การผลิตและตรวจสอบคุณภาพของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน

นางสาวภัทรติกรณ์ รักษ์ศักดิ์ศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF WASTE COOKING PALM OILS HAVING VARIOUS FREE FATTY ACID

Miss Pattikorn Raksaksri

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตและตรวจสอบคุณภาพของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน
โดย	นางสาวภัทรติกรณ์ รักษ์ศักดิ์ศรี
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยอนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กาญจนา กาญจนสุนทร)

ภัทรติกรณ์ รักษ์ศักดิ์ศรี : การผลิตและตรวจสอบคุณภาพของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน. (PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF WASTE COOKING PALM OILS HAVING VARIOUS FREE FATTY ACID) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร, 499 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มที่ผ่านการทอดพืชและสัตว์ที่มีผลต่อการผลิตและคุณภาพของไบโอดีเซล การทดลองได้สุ่มตัวอย่างน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระระหว่าง 0.427 ถึง 1.435% ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมัน และมีเมทานอลที่ปริมาณ 15 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของน้ำมัน โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 30 45 และ 60 องศาเซลเซียส ใช้เวลานาน 30 60 และ 120 นาที

จากการทดลอง พบว่า อิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพไบโอดีเซล คือ เมื่อปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) ในน้ำมันปาล์มเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) และร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ลดลง ในขณะที่อุณหภูมิและปริมาณเมทานอลที่ใช้ทดลอง เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ %FAME และ %Yield เพิ่มสูงขึ้น เช่นกัน แต่เวลาที่ใช้ในการทดลองที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ %FAME และ %Yield ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ทุกสภาวะการทดลอง

ที่ระดับกรดไขมันอิสระ 0.427% ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา30 นาที ในการผลิตไบโอดีเซล พบว่า (1) การใช้ปริมาณเมทานอลที่ 25 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของน้ำมัน ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จะให้ปริมาณเมทิลเอสเตอร์และร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์สูงสุด เท่ากับ 96.81 และ 97.30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ขณะที่ (2) การใช้ปริมาณเมทานอลที่ร้อยละ 15 โดยปริมาตรของน้ำมัน อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส จะให้ค่า%FAMEต่อบาทสูงสุด เท่ากับ 4.38

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2555 .....

5370653021: MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING
KEYWORDS: PRODUCTION / QUALITY / BIODIESEL / WASTE COOKING PALM OIL / METHYL ESTER

PATTIKORN RAKSAKSRI :PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF WASTE COOKING PALM OILS HAVING VARIOUS FREE FATTY ACID. ADVISOR : ASST. PROF.SOMCHAI PUAJINDANETR, Ph.D.,499 pp.

The objective of this research was to analyze the effect of free fatty acid concentration in waste cooking palm oil on the yield and quality of biodiesel. Waste cooking palm oils having various percentage of free fatty acid (%FFA) ranged between 0.427 to 1.435% by weight, were used to produce biodiesel via transesterification employing potassium hydroxide concentration of 1% by weight of the oil as catalyst and reacting with methanol ranging between 15, 25 and 50% by volume of the oil at the temperatures of 30, 45 and 60°C with the time of 30, 60 and 120 minutes. The percentage of yield and Fatty Acid Methyl Esters (%FAME) in product of biodiesel were characterized.

The results showed that free fatty acid concentration (%FFA) in waste cooking palm oil, reaction temperature and methanol could remarkably affect on yield and quality of biodiesel. Lower %FFA in waste cooking palm oil and higher methanol and reaction temperature could remarkably provide the higher percentages of FAME and Yield. The reaction times could slightly affect on %FAME and %Yield. Using 0.427%FFA in waste palm oil and 30 minutes of reaction time was found that (1) using the methanol of 25% with reaction temperature of 60°C gave the maximum %FAME and %Yield of 96.81 and 97.30 respectively, whereas (2) using the methanol of 15% with the temperature of 45°C provided the maximum %FAME per Baht of 4.38.

.

Department : Industrial Engineering Student's Signature .....
Field of Study : Industrial Engineering Advisor's Signature .....
Academic Year : 2012 .....

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่างๆ เกี่ยวกับแนวคิด วิธีการ ตลอดจนแนวทางในการแก้ปัญหาและอุปสรรคต่างๆ ที่เกิดขึ้น และตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในงานวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ บริษัทโรงงานแม่รวย จำกัดและร้านขายข้าวเหนียวไก่ทอด ณ โรงอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างน้ำมันปาล์มใช้แล้วมาใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องตรวจตัวอย่าง ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกเป็นอย่างดี รวมถึงเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ที่ให้การสนับสนุนและร่วมมือในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือ อุปกรณ์และสถานที่ในการทำงานวิจัยและเจ้าหน้าที่ผู้ดูแลห้องปฏิบัติการทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกในงานวิจัยเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสาทความรู้อันเป็นพื้นฐานสำคัญที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ตลอดจนบิดา มารดาและครอบครัวของผู้วิจัยที่ให้คำแนะนำและกำลังใจแก่ผู้วิจัยตลอดมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ซ
สารบัญรูป ..... ฌ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 12
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 12
1.4 ตัวชี้วัดในงานวิจัย 13
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 13
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 14
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 16
2.1 แนวคิดและทฤษฎี 16
2.1.1 ปาล์มน้ำมัน 17
2.1.2 อุตสาหกรรมจากน้ำมันปาล์ม 18
2.1.3 ไบโอดีเซล 36
2.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของไบโอดีเซล 43
2.1.5 กระบวนการการผลิตไบโอดีเซล 53
2.1.6 คุณสมบัติของไบโอดีเซล 57
2.1.7 การตรวจสอบและวิเคราะห์คุณภาพไบโอดีเซล 60
2.1.8 อุณหพลศาสตร์เคมี 65
2.1.9 การถ่ายเทความร้อน 68
2.1.10 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ 72
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 73

หน้า

2.2.1 กำหนดปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของไบโอดีเซล 78
2.2.2 การเลือกปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของน้ำมันไบโอดีเซล 83
2.2.3 การกำหนดปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของน้ำมันไบโอดีเซล 87
2.2.4 การคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อสิทธิภาพของน้ำมันไบโอดีเซล 95
2.2.5 การกำหนดระดับของปัจจัยสำหรับการทดลองเบื้องต้น 112
2.2.6 การกำหนดขอบเขตของปัจจัยเพื่อหาสภาวะในการผลิตไบโอดีเซล 113
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย 115
3.1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง 115
3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง 115
3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง 115
3.2 วิธีการทดลอง 117
3.3 การตรวจสอบประสิทธิภาพของไบโอดีเซล 119
3.3.1 ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ 119
3.3.2 ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ 120
3.4 การคำนวณค่าใช้จ่ายด้านวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในการทดลอง 121
3.4.1 ค่าใช้จ่ายด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง 134
3.4.2 ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง 134
3.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง 143
3.5.1 ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ 143
3.5.2 ร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเตอร์ 143
3.5.3 ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ 143
3.5.4 ร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเตอร์ต่อค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ 144
3.5.5 ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อพลังงานทั้งหมดที่ใช้ 146
3.5.6 ร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเตอร์ต่อพลังงานทั้งหมดที่ใช้ 146
3.6 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะที่ใช้ในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลกับปริมาณกรดไขมันอิสระที่แตกต่างกัน 147
3.7 วิเคราะห์โมเดลการทำนายประสิทธิภาพของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลอง 147

หน้า

3.8 สรุปขั้นตอนการศึกษาสภาวะที่ใช้ในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล.....147
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....149
4.1 ผลที่ได้ทางด้านประสิทธิภาพจากการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล 149
4.1.1 ปริมาณเมทิลเอสเตอร์.....149
4.1.2 ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์.....170
4.2 ค่าใช้จ่ายด้านวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในการทดลอง 191
4.2.1 ค่าใช้จ่ายโดยรวมด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง 191
4.2.2 ค่าใช้จ่ายโดยรวมด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง.....192
4.3 ผลที่ได้จากการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล.....204
4.3.1 ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้.....204
4.3.2 ร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเตอร์ต่อค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้.....223
4.3.3 ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อพลังงานทั้งหมดที่ใช้ 228
4.3.4 ร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเตอร์ต่อพลังงานทั้งหมดที่ใช้.....235
บทที่ 5 การอภิปรายผลการทดลอง.....242
5.1 การอภิปรายผลที่ได้จากการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล 242
5.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเมทิลเอสเตอร์กับปัจจัยที่ใช้ 242
5.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลผลิตของมทิลเอสเตอร์กับปัจจัยที่ใช้.....242
5.1.3 ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้.....242
5.1.4 ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ต่อค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ 243
5.1.5 ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อพลังงานที่ใช้รวมทั้งหมดในการทดลอง.....243
5.1.6 ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ต่อพลังงานที่ใช้รวมทั้งหมด.....243
5.2 การวิเคราะห์สภาวะการทดลองที่ในการผลิตไบโอดีเซล 244
5.2.1 สภาวะการทดลองที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซล 244
5.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลกับปริมาณกรดไขมันอิสระที่แตกต่างกัน.....249
5.2.3 โมเดลการทำนายประสิทธิภาพของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลอง.....262
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 276

หน้า

6.1 สรุปผลการทดลอง 276
6.1.1 อิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซล....276
6.1.2 สภาวะการทดลองที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซล 277
6.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลกับปริมาณกรดไขมันอิสระที่แตกต่างกัน....277
6.1.4 โมเดลการทำนายประสิทธิภาพของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลอง....277
6.2 ข้อเสนอแนะ 277
รายการอ้างอิง....279
ภาคผนวก....291
ภาคผนวก ก. 292
ภาคผนวก ข. 295
ภาคผนวก ค. 299
ภาคผนวก ง. 319
ภาคผนวก จ. 329
ภาคผนวก ฉ. 333
ภาคผนวก ช. 393
ภาคผนวก ซ. 423
ภาคผนวก ฌ. 483
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์....499

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1-1 การคาดการณ์ความต้องการพลังงานรวมที่ได้จากแหล่งพลังงานของโลก 1
ตารางที่ 1-2 จำนวนและร้อยละของประชากร จำแนกตามพื้นที่ พ.ศ. 2493 – 2573 2
ตารางที่ 1-3 การใช้น้ำมันสำเร็จรูปชนิดต่างๆ ของประเทศไทย ในช่วงปีพ.ศ. 2549 – 2552 ของสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงานน 3
ตารางที่ 1-4 ปริมาณการใช้น้ำมันดีเซลในประเทศในช่วงปี พ.ศ. 2549 – 2552 ของสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน 4
ตารางที่ 1-5 ปริมาณการจำหน่ายน้ำมันดีเซลหมุนเร็วบี 5ในช่วงปี พ.ศ. 2549 – 2552 ของสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน 5
ตารางที่ 1-6 ตัวแปรหรือสิ่งที่เป็นตัวกำหนดราคาซึ่งทำให้เกิดความผันผวนของราคาน้ำมันในตลาดโลกในช่วงเวลาต่างๆ 6
ตารางที่ 2-1 อุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งสามารถใช้ประโยชน์จากน้ำมันปาล์ม 18
ตารางที่ 2-2 สูตรโครงสร้างของลิพิดของกลีเซอไรด์ 20
ตารางที่ 2-3 องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มดิบ (Crude palm oil) 22
ตารางที่ 2-4 ปริมาณองค์ประกอบในน้ำมันปาล์มโดยการวิเคราะห์ Normal-phase HPLC เป็นเวลา 24 ชั่วโมง 23
ตารางที่ 2-5 ความแตกต่างระหว่างน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์ 25
ตารางที่ 2-6 การเปรียบเทียบชนิดของกรดไขมัน (Fatty acids) 26
ตารางที่ 2-7 ชื่อและโครงสร้างทางเคมีของกรดไขมันในน้ำมันปาล์ม 29
ตารางที่ 2-8 คุณสมบัติหลักที่สำคัญของน้ำมันปาล์ม 30
ตารางที่ 2-9 ปริมาณและจุดหลอมเหลวของกรดไขมันองค์ประกอบในน้ำมันต่างๆ 30
ตารางที่ 2-10 ชนิดของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันปาล์มดิบ น้ำมันปาล์มจากเนื้อปาล์มและน้ำมันปาล์มจากเมล็ดปาล์ม ด้านปริมาณและจุดหลอมเหลวของกรดไขมันองค์ประกอบในน้ำมันต่างๆ 31
ตารางที่ 2-11 คุณสมบัติและปริมาณกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันบริสุทธิ์และน้ำมันที่ผ่านการใช้แล้ว 32
ตารางที่ 2-12 อุณหภูมิที่เป็นควันของไขมันและน้ำมันชนิดต่างๆ 35
ตารางที่ 2-13 สรุปข้อดีและข้อเสียของการใช้น้ำมันพืชเสมือนเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล 37

หน้า

ตารางที่ 2-14 คุณสมบัติของไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล 38
ตารางที่ 2-15 เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลทั้ง 3 กระบวนการ 39
ตารางที่ 2-16 เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลในเชิงพาณิชย์ทั้ง 2 แบบ 42
ตารางที่ 2-17 การเปรียบเทียบความแตกต่างของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด เบส กรดและเอนไซม์ ... 45
ตารางที่ 2-18 การเปรียบเทียบอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันตั้งต้นเมื่ออยู่ในรูปของหน่วยเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและปริมาตรของน้ำมันปาล์ม 49
ตารางที่ 2-19 การเปรียบเทียบความแตกต่างของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด เบส กรดและเอนไซม์การเปรียบเทียบกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลของประเทศสหรัฐอเมริกา และการกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมันของประเทศไทย 58
ตารางที่ 2-20 การเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์กรดไขมันอิสระด้วยการไตเตรททั้งวิธี Manual และด้วยเครื่องไตเตรทอัตโนมัติ 62
ตารางที่ 2-21 ขอบเขตของปัจจัยที่ใช้ในเพื่อหาสภาวะเหมาะสมในการทดลอง 78
ตารางที่ 2-22 ปัจจัยที่ถูกควบคุมในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล 79
ตารางที่ 2-23 แผนการทดลอง (Experimental Plan) สำหรับการทดลองในงานวิจัย 81
ตารางที่ 2-24 ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ได้ในการผลิตไบโอดีเซล 85
ตารางที่ 2-25 เหตุผลที่ไม่เลือกปัจจัยต่าง ๆ เบื้องต้น 86
ตารางที่ 2-26 งานวิจัยที่น่าสนใจทั้ง 30 รายการและมีการศึกษาที่เกี่ยวกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล 96
ตารางที่ 2-27 ผลการเก็บรวบรวมข้อมูลผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่องานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล 103
ตารางที่ 2-28 ปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการทดลองเบื้องต้น 112
ตารางที่ 2-29 ขอบเขตของปัจจัยที่ใช้เพื่อหาสภาวะเหมาะสมในการทดลอง 113
ตารางที่ 3-1 ตัวแปรต่างๆ ใน Mass Balance Equationsเพื่อคำนวณหาปริมาณของผลผลิตที่ได้ในแต่ละขั้นตอน (สำหรับ 1 Batchการทดลอง) 123
ตารางที่ 3-2 สัญลักษณ์สำหรับแทนเพื่อคำนวณหาพลังงานความร้อนที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน (สำหรับ 1 Batchการทดลอง) 131

หน้า

ตารางที่ 3-3 รายละเอียดของ Mass และ Energy ในแต่ละขั้นตอนเพื่อหาปริมาณวัตถุดิบและพลังงานความร้อนที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล 132
ตารางที่ 3-4 การพิจาณาขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์หาค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด 133
ตารางที่ 3-5 สัญลักษณ์ที่ถูกกำหนดในสมการเพื่อคำนวณค่าใช้จ่ายรวมที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลต่อ1 Batchการทดลอง (300 ml.)ทั้งทางด้านวัตถุดิบทางตรงและด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง 137
ตารางที่ 4-1 ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)ที่ได้จากกระบวนการทดลองในแต่ละสภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดอิสระ (%FFA) ที่แตกต่างกันทั้ง 4 ระดับเป็นสารตั้งต้น 150
ตารางที่ 4-2 ผลการศึกษาความแตกต่างระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) ในน้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้นกับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)ที่ได้จากการทดลอง (พิจารณาจากค่าเฉลี่ย) สำหรับทุกสภาวะการทดลอง 156
ตารางที่ 4-3 เปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA)กับ %FAME ที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกันในแต่ละสภาวะ 158
ตารางที่ 4-4 กราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA)กับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)สำหรับสภาวะการทดลอง โดยใช้ปริมาณเมทานอลในการทำปฏิกิริยา 50%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์มใช้แล้วและทั้ง 3 ช่วงเวลา ที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกัน 159
ตารางที่ 4-5 ปริมาณเมทิลเอสเตอร์สูงสุดที่ได้จากการทดลองในแต่ละระดับอุณหภูมิ 160
ตารางที่ 4-6 เปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA)กับ %FAME โดยช่วงเวลาที่ใช้ทำการทดลองต่างกันในแต่ละสภาวะปริมาณเมทิลเอสเตอร์สูงสุดที่ได้จากการทดลองในแต่ละระดับอุณหภูมิ 162
ตารางที่ 4-7 เปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) กับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) โดยใช้ปริมาณเมทานอลในการทำปฏิกิริยา 50%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์มใช้แล้วและทั้ง 3 ระดับอุณหภูมิ แต่ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน 163
ตารางที่ 4-8 ปริมาณเมทิลเอสเตอร์สูงสุดที่ได้จากการทดลองในแต่ละช่วงระยะเวลา 165

หน้า

ตารางที่ 4-9 เปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA) กับ%FAMEที่ปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกันปริมาณ เมทิลเอสเตอร์สูงสุดที่ได้จากการทดลองในแต่ละระดับอุณหภูมิ 166
ตารางที่ 4-10 เปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA)กับ ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) โดยเวลาที่ในการทดลอง 120 นาที สำหรับทั้ง 3 ระดับอุณหภูมิ แต่ใช้ปริมาณเมทานอลในการทำปฏิกิริยา ที่แตกต่างกัน 167
ตารางที่ 4-11 ปริมาณเมทิลเอสเตอร์สูงสุดที่ได้จากการทดลองในแต่ละระดับเมทานอล 169
ตารางที่ 4-12 ปริมาณเมทิลเอสเตอร์สูงสุดที่ได้จากการทดลอง 3 อันดับแรก..... 169
ตารางที่ 4-13 ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)ที่ได้จากกระบวนการทดลอง ในแต่ละสภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มี ปริมาณกรดอิสระ (%FFA) ที่แตกต่างกันทั้ง 4 ระดับเป็นสารตั้งต้น..... 171
ตารางที่ 4-14 ผลการศึกษาความแตกต่างระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) ในน้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้นกับร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ได้จากการทดลอง สำหรับทุกสภาวะการทดลอง 177
ตารางที่ 4-15 เปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA) กับ %Yield ที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกันในแต่ละสภาวะ..... 179
ตารางที่ 4-16 เปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA)กับ ร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) สำหรับสภาวะการทดลอง โดยใช้ ปริมาณเมทานอลในการทำปฏิกิริยา 50%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์มใช้ แล้วและทั้ง 3 ช่วงเวลา ที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกัน 180
ตารางที่ 4-17 ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์สูงสุดที่ได้ ในแต่ละระดับอุณหภูมิ 181
ตารางที่ 4-18 เปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA) กับ %Yield โดยเวลาที่ใช้ทำการทดลองต่างกันในแต่ละสภาวะ..... 183

หน้า

ตารางที่ 4-19 เปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA)กับ ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) โดยใช้ปริมาณเมทานอลในการทำปฏิกิริยา 50%โดย ปริมาตรของน้ำมันปาล์มใช้แล้วทั้ง 3 ระดับอุณหภูมิแต่ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน 184
ตารางที่ 4-20 ร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเตอร์สูงสุดที่ได้จากการทดลองในแต่ละช่วงเวลา 186
ตารางที่ 4-21 เปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA)กับ %Yield โดยปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกัน 187
ตารางที่ 4-22 เปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA)กับ ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) โดยเวลาที่ในการทดลอง 120 นาที สำหรับทั้ง 3 ระดับอุณหภูมิ แต่ใช้ปริมาณเมทานอลในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน 188
ตารางที่ 4-23 ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์สูงสุด ที่ได้จากการทดลองในแต่ละระดับของปริมาณเมทานอลที่ใช้สำหรับการทดลอง 190
ตารางที่ 4-24 ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์สูงสุดที่ได้จากการทดลอง 3 อันดับแรก 190
ตารางที่ 4-25 อิทธิพลแนวโน้มของปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของไบโอดีเซล 191
ตารางที่ 4-26 ค่าใช้จ่ายโดยรวมที่ใช้ในการทดลองโดยคิดเป็นสัดส่วนในแต่ละด้าน 192
ตารางที่ 4-27 ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการทดลองสำหรับค่าใช้จ่ายโดยรวมในแต่ละด้าน 196
ตารางที่ 4-28 ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลต่อ 1Batch การทดลอง (300 ml.) และประสิทธิภาพของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองในแต่ละสภาวะ 197
ตารางที่ 4-29 สรุปผลการกระจายของข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการคำนวณหาค่าใช้จ่ายรวม 203
ตารางที่ 4-30 ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (ค่า%FAMEต่อบาท) ที่ได้จากการทดลอง 204
ตารางที่ 4-31 เปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA) กับ %FAME ต่อบาท สำหรับสภาวะการทดลอง โดยใช้เวลาและปริมาณเมทานอลในการทำปฏิกิริยาคงที่ แต่ศึกษาที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกัน 208
ตารางที่ 4-32 %FAME ต่อบาทสูงสุดที่ได้จากการทดลองในแต่ละระดับของอุณหภูมิ 212

หน้า

ตารางที่ 4-33 เปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA) กับ%FAME ต่อบาท สำหรับสภาวะการทดลอง โดยใช้อุณหภูมิและปริมาณเมทานอลในการทำปฏิกิริยาคงที่ แต่ศึกษาที่ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกัน 213
ตารางที่ 4-34 %FAME ต่อบาทสูงสุดที่ได้จากการทดลองในแต่ละช่วงเวลาที่ใช้ 217
ตารางที่ 4-35 เปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA) กับ%FAME ต่อบาท สำหรับสภาวะการทดลอง โดยใช้อุณหภูมิและเวลาคงที่ แต่ศึกษาที่ระดับปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกันร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์สูงสุดที่ได้ ในแต่ละระดับอุณหภูมิ 218
ตารางที่ 4-36 %FAME ต่อบาทสูงสุดที่ได้ ในแต่ละระดับปริมาณเมทานอลที่ใช้ทดลอง 222
ตารางที่ 4-37 %FAME ต่อบาทสูงสุดที่ได้ สำหรับทุกสภาวะการทดลอง 222
ตารางที่ 4-38 ร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (ค่า%Yield ต่อบาท) ที่ได้ 223
ตารางที่ 4-39 %Yield ต่อบาทสูงสุดที่ได้ ในแต่ละระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง 228
ตารางที่ 4-40 %Yield ต่อบาทสูงสุดที่ได้ สำหรับทุกสภาวะการทดลอง 228
ตารางที่ 4-41 ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อกิโลจูล (%FAMEต่อกิโลจูล) ที่ได้จากการผลิต 229
ตารางที่ 4-42 %FAME ต่อกิโลจูลสูงสุดที่ได้ ในแต่ละระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง 234
ตารางที่ 4-43 %Yield ต่อบาทสูงสุดที่ได้ สำหรับทุกสภาวะการทดลอง 234
ตารางที่ 4-44 ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ต่อกิโลจูลที่ผลิตได้ 235
ตารางที่ 4-45 %Yield ต่อกิโลจูลสูงสุดที่ได้ ในแต่ละระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง 240
ตารางที่ 4-46 %Yield ต่อกิโลจูลสูงสุดที่ได้ สำหรับทุกสภาวะการทดลอง 240
ตารางที่ 4-47 แนวโน้มของ %FAME ต่อบาท %Yield ต่อบาท %FAME ต่อกิโลจูล และ %Yield ต่อกิโลจูลกับปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของไบโอดีเซล%Yield ต่อกิโลจูลสูงสุดที่ได้ สำหรับทุกสภาวะการทดลอง 241
ตารางที่ 5-1 การพิจารณาเลือกสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้ว ซึ่งมีระดับกรดไขมันอิสระ (%FFA)แตกต่างกัน สำหรับการพิจารณาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)และร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) สูงสุด 245

หน้า

ตารางที่ 5-2 การพิจารณาเลือกสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้ว ซึ่งมีระดับกรดไขมันอิสระ (%FFA)แตกต่างกัน สำหรับการพิจารณาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (%FAME ต่อบาท) สูงสุด 246
ตารางที่ 5-3 การพิจารณาเลือกสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้ว ซึ่งมีระดับกรดไขมันอิสระ (%FFA)แตกต่างกัน สำหรับการพิจารณาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อบาทหรือ %FAME ต่อบาท สูงสุด ที่ระดับอุณหภูมิต่ำ 248
ตารางที่ 5-4 การสรุปสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล 249
ตารางที่ 5-5 ผลการทดลองที่ได้ ณ สภาวะการทดลองที่ระดับกรดไขมันอิสระ 0.427 %FFA และเวลาที่ใช้ 30 นาที แต่มีระดับของอุณหภูมิและปริมาณเมทานอลที่ใช้แตกต่างกัน 260
ตารางที่ 5-6 สมการหรือโมเดลการทำนายประสิทธิภาพที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซล 271
ตารางที่ 5-7 การเปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับค่าที่ได้จากการทำนายจากโมเดลการทำนายโดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่แตกต่าง 275
ตารางที่ ค-1 การคำนวณปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 0.427%FFAเป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.) 299
ตารางที่ ค-2 การคำนวณปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 0.427%FFAเป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.) 302
ตารางที่ ค-3 การคำนวณปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 0.512%FFAเป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.) 305
ตารางที่ ค-4 การคำนวณปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 0.512%FFAเป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.) 307
ตารางที่ ค-5 การคำนวณปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 0.630%FFAเป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.) 309
ตารางที่ ค-6 การคำนวณปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 0.630%FFAเป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.) 311

หน้า

ตารางที่ ค-7 การคำนวณปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 1.435%FFAเป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.) 313
ตารางที่ ค-8 การคำนวณปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 1.435%FFAเป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.) 316
ตารางที่ ง-1 การคำนวณร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น 319
ตารางที่ ง-2 การคำนวณร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น 322
ตารางที่ ง-3 การคำนวณร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น 324
ตารางที่ ง-4 การคำนวณร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น 326
ตารางที่ จ-1 ค่าความหนาแน่นของน้ำมันปาล์มใช้แล้วซึ่งมีกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน 329
ตารางที่ ฉ-1 การหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1-3 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.) 333
ตารางที่ ฉ-2 การหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1-3 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.) 336
ตารางที่ ฉ-3 การหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1-3 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.) 339
ตารางที่ ฉ-4 การหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1-3 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.) 341

หน้า

ตารางที่ ฉ-5 การหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1-3 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.) 343
ตารางที่ ฉ-6 การหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1-3 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.) 345
ตารางที่ ฉ-7 การหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1-3 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.) 347
ตารางที่ ฉ-8 การหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1-3 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.) 350
ตารางที่ ฉ-9 การหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 4 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.)ร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (ค่า%Yieldต่อบาท) ที่ได้ 353
ตารางที่ ฉ-10 การหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 4 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.)ร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (ค่า%Yieldต่อบาท) ที่ได้ 356
ตารางที่ ฉ-11 การหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 4 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.)ร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (ค่า%Yieldต่อบาท) ที่ได้ 359
ตารางที่ ฉ-12 การหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 4 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.)ร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (ค่า%Yieldต่อบาท) ที่ได้ 361

หน้า

ตารางที่ ฉ-13 การหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 4 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.)ร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (ค่า%Yieldต่อบาท) ที่ได้ 363

ตารางที่ ฉ-14 การหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 4 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.)ร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (ค่า%Yieldต่อบาท) ที่ได้ 364

ตารางที่ ฉ-15 การหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 4 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.)ร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (ค่า%Yieldต่อบาท) ที่ได้ 367

ตารางที่ ฉ-16 การหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 4 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.)ร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (ค่า%Yieldต่อบาท) ที่ได้ 369

ตารางที่ ฉ-17 การหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 5-6 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.) 373

ตารางที่ ฉ-18 การหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 5-6 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.) 376

ตารางที่ ฉ-19 การหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 5-6 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.) 379

ตารางที่ ฉ-20 การหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 5-6 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.) 381

หน้า

ตารางที่ ฉ-21 การหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 5-6 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.) 383
ตารางที่ ฉ-22 การหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 5-6 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.) 385
ตารางที่ ฉ-23 การหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 5-6 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.) 387
ตารางที่ ฉ-24 การหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 5-6 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.) 390
ตารางที่ ช-1 ค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลองซึ่งใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.427%FFA เป็นสารตั้งต้นค่าความหนาแน่นของน้ำมันปาล์มใช้แล้วซึ่งมีกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน..... 393
ตารางที่ ช-2 ค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลองซึ่งใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.512%FFA เป็นสารตั้งต้นค่าความหนาแน่นของน้ำมันปาล์มใช้แล้วซึ่งมีกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน..... 399
ตารางที่ ช-3 ค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลองซึ่งใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.630%FFA เป็นสารตั้งต้นค่าความหนาแน่นของน้ำมันปาล์มใช้แล้วซึ่งมีกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน..... 403
ตารางที่ ช-4 ค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลองซึ่งใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ1.435%FFA เป็นสารตั้งต้นค่าความหนาแน่นของน้ำมันปาล์มใช้แล้วซึ่งมีกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน..... 407
ตารางที่ ช-5 ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ 1 Batch การทดลอง) สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น 413

หน้า

ตารางที่ ซ-6 ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ 1 Batch การทดลอง) สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น 416
ตารางที่ ซ-7 ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ 1 Batch การทดลอง) สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น 418
ตารางที่ ซ-8 ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ 1 Batch การทดลอง) สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น 420
ตารางที่ ซ-1 ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (STEP 2)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้นการสรุปสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล 423
ตารางที่ ซ-2 ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (STEP 2)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้นการสรุปสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล 425
ตารางที่ ซ-3 ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (STEP 2)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้นการสรุปสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล 428
ตารางที่ ซ-4 ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (STEP 2)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ1.435%FFA เป็นสารตั้งต้นการสรุปสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล 430
ตารางที่ ซ-5 ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (STEP 3)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้นการสรุปสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล 432
ตารางที่ ซ-6 ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (STEP 3)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้นการสรุปสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล 436

หน้า

ตารางที่ ซ-7 ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (STEP 3)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้นการสรุปสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล 438
ตารางที่ ซ-8 ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (STEP 3)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ1.435%FFA เป็นสารตั้งต้นการสรุปสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล 440
ตารางที่ ซ-9 ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (STEP 4)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้นการสรุปสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล 443
ตารางที่ ซ-10 ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (STEP 4)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้นการสรุปสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล 446
ตารางที่ ซ-11 ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (STEP 4)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้นการสรุปสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล 448
ตารางที่ ซ-12 ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (STEP 4)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ1.435%FFA เป็นสารตั้งต้นการสรุปสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล 450
ตารางที่ ซ-13 ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (STEP 6)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้นการสรุปสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล 453
ตารางที่ ซ-14 ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (STEP 6)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้นการสรุปสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล 456
ตารางที่ ซ-15 ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (STEP 6)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้นการสรุปสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล 458

หน้า

ตารางที่ ซ-16 ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (STEP 6)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ1.435%FFA เป็นสารตั้งต้นการสรุปสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล 460
ตารางที่ ซ-17 ปริมาณพลังงานที่ใช้รวมทั้งหมดในการทดลอง และพลังงานรวมเฉพาะ STEP ที่ 3 และ 4 สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น 463
ตารางที่ ซ-18 ปริมาณพลังงานที่ใช้รวมทั้งหมดในการทดลอง และพลังงานรวมเฉพาะ STEP ที่ 3 และ 4 สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น 466
ตารางที่ ซ-19 ปริมาณพลังงานที่ใช้รวมทั้งหมดในการทดลอง และพลังงานรวมเฉพาะ STEP ที่ 3 และ 4 สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น 468
ตารางที่ ซ-20 ปริมาณพลังงานที่ใช้รวมทั้งหมดในการทดลอง และพลังงานรวมเฉพาะ STEP ที่ 3 และ 4 สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น 470
ตารางที่ ซ-21 ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดด้านพลังงานที่ใช้และค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้นค่า 473
ตารางที่ ซ-22 ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดด้านพลังงานที่ใช้และค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้นค่า 476
ตารางที่ ซ-23 ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดด้านพลังงานที่ใช้และค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้นค่า 478
ตารางที่ ซ-24 ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดด้านพลังงานที่ใช้และค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้นค่า 480

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1-1 แผนภูมิความผันผวนของราคาน้ำมันในตลาดโลก 6
รูปที่ 1-2 ราคาน้ำมันขายปลีก กทม.และปริมณฑล บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน)ในช่วง ปี ม.ค. 2553 - มี.ค. 2555 7
รูปที่ 2-1 ส่วนประกอบหลักของน้ำมันและไขมันที่ใช้เป็นอาหารโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ 21
รูปที่ 2-2 โครงสร้างโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ 22
รูปที่ 2-3 โครมาโตรกราฟ (Chromatogram) วิเคราะห์แยกองค์ประกอบต่างๆ 22
รูปที่ 2-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไตรกลีเซอไรด์กับปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มใช้แล้วเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 23
รูปที่ 2-5 โครงสร้างของกรดปาล์มิติก มี C 16 ตัวสายไฮโดรคาร์บอนเป็นพันธะเดี่ยว 27
รูปที่ 2-6 โครงสร้างของกรดโอเลอิก 28
รูปที่ 2-7 โครงสร้างกรดลิโนเลอิก มีพันธะคู่ 2 คู่ 28
รูปที่ 2-8 โครงสร้างกรดลิโนเลนิก มีพันธะคู่ 3 คู่ 28
รูปที่ 2-9 การเกิดกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid) 33
รูปที่ 2-10 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซีลของไตรกลีเซอไรด์ 33
รูปที่ 2-11 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิด 34
รูปที่ 2-12 รูปแบบของแต่ละองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มดิบเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซีล 34
รูปที่ 2-13 องค์ประกอบของกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil) 35
รูปที่ 2-14 โครงสร้างโมกุลไบโอดีเซล 36
รูปที่ 2-15 ปฏิกิริยาเอสเตอร์และปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน 41
รูปที่ 2-16 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน ทั้ง 3 ขั้นตอน 41
รูปที่ 2-17 กลไกปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในน้ำมันพืช 44
รูปที่ 2-18 กลไกปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในน้ำมันพืช 45
รูปที่ 2-19 ปฏิกิริยาการเกิดสบู่ (Saponification) 46
รูปที่ 2-20 ปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน 47
รูปที่ 2-21 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อเมทิลเอสเตอร์และไตรกลีเซอไรด์ 48
รูปที่ 2-22 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกลีเซอไรด์เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเปลี่ยน 52
รูปที่ 2-23 แผนภาพแสดงกระบวนการผลิตไบโอดีเซล 53

หน้า

รูปที่ 2-24 แผนภาพแสดงการเตรียมและปรับสภาพน้ำมัน 54
รูปที่ 2-25 องค์ประกอบของเครื่อง Gas Chromatography (GC)..... 60
รูปที่ 2-26 เครื่องไตเตรทอัตโนมัติ (Automatic Titrator) รุ่น Entry Level..... 61
รูปที่ 2-27 การเปลี่ยนแปลงของกระบวนการ (process) 66
รูปที่ 2-28 กระบวนการคายความร้อน(ExothermicProcess)..... 70
รูปที่ 2-29 กระบวนการดูดกลืนความร้อน(EndothermicProcess) 71
รูปที่ 2-30 แผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram)..... 84
รูปที่ 2-31 แผนผังก้างปลาเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อ %FAMEที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซล..... 86
รูปที่ 2-32 แผนผังก้างปลาแสดงปัจจัยที่มีผลต่อ%FAMEที่ผ่านการพิจารณาเลือกใน
เบื้องต้นแผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram)..... 94
รูปที่ 2-33 แผนภูมิพาเรโตของตัวเลขแสดงถึงปัจจัยที่มีผลจากงานวิจัยในอดีต..... 109
รูปที่ 3-1 การสรุปขั้นตอนกระบวนการผลิตไบโอดีเซลเป็น Process Flow Chart 118
รูปที่ 3-2 Mass Balance สำหรับขั้นตอน Pretreatment Process (I) (STEP 1) 125
รูปที่ 3-3 Mass Balance สำหรับขั้นตอน Pretreatment Process (II) (STEP 2) 125
รูปที่ 3-4 Mass Balance สำหรับขั้นตอนReaction Process (I) (STEP 3))..... 126
รูปที่ 3-5 Mass Balance สำหรับขั้นตอน**Reaction Process (II)(STEP 4)** 126
รูปที่ 3-6 Mass Balance สำหรับขั้นตอนการไขแยกกลีเซอรอลใน STEP 4 127
รูปที่ 3-7 Mass Balance สำหรับหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่เหลือหลังจากการไขแยก 127
รูปที่ 3-8 Mass Balance สำหรับขั้นตอน Water Washing Process (STEP 5)..... 128
รูปที่ 3-9 Mass Balance สำหรับการหาปริมาณน้ำกลั่นที่ปะปนรวมกับเมทิล
เอสเตอร์ในกระบวนการล้างน้ำ 128
รูปที่ 3-10 Mass Balance สำหรับการหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่สูญหายไป
ระหว่างกระบวนการล้างน้ำ 129
รูปที่ 3-11 Mass Balance สำหรับขั้นตอนการต้มไล่น้ำDrying Process (STEP 6) 129
รูปที่ 3-12 ขั้นตอนการทำการทดลองเพื่อศึกษาสภาวะที่ใช้ในกระบวนการผลิต
ไบโอดีเซลเพื่อนำไปสู่การศึกษาประสิทธิภาพของไบโอดีเซลจากการทดลอง 148

หน้า

รูปที่ 5-1 เปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ของ %FAME, %Yield และ %FAME ต่อบาท ที่ได้จากการทดลองที่ระดับอุณหภูมิ 60°C, เวลา 30 นาที และเมทานอล 25% โดยปริมาตรของน้ำมัน 250

รูปที่ 5-2 เปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ของ %FAME, %Yield และ %FAME ต่อบาท ที่ได้จากการทดลองที่ระดับอุณหภูมิ 45 °C เวลา 30 นาที และเมทานอล 15% โดยปริมาตรของน้ำมัน 250

รูปที่ 5-3 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของ %FAME, %Yield และ %FAME ต่อบาท ที่ได้จากการทดลองที่ระดับอุณหภูมิ 30 °C เวลา 60 นาที และเมทานอล 15% โดยปริมาตรของน้ำมัน 251

รูปที่ 5-4 Probability Plot ของ %FAME สำหรับการทดลองที่ใช้เมทานอล 15% โดยปริมาตรน้ำมันปาล์มใช้แล้ว เมื่อใช้เวลา 30 นาที 253

รูปที่ 5-5 Probability Plot ของ %FAME สำหรับการทดลองที่ใช้เมทานอล 15% โดยปริมาตรน้ำมันปาล์มใช้แล้ว เมื่อใช้เวลา 60 นาที 254

รูปที่ 5-6 Residual Plots for Response ของ %FAME สำหรับการทดลองที่ใช้เมทานอล 25% โดยปริมาตรน้ำมันปาล์มใช้แล้ว เมื่อใช้เวลา 30, 60 และ 120 นาที 256

รูปที่ 5-7 Probability Plot ของ %FAME สำหรับการทดลองที่ใช้เมทานอล 25% โดยปริมาตรน้ำมันปาล์มใช้แล้ว เมื่อใช้เวลา 30 นาที 257

รูปที่ 5-8 Probability Plot ของ %FAME สำหรับการทดลองที่ใช้เมทานอล 25% โดยปริมาตรน้ำมันปาล์มใช้แล้ว เมื่อใช้เวลา 60 นาที 258

รูปที่ 5-9 Probability Plot ของ %FAME สำหรับการทดลองที่ใช้เมทานอล 25% โดยปริมาตรน้ำมันปาล์มใช้แล้ว เมื่อใช้เวลา 120 นาที 259

รูปที่ 5-10 ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้จากการทดลอง ณ สภาวะที่ระดับกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA ที่เวลา 30 นาที แต่มีระดับของอุณหภูมิและปริมาณเมทานอลที่ใช้แตกต่างกัน 260

รูปที่ 5-11 %FAME ต่อบาท ที่ได้จากการทดลอง ณ สภาวะที่ระดับกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA ที่เวลา 30 นาที แต่มีระดับของอุณหภูมิและปริมาณเมทานอลที่ใช้แตกต่างกัน 261

หน้า

รูปที่ 5-12 Residual Plots for Response ของ %FAME กับ %FFA สำหรับการทดลองที่เวลา 30 นาที แต่ที่ระดับอุณหภูมิ ปริมาณเมทานอลและที่ระดับกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน 266
รูปที่ 5-13 Residual Plots for Response ของ %Yield กับ %FFA สำหรับการทดลองที่เวลา 30 นาที แต่ที่ระดับอุณหภูมิ ปริมาณเมทานอลและที่ระดับกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน 268
รูปที่ 5-14 Residual Plots for Response ของ %FAME ต่อบาท กับ %FFA สำหรับการทดลองที่เวลา 30 นาที แต่ที่ระดับอุณหภูมิ ปริมาณเมทานอลและที่ระดับกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน 271
รูปที่ 5-15 3D Surface Plot ระหว่าง %FAME กับปัจจัยที่เกี่ยวข้อง (ก.) %FFA กับอุณหภูมิ (ข.) %FFA กับเมทานอล และ (ค.) อุณหภูมิกับเมทานอล โดยใช้ Multiple Linear Regression 272
รูปที่ 5-16 3D Surface Plot ระหว่าง %Yield กับปัจจัยที่เกี่ยวข้อง (ก.) %FFA กับอุณหภูมิ (ข.) %FFA กับเมทานอล และ (ค.) อุณหภูมิกับเมทานอล โดยใช้ Multiple Linear Regression 273
รูปที่ 5-17 3D Surface Plot ระหว่าง %FAME กับปัจจัยที่เกี่ยวข้อง (ก.) %FFA กับอุณหภูมิ (ข.) %FFA กับเมทานอล และ (ค.) อุณหภูมิกับเมทานอล โดยใช้ Multiple Linear Regression 274
รูปที่ 6-1 การแยกชั้นของกรีเซอรอลที่สภาวนะการทดลอง 60°C 278
รูปที่ 6-2 การแยกชั้นของกรีเซอรอลที่สภาวนะการทดลอง 30°C 278
รูปที่ ก-1 การติดตั้งสำหรับเครื่องโครมาโทกราฟี 292
รูปที่ ข-1 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเตอร์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันโดยใช้น้ำมันปาล์มที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFAเป็นสารตั้งต้น 295
รูปที่ ข-2 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเตอร์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันโดยใช้น้ำมันปาล์มที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFAเป็นสารตั้งต้น 296

หน้า

รูปที่ ข-3 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเตอร์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันโดยใช้น้ำมันปาล์มที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFAเป็นสารตั้งต้น 297
รูปที่ ข-4 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเตอร์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันโดยใช้น้ำมันปาล์มที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFAเป็นสารตั้งต้น 298
รูปที่ ฌ-1 Probability Plot มวลของน้ำมันปาล์มใช้แล้วเริ่มต้นในการทำปฏิกิริยา 484
รูปที่ ฌ-2 Probability Plot มวลของน้ำมันปาล์มใช้แล้วเริ่มต้นที่ใช้ในการกรองแยก 485
รูปที่ ฌ-3 Probability Plot มวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา..... 486
รูปที่ ฌ-4 Probability Plot ของปริมาตรน้ำกลั่นที่ใช้ในกระบวนการล้างเมทิลเอสเตอร์..... 487
รูปที่ ฌ-5 Probability Plot สำหรับพลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 2..... 488
รูปที่ ฌ-6 Probability Plot สำหรับค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลองใน STEP 2 489
รูปที่ ฌ-7 Probability Plot ของพลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 3 ณ อุณหภูมิ 60°C 490
รูปที่ ฌ-8 Probability Plot ของพลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 3 ณ อุณหภูมิ 45°C 491
รูปที่ ฌ-9 Probability Plot ของพลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 3 ณ อุณหภูมิ 30°C 492
รูปที่ ฌ-10 Probability Plotมวลของสารตั้งต้นในขั้นตอนที่ 4 ณ ระดับเมทานอล 15%v/v 494

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ทุกวันนี้ประเทศไทยประสบปัญหาราคาน้ำมันปิโตรเลียมที่ปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องและไม่มีท่าทีว่าจะลดลง รวมทั้งความต้องการการใช้พลังงานจากปิโตรเลียมที่มากขึ้น ซึ่งส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นสาเหตุทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Greenhouse Effect) เป็นต้น ดังนั้น การแสวงหาแหล่งเชื้อเพลิงที่สามารถทดแทนปิโตรเลียมได้เป็นแหล่งพลังงานที่ยั่งยืนและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่น้อยลง จึงเป็นสิ่งที่มนุษย์ควรตระหนักและใส่ใจมากขึ้นในปัจจุบัน

ความต้องการของพลังงานโลก ซึ่งความต้องการพลังงานเพื่อการดำรงชีวิตของประชากรโลกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว พร้อมๆ กับเพิ่มของประชากรโลก พลังงานที่มนุษย์ใช้อยู่ทุกวันนี้ได้จากแหล่งต่างๆ ทั้งที่เป็นทรัพยากรที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ถ่านหิน น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ รวมทั้งสิ่งที่มนุษย์สังเคราะห์หรือประดิษฐ์คิดค้นขึ้น เช่น พลังงานนิวเคลียร์ เป็นต้น ซึ่งแสดงให้เห็นการคาดการณ์ของปริมาณความต้องการพลังงานของโลกจากแหล่งพลังงานต่างๆ ระหว่าง พ.ศ. 2523 –2573 ดังนี้

ตารางที่ 1-1 แสดงการคาดการณ์ความต้องการพลังงานรวมที่ได้จากแหล่งพลังงานของโลก [1]

หน่วย : เทียบเท่าล้านตันน้ำมันดิบ

แหล่งพลังงาน	ปีที่คาดการณ์				
	2523	2547	2553	2558	2573
ถ่านหิน	1,785	2,773	3,354	3,666	4,441
น้ำมัน	3,107	3,940	4,366	4,750	5,575
ก๊าซธรรมชาติ	1,237	2,302	2,686	3,017	3,896
นิวเคลียร์	186	714	775	810	861
พลังน้ำ	148	242	280	317	408
ชีวมวลและขยะ	765	1,176	1,283	1,375	1,645
แหล่งพลังงานหมุนเวียนอื่นๆ*	33	57	99	136	296
รวม	**7,261**	**11,204**	**12,843**	**14,071**	**17,122**

* หมายถึง พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานความร้อนใต้พิภพ

ที่มา : *World Energy Outlook 2006 (พ.ศ.2546)*

จากตารางที่ 1-1 พบว่า หากการคาดการณ์ดังกล่าวถูกต้อง ปริมาณความต้องการพลังงานรวมของโลกจะเพิ่มขึ้นถึงกว่าร้อยละ 135 ในช่วงเวลา 50 ปี (พ.ศ. 2523 - 2573) หรือเพิ่มขึ้นเฉลี่ยมากกว่าร้อยละ 27 ในทุกๆ 10 ปี

ตารางที่ 1-2 แสดงจำนวนและร้อยละของประชากร จำแนกตามพื้นที่ พ.ศ. 2493 – 2573 [2]

พื้นที่	2493	2503	2513	2523	2533	2543	2553	2563	2573
จำนวนประชากร (ล้านคน)									
โลก	2,518.6	3,021.5	3,692.5	4,434.6	5,263.5	6,070.5	6,830.1	7,540.2	8,130.1
เอเชีย	1,395.5	1,701.3	2,143.1	2,632.3	3,167.8	3,679.7	4,148.9	4,570.1	4,886.6
แอฟริกา	221.2	277.4	357.3	469.6	622.4	795.7	984.2	1,187.6	1,398.0
ยุโรป	547.4	604.4	655.9	692.4	721.6	728.0	719.7	705.4	685.4
ลาตินอเมริกา/แคริเบียน	167.1	218.3	284.9	361.4	441.5	520.2	594.4	659.2	711.1
อเมริกาเหนือ	171.6	204.2	231.9	256.1	283.5	315.9	348.1	379.6	407.5
โอเชียเนีย	12.8	15.9	19.4	22.8	26.7	31.0	34.8	38.3	41.5
ร้อยละ (%)									
โลก	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
เอเชีย	55.5	56.3	58.0	59.4	60.2	60.6	60.7	60.6	60.1
แอฟริกา	8.8	9.2	9.7	10.6	11.8	13.1	14.4	15.8	17.2
ยุโรป	21.7	20.0	17.8	15.6	13.7	12.0	10.5	9.4	8.4
ลาตินอเมริกา/แคริเบียน	6.6	7.2	7.7	8.1	8.4	8.6	8.7	8.7	8.7
อเมริกาเหนือ	6.8	6.8	6.3	5.8	5.4	5.2	5.1	5.0	5.0
โอเชียเนีย	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

จากตารางที่ 1-2 พบว่า ผลการพยากรณ์จำนวนประชากรโลกชี้ให้เห็นว่าจำนวนประชากรโลกมีแนวโน้มจะเพิ่มมากขึ้นถึงกว่าร้อยละ 22 ในช่วงระหว่าง พ.ศ. 2553 – 2573 และจากผลได้กล่าวว่า ประชากรโลกมีอัตราการเพิ่มเฉลี่ยมากกว่าร้อยละ 11 ในทุก 10 ปี [1, 2]

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการเพิ่มความต้องการพลังงานและอัตราการเพิ่มประชากรโลกในทุก 10 ปี พบว่า อัตราส่วนการเพิ่มความต้องการพลังงานต่อการเพิ่มของประชากรจะมีค่าประมาณ 2.5 : 1 จากผล พบว่า ทุก1%ของประชากรที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความต้องการพลังงานของโลกเพิ่มขึ้น 2.5% ดังนั้นความต้องการพลังงานของโลกจึงเพิ่มขึ้นอย่างไม่หยุดยั้ง

สถานการณ์พลังงานในประเทศไทย ช่วงปี พ.ศ. 2549 – 2552 สำหรับน้ำมันสำเร็จรูป ในปี 2552 ในประเทศไทยมีการใช้น้ำมันสำเร็จรูปเพิ่มขึ้นจากปี 2551 ร้อยละ 1.0 เนื่องจากการใช้ดีเซลและเบนซินเพิ่มขึ้นอันเป็นผลจากราคาขายปลีกเฉลี่ยในปีนี้ต่ำกว่าปี 2551 มากทำให้ประชาชนใช้น้ำมันเพิ่มมากขึ้น และประมาณการว่าในปี 2553 สถานการณ์ความต้องการการใช้น้ำมันเบนซินและดีเซลจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เพราะคาดว่าปี 2553 ราคาน้ำมันยังคงทรงตัวอยู่ในระดับ 75 – 85 ดอลลาร์ สรอ.ต่อบาร์เรล โดยการใช้น้ำมันเบนซินจะเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.6 และการใช้น้ำมันดีเซลเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.0 [2]

ตารางที่ 1-3 แสดงการใช้น้ำมันสำเร็จรูปชนิดต่างๆ ของประเทศไทย ในช่วงปีพ.ศ. 2549 – 2552 ของสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน [3]

หน่วย: พันบาร์เรลต่อวัน

ชนิด	2549	2550	2551	2552*	อัตราการปลี่ยนแปลง (%)			
					2549	2550	2551	2552*
เบนซิน	124	126	122	131	-0.4	1.6	-2.9	6.4
ธรรมดา 91	79	81	74	89	4.5	3.3	-8.4	19.1
พิเศษ	46	45	48	42	-7.9	-1.1	7	-13
- แก๊สโซฮอล์	20	26	42	40	83.4	28.1	62.5	-6.7
- 95	25	19	6	2	-34.3	-24.7	-69.1	-59.1
ก๊าด	0.3	0.3	0.3	0.2	-7.4	-7.5	-13.7	-20.3
ดีเซล	317	322	303	316	-6.2	1.8	-5.7	4
เครื่องบิน	78	85	80	76	5.2	9.1	-5.9	-4.9
น้ำมันเตา	101	73	56	46	-5.6	-27.8	-22.1	-19.5
LPG**	87	100	117	120	16.2	14.5	17.4	1.6
รวม	707	707	679	688	-1.6	-0.1	-3.6	1

สำหรับน้ำมันดีเซล ในปี 2552 ประเทศไทยมีปริมาณการใช้รวม 50.3 ล้านลิตรต่อวัน เพิ่มขึ้นร้อยละ 4.0 โดยในช่วงต้นปี 2552 ปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นมากเนื่องจากราคาน้ำมันดีเซลต่ำกว่าปีที่ผ่านมา ต่อมาราคาเริ่มปรับตัวสูงขึ้น ทำให้การใช้ลดลง อย่างไรก็ดีในช่วงไตรมาสสุดท้ายของปี 2552 เศรษฐกิจไทยเริ่มมีแนวโน้มปรับตัวดีขึ้น ประกอบกับราคาน้ำมันดีเซลเฉลี่ยในปีนี้ต่ำกว่าปีที่ผ่านมา จึงทำให้ปริมาณการใช้ของทั้งปีเพิ่มขึ้น ดังได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1-4

ตารางที่ 1-4 แสดงปริมาณการใช้น้ำมันดีเซลในประเทศในช่วงปี พ.ศ. 2549 – 2552 ของสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน [3]

หน่วย : ล้านลิตร/วัน

ช่วงเวลา	รายเดือน												
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.-ธ.ค.
2549	52	54.5	55.7	52.1	52.4	49.1	46.3	46.2	45.6	46.1	51	51.2	50.2
2550	52.9	53.5	55.3	52.4	50.3	52.4	48.3	50.1	47.8	48.2	50.8	51.9	51.1
2551	52.5	52.4	54.7	53.7	49.9	45.4	40.2	42.8	42.5	45	46.8	52.5	48.2
2552	55.4	51.4	52.5	52.9	53.6	48.6	47.5	46.7	46.5	47.5	49.4	52.1*	50.3*
Δ (%) จากช่วงเดียวกันปีก่อน	5.6	-1.9	-4	-1.5	7.3	7.2	18.1	9	9.3	5.6	5.6	-0.8	4
Δ(%) จากเดือนก่อนปี 52	5.6	-7.3	2.1	0.8	1.2	-9.2	-2.4	-1.7	-0.4	2.2	3.9	7	

* หมายถึง เบื้องต้น

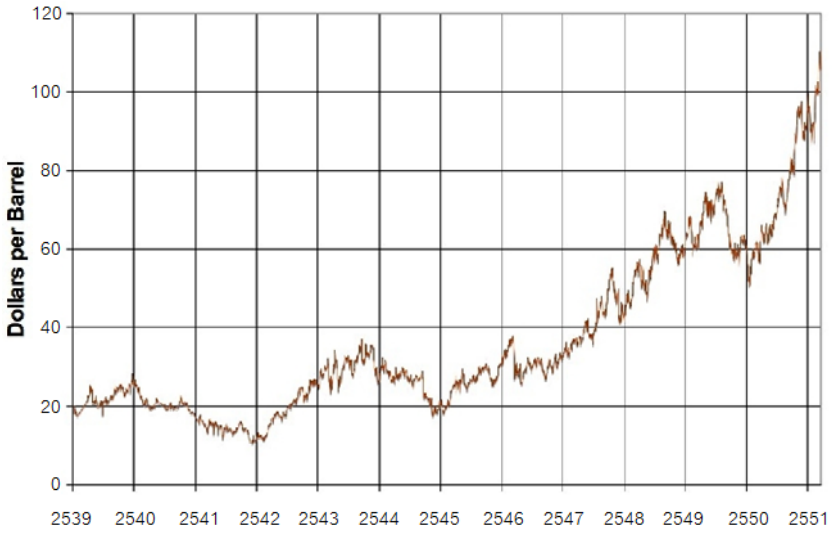
สำหรับ ไบโอดีเซล (B5) ในปี 2552 ประเทศไทยปริมาณการจำหน่ายเพิ่มขึ้นจาก 10.3 ล้านลิตรต่อวันในปี 2551 เป็น 22.2 ล้านลิตรต่อวันในปีนี้ หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 114.7 เนื่องจากรัฐบาลได้มีนโยบายส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนอย่างจริงจัง ด้วยการลดอัตราเงินนำส่งเข้ากองทุนน้ำมันและกองทุนอนุรักษ์พลังงานของ B5 ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล เป็นผลให้ราคาขายปลีกของ B5 ต่ำกว่าราคาน้ำมันดีเซล 1.00 – 3.00 บาทต่อลิตร จึงเป็นเหตุให้การใช้น้ำมัน B5 เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1-5

ตารางที่ 1-5 ปริมาณการจำหน่ายน้ำมันดีเซลหมุนเร็วบี 5 ในช่วงปี พ.ศ. 2549 – 2552 ของสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน [3]

หน่วย : ล้านลิตร/วัน

ช่วงเวลา	รายเดือน												
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.-ธ.ค.
2549	0.048	0.054	0.055	0.090	0.135	0.115	0.103	0.092	0.095	0.110	0.190	0.326	0.118
2550	0.469	0.670	0.889	1.072	1.285	1.505	1.667	1.793	1.934	2.101	3.109	4.042	1.718
2551	4.916	5.330	7.512	8.455	9.666	10.65	9.709	10.78	11.82	13.18	14.44	17.27	10.33
2552	19.31	19.97	21.89	23.58	25.48	24.22	23.51	22.33	21.23	21.09	21.72	21.67*	22.17*
Δ(%) ช่วงเดียวปีก่อน	292.9	274.7	191.4	178.9	163.6	127.4	142.2	107.1	79.6	60.0	50.4	50.3	114.7
Δ(%)เดือนก่อนปี 52	11.8	3.4	9.6	7.7	8.0	-5.0	-2.9	-5.0	-4.9	-0.7	3.0	0.2	

* หมายถึง เบื้องต้น



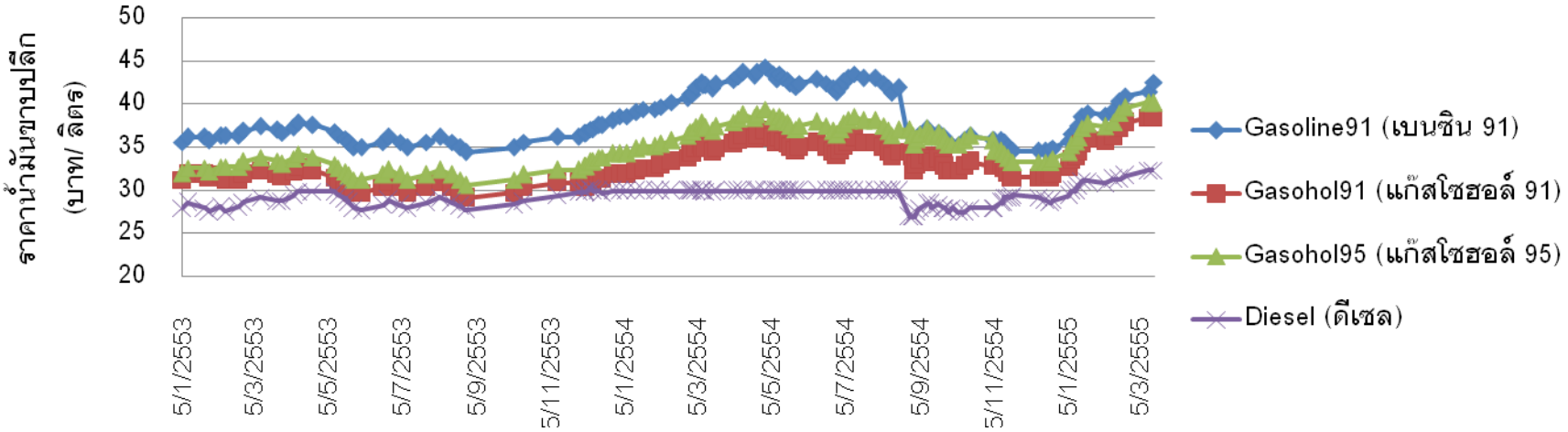
รูปที่ 1-1 แผนภูมิแสดงความผันผวนของราคาน้ำมันในตลาดโลก [4]

ตัวแปรหรือสิ่งที่เป็นตัวกำหนดราคาซึ่งทำให้เกิดความผันผวนของราคาน้ำมันในตลาดโลกในช่วงเวลาต่างๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1-6 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1-6 แสดงตัวกำหนดราคาที่ทำให้เกิดความผันผวนของราคาน้ำมันในตลาดโลก [1]

ช่วงเวลา	ตัวกำหนดซึ่งทำให้เกิดความผันผวนของราคาน้ำมันในตลาดโลก
ช่วง พ.ศ. 2393 - 2507	ประเทศผู้ผลิตน้ำมันแข่งขันกันผลิตจนปริมาณน้ำมันมีมากเกินความต้องการ ทำให้ราคาน้ำมันในโลกถูกกำหนดโดยกลุ่มประเทศผู้ใช้น้ำมันรายใหญ่ที่เป็นประเทศที่พัฒนาแล้วในซีกโลกตะวันตก ราคาน้ำมันจึงไม่สูงและมีความผันผวนน้อย
ช่วง พ.ศ. 2508 - 2523	ราคาน้ำมันในตลาดโลกถูกกำหนดโดยกลุ่มประเทศผู้ผลิตน้ำมัน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นประเทศนับถือศาสนาอิสลามในตะวันออกกลาง ราคาน้ำมันเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากมีความต้องการน้ำมันที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ราคาน้ำมันเริ่มมีความผันผวนเนื่องจากสถานการณ์สงครามในระหว่างกลุ่มประเทศผู้ผลิตน้ำมันด้วยกันเอง และรู้ถึงผลกระทบของผลผลิตน้ำมันที่มีผลต่อระบบเศรษฐกิจ และเริ่มนำผลผลิตน้ำมันมาใช้เป็นเครื่องมือต่อรองทางการเมืองระหว่างประเทศ
ช่วง พ.ศ. 2523 - 2551	ราคาน้ำมันในตลาดโลกยังคงถูกกำหนดโดยกลุ่มประเทศผู้ผลิตน้ำมัน ราคาน้ำมันเพิ่มสูงขึ้นมากเนื่องจากสถานการณ์สงครามและปริมาณน้ำมันสำรองของโลกที่เริ่มลดน้อยลง ความผันผวนของราคาน้ำมันมีสูง เนื่องจากความขัดแย้งทางด้านการเมืองระหว่างประเทศในซีกโลกตะวันกับประเทศที่นับถือศาสนาอิสลาม

จากการศึกษาข้อมูลย้อนหลังเกี่ยวกับราคาน้ำมันขายปลีก กทม.และปริมณฑลในช่วงปี ม.ค. 2553 - มี.ค. 2555 จากบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) [5] ย้อนหลัง พบว่า ราคาน้ำมันขายปลีกทั้ง Gasoline91 (เบนซิน 91), Gasohol91 (แก๊สโซฮอล์ 91), Gasohol95 (แก๊สโซฮอล์ 95) และDiesel (ดีเซล) ในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลมีแนวโน้มสูงขึ้นช่วงปลายปี 2553 และมีแนวโน้มลดลงช่วงปลายที่ 2554 แต่จากการสังเกตพบว่า ช่วงต้นปี 2555 นี้ ราคาน้ำมันมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งได้ถูกแสดงรูปที่ 1-2



รูปที่ 1-2 แสดงราคาน้ำมันขายปลีก กทม.และปริมณฑล บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ในช่วงปี ม.ค. 2553 - มี.ค. 2555 [5]

ราคาน้ำมันขายปลีก กทม.และปริมณฑล บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ณ วันที่ 26 มีนาคม 2555 ของ Gasoline91 (เบนซิน 91), Gasohol91 (แก๊สโซฮอล์ 91), Gasohol95 (แก๊สโซฮอล์ 95) และDiesel (ดีเซล) มีราคาเท่ากับ 42.58, 38.48, 40.23 และ 32.33 บาทต่อลิตร ตามลำดับ [5]

จากภาวะวิกฤตการณ์ปัญหาทางด้านพลังงานและเศรษฐกิจของประเทศและภาวะวิกฤตทางด้านสิ่งแวดล้อมของโลกในปัจจุบันที่ได้กล่าวมาข้างต้น การแสวงหาแหล่งเชื้อเพลิงที่สามารถทดแทนปิโตรเลียมที่ยั่งยืนและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่น้อยลง จึงเป็นสิ่งที่มนุษย์ควรตระหนักและใส่ใจ ดังนั้น การนำพืชผลทางการเกษตรมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลเพื่อเป็นพลังงานทดแทนน้ำมันดีเซลซึ่งได้จากปิโตรเลียมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน การใช้ไบโอดีเซลนับเป็นพลังงานที่สำคัญชนิดหนึ่งที่ช่วยสร้างความมั่นคงด้านพลังงานให้กับประเทศ ลดการนำเข้าพลังงาน ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งในการช่วยลดการสูญเสียเงินตราต่างประเทศในการจัดหาน้ำมันเชื้อเพลิง และสิ่งที่สำคัญที่สุดต่อประเทศชาติ คือ การตอบสนองนโยบายของรัฐบาลเพื่อรณรงค์ให้มีการใช้พลังงานหมุนเวียนในชุมชนเช่นกัน รวมทั้งรักษาปริมาณพืชผลทางการเกษตรให้เกิดความสมดุลและลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมได้ในเวลาเดียวกัน โดยควรคำนึงถึงต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลและใช้พลังงานในการผลิตเป็นสำคัญ เพื่อให้ได้คุณภาพของไบโอดีเซลผ่านตามมาตรฐานของข้อกำหนดลักษณะและประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันและคุณภาพไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) ที่ประกาศโดยกรมธุรกิจพลังงาน

การผลิตน้ำมันดีเซลจากพืชน้ำมันหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “ไบโอดีเซล” นี้เป็นพลังงานที่น่าสนใจชนิดหนึ่ง เนื่องจากเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่สามารถนำมาใช้งานได้เลยโดยไม่ต้องมีการดัดแปลงเครื่องยนต์ ง่ายต่อการผลิต ลงทุนไม่สูงและวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตสามารถหาได้ง่ายภายในประเทศ เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมซึ่งมีพืชน้ำมันหลากหลายชนิด ได้แก่ ถั่วเหลือง ปาล์ม มะพร้าว ละหุ่ง งา บัว มะกอก รำข้าว และทานตะวัน เป็นต้น นอกจากจากยังสามารถใช้ไขมันจากสัตว์ต่างๆ ในการผลิตไบโอดีเซลได้เช่นกัน นอกจากจะลดผลกระทบจากปัญหาราคาน้ำมันดีเซลที่เพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งยังเป็นการช่วยเหลือเกษตรกรในการเพิ่มรายได้และผลผลิตจากการเกษตร และเป็นการช่วยเพิ่มฐานะทางเศรษฐกิจในระดับรากหญ้าเพื่อสนองตามนโยบายของรัฐบาลอีกทางหนึ่ง

“ น้ำมันไบโอดีเซล” เป็นน้ำมันที่ผลิตจากการนำน้ำมันพืชชนิดต่างๆ หรือน้ำมันที่ผ่านการใช้ปรุงอาหารแล้วตลอดจนไขมันสัตว์ต่างๆ มาแปรสภาพ โดยผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เรียกว่า “Transesterification Process” ด้วยแอลกอฮอล์ได้เป็นน้ำมันชนิดใหม่ที่อยู่ในรูปของเมทิลเอสเตอร์ (Methyl ester) หรือเอทิลเอสเตอร์ (Ethyl ester) ซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยทั้ง 2 ด้านคือ คุณลักษณะของน้ำมันพืชที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงและเทคโนโลยีของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมัน เป็นต้น

การผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทยมีอยู่ 2 ระดับ คือ ไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ และไบโอดีเซลเชิงชุมชน สำหรับโรงงานไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ซึ่งถือว่าเป็นโรงงานขนาดใหญ่และมีการลงทุนสูง มีทั้งกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องและแบบกะ มีการออกแบบอุปกรณ์การผลิตและระบบควบคุมอย่างดี เพื่อให้สามารถผลิตไบโอดีเซลที่มีคุณภาพตามมาตรฐาน ส่วนการผลิตไบโอดีเซลในระดับชุมชน ส่วนใหญ่เป็นกระบวนการผลิตแบบกะและมีกำลังการผลิตไม่มาก โดยใช้น้ำมันพืชใช้แล้วที่หาได้ในชุมชนหรือการรับซื้อในราคาไม่แพงนักเป็นวัตถุดิบหลัก และใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันแบบขั้นตอนเดียวในการผลิต โดยมีอุปกรณ์ไม่ซับซ้อนมากนัก ซึ่งบางแห่งก็ได้พัฒนาอุปกรณ์การผลิตขึ้นเอง [1]

น้ำมันพืชหรือสัตว์ใช้แล้ว (Waste cooking oils) เป็นน้ำมันบริโภคที่ผ่านการใช้แล้ว ซึ่งสามารถเป็นแหล่งวัตถุดิบที่สำคัญอีกแหล่งหนึ่งในการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากน้ำมันบริโภคที่ใช้ทอดซ้ำหลายครั้งจะเกิดมีสารที่ก่อให้เกิดการกลายพันธุ์และก่อกวนระบบฮอร์โมน ทำให้เกิดผลกระทบและเป็นอันตรายต่อสุขภาพ [6] โดยในช่วง 20 ปีที่ผ่านมาทั่วโลกมีอัตราเฉลี่ยในการบริโภคน้ำมันพืชเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 4 ต่อปีส่งผลให้ปัจจุบันมีการบริโภคน้ำมันพืชสูงกว่า 100 ล้านตันต่อปีเพราะวิถีการบริโภคที่หันมานิยมอาหารประเภทจานด่วน (Fast Food) ที่ปรุงด้วยการทอดมากขึ้นผลที่ตามมาคือมีน้ำมันพืชใช้แล้วจำนวนมากที่เหลือจากการปรุงอาหารซึ่งจำเป็นต้องหาวิธีจัดการไม่ว่าเป็นการกำจัดบำบัดหรือนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ดังนั้นทางรัฐบาลจึงควรออกกฎหมายควบคุมดูแลและมีวิธีการจัดการกับน้ำมันพืชใช้แล้วอย่างเข้มงวดมิให้นำน้ำมันบริโภคที่ผ่านการทอดแล้วกลับมาใช้ในการบริโภคอีก เพราะถือว่าเป็นของเสียที่ต้องถูกกำจัดหรือบำบัดอย่างถูกต้องตามกฎหมายโดยประเทศพัฒนาแล้วต่างๆนิยมนำน้ำมันพืชใช้แล้วมาใช้ประโยชน์ในด้านพลังงานด้วยการนำไปผลิตเป็นน้ำมันไบโอดีเซลซึ่งมีการดำเนินการอย่างเป็นรูปธรรม [7]

อย่างไรก็ตาม การนำน้ำมันพืชใช้แล้วมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลมีปัญหาในการรวบรวมและปัญหาด้านคุณภาพน้ำมัน เนื่องจากน้ำมันได้ผ่านการทอดที่อุณหภูมิสูงหลายครั้งและมีการปนเปื้อนจากกระบวนการทำอาหาร ทำให้ต้องทำการควบคุมคุณภาพน้ำมันทั้งก่อนและหลังการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน จึงจะผลิตได้ไบโอดีเซลที่มีคุณภาพตามมาตรฐานกำหนด [6]

งานวิจัยนี้ได้มีความสนใจเกี่ยวกับน้ำมันปาล์มที่ผ่านการใช้แล้ว เช่น น้ำมันปาล์มใช้แล้วจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารและร้านค้า ซึ่งมียอดปริมาณของเสียเหลือทิ้งที่เกิดขึ้นจาก

กระบวนการผลิตในแต่ละเดือนแตกต่างกันโดยเมื่อเปรียบเทียบปริมาณของเสียของน้ำมันปาล์มที่ใช้ในกระบวนการผลิตจากข้อมูลทางโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร พบว่า มีปริมาณที่สูงมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่ถูกเบิกใช้ไปในการผลิต ในการเก็บข้อมูลช่วง 3 เดือน คือ เมษายน- มิถุนายน 2554 ของโรงงานอาหารทอดแห่งหนึ่งที่ผ่านมามีปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นคิดเป็น 50-62% เท่านั้นเมื่อเทียบกับยอดใช้ทั้งหมด

เนื่องจากทางฝ่ายคุณภาพได้ยึดหลักและอ้างอิงกฎหมาย สำหรับข้อ 6 น้ำมันและไขมันต้องมีคุณภาพหรือมาตรฐาน ของประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 205) พ.ศ. 2543 เรื่องน้ำมันและไขมัน เพื่อตรวจสอบคุณภาพน้ำมันปาล์มก่อนใช้ ระหว่างใช้ และหลังการใช้เพื่อให้อยู่ภายใต้เกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดโดยโรงงานมีความสนใจในค่าเพอร์ออกไซด์ (Peroxide Value) และ ค่า %FFA (กรดไขมันอิสระหรือ Free Fatty acid ; FFA) ของตัวอย่างน้ำมัน โดยเน้นค่า %FFA เป็นสำคัญคือ ต้องมีค่าน้อยกว่า 0.450 % ถ้าหากนำน้ำมันปาล์มที่ผ่านการใช้แล้วมาทำการตรวจวัดค่าเหล่านี้และมีค่าไม่เป็นไปตามมาตาฐานกำหนด ทางฝ่ายคุณภาพจะออกคำสั่งห้ามน้ำมันปาล์มเหล่านั้นและจะถูกเปลี่ยนสถานะไปเป็นของเสียและน้ำมันปาล์มถูกลำเลียงไปยังถังเก็บน้ำมันเสียเพื่อรอขายทิ้งในที่สุด และมีมาตรการสำหรับการเสนอขายน้ำมันเสียในราคากิโลกรัมละ 16.50 บาทต่อกิโลกรัม เท่านั้น

จากข้อมูลที่กล่าวไปในเบื้องต้นนั้น ได้แสดงถึงปัญหาที่เกิดขึ้นเกี่ยวกับมูลค่าของของเสียในส่วนของน้ำมันปาล์มที่ผ่านการผลิตแล้ว งานวิจัยนี้ได้เล็งเห็นความสำคัญของการศึกษาวิธีการเพิ่มมูลค่าของน้ำมันปาล์มเสียที่ผ่านการใช้แล้ว โดยจะไม่กล่าวถึงกรรมวิธีหรือกระบวนการผลิตโดยใช้น้ำมันปาล์ม เนื่องจากได้ทำการอ้างอิงข้อมูลการตรวจวัดคุณภาพของน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วจากฝ่ายคุณภาพจากทางโรงงานอุตสาหกรรมเกี่ยวกับคุณภาพของน้ำมันปาล์มใช้แล้ว โดยกล่าวว่าไม่สามารถนำน้ำมันปาล์มใช้แล้วกลับไปใช้ซ้ำในกระบวนการผลิตได้ เนื่องจากมีค่าที่วัดได้มีค่าเกินค่ามาตรฐานที่กฎหมายกำหนด

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้มีความสนใจทำการศึกษาเกี่ยวกับการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลในสภาวะเหมาะสม โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของน้ำมันไบโอดีเซลสำหรับตัวอย่างน้ำมันปาล์มใช้แล้ว ได้แก่ ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (% FAME ; Fatty Acid Methyl Esters) ซึ่ง

มาตรฐานไบโอดีเซลของข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมันพ.ศ. 2550 ประกาศกรมธุรกิจพลังงานระบุว่า ปริมาณเมทิลเอสเตอร์มีปริมาณไม่ต่ำกว่าร้อยละ 96.5 โดยน้ำหนัก โดยทำการวิเคราะห์หาค่าปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (% FAME ; Fatty Acid Methyl Esters) ในตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography; GC) อ้างอิงตามวิธีมาตรฐาน EN14103 โดยการส่งตัวอย่างเมทิลเอสเตอร์ตรวจ ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และปริมาณผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล (%Yield) จากน้ำมันปาล์มใช้แล้วซึ่งสามารถเป็นการเพิ่มมูลค่าของน้ำมันปาล์มใช้แล้วและลดอัตราการใช้ซ้ำของน้ำมันปาล์มใช้แล้วของอุตสาหกรรมอาหาร พร้อมทั้งลดอัตราความเสี่ยงในการเกิดโรคมะเร็งของผู้บริโภคได้อีกทางหนึ่ง

ดังนั้น งานวิจัยนี้สามารถทราบความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของไบโอดีเซลทั้งปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (% FAME) และปริมาณผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล (%Yield)จากน้ำมันปาล์มใช้แล้วจากการสุ่มตัวอย่าง ซึ่งมีปริมาณกรดไขมันอิสระหรือ Free Fatty Acid (%FFA) แตกต่างกัน ซึ่งใช้สำหรับทอดผลิตภัณฑ์ที่ต่างชนิดกัน ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ประเภทพืชและประเภทสัตว์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้คำนึงถึงต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลที่ต่ำและใช้พลังงานในการผลิตที่เหมาะสมเป็นสำคัญ เพื่อให้ได้คุณภาพของไบโอดีเซลผ่านตามมาตรฐานของข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพไบโอดีเซลที่ประกาศโดยกรมธุรกิจพลังงาน

สำหรับผลการวิเคราะห์ข้อมูลของงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางหรือประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจเกี่ยวกับการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้ว เนื่องจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วจากต่างแหล่งที่มา มักมีปริมาณกรดไขมันในน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพของน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้มีคุณภาพที่แตกต่างกันด้วยในสภาวะที่เหมาะสม

จากงานวิจัยนี้ยังสามารถทำการคาดคะเนแนวโน้มเพื่อทราบประสิทธิภาพของน้ำมันไบโอดีเซลของผู้ที่สนใจก่อนทำการลงทุนทำการทดลองในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจริง โดยทำการตรวจสอบค่า ปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid ; %FFA) จากตัวอย่างน้ำมันปาล์มใช้แล้วของตน เพื่อนำมาทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลของผลวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในการวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้บริหารในการตัดสินใจในการพิจารณาก่อนการลงทุนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลเพื่อใช้ทดแทนในโรงงานและเพิ่มมูลค่าของของเสียจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1) เพื่อวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ (FREE FATTY ACID ; %FFA) ในน้ำมันปาล์มใช้แล้ว, อุณหภูมิ, เวลาและปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล ที่มีผลต่อ ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (FATTY ACID METHYL ESTERS ; %FAME) และผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล
2) เพื่อประเมินผลค่าใช้จ่ายของปัจจัยที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลโดยพิจารณาจากปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (%FAME ต่อบาท) ที่เหมาะสมเป็นตัวแปรที่ใช้ในการตัดสินใจ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1) ศึกษาความแตกต่างของแหล่งที่มาของน้ำมันปาล์มที่ผ่านการใช้แล้วซึ่งมีปริมาณกรดไขมันอิสระหรือ Free Fatty Acid (%FFA) แตกต่างกัน ซึ่งใช้สำหรับทอดผลิตภัณฑ์ที่ต่างชนิดกัน ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ประเภทพืชและประเภทสัตว์
2) วิเคราะห์และศึกษาความแตกต่างของปริมาณของกรดไขมันอิสระจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วด้วยวิธีการไตเตรทหาค่า % FFA (Free Fatty Acid) ด้วยเครื่องไตเตรทอัตโนมัติตามมาตรฐาน ASTM D 5555
3) ศึกษากระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลหรือเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มใช้แล้วและเมทานอล (Methanol) ที่มีความบริสุทธิ์ 99.98% ด้วยกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (Transesterification Process) โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide ; KOH) A.R. Grade เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ที่ระดับความเร็วรอบในการหมุน(RPM) 500 รอบต่อนาที (RPM.) และใช้อุณหภูมิในกระบวนการต้มไล่น้ำในตัวอย่างที่ระดับอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส
4) ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (% FAME ; Fatty Acid Methyl Esters) โดยการส่งตรวจหาปริมาณของเมทิลเอสเตอร์ (%FAME ; Fatty Acid Methyl Esters) จากตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography; GC) อ้างอิงตามวิธีมาตรฐาน EN14103 จากมาตรฐานไบโอดีเซลของข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบ

โอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมันพ.ศ. 2550 ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน โดยการส่งตัวอย่างเมทิลเอสเตอร์ตรวจ ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

5) ศึกษาหาปัจจัยเบื้องต้นที่มีผลต่อประสิทธิภาพไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้ว จากการศึกษาข้อมูลและทฤษฎีจากเอกสาร บทความ (Journal) ที่ถูกตีพิมพ์ หนังสือเกี่ยวกับการผลิตไบโอดีเซลและจากการสอบถาม สัมภาษณ์และคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญหรือผู้มีประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องโดยอ้างอิงตามหลักการทางวิศวกรรมและเคมี เป็นต้น โดยประยุกต์ใช้แผนภูมิก้างปลา (Cause and Effect Diagram) พิจารณาร่วมกับผลการทดลองในอดีตจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
6) ศึกษาหาสภาวะที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วด้วยทำการทดลอง ซึ่งมีปัจจัยมาเกี่ยวข้องทั้ง 4 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มใช้แล้ว อุณหภูมิ เวลา และปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง โดยคำนึงถึงทางด้านประสิทธิภาพ ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์และพลังงานที่ใช้ในการผลิตเป็นสำคัญ เพื่อศึกษาคุณภาพของไบโอดีเซลที่ได้ให้สอดคล้องตามมาตรฐานของข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพไบโอดีเซล

1.4 ตัวชี้วัดในการทำวิจัย

- ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (% FAME ; Fatty Acid Methyl Esters) และร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยการประเมินผลค่าใช้จ่ายของปัจจัยที่ใช้ในการผลิตและค่าปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (%FAME ต่อบาท) ที่เหมาะสม

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) เพิ่มมูลค่าของของเสียในส่วนของน้ำมันปาล์มใช้แล้วในอุตสาหกรรมอาหาร
2) การคาดคะเนแนวโน้มของประสิทธิภาพของน้ำมันไบโอดีเซล โดยการประเมินผลค่าใช้จ่ายของปัจจัยที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วซึ่งมีปริมาณของกรดไขมันอิสระแตกต่างกันจากค่าปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (%FAME ต่อบาท)ที่ได้

3) เพื่อเกิดประโยชน์แก่ผู้บริหารในการตัดสินใจในการพิจารณาสำหรับการลงทุนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลเพื่อใช้ทดแทนในโรงงานต่อไปในอนาคต เพื่อรองรับวิกฤตการณ์ราคาน้ำมันปาล์มที่สูงขึ้นในปัจจุบัน

4) เพื่อช่วยลดการนำน้ำมันปาล์มใช้แล้วกลับมาสู่วงจรการบริโภคซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดโรคมะเร็งในผู้บริโภค อีกทั้งยังเป็นการร่วมรณรงค์การใช้น้ำมันไบโอดีเซลแทนน้ำมันดีเซลเพื่อช่วยลดปัญหามลพิษด้านสิ่งแวดล้อมในประเทศได้

5) หากตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มตัวอย่างที่ได้จากการทดลองซึ่งมีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ที่กำหนดโดยกรมธุรกิจบริการ (เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล) ดังนั้นสามารถนำไปทดสอบใช้กับเครื่องยนต์ในโรงงานในเบื้องต้นของการศึกษาได้ อาทิ เครื่องสูบน้ำ เป็นต้น

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1) สำรวจข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2) ศึกษาและรวบรวมข้อมูลจริงที่เกิดขึ้นและวิเคราะห์สาเหตุถึงปัญหาที่พบ
3) ทำการทดลองและศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ เพื่อหาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง
4) ศึกษาหาปัจจัยเบื้องต้นที่มีผลต่อประสิทธิภาพไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้ว จากการศึกษาข้อมูลและทฤษฎีจากเอกสาร บทความที่ถูกตีพิมพ์ หนังสือเกี่ยวกับการผลิตไบโอดีเซล จากการสอบถาม สัมภาษณ์และคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญหรือผู้มีประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องโดยอ้างอิงตามหลักการทางวิศวกรรมและเคมี เป็นต้น โดยประยุกต์ใช้แผนภูมิก้างปลาพิจารณาร่วมกับผลการทดลองในอดีตจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
5) ออกแบบแผนการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid ; %FFA) ในน้ำมันปาล์มใช้แล้ว, อุณหภูมิ, เวลาและปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลที่มีผลต่อ ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (% FAME ; Fatty Acid Methyl Esters) ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography; GC) อ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ EN14103 และร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล
6) วิเคราะห์ผลการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของไบโอดีเซล คือ ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (% FAME) และร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)ที่ได้จากการผลิต

7) วิเคราะห์ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง %FAME ต่อบาท %Yield ต่อบาท %FAME ต่อกิโลจูลและ %Yield ต่อกิโลจูล กับประสิทธิภาพของไบโอดีเซลที่ได้จากการผลิด
8) หาสภาวะที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้นซึ่งมีปริมาณกรดไขมันอิสระหรือ (%FFA) แตกต่างกัน โดยคำนึงถึงทั้งทางด้านประสิทธิภาพ ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์และพลังงานที่ใช้ในการผลิตเป็นสำคัญ
9) วิเคราะห์หา Response Opimizer สำหรับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) และปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (%FAME ต่อบาท) ที่ได้เมื่อใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วซึ่งมีปริมาณกรดไขมันอิสระแตกต่างกันเป็นสารตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซล
10) สรุปผลการทดลอง
11) จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

เนื่องจากปัจจุบันประเทศไทยและหลายประเทศต่างๆทั่วโลกมีความต้องการในการใช้พลังงานเชื้อเพลิงประเภทน้ำมันเพิ่มสูงขึ้น แต่แหล่งผลิตในประเทศไม่เพียงพอกับความต้องการ รวมทั้งการใช้พลังงานจากปิโตรเลียมส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อน ประเทศจึงต้องนำเข้าเชื้อเพลิงน้ำมันเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ทางด้านราคาของน้ำมันยังมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นการหาสิ่งมาทดแทนจึงเป็นสิ่งสำคัญและแหล่งพลังงานชนิดหนึ่งที่ได้รับความสนใจในขณะนี้คือ “ไบโอดีเซล” ซึ่งในทั้งภาครัฐบาลและเอกชนได้มีการสนับสนุนให้นำพืชผลทางการเกษตรมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลเพื่อเป็นพลังงานทดแทน ซึ่งเป็นหนทางหนึ่งที่ช่วยสร้างความมั่นคงด้านพลังงานให้กับประเทศ ลดการนำเข้าพลังงาน เป็นการเพิ่มรายได้ให้กับภาคเกษตรกรเนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศที่มีผลผลิตทางเกษตรอยู่เป็นจำนวนมาก รวมทั้งรักษาปริมาณพืชผลทางการเกษตรให้เกิดความสมดุลและลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมได้ในเวลาเดียวกัน

ดังนั้นประเทศไทยต้องหาแหล่งพลังงานทดแทนพลังงานปิโตรเลียมที่กำลังจะหมดไป พลังงานทดแทน หมายถึง เป็นพลังงานจากแหล่งอื่นๆ ที่สามารถใช้แทนแหล่งเชื้อเพลิงฟอสซิลได้ แบ่งตามแหล่งที่ได้เป็น 2 ประเภท คือ พลังงานสิ้นเปลืองเป็นพลังงานทดแทนจากแหล่งที่ใช้แล้วหมดไป ได้แก่ ถ่านหิน แก๊สธรรมชาติ หินน้ำมัน เป็นต้น และพลังงานหมุนเวียนซึ่งเป็นพลังงานทดแทนจากแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วสามารถหมุนเวียนมาใช้อีกได้ เช่น แสงอาทิตย์ ลม น้ำมันพืช หรือน้ำมันสัตว์ใช้แล้ว เป็นต้น [8]

อย่างไรก็ตามการนำน้ำมันพืชใช้แล้วมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลมีปัญหาในการรวบรวมและปัญหาด้านคุณภาพน้ำมัน เนื่องจากน้ำมันได้ผ่านการทอดที่อุณหภูมิสูงหลายครั้งและมีการปนเปื้อนจากกระบวนการทำอาหาร ทำให้ต้องทำการควบคุมคุณภาพน้ำมันทั้งก่อนและหลังการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน จึงจะผลิตได้ไบโอดีเซลที่มีคุณภาพตามมาตรฐานกำหนด [6]

ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นทำให้การผลิตไบโอดีเซลได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายในปัจจุบันซึ่งในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่

ผลิตจากน้ำมันพืชที่ผ่านใช้แล้วในอุตสาหกรรมอาหารประเภทน้ำมันปาล์ม (น้ำมันปาล์มโอเลอีน) เป็นวัตถุดิบหลายแหล่งที่มา ซึ่งมีปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้น (%FFA) แตกต่างกัน ได้แก่ น้ำมันปาล์มใช้แล้วจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ผ่านการทอดธัญพืชประเภทถั่ว และจากร้านค้าทั่วไปที่ผ่านการทอดเนื้อสัตว์ประเภทไก่ซึ่งมีส่วนประกอบต่างๆ ในน้ำมันต่างกัน

เนื่องจากปัจจุบันทางอุตสาหกรรมอาหารประเภททอดมีของเสียที่ได้จากกระบวนการผลิตในแต่ละวันเป็นปริมาณมาก นั่นคือ ของเสียประเภทน้ำมันที่ผ่านการใช้แล้วและไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานในระดับอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งไม่สามารถนำกลับไปทอดซ้ำๆ ได้หลายครั้งจึงกลายเป็นของเสียในที่สุด สำหรับการใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วเป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตไบโอดีเซลนั่น ส่งผลให้เป็นการเพิ่มมูลค่าของเสียของน้ำมันปาล์มของอุตสาหกรรมอาหารและสามารถใช้เป็นพลังงานทดแทนน้ำมันดีเซลในเบื้องต้นในโรงงานอุตสาหกรรมโดยไม่ต้องทำการดัดแปลงเครื่องยนต์ เช่น เครื่องสูบน้ำ เครื่องยนต์ของรถขนส่งภายในโรงงาน เป็นต้น

2.1.1 **ปาล์มน้ำมัน** (Palm Oil)

ประเทศไทยมีการผลิตปาล์มเพื่อเป็นพืชน้ำมันสำหรับการบริโภคมากเป็นอันดับหนึ่งของประเทศ โดยมีการนำเข้าและส่งออกน้ำมันปาล์ม ทั้งในรูปของน้ำมันปาล์มดิบ สกัดผ่านกรรมวิธีและชนิดเติมไฮโดรเจน การผลิตไบโอดีเซลสามารถใช้น้ำมันทุกส่วนที่ได้จากปาล์มน้ำมันมาเป็นวัตถุดิบ เช่น น้ำมันปาล์มดิบ น้ำมันปาล์มโอลีน ไขสเตียรีน กรดไขมันปาล์มกลั่น และน้ำมันเมล็ดในปาล์ม [6]

น้ำมันปาล์ม (palm oil) เป็นน้ำมันพืช (vegetable oil) บีบได้จากส่วนเนื้อ (Mesocarp) ของผลปาล์มซึ่งมีน้ำมันร้อยละ 56 ข้อเสียของน้ำมันปาล์มคือจะแตกตัว (Hydrolyse) ได้ง่ายด้วยเอนไซม์ (lypase) เมื่อเกิดการช้ำหรือการกระแทกของผลปาล์มในระหว่างการเก็บเกี่ยวและการขนย้ายทำให้มีปริมาณกรดไขมันอิสระ (free fatty acid) สูงและมีสีเหลืองส้มของแคโรทีน (Carotene) ปะปนทำให้น้ำมันต้องกำจัดสีโดยขบวนการทำให้น้ำมันบริสุทธิ์ [9] น้ำมันปาล์มดิบ ประกอบด้วย Phosphatides (ยางเหนียว), Tocopherols หรือ Vitamic E, ไตรกลีเซอไรด์, กรดไขมันอิสระและขี้ผึ้ง (Wax) เป็นต้น ซึ่งกรดไขมันอิสระมีความสัมพันธ์ต่อการผลิตไบโอดีเซล
น้ำมันปาล์ม สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

1. น้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil) สกัดจากส่วนเปลือกสดของผลปาล์มมันน้ำมัน
2. น้ำมันเมล็ดในปาล์ม (Crude Plam Kernel Oil) สกัดจากเมล็ดในของผลปาล์มน้ำมัน

2.1.2 อุตสาหกรรมจากน้ำมันปาล์ม

น้ำมันปาล์มจะมีเบต้าแคโรทีน (Beta-Carotene) โปรวิตามินเอ (Pro Vitamin A) และมีวิตามินอี (Vitamin E) ในปริมาณสูงจึงทำให้น้ำมันปาล์มมีเสถียรภาพสูงและมีคุณสมบัติในการป้องกันการเหี่ยวย่นของเซลล์ผิวหนังโรคหัวใจและโรคมะเร็งจึงมีการนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ เช่น วิตามินแคปซูลสำเร็จรูปอาหารเสริมเครื่องสำอางเป็นต้น ดังนั้นน้ำมันปาล์มจึงนำมาใช้ในอุตสาหกรรมได้หลายอย่างดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 แสดงอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งสามารถใช้ประโยชน์จากน้ำมันปาล์ม[10]

รายละเอียด	ตัวอย่างอุตสาหกรรมจากน้ำมันปาล์ม
1. ในอุตสาหกรรมอาหารเช่น	- น้ำมันปาล์มเนยเทียมครีมเทียมและสบู่
2. ผลิตผลของกรดไขมันประเภทต่างๆ ทั้งกรดไขมันอิ่มตัวและกรดไขมันไม่อิ่มตัวเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท	- กรดลอริกใช้ทำเป็นเรซินในอุตสาหกรรมสี - กรดปาล์มมิติกใช้ในการเลี้ยงเชื้อราเพื่อสกัดเป็นยาปฏิชีวนะผสมกับกรดสเตียติคเพื่อทำเทียนไข - กรดโอเลอิกใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ - กรดสเตียริกใช้ในการผลิตเครื่องสำอางสบู่เด็กผสมกับกรดปาล์มมิติกเพื่อทำเทียนไข - กรดลิโนเลอิกใช้เป็นยาฉีดสำหรับลดไขมันในเส้นเลือด
3. ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลเพื่อใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลและมีผลพลอยได้ที่สำคัญ คือ กลีเซอรอลสามารถนใช้เป็นสารสำหรับผลิตกรดไขมันประเภทต่างๆ	- Fatty Alcoholใช้ในการผลิต Sodium Alkyl Sulphates และ Surfactant ใช้ในการผลิตผงซักฟอก - Fatty Acid Amides ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอการผลิตกระดาษ ไม้อัด โลหะ ยาง - Fatty Aminesใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอการผลิตพลาสติก น้ำมันหล่อลื่นสารควบคุมเชื้อราและแบคทีเรีย

องค์ประกอบหลักของน้ำมันพืชและจากไขมันสัตว์ ประกอบด้วย ไตรกลีเซอไรด์ (Triglycerides) กรดไขมันอิสระ ฟอสฟอริค สเตอร์รอย น้ำ และอื่นๆ คำว่า น้ำมัน (oil) นั้นใช้กับไตรกลีเซอไรด์ที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ ส่วนคำว่าไขมัน (Fat) ใช้กับไตรกลีเซอร์ไรด์ซึ่งเป็นของแข็ง น้ำมันพืชโดยทั่วไปประกอบด้วยไตรกลีเซอร์ไรด์และกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid) ประมาณร้อยละ 90-98 และร้อยละ 1-5 ตามลำดับ [11]

ไขมันและน้ำมัน

ไขมัน (Lipids) หมายถึงสารอินทรีย์กลุ่มหนึ่งซึ่งไม่ละลายน้ำปรากฏอยู่ในรูปของแข็งและของเหลวที่ได้จากพืชและสัตว์ประเภทของไขมัน (แบ่งตามโครงสร้างทางเคมี) ได้แก่ ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride), กรดไขมันอิสระ (Free fatty acids), คอเลสเตอรอล (Cholesterol) และฟอสโฟลิปิด (Phospholipid) [12]

โมเลกุลของไขมันประกอบด้วยกรีเซอรีน 1 โมเลกุลและกรดไขมัน 3 โมเลกุลซึ่งอาจจะเป็นกรดไขมันชนิดเดียวกันหรือต่างกันไขมันมีหลายชนิดแล้วแต่ชนิดของกรดไขมันที่เป็นส่วนประกอบ โดยทั่วไปในน้ำมันพืชจะประกอบด้วยไตรกลีเซอไรด์ (Triglycerides) เป็นส่วนใหญ่

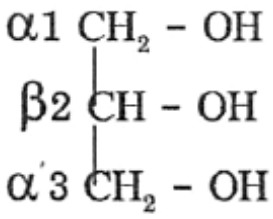
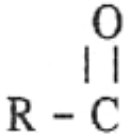
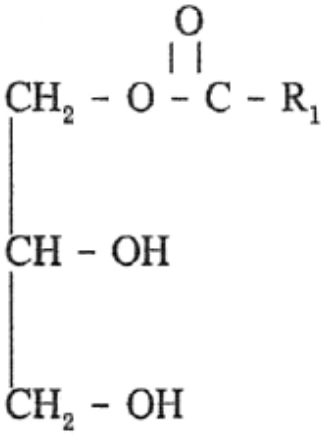
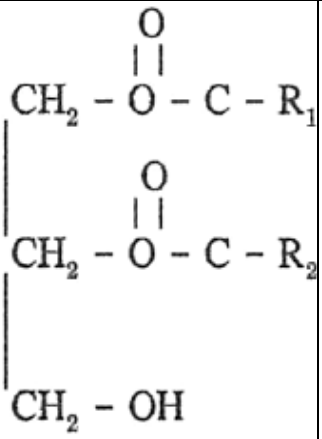
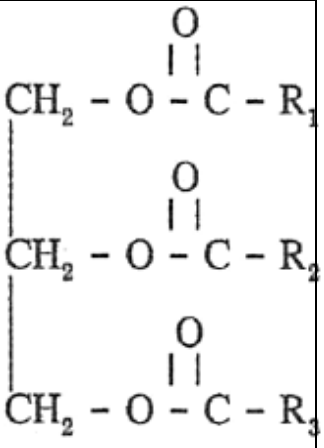
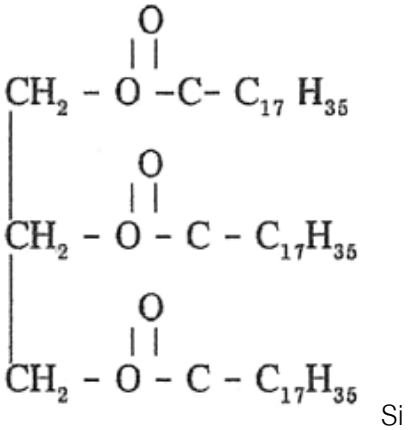
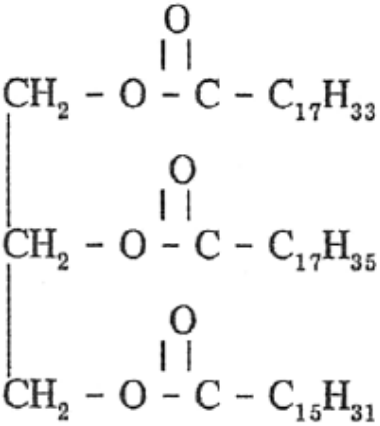
กลีเซอรอล [13]

กลีเซอรอล หรือ กลีเซอริน (Glycerol) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของน้ำมันและไขมัน ควบคู่กับกรดไขมัน กลีเซอรอลเป็นแอลกอฮอล์ชนิดที่มีหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ (Three carbon hydric alcohol) หมายความว่า น้ำมันและไขมันเป็นเอสเตอร์ของแอลกอฮอล์ชนิดนี้ จึงเรียกน้ำมันและไขมันว่ากลีเซอไรด์ (Glyceride) ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ตามจำนวนโมเลกุลของกรดไขมันที่ไปทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล

1. โมโนกลีเซอไรด์ (Monoglyceride) คือ กลีเซอไรด์ที่มีกรดไขมัน 1 โมเลกุลจับอยู่ที่หมู่ไฮดรอกซิลของกลีเซอรอลตำแหน่งใดก็ได้เพียง 1 หมู่
2. ไดกลีเซอไรด์ (Diglyceride) คือ กลีเซอไรด์ที่มีกรดไขมัน 2 โมเลกุล จับอยู่ที่หมู่ไฮดรอกซิลของกลีเซอรอลตำแหน่งใดก็ได้ 2 หมู่
3. ไตรกลีเซอไรด์ (Triglycerides) คือ กลีเซอไรด์ที่มีกรดไขมัน 2 โมเลกุลจับอยู่ที่หมู่ไฮดรอกซิลของกลีเซอรอลตำแหน่งทั้ง 3 หมู่

และสามารถแสดงสูตรโครงสร้างของลิพิด (lipid) ของกลีเซอไรด์ (Glyceride) ดังตารางที่ 2-2 ได้ดังนี้

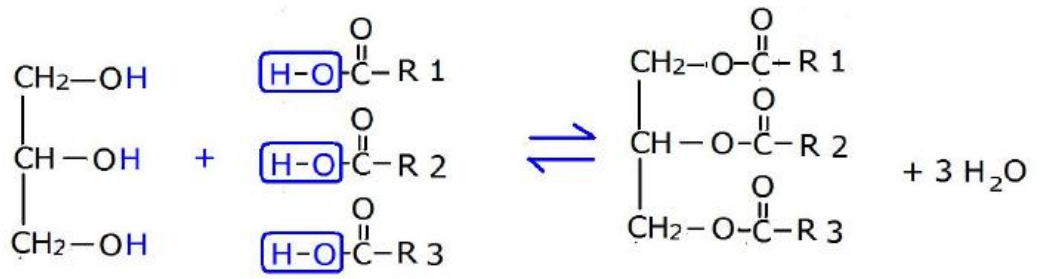
ตารางที่ 2-2 แสดงสูตรโครงสร้างของลิพิดของกลีเซอไรด์ [14]

สูตรโครงสร้างของลิพิด (Lipid) **ของกลีเซอไรด์** (Glyceride)		
		
กลีเซอรอล (Glycerol)	กรดไขมัน (Fatty acid)	หมู่เอซิล (Acyl group)
		
โมโนกลีเซอไรด์ (Monoglyceride)	ไดกลีเซอไรด์ (Diglyceride)	ไตรกลีเซอไรด์ (Triglycerides)
 Simple triglycerides ไตรสเทียริน (Tristearin)	 Mix triglyceride แอลฟา-โอลิโอ-แอลฟาไพร์ม-ปิตา-พาลมิโทสเทียริน (α – Oleo – α – β - Palmitostearin)	

ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride)

ไขมันและน้ำมันที่ได้จากพืชและสัตว์มีสารประกอบส่วนใหญ่เป็นไตรกลีเซอไรด์นอกจากนี้ไตรกลีเซอไรด์ยังเกิดขึ้นได้จากกระบวนการเผาผลาญคาร์โบไฮเดรทเช่นน้ำตาล ดังนั้นหากรับประทานอาหารจำพวกคาร์โบไฮเดรทในปริมาณที่มากเกินไปจะมีผลทำให้ไตรกลีเซอไรด์สูงขึ้นได้ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดโรคระบบหัวใจและหลอดเลือด ค่าปกติของไตรกลีเซอไรด์ควรอยู่ระหว่าง 70-200 มิลลิกรัม/เดซิลิตร

ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) หรืออาจเรียกว่าไตรเอซีลกลีเซอรอล (Triacylglycerol) เป็นสารในกลุ่มลิพิด (lipid) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของน้ำมันและไขมันที่ใช้เป็นอาหารโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์เกิดจากการรวมตัวของกรดไขมัน (Fatty acid) 3 โมเลกุลกับกลีเซอรอล 1 โมเลกุลด้วยพันธะเอสเทอร์โดยที่กรดไขมันทั้งสามชนิด (R1,R2,R3) ในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์อาจจะเหมือนกัน (simple trigleyceride) หรือแตกต่างกัน (mixed triglyceride) [15]



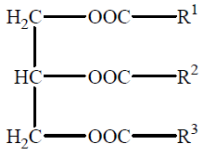
กลีเซอรอล กรดไขมัน 3 โมเลกุล ไตรกลีเซอร์ไรด์ (Triglyceride) น้ำ 3 โมเลกุล

รูปที่ 2-1 แสดงส่วนประกอบหลักของน้ำมันและไขมันที่ใช้เป็นอาหารโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ [12]

ไตรกลีเซอร์ไรด์เป็นส่วนประกอบสำคัญในน้ำมันพืช ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่พบมากที่สุดและเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ไขมันและน้ำมันเมื่อแตกตัวเป็นกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid) จะมีสมบัติเป็นกรด ดังนั้นในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลชีวภาพจึงจำเป็นต้องทราบปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชที่ใช้เป็นวัตถุดิบ

การหาปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชนั้น จะใช้วิธีการไตเตรทน้ำมันพืชด้วยสารละลายเบสโดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์หรือใช้เครื่องไตเตรทแบบอัตโนมัติ (AUTOMATIC TITRATOR) เพื่อปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid) หรือ %FFA ได้เช่นกัน [11]

ไตรกลีเซอไรด์ เป็นสารประกอบประเภทเอสเทอร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างกรดไขมัน 3 โมเลกุลกับกลีเซอรอลหนึ่งโมเลกุล ดังรูปที่ 2-2



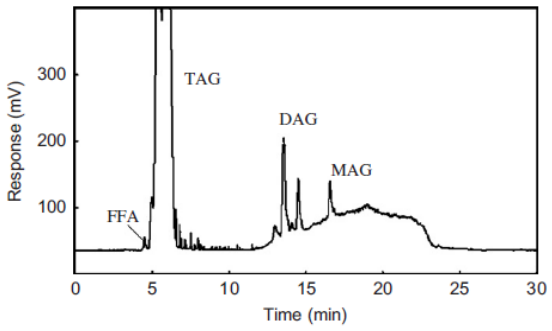
รูปที่ 2-2 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ [16]

จากรูปที่ 2-2 R^1 R^2 และ R^3 คือ สายโซ่ไฮโดรคาร์บอนของกรดไขมันดังนั้นชนิดของกรดไขมันจึงขึ้นอยู่กับสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบ [16]

ตารางที่ 2 -3 แสดงองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มดิบ (Crude palm oil)[17]

องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มดิบ	เปอร์เซ็นต์ (%)
Triglycerides (TAG)	~>90
Diglycerides (DAG)	~2-7
Monoglycerides (MAG)	~<1
Free Fatty Acids (FFA)	~3-5
Phytonutrients	~1

การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มสามารถหาได้โดยทำการตรวจสอบกับเครื่อง High performance liquid chromatographic (HPLC) ด้วย Tributyrin โดยใช้ไลเปสในการเกิดปฏิกิริยา ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง ซึ่งสามารถแสดงโครมาโตรกราฟได้ดังรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 แสดงโครมาโตรกราฟ (Chromatogram) วิเคราะห์แยกองค์ประกอบต่างๆ เช่น Free Fatty Acid (FFA), Monoacylglycerol (MAG), Diacylglycerol (DAG) และ Triacylglycerol (TAG) ในน้ำมันปาล์มในเวลา 1 ชั่วโมง [18]

จากรูปที่ 2-3 พบว่าสามารถอ่านค่าจากโครมาโครกราฟแสดงปริมาณขององค์ประกอบชนิดต่างๆในน้ำมันปาล์มได้และจากข้อมูลสามารถทราบความสัมพันธ์ระหว่างไตรกลีเซอไรด์และกรดไขมันอิสระ คือ หากเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ลดลงแต่กรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นเช่นกันดังตารางที่ 2-4

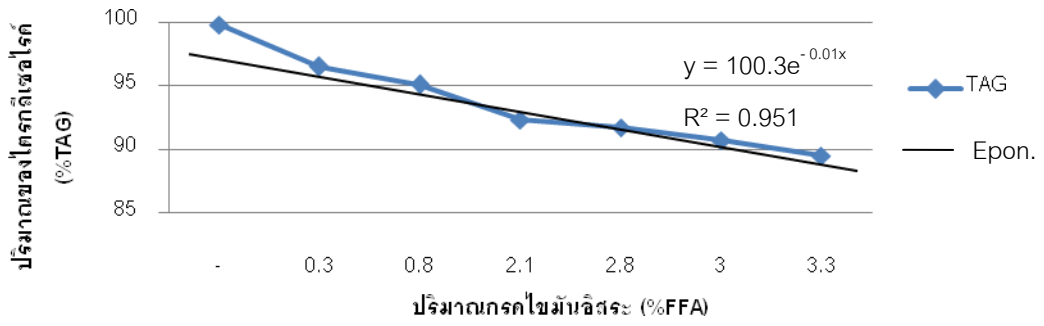
ตารางที่ 2-4 แสดงปริมาณองค์ประกอบน้ำมันปาล์มโดยการวิเคราะห์ Normal-phase HPLC [18]

Reaction Time (h)	FFA	MAG	DAG	TAG
0	-	-	0.2 ± 0.1	99.8 ± 0.5
1	0.3± 0.1[a]	0.7± 0.1	2.5± 0.1	96.5± 1.7
3	0.8 ± 0.1	0.9 ± 0.1	3.2 ± 0.2	95.1 ± 1.5
5	2.1 ± 0.1	1.1 ± 0.1	4.5 ± 0.4	92.3 ± 1.6
7	2.8 ± 0.1	0.9 ± 0.1	4.6 ± 0.3	91.7 ± 1.2
14	3.0 ± 0.1	1.2 ± 0.1	5.1 ± 0.3	90.7 ± 0.8
24	3.3 ± 0.2	1.3 ± 0.1	5.8 ± 0.3	89.5 ± 0.8

หมายเหตุ a คือ ค่าเฉลี่ย (Means) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ของแบบจำลอง

จากตารางที่ 2-4 พบว่า เมื่อระยะเวลาในเกิดปฏิริยาไฮโดรไลซีลของน้ำมันปาล์มเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมารของไตรกลีเซอไรด์มีปริมาณสูงสุด แต่ปริมาณไดกลีเซลไรด์ โมโนกลีเซอไรด์และกรดไขมันอิสระ กลับมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ โดยการตรวจสอบด้วยเครื่อง HPLC ด้วย Tributyrin โดยใช้ไลเปสในการเกิดปฏิกิริยา [18]

เมื่อทำการวิเคราะห์ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (TAG) ซึ่งมีค่าลดลงและปริมาณของกรดไขมันอิสระ (%FFA)ซึ่งมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2-4 ดังนี้



รูปที่ 2-4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไตรกลีเซอไรด์กับปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มใช้แล้วเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 2-4 พบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of Determination) หรือ R^2 = 0.951 หรือเท่ากับ 95.10% ซึ่งหมายความว่า ปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ (แกน Y; %TAG) มีความสัมพันธ์กับปริมาณของกรดไขมันอิสระ (แกน X ; %FFA) ประมาณ 95.10% ส่วน 4.90% จะขึ้นอยู่กับปริมาณขององค์ประกอบอื่นๆ ในน้ำมันปาล์มใช้แล้ว เช่น ไดกลีเซอไรด์และโมโนกลีเซอไรด์ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า สมการถดถอย $Y = 100.3e^{-0.01x}$ (Trend/Regression Tpye ; Exponential) สามารถพยากรณ์ค่าของปริมาณไตรเลีเซอไรด์ในน้ำมันปาล์มใช้แล้วได้ถูกต้อง 95.10%

ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ หรือ Coefficient of Determination ซึ่งเกิดจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ยกกำลังสอง ใช้ตัวย่อว่า R^2หากค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจยิ่งมีค่าใกล้ 1.00 มากเท่าใด ดังนั้น สามารถอธิบายค่าของตัวแปรตามได้ดี เนื่องจากตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นกับตัวแปรตามมีความสัมพันธ์กันมาก แต่ถ้ามีค่าใกล้ 0 แสดงว่า สมการถดถอยสามารถอธิบายค่าของตัวแปรตามได้ไม่ดี หรือกล่าวโดยสรุปได้ว่า ตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันน้อย [19]

การเลือกใช้น้ำมันในการประกอบอาหาร [20]

น้ำมันสำหรับนำมาใช้ประกอบอาหาร นับเป็นส่วนหนึ่งของสารอาหารที่จำเป็นต่อร่างกาย ซึ่งจัดอยู่ในหมวดของไขมัน อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าน้ำมันหรือไขมันจะเป็นสิ่งที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ แต่หากกินเกินกว่าที่ร่างกายต้องการ ก็ก่อให้เกิดโรคภัยตามมาได้หลายโรค น้ำมันที่ใช้ประกอบอาหารทั่วๆไป มี 2 ชนิด คือ น้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์ ในอดีตน้ำมันที่ใช้ประกอบอาหารในครัวเรือน มีเพียงน้ำมันหมูและน้ำมันมะพร้าวเท่านั้น ต่อมาได้มีการผลิตน้ำมันจากถั่วลิสงออกมาเพิ่มอีกชนิดหนึ่ง ต่อมาเมื่ออุตสาหกรรมการผลิตก้าวหน้า ก็มีน้ำมันปรุงอาหารจากพืชนานาชนิดออกมาให้เราได้รู้จักและเลือกใช้มากมาย เช่น น้ำมันรำข้าว น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันงา น้ำมันจากดอกคำฝอย น้ำมันจากดอกและเมล็ดทานตะวัน และน้ำมันปาล์มโอเลอีน เป็นต้น

น้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์ต่างกันอย่างไร [20]

ผู้บริโภคส่วนใหญ่จะเข้าใจผิดคิดว่า น้ำมันพืชต่างจากน้ำมันหมูหรือน้ำมันสัตว์ (เช่น เนย) ตรงที่ให้พลังงานน้อยกว่าน้ำมันสัตว์ ซึ่งเป็นความเข้าใจผิด ความจริงแล้วไม่ว่าน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ก็จะให้พลังงานต่อหน่วยน้ำหนักเท่ากัน คือ 1 กรัม จะให้พลังงานเท่ากับ 9 แคลอรี ดังนั้นความเชื่อที่ว่ากินน้ำมันพืชแล้วไม่อ้วน จึงไม่เป็นความจริง เพราะไม่ว่าน้ำมันอะไร หากกิน มากเกินก็ทำให้น้ำหนักตัวเพิ่มขึ้นได้เหมือนกัน

ตารางที่ 2-5 แสดงความแตกต่างระหว่างน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์ [20, 21]

ความแตกต่าง	น้ำมันสัตว์	น้ำมันพืช
องค์ประกอบ	- น้ำมันหมูจะมีองค์ประกอบเป็นกรดไขมันอิ่มตัวสูง - นอกจากจะไม่ลดโคเลสเตอรอลแล้ว ยังช่วยเพิ่มโคเลสเตอรอลในร่างกายได้ ปกติเราได้ไขมันจากสัตว์ซึ่งเป็นไขมันอิ่มตัวจากการกินเนื้อสัตว์อยู่แล้ว	- น้ำมันพืชส่วนใหญ่มีกรดไขมันจำเป็นชนิดกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูง ซึ่งเป็นกรดไขมันที่ร่างกายไม่สามารถสังเคราะห์ได้ในร่างกาย ต้องได้จากอาหารมี - กรดไขมันจำเป็นจะช่วยลดระดับคอเลสเตอรอลในร่างกาย
คุณสมบัติ	- เป็นไขได้ง่ายเมื่ออากาศเย็นขึ้น - ไขมันสัตว์มีกลิ่นเหม็นหืนได้ง่ายเมื่อทิ้งไว้ที่อุณหภูมิธรรมดา	- มีคุณสมบัติที่ตรงข้ามกับน้ำมันสัตว์ (ยกเว้นน้ำมันมะพร้าว และน้ำมันเมล็ดปาล์ม) - ซึ่งไขมันไม่อิ่มตัวนี้จะไม่ค่อยเป็นไข แม้จะอยู่ในที่เย็น เช่น แช่ตู้เย็น แต่จะทำปฏิกิริยากับความร้อนและออกซิเจนได้ง่าย และมักทำให้เกิดกลิ่นเหม็นหืนภายหลังจากใช้ประกอบอาหารแล้ว
คอเลสเตอรอล	มี	ไม่มีหรือพบน้อยมาก
ผลกระทบ	- หากรับประทานมากอาจจะทำให้ระดับคอเลสเตอรอลในเลือดสูงขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยเสี่ยงสำคัญต่อการเกิดโรคหัวใจขาดเลือด - ผู้ที่มีไขมันในเลือดสูงควรหลีกเลี่ยงการใช้น้ำมันมะพร้าว เนื่องจากมีไขมันอิ่มตัวในปริมาณมาก	- มีองค์ประกอบทางเคมีที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกายมากกว่าน้ำมันสัตว์

ความแตกต่างของน้ำมันจากพืชและสัตว์เมื่อนำมาทำเป็นไบโอดีเซล

โดยปกติแล้วน้ำมันพืชที่ผ่านกระบวนการผลิตสำหรับบริโภค (RBD) แล้ว โดยส่วนใหญ่สามารถนำมาทำไบโอดีเซลที่มีคุณภาพดีกว่าไบโอดีเซลที่ทำมาจากไขสัตว์ได้ [22]น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์อาจเป็นแบบที่ผ่านการใช้งานมาแล้วหรือยังไม่ผ่านการใช้งานก็สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลได้แต่ต้องกรองให้สะอาด (ผ้าขาวกรอง) ไขมันสัตว์ก็สามารถนำมาใช้ได้ [23]

- น้ำมันใหม่ : คุณภาพดีใช้สารเคมีในการไตเตรตและการผลิตไบโอดีเซลน้อยแต่มีราคาสูง
- น้ำมันใช้แล้ว : คุณภาพไม่ค่อยดีต้องนำมาต้มเตรียมน้ำมันก่อนทำปฏิกิริยาจากนั้นนำมาไตเตรตเพื่อหาค่ากรดไขมันอิสระซึ่งจะพบว่าสูงมากกว่าน้ำมันใหม่ซึ่งยังไม่ผ่านการใช้

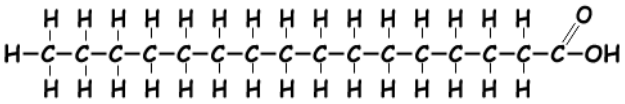
ข้อดีของการใช้น้ำมันจากพืชหรือไขมันจากสัตว์โดยตรงคือการที่ได้ใช้น้ำมันในราคาถูกโดยเฉพาะน้ำมันจากพืชที่ยังไม่ได้ผ่านการกลั่นมาใช้ ส่วนข้อเสียของการใช้น้ำมันไบโอดีเซลชนิดนี้จะทำให้เกิดอุปสรรค์ในการจุดระเบิดของเครื่องยนต์และเกิดการสันดาปที่ไม่สมบูรณ์ทำให้มีคราบเขม่าเกาะที่หัวฉีดอันเป็นเหตุจากน้ำมันพืชมีความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซลประมาณ 17 เท่า ยิ่งที่อุณหภูมิต่ำน้ำมันพืชก็จะยิ่งมีความหนืดสูงและยังจับตัวเป็นไขอีกสาเหตุหนึ่งเนื่องจากคุณสมบัติของน้ำมันพืชที่ระเหยตัวได้ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลหัวฉีดจึงทำให้น้ำมันกระจายเป็นฝอยได้ยาก [24]

กรดไขมัน (Fatty Acids)

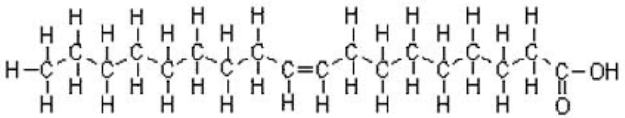
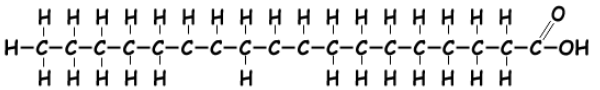
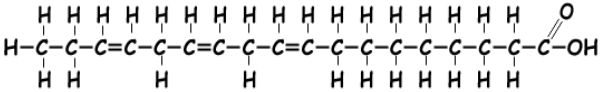
กรดไขมันประกอบขึ้นจากการเรียงตัวเป็นสายโซ่ของธาตุคาร์บอนโดยที่ปลายข้างหนึ่งเป็นหมู่ methylgroup (-CH_3) และปลายอีกข้างหนึ่งเป็นหมู่ carboxyl group (-COOH) ซึ่งจำนวนของคาร์บอนมีได้หลายตัวโดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 4 ถึง 22 อะตอมหากมีความยาวน้อยกว่า 6 จะเรียกว่า กรดไขมันสายสั้น (short chain fatty acid) หากมีความยาวมากกว่า 12 ก็จะเรียกว่ากรดไขมันสายยาว (longchain fatty acid) [10]

กรดไขมันที่พบในไขมันหรือน้ำมันทั้งในน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ ต่างก็มีองค์ประกอบของกรดไขมันทั้ง 2 ชนิดใหญ่ๆเพียงแต่สัดส่วนจะมากหรือน้อยแตกต่างกันไป แล้วแต่ชนิดของพืชหรือสัตว์ที่นำมาเป็นน้ำมันซึ่งสามารถจำแนกตามประเภท และสามารถสรุปสารกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิกแอซิค (Carboxylic acid) ซึ่งมีฤทธิ์เป็นกรดและเป็นองค์ประกอบที่พบในน้ำในพืชและมีผลต่อการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ไว้ดังตารางที่ 2-6 และ 2-7 ตามลำดับ

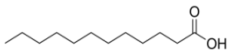
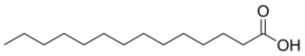
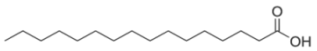
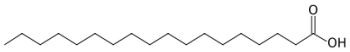
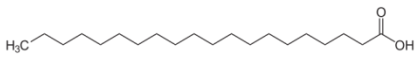
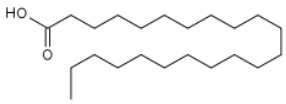
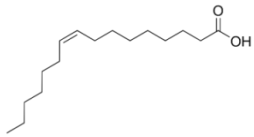
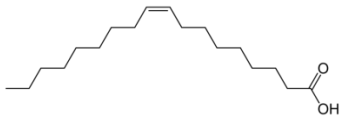
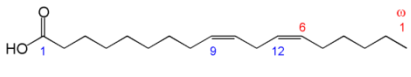
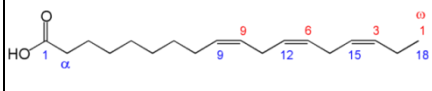
ตารางที่ 2-6 แสดงการเปรียบเทียบชนิดของกรดไขมัน (Fatty acids) [12, 36]

ประเภทของกรดไขมัน	รายละเอียด	ตัวอย่างโครงสร้างของกรดไขมัน
กรดไขมันอิ่มตัว (saturated fatty acid)	- **<u>กรดไขมันอิ่มตัว</u>** หมายถึง กรดไขมันที่คาร์บอนทุกตัวในโมเลกุลไม่สามารถจับกับไฮโดรเจนเพิ่มได้และไม่สามารถจะจับกับสารใดๆได้อีกไขมันอิ่มตัวมักได้มาจากสัตว์ซึ่งมีลักษณะแข็งตัวได้แม้ในอุณหภูมิปกติเช่นเนยแข็ง น้ำมันหมูช็อคโกแลตเป็นต้นโดยพวกนี้จะมีไขมันที่ทำให้คอเลสเตอรอลในเลือดจับตัว - เป็นกรดไขมันที่มีคาร์บอนอะตอมเรียงตัวกันเป็นสายยาวตรงยึดกันด้วยพันธะเดี่ยว (C-C) ดังรูปที่ 2-5 และไม่มีพันธะ C=C อยู่ในโมเลกุลมีสูตรทั่วไปคือ $C_nH_{2n+1}COOH$ เมื่อ n เป็นเลขจำนวนเต็มกรดไขมันส่วนใหญ่เป็นเลขคู่มี C ตั้งแต่ 16-18 ตัว เช่น กรดปาล์มิติก มี C 16 ตัวมีสูตร $C_{15}H_{31}COOH$ เป็นกรดไขมันที่พบมากที่สุดในธรรมชาติกรดสเตียริก มี C 18 ตัว มีสูตร $C_{17}H_{35}COOH$ เป็นต้น	 รูปที่ 2-5 โครงสร้างของกรดปาล์มิติก มี C 16 ตัวสายไฮโดรคาร์บอนเป็นพันธะเดี่ยว <u>หมายเหตุ</u> กรดไขมันอิ่มตัวจะพบมากในไขมันที่มาจากสัตว์ และน้ำมันพืชบางชนิด ซึ่งหากจะเปรียบเทียบปริมาณของกรดไขมันอิ่มตัวที่มีในน้ำมันพืชกับน้ำมันหมูเป็นร้อยละของน้ำมัน จะมีสัดส่วนของตัวเลขดังนี้ คือ น้ำมันหมูร้อยละ 40 น้ำมันมะพร้าว 88 และน้ำมันปาล์มร้อยละ 48 [20]

ตารางที่ 2-6 แสดงการเปรียบเทียบชนิดของกรดไขมัน (Fatty acids) [12, 26](ต่อ)

ประเภทของกรดไขมัน	รายละเอียด	ตัวอย่างโครงสร้างของกรดไขมัน
กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว (Monounsaturated fatty acid)	- **Monounsaturated fatty acid**หรือ monoenoic fatty acid หรือ กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว เป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่ มีพันธะคู่ 1 คู่ เช่นกรดโอเลอิก (oleic acid) มีจำนวน C 18 อะตอม มีพันธะคู่ 1 คู่เป็นกรดไขมันที่พบมากที่สุดในธรรมชาติ - กรดไขมันไม่อิ่มตัวตำแหน่งเดียวไขมันชนิดนี้แทบไม่มีบทบาทอะไรกับปริมาณคอเลสเตอรอลในเลือด	 OLEIC ACID (18:1). $C_{17}H_{33}COOH$ รูปที่ 2-6 โครงสร้างของกรดโอเลอิก
กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน (Polyunsaturnted fatty acid)	- **Polyunsaturnted fatty acid** หรือ polyenoic fatty acid หรือ กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน (หลายตำแหน่ง) เป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มี พันธะคู่ตั้งแต่ 2 คู่ขึ้นไป พันธะคู่ที่อยู่ในกรดไขมันต้องอยู่ห่างกัน 3 คาร์บอน กรดไขมันชนิดนี้สำคัญต่อร่างกายมากช่วยในการทำงานของอวัยวะสำคัญในร่างกายมีลักษณะเหลวแม้ในอุณหภูมิต่ำส่วนใหญ่ได้จากพืชและสัตว์น้ำบางชนิดเช่น น้ำมันทานตะวันน้ำมันถั่วเหลืองน้ำมันข้าวโพด	 รูปที่ 2-7 โครงสร้างกรดลิโนเลอิก มีพันธะคู่ 2 คู่  รูปที่ 2-8 โครงสร้างกรดลิโนเลนิก มีพันธะคู่ 3 คู่

ตารางที่ 2-7 แสดงชื่อและโครงสร้างทางเคมีของกรดไขมันในน้ำมันปาล์ม [27, 28]

ชนิดกรดไขมัน		สูตรโมเลกุล / Molecular	โครงสร้างของกรดไขมัน
กรดไขมันอิ่มตัว (saturated fatty acid)			
กรดลอริค (Lauric acid)	C12:0	$C_{12}H_{24}O_2$ (200.32)	
กรดไมริสติค (Myristic acid)	C14:0	$C_{14}H_{28}O_2$ (228.38)	
กรดปาล์มมิติค (Palmitic acid)	C16:0	$C_{16}H_{32}O_2$ (256.43)	
กรดสเตียริค (Stearic acid)	C18:0	$C_{18}H_{36}O_2$ (284.48)	
กรดอราชิดิค (Arachidic acid)	C20:0	$C_{20}H_{40}O_2$ (312.54)	
กรดเบนเฮนิค (Behenic acid)	C22:0	$C_{22}H_{44}O_2$ (340.60)	
กรดไขมันไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acid)			
กรดปาล์มมิโตลีอิค (Palmitoleic acid)	C16:1	$C_{16}H_{30}O_2$ (254.408)	
กรดโอลีอิค (Oleic acid)	C18:1	$C_{18}H_{34}O_2$ (282.46)	
กรดไลโนลีอิค (Linoleic acid)	C18:2	$C_{18}H_{32}O_2$ (280.46)	
กรดไลโนลีนิค (Linolenic acid)	C18:3	$C_{18}H_{30}O_2$ (278.44)	

ตารางที่ 2-8 แสดงคุณสมบัติหลักที่สำคัญของน้ำมันปาล์ม [29, 30]

คุณสมบัติหลักที่สำคัญของน้ำมันปาล์ม	Palm kernel oil	Palm Oil
ค่าความร้อน (J/g.)	N/A	39,550
Iodine value	14-20	43-59
Acid value (Crude)	20	15
Specific gravity (Relative Density 25°C/ water 25°C: g/ml.)	0.900-0.9452	0.893 – 0.905
Saponification value (mg KOH/g)	240-257	195-210

จากตารางที่ 2-8 ได้แสดงค่าคุณสมบัติหลักที่สำคัญของน้ำมันปาล์มได้แก่ ค่าความหนืด, ค่าความร้อน และค่า ค่าความหนาแน่น และปริมาณกรดไขมันทั้งกรดไขมันอิ่มตัวและกรดไขมันไม่อิ่มตัวพร้อมทั้งระบุจุดหลอมเหลวที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันต่างๆ ทั้งน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์ได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2-9 ดังนี้

ตารางที่ 2-9 แสดงปริมาณและจุดหลอมเหลวของกรดไขมันองค์ประกอบในน้ำมันต่างๆ [13, 31]

กรดไขมัน	ไขมันวัว	น้ำมันหมู	น้ำมันมะพร้าว	น้ำมันปาล์ม (Kernel)	น้ำมันปาล์ม[31]	น้ำมันถั่วเหลือง
Caprylic acid (C8:0)	-	-	7.6	1.4	-	-
Capric acid (C10:0)	-	-	7.3	2.9	-	-
Lauric acid (C12:0)	-	0.3	48.2	50.9	0.7	-
Myristic acid (C14:0)	3.1	1.7	16.6	18.4	1.1	0.1
Myristoleic acid (C14:1)	0.4	0.2	-	-	-	-
Palmitic acid (C16:0)	29.1	26.2	8.0	8.7	38.6	10.5
Palmitoleic acid (C16:1)	34.0	4.0	1.0	-	-	-
Stearic acid (C18:0)	18.9	13.5	3.4	1.9	3.8	3.2
Oleic acid (C18:1)	44.0	42.9	5.0	14.6	42.5	22.3
Linoleic acid (C18:2)	0.3	9.0	2.5	1.2	12.2	54.5
Linolenic acid (C18:3)	-	0.3	-	-	0.3	8.3
จุดหลอมเหลว (°C)	40-48	33-46	23-28	24-28	27-50	-8 ถึง -18

ตารางที่ 2-10 แสดงชนิดของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันปาล์มดิบน้ำมันปาล์มจากเนื้อปาล์ม (Palm olein)และน้ำมันปาล์มจากเมล็ดปาล์ม (Palm kernel oil)[9, 32, 33]

กรดไขมัน (Fatty acid)	C-atoms	น้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil) [4]	น้ำมันปาล์มจากเนื้อปาล์ม(Palm olein)[17]	น้ำมันปาล์มจากเมล็ดปาล์ม (Palm kernel oil) [18]
กรดคาโปรอิค(Caproic acid)	C6:0	-	-	0.1 - 0.5
กรดคาปรีลิค(Caprylic acid)	C8:0	-	-	3.4 - 5.9
กรดคาปริค(Capric acid)	C10:0	-	-	3.3 - 4.4
กรดลอริค(Lauric acid)	C12:0	0.1 - 0.4	< 1.2	46.3 - 51.1
กรดไมริสติค (Myristic acid)	C14:0	1.0 - 1.4	0.5 - 5.9	14.3 - 16.8
กรดปาล์มมิติค(Palmitic acid)	C16:0	40.9 - 47.5	32 - 59	6.5 - 8.9
กรดปาล์มมิโตลีอิค (Palmitoleic acid)	C16:1	0 - 0.6	< 0.6	-
กรดสเตียริค (Stearic acid)	C18:0	3.8 - 4.8	1.5 - 8.0	1.6 - 2.6
กรดโอลีอิค(Oleic acid)	C18:1	36.4 - 41.2	27 - 52	13.2 - 16.4
กรดไลโนลีอิค(Linoleic acid)	C18:2	9.2 - 11.6	5.0 - 14.0	2.2 - 3.4
กรดไลโนลีนิค(Linolenic acid)	C18:3	0 - 0.5	< 1.5	-
กรดอราชิดิค(Arachidic acid)	C20:0	0 - 0.8	< 1.0	-

น้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์เมื่อผ่านการใช้แล้วทั้งกระบวนการทอดหรือผัด ส่งผลให้คุณสมบัติต่างๆของน้ำมันเปลี่ยนแปลงไป รวมทั้งปริมาณกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันทั้งชนิดกรดไขมันอิ่มตัวและกรดไขมันไม่อิ่มตัวเปลี่ยนแปลงไป และตารางที่ 2-11 แสดงคุณสมบัติและปริมาณกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันบริสุทธิ์และน้ำมันที่ผ่านการใช้แล้ว ซึ่งได้ทำการรวบรวมข้อมูลจากหลากหลายงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับปริมาณกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันต่างๆ ได้ดังนี้

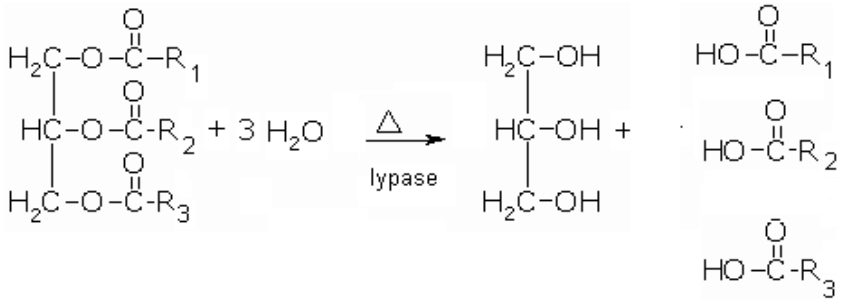
ตารางที่ 2-11 แสดงคุณสมบัติและปริมาณกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันบริสุทธิ์และน้ำมันที่ผ่านการใช้แล้ว [31, 34, 35, 36]

คุณสมบัติ	น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ [31]	น้ำมันพืชบริสุทธิ์ [34]	น้ำมันพืชใช้แล้ว [34]	น้ำมันพืชใช้แล้ว [35]	น้ำมันถั่วเหลือง [36]	น้ำมันพืชใช้แล้ว [36]
Viscosity @40°C (cSt)	43.1	N/A	N/A	55.0	65	66.6
Acid value (mg KOH/g)	N/A	N/A	N/A	1.24	0.2	7.25
Saponification value (mg KOH/g)	N/A	N/A	N/A	155.432	N/A	N/A
Iodine value (g I^-/100g)	N/A	N/A	N/A	119	N/A	N/A
Fat Composition (%wt)						
Triglycerides	N/A	N/A	N/A	99.38	N/A	N/A
Free Fatty Acids	0.22	N/A	0.80	0.62	N/A	N/A
Fatty Acid Composition (%wt)						
Caproic acid (C6:0)	-	1.42	-	-	-	-
Caprylic acid (C8:0)	-	3.78	2.96	-	-	-
Capric acid (C10:0)	-	3.31	3.26	-	-	-
Lauric acid (C12:0)	0.7	38.74	47.63	0.05	N/A	N/A
Myristic acid (C14:0)	1.1	15.47	16.01	0.23	N/A	N/A
Palmitic acid (C16:0)	38.6	13.07	9.24	11.90	11.75	16
Stearic acid (C18:0)	3.8	1.50	1.75	3.80	3.15	5.21
Arachidic acid (C20:0)	-	-	-	0.29	-	-
Beheric acid (C22:0)	-	-	-	0.50	-	-
Lignoseric acid (C24:0)	-	-	-	0.20	-	-
Palmitoleic acid (C16:1)	-	-	0.62	0.19	N/A	N/A
Oleic acid (C18:1)	42.5	18.90	16.38	31.25	23.26	34.28
Linoleic acid (C18:2)	12.2	2.68	2.12	50.76	55.53	40.76
Linolenic acid (C18:3)	-	-	-	-	6.31	-

กรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid) [37]

กรดไขมันอิสระ (free fatty acid) หมายถึง กรดไขมัน (fatty acid) ที่ไม่ได้รวมอยู่ในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) โดยปกติกรดไขมัน ซึ่งเป็น เป็นลิพิด (lipid) มักพบอยู่ในน้ำมันและไขมันบริโภคจะรวมกันในรูปของไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) หากถูกแยกออกมาจะอยู่ในรูปของไขมันอิสระ

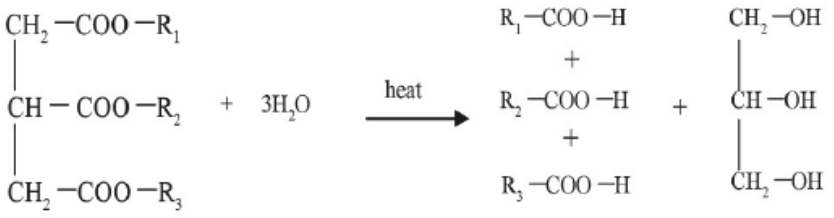
สาเหตุของการเกิดกรดไขมันอิสระ เกิดจากไตรกลีเซอไรด์ถูกย่อยด้วยเอ็นไซม์ไลเปส โดยมีน้ำ เป็นส่วนร่วมในปฏิกริยา เรียกว่า hydrolytic rancidity ดังรูปที่ 2-9



Triglyceride Glycerol Free Fatty Acid

รูปที่ 2-9 แสดงการเกิดกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid) [37]

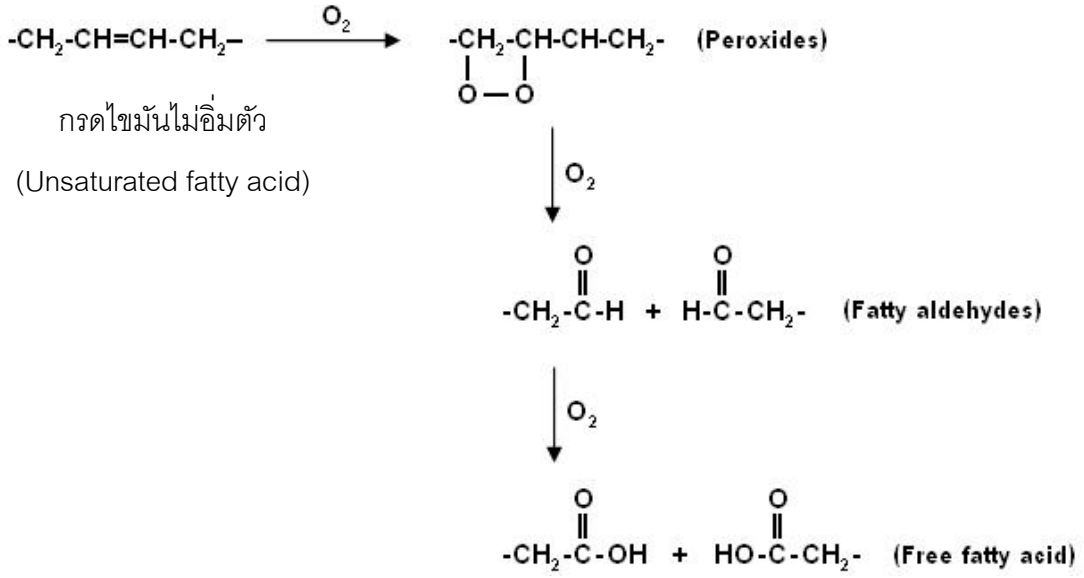
การเกิดกรดไขมันอิสระในอาหาร เป็นดัชนีชี้คุณภาพของน้ำมันพืช (vegetable oil) ไขมัน น้ำมันทอดซ้ำรวมทั้งอาหารที่มีไขมันสูงปริมาณกรดไขมันอิสระเป็นต้นเหตุสำคัญของการเสื่อมเสียอาหาร (food spoilage) คือการเกิดกลิ่นผิดปกติ (off flavor) ที่เรียกว่ากลิ่นหืน (rancidity) และทำให้ค่าความเป็นกรด (acid value) ของน้ำมันสูงขึ้น จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซีส (hydrolysis) เป็นปฏิกิริยาการย่อยสลายพันธะเอสเทอร์ในโมเลกุลของไตรกลีเซอรไรด์ด้วยน้ำให้ได้กรดไขมันอิสระ (free fatty acid) โดยมีเอนไซม์ไลเปส (lypase) เป็นตัวเร่งปฏิกริยาทำให้มีค่าความเป็นกรด (acid value) สูง [15]



Triglyceride Water Free Fatty Acid Glycerol

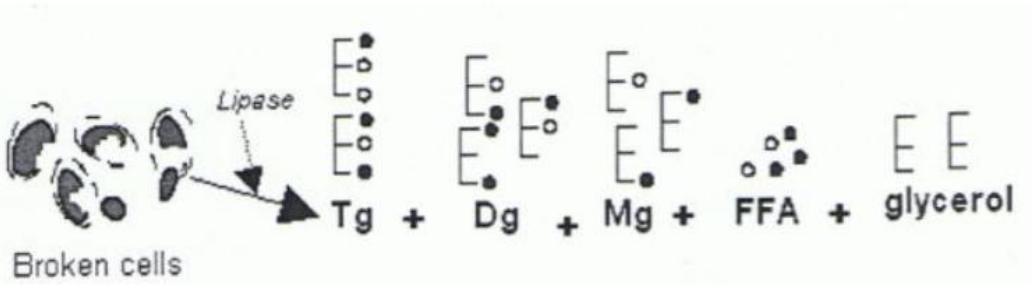
รูปที่ 2-10 แสดงปฏิกิริยาไฮโดรไลซีลของไตรกลีเซอไรด์ [37]

กรดไขมันไม่อิ่มตัวมีพันธะคู่ในโมเลกุลทำให้สามารถถูกออกซิไดซ์ด้วยออกซิเจนในอากาศ เรียกว่าเกิด “auto-oxidation” ทำให้กรดไขมันเปลี่ยนเป็นเปอร์ออกไซด์ (peroxide) และเปลี่ยนต่อไปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนอัลดีไฮด์ (fatty aldehydes) ซึ่งทำให้มีกลิ่นเหม็นหืน ดังรูปที่ 2-11

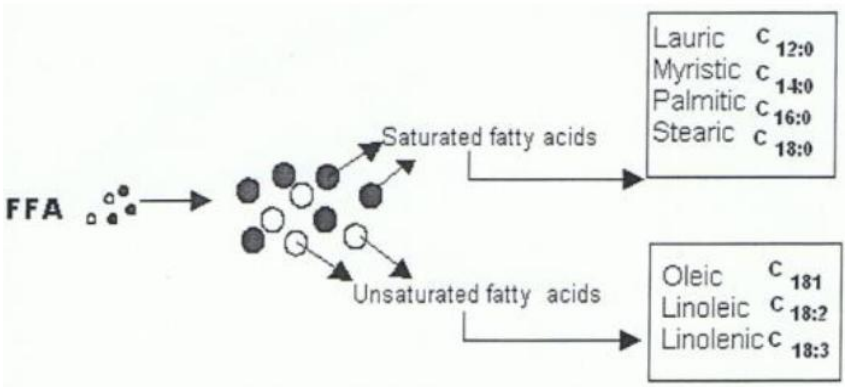


รูปที่ 2-11 แสดงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิด (lipid oxidation)ในกรดไขมันไม่อิ่มตัว [38]

เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซีลของน้ำมันเซลล์จะถูกแบ่งตัวออกได้เป็นไตรกลีเซอไรด์ (Triglycerides : Tg) ไดกลีเซอรไรด์ (Diglycerides :Dg) โมโนกลีเซอไรด์ (Monoglycerides : Mg) กรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acids :FFA) และกลีเซอไรด์ (Glycerols) ซึ่งมีปริมาณแต่กต่างกับไป ไม่เท่ากันในแต่ละองค์ประกอบและแต่ละชนิดน้ำมัน และกรดไขมันอิสระประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัวและกรดไขมันไม่อิ่มตัว ดังได้แสดงไว้ดังในรูปที่ 2-12 และ 2-13 ตามลำดับ



รูปที่ 2-12 แสดงรูปแบบของแต่ละองค์ประกอบน้ำมันปาล์มดิบเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซีล [39]



รูปที่ 2-13 แสดงองค์ประกอบของกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil) [39]

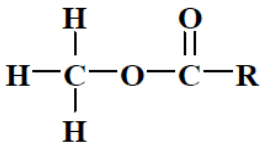
อุณหภูมิที่ทำให้ไขมันหรือน้ำมันเป็นควัน เรียกว่า จุดเกิดควัน (Smoking point) ไขมันหรือน้ำมันจากสัตว์มีอุณหภูมิที่เป็นควันต่ำกว่าน้ำมันพืช อุณหภูมิที่เป็นควันนี้ใช้ทดสอบความบริสุทธิ์ของไขมันได้ ซึ่งน้ำมันและไขมันแต่ละชนิดจะสลายตัวที่อุณหภูมิต่างกัน นอกจากจะขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันและไขมันแล้ว ยังขึ้นอยู่กับปริมาณของกรดไขมันอิสระเช่นกัน ถ้าในน้ำมันมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงจุมีอุณหภูมิที่เป็นควันต่ำ เช่น น้ำมันมะพร้าวมีกรดไขมันอิสระในรูปของกรดโอเลอิกร้อยละ 1.90 สูงกว่ากรดไขมันทุกชนิด จึงมีอุณหภูมิที่เป็นควันต่ำสุด น้ำมันที่ใช้แล้วมีอุณหภูมิที่เป็นควันต่ำลงด้วยเหตุผลเดียวกัน นั่นคือ เมื่อได้รับความร้อนโมเลกุลของไขมันสลายตัวเป็นกรดไขมันอิสระ ในน้ำมันจึงมีปริมาณของกรดไขมันอิสระมากขึ้น ทำให้อุณภูมิที่เป็นควันลดต่ำลง [40] ดังในกรณีของน้ำมันหมูในตารางที่ 2-12

ตารางที่ 2-12 แสดงอุณหภูมิที่เป็นควันของไขมันและน้ำมันชนิดต่างๆ [41]

ชนิดของไขมัน	อุณหภูมิที่เป็นควัน (°C)	กรดไขมันอิสระ (กรดโอเลอิก) %
น้ำมันเมล็ดฝ้าย	233	0.07
น้ำมันหมู (มันเปลว)	221	0.15
น้ำมันหมู (มันแข็ง)	194	0.51
น้ำมันหมูใช้แล้ว (5 ชั่วโมง)	204	0.34
น้ำมันหมูใช้นานกว่า 5 ชั่วโมง	190	0.61
น้ำมันมะกอก	170	0.92
น้ำมันมะพร้าว	138	1.90
น้ำมันปาล์ม (บริษัท โอลีน จำกัด)	N/A	0.65
เนย	208	0.28

2.1.3 ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลคือเชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ โดยผ่านกระบวนการทางเคมีที่ทำให้โมเลกุลเล็กลง เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างไขมันให้เป็นเอสเตอร์ของกรดไขมันให้อยู่ในรูปของโมโนอัลคิลเอสเตอร์ (Mono alkyl ester) ได้แก่ เอทิลเอสเตอร์ (Ethyl ester)หรือ เมทิลเอสเตอร์ (Methyl ester)ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลเรียกว่า ไบโอดีเซล (B100) ซึ่งเมื่อนำมาผสมกับน้ำมันดีเซลเกรดที่ใช้กันในปัจจุบันในสัดส่วนร้อยละ 5- 10 (B5-B10)สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องยนต์ ไบโอดีเซลเป็นพลังงานทดแทนรูปแบบหนึ่งมีคุณสมบัติย่อยสลายตามเวลา ไม่เป็นพิษ เมื่อใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลจะก่อให้เกิดผลบวก คือ จะปล่อยคาร์บอนมอนออกไซด์ที่ต่ำกว่า [10]



รูปที่ 2-14 โครงสร้างโมกุลไบโอดีเซล [15]

ไบโอดีเซลในประเทศไทย

สำหรับประเทศไทยเริ่มมีการวิจัยประมาณพ.ศ. 2524 โดยสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วท.) ได้ศึกษาวิจัยการใช้น้ำมันถั่วเหลืองและเอสเตอร์ของน้ำมันปาล์มมาเป็นพลังงานทดแทนผลการวิจัยพบว่าน้ำมันถั่วเหลืองมีความหนืดสูงทำให้เครื่องยนต์ติดยากสะดุดการสันดาปไม่สมบูรณ์และมีตระกรันขาวในถังน้ำมันมาก ต่อมามีการทดลองใช้เอสเตอร์ของน้ำมันปาล์มที่เรียกว่า FAME (Fatty acid Methyl Ester) กับเครื่องยนต์ดีเซลพบว่าน้ำมันที่ได้มีความหนืดใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลและในปีพ.ศ. 2543 เกิดวิกฤตการณ์น้ำมันทำให้ประเทศไทยเริ่มตื่นตัวและวิจัยเรื่องพลังงานทดแทนอีกครั้งและพ.ศ. 2544 ชาวบ้านอำเอทับสะแกร่วมมือกันพัฒนาและผลิตไบโอดีเซลด้วยมะพร้าวเป็นผลสำเร็จสามารถเปิดสถานีจำหน่ายน้ำมันไบโอดีเซลเป็นแห่งแรกในประเทศไทยและจำหน่ายให้แก่เกษตรกรเพื่อใช้ทดแทนน้ำมัน [42]

กระบวนการผลิตไบโอดีเซล

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลหรือการสังเคราะห์สารเอสเตอร์จากน้ำมันพืช/ไขสัตว์แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ [43]

1. **ไบโอดีเซลที่ใช้น้ำมันของพืชหรือไขมันจากสัตว์โดยตรง** (Direct used)

น้ำมันพืชหรือน้ำมันจากไขมันสัตว์ เช่น ใช้น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม หรือน้ำมันจากไขสัตว์ เช่น น้ำมันหมู เป็นต้น ป้อนลงไปในเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่ต้องผสมหรือเติมสารเคมีอื่นใด

ตารางที่ 2-13 สรุปข้อดีและข้อเสียของการใช้น้ำมันพืชเสมือนเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล [42, 44]

ข้อดี	ข้อเสีย
- เป็นของเหลวเบาโดยธรรมชาติขนส่งเคลื่อนย้ายได้สะดวก(liquid nature Portability) - มีค่าความร้อน (Heating value) สูงอยู่ในราว80% ของน้ำมันดีเซล - พร้อมใช้งานและหาง่าย (ready availability) - สามารถนำน้ำมันพืชใช้แล้วกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้ (renewable)	- น้ำมันพืชหรือสัตว์มีปัญหาค่อนข้างมาก เนื่องจากมีคุณสมบัติต่างกับดีเซลค่อนข้างมาก และมีปัญหาเรื่องการสันดาปไม่สมบูรณ์ เครื่องสะดุด มีผลต่อลูกสูบและวาล์ว มีตะกรันขาวอยู่ในถังน้ำมัน - ความหนืดสูงที่อุณหภูมิต่ำลงทำให้ จากที่สตาร์ทไม่ค่อยจะติดอยู่แล้วกลายเป็นไม่ติดไปเลยในที่อากาศเย็นๆ - ความสามารถในการระเหยกลายเป็นไอได้ต่ำ - มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัวสูงรวมตัวเป็นยางเหนียวเนื่องจากโมเลกุลมีขนาดใหญ่ทำให้เผาไหม้ไม่สมบูรณ์

2. **ไบโอดีเซลแบบลูกผสม**

ไบโอดีเซลประเภทนี้เป็นลูกผสมระหว่างน้ำมันพืชหรือน้ำมันจากไขมันสัตว์กับน้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซลหรืออะไรก็ได้ เพื่อให้ไบโอดีเซลที่ได้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด

ข้อเสียของไบโอดีเซลชนิดนี้จะลดปัญหาเรื่องความหนืดลงไปได้บ้าง แต่ก็ยังมีปัญหาตอนที่อากาศเย็น และปัญหาเรื่องการอุดตันของเครื่องยนต์คือ ไส้กรองจะอุดตันเร็วกว่าปกติ สำหรับปัญหาอื่นๆไม่มี คุณสมบัติ ส่วนมากจะเหมือนกับน้ำมันดีเซล เครื่องจะเดินเรียบไม่มีปัญหาเรื่องสะดุดกุกกักเหมือนแบบแรก เครื่องสตาร์ทติดง่าย (แต่ควรมีการอุ่นน้ำมันก่อน) เหมาะสำหรับการใช้กับเครื่องยนต์รอบต่ำ หรือเครื่องจักรกลการเกษตร [42]

3. **ไบโอดีเซลแบบปฏิกิริยาเคมี (แบบเอสเตอร์)**

ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์เป็นความหมายของ “ไบโอดีเซลที่แท้จริง” โดยมีคำจำกัดความว่าเป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติเหมือนกับ “น้ำมันดีเซล” มากที่สุดทำให้ไม่มีปัญหากับเครื่องยนต์ ได้น้ำมันที่มีความคงตัวมากขึ้นสามารถนำไปเติมในเครื่องยนต์ดีเซลได้ทุกชนิดทั้งเติมโดยตรงและ

ผสมลงในน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนต่างๆ เช่น B5 หมายถึงการผสมไบโอดีเซลต่อน้ำมันดีเซลในอัตราส่วน 5:95 หรือ B100 ซึ่งเป็นน้ำมันไบโอดีเซล 100 % เป็นต้น แต่ปัญหาคือต้นทุนการผลิตมีราคาแพงกว่าเมื่อเทียบกับไบโอดีเซลแบบอื่นๆปัจจุบันราคาของน้ำมันไบโอดีเซลยังสูงกว่าน้ำมันดีเซล 1-2 เท่าตัว อย่างไรก็ตามการนำมาใช้กับเครื่องยนต์มักจะนำน้ำมันดีเซลมาผสมด้วยซึ่งในปัจจุบันได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในระบบขนส่งมวลชน เนื่องจากเป็นน้ำมันที่มีราคาไม่ต่างจากน้ำมันดีเซลมากนัก นอกจากนี้เผาไหม้ได้อย่างหมดจดไม่มีเขม่าควันหลงเหลือให้เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมจากความนิยมเป็นอย่างมากเช่นนี้ทำให้ปั๊มน้ำมันจำนวนมากนำไบโอดีเซลมาบริการให้กับลูกค้าเชื้อเพลิงชนิดนี้ มีความหนืดใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล และมีความคงตัวความหนืดเปลี่ยนแปลงได้น้อยมาก เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน จุดวาบไฟของไบโอดีเซลมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้มีความปลอดภัยในการใช้และการขนส่ง [43] ดังนั้นเราจะมาทำความรู้จักไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์กันให้มากขึ้นดังแสดงในตารางที่ 2-14

ตารางที่ 2-14 แสดงคุณสมบัติของไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล [43]

Fuel Property	Diesel	Biodiesel
Fuel Standard	ASTM D975	ASTM D6751
Lower Heating Value, Btu/gal	~129,050	~118,170
Kinematic Viscosity, @ 40°C	1.3 - 4.1	4.0 – 6.0
Specific Gravity, @ 60°F	0.85	0.88
Density, lb/gal @ 15°C	7.079	7.328
Water and Sediment, vol%	0.05 max	0.05 max
Carbon, wt%	87	77
Hydrogen, wt%	13	12
Oxygen, by dif. Wt%	0	11
Sulfur, wt%	0.05 max	0.0 to 0.0024
Boiling Point, °C	180 to 340	315 to 350
Flash Point, °C	60 to 80	100 to 170
Cloud Point, °C	-15 to 5	-3 to 12
Pour Point, °C	-35 to -15	-15 to 10
Cetane Number	40 - 55	48 - 65
Lubricity SLBOCLE, grams	2,000 – 5,000	7,000
Lubricity HFRR, microns	300 - 600	< 300

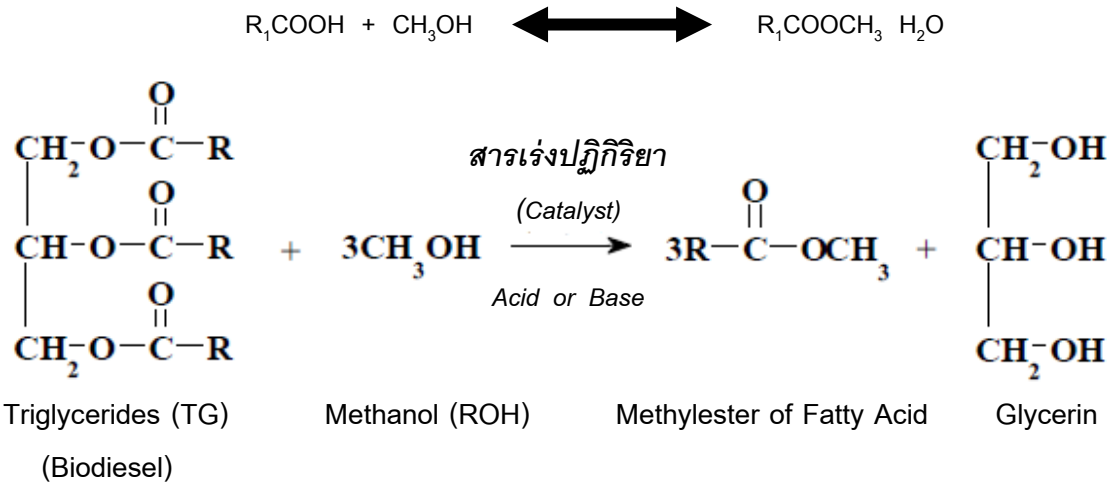
ตารางที่ 2-15 แสดงเทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลทั้ง 3 กระบวนการ [6, 45]

เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซล	รายละเอียด	ข้อดี	ข้อเสีย
กระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (Transesterification Process)	- เป็นปฏิกิริยาที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้แอลกอฮอล์หรือเมทานอลเป็นตัวทำปฏิกิริยา	- เป็นเทคโนโลยีที่มีการลงทุนไม่สูงนัก เนื่องจากเป็นกระบวนที่ใช้อุณหภูมิต่ำและความดันต่ำกว่า 2 บรรยากาศ - ผลผลิต (Yield) ที่ได้ของปฏิกิริยานี้สูงถึง 98%	- กระบวนการนี้จะไม่เหมาะสมกับวัตถุดิบที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง (มากว่า 2%) เนื่องจากจะเกิดสบู่ และส่งผลให้ผลผลิต (Yield) ที่ได้ลดลง
กระบวนการเอสเตอริฟิเคชัน (Esterification Process)	- เป็นปฏิกิริยาที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้แอลกอฮอล์หรือเมทานอลเป็นตัวทำปฏิกิริยา	- สามารถใช้ได้กับวัตถุดิบทุกชนิดและค่ากรดไขมันอิสระ(Free Fatty Acid: %FFA) ทุกระดับ	- ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน - ใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าใช้เบสเป็นสารเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตต่อหน่วยสูงกว่า

ตารางที่ 2-15 แสดงเทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลทั้ง 3 กระบวนการ [6, 45] (ต่อ)

เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซล	รายละเอียด	ข้อดี	ข้อเสีย
	- ขั้นตอนที่ 1 เป็นปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน - ขั้นตอนที่ 2 เป็นปฏิกิริยา ทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน	- เป็นการแก้ปัญหาจุดด้อยของ 2 กระบวนการที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นสามารถใช้ได้กับน้ำมันที่มีค่ากรดไขมันอิสระสูงในขณะเดียวกันก็มีการใช้พลังงานที่ต่ำ โดยหลักการ คือ ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนกรดไขมันอิสระที่อยู่ในน้ำมันให้กลายเป็นเอสเตอร์ก่อนที่เป็นปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันจากนั้นจึงใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน	- ถึงแม้ว่ากระบวนการนี้จะใช้จะใช้พลังงานต่ำกว่ากระบวนการเอสเตอริฟิเคชันที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้นตอนเดียว แต่หากวัตถุดิบมีค่ากรดสูงมากๆ กระบวนการในขั้นตอนแรกจะใช้เวลามากขึ้น ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตต่อหน่วยของไบโอดีเซลสูงขึ้นตามไปด้วย

ปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชันหรือปฏิกิริยาแอลกอฮอล์ไลซิส (Alcoholysis) เป็นปฏิกิริยาเพื่อเป็นโครงสร้างของน้ำมันจากไตร์กลีเซอร์ไรด์ (Triglycerides) ให้เป็นโมโนอัลคิลเอสเตอร์ (Mono Alkyl Ester) ได้แก่ เมทิลเอสเตอร์ (Methyl Ester) หรือเอทิลเอสเตอร์ (Ethyl Ester) ขึ้นกับชนิดของแอลกอออล์ที่นำมาทำปฏิกิริยาและได้กลีเซอรีน (Glycerine หรือGlycerol) เป็นผลพลอยได้ [43] ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 2-15



รูปที่ 2-15 แสดงปฏิกิริยาเอสเตอร์และปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน [43]

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน ประกอบด้วยปฏิกิริยา 3 ขั้นตอน ขั้นตอนแรก น้ำมันพืชหรือไตรกลีเซอไรด์ (TG)ทำปฏิกิริยากับเมทานอล (ROH) เกิดเป็นเมทิลเอสเตอร์ (ME)หรือไบโอดีเซลกับไดกลีเซอไรด์ (DG)ทำปฏิกิริยาต่อกับเมทานอล (ROH) เกิดเป็นเมทิลเอสเตอร์กับโมโนกลีเซอไรด์ ในขั้นตอนสุดท้าย โมโนกลีเซอไรด์ (MG) ทำปฏิกิริยาต่อกับเมทานอลเกิดเป็นเมทิลเอสเตอร์กับกลีเซอรอล ซึ่งสามารถแสดงเป็นสามารถดังรูปที่ 2-16 [6]

$$TG + ROH \underset{k_2}{\overset{k_1}{\rightleftharpoons}} DG + R'CO_2R$$

$$DG + ROH \underset{k_4}{\overset{k_3}{\rightleftharpoons}} MG + R'CO_2R$$

$$MG + ROH \underset{k_6}{\overset{k_5}{\rightleftharpoons}} GL + R'CO_2R$$

Overall reaction :

$$TG + 3ROH \underset{k}{\overset{k}{\rightleftharpoons}} 3R'CO_2R + GL$$

รูปที่ 2-16 แสดงปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน ทั้ง 3 ขั้นตอน [46]

การผลิตไบโอดีเซลในเชิงอุตสาหกรรมอาจเป็นกระบวนการแบบต่อเนื่องหรือแบบไม่ต่อเนื่องก็ได้ แต่มักเป็นปฏิกิริยาที่ใช้เบสเป็นสารเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่มีความคุ้มทางเศรษฐศาสตร์สูงสุดด้วยเหตุผล ดังต่อไปนี้

- เป็นกระบวนการทางเคมีที่ใช้สภาวะในการผลิตที่อุณหภูมิและความดันต่ำและใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาสั้นกว่าการใช้กรดเป็นสารเร่งปฏิกิริยา
- เป็นกระบวนการที่ให้ผลได้หรือ Yield สูงและควบคุมการผลิตได้ง่าย
- ไม่ต้องใช้วัสดุที่ต้องทนต่อความดันสูงในการสร้างอุปกรณ์การผลิตทำให้ค่าใช้จ่ายในการสร้างอุปกรณ์การผลิตต่ำลง

ตารางที่ 2-16 แสดงเทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลในเชิงพาณิชย์ทั้ง 2 แบบ [42]

เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลในเชิงพาณิชย์	**ข้อดี**	**ข้อเสีย**
แบบต่อเนื่อง (Batch Technology)	เทคโนโลยีนี้ใช้เงินลงทุนต่ำ	เป็นการผลิตแบบไม่ต่อเนื่องทำให้ผลิตได้คราวละไม่มากและผลผลิตมีคุณภาพไม่สม่ำเสมอ
แบบไม่ต่อเนื่อง (Continuous Trans-Esterification)	ให้ผลผลิตที่มีคุณภาพดีกว่า และมีกำลังการผลิตสูงกว่า	เป็นกระบวนการผลิตที่ต้องใช้เงินลงทุนสูงกว่าแบบแรก

สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันต้องการอัตราส่วนแอลกอฮอล์ต่อไตรกลีเซอไรด์เป็น 3 โมล ต่อ 1 โมลแต่ในทางปฏิบัติต้องการอัตราส่วนที่สูงมากเกินพอ เพื่อผลักให้ปฏิกิริยาไปข้างหน้ามากที่สุด เพื่อให้ได้เอสเตอร์สูงสุด

โดยปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและมีความสำคัญต่อผลผลิตได้ (yield) ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลได้แก่ ชนิดและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา, ชนิดของแอลกอฮอล์, อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน, อุณหภูมิของปฏิกิริยา, เวลาในการทำปฏิกิริยา, ชนิดของน้ำมัน, การผสมสารตั้งต้น, ความบริสุทธิ์ของสารตั้งต้น,คุณภาพของน้ำมัน เช่น ปริมาณของกรดไขมันปริมาณน้ำในวัตถุดิบ เป็นต้น

2.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน

ตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน ได้แก่

ก. ผลของกรดไขมันอิสระในน้ำมัน (Free Fatty Acid ; FFA)

ในวัตถุดิบควรมีปริมาณไม่สูงกว่าร้อยละ 3 ถ้ามีปริมาณสูงกว่าจะทำให้กรดไขมันอิสระทำปฏิกิริยากับด่างเกิดเป็นสบู่ ดังนั้นในการนำน้ำมันที่ใช้แล้วจึงจำเป็นต้องลดปริมาณกรดไขมันอิสระลงให้น้อยกว่าร้อยละ 2 ก่อนที่จะทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันด้วยด่าง เพื่อใช้เป็นน้ำมันตั้งต้นในกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลต่อไป [43]

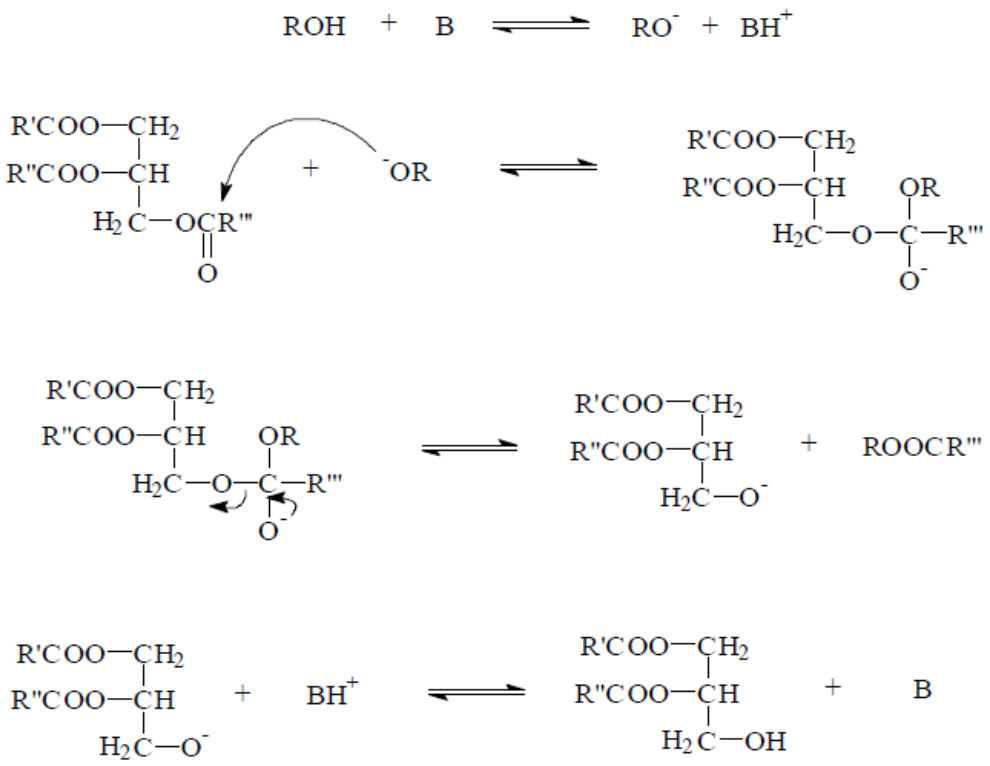
ข. ผลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาและชนิดของตัวเร่ง

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอาเตอริฟิเคชัน ได้แก่ เบส เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโซดาไฟ (Sodium hydroxide: สูตรโมเลกุล NaOH), โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์หรือด่างคลี (Potassium Hydroxide: สูตรโมเลกุล KOH), โซเดียมเมทอกไซด์ (Sodium methoxide : สูตรโมเลกุล CH_3ONa) หรือกรด เช่น กรดซัลฟิวริกหรือกรดกำมะถัน (Sulfuric acid: สูตรโมเลกุล H_2SO_4), กรดไฮโดรคลอริก หรือ กรดเกลือ (Hydrochloric acid : สูตรโมเลกุล HCl) และเอนไซม์ เช่น ไลเปส ซึ่งเมื่อพิจารณาตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิด พบว่าในกระบวนการผลิตของโรงงานนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสมากกว่ากรด เนื่องจากสามารถเร่งปฏิกิริยาได้เร็วกว่า ซึ่งกลไกการเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2-17 อีกทั้งยังกัดกร่อนน้อยกว่ากรด ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า

วิธีใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส

ดังนั้นกลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งชนิดเบสมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ปฏิกิริยาของเบสกับแอลกอฮอล์ได้แอลคอกไซด์ (RO^-) กับเบสที่ถูกโปรโตเนต (BH^+)
2. แอลคอกไซด์ชนกับหมู่คาร์บอนิลของไตรกลีเซอไรด์ได้เป็นสาร Tetrahedral intermediate (โครงสร้างทรงสี่หน้า)
3. การจัดอิเล็กตรอนที่หมู่คาร์บอนิลให้แอลคิลเอสเตอร์และเกิดประจุลบที่ไดกลีเซอไรด์ (หรือไตรกลีเซอไรด์แอนไอออน
4. ไตรกลีเซอไรด์แอนไอออนดึงโปรตอนที่อยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาได้เป็นไดกลีเซอไรด์และตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปที่ว่องไวเหมือนเดิม



เมื่อ B = Base catalyst

R_1, R_2, R_3 = Carbon chain of the fatty acid

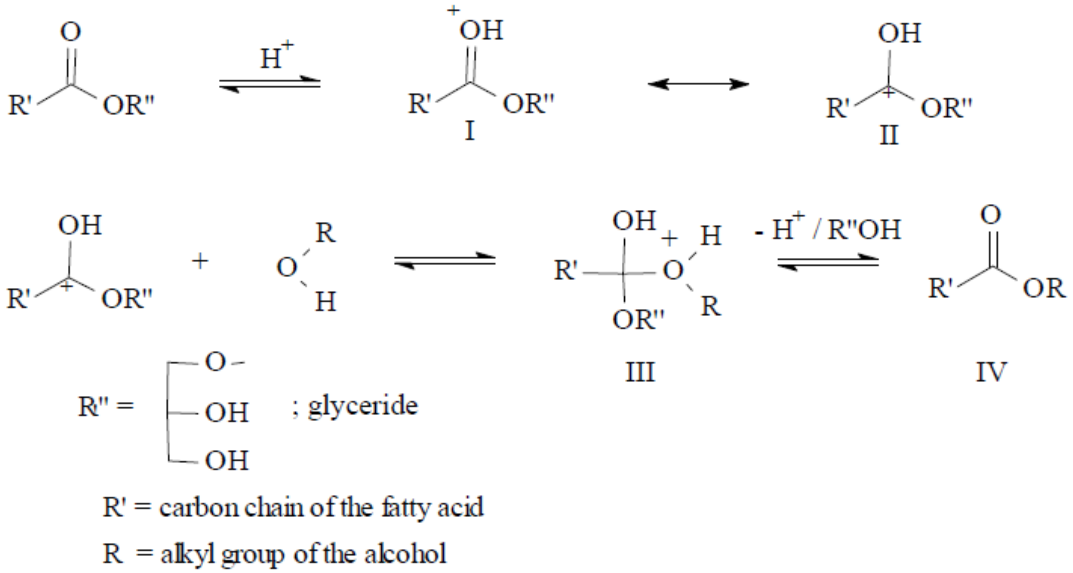
R = Alkyl group of alcohol

รูปที่ 2-17 กลไกปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในน้ำมันพืช [48]

วิธีใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันสามารถเร่งปฏิกิริยาได้ด้วยกรด Brownsted เช่น กรดซัลโฟนิค กรดซัลฟิวริก การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ให้ร้อยละผลิตภัณฑ์ค่อนข้างสูง แต่เกิดปฏิกิริยาช้ามาก โดยต้องทำในสภาวะที่อุณหภูมิมากกว่า 100 องศาเซลเซียส ใช้เวลามากกว่า 3 ชั่วโมงเพื่อทำให้ปฏิกิริยาเกิดอย่างสมบูรณ์ [45]

กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้กรด Brownsted เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเริ่มจากโปรตอนไปโปรโตเนตที่หมู่คาร์บอนิลของเอสเตอร์ทำให้เกิดคาร์โบแคทไอออน หลังจากนั้นจึงเกิดการชนด้วยนิวคลีโอไฟล์ของแอลกอฮอล์เกิด tetrahedral intermediate โดย intermediate จะปล่อยกลีเซอรอล ออกมาทำให้เกิดเอสเตอร์ใหม่และตัวเร่งปฏิกิริยาใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 2-18



รูปที่ 2-18 กลไกปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในน้ำมันพืช [48]

ตารางที่ 2-17 การเปรียบเทียบความแตกต่างของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งชนิดเบสกรดและเอนไซม์ [49]

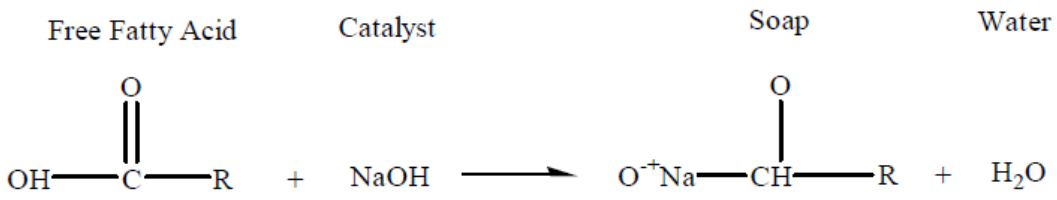
ตัวแปร	**ตัวเร่งชนิดเบส**	**ตัวเร่งชนิดกรด**	**เอนไซม์ไลเปส**
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส : °C)	60 - 70	50 -80	30 - 50
กรดไขมันอิสระในน้ำมัน	เกิดสบู่ (Soaps)	เกิดเอสเทอร์ (Ester)	เกิดเอสเทอร์(Ester)
น้ำในน้ำมัน	มีผลกระทบต่อการเกิดปฏิกิริยา	มีผลกระทบต่อการเกิดปฏิกิริยา	ไม่มีผลกระทบต่อการเกิดปฏิกิริยา
ปริมาณผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์	ปกติ	ปกติ	สูง
การ Recovery กลีเซอรอล	ยาก	ยาก	ง่าย
การทำให้เมทิลเอสเทอร์บริสุทธ์	ทำการล้างซ้ำ	ทำการล้างซ้ำ	ไม่ต้องล้าง
เวลาที่การกำปฏิกิริยา	1-2 Hr.	8-70 Hr.	4-70 Hr.
ราคา	ถูกที่สุด	ถูกกว่า	ค่อนข้างแพง

จากตารางที่ 2-17 เป็นการรวบรวมข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบข้อแตกต่างของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสกรดและเอนไซม์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสที่ความเข้มข้น 0.5 – 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะทำให้ผลได้ผลิตภัณฑ์ (Yield) 94 – 99 เปอร์เซ็นต์ การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเบสไม่ได้เป็นการช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดมากขึ้นแต่กลับเพิ่มค่าใช้จ่ายในขั้นตอนของการล้างเอาตัวเร่งปฏิกิริยาเบสออกจากผลิตภัณฑ์ [16] สำหรับการเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส ระหว่าง NaOHและ KOH ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันมากนักต่อการทำปฏิกิริยาผลิตไบโอดีเซลแต่ความแตกต่างจะอยู่ที่ราคาและตัวประจุบวกคือ Na^+และ K^+ซึ่งจะปะปนออกมากับน้ำล้างไบโอดีเซล โดย K^+ จะมีความเป็นพิษน้อยกว่า Na^+ สามารถนำไปเป็นปุ๋ยได้ ส่วน Na^+ที่ปนมาในน้ำเป็นพิษ จึงต้องมีการบำบัดน้ำเสียนั้นก่อน [50]

ค. ผลของความชื้นหรือการมีอยู่ของน้ำ [43, 45]

น้ำมันจากพืชซึ่งใช้เป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันควรที่จะไม่ให้มีน้ำเนื่องจากน้ำจะให้ผลด้านลบต่อปฏิกิริยา น้ำมันที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระอยู่มาก การใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาเบส เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งจะไม่เข้าทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ ทำให้ไม่เกิดแอลคอกไซด์ที่จะไปทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ แต่มันจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระ [45] ถ้าระบบมีน้ำหรือมีกรดไขมันอิสระในปริมาณมากจะทำให้เกิดปฏิกิริยาซาพอนิฟิเคชัน (Saponification) เป็นเกลือของกรดไขมันหรือสบู่แทน เมื่อมีน้ำอยู่มากทำให้เกิดการแยกชั้นของกลีเซอรินยากขึ้น ส่งผลให้ได้ร้อยละของผลผลิตที่ลดลง

ทั้งนี้เนื่องจากกรดไขมันสามารถทำปฏิกิริยากับเบสแก่ที่เติมลงไปเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส (NaOH ,KOH เป็นต้น) กลีเซอไรด์และแอลกอฮอล์ที่ใช้จะต้องไม่มีน้ำเป็นส่วนผสม เพราะน้ำเป็นสาเหตุทำให้เกิดสบู่ขึ้นในระหว่างการทำปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 2-19 สบู่ที่เกิดขึ้นจะไปลดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลงนอกจากนั้นยังส่งผลต่อคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลคือทำให้ค่าความหนืดสูงขึ้นส่งผลให้เกิดผลได้ของเอสเตอร์น้อยลง ทำให้น้ำมันมีลักษณะเป็นเจลและยากต่อการแยกไบโอดีเซลออกจากกลีเซอรอลได้ยาก



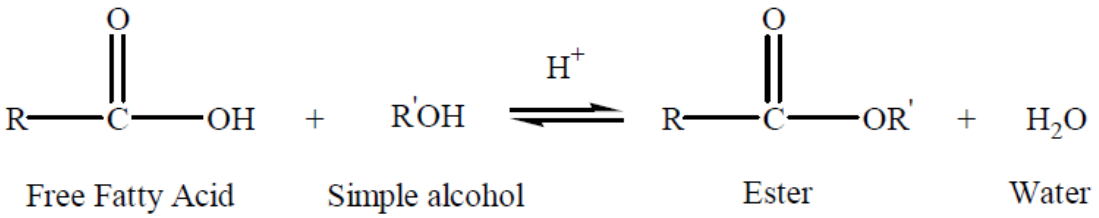
รูปที่ 2-19 แสดงปฏิกิริยาการเกิดสบู่ (Saponification) [51]

จากรูปที่ 2-19 เป็นปฏิกิริยาระหว่างสารพวกแอลคาไลด์กับกรดไขมันอิสระทำให้เกิดสบู่ [51] ซึ่งจะเห็นได้ว่าปัจจัยที่ทำให้ปฏิกิริยาการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเกิดสบู่ได้นอกจากน้ำแล้วยังมีกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid) ที่มีอยู่ในน้ำมันวัตถุดิบดังนั้นในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาน้ำมันวัตถุดิบควรมีค่าความเป็นกรด (Acid value) ไม่เกิน 4 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมเพราะการมีกรดไขมันอิสระในน้ำมันวัตถุดิบที่มากเกินไปจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ (ไบโอดีเซล) น้อยลง [52]

ง. ความบริสุทธิ์ของสารตั้งต้น (Purity of reactant)

ความบริสุทธิ์ของน้ำมันนั้นจะส่งผลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์ภายใต้สภาวะเดียวกัน โดยหากใช้น้ำมันที่ปราศจากสิ่งสกปรก พบว่าจะทำให้ได้ร้อยละของการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์สูงถึง 94-97% ซึ่งกรดไขมันอิสระหรือ Free Fatty Acid ในน้ำมันเริ่มต้นจะถูกตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามาแทรก ทำให้น้ำมันที่ได้ไม่ค่อยบริสุทธิ์ อย่างไรก็ตามถ้าทำปฏิกิริยาในสภาวะที่อุณหภูมิและความดันสูงๆ ก็สามารถแก้ปัญหานี้ได้ [45]

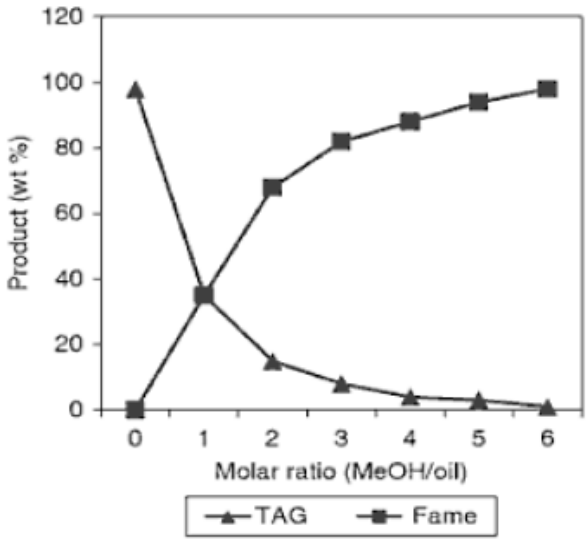
แต่สำหรับน้ำมันวัตถุดิบที่ค่าความเป็นกรดสูง (มากกว่า 4 มิลลิกรัมต่อกรัม) จะต้องนำน้ำมันมาทำการลดค่าความเป็นกรดลงโดยให้ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันซึ่งใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Acid esterification) ดังแสดงในรูปที่ 2-20 แล้วจึงนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปทำปฏิกิริยาทราส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาต่อ [52]



รูปที่ 2-20 ปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน [51]

จ. ผลของอัตราส่วนโดยโมลหรือสัดส่วนระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน

อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน (Ratio of Methanol)ถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลอย่างมากต่อการผลิตไบโอดีเซลเนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับเพราะฉะนั้นแอลกอฮอล์ที่ใช้ในปฏิกิริยาจะต้องใช้ในปริมาณที่มากเกินพอเพื่อที่จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดไปทางขวามากขึ้นซึ่งก็จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์มากขึ้นเช่นกัน [16]



รูปที่ 2-21 แสดงผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อเมทิลเอสเตอร์ (Fatty Acids Methyl Esters ;%FAME) และไตรกลีเซอไรด์ (Triglycerides ; TAG)[57]

จากรูปที่ 2-21 พบว่าอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันมีผลต่อเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ของปฏิกิริยาทรานเอสเตอร์ริฟิเคชันในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล หากยิ่งใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเพิ่มมากขึ้น เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเตอร์ยิ่งเพิ่มสูงขึ้น เช่น ในสภาวะอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 และปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ที่เหลือในเมทิลเอสเตอร์หลังจากผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันในสภาวะดังกล่าวมีปริมาณที่ลดน้อยลงตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ เมทิลเอสเตอร์และปริมาณของไตรกลีเซอร์มีปริมาณที่ลดลง นั่นคือ ปริมาณของไตรกลีเซอร์ของน้ำมันตั้งต้นมีความสำคัญต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันของกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

เมื่อดูจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอรีฟิเคชันในรูปที่ 2-21 พบว่า อัตราส่วนโดยโมลอยู่ที่ 3:1 แต่เนื่องจากปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาย้อนกลับได้ ดังนั้นเพื่อผลักดันปฏิกิริยาให้เกิดน้ำมันไบโอดีเซลสูงสุดจึงมักใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลและน้ำมันที่อัตราส่วน 6 : 1 ถึง 15: 1 [43] หรือหากสนใจในความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ต่อปริมาตรของน้ำมัน พบว่า ปริมาณของแอลกอฮอล์ที่เหมาะสมกับน้ำมันปาล์มใช้แล้ว คือ 20-25% โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์มใช้แล้ว [54] การใช้สัดส่วนเชิงโมลของเมทิลแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันเป็น 6:1 หรือมีค่าเท่ากับปริมาณเมทิลแอลกอฮอล์ (เมทานอล) ประมาณ 20% โดยน้ำหนักน้ำมัน [55]

ตารางที่ 2-18 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันตั้งต้นเมื่ออยู่ในรูปของหน่วยเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและปริมาตรของน้ำมันปาล์ม [28, 31, 40, 58, 59, 60]

การคิดคำนวณอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มที่ระดับ 6:1						
คุณสมบัติทางกายภาพ	**ชนิดของน้ำมันปาล์มในงานวิจัยที่ทำการศึกษา**					
	น้ำมันเมล็ดในน้ำมันปาล์ม [59]	**น้ำมันปาล์มยังไม่ผ่านการใช้** [60]	**น้ำมันปาล์มดิบ** [28]	**น้ำมันปาล์มใช้แล้ว** [31]	**น้ำมันพืชใช้แล้ว** [40]	**น้ำมันปาล์มใช้แล้ว** [58]
มวลโมเลกุลน้ำมัน (MV ; g/mol.)	702	702	843.12	978	813.13	841.12
ความหนาแน่นน้ำมัน (g/ml.)	0.925	N/A	N/A	0.92	N/A	N/A
น้ำหนักน้ำมันปาล์มที่ใช้ (g.)	100	6,961.60	400	100	100	60
ปริมาตรน้ำมันปาล์ม (ml.)	759	N/A	N/A	100	N/A	67.42
น้ำมันปาล์ม (mol.)	0.1425	9.9168	0.4744	0.1022	0.1230	0.0713

ตารางที่ 2-18 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันตั้งต้นเมื่ออยู่ในรูปของหน่วยเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและปริมาตรของน้ำมันปาล์ม [28, 31, 40, 58, 59, 60] (ต่อ)

การคิดคำนวณอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มที่ระดับ 6:1						
คุณสมบัติทางกายภาพ	**ชนิดของน้ำมันปาล์มในงานวิจัยที่ทำการศึกษา**					
	น้ำมันเมล็ดในน้ำมันปาล์ม [59]	**น้ำมันปาล์มยังไม่ผ่านการใช้** [60]	**น้ำมันปาล์มดิบ** [28]	**น้ำมันปาล์มใช้แล้ว** [31]	**น้ำมันพืชใช้แล้ว** [40]	**น้ำมันปาล์มใช้แล้ว** [58]
มวลโมเลกุลของเมทานอล (g/mol.)	32	32	32	32.04	32	32
ความหนาแน่นเมทานอล (g/ml.)	0.792	N/A	N/A	0.79	N/A	N/A
เมทานอล (mol.)	0.8547	59.5009	2.8466	0.6135	0.7379	0.4280
น้ำมันเมทานอลที่ใช้ (g.)	27.35	1,904.03	91.09	19.66	23.61	13.70
ปริมาตรเมทานอลที่ใช้ (ml.)	242	N/A	N/A	24.88	N/A	16.52
คิดเป็นเมทานอล (%โดยน้ำหนักน้ำมัน)	27.35	27.35	22.77	19.66	23.61	22.83
คิดเป็นเมทานอล (%โดยปริมาตรน้ำมัน)	31.88	N/A	N/A	24.88	N/A	24.50

จากผลการคำนวณจากงานวิจัยต่างๆ ในตารางที่ 2-18 พบว่า อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มตั้งต้นที่ระดับ 6:1 สำหรับน้ำมันปาล์มที่ยังไม่ผ่านการใช้นั้น มีค่าประมาณ 28% โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มหรือ 32% โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์มตั้งต้น และสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วนั้น มีค่าประมาณ 20 – 23%โดยน้ำหนักน้ำมันหรือ 25%โดยปริมาตรของน้ำมันตั้งต้น ดังนั้น เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทั้งในรูปของสัดส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันกับคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของน้ำมัน สามารถสรุปได้ว่า หากใช้สัดส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันหรือปริมาณเมทานอล เท่ากับ 6:1 หรือปริมาณเมทานอลเท่ากับ 25%โดยปริมาตรน้ำมันปาล์ม ถ้าคิดในหน่วยของเปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับน้ำหนักน้ำมันปาล์มจะมีค่าใช้เคียงกัน คือ ประมาณ 20% โดยน้ำหนักน้ำมันปาล์ม

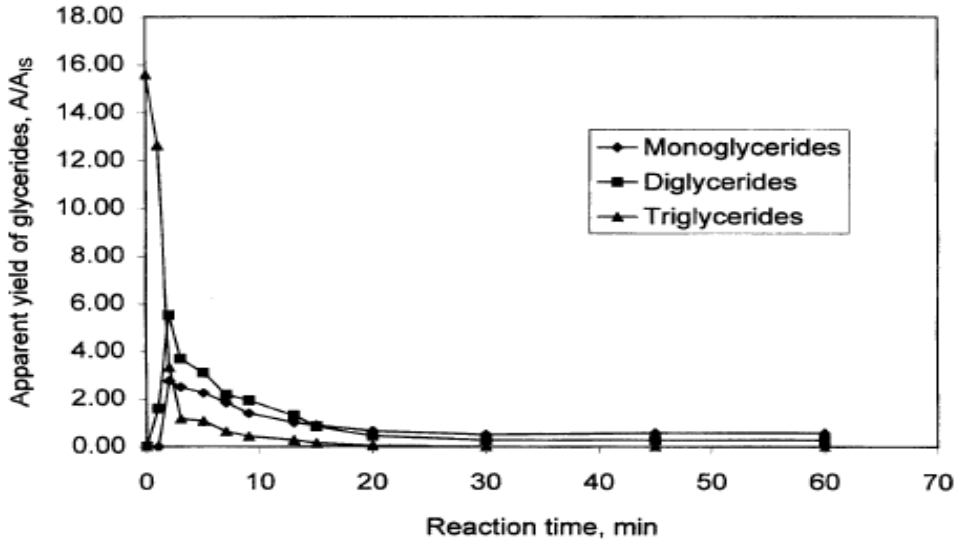
สำหรับในงานวิจัยนี้ ทำการทดลองต่อ Batch โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วปริมาตร 300 มิลลิลิตร (น้ำหนักประมาณ 276.78 กรัม) หากทำปฏิกิริยากับเมทานอลในปริมาณเท่ากับ 25% โดยปริมาตรของน้ำมัน คิดเป็น 75 มิลลิลิตรหรือน้ำหนักประมาณ 58.713 กรัม ดังนั้นเมื่อทำการเทียบสักส่วนเปอร์เซ็นต์ระหว่างปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับน้ำมันปาล์มใช้แล้วคิดเป็น 21.93 % โดยน้ำหนักน้ำมัน

ฉ. ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (Reaction Time)

การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันนั้น อัตราการเกิดไบโอดีเซลจะแปรผันโดยตรงกับเวลานั่นคือถ้าเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้นก็จะทำให้ได้ปริมาณเอสเทอร์มากขึ้น [61] อัตราเร็วในการเปลี่ยนน้ำมันให้เป็นน้ำมันไบโอดีเซลสูงขึ้นตามระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

เมื่อมีการเพิ่มเวลาในการทำปฏิริยาโดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงจะส่งผลต่อปริมาณการเกิดเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) คือ จากนาทีที่ 0 ถึง 20 นาทีอัตราการเกิดปฏิกิริยามีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแบบ Exponential และหลังจากช่วง 20 นาทีปริมาณการเกิดเมทิลเอสเตอร์จะเพิ่มสูงขึ้นและเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาผ่านไป 60 นาทีปริมาณเมทิลเอสเตอร์เริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady State)[62]

ดังนั้น หากถ้าเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาให้เพียงพอผลลัพธ์ของปฏิกิริยาที่ได้ก็จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์เช่นกัน แต่เนื่องจากปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาย้อยกลับได้ ดังนั้นจึงควรหาช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์หรือไบโอดีเซลสูงสุด [43]



รูปที่ 2-22 แสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณกลีเซอไรด์เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเปลี่ยน [47]

จากรูปที่ 2-22 พบว่า เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงไปปริมาณของกลีเซอไรด์ซึ่งประกอบด้วย ไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ เป็นต้น ซึ่งประเภทของกลีเซอไรด์ทั้ง 3 ประเภทมีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 10-20 นาทีแรกในการทำปฏิกิริยา แต่เมื่อหลังจาก 20 นาทีเป็นต้นไป ปริมาณของกลีเซอไรด์ทั้ง 3 ประเภทเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่

ช. ผลของอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา (Reaction Temperature)

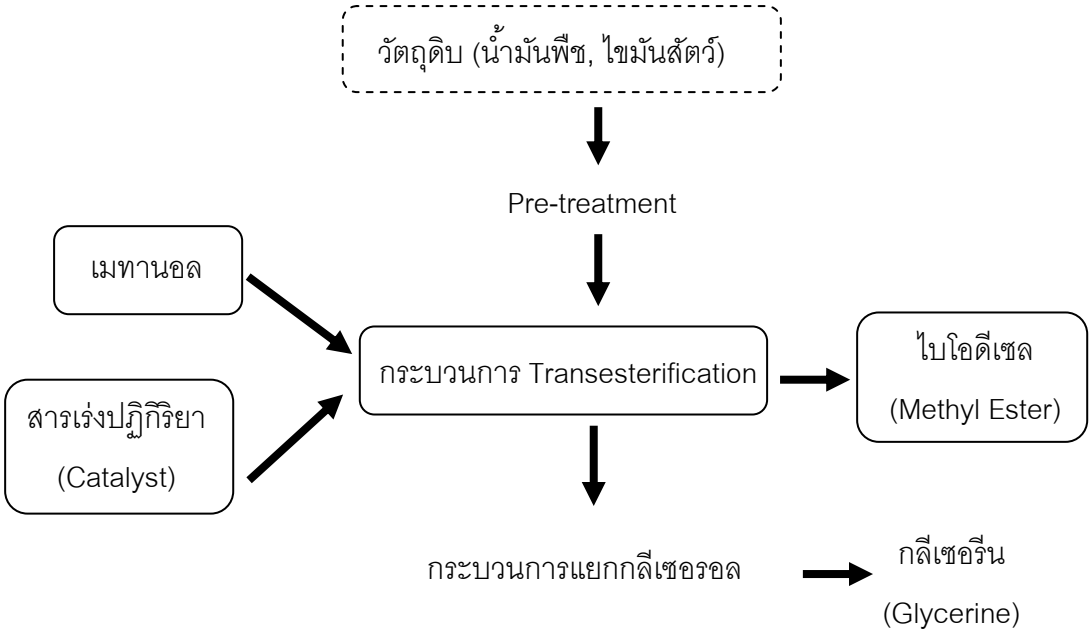
อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในการผลิตไบโอดีเซลอย่างมากหากการทำปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีความเหมาะสมหรือเพียงพอก็จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์เช่นกันภายใต้การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องแต่อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาโดยทั่วไปจะใช้อุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับจุดเดือด (Boiling Point) หรือไม่เกินของแอลกอฮอล์ที่ใช้ หากเลือกใช้เมทานอลซึ่งมีจุดเดือดอยู่ที่อุณหภูมิ 64.7 °C หรือที่ 148.4 °F (337.8 K)

จากการศึกษา พบว่า ระดับอุณหภูมิที่เหมาะสมหรือใช้ในการทดลองคือ 60 – 70 องศาเซลเซียสที่ความดันบรรยากาศ (โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา) [16] อัตราเร็วในการเปลี่ยนแปลงน้ำมันเป็นน้ำมันไบโอดีเซลสูงขึ้นตามอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้และเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic) ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มากขึ้นเช่นกัน [43]

ซ. ผลของอัตราการกวนผสม

การกวนผสมถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญมากสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน เนื่องจากน้ำมันหรือไขมันที่นำมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซลนั้นไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับแอลกอฮอล์และตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นจึงต้องมีการกวนผสมให้เนื้อสารสัมผัสกันปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจึงจะเกิดและได้เป็นไบโอดีเซล [61]

2.1.5 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล



รูปที่ 2-23 แผนภาพแสดงกระบวนการผลิตไบโอดีเซล [29]

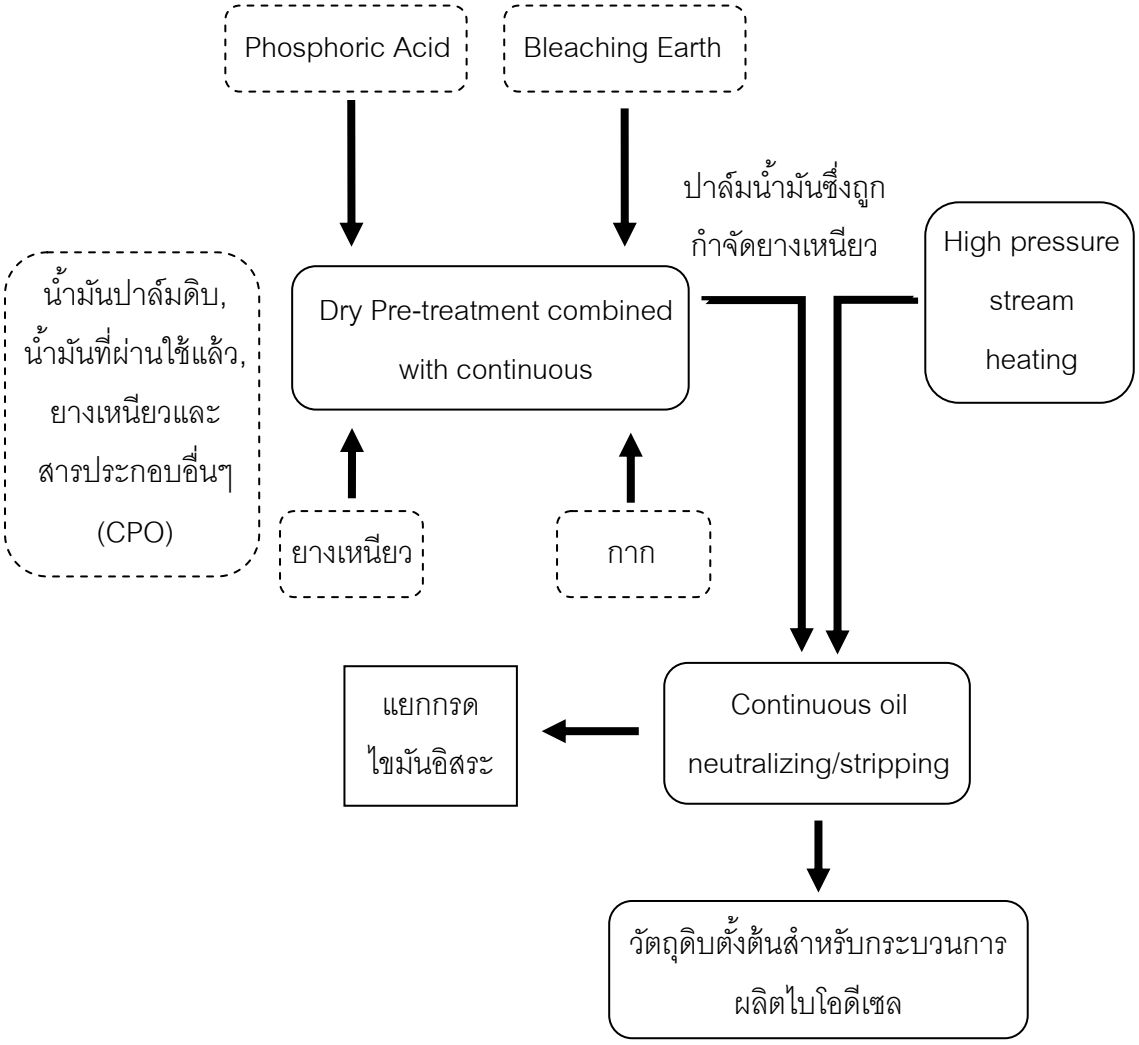
ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล

ขั้นตอนที่ (1.) : ขั้นตอนการเตรียมสารตั้งต้นก่อนการผลิต[63]

กระบวนการเตรียมและปรับสภาพน้ำมัน (Pre-Treatment Process)

เนื่องจากน้ำมันปาล์มดิบที่ได้มาจากโรงงานสกัดหรือน้ำมันที่ผ่านการใช้แล้วจะประกอบไปด้วยสารไม่พึงประสงค์ต่อการผลิตไบโอดีเซล เช่น Phospholipids, Lecithin, กรดไขมันอิสระฯลฯ อีกทั้งโครงสร้างทางกายภาพต่างๆ ของน้ำมันปาล์มดิบ เช่น ความชื้นยางเหนียว ไข กลิ่น สี เป็นต้น จะเป็นปัญหาและอุปสรรคต่อการผลิตไบโอดีเซลดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการกำจัดและปรับสภาพก่อนที่จะนำเข้าสู่กระบวนการผลิตต่างๆต่อไป [64]

ยางเหนียวและสีในน้ำมันปาล์มดิบหรือน้ำมันที่ผ่านการใช้แล้ว จะถูกแยกออกจากน้ำมันปาล์มดิบโดยการเติม Phosphoric Acid และ Bleaching Earth เข้าไปในกระบวนการและคัดแยกโดยเครื่องแยกแรงดันสูง หลังจากนั้นน้ำมันที่ไม่มียางเหนียว แล้วนั้นจะถูกนำไปผ่านการแยกกรดไขมันอิสระ (Palm Fatty Acid Distillated -PFAD) และน้ำที่ปนอยู่ออกไปโดยวิธีการระเหยและควบแน่นเพื่อกลายเป็นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (Refined Bleaching Deodorize – RBD Palm oil) ซึ่งเป็นวัตถุดิบตั้งต้นสำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลต่อไปซึ่งสามารถแสดงแผนภาพขั้นตอนการเตรียมน้ำมันในรูปที่ 2-24



รูปที่ 2-24 แผนภาพแสดงการเตรียมและปรับสภาพน้ำมัน [64]

ขั้นตอนที่ (2.) : **กระบวนการทำปฏิกิริยา** Transesterification (Reaction Step)

โดยการนำน้ำมันพืชบริสุทธิ์หรือน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่ผ่านการเตรียมแล้วมาผสมแอลกอฮอล์เช่นเมทานอล (Methanol) และใช้สารเร่งปฏิกิริยาเช่นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide: สูตรโมเลกุล NaOH), โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide: สูตรโมเลกุล KOH) ภายใต้อุณหภูมิสูงได้เป็นเมทิลเอสเตอร์หรือไบโอดีเซลพร้อมทั้งได้กลีเซอริน [63]

ตวงน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วที่ผ่านการต้มหรือกรองทิ้งให้ใส (ผ่านกระบวนการเตรียม)

โดยการนำน้ำมันพืชบริสุทธิ์หรือน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่ผ่านการต้มหรือกรองทิ้งให้ใส ซึ่งควรมีความใสไม่ขุ่นข้นตวงมาในปริมาณที่ต้องการ

ตวงแอลกอฮอล์ % ของน้ำมันปาล์มใช้แล้ว

ตวงแอลกอฮอล์ในปริมาตรที่เหมาะสม ควรระวังการสูดดมและสัมผัสเมทานอลควรใส่ถุงมือแว่นตากันสารและผ้าปิดจมูกจากนั้นเทเมทานอลลงขวดที่มีฝาปิดค่อยๆเทลงขวดให้เทโซดาไฟลงในเมทานอลแล้วปิดฝาไว้ป้องกันการระเหย [65]

ละลายตัวเร่งปฏิกิริยาในแอลกอฮอล์

ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมไว้ในปริมาณเหมาะสมที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นเขย่าหรือคนให้ละลายเข้ากันจนได้สารละลายใส (ห้ามเทเมทานอลลงโซดาไฟเด็ดขาด เพราะอาจทำให้เกิดความร้อนสูงและกระเด็นถูกร่างกายได้) ปิดฝาไว้หากละลายปริมาณมากควรใส่ถุงมือหนังกันความร้อนเพราะอาจเกิดความร้อนถึง 60 กว่าองศาเซลเซียส [63]

อุ่นน้ำมัน

อุ่นน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่เตรียมไว้ให้ได้อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)ที่เหมาะสมเมื่อได้อุณหภูมิตามต้องการให้ดับตะเกียงหรือแหล่งให้ความร้อน

การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน [63, 66]

เทสารละลายเบสที่ผสมกับแอลกอฮอล์แล้ว (เช่นโซดาไฟผสมกับเมทานอลเรียกว่าเมท็อกไซด์) ลงในน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่ร้อนที่ระดับอุณหภูมิที่ได้กำหนดไว้ในการออกแบบการทดลองลงในถังหรือขวดที่มีฝาปิดโดยเทผ่านกรวยกรอง (ป้องกันไม่ให้สารหกกระเด็น) เขย่าหรือกวนนานในช่วงระยะเวลาที่เหมาะสม สังเกตสีการเปลี่ยนแปลงและอุณหภูมิจะพบว่าถ้าเกิดไบโอดีเซลแน่นอนสีต้องเข้มขึ้นไม่ขุ่นข้นเหลืองครีมและอุณหภูมิจะสูงขึ้น

ขั้นตอนที่ (3.) : **กระบวนการแยกกลีเซอรีนออก** (Separator)

ทิ้งให้กลีเซอรีนแยกตัว

ภายหลังจากเขย่าหรือกวนตั้งทิ้งไว้ให้กลีเซอรีนแยกตัวจะเห็นการแยกชั้นชัดเจนระหว่างเมทิลเอสเตอร์ (ของเหลวสีเหลืองใส) กับกลีเซอรีน (สีน้ำตาลเหนียวถึงเป็นก้อน) หากเป็นการทดลองขนาดปริมาณน้อยๆประมาณไม่เกิน 1 ลิตรใช้เวลาแยกตัวประมาณ 2-4 ชั่วโมง (มีการจับเวลาทุกๆ 2 ชั่วโมง) ภายในหนึ่งชั่วโมงจะสังเกตเห็นการแยกชั้นไบโอดีเซลที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าจะแยกอยู่ชั้นบนและปริมาณกลีเซอรีนมีการตกออกมาเป็นส่วนของเหลวหนืดๆสีเข้มอยู่ด้านล่าง จากนั้นไขกลีเซอรีน ออกกลีเซอรีนที่ได้อาจมีปริมาณตั้งแต่ 5-20% [63]

ขั้นตอนที่ (4.) : **กระบวนทำความสะอาด** (Washing)

การล้างไบโอดีเซล

เป็นการนำเอาไบโอดีเซลที่แยกออกมาไปล้างน้ำเพื่อชะล้างแอลกอฮอล์สารเร่งปฏิกิริยาและสารปนเปื้อนอื่นๆที่สามารถละลายน้ำได้ การมีแอลกอฮอล์ที่เป็นส่วนเกินจากการทำปฏิกิริยาในน้ำมันสามารถทำให้เกิดการสึกหรอส่วนที่เป็นยางในน้ำมันได้และมีส่วนทำให้จุดวาบไฟของไบโอดีเซลต่ำลงอันอาจมีผลต่อความปลอดภัยและไม่ผ่านมาตรฐานได้ตามมาตรฐาน ASTM จะให้มีแอลกอฮอล์ปนอยู่ในไบโอดีเซลได้ไม่เกิน 0.2% เท่านั้นการล้างไบโอดีเซลจึงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพที่จะลดปริมาณแอลกอฮอล์ลงนอกจากนี้การล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำยังสามารถช่วยล้างสิ่งสกปรกอื่นๆเช่นคราบไขสบู่ในไบโอดีเซลได้เราจะสังเกตได้ว่าถ้าเราใส่ตัวเร่งปฏิกิริยามากเกินไปจะเกิดเห็นเป็น 3 ชั้นได้แก่ชั้นของไบโอดีเซลชั้นกลีเซอรีนและชั้นของไขสบู่ขาวขุ่นซึ่งอาจทำให้ปนเปื้อนในไบโอดีเซล ดังนั้นจึงควรล้างไบโอดีเซล [66]

กระบวนการล้างน้ำสามารถทำได้ดังนี้ [66]

- เทน้ำเปล่าสะอาดประมาณ 10-20% ลงในไบโอดีเซลเพื่อล้างตัวเร่งปฏิกิริยาออก
- ให้ไขชั้นล่างสุดคือชั้นน้ำออกมาก่อนชั้นนี้จะมีแอลกอฮอล์ออกมาด้วยแต่เพียงเล็กน้อยไม่เป็นพิษสามารถทิ้งลงพื้นดินหรือท่อน้ำทิ้งได้
- ล้างซ้ำด้วยวิธีการแบบเดิมอีกครั้งหรือสองครั้งไบโอดีเซลที่ได้จะใสขึ้นและน้ำชั้นล่างก็จะใสขึ้นด้วย
- วัดค่า pH ซึ่งไบโอดีเซลควรมีค่าใกล้เคียง 7 (คุณสมบัติเป็นกลาง)

ขั้นตอนที่ (5.) : กระบวนการกำจัดน้ำออกจากไบโอดีเซล (Drying) ได้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์

2.1.6 คุณสมบัติของไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นผลผลิตที่ได้จากน้ำมันพืชที่ผ่านกระบวนการทางเคมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล อย่างไรก็ตาม เนื่องจากน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซลมีองค์ประกอบและมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ทำให้ไบโอดีเซลยังคงมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากน้ำมันดีเซล ซึ่งบางคุณสมบัติเป็นข้อได้เปรียบและบางคุณสมบัติเป็นข้อเสียเปรียบ [10]

ไบโอดีเซลเป็นพลังงานหมุนเวียนสามารถผลิตได้จากพืชผลทางการเกษตร ซึ่งไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชต่างชนิดกันจะมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันพืชเป็นสารประกอบไตรกลีเซอไรด์ที่มีกรดไขมันอยู่ในโครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์ถึงร้อยละ 94-96% ของน้ำหนักโมเลกุล ทำให้คุณสมบัติของน้ำมันมีคุณสมบัติทั้งทางเคมีและทางกายภาพเป็นไปตามกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบอยู่ [6]

ข้อดีของไบโอดีเซล [68, 69]

1. เป็นพลังงานที่ปราศจากสารพิษ ถูกย่อยสลายง่ายปลอดสารกำมะถันและเบนซินซึ่งไม่เป็นสารก่อมะเร็งอีกทั้งไม่มีกลิ่นและควันพิษ
2. เป็นพลังงานที่ได้จากกระบวนการนำทรัพยากรที่ใช้แล้ว ได้แก่ การนำน้ำมันพืชชนิดต่างๆ มาผลิตเป็นไบโอดีเซลใช้เองในท้องถิ่น ซึ่งช่วยลดปริมาณการนำน้ำมันจากต่างประเทศ ยังช่วยประหยัดเงินตราและลดการนำเงินตราออกนอกประเทศ
3. ช่วยลดปัญหาภาวะเรือนกระจกที่ทำให้อุณหภูมิในชั้นบรรยากาศสูงขึ้น ซึ่งมีผลเสียต่อสุขภาพและสภาวะแวดล้อม
4. น้ำมันดีเซลมีกำมะถันสูงแต่น้ำมันไบโอดีเซลไม่มี ซึ่งช่วยหล่อลื่นแทนกำมะถันและลดฝุ่นละอองหรือควันดำให้ต่ำลง โดยไม่ทำให้เครื่องยนต์อุดตันเนื่องจากการเผาไหม้ไม่หมด
5. ไบโอดีเซลเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่สามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลทั่วไปได้ทันที อีกทั้งยังช่วยยืดอายุการใช้งานของเครื่องยนต์ดีเซล

ปัจจุบันน้ำมันไบโอดีเซลมีการผลิตจำหน่ายเป็นการค้า ซึ่งต้องมีคุณภาพตามมาตรฐานที่กำหนด เช่น มาตรฐานของสหรัฐอเมริกา ASTM D6751 และมาตรฐานยุโรป EN14214 สำหรับประเทศไทยได้มีประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน พ.ศ. 2550 เรื่อง “กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน” โดยได้อ้างอิงจากมาตรฐานคุณสมบัติไบโอดีเซลของประเทศสหรัฐอเมริกาและสหภาพยุโรป ดังตารางที่ 2-19

ตารางที่ 2-19 แสดงการเปรียบเทียบกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลของประเทศสหรัฐอเมริกา และการกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมันของประเทศไทย [70, 71]

คุณสมบัติ	**หน่วย**	**การกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลของประเทศสหรัฐอเมริกา** [70]		**การกำหนดลักษณะและคุณภาพประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมันของประเทศไทย** [71]	
		มาตรฐานทดสอบ	อัตราสูงต่ำ	มาตรฐานทดสอบ	อัตราสูงต่ำ
เมทิลเอสเตอร์ (Methylester)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	N/A	N/A	EN 14103	ไม่ต่ำกว่า 96.5
ความหนาแน่น ที่อุณหภูมิ 15°C	กิโลกรัม/ ลูกบาศก์เมตร	N/A	N/A	ASTM D1298	860 – 900
ค่าไอโอดีน	g. Iodine/100 g.	N/A	N/A	EN 14111	ไม่สูงกว่า 120
เมทานอล	ร้อยละโดยน้ำหนัก	N/A	N/A	EN 14110	ไม่สูงกว่า 0.20
กลีเซอรอลอิสระ	ร้อยละโดนน้ำหนัก	N/A	N/A	EN 14105	ไม่สูงกว่า 0.02
กลีเซอรอลทั้งหมด	ร้อยละโดนน้ำหนัก	N/A	N/A	EN 14105	ไม่สูงกว่า 0.25
จุดวาบไฟ	องศาเซลเซียส	ASTM D93	ไม่ต่ำกว่า 100	ASTM D93	ไม่ต่ำกว่า 120
ปริมาณเถ้าซัลเฟต	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ASTM D 874	ไม่สูงกว่า 0.02	ASTM D 874	ไม่สูงกว่า 0.02

ตารางที่ 2-19 แสดงการเปรียบเทียบกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลของประเทศสหรัฐอเมริกา และการกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมันของประเทศไทย [70, 71] (ต่อ)

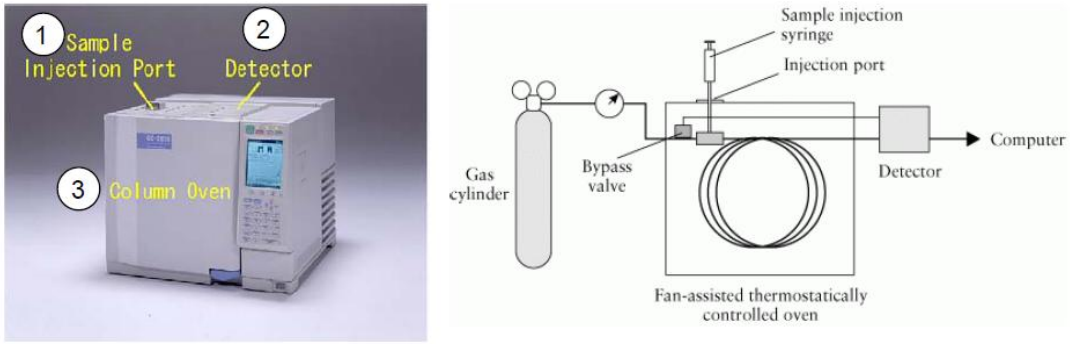
คุณสมบัติ	**หน่วย**	**การกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลของประเทศสหรัฐอเมริกา** [70]		**การกำหนดลักษณะและคุณภาพประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมันของประเทศไทย** [71]	
		มาตรฐานทดสอบ	อัตราสูงต่ำ	มาตรฐานทดสอบ	อัตราสูงต่ำ
น้ำ	ร้อยละโดยปริมาตร	ASTM D 1796	ไม่สูงกว่า 0.05	EN ISO 12937	ไม่สูงกว่า 0.05
กากคาร์บอน	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ASTM D 4530	ไม่สูงกว่า 0.05	ASTM D 4530	ไม่สูงกว่า 0.03
ความหนืด ที่อุณหภูมิ 40°C	เซนติสโตรก	ASTM D 445	1.9 – 6.0	ASTM D 445	3.5 – 5.0
ปริมาณกำมะถัน	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ASTM D 2622	ไม่สูงกว่า 0.05	ASTM D 2622	ไม่สูงกว่า 0.001
ค่าซีเทน	-	ASTM D 613	ไม่ต่ำกว่า 40	ASTM D 613	ไม่ต่ำกว่า 51
ค่าความเป็นกรด	mgKOH/g.	ASTM D 644	ไม่สูงกว่า 0.8	ASTM D 644	ไม่สูงกว่า 0.5

2.1.7 **การตรวจสอบและวิเคราะห์คุณภาพไบโอดีเซล** [6,67]

การตรวจสอบและวิเคราะห์คุณภาพไบโอดีเซลสามารถทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทั้งทางด้านกายภาพและทางเคมี สำหรับการทดสอบไบโอดีเซลแบบละเอียดอันได้แก่วิธีการ Gas Chromatography และการทดสอบอื่นๆตามมาตรฐานนั้นมีค่าใช้จ่ายที่สูงมากซึ่งเป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี สำหรับการทดสอบคุณสมบัติทั้งทางด้านกายภาพสามารถทำการทดสอบได้ด้วยสายตา [67]

เครื่อง Gas Chromatography (GC) [6]

เครื่อง Gas Chromatography (GC) เป็นเครื่องวิเคราะห์สารเคมี ซึ่งสามารถแยกสารผสมมากกว่าหนึ่งชนิดในสภาวะที่เหมาะสมและตรวจวัดสารตัวอย่างด้วย detector ตามคุณสมบัติเฉพาะทางเคมีพร้อมทั้งคำนวณหาชนิดและปริมาณของสารตัวอย่างเพื่อเทียบกับสารมาตรฐาน (Standard samples) ด้วยระบบคอมพิวเตอร์แบบอัตโนมัติ



รูปที่ 2-25 แสดงองค์ประกอบของเครื่อง Gas Chromatography (GC) [6]

การประยุกต์ใช้งานเครื่อง GC กับการวิเคราะห์ไบโอดีเซล [6]

- ตรวจวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอลอิสระกลีเซอรอลทั้งหมดและปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ไดกลีเซอไรด์และไตรกลีเซอไรด์ (EN 14105)
- ตรวจวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ปริมาณเมธิลเอสเตอร์ของกรดไขมันทั้งหมด (EN14103)

สำหรับงานวิจัยนี้ได้สนใจทำการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของไบโอดีเซลจำนวน 2 คุณสมบัติได้แก่

1. ค่าความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเตอร์ของการผลิตไบโอดีเซล (% FAME)
2. ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ของการผลิตไบโอดีเซล (%Yield)

การตรวจสอบค่ากรดไขมันอิสระ (%FFA) ในน้ำมันปาล์มใช้แล้ว [72]

สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ได้เลือกกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (Transesterification) โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วมาทำการวัดค่ากรดไขมันอิสระหรือ %FFA โดยการไตเตรทนั้นสามารถทำได้ทั้ง 2 วิธี คือ ทั้งด้วยวิธีการไตเตรทด้วยมือ (Manual) และวิธีการไตเตรทด้วยเครื่องอัตโนมัติ (Automatic Titrator)

รูปที่ 2-26 แสดงเครื่องไตเตรทอัตโนมัติ (Automatic Titrator) รุ่น Entry Level [72]

เครื่องไตเตรทอัตโนมัติ (Automatic Titrator) เป็นเครื่องสำหรับการไตเตรทแบบจุดยุติและจุดสมมูลสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร, น้ำและเคมี มีคุณสมบัติที่ใช้งานง่าย สะดวก รวดเร็ว อ่านค่าถูกต้องแม่นยำและกระทัดรัด [72] หากการวัดค่า %FFA ของ (กรดไขมันอิสระหรือ Free Fatty acid ; FFA) ต่ำกว่าร้อยละ 2 จึงสามารถเลือกใช้กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันสำหรับผลิตไบโอดีเซล โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการเอสเทอร์ริฟิเคชันก่อน ซึ่งกระบวนการเอสเทอร์ริฟิเคชันสามารถใช้ได้กับน้ำมันที่มีค่ากรดไขมันอิสระสูงในขณะเดียวกันก็มีการใช้พลังงานต่ำโดยหลักการคือใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนกรดไขมันอิสระที่อยู่ในน้ำมันให้เป็นสารเอสเทอร์ก่อนที่เป็นปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน

การไทเทรต เป็นวิธีการหาปริมาณของสารละลายมาตรฐาน (Standard Solution) สารที่ทราบค่าความเข้มข้นที่แน่นอนโดยให้ทำปฏิกิริยาพอดีกับสารละลายที่ไม่ทราบความเข้มข้น แต่ทราบปริมาตรและใช้การเปลี่ยนสีของอินดิเคเตอร์เป็นเกณฑ์ในการบอกจุดยุติ (End Point) เมื่อกรดและด่างทำปฏิกิริยากันพอดีกันตามจุดสมมูล (Equivalent Point) ก็จะทราบปริมาตรของสารละลายมาตรฐานแล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายอื่นได้ [73] ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการการเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์กรดไขมันอิสระด้วยการไตเตรททั้งวิธี Manual และด้วยเครื่องไตเตรทอัตโนมัติ ดังแสดงในตารางที่ 2-20

ตารางที่ 2-20 แสดงการเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์กรดไขมันอิสระด้วยการไตเตรททั้งวิธี Manual และด้วยเครื่องไตเตรทอัตโนมัติ [72, 73]

ขั้นตอน	**การไตเตรทด้วยวิธี Manual** [73]	**การไตเตรทด้วยเครื่องมืออัตโนมัติ** [72]
สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์	1. ตัวอย่างน้ำมันที่ต้องการไตเตรท ได้แก่ น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่ผ่านการปรับปรุงสภาพเตรียมผลิตไบโอดีเซล หรือเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล 2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 นอร์มอล เตรียมโดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 4 กรัมละลายในน้ำกลั่น ปรับปริมาตร 1 ลิตรเก็บสารละลายด่างในขวดแก้ว 3. ฟีนอฟทาลีนเข้มข้นร้อยละ 1	1. ตัวอย่างน้ำมันที่ต้องการไตเตรท 2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 นอร์มอล 3. เครื่องไตเตรทอัตโนมัติ 4. แอลกอฮอล์ (เอทานอล 95%)
วิธีการวิเคราะห์	1. ชั่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนักแน่นอน 1-10 กรัม ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร 2. เตรียมน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่ผ่านการปรับปรุงสภาพเตรียมผลิตไบโอดีเซลหรือสารละลายเมทิลแอลกอฮอล์ให้เป็นกลาง โดยเติมฟีนอฟทาลีน 5 หยดและปรับให้เป็นกลางด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 นอร์มัล หยดด่างทีละหยดพร้อมทั้งเขย่า(คน)จนได้สีชมพูถาวร 3. เติมน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่ผ่านการปรับปรุงสภาพเตรียมผลิตไบโอดีเซลหรือเมทิลแอลกอฮอล์ที่เป็นกลาง 50 มิลลิลิตรลงในตัวอย่าง เขย่าอย่างแรงให้ตัวอย่างละลายในแอลกอฮอล์ ถ้าละลายได้ไม่ดีให้อุ่นที่อุณหภูมิ 60-65 องศาเซลเซียส 4. ไตเตรทสารละลายตัวอย่างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 นอร์มัลขณะไตเตรทต้องเขย่าอย่างแรง จนกระทั่งได้สีชมพูคงที่อยู่ประมาณ 1 นาที	1. ชั่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนักแน่นอน 10 กรัม (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) 2. เตรียมแอลกอฮอล์ (เอทานอล 95%) 50 มิลลิลิตร 3. ผสมแอลกอฮอล์ลงในตัวอย่างน้ำมันที่เตรียมไว้ในข้อ (1.) 4. เติมน้ำมันตัวอย่างที่ผ่านการผสมแล้วใส่ในเครื่องไตเตรทอัตโนมัติ 5. ไตเตรทด้วยเครื่องเป็นเวลา15 นาที

ตารางที่ 2-20 แสดงการเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์กรดไขมันอิสระด้วยการไตเตรททั้งวิธี Manual และด้วยเครื่องไตเตรทอัตโนมัติ [72, 73] (ต่อ)

ขั้นตอน	**การไตเตรทด้วยวิธี Manual** [73]	**การไตเตรทด้วยเครื่องมืออัตโนมัติ** [72]
การอ่านค่า %FFA	คำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid; %FFA) จากสูตร กรดไขมันอิสระ =ปริมาณด่างที่ใช้ (มิลลิลิตร) x ความเข้มข้นด่าง (นอร์มัล) x 25.6 (ร้อยละ)น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม) ในรูปกรดโอเลอิก	อ่านค่าจากเครื่องไตเตรทอัตโนมัติ 1. ปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) 2. ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัลที่ใช้ในการไตเตรท (กรัม)

การคำนวณหาประสิทธิภาพของไบโอดีเซลที่ได้จากการผลิต

ค่าความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเตอร์ของการผลิตไบโอดีเซล (% FAME)

การคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (%FAME) [75, 76]

การคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซลโดยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟีตามมาตรฐาน EN 14103 ซึ่งใช้ Methyl Heptadeanoate เป็นสาร Internal Standard สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (2.1)

$$C = \frac{(\sum A) - A_{EI}}{A_{EI}} \times \frac{C_{EI} \times V_{EI}}{m} \times 100\% \qquad (2.1)$$

โดย

C = ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (%FAME) คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของเศษส่วนโดยมวล

$\sum A$ = พื้นที่รวมของเมทิลเอสเทอร์ซึ่งคิดตั้งแต่ C_{14} ถึง C_{24}

A_{EI} = พื้นที่ของ Methyl Heptadeanoate

C_{EI} = ความเข้มข้นของ Methyl Heptadeanoate (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)

V_{EI} = ปริมาตรของ Methyl Heptadeanoate (มิลลิลิตร)

M = น้ำหนักของตัวอย่างไบโอดีเซล (มิลลิกรัม)

ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซล

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผลได้ (Yield)[77]

ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ของการผลิตไบโอดีเซลหมายถึง ผลผลิตทของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน การการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผลได้ของไบโอดีเซล โดยสามารถคำนวณจากสมการที่ (2.2)

$$\text{Yield} = \frac{\text{weight of product (g.)}}{\text{weight of raw oil (g.)}} \times 100 \qquad (2.2)$$

โดย % Yield of Methyl ester = เปอร์เซ็นต์ผลได้ของไบโอดีเซล(%Yield)

weight of raw oil = น้ำหนักของน้ำมันวัตถุดิบเริ่มต้น (กรัม)

weight of product = น้ำหนักของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ (กรัม)

2.1.8 อุณหพลศาสตร์เคมี

อุณหพลศาสตร์เคมี (Thermochemistry) เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงพลังงานในปฏิกิริยาเคมี หรือเป็นการเปลี่ยนแปลงชนิดของสารเคมี โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นโดยมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานในรูปของความร้อนและงาน [78] โดยทั่วไปเป็นไปตามกฎ 2 ข้อ คือ

(1.) Law of conservation of mass หรือ กฎทรงมวล (มวลสารไม่สูญหาย)

: มวลสารก่อนทำปฏิกิริยาเคมีจะเท่ากับมวลของสารหลังทำปฏิกิริยาเคมี

$$A + B \rightarrow C + D$$

หรือ $$\text{mass A} + \text{mass B} = \text{mass C} + \text{mass D} \qquad (2.3)$$

(2.) Law of conservation of energy หรือ กฎการอนุรักษ์พลังงาน

: พลังงานย่อมไม่มีการสูญหาย แต่เปลี่ยนรูปได้

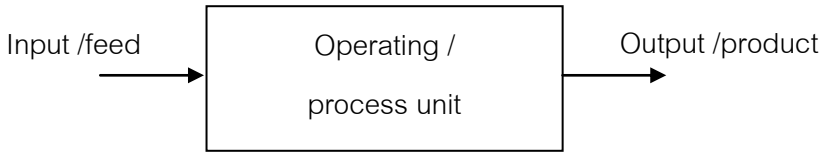
ปฏิกิริยาเคมี คือกระบวนการที่ประกอบด้วยการทำลายพันธะของสารตั้งต้น และ สร้างพันธะเพื่อเกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ซึ่งการทำลายพันธะ หมายถึง การดูดพลังงานและการสร้างพันธะ หมายถึง คายพลังงานปฏิกิริยาเคมีจะเป็นกระบวนการดูดพลังงานหรือคายพลังงานขึ้นกับความแตกต่างของพลังงานที่ใช้ในการทำลายพันธะของสารตั้งต้นและพลังงานที่คายออกมาจากการสร้างพันธะของสารผลิตภัณฑ์ [79]

- ปฏิกิริยาคายความร้อน หมายถึง พลังงานทำลายพันธะ < พลังงานสร้างพันธะ
- ปฏิกิริยาดูดความร้อน หมายถึง พลังงานทำลายพันธะ > พลังงานสร้างพันธะ

สมดุลมวลสาร (Mass balance) [80]

สมดุลมวลสารมาจากกฎทรงมวล (Law of conservation of mass) กล่าวคือ “มวลของสารไม่สามารถถูกสร้างขึ้นใหม่ หรือถูกทำลายได้” ดังนั้น จึงใช้สมดุลมวลในการติดตามความเป็นไปของมวลในกระบวนต่างๆ กระบวนการ (process) หรือ การปฏิบัติการ (operation) ซึ่งก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ หรือเคมีของสารใดๆ ที่เกี่ยวกับกระบวน ซึ่งประกอบด้วย

- สารที่เข้าสู่กระบวนการ หมายถึง input หรือ feed
- สารที่ออกจากกระบวนการ หมายถึง output หรือ product
- เครื่องมือ/อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง หมายถึง การปฏิบัติการ (operating/process unit)



รูปที่ 2-27 แสดงการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการ (process) [80]

จากสมการสมดุลมวลสารที่ (2.3) สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของมวลสารในกระบวนการได้ดังสมการที่ (2.4) ดังนี้

$$\text{input} - \text{output} + \text{generation} - \text{consumption} = \text{accumulation} \qquad (2.4)$$

มวลที่เข้าระบบ – มวลที่ออก +มวลที่เกิดขึ้นในระบบ – มวลที่ใช้ในระบบ = มวลที่สะสม

(1.) กรณีที่ระบบไม่มีปฏิกิริยาใดๆเกิดขึ้นในระบบ

หมายถึง generation และ consumption เท่ากับ 0 ส่งผลให้ มวลที่เข้าระบบ (input) ลบด้วยมวลที่ออก (output) เท่ากับมวลที่สะสม

(2.) กรณีที่ระบบอยู่ในสภาวะคงที่

หมายถึง จะไม่มีการสะสมของมวลในระบบ เรียกว่าสภาวะ Steady-state ซึ่งมวลที่สะสมเท่ากับ 0 ส่งผลให้ มวลที่เข้าระบบ เท่ากับมวลที่ออก (output)

(3.) กรณีที่ระบบอยู่ในสภาวะไม่คงที่

หมายถึง จะมีการสะสมของมวลในระบบ เรียกว่าสภาวะ Unsteady-state ซึ่งมวลที่สะสมไม่เท่ากับ 0 ส่งผลให้มวลที่เข้าระบบ (input) ลบด้วยมวลที่ออก (output) เท่ากับมวลที่สะสม

การเขียนสมดุลมวล[80]

อาจเขียนครอบคลุมกระบวนการทั้งหมด สมการที่ได้ คือ สมดุลมวลรอบกระบวนการทั้งหมด (overall mass balance)ถ้ากระบวนการเป็นแบบ multiple unit process อาจจะแยกพิจารณาเป็นระบบย่อยโดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

- เขียนมวลทั้งหมดของแต่ละ stream ที่เข้า ออก สมการนี้ เรียกว่าสมดุลมวลรวม (total mass balance)
- พิจารณาองค์ประกอบแต่ละชนิดภายใน stream เรียกว่าสมดุลมวลขององค์ประกอบ (components mass balance) เช่น solid balance, water balance
- หลักการเหมือน total mass balance แต่ว่าองค์ประกอบ (component) จะถูกพิจารณาเป็นตัวไป
- สมการที่ได้จากการทำ component MB จะเป็น n สมการ ซึ่งเท่ากับสมการ total MB รวมกับ n-1 component balance equation
- เวลาทำ balance สมการ ให้ทำเป็น mass fraction/mass percentage

$$\text{Mass fraction A} = \frac{\text{mass of component A}}{\text{Total mass of mixture containing A}} \quad (2.5)$$

$$\text{mass of component A} = \text{Mass fraction of A} \times \text{Total mass of mixture containing A} \quad (2.6)$$

ขั้นตอนการคำนวณเกี่ยวกับสมดุลมวล [78, 80]

(1.) รวบรวมข้อมูลทั้งหมดที่ทราบเกี่ยวกับสารที่เข้า ออกจากระบบ

(2.) วาดแผนผังกระบวนการ และเขียนขอบเขตของระบบที่ต้องการศึกษา

(3.) เขียนข้อมูลที่ทราบทั้งหมดลงบนแผนผังกระบวนการ

(4.) เลือกฐานการคำนวณ (basis of calculation)

(5.) เขียนสมการสมดุลมวล

(6.) แก้สมการ เพื่อหาค่าที่ต้องการ

2.1.9 การถ่ายเทความร้อน [78, 81]

การเปลี่ยนแปลงพลังงานในปฏิกิริยาเคมี (Energy Changes in Chemical Reactions) สำหรับปฏิกิริยาเคมีต้องมีการดูดกลืน (absorb) หรือ คาย (release) พลังงานซึ่งมักจะอยู่ในรูปของความร้อนและจะมีการถ่ายเทพลังงานความร้อนระหว่างระบบ กับ สิ่งแวดล้อม

- สิ่งแวดล้อม (Surroundings): ส่วนที่อยู่นอกระบบหรือไม่เกี่ยวข้องกับระบบแต่ได้รับผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระบบ
- ระบบ (System) : สารเคมีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางเคมีและทางกายภาพ ซึ่งระบบแบ่งเป็น 3 ชนิด

(1.) ระบบเปิด (opensystem) : ระบบที่มีการถ่ายเททั้งพลังงานและมวลสาร

(2.) ระบบปิด (closedsystem) : ระบบที่มีการถ่ายเทเฉพาะพลังงานแต่มวลสารไม่เปลี่ยนแปลง

(3.) ระบบโดดเดี่ยว (isolatedsystem) : ระบบที่ไม่มีการถ่ายเททั้งพลังงานและมวลสาร

เอนทัลปี (Enthalpy,ΔH)

- ปริมาณความร้อนที่ ไหลเข้า / ออก จากระบบที่ ความดันคงที่
- ΔH_{rxn} = H (products) -H (reactants)
- หาก ΔHติดลบ < 0 = Exothermic แต่ถ้า ΔHบวก >0 = Endothermic
- ตัวอย่าง เช่น $CH_4(g) + 2O_2(g) \rightarrow CO_2(g) + 2H_2O(l)$ ส่งผลให้$\Delta H = -890.4kJ$ เรียกว่า สมการอุณหเคมี (thermochemical equation) ซึ่งเป็นสมการที่แสดงการเกิดปฏิกิริยาและพลังงานที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยา

ปริมาณความร้อนของวัตถุ (HEAT, Q)[80, 81, 82]

เป็นพลังงานความร้อนที่วัตถุรับเข้ามาหรือคายออกจากการศึกษาผลของความร้อนต่อสสารหรือวัตถุในชั้นนี้จะศึกษาเพียงสองด้าน คือ

(1.) ความร้อนจำเพาะ (Specific heat)

หมายถึง พลังงานความร้อนที่ทำให้วัตถุมีอุณหภูมิสูงขึ้นหรือต่ำลงโดยสถานะยังคงรูปเดิม

(2.) ความร้อนแฝง (Latent Heat)

หมายถึง พลังงานความร้อนที่ทำให้วัตถุเปลี่ยนสถานะโดยอุณหภูมิคงที่

ความจุความร้อน (Heat capacity,C)

ความจุความร้อนคือความร้อนที่ทำให้สารทั้งหมดที่กำลังพิจารณามีอุณหภูมิเปลี่ยนไปหนึ่งหน่วย โดยสถานะไม่เปลี่ยนถ้าให้ปริมาณความร้อน ΔQ แก่วัตถุ ทำให้อุณหภูมิของวัตถุเปลี่ยนไป ΔT ดังนั้นถ้าอุณหภูมิของวัตถุเปลี่ยนไป 1 หน่วย จะใช้ความร้อน C คือ

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$$ มีหน่วยเป็น จูล/ องศาเซลเซียส (J/C) (2.7)

ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity, c)

ความจุความร้อนจำเพาะ คือความร้อนที่ทำให้สาร(วัตถุ) มวลหนึ่งหน่วยมีอุณหภูมิเปลี่ยนไปหนึ่งองศาเซลเซียส คือ

$$c = \frac{\Delta Q}{m\Delta T}$$ ความจุความร้อนจำเพาะของสาร(J/kg-C) (2.8)

นั่นคือ เมื่อสารมวล m มีอุณหภูมิเพิ่มจาก T_1เป็น T_2 และความจุความร้อนจำเพาะมีค่าคงตัว ความร้อนที่สารได้รับ คือ

$$Q = C\Delta T \text{หรือ } Q = mc\Delta T \text{หรือ } Q = ms\Delta T$$ (2.9)

โดยที่ Q = ปริมาณความร้อนหน่วย กิโลจูล ; J

m = มวลหน่วย กรัม ; g

s = ความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat)หน่วยJ/g$^{\circ}$C

c = ความจุความร้อนจำเพาะของสารหน่วย J/kg-C

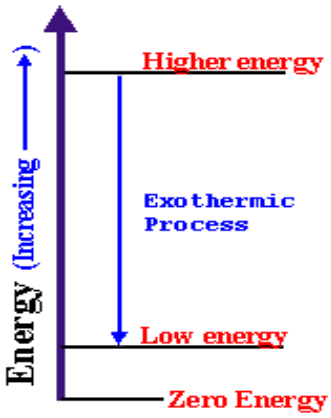
C = ความจุความร้อน(heat capacity)หน่วย J/ $^{\circ}$C)

ΔT = อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป (T_{final} or T_2) – ($T_{initial}$or T_1) (องศาเซลเซียส ; $^{\circ}$C)

จากสมการที่ (2.9) สามารถหาปริมาณความร้อนได้ โดยเครื่องหมายของ Q เหมือนกับ ΔH คือ ถ้าเครื่องหมายเป็นบวก (+) หมายถึง กระบวนการดูดกลืนความร้อน และถ้ามีเครื่องหมายเป็นลบ (-) หมายถึง กระบวนการคายความร้อน

กระบวนการคายความร้อน (ExothermicProcess)

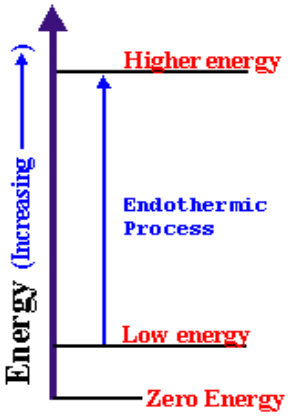
- กระบวนการที่ระบบถ่ายเทพลังงานให้กับสิ่งแวดล้อม ทำให้ระบบมีพลังงานลดลง ส่วนสิ่งแวดล้อมมีพลังงานสูงขึ้น (อุณหภูมิสูงขึ้น)โดยที่ E, ΔH มีเครื่องหมายเป็นลบ
- ระบบ → พลังงาน (ความร้อน) → สิ่งแวดล้อม
- $2\ H_2(g) + O_2(g) \rightarrow 2\ H_2O(l) + \text{energy}$



รูปที่ 2-28 แสดงกระบวนการคายความร้อน(ExothermicProcess)[80]

กระบวนการดูดกลืนความร้อน (EndothermicProcess)

- กระบวนการที่ระบบดูดพลังงานจากสิ่งแวดล้อม ทำให้ระบบมีพลังงานเพิ่มขึ้น ส่วนสิ่งแวดล้อมมีพลังงานลดลง (อุณหภูมิต่ำลง) โดยที่E, ΔH มีเครื่องหมายเป็นบวก
- สิ่งแวดล้อม → พลังงาน(ความร้อน) → ระบบ
- $\text{energy} + 2HgO(s) \rightarrow 2\ Hg(l) + O_2(g)$



รูปที่ 2-28 แสดงกระบวนการดูดกลืนความร้อน(EndothermicProcess)[80]

ความร้อน (Thermal) [78, 80]

ความร้อนเป็นพลังงานรูปหนึ่งที่เปลี่ยนมาจากพลังงานรูปอื่น เช่น พลังงานไฟฟ้าพลังงานกล(พลังงานศักย์และพลังงานจลน์) พลังงานเคมี พลังงานนิวเคลียร์ หรืองาน เป็นต้น

พลังงานความร้อนมีหน่วยเป็นจูล (Joule, J) ในระบบเอสไอ (SI) แต่บางครั้งอาจบอกเป็นหน่วยอื่นได้ เช่น แคลอรี (cal) และบีทียู (BTU)

พลังงานความร้อน 1 แคลอรี คือ พลังงานความร้อนที่ทำให้น้ำมวล 1 กรัม มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส ($^{\circ}$C) ในช่วง 14.5°Cถึง 15.5°C

พลังงานความร้อน 1 บีทียู คือ พลังงานความร้อนที่ทำให้น้ำมวล 1 ปอนด์ มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาฟาเรนไฮต์ ($^{\circ}$F) ในช่วง 58.1°Fถึง 59.1°F

ดังนั้น จากการศึกษา พบว่า 1 cal = 4.186 J

1 BTU = 252 cal = 1055 J

กำลังไฟฟ้า (Electric Power) [83]

เครื่องใช้ไฟฟ้าแต่ละชนิด เช่น หลอดไฟฟ้า หม้อหุงข้าวไฟฟ้า เตารีดไฟฟ้ามีตัวเลขกำกับไว้ บนเครื่องใช้ไฟฟ้า เช่น หลอดไฟฟ้ามีตัวเลขกำกับว่า 220 V 60 W ตัวเลข 220 V หมายถึง หลอดไฟฟ้านี้ใช้กับความต่างศักย์ 220 โวลต์ซึ่งเราต้องใช้ให้ตรงกับค่าความต่างศักย์ที่กำหนดมา ส่วนตัวเลข 60 W ที่กำกับมาเป็นค่าของพลังงานไฟฟ้าที่หลอดไฟฟ้าใช้ไปในเวลา 1 วินาทีซึ่งเรียกว่า กำลังไฟฟ้า การวัดพลังงานไฟฟ้า ใช้หน่วยเป็นจูล ตัวเลข 60 W จึงหมายความว่า ขณะเปิดไฟ หลอดไฟฟ้านี้จะใช้พลังงานไฟฟ้า 60 จูล ในเวลา 1 วินาที

กำลังไฟฟ้า (Electric Power) คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไปในเวลา 1 วินาที มีหน่วยเป็นวัตต์ (W) หรือจูลต่อวินาทีกำลังไฟฟ้าของเครื่องใช้ไฟฟ้าแต่ละชนิดหาได้จากพลังงานไฟฟ้าที่เครื่องใช้ไฟฟ้านั้นใช้ไปในเวลา 1 วินาที ซึ่งเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2.10)

$$P\ (W) = Q\ (J) / t\ (s.) \qquad (2.10)$$

โดยที่ P = กำลังไฟฟ้า หน่วยวัตต์; W

Q = พลังงานไฟฟ้า หน่วย จูล ; J

t = เวลา หน่วย วินาที ; s

พลังงานไฟฟ้า [83]

เมื่อทราบค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าที่สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (2.10) ดังนั้น สามารถหาพลังงานไฟฟ้าที่สิ้นเปลืองไปกับเครื่องใช้ไฟฟ้านั้นได้จากสมการที่ (2.11) ดังนี้

$$Q\ (J) = P\ (W) \times t\ (s.) \qquad (2.11)$$

โดยที่ Q = พลังงานไฟฟ้า หน่วย จูล ; J

P = กำลังไฟฟ้า หน่วยวัตต์; W

t = เวลา หน่วย วินาที ; s

โดยทั่วไปนิยมวัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าเป็นหน่วยที่ใหญ่กว่าหน่วยจูล โดยมักทำการวัดกำลังไฟฟ้าเป็นกิโลวัตต์ (kW)และคิดช่วงเวลาเป็นชั่วโมง เนื่องจากกำลังไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์เท่ากับ 1,000 วัตต์ ดังนั้นถ้าใช้พลังงานไฟฟ้าไป 1 กิโลวัตต์ – ชั่วโมง จึงหมายถึงมีการใช้พลังงานไฟฟ้าไป 1,000 วัตต์ เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง ดังนั้นสามารถคำนวณหาพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เป็นกิโลวัตต์ – ชั่วโมง (kWh) หรือหน่วย หรือยูนิต (Unit)ได้จากสมการที่ (2.12)

$$W\ (kWh) = P\ (kW) \times t\ (h) \qquad (2.12)$$

โดยที่ W = พลังงานไฟฟ้า หน่วย หน่วย หรือกิโลวัตต์-ชั่วโมง ; kWhหรื Unit

P = กำลังไฟฟ้า หน่วยกิโลวัตต์; kW

t = เวลา หน่วย ชั่วโมง; h

2.1.10 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ [84]

วิเคราะห์ผลโดยใช้หลักการทางสถิติ คือการนำวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ทำการทดลองไว้เพื่อช่วยในการหาข้อสรุปที่เกิดขึ้นว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลองหรือไม่ควรจะเอาวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อว่าผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นตามวัตถุประสงค์ของการทดลองถ้าการทดลองได้ถูกออกแบบไว้เป็นอย่างดีและถ้าทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้วิธีการทางสถิติที่จะนำมาใช้นั้นจะเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนข้อได้เปรียบของวิธีการทางสถิติคือทำให้ผู้มีอำนาจในการตัดสินใจมีเครื่องมือช่วยที่มีประสิทธิภาพและถ้านำเอาวิธีการทางสถิติมาผนวกกับความรู้ทางวิศวกรรมความรู้เกี่ยวกับกระบวนการและสามัญสำนึกจะทำให้ข้อสรุปที่ได้ออกมานั้นมีเหตุผลสนับสนุนและมีความน่าเชื่อถือ

การตั้งสมมติฐานในการตรวจสอบ (Hypothesis Testing) [84, 85]

การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีทางสถิตินั้นจะมีความเสี่ยงเข้ามาเกี่ยวข้องอยู่เสมอ ดังนั้นการตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูลจึงต้องอยู่ภายใต้ความเสี่ยงดังกล่าว

การตั้งสมมติฐานในการตรวจสอบจะตั้งสมมติฐานใน 2 ทางเลือกคือ

H_o : ระดับของปัจจัยไม่มีผลต่อกระบวนการผลิต

H_1 : ระดับของปัจจัยมีผลต่อกระบวนการผลิต

ทั้งนี้ภายใต้ความเสี่ยง 2 ตัว คือ α และ β

α คือความเสี่ยงในการที่จะไม่ยอมรับสมมติฐานหลัก (Null Hypothesis) ทั้งที่สมมติฐานหลักเป็นจริงหมายถึงความเสี่ยงในการยอมรับสมมติฐานหลักทั้งที่สมมติฐานหลักไม่เป็นจริงจากความเสี่ยงของทั้ง 2 แบบนี้เองจึงต้องมีการกำหนดจำนวนซ้ำที่ใช้ในการทดลองเพื่อให้มีความเชื่อมั่นหรือมีความเสี่ยงตามที่กำหนดไว้และในการทำการวิเคราะห์ก็มักจะให้ค่าของ α คงที่และให้ค่า β น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้

การตั้งสมมติฐานจะเป็นการตั้งด้วยความหวังที่จะปฏิเสธดังนั้นในการทำการทดสอบสมมติฐานย่อมมีความเสี่ยงที่จะเกิดความผิดพลาดแบบที่ 1 หากจะทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก ในทางปฏิบัติจะเริ่มจากการตั้งสมมติฐานออกแบบการทดลองดำเนินการสุ่มตัวอย่างแล้วทำการวิเคราะห์เพื่อหาความเชื่อมั่นที่จะปฏิเสธสมมติฐานหลักนั้นๆ

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่จัดทำขึ้นนี้ได้ทำการสำรวจงานวิจัยทีเกี่ยวข้องซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มที่ผ่านการใช้แล้วจากอุตสาหกรรมอาหารที่มีผลต่อประสิทธิภาพของไบโอดีเซล ได้แก่ ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME ; Fatty Acid Methyl Esters) และผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ (%Yield) ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ขั้นตอนแรกของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลเพื่อให้ได้มาซึ่งไบโอดีเซลที่มีประสิทธิภาพที่เหมาะสมจึงควรมีการเตรียมน้ำมัน [63] และทำการตรวจสอบปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในน้ำมันตั้งต้นก่อนด้วยการไตเตรท [72,73] เพื่อให้ทราบถึงปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในน้ำมัน (%FFA) ของน้ำมันตั้งต้นและสามารถนำไปเลือกใช้วิธีการที่เหมาะสมในการบวนการผลิตไบโอดีเซลต่อไป

สำหรับการวิจัยนี้ได้เลือกกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ ปฏิกิริยาทรานเอสเตอริฟิเคชัน (Transesterification) เนื่องจากได้นำตัวอย่างน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่สุ่มตัวอย่างมาจาก 4 แหล่งที่มา ซึ่งมีค่ากรดไขมันอิสระหรือ Free Fatty Acid (%FFA) แตกต่างกัน เนื่องจากใช้สำหรับทอดผลิตภัณฑ์ที่ต่างชนิดกัน ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ประเภทพืชและประเภทสัตว์ สรุปได้ว่า ตัวอย่างน้ำมันจากทั้ง 4 ตัวอย่างที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) ต่ำกว่าร้อยละ 2 จึงสามารถเลือกใช้กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันสำหรับผลิตไบโอดีเซล โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการเอสเตอริฟิเคชันก่อน ซึ่งกระบวนการเอสเทอร์ริฟิเคชันสามารถใช้ได้กับน้ำมันที่มีค่ากรดไขมันอิสระสูงในขณะเดียวกันก็มีการใช้พลังงานต่ำโดยหลักการคือใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนกรดไขมันอิสระที่อยู่ในน้ำมันให้เป็นสารเอสเทอร์ก่อนที่เป็นปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน [6]

จากรูปที่ 2-3 และตารางที่ 2-4 ที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้นพบว่าองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มตั้งต้นหากมีปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid) มีความสัมพันธ์กันกับปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ (Triglycerides) นั่นคือ หากน้ำมันปาล์มใช้แล้วมีองค์ประกอดของกรดไขมันอิสระสูงแสดงว่ามีปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ต่ำและหากมีปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันต่ำแสดงว่ามีปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันปาล์มสูง เป็นต้น สำหรับในกระบวนการผลิตเมทิลเอสเตอร์ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันนั่นหากต้องการได้ปริมาณเมทิลเอสเตอร์หรือ %FAME ปริมาณสูงนั้นต้องมีค่ากรดไขมันอิสระ (%FFA)ต่ำๆ หรือมีปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ที่สูงๆ นั่นเอง และถ้าดูจากรูปที่ 2-14 เป็นสมการแสดงปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันโดยมีไตรกลีเซอไรด์เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ (เมทานอล) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเบส ผลผลิตที่ได้คือเมทิลเอสเตอร์และกลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการ แต่กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ผันกลับได้จะเกิดปฏิกิริยาตลอดเวลาผันกลับไปกลับมา เห็นได้ว่าปริมาณไตรกลีเซอไรด์มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตไบโอดีเซล แต่เนื่องจากการวิเคราะห์หาปริมาณไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันปาล์มต้องเสียค่าใช้จ่ายซึ่งค่อนข้างแพง งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้การตรวจหาค่ากรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acids ; %FFA) โดยใช้เครื่องไตเตรทอัตโนมัติซึ่งเป็นวิธีที่สะดวก ตรวจค่าเองได้ประหยัดทั้งเวลาและค่าใช้จ่าย ดังนั้นสามารถใช้ปริมาณกรดไขมันอิสระขิงน้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้นแทนการหาปริมาณไตรกลีเซอไรด์เพื่อทำการวิเคราะห์สารตั้งต้นก่อนทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันได้

บางงานวิจัยในอดีตได้ศึกษาการสังเคราะห์เมทิลเอสเตอร์จากน้ำมันประกอบอาหารที่ใช้แล้วด้วยวิธีปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน เนื่องจากได้ทำการตรวจหาค่ากรดไขมันอิสระของตัวอย่างน้ำมันใช้แล้ว พบว่ามีค่ากรดไขมันอิสระหรือ FFA% (wt) เท่ากับ 0.80 [31] และอีก

งานวิจัยได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้ตัวทำละลายร่วม กล่าวว่าปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้โดยวิธีการไตเตรท พบว่า มีปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มอยู่ประมาณ 0.22% โดยน้ำหนัก ซึ่งถือว่ามีปริมาณน้อยและน้อยกว่า 1% ดังนั้นสามารถใช้กระบวนการปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสเพื่อผลิตไบโอดีเซลได้ [34]

เมื่อทำการเตรียมน้ำมันตั้งต้นและตรวจสอบหาค่ากรดไขมันอิสระของตัวอย่างน้ำมันใช้แล้วเพื่อเลือกวิธีการผลิตไบโอดีเซลแล้ว สิ่งสำคัญในการผลิตที่ต้องคำนึงถึงการทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์เพื่อให้ได้ผลได้อย่างสูงสุดและเกิดการสูญเสียน้อยที่สุด นอกจากนี้ยังต้องให้ไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีความบริสุทธิ์ตามมาตรฐานที่กำหนดด้วย เพื่อให้ต้นทุนในการผลิตต่ำสุด มีราคาที่สามารถแข่งขันได้ จึงมีความจำเป็นที่ต้องสนใจปัจจัยที่มีความสำคัญต่อปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) และ ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ได้เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ ปริมาณของกรดไขมันอิสระในน้ำมัน (Free Fatty Acid ; FFA), ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาและชนิดของตัวเร่ง, ความชื้นหรือการมีอยู่ของน้ำ, ความบริสุทธิ์ของสารตั้งต้น (Purity of reactant), อัตราส่วนโดยโมลหรือสัดส่วนระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน (Ratio of Methanol), ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (Reaction Time), อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา (Reaction Temperature) และอัตราการกวนผสมเป็นต้นและนำไบโอดีเซลที่ผลิตได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ด้วยเครื่อง Gas Chromatography (GC)โดยวิธีทดสอบส่วนใหญ่ที่ใช้ได้แก่ American Society for Testing and Material (ASTM) หรือ TheEuropean Standard (EN) ซึ่งในวิธีทดสอบจะกำหนดเครื่องมือที่ใช้ ทั้งขนาด รูปร่าง ขั้นตอนการทดสอบอย่างละเอียด วิธีการรายงานผล รวมถึงความแตกต่างระหว่างผลการทดสอบที่ยอมรับได้ เพื่อให้ค่าที่ทดสอบได้มีความละเอียดน่าเชื่อถือ [86] ดังนั้นจึงใช้มาตรฐานการทดสอบ EN14103 เพื่อตรวจวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาค้นคว้าจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันและปัจจัยหลักที่จะทำการศึกษา นั่นคือ ปริมาณของกรดไขมันอิสระในน้ำมัน (Free Fatty Acid ; FFA) ซึ่งในแต่ละตัวอย่างน้ำมันจะมีปริมาณของกรดไขมันอิสระไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการใช้ทอดและการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างทอดแตกต่างกัน

ดังนั้น จากงานวิจัยนี้สามารถคาดคะเนแนวโน้มของประสิทธิภาพของไบโอดีเซลที่ได้จากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันได้ เนื่องจากเมื่อทราบสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันตั้งต้นซึ่งมีปริมาณกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน สามารถส่งผลให้เกิดประโยชน์แก่ผู้บริหารในการตัดสินใจในการพิจารณาสำหรับการลงทุนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันของเสียใช้แล้วเพื่อใช้ทดแทนในโรงงานต่อไปในอนาคต และเป็นการเพิ่มมูลค่าของของเสียในส่วนของน้ำมันปาล์มใช้แล้วในอุตสาหกรรมอาหาร อีกทั้งยังสามารถเป็นการช่วยลดการนำน้ำมันปาล์มใช้แล้วกลับมาสู่วงจรการบริโภคซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดโรคมะเร็งในผู้บริโภค อีกทั้งยังเป็นการร่วมรณรงค์การใช้น้ำมันไบโอดีเซลแทนน้ำมันดีเซลเพื่อช่วยลดปัญหามลพิษด้านสิ่งแวดล้อมในประเทศได้ ดังนั้นจึงความจำเป็นต้องเลือกปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของไบโอดีเซล

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไบโอดีเซล กล่าวว่า การเลือกใช้ไขมันจากสัตว์เป็นสารตั้งต้น พบปัญหาที่คล้ายกันคือ มีขั้นตอนในการทำปฏิกิริยา 2 ขั้นตอนในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากน้ำมันจากสัตว์มีคอเรสเตอรอลมากกว่าในน้ำมันพืช ซึ่งในน้ำมันพืชไม่มีคอเรสเตอรอลหรืออาจจะพบในปริมาณที่น้อยมา [20] ส่งผลให้ในน้ำมันสัตว์มีปริมาณกรดไขมันอิสระตั้งต้นสูงกว่าในน้ำมันพืช ดังนั้นในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจำเป็นต้องใช้กรดมาทำปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันกับน้ำมันจากสัตว์ตั้งต้นก่อนในขั้นตอนแรกเพื่อเป็นการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันตั้งต้นให้เหลือน้อยว่า 2% เพื่อทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเข้าสู่กระบวนการผลิตไบโอดีเซลต่อไป จะเห็นได้ว่าต้องใช้เวลาตลอดทั้งกระบวนการผลิตมากกว่าในน้ำมันพืชซึ่งส่วนใหญ่จะมีปริมาณกรดไขมันอิสระไม่เกิน 2% และโดยปกติแล้วน้ำมันพืชที่ผ่านกระบวนการผลิตสำหรับบริโภค (RBD) แล้ว โดยส่วนใหญ่สามารถนำมาทำไบโอดีเซลที่มีคุณภาพดีกว่าไบโอดีเซลที่ทำมาจากไขมันสัตว์ [91]

ดังนั้น จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้นเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของไบโอดีเซลทั้งเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเตอร์ (%FAME) และปริมาณผลผลิตเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ได้จากกระบวนการผลิต ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยที่สำคัญส่วนใหญ่ที่ผู้วิจัยให้ความสนใจและทำการศึกษาในการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันทั้งหมด 4 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ซึ่งให้ความสนใจในช่วง 50 – 70°C, ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ช่วงเวลา 30 – 90 นาที, อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันตั้งต้นในช่วง 3:1 – 9:1 หรือหากคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของน้ำมันตั้งต้นอยู่ในช่วง 15 – 25% โดยปริมาตรของน้ำมันตั้งต้น และชนิดของสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้มี 2 ชนิด ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจากงานวิจัยทั้งหลายข้างต้นได้สรุปว่า สารตัวเร่งปฏิกิริยามีความสามารถใกล้เคียงกัน

แต่นิยมใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจาก K^+ จะมีความเป็นพิษน้อยกว่า Na^+ สามารถนำไปเป็นปุ๋ยได้ ส่วน Na^+ที่ปนมาในน้ำเป็นพิษ จึงต้องมีการบำบัดน้ำเสียนั้นก่อน [50] และในผลการทดลองของหลายงานวิจัยข้างต้น สนใจที่ระดับความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.5 – 1 %โดยน้ำหนักของน้ำมันตั้งต้นส่วนปัจจัยอื่นๆ ซึ่งมีความสำคัญรองลงมาจะมีการกำหนดให้เป็นตัวแปรควบคุม คือทำการกำหนดให้เท่ากันในทุก ๆ สภาวะการทดลอง ดังนั้นจากการศึกษาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น พบว่า หากทำการผลิตไบโอดีเซลในสภาวะที่เหมาะสม ส่งผลให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเตอร์ที่ได้อยู่ในช่วง 92 – 98% (%FAME) และปริมาณเมทิลเอสเตอร์อยู่ในช่วง 95- 98% (%Yield) เป็นต้น

และจากหลายงานวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้น พบว่า ได้ค่าเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเตอร์ที่ได้อยู่ในช่วงที่ต่ำกว่า 96.5% จากมาตรฐานไบโอดีเซลของข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซล จึงได้ทำการพิจารณาค่าคุณสมบัติต่างๆ ของไบโอดีเซล ได้แก่ ความหนืด ความหนาแน่น จุดวาปไฟ และค่าความเป็นกรด เป็นต้น ซึ่งหากพบว่าผ่านตามมาตรฐานของข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันและข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) ที่ประกาศโดยกรมธุรกิจพลังงาน ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบเป็นน้ำมันที่ผ่านการใช้ทอดแล้วจึงมีความบริสุทธิ์ต่ำทำให้สิ่งเจือปนต่างๆที่อยู่ในน้ำมันเช่นเครื่องปรุงรสและปริมาณน้ำจะขัดขวางการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันกับเมทานอลกล่าวคือน้ำมันจะสัมผัสกับเมทานอลได้น้อยลงดังนั้นการทำปฏิกิริยาจึงไม่สมบูรณ์ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานแต่ไบโอดีเซลที่ผลิตได้นี้สามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์การเกษตรได้ [99]

เมื่อศึกษาหาปัจจัยหลักที่สำคัญที่มีผลกระทบการผลิตเมทิลเอสเตอร์ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันจากงานวิจัยในอดีต ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น งานวิจัยนี้สนใจทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่สุ่มตัวอย่างมาจาก 4 แหล่งที่มาซึ่งมีค่ากรดไขมันอิสระหรือ Free Fatty Acid (%FFA) แตกต่างกัน ซึ่งใช้สำหรับทอดผลิตภัณฑ์ที่ต่างชนิดกัน ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ประเภทพืชและประเภทสัตว์ เนื่องจากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อทำการศึกษาปริมาณของกรดไขมันอิสระมีผลต่อประสิทธิภาพไบโอดีเซลทั้งเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเตอร์ (%FAME) และปริมาณผลผลิตเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)โดยทำการกำหนดปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของไบโอดีเซล และมีการกำหนดขอบเขตของระดับในแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง พร้อมทั้งมีการแสดงแผนการทดลองสำหรับงานวิจัย ดังต่อไปนี้

2.2.1 กำหนดปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของไบโอดีเซล

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (% FAME) และร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ถือเป็นผลพลอยได้ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากผลผลิตที่ได้จากการทดลอง โดยเริ่มทำการศึกษาโดยใช้การระดมสมอง (Brainstorming) จากการศึกษาจากเอกสาร บทความ (Journal) ที่ถูกตีพิมพ์ หนังสือเกี่ยวกับการผลิตไบโอดีเซลและจากการสอบถามสัมภาษณ์และคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญหรือผู้มีประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องโดยอ้างอิงตามหลักการทางวิศวกรรมและเคมี ข้อมูลจากการทดลองในอดีต รวมทั้งข้อจำกัดในทางปฏิบัติต่างๆ มาพิจารณาร่วมกันเพื่อหาปัจจัยที่จะนำมาใช้ในการทดลองเพื่อทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของไบโอดีเซล

สำหรับในงานวิจัยนี้ผู้ทำการทดลองได้กำหนดระดับของปัจจัยจากค่าควบคุมหรือจากการอ้างอิงจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต ดังนั้นเมื่อทำการคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (% FAME) ทั้งหมด 4 ปัจจัย ในงานวิจัยนี้สามารถสรุปช่วงหรือระดับของค่าที่สนใจสำหรับปัจจัยต่าง ๆ และปัจจัยที่ถูกควบคุมในการทำการทดลอง ดังนั้นการศึกษาสภาวะที่ของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของไบโอดีเซล ภายใต้เกณฑ์การพิจารณาเลือกที่แตกต่างกันตามวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้ได้ ซึ่งได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2-21 และ 2-22 ตามลำดับ และเมื่อทำการการเลือกปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของน้ำมันไบโอดีเซลและกำหนดขอบเขตของแต่ละปัจจัยที่ต้องการศึกษา ขั้นตอนต่อไปเป็นการกำหนดแผนการทดลองสำหรับทำการทดลองเพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ ซึ่งสามารถทำการออกแบบแผนการทดลอง (Experimental Plan) โดยรวมเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของไบโอดีเซลงานวิจัย ดังแสดงในตารางที่ 2-23

ตารางที่ 2-21 ขอบเขตของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองเพิ่มเติมเพื่อหาสภาวะเหมาะสมในการทดลอง

ปัจจัย	ขอบเขตของปัจจัย		หน่วย
	เบื้องต้น	เพิ่มเติม	
ปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันตั้งต้น	0.427 – 1.435		%FFA (สุ่ม 4 ตัวอย่าง)
อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	45 - 60	30	°C
เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	30 - 60	120*	นาที
ปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง	15 - 25	50*	% โดยปริมาตรน้ำมัน

หมายเหตุ สัญลักษณ์ * แทน สำหรับสภาวะที่ใช้ในการทดลองเฉพาะที่ระดับอุณหภูมิ 30°C เท่านั้น

ตารางที่ 2-22 ปัจจัยที่ถูกควบคุมในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

ปัจจัยที่ถูกควบคุม	เงื่อนไขที่ควบคุม
ปัจจัยที่เกิดจากคน (Man)	
ผู้ทำการทดลอง	กำหนดให้ผู้ทำการทดลองเป็นบุคคลคลเดียวกันเพื่อลดความ Error
ปัจจัยที่เกิดจากเครื่องจักร (Machine)	
เครื่องมือที่ใช้ในการผลิต	กำหนดให้ใช้เครื่องมือตัวเดิมตลอดการทดลอง โดยต้องทำการตรวจสอบคุณภาพความพร้อมใช้งานทุกครั้งของเครื่องมือก่อนใช้งาน
ปัจจัยที่เกิดจากวัตถุดิบ (Material)	
ชนิดของน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง	ตรวจสอบและควบคุมชนิดของน้ำมันว่าเป็นน้ำมันปาล์มใช้แล้วตามที่ได้ถูกกำหนด
แหล่งที่มาของน้ำมันในแต่ละแหล่ง	ตรวจสอบแหล่งที่มาของน้ำมันเหล่านี้ต้องมาจากแหล่งเดียวกัน
ชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทดลอง	ตรวจสอบและกำหนดให้ใช้เมทานอลเป็นแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำการทดลอง
ชนิดสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง	ตรวจสอบและกำหนดให้ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับใช้ในการทำการทดลอง
ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 1.0% โดยน้ำหนักของน้ำมัน
น้ำที่ใช้ในกระบวนการล้าง	ตรวจสอบชนิดของน้ำที่ใช้ต้องมีความบริสุทธิ์ เช่น น้ำกลั่น ซึ่งมีค่า pH อยู่ที่ระดับ 6.5-7.5
ปัจจัยที่เกิดจากวิธีการ (Method)	
การตรวจวัดปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันตั้งต้น	ใช้เครื่องไตเตรทอัตโนมัติสำหรับการทำการตรวจหาค่าปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) ทุกครั้ง
รูปแบบวิธีที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล	เลือกใช้กระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบปฏิกิริยาทรานเอสเตอริฟิเคชันในการทดลอง

ตารางที่ 2-22 ปัจจัยที่ถูกควบคุมในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล (ต่อ)

ปัจจัยที่ถูกควบคุม	เงื่อนไขที่ควบคุม
ปัจจัยที่เกิดจากวิธีการ (Method) **(ต่อ)**	
อุณหภูมิที่ใช้ในการต้มไล่น้ำ	สำหรับการต้มไล่น้ำในทดลองนั้นได้มีการกำหนดอุณหภูมิที่ระดับ 150 องศาเซลเซียล (°C) สำหรับทุกสภาวะการทดลอง
อัตราการกวนผสมในการผลิต	ตรวจสอบและกำหนดอัตราการกวนผสมของเครื่อง Hot Plate Stirrerโดยขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการทดลองประมาณ 500 rpm.
การตรวจหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)	การส่งตรวจตัวอย่างไบโอดีเซลที่ได้จากกระบวนการผลิตเพื่อหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)โดยทำการส่งตรวจ ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยเครื่อง Gas Chromatography (GC) อ้างอิงตามวิธีมาตรฐาน EN14103 [2]
สิ่งแวดล้อม (Environmental)	
ระบบที่ใช้ในการทำการผลิต	เลือกใช้เป็นแบบระบบปิดในการทำการทดลอง
ภาชนะเก็บตัวอย่าง	เลือกใช้ขวดแก้วสีชา (มีจุกพลาสติกปิด) เก็บไว้ในสถานที่มิดชิด ปราศจากแสง ความร้อน และลม เป็นต้น

ตารางที่ 2-23 แสดงแผนการทดลอง (Experimental Plan) สำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้

%FFA	Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	Mean of %FAME			Mean of %Yield			Mean of %FAME/Baht		
			Reaction Temp. (°C)			Reaction Temp. (°C)			Reaction Temp. (°C)		
			30	45	60	30	45	60	30	45	60
0.427	30	15	2	1	1	2	1	1	2	1	1
		25	2	1	1	2	1	1	2	1	1
		50	✕	2	✕	✕	2	✕	✕	2	✕
	60	15	2	1	1	2	1	1	2	1	1
		25	2	1	1	2	1	1	2	1	1
		50	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	120	15	✕	2	✕	✕	2	✕	✕	2	✕
		25	2	2	2	2	2	2	2	2	2
		50	2	2	✕	2	2	✕	2	2	✕
0.512	30	15	2	1	1	2	1	1	2	1	1
		25	2	1	1	2	1	1	2	1	1
		50	✕	2	✕	✕	2	✕	✕	2	✕
	60	15	2	1	1	2	1	1	2	1	1
		25	2	1	1	2	1	1	2	1	1
		50	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	120	15	✕	2	✕	✕	2	✕	✕	2	✕
		25	2	2	2	2	2	2	2	2	2
		50	2	2	✕	2	2	✕	2	2	✕

หมายเหตุ :

- สัญลักษณ์ 1 แทน ค่าเฉลี่ยของผลการทดลองจากการกำหนดระดับของปัจจัยเบื้องต้น
- สัญลักษณ์ 2 แทนค่าเฉลี่ยของผลการทดลองจากการกำหนดระดับของเพิ่มเติมของปัจจัย
- สัญลักษณ์ ✕ แทน ไม่มีผลการทดลอง เนื่องจากสภาวะนั้นๆ ไม่มีการทำการทดลอง
- ผลการทดลองที่ถูกบันทึกลงในตารางเป็นค่าเฉลี่ย ซึ่งได้จากการทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง

ตารางที่ 2-23 แสดงแผนการทดลอง (Experimental Plan) สำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้(ต่อ)

%FFA	Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	Mean of %FAME			Mean of %Yield			Mean of %FAME/Baht		
			Reaction Temp. (°C)			Reaction Temp. (°C)			Reaction Temp. (°C)		
			30	45	60	30	45	60	30	45	60
0.630	30	15	2	1	1	2	1	1	2	1	1
		25	2	1	1	2	1	1	2	1	1
		50	✕	2	✕	✕	2	✕	✕	2	✕
	60	15	2	1	2	2	2	1	2	1	1
		25	2	1	2	2	2	1	2	1	1
		50	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	120	15	✕	2	✕	✕	2	✕	✕	2	✕
		25	2	2	2	2	2	2	2	2	2
		50	2	2	✕	2	2	✕	2	2	✕
1.435	30	15	2	1	1	2	1	1	2	1	1
		25	2	1	1	2	1	1	2	1	1
		50	✕	2	✕	✕	2	✕	✕	2	✕
	60	15	2	1	1	2	1	1	2	1	1
		25	2	1	1	2	1	1	2	1	1
		50	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	120	15	✕	2	✕	✕	2	✕	✕	2	✕
		25	2	2	2	2	2	2	2	2	2
		50	2	2	✕	2	2	✕	2	2	✕

หมายเหตุ :

- สัญลักษณ์ 1 แทน ค่าเฉลี่ยของผลการทดลองจากการกำหนดระดับของปัจจัยเบื้องต้น
- สัญลักษณ์ 2 แทนค่าเฉลี่ยของผลการทดลองจากการกำหนดระดับของเพิ่มเติมของปัจจัย
- สัญลักษณ์ ✕ แทน ไม่มีผลการทดลอง เนื่องจากสภาวะนั้นๆ ไม่มีการทำการทดลอง
- ผลการทดลองที่ถูกบันทึกลงในตารางเป็นค่าเฉลี่ย ซึ่งได้จากการทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง

ในงานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีผลต่อประสิทธิภาพของน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลอง จึงมีความสนใจในการการศึกษาประสิทธิภาพของไบโอดีเซลที่ได้จากกระบวนการทดลอง ได้แก่ ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (% FAME) ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลและปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อค่าใช้จ่ายรวมในการทดลอง (%FAME ต่อบาท)เนื่องจากข้อมูลดังกล่าวมีความสอดคล้องและสัมพันธ์กับวัตถุประสงค์ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นเพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์ผลการทดลองในลำดับต่อไปดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการกำหนดตัวแปรตอบสนองที่สนใจทั้งสิ้น 3 ตัวแปร ได้แก่

(1.) $Y_{\%FAME}$ แทน ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME ; Fatty Acid Methyl Esters)

(2.) $Y_{\%Yield}$ แทน ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)

(3.) $Y_{\%FAME/Baht}$ แทน ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อค่าใช้จ่ายรวมในการทดลอง (%FAMEต่อบาท)

2.2.2 การเลือกปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของน้ำมันไบโอดีเซล

ในการทำการทดลองเบื้องต้นนี้เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (% FAME ; Fatty Acid Methyl Esters) ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลส่วนร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ถือเป็นผลพลอยได้ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากผลผลิตที่ได้จากการทดลอง ดังนั้น จึงเริ่มทำการศึกษาโดยใช้การระดมสมอง (Brainstorming) จากการศึกษาจากเอกสาร บทความ (Journal) ที่ถูกตีพิมพ์ หนังสือเกี่ยวกับการผลิตไบโอดีเซลและจากการสอบถามสัมภาษณ์และคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญหรือผู้มีประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องโดยอ้างอิงตามหลักการทางวิศวกรรมและเคมี ข้อมูลจากการทดลองในอดีต รวมทั้งข้อจำกัดในทางปฏิบัติต่างๆ มาพิจารณาร่วมกันเพื่อหาปัจจัยที่จะนำมาใช้ในการทดลองเพื่อทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองที่สนใจ

จากผลการศึกษาดังกล่าวนี้สามารถนำไปทำการต่อยอดต่อไปในอนาคตในเชิงอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการตัดสินใจเพื่อก่อให้เกิดประโยชน์แก่ผู้บริหารต่อการตัดสินใจในการเลือกพิจารณาสำหรับการลงทุนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลเพื่อใช้เป็นน้ำมันทดแทนในโรงงานต่อไปในอนาคต โดยประเมินการความคุ้มทุนในการลงทุนดังกล่าวอย่างเหมาะสม ดังนั้นในการศึกษาขั้นต้นจึงควรพิจารณาถึงปัจจัยโดยสามารถจำแนกปัจจัยออกได้เป็น 5 ปัจจัยหลักการ ตามหลักการ 4M 1E ดังต่อไปนี้

(1.) ปัจจัยที่เกิดจากคน (Man)

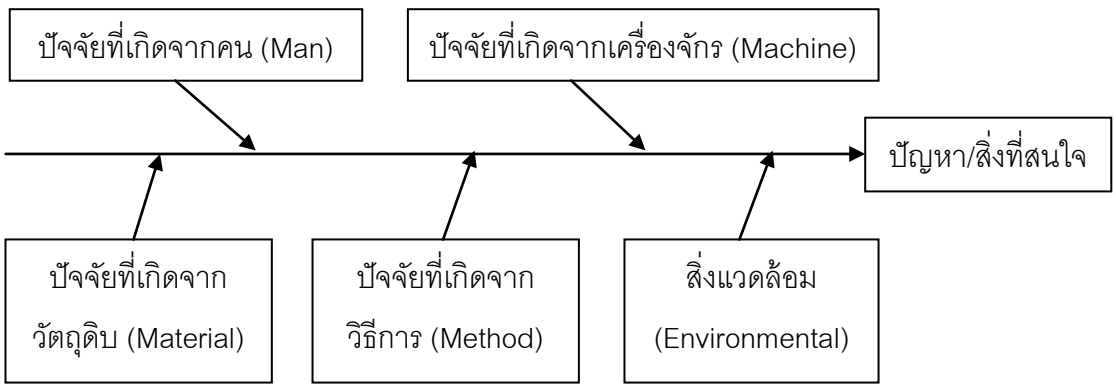
(2.) ปัจจัยที่เกิดจากเครื่องจักร (Machine)

(3.) ปัจจัยที่เกิดจากวัตถุดิบ (Material)

(4.) ปัจจัยที่เกิดจากวิธีการ (Method)

(5.) สิ่งแวดล้อม (Environmental)

โดยการประยุกต์ใช้แผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram or Cause and Effect Diagram) ที่เกิดจากการศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลและความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการผลิตไบโอดีเซลเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างผลกับปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้ว พร้อมทั้งยังทราบปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (% FAME), ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)ที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลและปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อค่าใช้จ่ายรวมในการทดลอง (%FAME ต่อบาท) ซึ่งเป็นสิ่งที่สนใจในการทำการทดลองครั้งนี้ นำไปสู่การวิเคราะห์เพื่อศึกษาปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีผลต่อประสิทธิภาพของน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลอง และเป็นประโยชน์สำหรับผู้บริหารหรือผู้บุคคลทั่วไปที่มีความสนใจเกี่ยวกับการผลิตไบโอดีเซลไว้ใช้เองในโรงงานของตน เพื่อสามารถใช้เป็นแนวทางในการตัดสินใจสำหรับทางเลือกในการลงทุนซื้อเครื่องจักรในการผลิตไบโอดีเซล ดังนั้นสามารถวิเคราะห์ถึงสาเหตุที่เป็นรากเง้า (Root Cause)ของปัญหาหรือสิ่งที่เราสนใจได้ โดยมีการแบ่งเป็นหมวดหมู่ของสาเหตุของปัญหาว่าเกิดจาก คน เครื่องจักร วัสดุ วิธีการและปัจจัยสิ่งแวดล้อม ดังแสดงในรูปที่ 2-30 และดังนั้นการกรองหาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วเพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมตามหลักการ 4M 1E จึงสามารถสรุปได้ในตารางที่ 2-24 ดังนี้

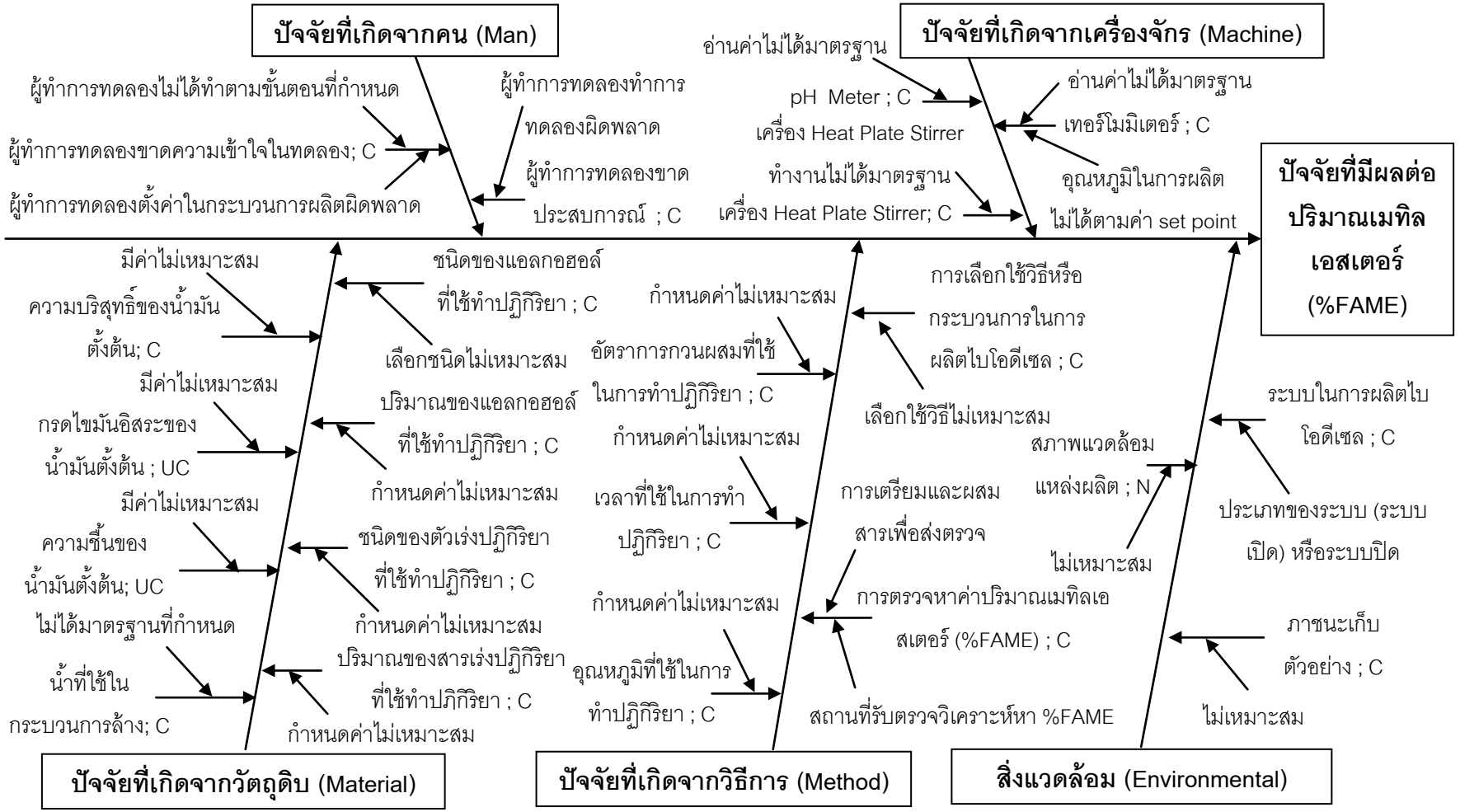


รูปที่ 2-30 แสดงแผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram)

ตารางที่ 2-24 แสดงปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้ในการผลิตไบโอดีเซล

หลักการ 5M และ 1E	ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (% FAME)ที่ได้จากการผลิต
ปัจจัยที่เกิดจากคน (Man)	1. ผู้ทำการทดลองขาดความเข้าใจการทดลอง 2. ผู้ทำการทดลองขาดประสบการณ์
ปัจจัยที่เกิดจากเครื่องจักร (Machine)	1. เครื่อง Heat Plate Stirrer 2. เทอร์โมมิเตอร์ 3. pH Meter
ปัจจัยที่เกิดจากวัตถุดิบ (Material)	1. ความบริสุทธิ์ของน้ำมันตั้งต้น 2. กรดไขมันอิสระของน้ำมันตั้งต้น 3. ความชื้นของน้ำมันตั้งต้น 4. น้ำที่ใช้ในกระบวนการล้าง 5. ชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้การทำปฏิกิริยา 6. ปริมาณแอลกอฮอล์ที่ใช้การทำปฏิกิริยา 7. ชนิดสารตัวปฏิกิริยาที่ใช้การทำปฏิกิริยา 8. ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้การทำปฏิกิริยา
ปัจจัยที่เกิดจากวิธีการ (Method)	1. เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 2. อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 3. อัตราการกวนผสมที่ใช้ในทำปฏิกิริยา 4. การเลือกใช้วิธีในการผลิต 5. การหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)
สิ่งแวดล้อม (Environmental)	1. สภาพแวดล้อมบริเวณแหล่งผลิต 2. ระบบ (ระบบเปิด/ระบบปิด) ในการผลิต 3. ภาชนะเก็บตัวอย่าง

จากตารางที่ 2-24 สามารถนำปัจจัยดังกล่าวไปประยุกต์โดยใช้แผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram) จากการศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับไบโอดีเซล สำหรับแผนผังก้างที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลเบื้องต้นนั้นมีการระบุประเภทของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ (Controllable ; C) ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable ; UC) และปัจจัยรวบกวน (Noise ; N) ในการพิจารณาและนำเสนอด้วยแผนผังก้างปลาดังรูปที่ 2-31



รูปที่ 2-31 แสดงแผนผังก้างปลาเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

2.2.3 การกำหนดปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของน้ำมันไบโอดีเซล

จากการทำการศึกษาคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้นขั้นต่อไปจะทำการศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)โดยการพิจารณาเลือกปัจจัยที่ใช้ในการทำงานวิจัยและปัจจัยที่ไม่เลือกใช้ในการทำงานวิจัยซึ่งจะถูกควบคุมให้คงที่ แล้วนำปัจจัยเหล่านี้ที่ถูกเลือกมาทำการทดลอง เพื่อทำการพิสูจน์จากผลการทดลองเพื่อศึกษาว่าปัจจัยเหล่านั้นมีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ซึ่งในการทดลองนี้มีการใช้หลักการทางสถิติวิเคราะห์ผลทางการทดลองที่ได้จากการทดลอง เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลในเชิงสถิติแล้วจะต้องทำการตีความหมายออกมาเพื่อใช้เลือกใช้เป็นสภาวะที่เหมาะสมจากการผลิตไบโอดีเซล โดยมีการเกณฑ์หรือกรณีการพิจารณาเลือกสภาวะที่แตกต่างกันตามวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้ทั้ง 3 กรณีดังนั้นจากการทดลองสามารถทราบปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) และสามารถคำนวณหาร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) และปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อค่าใช้จ่ายรวมในการทดลอง (%FAME ต่อบาท) ที่เหมาะสม

จากรูปที่ 2-31 พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 21 ปัจจัยและสามารถแบ่งเป็นแต่ละประเภทของปัจจัยได้ดังนี้ คือ ปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ (C) ทั้งหมด 18 ปัจจัย ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (UC) 2 ปัจจัยและปัจจัยรบกวน (N) อีก 1 ปัจจัย

แต่เนื่องจากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อต้องการศึกษาอิทธิพลของปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) ในน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีผลต่อประสิทธิภาพของน้ำมันไบโอดีเซล ได้แก่ ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (% FAME) และร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลดังนั้นจึงทำการเลือกปัจจัยที่ว่าด้วย “กรดไขมันอิสระของน้ำมันตั้งต้น” ให้เป็นปัจจัยหลักที่สำคัญในการศึกษางานวิจัยในครั้งนี้ ถึงแม้ว่ากรดไขมันอิสระ (%FFA) ของน้ำมันใช้แล้วตั้งต้นเป็นปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ เนื่องจากเป็นค่าที่พบในน้ำมันปาล์มใช้แล้วซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่ใช้ในการกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ดังนั้นสามารถทำการเลือกปัจจัยที่ใช้ในการวิจัยซึ่งมีเกณฑ์ที่ใช้สำหรับการพิจารณาเลือก คือ ปัจจัยที่ถูกเลือกนั้นต้องสามารถปรับเปลี่ยนแปลงค่าได้ โดยไม่เสียค่าใช้จ่ายในการผลิตเพิ่มขึ้นมากมายเกินความจำเป็น หากปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับคน (Man) จะเลือกใช้พนักงานที่มีความชำนาญหรือได้รับการอบรมเกี่ยวกับการผลิตไบโอดีเซลสามารถทำงานได้อยากถูกต้องและมีประสิทธิภาพ หรือเลือกใช้พนักงานที่มีความสามารถให้เหมาะสมกับงานที่ได้รับมอบหมาย เพื่อลดข้อผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นและทำการกำหนดปัจจัย

ควบคุมในกระบวนผลิต ส่วนปัจจัยที่อยู่นอกเหนือความรับผิดชอบจากหน่วยงานที่รับผิดชอบ (สภาพแวดล้อม) และปัจจัยไม่เกี่ยวข้องกับตัวแปรตอบสนองหรือสิ่งที่สนใจจะไม่นำมาพิจารณาร่วม เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ปัจจัยที่ไม่ถูกเลือกมาทำการศึกษาต่อในขั้นตอนต่อไปนั้น ซึ่งได้ทำการสรุปด้วยเหตุผลไว้ดังตารางที่ 2-25

ตารางที่ 2-25 แสดงเหตุผลที่ไม่เลือกปัจจัยต่าง ๆ เบื้องต้น

ปัจจัย	เหตุผลที่ไม่เลือกปัจจัย
(1.) ปัจจัยที่เกิดจากคน (Man)	
1.1 ผู้ทำการทดลองขาดความเข้าใจในทดลอง (เป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ ; C)	- ปัจจัยนี้เกิดจากผู้ทำการทดลองขาดความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล - ผู้ทำการทดลองไม่ได้ทำตามขั้นตอนที่กำหนดซึ่งอาจเกิดจากความเร่งรีบของผู้ทดลองซึ่งสามารถที่จะปรับปรุงแก้ไขโดยการปลูกจิตสำนึกหรือใช้หลักการPokaYokeสามารถช่วยในการป้องกันความผิดพลาดของผู้ทดลอง - ผู้ทำการทดลองตั้งค่าในกระบวนการผลิตผิดพลาด แต่โดยปกติจะมีการทำการตรวจสอบค่าในการ SET ก่อนการดำเนินการทำการทดลองในขั้นตอนต่าง ๆ สามารถทำการแก้ไขโดยอบรมผู้ทำการทดลองให้ปฏิบัติตามมาตรฐานของกรรมวิธีการผลิต
1.2 ผู้ทำการทดลองขาดประสบการณ์ (เป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ ; C)	- ปัจจัยนี้เกิดจากผู้ทำการทดลองมีความใหม่หรือผู้ทำการทดลองที่ยังขาดประสบการณ์และความชำนาญในการทำการทดลอง อาจจะส่งผลให้ผลการทดลองที่ได้มีความผิดพลาดจากความเป็นจริง ซึ่งสามารถทำการปรับปรุงแก้ไขได้โดยมีการจัดฝึกอบรมความรู้เพิ่มเติมหรือกำหนดให้ผู้ทำการทดลองที่มีประสบการณ์และมีความชำนาญมากพอเป็นผู้ทำการทดลองเพียงผู้เดียวตลอดการทดลอง

ตารางที่ 2-25 แสดงเหตุผลที่ไม่เลือกปัจจัยต่าง ๆ เบื้องต้น (ต่อ)

ปัจจัย	เหตุผลที่ไม่เลือกปัจจัย
(2.) ปัจจัยที่เกิดจากเครื่องจักร (Machine)	
2.1 เครื่อง Heat Plate Stirrer(เป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ ; C)	- ปัจจัยนี้เป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความสามารถของเครื่องมือและอุปกรณ์ คือ เครื่อง Heat Plate Stirrer ทำงานไม่ได้มาตรฐาน ซึ่งเครื่องมือประเภทนี้สามารถปรับค่าและซ่อมแซมได้ง่ายไม่ยุ่งยาก แก้ไขโดยจัดตารางรอบการเช็คสภาพเครื่องและ Maintenance สม่ำเสมอ
2.2 เทอร์โมมิเตอร์ (เป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ ; C)	- ปัจจัยนี้เป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความสามารถของเครื่องมือและอุปกรณ์ คือ เทอร์โมมิเตอร์อ่านค่าไม่ได้มาตรฐานส่งผลให้การอ่านค่าอุณหภูมิ มีความผิดพลาดไม่ตรงตามที่กำหนด (Set Point)ในกระบวนการผลิตซึ่งสามารถปรับปรุงแก้ไขโดยมีการตรวจเช็คสภาพ/ความพร้อมของเทอร์โมมิเตอร์ทุกครั้งก่อนทำการทดลอง หากมีปัญหาควรเปลี่ยนอันใหม่สำหรับใช้ในการทดลองต่อไป - การตั้งค่าอุณหภูมิในการผลิตไม่ได้ตามค่า Set Point นั้นควรหมั่นมีการตรวจสอบการ Set ค่าทุกครั้งก่อนทำการทดลองเพื่อให้ได้ค่าตามมาตรฐานที่กำหนด ซึ่งสามารถแก้ไขโดยการจัดรอบการเช็คสภาพเครื่องและ Maintenance อย่างสม่ำเสมอ
2.3 pH Meter (เป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ ; C)	- ปัจจัยนี้เป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความสามารถของเครื่องมือและอุปกรณ์ คือ pH Meter อ่านค่าไม่ได้มาตรฐาน ซึ่งสามารถแก้ไขโดยมีการตรวจเช็คสภาพ/ความพร้อมของเทอร์โมมิเตอร์ทุกครั้งก่อนทำการทดลองโดยต้องทำการ Calibrate pH Meter ก็ทำการวัดค่า pH ของสารก่อนทุกครั้งโดยใช้ Buffer ที่ระดับค่า pH ต่างๆ

ตารางที่ 2-25 แสดงเหตุผลที่ไม่เลือกปัจจัยต่าง ๆ เบื้องต้น (ต่อ)

ปัจจัย	เหตุผลที่ไม่เลือกปัจจัย
(3.) ปัจจัยที่เกิดจากวัตถุดิบ (Material)	
3.1 ความบริสุทธิ์ของน้ำมันตั้งต้น (เป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ ; C)	- ปัจจัยนี้เกิดระหว่างขั้นตอนการเตรียมสารตั้งต้นให้บริสุทธิ์ โดยตั้งน้ำมันทิ้งไว้ให้เกิดการตกตะกอนเป็นเวลา 2 สัปดาห์ จากนั้นทำการกรองแยกของแข็งด้วยกรวยกรอง และทำการไล่น้ำขึ้นอยู่กับกรรมวิธีในการใช้และความสามารถของผู้ทำการทดลอง ซึ่งสามารถทำการปรับปรุงแก้ไขได้โดยให้ความรู้และมีการจัดการฝึกอบรมเกี่ยวกับขั้นตอนการเตรียมสารตั้งต้นแก่ผู้ทำการทดลอง
3.2 ความชื้นของน้ำมันตั้งต้น(เป็นปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ ; NC)	- ปัจจัยนี้เป็นปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้แต่สามารถทำการปรับค่าความชื้นของน้ำมันก่อนทำการทดลองได้โดยการต้มไล่น้ำอุณหภูมิ 120-180 °C เพื่อเป็นการระเหยหรือลดปริมาณน้ำที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันตั้งต้นให้น้อยที่สุดก่อนทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล
3.3 น้ำที่ใช้ในกระบวนการล้า (เป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ ; C)	- ปัจจัยนี้เป็นปัจจัยที่สำคัญอีกปัจจัยหนึ่งเนื่องจากส่งผลต่อประสิทธิภาพความเป็นกลาง (pH=7)ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล จึงควรใช้น้ำที่มีความบริสุทธิ์ เช่น น้ำกลั่น เป็นต้น ซึ่งมีค่า pH อยู่ระหว่าง 6.5-7.5 ดังนั้นจึงต้องทำการตรวจสอบน้ำที่ใช้ในกระบวนการล้างทุกครั้งด้วย pH Meter ก่อนใช้ในกระบวนการล้าง

ตารางที่ 2-25 แสดงเหตุผลที่ไม่เลือกปัจจัยต่าง ๆ เบื้องต้น (ต่อ)

ปัจจัย	เหตุผลที่ไม่เลือกปัจจัย
(3.)ปัจจัยที่เกิดจากวัตถุดิบ (Material)ต่อ	
3.4 ชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา(เป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ ; C)	- ปัจจัยนี้เกี่ยวข้องกับชนิดของแอลกอฮอล์ที่นิยมใช้กันได้แก่ เมทานอลและเอทานอลซึ่งมีคุณสมบัติแตกต่างกันส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเช่นกัน แต่ควรเลือกใช้เมทานอล (เมทิลแอลกอฮอล์) มีสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ CH_3OH เป็นของเหลวใสไม่มีสี ซึ่งเมทานอลมีราคาถูกกว่าและทำปฏิกิริยาง่ายกว่าจึงเป็นที่นิยมกว่าเอทานอล เนื่องจากเมทานอลโมเลกุลมีขนาดเล็กกว่าโดยอุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา 50-55 $^{\circ}C$ หากเป็นเอทานอลจะใช้อุณหภูมิ 60-65 $^{\circ}C$
3.5 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา(เป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ ; C)	- ปัจจัยเกี่ยวกับชนิดของสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้กันได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์(KOH)การพิจารณาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาด่างระหว่าง NaOHและ KOH ไม่มีความแตกต่างกันมากนักต่อการทำปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซลแต่ความแตกต่างจะอยู่ที่ราคาและตัวประจุบวกคือNa^+และ K^+ซึ่งจะปะปนออกมากับน้ำล้างไบโอดีเซล โดย K^+ จะมีความเป็นพิษน้อยกว่า Na^+ดังนั้นจึงควรเลือกใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์(KOH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ 2-25 แสดงเหตุผลที่ไม่เลือกปัจจัยต่าง ๆ เบื้องต้น (ต่อ)

ปัจจัย	เหตุผลที่ไม่เลือกปัจจัย
(4.) ปัจจัยที่เกิดจากวิธีการ (Method)	
4.1 ชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา(เป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ ; C)ต่อ	- ปัจจัยนี้มีความสำคัญอีกปัจจัยเช่นกันซึ่งกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมีหลายวิธีจึงควรเลือกใช้อย่างเหมาะสม โดยมีเงื่อนไขที่สำคัญในการแบ่งแยกคือ ชนิดและประเภทของน้ำมัน ชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการผลิต และค่ากรดไขมันอิสระของน้ำมัน (%FFA) เป็นต้น - การวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) ในน้ำมันตั้งต้นโดยใช้เครื่องไตเตรทอัตโนมัตอัตหากปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันตั้งต้น (%FFA) มีค่าต่ำกว่า 2% จึงควรเลือกใช้วิธีทรานส์เอสเตอริฟิเคชันในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล แต่ถ้าหากค่า %FFA มีค่าสูงกว่า 2%จึงควรเลือกใช้วิธีปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชั่นเพื่อทำการปรับค่า %FFA ให้มีค่าต่ำกว่า 2% ก่อนการใช้วิธีปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชันในขั้นตอนต่อไป
4.2 การตรวจหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) (เป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ ; C)	- ปัจจัยนี้มีความสำคัญเช่นกันเนื่องจากเป็นขั้นตอนการตรวจหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยผู้ทดลองต้องทำการเตรียมและผสมตัวอย่างเมทิลเอสเตอร์กับ Internal Standard ในสัดส่วนที่กำหนดเพื่อส่งตรวจต่อสถาบันวิจัยที่รับตรวจด้วยเครื่อง Gas Chromatography (GC) อ้างอิงตามวิธีมาตรฐาน EN14103 เนื่องจากประสิทธิภาพการตรวจของแต่ละสถาบันมีความแตกต่างกันจึงเลือกส่งตรวจเพียงใดที่หนึ่งเพียงที่เดียว

ตารางที่ 2-25แสดงเหตุผลที่ไม่เลือกปัจจัยต่าง ๆ เบื้องต้น (ต่อ)

ปัจจัย	เหตุผลที่ไม่เลือกปัจจัย
(5.) สิ่งแวดล้อม (Environmental)	
5.1 สภาพแวดล้อมบริเวณแหล่งผลิต (เป็นปัจจัยรบกวน ; N)	- ปัจจัยนี้ขึ้นอยู่กับพื้นที่ในการทดลองเป็นห้องแลบปฏิบัติการซึ่งไม่ใช่เครื่องผลิตไบโอดีเซลแบบอัตโนมัติ จึงไม่สามารถควบคุมลักษณะสิ่งแวดล้อมโดยรอบ ๆ ได้
5.2 ระบบในการผลิตไบโอดีเซล (เป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ ; C)	- ปัจจัยนี้เป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้โดยในการวิจัยนี้เลือกใช้ระบบปิดสำหรับการผลิตไบโอดีเซล
5.3 ภาชนะเก็บตัวอย่าง (เป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ ; C)	- ปัจจัยนี้มีผลต่อประสิทธิภาพของปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) หากทำการเก็บตัวอย่างที่ได้จากการทดลองไม่ดี ส่งผลให้ค่าของ %FAME ของเมทิลเอสเตอร์มีค่าลดลงเช่นกัน จึงควรเลือกเก็บในขวดหรือภาชนะที่มิดชิดอากาศไม่สามารถผ่านเข้าไปได้ ปลอดแสงและลม หรืออาจจะใช้ขวดบรรจุที่ควรเป็นสีชา เป็นต้น

เมื่อพิจารณาปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่น่าจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) จากรูปที่ 2-30กล่าวคือมีจำนวนทั้งหมด 21 ปัจจัยดังได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น พบว่า แผนผังก้างปลาเป็นการแสดงเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเตอร์และได้แสดงสาเหตุของปัญหาทั้งหลายที่อาจจะเกิดขึ้นได้ซึ่งแยกตามกระบวนการผลิต โดยทำการศึกษาจากข้อมูลของการทดลองที่ได้ทำไปแล้วในอดีต จากหนังสือ วารสาร บทความที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไบโอดีเซลเพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการเลือกปัจจัยเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง แต่พบว่ามีจำนวนของปัจจัยที่สนใจที่มากเกินไป เนื่องจากปัจจัยที่จะถูกเลือกออกมาเพื่อดำเนินการศึกษาในการทำการทดลองเบื้องต้นนั้นควรมีเพียง 4 ถึง 6 ปัจจัย ดังนั้น จากตารางที่ ก-2 เป็นการพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อเมทิลเอสเตอร์ โดยผ่านการคัดเลือกและแสดงเหตุผลที่ไม่เลือกปัจจัยเบื้องต้นทั้งสิ้น 15 ปัจจัยและกรองปัจจัยให้เหลือเพื่อทำการเลือกเพียง 6 ปัจจัย ดังนี้

(1.) ปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันตั้งต้น

(2.) อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

(3.) เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

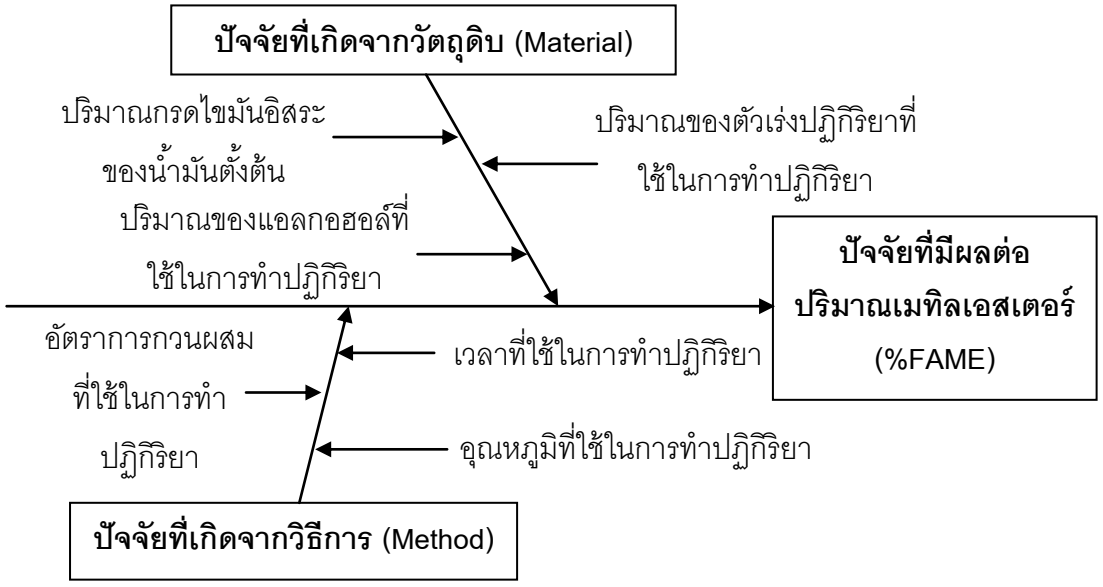
(4.) ปริมาณของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

(5.) ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

(6.) อัตราการกวนผสมที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

แต่สำหรับปัจจัย “กรดไขมันอิสระของน้ำมันตั้งต้น” เป็นปัจจัยไม่สามารถควบคุมได้ซึ่งเป็นองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้น แต่สามารถทำการตรวจสอบวัดค่าได้ทุกครั้งก่อนทำการทดลองโดยใช้เครื่องไตเตรทอัตโนมัติเพื่อทราบค่ากรดไขมันอิสระ (%FFA) เนื่องจากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อต้องการศึกษาปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีผลต่อประสิทธิภาพของน้ำมันไบโอดีเซล ได้แก่ ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (% FAME) ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลและสามารถคำนวณหาปริมาณผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) อีกทั้งยังสามารถคำนวณหสาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อค่าใช้จ่ายรวมในการทดลอง (%FAME ต่อบาท) ได้เช่นกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการเลือกปัจจัยเหล่านี้ให้เป็นปัจจัยเบื้องต้นที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเมทิลเอสเตอร์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

จากการศึกษาและรวบรวมปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (% FAME) เพื่อจะนำมาใช้ในการทดลองเบื้องต้น ผลของการศึกษาสามารถประยุกต์ใช้แผนผังก้างปลาเพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเมทิลเอสเตอร์กับปัจจัยต่าง ๆ ซึ่งได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2-32



รูปที่ 2-32 แผนผังก้างปลาแสดงปัจจัยที่มีผลต่อ%FAMEที่ผ่านการพิจารณาเลือกในเบื้องต้น

2.2.4 การคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อสิทธิภาพของน้ำมันไบโอดีเซล

จากการได้ทำการรวบรวมปัจจัยทั้งหมดที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (% FAME) ทั้ง 6 ปัจจัยและได้ทำการนำปัจจัยทั้งหมดมาทำการวิเคราะห์ซึ่งได้ถูกแสดงเป็นแผนผังก้างปลาในรูปที่ ก-3 เพื่อต้องการคัดเลือกปัจจัยที่มีผลสำหรับการทดลองเบื้องต้นนั้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีความสนใจในศึกษาค้นคว้าและเก็บข้อมูลจากการงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลเป็นขั้นตอนทางวิทยาศาสตร์ (Science)

ดังนั้นสามารถอ้างอิงจากผลการทดลองในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของไบโอดีเซลที่ได้จากกระบวนการผลิตซึ่งถือว่าเป็นผลการทดลองที่มีความน่าเชื่อถือได้ โดยทำการศึกษาจากงานวิจัยของหลากหลายสถาบันจำนวน 30 งานวิจัยที่ผ่านการตีพิมพ์ทั้งในและต่างประเทศภายใต้ขอบเขตการศึกษาที่สนใจดังต่อไปนี้

(1.) เลือกชนิดของน้ำมันตั้งต้นในการผลิตไบดีเซลจากน้ำมันปาล์มหรือน้ำมันพืชใช้แล้ว

(2.) เลือกใช้แอลกอฮอล์ชนิดเมทานอล (Methanol : CH_3OH) ในการทำปฏิกิริยา

(3.) เลือกใช้เบสชนิดโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการทดลอง

(4.) เลือกใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (Tranesterification) ในกระบวนผลิตไบโอดีเซล

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตเกี่ยวกับการผลิตไบโอดีเซลซึ่งเป็นการอ้างอิงความรู้ทางวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์เคมีจากผู้ที่เคยทำการศึกษามาแล้ว เป็นการเข้าช่วยในการพิจารณาเลือกเพื่อให้ได้ปัจจัยที่เหมาะสมในการทำการทดลองเบื้องต้นโดยจะทำการคัดเลือกปัจจัยที่มีตัวเลขหรือปริมาณสูง แสดงถึง จำนวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีการให้ความสนใจหรือให้ความสำคัญแก่ปัจจัยต่างๆ เพื่อในเป็นแนวทางในการคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากการทดลองเบื้องต้นต่อไป ซึ่งสามารถรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่น่าสนใจทั้ง 30 รายการและมีการศึกษาที่เกี่ยวกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลไว้ ดังตารางที่ 2-26 และ 2-27 ดังนี้

ตารางที่ 2-26 แสดงงานวิจัยที่น่าสนใจทั้ง 30 รายการและมีการศึกษาที่เกี่ยวกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

ลำดับ	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	ผู้วิจัย	คณะและสถาบัน	สารตั้งต้น(ชนิดน้ำมัน)
1	ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบของแข็ง	วัฒนชัย เยาวรัตน์	สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ,ใช้แล้วและดิบ
2	การศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกรณ์แบบท่อ	ณัฐวุฒิ พร้อมมูล	สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	น้ำมันปาล์ม
3	การศึกษาเปรียบเทียบการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเป็นตัวกลางกับวิธีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	สุวภัทร์ อภัยสุวรรณ	สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	น้ำมันปาล์ม
4	การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มและน้ำมันมะพร้าวภายใต้ความไม่แน่นอน	พิชญาคุณวุฒิ	สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	น้ำมันปาล์มและน้ำมันมะพร้าว
5	การเปรียบเทียบกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วให้ได้ตามคุณสมบัติมาตรฐานไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์	วิภาดาวันแรก	สาขาวิทยาศาสตร์เคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	น้ำมันพืชใช้แล้ว
6	การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว :ผลกระทบต่อค่าตัวแปรในกระบวนการผลิต	วสันต์ เธียรสุวรรณ	สาขาวิชาวิศวกรรมมหาวิทยาลัยมหาสารคาม	น้ำมันพืชใช้แล้ว

ตารางที่ 2-26 แสดงงานวิจัยที่น่าสนใจทั้ง 30 รายการและมีการศึกษาที่เกี่ยวกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล(ต่อ)

ลำดับ	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	ผู้วิจัย	คณะและสถาบัน	สารตั้งต้น(ชนิดน้ำมัน)
7	การทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤตโดยกระบวนการแบบต่อเนื่อง	สุกัญญา มากมี	สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์ฯ	น้ำมันพืช
8	การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤตอย่างต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์ระดับนำร่อง	เรืองวิทย์ สว่างแก้ว	สาขาวิชาเคมีเทคนิคคณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	น้ำมันปาล์มและน้ำมันมะพร้าว
9	การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ผ่านการใช้ทอดแล้วโดยกระบวนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน	จุฑาเกศ เทียนเมธางกูร	สาขาวิทยาศาสตร์เคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	น้ำมันใช้แล้ว
10	การผลิตไบโอดีเซลจากไขสบู่ที่ได้จากกระบวนการทำให้เป็นกลางของน้ำมันปาล์มดิบ	ทรงธรรมบูรณะ	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	น้ำมันปาล์มดิบ
11	การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้ตัวทำละลายร่วม	ราตรี พันธุชา	สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	น้ำมันปาล์ม
12	Transesterification of Palm Oil in Series of Continuous Stirred Tank Reactors	Theerayut Leevijit and et la	The Joint Graduate School of Energy and Environment, King Mongkut's University of Technology Thonburi	Palm Oil

ตารางที่ 2-26 แสดงงานวิจัยที่น่าสนใจทั้ง 30 รายการและมีการศึกษาที่เกี่ยวกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล(ต่อ)

ลำดับ	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	ผู้วิจัย	คณะและสถาบัน	สารตั้งต้น(ชนิดน้ำมัน)
13	Biofuel production from palm oil with supercritical alcohols: Effects of the alcohol to oil molar ratios on the biofuel chemical composition and properties	Sawangkeaw Rand et al.	Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn	Palm Oil
14	Biodiesel Production from Crude Palm Oil by Transesterification Process	A.N. Alkabbashiand et al.	Department Biotechnology Engineering, International Islamic University Malaysia	Crude Palm Oil (CPO)
15	Kinetics of Palm Oil Transesterification in a Batch Reactor	D. Darnoko1 and Munir Cheryan2	University of Illinois, Department of Food Science and Human Nutrition	Palm Oil
16	Biodiesel production from palm oil via heterogeneous transesterification	Jibrail Kansedo and et al.	School of Chemical Engineering, Universiti Sains Malaysia, Engineering Campus, Seri Ampangan	Purified palm oil

ตารางที่ 2-26 แสดงงานวิจัยที่น่าสนใจทั้ง 30 รายการและมีการศึกษาที่เกี่ยวกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล(ต่อ)

ลำดับ	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	ผู้วิจัย	คณะและสถาบัน	สารตั้งต้น(ชนิดน้ำมัน)
17	การลดปริมาณกรดไขมันอิสระด้วยปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันโดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	ลลิตาบุรีรักษ์, ธิติมา อินทร์ลีและคณะ	ภาควิชาวิศวกรรมเคมีสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	น้ำมันปาล์ม
18	Parametric sensitivity in transesterification of waste cooking oil for biodiesel production — A review	A. Banerjee, R. Chakraborty	Department of Chemical Engineering, Jadavpur University, Kolkata, India	waste cooking oils (WCOs)
19	Base catalyzed transesterification of acid treated vegetable oil blend for biodiesel production	Suzana Yusup, Modhar Ali Khan	Chemical Engineering Department, Universiti Teknologi PETRONAS, Seri Iskandar, Tronoh, Perak 31750, Malaysia	Blend of crude rubber seed oil and crude palm oil
20	การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดในปาล์มดิบ (พัฒนาเครื่องจักรและโรงงานต้นแบบขนาดเล็กผลิตพลังงานจากพืช)	นางสาววิชณีย์ออมทรัพย์สิน และคณะ	สังกัดศูนย์วิจัยปาล์มน้ำมันสุราษฎร์ธานี	น้ำมันเมล็ดในปาล์มดิบ (Crude Palm Oil)

ตารางที่ 2-26 แสดงงานวิจัยที่น่าสนใจทั้ง 30 รายการและมีการศึกษาที่เกี่ยวกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล(ต่อ)

ลำดับ	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	ผู้วิจัย	คณะและสถาบัน	สารตั้งต้น(ชนิดน้ำมัน)
21	Continuous Production of Biodiesel via Transesterification from Vegetable Oils in Supercritical Methanol	Kunchana Bunyakiat, Sukunya Makmee and et al.	Fuels Research Center, Department of Chemical Technology, Faculty of Science,Chulalongkorn UniVersity,	Coconut oil (CCO) and palm kernel oil (PKO)
22	A Comparison of Costs of Biodiesel Production from Transesterication	Kulchanat Kapilakarn and Ampol Peugtong	Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University	Vegetable oil
23	Methanolysis of used frying oil.	Tomasevic, A.V. and Siler-Marinkovic, S.S	Department of Biochemical Engineering and Biotechnology Faculty of Technology and Metallurgy, University of Belgrade	waste cooking oils (WCOs)

ตารางที่ 2-26 แสดงงานวิจัยที่น่าสนใจทั้ง 30 รายการและมีการศึกษาที่เกี่ยวกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล(ต่อ)

ลำดับ	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	ผู้วิจัย	คณะและสถาบัน	สารตั้งต้น(ชนิดน้ำมัน)
24	การสังเคราะห์เมทิลเอสเตอร์จากน้ำมันประกอบอาหารที่ใช้แล้ว.	นุชจรี เลาห์ประเสริฐ.	หลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์โพลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ฯ	น้ำมันพืชใช้แล้ว
25	Optimisation of FAME production from waste cooking oil for biodiesel use	Luis Fernando Bautista, Gemma Vicente and et al.	Department of Chemical, Environmental Technology, Universidad Rey Juan Carlos. Madrid, Spain.	waste cooking oils (WCOs)
26	Transesterification น้ำมันปาล์ม.	กรกช ทิณพงษ์ และ พรประภา บุญสมโชค.	ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	น้ำมันปาล์มดิบ
27	การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยใช้สารดูดซับ.	จิรพรรณ เจริญสินวรกุล.	ภาควิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์โพลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	น้ำมันปาล์มดิบ

ตารางที่ 2-26 แสดงงานวิจัยที่น่าสนใจทั้ง 30 รายการและมีการศึกษาที่เกี่ยวกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล(ต่อ)

ลำดับ	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	ผู้วิจัย	คณะและสถาบัน	สารตั้งต้น(ชนิดน้ำมัน)
28	การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากแกลบ.	กนกกาญจน์ ชำนาญและสุกัญญา นาลาด.	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	น้ำมันปาล์ม
29	การผลิตไบโอดีเซลจากผลิตผลปาล์มน้ำมัน.	ชาคริต ทองอุไร, สัณห์ชัย กลิ่นพิกุลและคณะ	ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	ผลิตผลจากน้ำมันปาล์ม
30	A Two-Step Biodiesel Production Waste Cooking Oil : Optimization of Pre-Treatment Step.	Wan Omar, W.N.N, Nordin, N. and et al.	Faculty of Chemical and Natural Resources Engineering Universiti Teknologi Malaysia.	Waste Cooking Oil (WCO)

ตารางที่ 2-27 แสดงผลการเก็บรวบรวมข้อมูลผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่องานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

ลำดับ	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	ปัจจัยที่ได้รับความสนใจจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล					
		ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมัน (%)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (Mins)	อัตราการกวนผสม (PRM)	ปริมาณแอลกอฮอล์ *	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา**
1	ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบของแข็ง	1	1	1	-	-	1
2	การศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกรณ์แบบท่อ	-	1	-	-	1	1
3	การศึกษาเปรียบเทียบการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเป็นตัวกลางกับวิธีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	-	1	1	-	1	1
4	การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มและน้ำมันมะพร้าวภายใต้ความไม่แน่นอน	-	1	1	-	1	-
5	การเปรียบเทียบกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วให้ได้ตามคุณสมบัติมาตรฐานไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์	1	1	1	1	1	1

ตารางที่ 2-27 แสดงผลการเก็บรวบรวมข้อมูลผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่องานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล (ต่อ)

ลำดับ	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	ปัจจัยที่ได้รับความสนใจจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล					
		ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมัน (%)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (Mins)	อัตราการกวนผสม (PRM)	ปริมาณแอลกอฮอล์ *	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา**
6	การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว :ผลกระทบต่อค่าตัวแปรในกระบวนการผลิต	1	1	1	-	1	1
7	การทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤตโดยกระบวนการแบบต่อเนื่อง	-	1	1	-	1	-
8	การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤตอย่างต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์ระดับนำร่อง	-	1	1	-	1	-
9.	การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ผ่านการใช้ทอดแล้วโดยกระบวนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน	1	1	1	-	1	-
10	การผลิตไบโอดีเซลจากไขสบู่ที่ได้จากกระบวนการทำให้เป็นกลางของน้ำมันปาล์มดิบ	-	1	1	-	1	-

ตารางที่ 2-27 แสดงผลการเก็บรวบรวมข้อมูลผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่องานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล (ต่อ)

ลำดับ	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	ปัจจัยที่ได้รับความสนใจจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล					
		ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมัน (%)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (Mins)	อัตราการกวนผสม (PRM)	ปริมาณแอลกอฮอล์ *	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา**
11	การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้ตัวทำละลายร่วม	1	1	1	1	1	1
12	Transesterification of Palm Oil in Series of Continuous Stirred Tank Reactors	-	1	1	-	-	-
13	Biofuel production from palm oil with supercritical alcohols: Effects of the alcohol to oil molar ratios on the biofuel chemical composition and properties	-	1	-	-	1	-
14	Biodiesel Production from Crude Palm Oil by Transesterification Process	1	1	1	1	1	1
15	Kinetics of Palm Oil Transesterification in a Batch Reactor	-	1	1	-	1	1

ตารางที่ 2-27 แสดงผลการเก็บรวบรวมข้อมูลผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่องานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล (ต่อ)

ลำดับ	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	ปัจจัยที่ได้รับความสนใจจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล					
		ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมัน (%)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (Mins)	อัตราการกวนผสม (PRM)	ปริมาณแอลกอฮอล์ *	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา**
16	Biodiesel production from palm oil via heterogeneous transesterification	1	1	1	-	1	1
17	การลดปริมาณกรดไขมันอิสระด้วยปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันโดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	1	1	1	-	1	-
18	Parametric sensitivity in transesterification of waste cooking oil for biodiesel production—A review	1	1	1	-	1	1
19	Base catalyzed transesterification of acid treated vegetable oil blend for biodiesel production	-	1	1	-	1	1
20	การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดในปาล์มดิบ(พัฒนาเครื่องจักรและโรงงานต้นแบบขนาดเล็กผลิตพลังงานจากพืช)	-	1	1	-	1	1

ตารางที่ 2-27 แสดงผลการเก็บรวบรวมข้อมูลผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่องานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล (ต่อ)

ลำดับ	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	ปัจจัยที่ได้รับความสนใจจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล					
		ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมัน (%)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (Mins)	อัตราการกวนผสม (PRM)	ปริมาณแอลกอฮอล์ *	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา**
21	Continuous Production of Biodiesel via Transesterification from Vegetable Oils in Supercritical Methanol	-	1	1	-	1	-
22	A Comparison of Costs of Biodiesel Production from Transesterication	1	1	1	-	1	-
23	Methanolysis of used frying oil.	-	1	1	-	1	1
24	การสังเคราะห์เมทิลเอสเตอร์จากน้ำมันที่ผ่านการใช้แล้ว.	1	1	1	-	1	1
25	Optimisation of FAME production from waste cooking oil for biodiesel use	1	1	1	-	1	1
26	Transesterification น้ำมันปาล์ม.	-	1	1	-	1	1
27	การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยใช้สารดูดซับ.	1	1	1	-	1	1

ตารางที่ 2-27 แสดงผลการเก็บรวบรวมข้อมูลผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่องานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล (ต่อ)

ลำดับ	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	ปัจจัยที่ได้รับความสนใจจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล					
		ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมัน (%)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (Mins)	อัตราการกวนผสม (PRM)	ปริมาณแอลกอฮอล์ *	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา**
28	การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากแกลบ.	-	1	1	-	1	1
29	การผลิตไบโอดีเซลจากผลิตผลปาล์มน้ำมัน.	-	1	1	-	1	1
30	A Two-Step Biodiesel Production Waste Cooking Oil : Optimization of Pre-Treatment Step.	1	1	1	-	1	-
	รวมจำนวนงานวิจัยที่ (Summary Papers)	14	30	28	3	28	19
	Percentage (%)	46.67	100.00	93.33	10.00	93.33	63.33

หมายเหตุ * แทน หน่วยของปริมาณแอลกอฮอล์ (%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์มใช้แล้วหรือสัดส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน) และ

** แทน หน่วยชองปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%โดยน้ำหนักน้ำมัน)

จากตารางที่ 2-27 ได้ทำการศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลทั้งหมด 30 งานวิจัย สามารถสรุปผลได้ดังนี้ งานวิจัยทั้งหมดทำการเลือกใช้เมทานอลเป็นแอลกอฮอล์และใช้เบสชนิดโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แต่งานวิจัยส่วนใหญ่เลือกใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นสารเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากเบสทั้ง 2 ชนิดนี้มีความสามารถในการเร่งในการเกิดปฏิกิริยาใกล้เคียงกันแต่โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่า ดังนั้นนักวิจัยส่วนใหญ่จึงเลือกใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไฮด์ (KOH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันของกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

ส่วนปัจจัยที่มีผลทั้ง 6 ปัจจัยซึ่งได้ผ่านการเลือกปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) มาแล้วในขั้นตอนแรก หลังจากได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลซึ่งสามารถสรุปผลเป็น Percent และสรุปเป็นแผนภูมิพาเรโต (ParetoChart) โดยเรียงลำดับจากจำนวนงานวิจัยที่ให้ความสนใจปัจจัยแต่ละปัจจัยจากมากไปน้อย ซึ่งได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2-33

(1) อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา คิดเป็น 24.6%

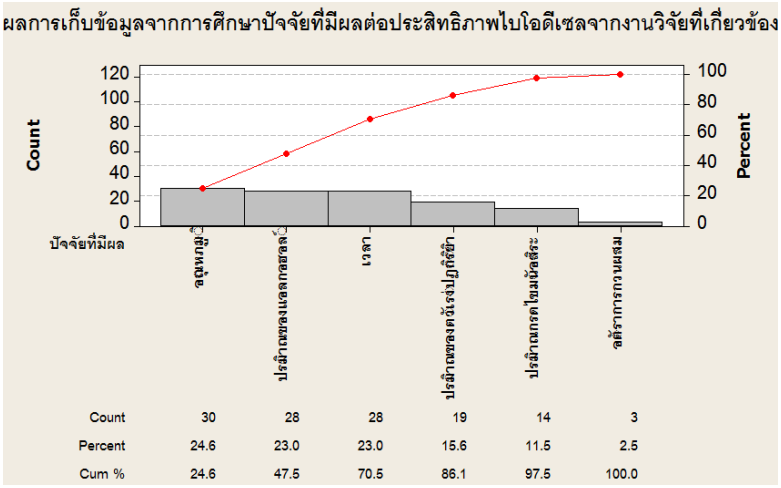
(2) ปริมาณของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา คิดเป็น 23.0%

(3) เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา คิดเป็น 23.0%

(4) ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา คิดเป็น 15.6%

(5) ปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันตั้งต้น คิดเป็น 11.5%

(6) อัตราการกวนผสมในการผลิต คิดเป็น 2.5%



รูปที่ 2-33 แสดงแผนภูมิพาเรโตของตัวเลขแสดงถึงปัจจัยที่มีผลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต

สำหรับหลักการวิเคราะห์ข้อมูลจากแผนภูมิพาเรโตซึ่งถูกนิยมใช้กันโดยทั่วไปกล่าวว่า 80% ของปัญหามักจะมีการอ้างอิงจาก 20% ของผลจากการศึกษา ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตทั้งหมด 30 งานวิจัย จากรูปที่ 2-32 พบว่า ปัจจัยที่อยู่ตกภายใต้ 80% ของปัญหามีทั้งหมด 4 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา, ปริมาณของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา, เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

แต่เนื่องจากทำการศึกษาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นสำหรับปริมาณของ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ซึ่งมีผลการทดลองจากหลายๆ งานวิจัยส่วนใหญ่นิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ระดับ 1.0% โดยน้ำหนักของน้ำมันในสภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (% FAME) ที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล ดังนั้นเพื่อเป็นลดปริมาณปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของไบโอดีเซลในงานวิจัยนี้จึงได้กำหนดให้ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นค่าคงที่หรือเป็นตัวแปรควบคุมตัวหนึ่งในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล คือ 1.0% โดยน้ำหนักน้ำมันใช้แล้วตั้งต้น

จากรูปที่ 2-33 พบว่า ปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันตั้งต้นเป็นปัจจัยที่ได้ไม่ถูกเลือกจากการวิเคราะห์ผลจากแผนภูมิพาเรโต้ เนื่องจากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยทั้งหลายข้างต้นต้องการเพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลแต่ไม่ได้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความแตกต่างของปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) ของน้ำมันตั้งต้น ซึ่งถือว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญหลักที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) และสำหรับงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการศึกษาปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีผลต่อประสิทธิภาพของน้ำมันไบโอดีเซล ได้แก่ ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (% FAME) ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลและสามารถทำการคำนวณหาผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)ได้ ดังนั้นสำหรับงานวิจัยนี้จึงทำการคัดเลือกปัจจัย “ปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันตั้งต้น” ให้เป็นปัจจัยเบื้องต้นที่มีผลในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลนี้

เมื่อได้ทำการคัดเลือกปัจจัยเบื้องต้นที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (% FAME) ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ได้กล่าวมาข้างต้น ดังนั้นสามารถสรุปปัจจัยที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยาที่ผ่านการคัดเลือกในเบื้องต้นทั้งหมด 4 ปัจจัย ได้แก่

- ปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันตั้งต้น (%FFA ; %)
- อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (Temperature ; °C)

- ปริมาณของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (Methanol ; %v/v of oil)
- เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (Time ; Mins.)

ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (% FAME) ทั้ง 4 ปัจจัยข้างต้น ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดในแต่ละปัจจัยและการเลือกระดับที่สนใจทำการศึกษาในงานวิจัย ดังต่อไปนี้

➢ **ปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันตั้งต้น** (Free Fatty Acid ; FFA)

สำหรับงานวิจัยนี้ศึกษาความแตกต่างของแหล่งที่มาของน้ำมันปาล์มที่ผ่านการใช้แล้วที่สุ่มตัวอย่างมาจาก 4 แหล่งที่มาซึ่งมีค่ากรดไขมันอิสระหรือ Free Fatty Acid (%FFA) แตกต่างกัน ซึ่งใช้สำหรับทอดผลิตภัณฑ์ที่ต่างชนิดกัน ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ประเภทพืชและประเภทสัตว์ ซึ่งมีปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันตั้งต้นประมาณ 0.427, 0.512, 0.630 และ 1.435% ตามลำดับ และสำหรับปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันปาล์มที่ยังไม่ผ่านการใช้ (บริษัท โอลีน จำกัด) มีค่าประมาณ 0.55 -0.65% เป็นต้น

➢ **อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา**

อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในการผลิตไบโอดีเซลอย่างมากและจากการศึกษาผลการทดลองของงานวิจัยในอดีตข้างต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาอิทธิผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อประสิทธิภาพของไบโอดีเซลที่ระดับช่วง 30°C ถึง 60°C

➢ **เวลาในการทำปฏิกิริยา** (Reaction Time)

การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันนั้น อัตราการเกิดไบโอดีเซลจะแปรผันโดยตรงกับเวลาแสดงให้เห็นว่าหากใช้เวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้น และจากการศึกษาผลการทดลองของงานวิจัยในอดีตข้างต้น ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาอิทธิผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อประสิทธิภาพของไบโอดีเซลที่ระดับช่วง 30 ถึง 120 นาที

➢ **ปริมาณที่ใช้ระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันตั้งต้น**

ปริมาณที่ใช้ระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลอย่างมากต่อกระบวนการผลิตไบโอดีเซลและจากการศึกษาผลการทดลองของงานวิจัยในอดีตข้างต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาอิทธิผลของปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อประสิทธิภาพของไบโอดีเซลที่ระดับช่วง 15 ถึง 50 %โดยปริมาตรของน้ำมัน (%v'v of oil)

2.2.5 การกำหนดระดับของปัจจัยสำหรับการทดลองเบื้องต้น

การกำหนดระดับของปัจจัยหลักสำหรับการทดลองเบื้องต้นและปัจจัยที่ต้องการควบคุมในการทดลองนี้ โดยทำการกำหนดระดับของปัจจัย (Levels) เป็นแบบกำหนดคงที่ (Fixed Level) เนื่องจากเป็นปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าได้แน่นอน โดยอาศัยการศึกษาความรู้พื้นฐานในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากหนังสือ บทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและใช้ประสบการณ์จากผู้ทำการทดลองที่มีความชำนาญเพื่อทำการกำหนดระดับของปัจจัยที่มีความเหมาะสมในการทำการทดลองเบื้องต้นออกเป็น 2 ระดับ เพื่อศึกษาแนวโน้มของผลการทดลองและใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการศึกษาในขั้นตอนต่อไป

แต่สำหรับในงานวิจัยนี้ผู้ทำการทดลองได้กำหนดระดับของปัจจัยจากค่าควบคุมหรือจากการอ้างอิงจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตเพิ่มเติมซึ่งนิยมใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลอยู่แล้วดังนั้นเมื่อทำการคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (% FAME) ในเบื้องต้นได้ทั้งหมด 4 ปัจจัย จากทฤษฎีและงานวิจัยในอดีตทั้งหลายที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น สำหรับในงานวิจัยนี้สามารถสรุปช่วงหรือระดับของค่าที่สนใจสำหรับปัจจัยต่าง ๆ ซึ่งได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2-28 ซึ่งข้อมูลดังกล่าวได้ถูกอ้างอิงจากการศึกษาค้นคว้าข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น

ตารางที่ 2-28 แสดงปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการทดลองเบื้องต้น

ปัจจัย	ช่วงของค่าที่สนใจ	หน่วย
ปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันตั้งต้น	0.427 – 1.435	%FFA (การสุ่ม 4 ตัวอย่าง)
อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	45 - 60	$^{\circ}$C
เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	30 - 60	นาที
ปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง	15 - 25	% โดยปริมาตรน้ำมันที่ใช้แล้ว

2.2.6 การกำหนดขอบเขตของปัจจัยเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล

จากผลการทดลองเบื้องต้น แสดงให้เห็นว่าปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้จากการทดลองสำหรับทุกสภาวะการทดลองใดๆ เป็นแนวโน้มที่ชัดเจนในแต่ละปัจจัย ได้แก่ เมื่อปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มใช้แล้วสูงขึ้น พบว่า ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) มีแนวโน้มลดลง ส่วนปัจจัยทางด้วยอุณหภูมินั่น หากทำการทดลองที่ระดับอุณหภูมิสูงขึ้น พบว่าปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สำหรับปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งพบว่าถ้าใช้ปริมาณเมทานอลเพิ่มมากขึ้น พบว่า ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน ส่วนระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองนั้น หากใช้เวลาในการทดลองมากขึ้น พบว่าปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) มีแนวโน้มลดลง เป็นต้น

หลังจากวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยกราฟเส้นเพื่อเปรียบเทียบแนวโน้มและความสัมพันธ์ในแต่ละปัจจัยแล้ว หากต้องการประหยัดต้นทุนทั้งทางด้านวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของไบโอดีเซล เช่น ทำการทดลองเพิ่มที่ระดับอุณหภูมิต่ำลง คือ ที่ระดับ 30°C แต่หากมีการลดระดับอุณหภูมิลงอาจจำเป็นต้องเพิ่มระยะเวลา (ระยะเวลา 120 นาที) และปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง (50% โดยปริมาตรของน้ำมัน) ตามลำดับ

ดังนั้นการหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของไบโอดีเซล ภายใต้เกณฑ์การพิจารณาเลือกที่แตกต่างกันตามวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้ได้ โดยต้องทำการทดลองเพิ่มดังตารางที่ 2-29ดังนี้

ตารางที่ 2-29 ขอบเขตของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองเพิ่มเติมเพื่อหาสภาวะเหมาะสมในการทดลอง

ปัจจัย	ขอบเขตของปัจจัย		หน่วย
	เบื้องต้น	เพิ่มเติม	
ปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันตั้งต้น	0.427 – 1.435		%FFA (สุ่ม 4 ตัวอย่าง)
อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	45 - 60	30	°C
เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	30 - 60	120*	นาที
ปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง	15 - 25	50*	% โดยปริมาตรน้ำมัน

หมายเหตุ สัญลักษณ์ * แทน สำหรับสภาวะที่ใช้ในการทดลองเฉพาะที่ระดับอุณหภูมิ 30°C เท่านั้น

เมื่อทราบประสิทธิภาพของไบโอดีเซลตามต้องการแล้ว สามารถคำนวณหาปริมาณมวลของสารตั้งต้นในขั้นตอนต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองโดยใช้หลักการสมดุลมวลสาร หรือ Mass Balance นอกจากนี้สามารถคำนวณหาปริมาณความร้อนหรือพลังงานความร้อนที่ใช้ในในการทดลองได้เช่นกัน เพื่อนำไปสู่ขั้นตอนการคำนวณหาค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งประกอบด้วยค่าใช้จ่ายรวมทั้งด้านวัตถุดิบทางตรงและค่าใช้จ่ายรวมด้านพลังงาน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการสมดุลมวลสารและพลังงานความร้อนที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

ในบางงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยพลังงานแสดงอาทิตย์ โดยการนำน้ำมันปาล์มมาผลิตเป็นไบโอดีเซลและใช้พลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นแหล่งให้พลังงานความร้อนแทนการใช้พลังงานจากก๊าซหุงต้ม แท่งเชื้อเพลิง โดยใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์มาให้ความร้อนแก่น้ำและใช้น้ำเป็นสารตัวกลางรับความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำมันปาล์ม ผ่านทางอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันปาล์มจากอุณหภูมิแวดล้อมที่ 30°C เป็น 60° [100]

สำหรับหลักการสมดุลมวลสาร มีงานวิจัยหนึ่งได้ใช้วิธีทางสถิติในการประเมินความแน่นอนของตัวแปรต่างๆ ในการประยุกต์ใช้สมการสมดุลมวลสารเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ของแต่ละวิธี และศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นของการคำนวณปริมาณน้ำมันในแหล่ง โดยได้ทำวิธีทางสถิติต่างๆมาจากบทความบทความตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องและและงานวิจัยต่างๆ ในเรื่องที่เกี่ยวกับหลักการวิเคราะห์ความไม่แน่นอน [102] และบางงานวิจัยได้ศึกษากระบวนการสร้างเพลเล็ตแบบไหลขึ้น โดยทำการทดลองศึกษาดุลมวลของระบบการสร้างเพลเล็ต ซึ่งใช้น้ำดิบจากแม่น้ำเจ้าพระยาในช่วงเดือนกันยายน 2539 ถึงกุมภาพันธ์ 2540 [103] และบางงานวิจัยได้สร้างแบบจำลองเพื่อการสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน 2 ถังต่อแบบอนุกรมที่มีการป้อนสารกลับ โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าอัตราส่วนอัตราการไหลเชิงโมลของสารต่ออัตราการไหลเชิงโมลของน้ำมันปาล์มที่เข้าทำปฏิกิริยา เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ [104] เป็นต้น

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

- น้ำมันปาล์มที่ผ่านการใช้แล้วจาก 4 ตัวอย่างซึ่งมีปริมาณกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน
  - ชนิดที่ 1 : จากโรงงานอุตสาหกรรมที่ผ่านการทอดธัญพืชประเภทถั่ว
  - ชนิดที่ 2 : จากร้านค้าทั่วไปที่ผ่านการทอดเนื้อสัตว์ประเภทไก่
- เบส : เกล็ดโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์: A.R. Grade, Ajax Chemical Co., Ltd.
- แอลกอฮอล์: เมทานอล(ความเข้มข้น 99.98% โดยน้ำหนัก) A.R.Grade
- น้ำกลั่น

วัสดุที่ใช้เตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเตอร์

- n-Heptane: Analysis grade, Labscan, Ireland
- เมทิลเฮปตะดีคาโนเอท (methyl heptadecanoate) : ค่าความบริสุทธิ์ 95 เปอร์เซ็นต์
- สารละลายเมทิลเฮปตะดีคาโนเอท 10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรเตรียมโดยชั่งเมทิลเฮปตะดีคาโนเอท 500 มิลลิกรัม ใส่ลงใน volumetric flask ขนาด 50 มิลลิลิตรแล้วเติมด้วย n-Heptane จนกระทั่งมีปริมาตรครบ 50 มิลลิลิตร

3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมน้ำมันปาล์มใช้แล้ว

- ชุดกรองสารระบบสุญญากาศ Glass Vacuum Filter Holder
- กระดาษกรอง เมมเบรนฟิวเตอร์ (ใช้กรองของเหลวด้วยกระดาษกรอง โดยใช้ปั๊มแรงดันสุญญากาศช่วยในการไหล)
- กรวยกระเบื้อง (Funnel) และ ขวดแก้ว (Filtration Flask)
- ขาตั้งและที่รองกรวยแยกสาร (O'ring)

- บีกเกอร์ขนาด 500, 800 และ 1,000 ml. และกระบอกตวง 500 ml
- แท่งแก้วคน
- เครื่องกวนสารให้ความร้อน (Hot Plate - Magnetic Stirrer)
- เทอร์โมมิเตอร์แท่งแก้ว (Glass Thermometer)
- ขวดใส่สารละลาย (Reagent bottle) สำหรับใส่ตัวอย่างน้ำมันที่ผ่านการเตรียมแล้ว
- กระดาษทิชชูหรือผ้าสะอาดสำหรับเช็ด

เครื่องมือที่ใช้ตรวจหาปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม

- เครื่องไตเตรทอัตโนมัติ (สำหรับตรวจหาปริมาณกรดไขมันอิสระตั้งต้นในน้ำมันปาล์ม)
- สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ความเข้มข้น 0.1%โดยปริมาตร)
- เอทานอล (ความเข้มข้น 95%โดยน้ำหนัก)

เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

- ชุดเครื่องแก้ว (บีกเกอร์ขนาด 100, 500, 800 และ 1, 000 ml. กระบอกตวง 500 ml
- ชุดอุปกรณ์การกวนด้วยแท่งแม่เหล็กและให้ความร้อน: Hot Plate - Magnetic Stirrer
- แท่งเหล็ก Magnetic Stirrer (สำหรับการกวนสาร)
- เทอร์โมมิเตอร์
- ขาตั้งและที่รองกรวยแยกสาร (O'ring)
- กรวยแยกสาร (Separating Funnel) ขนาด 1,000 ml.
- กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 4
- เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Analytical Balance)
- กระดาษลิตมัสหรือ pH-Meter
- นาฬิกาจับเวลา (Digital Timer)
- อลูมิเนียมฟอยด์ (Aluminium Foil)
- กระดาษลิตมัสหรือ pH Meter
- กระดาษทิชชูหรือผ้าสะอาดสำหรับเช็ด
- สมุดจดบันทึกผลการทดลอง

เครื่องมือป้องกันภัย

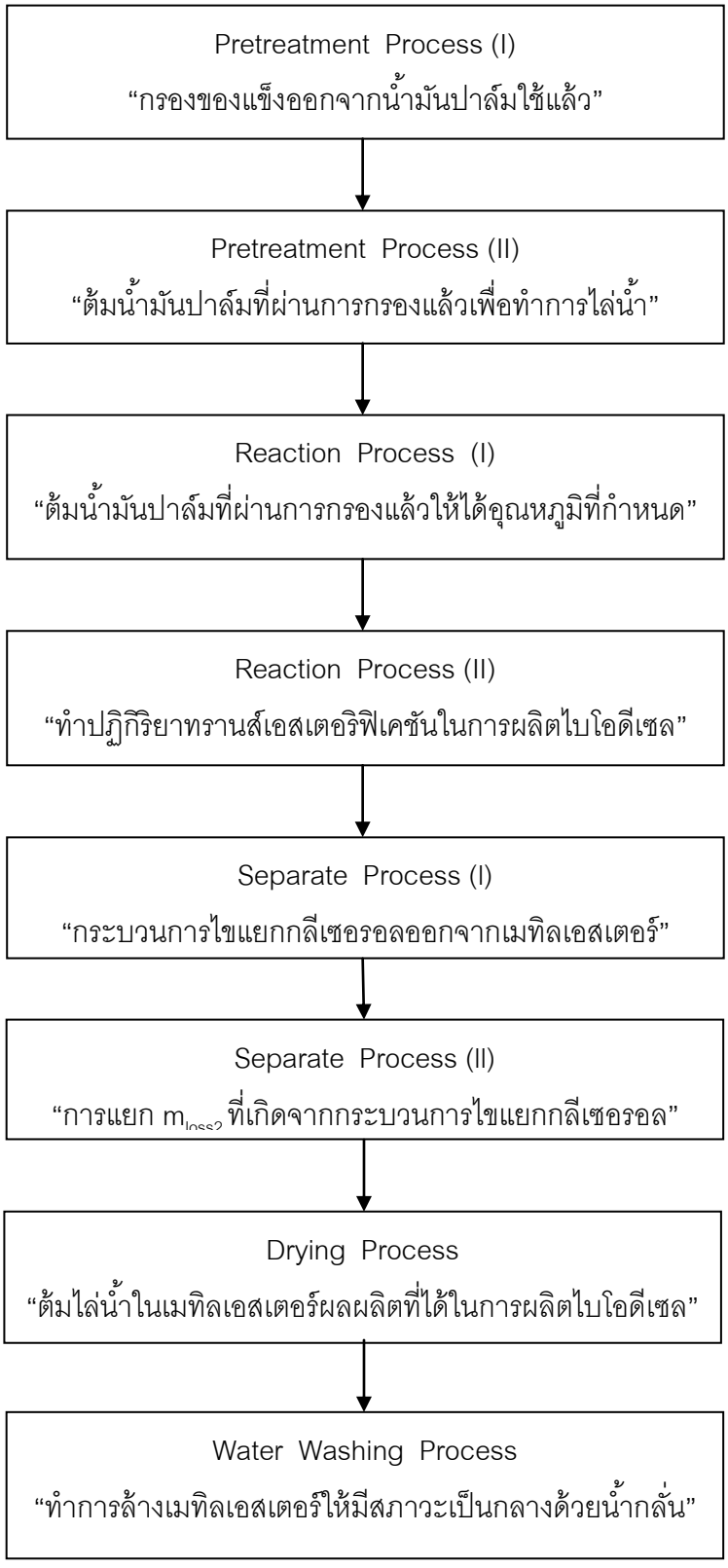
- ถุงมือ (Glove)
- เสื้อกาวน์ (Lab Gown)
- ที่ปิดจมูก
- แว่นตานิรัย (Eye Protection)
- รองเท้าผ้าใบนิรภัย (Canvas safety shoes)

3.2 วิธีการทดลอง

สำหรับการวิจัยครั้งนี้ได้เลือกกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชัน **(Transesterification)** เนื่องจากได้นำตัวอย่างน้ำมันปาล์มใช้แล้วจากการสุ่มทั้ง 4 ตัวอย่างซึ่งมีปริมาณกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน โดยทำการวัดค่า %FFA ของ (กรดไขมันอิสระหรือ Free Fatty acid ; FFA) ต่ำกว่าร้อยละ 2 จึงสามารถเลือกใช้กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันสำหรับผลิตไบโอดีเซล โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการเอสเทอร์ริฟิเคชันก่อน การศึกษาทำงานวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการทดลองต่อ Batch เท่ากับ ปริมาตรน้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้น 300 มิลลิลิตร (ml.) แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ

- การเตรียมวัตถุดิบ(การแยกของแข็งหรือตะกอนออกจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้น)
- คำนวณหาปริมาณการใช้แอลกอฮอล์ (เมทานอล) และตัวเร่งปฏิกิริยา (KOH)
- การผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันในสภาวะต่างๆเพื่อผลิตไบโอดีเซล
- การตรวจวัดคุณภาพน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองโดยอ้างอิงตามวิธีมาตรฐาน EN14103จากมาตรฐานไบโอดีเซลของข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมันพ.ศ. 2550 ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน โดยการส่งตัวอย่างเมทิลเอสเตอร์ตรวจ ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการสรุปกระบวนการผลิตไบโอดีเซลเป็น Process Flow Chart เพื่อความง่ายในการเข้าใจในขั้นตอนการทดลอง ดังรูปที่ 3-1



รูปที่ 3-1 แสดงการสรุปขั้นตอนกระบวนการผลิตไบโอดีเซลเป็น Process Flow Chart

3.3 การตรวจสอบคุณสมบัติของไบโอดีเซล

3.3.1 ปริมาณเมทิลเอสเตอร์

ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (Methylester หรือ %FAME) ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชันของการผลิตไบโอดีเซลซึ่งเป็นคุณสมบัติทางเคมีของไบโอดีเซล ซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (GC)ตามมาตรฐาน EN 14103 โดยใช้ Methyl Heptadeanoate เป็นสาร Internal Standard และสามารถอ่านค่าออกมาในรูปของโครมาโทกราฟดังนั้นปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) สามารถทำการคำนวณหาได้โดยการแทนค่าที่อ่านได้จากโครมาโตกราฟในสมการที่ (2.1) ซึ่งได้ถูกกล่าวมาแล้วในบทที่ 2

เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเตอร์

- เครื่องแก๊ซโครมาโตกราฟี: model GC – 2010, Shimadzu, Japan

  แก๊สตัวนำ : He

  คอลัมน์ : DB – Wax, 30 เมตร x 0.32 มิลลิเมตร

  ดีเทคเตอร์ : FID, 380 องศาเซลเซียส

  อินเจคเตอร์ : 260 องศาเซลเซียส (DB – Wax), split ratio 25
- เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง: model BL210S, Sartorius, Goettingen, Germany
- เครื่องผสม (Vortex Mexer): model KMC-1300V, VISION, Korea
- ขวด Vial ขนาด 10 มิลลิลิตร

การเตรียมตัวอย่างและทดสอบหาปริมาณ %FAME ในไบโอดีเซลด้วยเครื่อง GC [106]

วิธีการหาปริมาณของเมทิลเอสเตอร์(FAME) ในตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี(Gas Chromatography; GC) อ้างอิงตามวิธีมาตรฐาน EN14103 ซึ่งประกอบไปด้วยน้ำมัน 3 ชนิดด้วยกันคือ

1. ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil; CPO)
2. ไบโอดีเซลจากปาล์มสเตียริน (Palm Stearin)
3. ไบโอดีเซลจากน้ำมันทอดใช้แล้ว (Used Frying Oil; UFO)

ในงานวิจัยนี้ มีตัวอย่างที่จะต้องทำการเตรียมและทดสอบหา %FAME นั่นเป็นประเภทไบโอดีเซลจากน้ำมันทอดใช้แล้ว (Used Frying Oil; UFO) ดังนั้นจึงสามารถอ้างอิงตามมาตรฐาน EN14103 ได้

การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบดังนี้

1. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างให้ได้น้ำหนัก 250 มิลลิกรัมด้วยเครื่องชั่ง 5 ตำแหน่งบันทึกน้ำหนักที่ได้
2. เติม Internal Standard (Methl Heptadecanoate) ที่มีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรลงไปในตัวอย่างปริมาตร 5 มิลลิลิตรบันทึกปริมาตรแน่นอนของ Internal Standard ที่ใช้ด้วยผสมให้เข้ากันด้วย mixer
3. สำหรับกรณีตัวอย่างที่เป็นไบโอดีเซลจากน้ำมันทอดใช้แล้ว(Used Frying Oil; UFO) ให้เตรียมตัวอย่าง 2 ชุดโดยชุดแรกผสมด้วยตัวทำละลาย Heptane ปริมาตร 5 มิลลิลิตร และชุดที่ 2 ผสมด้วย Internal Standard ที่มีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรปริมาตร 5 มิลลิลิตร พร้อมทั้งบันทึกน้ำหนักน้ำมัน
4. ทำการปิเปตตัวอย่างจากข้อ 3 ใส่ vial สำหรับทดสอบด้วยเครื่อง GC ต่อไป

การเตรียมสาร Internal Standard

ชั่ง Internal Standard (methyl heptadecanoate) บันทึกน้ำหนักแน่นอนและลายด้วยตัวทำละลาย Heptane ให้ได้ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

3.3.2 ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์

ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลหมายถึง เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน ดังนั้นการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผลได้ของไบโอดีเซล โดยสามารถคำนวณจากสมการที่ (2.2) ซึ่งกล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ดังนั้นการวิเคราะห์ร้อยละผลผลิตของปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยศึกษาแนวโน้มและความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลผลิตของปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) เปลี่ยนแปลง ซึ่งทำการพิจารณาแยกในแต่ละปัจจัยของแต่ละการทดลอง ในรูปแบบตารางบันทึกผลและกราฟเส้นเพื่อให้ง่ายในการเข้าใจและนำไปใช้ต่อ

3.4 การคำนวณค่าใช้จ่ายด้านวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในการทดลอง

ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง หมายถึง ผลรวมของค่าใช้จ่ายทั้งหมด (ทุกขั้นตอนการทดลอง) สำหรับในงานวิจัยนี้ ค่าใช้จ่ายรวมที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยค่าใช้จ่ายด้านวัตถุดิบทางตรงและค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งสามารถสรุปเป็นสมการค่าใช้จ่ายโดยรวมที่ใช้ในการทดลองต่อ 1 Batch การทดลอง (300 ml.) ดังสมการที่ (3.1)

$$\text{ค่าใช้จ่ายรวม (บาท)} = \text{ผลรวมของค่าใช้จ่าย} \left\{ \begin{array}{c} \text{ด้านวัตถุดิบโดยตรง} \\ + \\ \text{ด้านพลังงาน} \end{array} \right\} \qquad (3.1)$$

คำนวณปริมาณผลผลิตที่ได้ในการทดลอง

ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนนั้น อาจจะไม่สามารถบันทึกค่าได้ในทุกๆ ขั้นตอนของการทำการทดลอง เนื่องจากมีความยุ่งยากและซับซ้อนของกระบวนการทำลอง ส่งผลให้ไม่สามารถทำการวัดค่าหรือน้ำหนักของผลผลิตที่เกิดขึ้นจริงในแต่ละสภาวะการทดลอง เช่น น้ำหนักของตะกอนหรือของแข็งที่ได้ถูกกรองแยกออกจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้นในขั้นตอนการ Pre-Treatment, น้ำหนักของน้ำมันตั้งต้นที่หายไประหว่างการทำปฏิกิริยา, น้ำหนักของเมทิลเอสเตอร์ที่หายไปหลังจากผ่านกระบวนการแยกกลีเซอรอลและน้ำหนักของเมทิลเอสเตอร์ที่หายไปหลังจากผ่านกระบวนการต้มไล่น้ำในขั้นตอนสุดท้าย เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้จึงใช้หลักการสมดุลมวลสาร (Mass Balance)มาจากกฎทรงมวล (Law of conservation of mass) ได้กล่าวว่า “มวลของสารไม่สามารถถูกสร้างขึ้นใหม่ หรือถูกทำลายได้” ดังนั้น จึงสามารถใช้สมดุลมวลในการติดตามความเป็นไปของมวลในกระบวนต่างๆและสามารถคำนวณหามวลได้ไม่ทราบค่าได้ โดยอ้างอิงจากสามารถที่ (2.3) ที่กล่าวไว้ในบทที่ 2. ดังสมการที่ (3.2)

$$\boxed{\text{มวลของสารที่เข้าสู่กระบวนการ } (\text{Mass}_{\text{In}})} = \boxed{\text{มวลของสารที่ออกจากกระบวนการ } (\text{Mass}_{\text{Out}})} \qquad (3.2)$$

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ได้ทำการสรุป Material หรือ Mass Balances ของกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ในรูปของ Process Flow Chart เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าโดยอ้างอิงกระบวนการทดลองดังรูปที่ 3-1 และได้แสดงสมการสมดุลมวลสาร (Mass Balance Equations) ในแต่ละขั้นตอนการทดลองทั้ง 6 ขั้นตอน (STEP) การทดลอง ซึ่งได้แสดงดังรูปที่ 3-6 ถึง รูปที่ 3-15 เพื่อแสดงให้เห็นว่าในแต่ละขั้นตอนนั้นมีมวลของสารที่เข้าสู่กระบวนการเท่าไหร่ (Mass $_{In}$) และมีมวลของสารที่ออกจากกระบวนการเท่าไหร่ (Mass $_{Out}$) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณของผลผลิตที่ได้ในแต่ละขั้นตอน เพื่อนำไปเป็นข้อมูลในการคำนวณหาค่าใช้จ่ายทั้งหมด (บาท) ที่ใช้ในการทดลองต่อ 1Batch การทดลอง (300 ml.) ต่อไป

สำหรับการแสดง Mass Balance ในรูปของ Process Flow Chart ของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในรูปที่ 3-6 นั้น ในงานวิจัยนี้ได้มีการกำหนดตัวแปรต่างๆ ซึ่งใช้แทนมวลหรือน้ำหนักของสารต่างๆ ในแต่ละขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอน (STEP) ที่ปรากฏในสมการสมดุลมวลสาร (Mass Balance Equations) โดยทำการสรุปตัวแปรทั้งหมดไว้ในตารางที่ 3-1

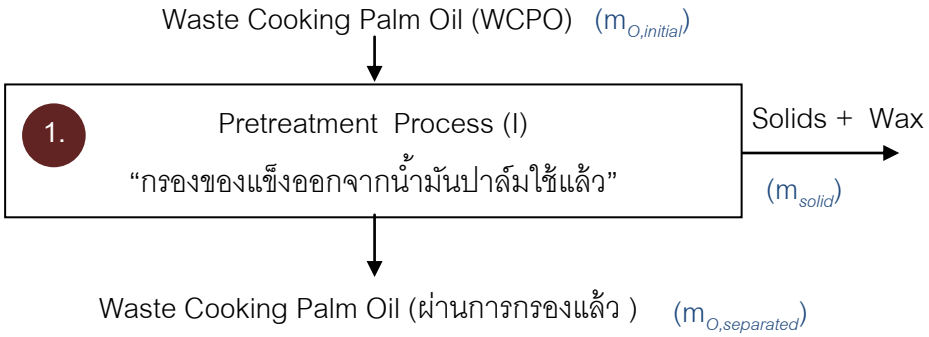
ตารางที่ 3-1 แสดงตัวแปรต่างๆ ใน Mass Balance Equationsเพื่อคำนวณหาปริมาณของผลผลิตที่ได้ในแต่ละขั้นตอน (สำหรับ 1 Batchการทดลอง)

No.	ตัวแปร	Detail (หมายถึง)	หน่วย
1.	$m_{O,initial}$	น้ำหนักน้ำมันปาล์มใช้แล้วก่อน (initial) ทำการกรองแยกของแข็งออก	กรัม (g.)หรือ มิลลิลิตร (ml.)
2.	m_{solid}	น้ำหนักของแข็ง (solid) ซึ่งได้จากการกรองแยกน้ำมันปาล์มใช้แล้ว	กรัม (g.)
3.	$m_{O,separated}$	น้ำหนักน้ำมันปาล์มใช้แล้วซึ่งผ่านการกรองแยกของแข็งออก(separated)	กรัม (g.)
4.	m_{w}	น้ำหนักของน้ำ (water) ซึ่งถูกแยกออกจากน้ำมันปาล์มด้วยการต้มไล่น้ำที่อุณหภูมิ 150 °C	กรัม (g.)
5.	$m_{O,final}$	น้ำหนักของน้ำมันปาล์ม (Palm oil) ซึ่งผ่านการต้มไล่น้ำแล้ว	กรัม (g.)
6.	m_{Oil}	น้ำหนักของน้ำมันปาล์ม (Palm oil) เริ่มต้นในการทดลอง ซึ่งผ่านการ Pretreatment แล้ว	กรัม (g.) หรือ มิลลิลิตร (ml.)
7.	$m_{O,boiled}$	น้ำหนักของน้ำมันปาล์ม ซึ่งผ่านการอุ่นให้ได้ในระดับอุณหภูมิที่กำหนด	กรัม (g.)
8.	m_{KOH}	น้ำหนักของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยา	กรัม (g.)
9.	m_{MeOH}	น้ำหนักของเมทานอล (MeOH) ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	กรัม (g.)หรือ มิลลิลิตร (ml.)
10.	$m_{G+m,initial}$	น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ (Product) ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันในการทดลอง	กรัม (g.)
11.	m_{loss1}	น้ำหนักที่เกิดการสูญเสีย ($loss_1$) ระหว่างการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน	กรัม (g.)

ตารางที่ 3-1 แสดงตัวแปรต่างๆ ใน Mass Balance Equationsเพื่อคำนวณหาปริมาณของผลผลิตที่ได้ในแต่ละขั้นตอน (สำหรับ 1 Batchการทดลอง) (ต่อ)

No.	ตัวแปร	Detail (หมายถึง)	หน่วย
12.	$m_{m,initial}$	น้ำหนักของเมทิลเอสเตอร์เริ่มต้น (initial) ที่ได้จากการไขแยกหลังการทำปฏิกิริยา (จากการคำนวณ)	กรัม (g.)
13.	m_{G}	น้ำหนักของกลีเซอรอล (Glycerol) จากการไขแยกหลังการทำปฏิกิริยา	กรัม (g.)
14.	$m_{m,initial,Actual}$	น้ำหนักของเมทิลเอสเตอร์เริ่มต้น (initial) ที่ได้จากการไขแยกหลังการทำปฏิกิริยา (จากการทดลอง)	กรัม (g.)
15.	m_{loss2}	น้ำหนักของเมทิลเอสเตอร์ที่เกิดการสูญเสีย ($loss_2$) ระหว่างกระบวนการไขแยกกลีเซอรอล	กรัม (g.)
16.	$m_{Water,\ input}$	น้ำหนักของน้ำกลั่น (Distilled Water) ที่ใช้ในกระบวนการล้างน้ำ (input) หรือ m_{Water}	กรัม (g.)
17.	$m_{m,washed}$	น้ำหนักของเมทิลเอสเตอร์ (Methyl ester) ที่ได้หลังจากกระบวนการล้างน้ำด้วยน้ำกลั่น	กรัม (g.)
18.	m_{Waste}	น้ำหนักของ Waste ที่เกิดระหว่างกระบวนการล้างน้ำ	กรัม (g.)
19.	$m_{Water,\ output}$	น้ำหนักของน้ำกลั่น (Distilled Water) ที่ถูกไขแยกออกในกระบวนการล้างน้ำ (input)	กรัม (g.)
20.	$m_{m,loss}$	น้ำหนักของเมทิลเอสเตอร์ที่เกิดการสูญเสีย (loss) ระหว่างกระบวนการล้างน้ำ	กรัม (g.)
21.	$m_{Water,\ remained}$	น้ำหนักของน้ำกลั่นซึ่งคงเหลือในเมทิลเอสเตอร์จากการกระบวนการล้างน้ำ	กรัม (g.)
22.	$m_{m,final}$	น้ำหนักของเมทิลเอสเตอร์ (Methyl ester) ที่ได้หลังจากกระบวนการต้มไล่น้ำ	กรัม (g.)

STEP 1 : Pretreatment Process (I)



รูปที่ 3-2 แสดงMass Balance สำหรับขั้นตอน Pretreatment Process (I) (STEP 1)

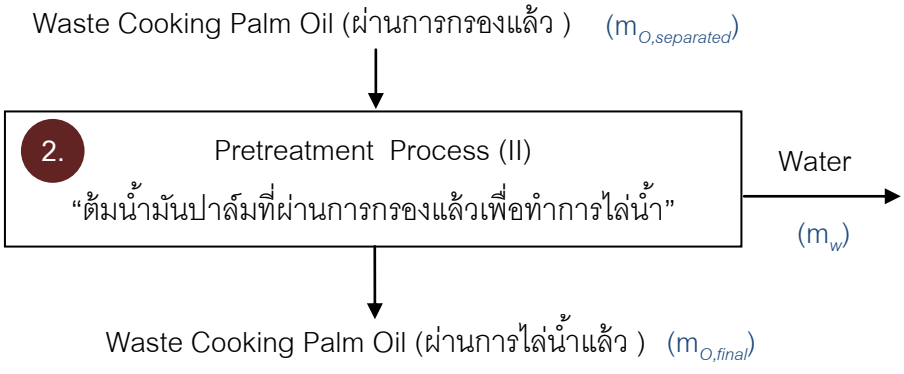
ดังนั้นจากสมการที่ (3.2) สมดุลมวลสาร นำมาประยุกต์ใช้กับ (STEP 1) Pretreatment Process (I) ได้ดังสมการที่ (3.3) ดังนี้

Inlet Waste Palm Oil particulate = Outlet (Waste Palm Oil particulate + Solids)

$$m_{O,initial} = m_{O,separated} + m_{solid} \quad (3.3)$$

know know Unknown

STEP 2 : Pretreatment Process (II)



รูปที่ 3-3 แสดง Mass Balance สำหรับขั้นตอน Pretreatment Process (II) (STEP 2)

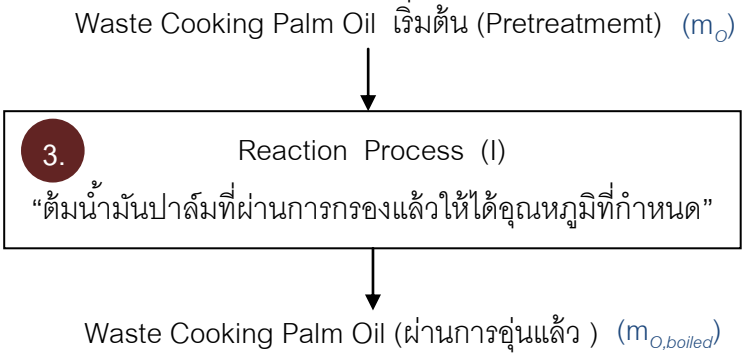
ดังนั้นจากสมการที่ (3.2) สมดุลมวลสาร นำมาประยุกต์ใช้กับ (STEP 2) Pretreatment Process (II) ได้ดังสมการที่ (3.4) ดังนี้

Inlet Waste Palm Oil particulate = Outlet (Waste Palm Oil particulate + Water)

$$m_{O,separated} = m_{O,final} + m_w \quad (3.4)$$

know know Unknown

STEP 3 : Reaction Process (I)



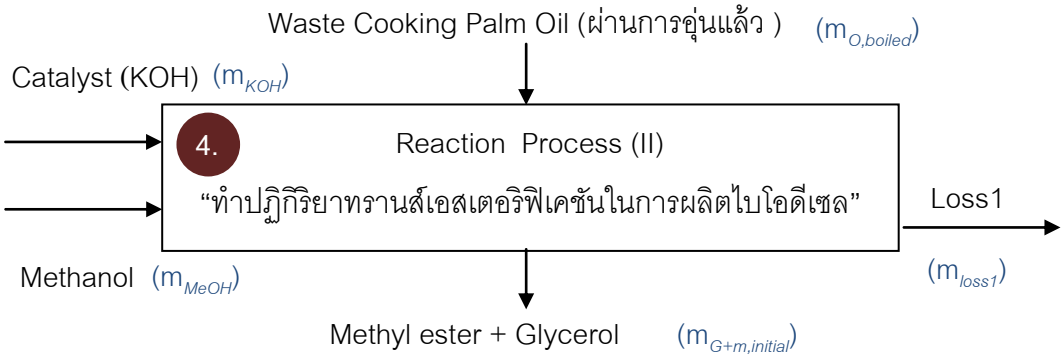
รูปที่ 3-4 แสดงMass Balance สำหรับขั้นตอนReaction Process (I) (STEP 3)

ดังนั้นจากสมการที่ (3.2) สมดุลมวลสาร นำมาประยุกต์ใช้กับ (STEP 3) Reaction Process (I) ได้ดังสมการที่ (3.5) ดังนี้

Inlet Waste Palm Oil particulate = Outlet Waste Palm Oil particulate

$$\underset{\text{know}}{m_O} = \boxed{\underset{\text{Unknown}}{m_{O,boiled}}} \qquad (3.5)$$

STEP 4 : Reaction Process (II)

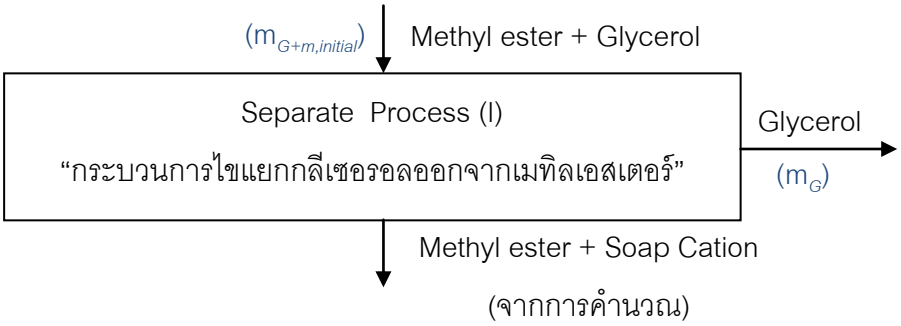


รูปที่ 3-5 แสดงMass Balance สำหรับขั้นตอน**Reaction Process (II)(STEP 4)**

ดังนั้นจากสมการที่ (3.2) สมดุลมวลสาร นำมาประยุกต์ใช้กับ(STEP 4)Reaction Process (II) ได้ดังสมการที่ (3.6) ดังนี้

Inlet (Waste Palm Oil + Catalyst + Methanol) = Outlet (Methyl ester + Glycerol)

$$\underset{\text{know}}{m_O} + \underset{\text{know}}{m_{KOH}} + \underset{\text{know}}{m_{MeOH}} = \underset{\text{know}}{m_{G+m,initia}} + \boxed{\underset{\text{Unknown}}{m_{loss1}}} \qquad (3.6)$$



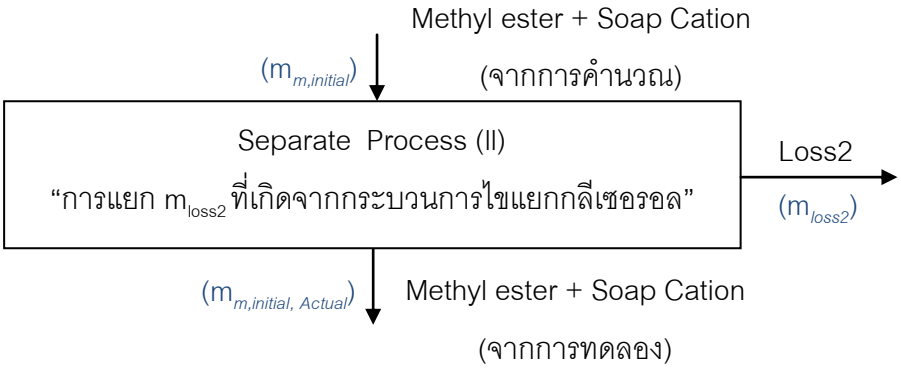
รูปที่ 3-6 แสดงMass Balance สำหรับขั้นตอนการไขแยกกลีเซอรอลใน STEP 4

ดังนั้นจากสมการที่ (3.2) สมดุลมวลสาร นำมาประยุกต์ใช้กับขั้นตอนการไขแยกกลีเซอรอลใน STEP 4ได้ดังสมการที่ (3.7) ดังนี้

Inlet (Methyl ester + Glycerol) = Outlet (Methyl ester + Glycerol + Distilled Water)

$$m_{G+m,initial} = m_{m,initial} + m_G \quad (3.7)$$

$m_{G+m,initial}$: know ; $m_{m,initial}$: Unknown ; m_G : know



รูปที่ 3-7 แสดงMass Balance สำหรับหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่เหลือจริงหลังจากการไขแยก

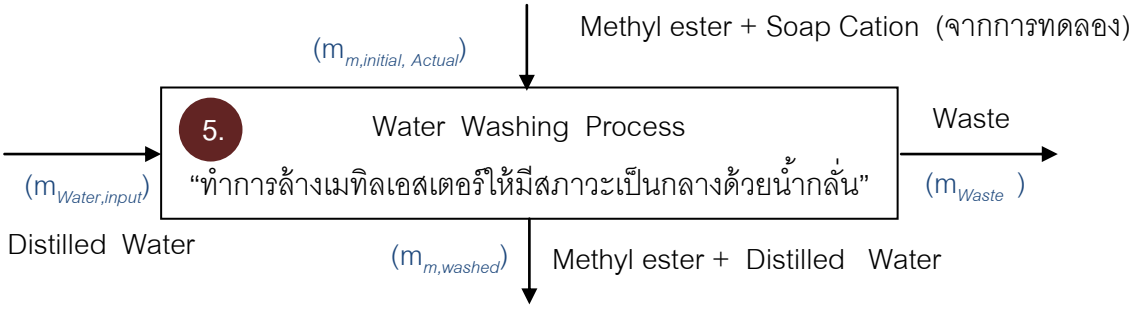
ดังนั้นจากสมการที่ (3.2) สมดุลมวลสาร นำมาประยุกต์ใช้กับการหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่เหลือจริงหลังจากการไขแยกกลีเซอรอลออกได้ดังสมการที่ (3.8) ดังนี้

Inlet (Methyl ester + Glycerol) = Outlet (Methyl ester + Glycerol + Distilled Water)

$$m_{m,initial} = m_{m,initial, Actual} + m_{loss2} \quad (3.8)$$

$m_{m,initial}$: know ; $m_{m,initial, Actual}$: know ; m_{loss2} : Unknown

STEP 5 : Water Washing Process



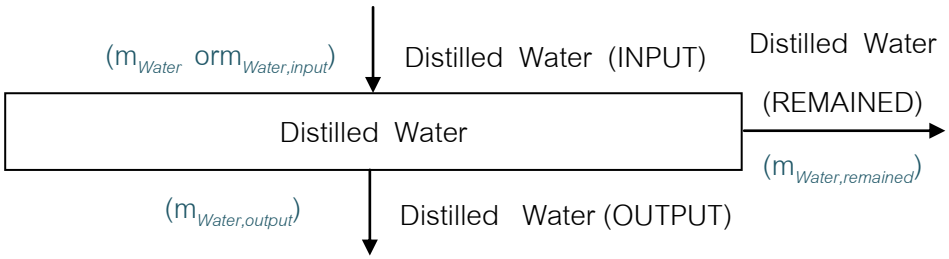
รูปที่ 3-8 แสดง Mass Balance สำหรับขั้นตอน Water Washing Process (STEP 5)

ดังนั้นจากสมการที่ (3.2) สมดุลมวลสาร นำมาประยุกต์ใช้กับขั้นตอนกระบวนการล้างน้ำด้วยน้ำกลั่น Water Washing Process (STEP 5) ได้ดังสมการที่ (3.9) ดังนี้

Inlet (Methyl ester + Distilled Water) = Outlet (Methyl ester + Distilled Water + Waste)

$$m_{m,initial,\ Actual} + m_{Water,input} = m_{m,washed} + \boxed{m_{Waste}} \qquad (3.9)$$

know know know Unknown



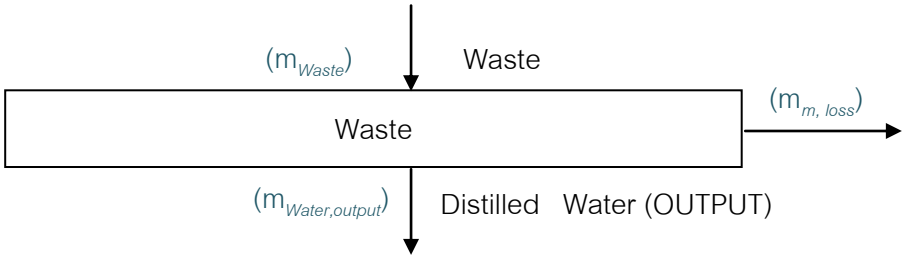
รูปที่ 3-9 แสดง Mass Balance สำหรับการหาปริมาณน้ำกลั่นที่ปะปนรวมกับเมทิลเอสเตอร์ในกระบวนการล้างน้ำ

ดังนั้นจากสมการที่ (3.2) สมดุลมวลสาร นำมาประยุกต์ใช้กับ การหาปริมาณน้ำกลั่นที่ปะปนรวมกับเมทิลเอสเตอร์ในกระบวนการล้างน้ำได้ดังสมการที่ (3.10) ดังนี้

Inlet (Distilled Water) = Outlet (Distilled Water)

$$m_{Water} \text{ หรือ } m_{Water,input} = m_{Water,output} + \boxed{m_{Water,remained}} \qquad (3.10)$$

know know Unknown



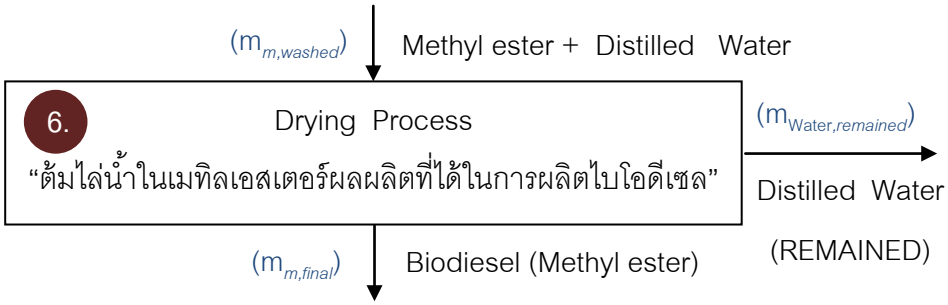
รูปที่ 3-10 แสดง Mass Balance สำหรับการหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่สูญหายไประหว่างกระบวนการล้างน้ำ

ดังนั้นจากสมการที่ (3.2) สมดุลมวลสาร นำมาประยุกต์ใช้กับ การหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่สูญหายไประหว่างกระบวนการล้างน้ำ ได้ดังสมการที่ (3.11) ดังนี้

$$m_{Waste} = m_{Water,output} + \boxed{m_{m,\ loss}} \qquad (3.11)$$

know know Unknown

STEP 6 : Drying Process



รูปที่ 3-11 แสดง Mass Balance สำหรับขั้นตอนการต้มไล่น้ำDrying Process (STEP 6)

ดังนั้นจากสมการที่ (3.2) สมดุลมวลสาร นำมาประยุกต์ใช้กับขั้นตอนกระบวนการต้มไล่น้ำในขั้นตอนสุดท้าย Drying Process (STEP 6) ได้ดังสมการที่ (3.12) ดังนี้

Inlet (Methyl ester + Distilled Water) = Outlet (Methyl ester + Distilled Water)

$$m_{m,washed} = \boxed{m_{Water,remained}} + m_{m,final} \qquad (3.12)$$

know Unknown know

จากสมการที่ (3.3) – (3.12) สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณของผลผลิตในแต่ละขั้นตอนที่เป็นตัวไม่ทราบค่า (Unknown) เนื่องจากไม่สามารถทำการวัดปริมาณได้จากการบันทึกผลการทดลองโดยตรง ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

การคำนวณพลังงานความร้อนที่ใช้ในการทดลอง

สำหรับการพิจาณาทางด้านพลังงานความร้อนที่ใช้ในการทดลอง เพื่อสามารถเป็นไปใช้ในการคำนวณหาค่าใช้จ่ายรวมทางด้านพลังงานที่ใช้ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้หลักการของพลังงานเพื่อคำนวณหาพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลและคำนวณหาปริมาณความร้อนของวัตถุ (HEAT, Q) ที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนในการทดลอง

ปริมาณความร้อนของวัตถุ เป็นพลังงานความร้อนที่วัตถุรับเข้ามาหรือคายออกไป จากการศึกษาผลของความร้อนต่อสสารหรือวัตถุสำหรับงานวิจัยนี้ คือ ความร้อนจำเพาะ (Specific heat)หมายถึง พลังงานความร้อนที่ทำให้วัตถุมีอุณหภูมิสูงขึ้นหรือต่ำลงโดยสถานะยังคงรูปเดิม และ ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity, c) คือความร้อนที่ทำให้สาร(วัตถุ)มวลหนึ่งหน่วยมีอุณหภูมิเปลี่ยนไปหนึ่งองศาเซลเซียสซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้มีการอ้างอิงค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันปาล์ม (c)ที่อุณหภูมิ 25°Cเท่ากับ 1.861 kJ/kg –C นำมาแทนในสมการที่ (2.3) เพื่อหาปริมาณความร้อนของวัตถุหรือพลังงานความร้อน (กิโลจูลหรือ kJ)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ได้พิจารณากระบวนการผลิตไบโอดีเซลในแต่ละขั้นตอนที่พบว่ามีพลังงานความร้อนเกิดขึ้นในการทดลอง โดยทำการกำหนดสัญลักษณ์หรือตัวแปรที่เกี่ยวข้องทางด้านเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน ซึ่งถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3-2และในงานวิจัยนี้ได้ทำการสรุปภาพรวมในแต่ละขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณหาค่าใช้จ่ายโดยรวมทั้งหมด (บาท) ที่ใช้ในการทดลองต่อ 1 Batch การทดลอง (300 ml.) ต่อไป ซึ่งแสดงรายละเอียดทั้งทางด้านวัตถุดิบทางตรงและพลังงานความร้อนที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนรวมทั้งหมด 6 ขั้นตอน (STEP) ในการทดลอง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-2 แสดงสัญลักษณ์สำหรับแทนเพื่อคำนวณหาพลังงานความร้อนที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน (สำหรับ 1 Batchการทดลอง)

No.	ตัวแปร	Detail (หมายถึง)	หน่วย
1.	t_1	เวลาที่ใช้การกรองแยกของแข็งในน้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้น	นาที (Mins.)
2.	t_2	เวลาที่ใช้สำหรับต้มไล่น้ำในน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่ผ่านการกรองแล้ว	นาที (Mins.)
3.	t_3	เวลาที่ใช้สำหรับอุ่นน้ำมันปาล์มเพื่อให้ได้อุณหภูมิตามกำหนด	นาที (Mins.)
4.	t_4	เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน	นาที (Mins.)
5.	t_5	เวลาที่ใช้ในกระบวนการล้างน้ำ	นาที (Mins.)
6.	t_6	เวลาที่ใช้สำหรับต้มไล่น้ำในเมทิลเอสเตอร์ที่ผ่านการล้างด้วยน้ำกลั่นแล้ว	นาที (Mins.)
7.	T_2	อุณหภูมิสำหรับต้มไล่น้ำในน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่ผ่านการกรองแล้ว มีค่าเท่ากับ 150°C	องศาเซลเซียส (°C)
8.	T_3	อุณหภูมิที่ใช้สำหรับต้มน้ำมันปาล์มเพื่อให้ได้ตามกำหนด	องศาเซลเซียส (°C)
9.	T_4	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน	องศาเซลเซียส (°C)
10.	T_6	อุณหภูมิสำหรับต้มไล่น้ำในเมทิลเอสเตอร์ที่ผ่านการล้างน้ำกลั่นแล้วหน่วย	องศาเซลเซียส (°C)

ตารางที่ 3-3 แสดงรายละเอียดของMass และ Energy ในแต่ละขั้นตอนเพื่อหาปริมาณวัตถุดิบและพลังงานความร้อนที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

No.	ขั้นตอนหรือกระบวนการในการทดลอง	Mass ที่เกี่ยวข้อง	Energy ที่เกี่ยวข้อง
STEP 1	Pretreatment Process (I)“กรองของแข็งออกจากน้ำมัน”		t_1 (เวลาที่ใช้ในการกรอง หน่วย นาที, Mins)
STEP 2	Pretreatment Process (II) “ต้มน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองแล้วเพื่อทำการไล่น้ำ”		t_2(เวลาที่ใช้เพื่อต้มไล่น้ำ หน่วย นาที, Mins) T_2 (อุณหภูมิที่ใช้ในการต้มไล่น้ำ ที่ระดับ 150 °C)
STEP 3	Reaction Process (I) “ต้มน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองแล้วให้ได้อุณหภูมิที่กำหนด”		t_3(เวลาที่ใช้ในการอุ่นน้ำมัน หน่วย นาที, Mins) T_3 (อุณหภูมิที่ใช้ในการอุ่นน้ำมันระดับกำหนด ;°C)
STEP 4	Reaction Process (II) “ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันในการผลิตไบโอดีเซล”	m_{Oil}, m_{KOH}, m_{MeOH}	t_4(เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา หน่วย นาที, Mins) T_4 (อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาระดับกำหนด ;°C)
	Separate Process (I) “กระบวนการไขแยกกลีเซอรอลออกจากเมทิลเอสเตอร์”		-
	Separate Process (II) “การแยก m_{loss2} ที่เกิดจากกระบวนการไขแยกกลีเซอรอล”		-
STEP 5	Water Washing Process “ทำการล้างเมทิลเอสเตอร์ให้มีสภาวะเป็นกลางด้วยน้ำกลั่น”	$m_{Water,\ input}$ (m_{Water})	t_5 (เวลาที่ใช้ในกระบวนการล้าง หน่วย นาที, Mins)
STEP 6	Drying Process “ต้มไล่น้ำในเมทิลเอสเตอร์ผลผลิตที่ได้ในการผลิตไบโอดีเซล”		t_6(เวลาที่ใช้เพื่อต้มไล่น้ำ หน่วย นาที, Mins) T_6 (อุณหภูมิที่ใช้ในการต้มไล่น้ำ ที่ระดับ 150 °C)

จากตารางที่ 3-3 พบว่า ปริมาณสารตั้งต้นหรือวัตถุดิบทางตรงที่มีการป้อนเข้ากระบวนการเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าใช้จ่ายรวมทางด้านวัตถุดิบทางตรงนั้น จะพิจารณาเพียง 2 ขั้นตอน ส่วนการคำนวณหาค่าใช้จ่ายรวมทางด้านพลังงานที่ใช้ จะพิจารณาเพียง 4 ขั้นตอน โดยได้สรุปไว้ในตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 แสดงการพิจาณาขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์หาค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด

การพิจารณาขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำไปคิดคำนวณค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด (บาท) ในการทดลองสำหรับ 1Batch การทดลอง (300 ml.)			
ค่าใช้จ่ายรวมทางด้านวัตถุดิบทางตรง		ค่าใช้จ่ายรวมทางด้านพลังงานความร้อนที่ใช้	
ขั้นตอน (STEP)	ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง	ขั้นตอน (STEP)	ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง
STEP 4 ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันในการผลิตไบโอดีเซล	1. น้ำหนักของน้ำมันปาล์มเริ่มต้นในการทดลองซึ่งผ่านการ Pretreatmentแล้ว (m_{oil}) 2. น้ำหนักของเมทานอล (Methanol) ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (m_{MeOH}) 3. น้ำหนักของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยา (m_{MeOH})	STEP 2 ต้มไล่น้ำน้ำมันที่กรองแล้ว	t_2(เวลาที่ใช้เพื่อต้มไล่น้ำ หน่วย นาที, Mins) T_2 (อุณหภูมิที่ใช้ในการต้มไล่น้ำ ที่ระดับ 150 °C)
		STEP 3 ต้มน้ำมันปาล์มให้ได้อุณหภูมิตามที่กำหนด	t_3(เวลาที่ใช้ในการอุ่นน้ำมัน หน่วย นาที, Mins) T_3 (อุณหภูมิที่ใช้ในการอุ่นน้ำมันระดับกำหนด ;°C)
		STEP 4 ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันในการผลิต	t_4(เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา หน่วย นาที, Mins) T_4 (อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาระดับกำหนด ;°C
STEP 5 กระบวนการล้างน้ำ	4. น้ำหนักของน้ำกลั่น (Distilled Water) ที่ใช้ในกระบวนการล้างน้ำ (input) ($m_{water,input}$ หรือ m_{water})	STEP 6 ต้มไล่น้ำในเมทิลเอสเตอร์หลังกระบวนการล้างน้ำ	t_6(เวลาที่ใช้เพื่อต้มไล่น้ำ หน่วย นาที, Mins) T_6 (อุณหภูมิที่ใช้ในการต้มไล่น้ำ ที่ระดับ 150 °C)($T_{Initial}$เท่ากับ อุณหภูมิห้อง คือ ที่ระดับ 25°C)

เมื่อทราบปริมาณของผลผลิตที่เกิดขึ้นและพลังงานความร้อนที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนการทดลองดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ขั้นตอนต่อไป คือ สามารถนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้ในการคำนวณหาค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งประกอบด้วยผลรวมระหว่างค่าใช้จ่ายทางวัตถุดิบทางตรงและพลังงานที่ใช้ที่พบในแต่ละขั้นตอนการทดลองต่อ 1Batch การทดลอง

3.4.1 คำนวณค่าใช้จ่ายด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง

วิธีการวิเคราะห์หาค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองต่อ 1 Batch การทดลอง (300 ml.) แบ่งออกเป็นค่าใช้จ่ายรวมทั้ง 2 ด้าน คือ ค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงและด้านพลังงานที่ใช้ที่พบในแต่ละขั้นตอนการทดลองต่อ 1Batch การทดลอง ดังนั้นจึงต้องการทำการแยกคิดพิจารณาค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการทดลองแต่ละด้านอย่างละเอียด ข้อมูลเบื้องต้นที่ควรทราบเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าใช้จ่ายรวม ได้แก่ สำหรับด้านวัตถุดิบทางตรง จึงต้องทราบปริมาณมวลของวัตถุดิบชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองและราคาของวัตถุดิบนั้นๆ เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าใช้จ่ายรวมทางด้านวัตถุดิบทางตรง

3.4.2 คำนวณค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง

ส่วนด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลองต้องทราบปริมาณมวลของสารตั้งต้นที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนแล้ว ยังต้องทราบอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง เพื่อความคำนวณหาพลังงานความร้อนที่ใช้ (กิโลจูล) แต่ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลนี้สามารถทราบเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในแต่ละขั้นตอน ส่งผลให้สามารถหากำลังไฟฟ้าในหน่วยของกิโลวัตต์ (kW) และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองในหน่วยของ กิโลวัตต์ -ชั่วโมง (kWh) ได้เช่นกันซึ่งได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2. สำหรับในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาอ้างอิงจากการไฟฟ้านครหลวง เกี่ยวกับการคำนวณหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไปในการทดลอง โดยมีการกำหนดเลือกประเภทอัตราค่าพลังงานไฟฟ้าประเภทที่ 6 ส่วนราชการและองค์กรที่ไม่แสวงหากำไร อัตรา 6.1 (อัตราต่อหน่วยคงที่) ซึ่งมีอัตราค่าพลังงานไฟฟ้า ต่อหน่วย (หรือต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง) เท่ากับ 3.0493 บาทต่อหน่วย ดังนั้นสามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าใช้จ่ายรวมทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลองแล้ว

เมื่อทราบทั้งค่าใช้จ่ายรวมทางด้านวัตถุดิบทางตรงและทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลองแล้ว ดังนั้นสามารถนำไปคิดคำนวณหาค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง (บาท) ต่อ 1Batch การทดลองได้ (300 ml.) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีการสร้างสมการเพื่อการคำนวณค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง (บาท) โดยภาพรวม ต่อ 1Batch การทดลองดังสมการที่ (3.13)และทำการพิจารณาแยกในแต่ละด้าน ดังสมการที่ (3.14)และ (3.15) ตามลำดับ

➢ **สมการการคิดคำนวณหาค่าใช้จ่ายรวมที่ใช้ในการทดลอง**

(ทั้งด้านวัตถุดิบโดยตรงและทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง)

$$Z = Z_1 + Z_2$$

$$= Z_{Material} + Z_{Energy}$$

$$= (Z_{Oil} + Z_{KOH} + Z_{MeOH} + Z_{Water}) + (\cancel{Z_{E1}} + Z_{E2} + Z_{E3} + Z_{E4} + \cancel{Z_{E5}} + Z_{E6})$$

$$= \left\{ \begin{array}{c} \{ (P_{Oil} \times m_{Oil}) + (P_{KOH} \times m_{KOH}) + (P_{MeOH} \times m_{MeOH}) + (P_{Water} \times m_{Water}) \} \\ + \\ \{ P_E \times (W_2 + W_3 + W_4 + W_6) \} \end{array} \right\}$$

$$Z = \left\{ \begin{array}{c} \{ (P_{Oil} \times m_{Oil}) + (P_{KOH} \times m_{KOH}) + (P_{MeOH} \times m_{MeOH}) + (P_{Water} \times m_{Water}) \} \\ + \\ \{ P_E \times (W_2 + W_3 + W_4 + W_6) \} \end{array} \right\} \quad (3.13)$$

➢ **สมการการคิดคำนวณหาค่าใช้จ่ายรวมด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง**

$$Z_{Material} \text{ or } Z_1 = (Z_{Oil} + Z_{KOH} + Z_{MeOH} + Z_{Water})$$

$$= \{ (P_{Oil} \times m_{Oil}) + (P_{KOH} \times m_{KOH}) + (P_{MeOH} \times m_{MeOH}) + (P_{Water} \times m_{Water}) \}$$

$$= \{ (P_{Oil} \times m_{Oil}) + (P_{KOH} \times m_{KOH}) + (P_{MeOH} \times V_{MeOH}) + (P_{Water} \times V_{Water}) \}$$

คงที่ ค่า Mean คงที่ ค่า Mean คงที่ (Variable) คงที่ (Variable)

$$= 16.50\ m_{Oil}\ (Kg.) + 300\ m_{KOH}\ (Kg.) + 180\ V_{MeOH}\ (Lt.) + 2V_{Water}\ (Lt.)$$

$$Z_{Material}\ (Z_1) = 16.50\ m_{Oil}\ (Kg.) + 300\ m_{KOH}\ (Kg.) + 180\ V_{MeOH}\ (Lt.) + 2V_{Water}(Lt.) \quad (3.14)$$

➢ **สมการการคิดคำนวณหาค่าใช้จ่ายรวมด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง**

$$Z_{Energy} \text{ or } Z_2 = (\cancel{Z_{E1}}^{0} + Z_{E2} + Z_{E3} + Z_{E4} + \cancel{Z_{E5}}^{0} + Z_{E6})$$

$$= \{ P_E \times (W_2 + W_3 + W_4 + W_6) \}$$

$$= P_E \times [\{ P_2 \times t_2(h.) \} + \{ P_3 \times t_3(h.) \} + \{ P_4 \times t_4(h.) \} + \{ P_6 \times t_6(h.) \}]$$

$$= P_E x [\{ Q_2/t_2(s.) x\, t_2(h.) \} + \{ Q_3/t_3(s.) \times t_3(h.) \} + \{ Q_4/t_4(s.) \times t_4(h.) \} + \{ Q_6/t_6(s.) \times t_6(h.) \}]$$

$$= 3.0493x[\{ Q_2(kJ.)/3{,}600 \} + \{ Q_3(kJ.)/3{,}600 \} + \{ Q_4(kJ.)/3{,}600 \} + \{ Q_6(kJ.)/3{,}600 \}]$$

$$= 3.0493x[\{ Q_2(kJ.) + Q_3(kJ.) + Q_4(kJ.) + Q_6(kJ.) \} / 3{,}600]$$

บาทต่อหน่วย ค่า Mean Variable Variable ค่า Mean

$$Z_{Energy}(Z_2) = 3.0493x[\{ Q_2(kJ.) + Q_3(kJ.) + Q_4(kJ.) + Q_6(kJ.) \} / 3{,}600] \quad (3.15)$$

หมายเหตุ

1. สำหรับ STEP 1 และ STEP 5 ไม่มีการใช้พลังงานความร้อนในการทำการทดลอง ดังนั้น Q_1และ Q_5 มีค่าเท่ากับ 0
2. สาเหตุที่สนใจพลังงานเฉพาะ Q_3 และ Q_4 เท่านั้น เนื่องจากเป็นพลังงานแปรผันได้ ส่วนพลังงาน Q_2 และ Q_6 เป็นพลังงานคงที่ ในงานวิจัยนี้จึงสามารถ Fixed ได้
3. พลังงานความร้อนหรือปริมาณความร้อนของวัตถุ (Qหน่วยเป็น กิโลจูล; kJ.) ที่ใช้ในการทดลองหาได้จากสูตร $Q = mc\Delta T$
4. กำลังไฟฟ้า (Pหน่วย กิโลวัตต์ ;kW) ที่ใช้ หาได้จากสูตร $P = Q(kJ)\ /t(s)$
5. พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W หน่วยเป็นกิโลวัตต์-ชั่วโมง ; kWh) ที่ใช้ในการทดลองหาได้จากสูตร $W = P(kW)\ /t(hr)$
6. สัญลักษณ์หรือตัวแปรที่ถูกกำหนดในสมการที่ (3.13) – (3.15) สามารถอธิบายรายละเอียดของความหมายและที่มาไว้ในตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-5 แสดงสัญลักษณ์ที่ถูกกำหนดในสมการเพื่อคำนวณค่าใช้จ่ายรวมที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลต่อ 1 Batchการทดลอง (300 ml.) ทั้งทางด้านวัตถุดิบทางตรงและด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง

No.	สัญลักษณ์	ความหมาย (Meaning)	หน่วย	หมายเหตุ (Notice)
(1.) **ด้านค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการทดลองต่อ 1Batch การทดลอง**				
1	Z	ค่าใช้จ่ายด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลองและค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง	บาท (Baht.)	$Z = Z_{Material} + Z_{Energy} = Z_1 + Z_2$
2	$Z_{Material}$ (Z_1)	ค่าใช้จ่ายรวมด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลองต่อ Batch		$Z_{Material}$หรือ $Z_1 = z_{Oil} + z_{KOH} + z_{MeOH} + z_{water}$
3	Z_{Energy} (Z_2)	ค่าใช้จ่ายรวมด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลองต่อ Batch		
4	z_{Oil}	ค่าใช้จ่ายของปริมาณน้ำมันปาล์มใช้แล้วเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลอง		$z_{Oil} = m_{Oil} \times P_{Oil}$
5	z_{KOH}	ค่าใช้จ่ายของปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา		$z_{KOH} = m_{KOH} \times P_{KOH}$
6	z_{MeOH}	ค่าใช้จ่ายของปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา		$z_{MeOH} = m_{MeOH} \times P_{MeOH}$
7	z_{water}	ค่าใช้จ่ายของน้ำกลั่นที่ใช้ในกระบวนการล้างเมทิลเอสเตอร์ในการทดลอง		$z_{water} = m_{water} \times P_{Water}$
8	Z_{En}	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลองที่เกิดใน STEP ที่ n		Z_{Energy} หรือ $Z_2 = \sum (Z_{En})$

ตารางที่ 3-5 แสดงสัญลักษณ์ที่ถูกกำหนดในสมการเพื่อคำนวณค่าใช้จ่ายรวมที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลต่อ 1 Batchการทดลอง (300 ml.) ทั้งทางด้านวัตถุดิบทางตรงและด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ)

No.	สัญลักษณ์	ความหมาย (Meaning)	หน่วย	หมายเหตุ (Notice)
(2.) **ด้านวัตถุดิบทางตรง** (Direct Material) : **มวลของวัตถุดิบตั้งต้น** (Material) **ที่ใช้ในการทดลอง**				
1	m_{Oil}	มวลของน้ำมันปาล์มใช้แล้วเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลอง	กิโลกรัม (Kg.)	ทดลองแบบระบบเปิด Bacth ละ 300 มิลลิลิตร
2	m_{KOH}	มวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา		กำหนดที่ปริมาณ 1%โดยน้ำหนักของน้ำมัน
3	m_{MeOH}	มวลของเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา		กำหนดที่15-50 %โดยปริมาตรของน้ำมัน
4	$m_{initial}$	มวลรวมของสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน		$m_{initial} = m_{Oil} + m_{KOH} + m_{MeOH}$
5	m_{water}	มวลของน้ำกลั่นที่ใช้ในกระบวนการล้างน้ำเมทิลเอสเตอร์		
6	$m_{O,separated}$	มวลของน้ำมันปาล์มใช้แล้วซึ่งผ่านการกรองแยกของแข็งแล้วเตรียมทำการต้มไล่น้ำ		$m_{O,separated} = m_{w} + m_{O,final}$
7	$m_{m,washed}$	มวลของเมทิลเอสเตอร์ (Methyl ester) ที่ได้หลังจากกระบวนการล้างน้ำด้วยน้ำกลั่นเตรียมทำการต้มไล่น้ำ		$m_{m,washed} = m_{m,final} + m_{Water,remained}$
8	$m_{m,final}$	มวลของเมทิลเอสเตอร์ (Methyl ester) ที่ได้หลังจากกระบวนการต้มไล่น้ำ		$m_{m,final} = m_{m,washed} - m_{Water,remained}$
9	$m_{water,remained}$	มวลของน้ำกลั่นที่คงเหลือในเมทิลเอสเตอร์จากกระบวนการล้างน้ำ		

ตารางที่ 3-5 แสดงสัญลักษณ์ที่ถูกกำหนดในสมการเพื่อคำนวณค่าใช้จ่ายรวมที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลต่อ 1 Batchการทดลอง (300 ml.) ทั้งทางด้านวัตถุดิบทางตรงและด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ)

No.	สัญลักษณ์	ความหมาย (Meaning)	หน่วย	หมายเหตุ (Notice)
(3.) ราคา (ต้นทุนต่อหน่วย) ของวัตถุดิบตั้งต้นและอัตราพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง				
1	P_{Oil}	ราคาน้ำมันปาล์มใช้แล้วกิโลกรัมละ 16.5 บาท	บาทต่อกิโลกรัม	ราคาน้ำมันปาล์มใช้แล้วขายทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม
2	P_{KOH}	ราคาของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (ตัวเร่งปฏิกิริยา) ราคากิโลกรัมละ 300 บาท	บาทต่อกิโลกรัม	450 กรัม ราคา 135 บาทศึกษาภัณฑ์พาณิชย์สนามกีฬาแห่งชาติ (02-2153532)
3	P_{MeOH}	ราคาเมทานอล (ตัวทำปฏิกิริยาในการทดลอง) ราคาลิตรละ 180 บาท	บาทต่อลิตร	Methly alcohol 99.8% Lab เกรด 2.5 Lt 450 บาท (ร้านวิโรฒวิทยาภัณฑ์)ดังนั้น 1L.(1,000 ml.) ราคา 180 บาท
4	P_{Water}	ราคาน้ำกลั่น (สำหรับกระบวนการล้างน้ำ) ราคาลิตรละ 2 บาท	บาทต่อลิตร	แหล่งที่มา :บริษัท นวนที จำกัด
5	P_E	อัตราค่าพลังงานไฟฟ้าราคา 3.0493 บาทต่อหน่วย (Baht/Unit) (หรือต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง)	บาทต่อหน่วย	$T_n = T_{n,Final}$(อัตราค่าไฟฟ้าต่อหน่วยต่อหน่วย) แหล่งที่มา : การไฟฟ้านครหลวง (เมษายน 2555)

ตารางที่ 3-5 แสดงสัญลักษณ์ที่ถูกกำหนดในสมการเพื่อคำนวณค่าใช้จ่ายรวมที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลต่อ 1 Batchการทดลอง (300 ml.) ทั้งทางด้านวัตถุดิบทางตรงและด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ)

No.	สัญลักษณ์	ความหมาย (Meaning)	หน่วย	หมายเหตุ (Notice)
(4.) **พลังงาน** (Energy) **ที่ใช้ในการทดลอง**				
1	Q_n	พลังงานความร้อนที่ใช้ในการทดลองที่เกิดใน STEP ที่ n โดยที่	กิโลจูล (kJ.)	พลังงานความร้อน (Q) ; $Q = m_{initial} c \Delta T$
โดยที่	n = 1	แทน STEP 1 คือ Pretreatment Process (I) “กรองของแข็งออกจากน้ำมันปาล์มใช้แล้ว”		
	n = 2	แทน STEP 2 คือ Pretreatment Process (II) “ต้มน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองแล้วเพื่อทำการไล่น้ำ”		
	n = 3	แทน STEP 3 คือ Reaction Process (I) “ต้มน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองแล้วให้ได้อุณหภูมิที่กำหนด”		
	n = 4	แทน STEP 4 คือ Reaction Process (II) “ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันในการผลิตไบโอดีเซล”		
	n = 5	แทน STEP 5 คือ Water Washing Process “ทำการล้างเมทิลเอสเตอร์ให้มีสภาวะเป็นกลางด้วยน้ำกลั่น”		
	n = 6	แทน STEP 6 คือ Drying Process “ต้มไล่น้ำในเมทิลเอสเตอร์ผลผลิตที่ได้ในการผลิตไบโอดีเซล”		
2	m or $m_{initial}$	มวลรวมของสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน	กิโลกรัม (kg.)	$m_{initial} = m_{Oil} + m_{KOH} + m_{MeOH}$
	$m_{initial(\%MeOH)}$	มวลของสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันณ ระดับเมทานอลใดๆ		โดย %MeOH มี 3 ระดับ แทนด้วย 15, 25 และ 50 %โดยปริมาตรน้ำมัน (%v/v of oil) 62

ตารางที่ 3-5 แสดงสัญลักษณ์ที่ถูกกำหนดในสมการเพื่อคำนวณค่าใช้จ่ายรวมที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลต่อ 1 Batchการทดลอง (300 ml.) ทั้งทางด้านวัตถุดิบทางตรงและด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ)

No.	สัญลักษณ์	ความหมาย (Meaning)	หน่วย	หมายเหตุ (Notice)
(4.) **พลังงาน** (Energy) **ที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ)**				
3	c	ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิ 25°C [83]	kJ/kg -C	
4	ΔT_n	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในการทดลองที่เกิดใน STEP ที่ n	องศาเซลเซียส (°C)	(ΔT_n) เท่ากับ $T_{n,Final} - T_{Initial}$
	$T_{n,Initial}$	อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{Initial}$)หรืออุณหภูมิห้องที่ใช้ทดลอง STEP ที่ n		ทดลองแบบระบบเปิดที่อุณหภูมิห้อง25 °C
	$T_{n,Final}$	อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (T_{Final}) ใน STEP ที่ n		$T_n = T_{n,Final}$
	T_n	อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองที่เกิดใน STEP ที่ n		
5	t_n	เวลาที่ใช้ในการทำการทดลองที่เกิดใน STEP ที่ n	นาที (Mins)	(1 kW = 860 kcal x 4.186 kJ = 3,600 kJ)
	$t_{4,1}$	เวลาที่ใช้ในการทำการทดลองที่เกิดใน STEP ที่ 4,1		เวลาที่ใช้ในการผสมสารและทำให้อุณหภูมิคงที่
	$t_{4,2}$	เวลาที่ใช้ในการทำการทดลองที่เกิดใน STEP ที่ 4,2($t_4 = t_{4,1}+t_{4,2}$)		เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน
6	P_n	กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองที่เกิดใน STEP ที่ n	กิโลวัตต์ (kW)	กำลังไฟฟ้า(kW orkJ/s) = $\frac{\text{พลังงานความร้อน } (Q\ ;kJ)}{\text{เวลา } (t\ ;\text{วินาที } (s))}$

หมายเหตุ : เพิ่มเติมการคำนวณจากสูตร W(พลังงานไฟฟ้า ; kWh) = P(กำลังไฟฟ้า ; kW) x t (เวลา ; ชั่วโมง) เท่ากับ Q (พลังงานความร้อน ; kJ) / 3,600

ตารางที่ 3-5 แสดงสัญลักษณ์ที่ถูกกำหนดในสมการเพื่อคำนวณค่าใช้จ่ายรวมที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลต่อ 1 Batchการทดลอง (300 ml.) ทั้งทางด้านวัตถุดิบทางตรงและด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ)

No.	สัญลักษณ์	ความหมาย (Meaning)	หน่วย	หมายเหตุ (Notice)
(4.) **พลังงาน** (Energy) **ที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ)**				
7	P_{Heater}	กำลังไฟฟ้าของเครื่องกวนสารแบบให้ความร้อนที่ใช้ทดลอง โดยเครื่อง Hot Plate & Magnetic stirrer มีขนาด630 วัตต์ (Watt ;W)	วัตต์ (W)	พลังงานไฟฟ้า (kWh) มีค่าเท่ากับ กำลังไฟฟ้า (kW) x เวลา (h)
8	W_n	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองที่เกิดใน STEP ที่ n หน่วยกิโลวัตต์ –ชั่วโมง หรือ kWh	(kWh)	ประเภทที่ 6 ส่วนราชการและองค์กรที่ไม่แสวงหากำไร อัตรา 6.1 (อัตราต่อหน่วยคงที่)
(5.) **ความหนาแน่น** (Density)**ของสารตั้งต้นในการทดลอง**(แสดงรายละเอียดไว้ในภาคผนวก จ.)				
1	$D_{Oil,\ 0.427}$	ความหนาแน่นเฉลี่ยของน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่ระดับ 0.427%FFA	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3)	ค่าเฉลี่ยของ $D_{Oil,0.427}$เท่ากับ 0.8983 g/cm^3
2	$D_{Oil,\ 0.512}$	ความหนาแน่นเฉลี่ยของน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่ระดับ 0.512%FFA		ค่าเฉลี่ยของ $D_{Oil,0.512}$เท่ากับ 0.8991 g/cm^3
3	$D_{Oil,\ 0.630}$	ความหนาแน่นเฉลี่ยของน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่ระดับ 0.630%FFA		ค่าเฉลี่ยของ $D_{Oil,0.630}$เท่ากับ 0.8994 g/cm^3
4	$D_{Oil,\ 1.435}$	ความหนาแน่นเฉลี่ยของน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่ระดับ 1.435%FFA		ค่าเฉลี่ยของ $D_{Oil,1.435}$เท่ากับ 0.8997 g/cm^3
5	D_{MeOH}	ความหนาแน่นเฉลี่ยของเมทานอล 0.7918 g/cm^3		แหล่งที่มา: http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%80%E0%B8%A1%E0%B8%97%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%AD%E0%B8%

3.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.5.1 ปริมาณเมทิลเอสเตอร์

การวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยศึกษาแนวโน้มและความสัมพันธ์ของปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA)เปลี่ยนแปลง ซึ่งทำการพิจารณาแยกในแต่ละปัจจัยของแต่ละการทดลอง ในรูปแบบตารางบันทึกผลและกราฟเส้นเพื่อให้ง่ายในการเข้าใจและนำไปใช้ต่อ

3.5.2 ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์

การวิเคราะห์ ร้อยละผลผลิตของปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยศึกษาแนวโน้มและความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลผลิตของปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA)เปลี่ยนแปลง ซึ่งทำการพิจารณาแยกในแต่ละปัจจัยของแต่ละการทดลอง ในรูปแบบตารางบันทึกผลและกราฟเส้นเพื่อให้ง่ายในการเข้าใจและนำไปใช้ต่อ

3.5.3 ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้

เมื่อทราบค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง (บาท) ต่อ 1 Batch การทดลอง (300 ml.) โดยการคำนวณหาจากสมการที่ (3.13) สำหรับในงานวิจัยนี้ มีความประสงค์ในการวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ในแต่ละสภาวะการทดลอง เพื่อใช้เป็นตัวแปรในการตัดสินใจหรือพิจารณาเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลตามเกณฑ์ที่กำหนดต่อไป แต่เนื่องจากการทดลองในแต่ละสภาวะในงานวิจัยนี้ เป็นการทดลองที่มีความสัมพันธ์ร่วมของทั้ง 4 ปัจจัยที่แตกต่างกัน (สภาวะในการทดลองแตกต่างกัน) ดังนั้น จึงไม่สามารถทำการพิจารณาต้นทุนที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลจากค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดในการทดลองเพียงอย่างเดียวและปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้ในแต่ละสภาวะการทดลองมีค่าแตกต่างกัน เหล่านี้จึงเป็นเหตุผลที่แสดงให้เห็นว่าไม่สามารถทำการเปรียบเทียบทางด้านต้นทุนได้จากค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง (บาท)

สำหรับในงานวิจัยนี้ จึงขอเสนอแนวทางในการวิเคราะห์ต้นทุนเชิงเศรษฐศาสตร์ เพื่อใช้เป็นตัวแปรในการตัดสินใจเลือกสภาวะที่เหมาะสมให้สอดคล้องกับเกณฑ์การพิจารณาที่กำหนดต่อไป โดยมีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)ที่ได้จากการผลิตกับค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง (บาท) ต่อ 1Batch การทดลอง ดังนั้นการคำนวณหา

ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ผลิตได้ต่อค่าใช้จ่ายรวมที่ใช้ในการทดลอง (%FAME ต่อบาท) เพื่อศึกษาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อบาทในแต่ละสภาวะที่ใช้ในการทดลอง โดยสามารถคำนวณจากสมการที่ (3.16)

$$\%\text{FAME ต่อบาท} = \frac{\text{ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (\%FAME)}}{\text{ค่าใช้จ่ายที่ใช้รวม (บาท)}} \quad (3.16)$$

3.5.4 ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ต่อค่าใช้จ่ายรวมที่ใช้

สำหรับค่าร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ต่อค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด (%Yield ต่อบาท)ที่ใช้นั้นมีหลักในการคิดคำนวณคล้ายกับ %FAME ต่อบาท ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวแปรในการในการตัดสินใจเลือกสภาวะที่เหมาะสมให้สอดคล้องกับเกณฑ์การพิจารณาที่กำหนดต่อไปได้เช่นกัน ดังนั้นการคำนวณหาร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองต่อค่าใช้จ่ายรวมที่ใช้ในการทดลอง (%Yieldต่อบาท) เพื่อศึกษาร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ต่อบาทในแต่ละสภาวะที่ใช้ในการทดลอง โดยสามารถคำนวณจากสมการที่ (3.17)

$$\%\text{Yieldต่อบาท} = \frac{\text{ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (\%Yield)}}{\text{ค่าใช้จ่ายที่ใช้รวม (บาท)}} \quad (3.17)$$

การคำนวณพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง

จากสมการที่ (3.15) ซึ่งเป็นสมการในการคำนวณหาค่าใช้จ่ายรวมทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (กิโลจูล ; kJ.) พบว่า ในสมการนี้มีการคำนวณหาพลังงานความร้อนหรือปริมาณความร้อนของวัตถุ (Q) ทั้ง 4 ขั้นตอนการทดลอง ได้แก่ ขั้นตอนที่ 2, 3, 4 และ 6 ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ Q_2, Q_3, Q_4และ Q_6 ในสมการดังนั้นในงานวิจัยนี้สามารถคำนวณหาพลังงานความร้อนรวมที่ใช้ในการทดลอง (Q_{Total}) ได้จากสมการที่ (3.18)

$$Q_{Total}\,(kJ) = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_6 \quad (3.18)$$

โดยที่ Q_{Total} = พลังงานความร้อนที่ใช้รวมทั้งหมดในการทดลอง (กิโลจูล ; kJ)

Q_n = พลังงานความร้อนที่ใช้ในการทดลองที่เกิดใน STEP ที่ n (กิโลจูล ; kJ)

เมื่อ n = 2 แทน ต้มน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองแล้วเพื่อทำการไล่น้ำ(STEP 2)

n = 3 แทน ต้มน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองแล้วให้ได้อุณหภูมิที่กำหนด (STEP 3)

n = 4 แทน ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันในการผลิตไบโอดีเซล (STEP4)

n = 6 แทน ต้มไล่น้ำในเมทิลเอสเตอร์ผลผลิตที่ได้ในการผลิตไบโอดีเซล (STEP6)

แต่เมื่อทำการวิเคราะห์กระบวนการผลิตและผลการทดลองแล้ว พบว่า พลังงานความร้อนที่ใช้ในขั้นตอนที่ 2 (Q_2) และขั้นตอนที่ 6 (Q_6) มีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละสภาวะสำหรับทั้ง 2 ขั้นตอน เนื่องจากเป็นกระบวนการต้มไล่น้ำจากน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองแล้วกับเมทิลเอสเตอร์ ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองที่คล้ายคลึงกันสำหรับทุกสภาวะการทดลองเนื่องจากมีการต้มไล่น้ำที่ระดับอุณหภูมิเดียวกัน คือ 150°C และมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่เท่ากัน คือ 25°C (อุณหภูมิห้อง) ถึงแม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยของอื่นๆ แต่ค่าเฉลี่ยของพลังงานความร้อนที่ใช้ในขั้นตอนที่ 2 (Q_2) และขั้นตอนที่ 6 (Q_6) ในแต่ละสภาวะการทดลองไม่แตกต่างกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงถือว่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในขั้นตอนที่ 2 (Q_2) และขั้นตอนที่ 6 (Q_6) เป็นค่าคงที่ จึงสามารถคำนวณหาพลังงานความร้อนรวมที่ใช้ในการทดลอง (ใหม่)หรือ Q^*_{Total} ได้จากสมการที่ (3.19)เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณ %FAME ต่อกิโลจูลและ %Yield ต่อกิโลจูลในขั้นตอนต่อไป

$$Q^*_{Total}(kJ) = Q_3 + Q_4 \qquad (3.19)$$

โดยที่ Q^*_{Total} = พลังงานความร้อนที่ใช้รวมทั้งหมดในการทดลอง (ใหม่) (กิโลจูล ; kJ)

Q_n = พลังงานความร้อนที่ใช้ในการทดลองที่เกิดใน STEP ที่ n (กิโลจูล ; kJ)

เมื่อ n = 3 แทน ต้มน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองแล้วให้ได้อุณหภูมิที่กำหนด (STEP 3)

n = 4 แทน ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันในการผลิตไบโอดีเซล (STEP 4)

หมายเหตุ

- เนื่องจากพลังงานความร้อนที่ใช้ในขั้นตอนที่ 2 (Q_2) และขั้นตอนที่ 6 (Q_6) มีค่าใกล้เคียงกันมากในแต่ละสภาวะการทดลอง ตามลำดับ ดังนั้นจึงถือให้ Q_2 และ Q_6 เป็นค่าคงที่
- กำหนดให้ใช้ Q^*_{Total} แทนพลังงานความร้อนรวมทั้งหมดในการทดลอง (กิโลจูล ; kJ) สำหรับการพิจารณาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อพลังงานที่ใช้ทั้งหมดในการทดลอง (%FAME ต่อกิโลจูล) และร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ต่อพลังงานที่ใช้รวมทั้งหมด (%Yield ต่อกิโลจูล) ในขั้นตอนต่อไป เพื่อเป็นการกระชับตัวเลขในการคำนวณและเข้าใจง่ายต่อการวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป

3.5.5 ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อพลังงานทั้งหมดที่ใช้

เมื่อทราบพลังงานความร้อนที่ใช้รวมทั้งหมดในการทดลอง (กิโลจูล ; kJ) ต่อ 1Batch การทดลอง (300 ml.) โดยการคำนวณหาจากสมการที่ (3.19) สำหรับในงานวิจัยนี้ ได้เสนอแนวทางในการวิเคราะห์เชิงพลังงาน ซึ่งอาจใช้เป็นตัวแปรในการตัดสินใจเลือกสภาวะที่เหมาะสมให้สอดคล้องกับเกณฑ์การพิจารณาที่กำหนดในขั้นตอนต่อไป โดยมีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)ที่ได้จากการผลิตกับพลังงานความร้อนที่ใช้รวมทั้งหมดในการทดลอง (กิโลจูล) ต่อ 1Batch การทดลอง ดังนั้นการคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ผลิตได้ต่อพลังงานความร้อนที่ใช้รวมทั้งหมดในการทดลอง (%FAME ต่อกิโลจูล) เพื่อศึกษาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อกิโลจูลในแต่ละสภาวะที่ใช้ในการทดลอง โดยสามารถคำนวณจากสมการที่ (3.20)

$$\%\text{FAME ต่อกิโลจูล} = \frac{\text{ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (\%FAME)}}{\text{พลังงานความร้อน ที่ใช้รวมทั้งหมด (กิโลจูล)}} \qquad (3.20)$$

3.5.6 ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ต่อพลังงานทั้งหมดที่ใช้

สำหรับค่าร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ต่อพลังงานความร้อนที่ใช้รวมทั้งหมด (%Yield ต่อกิโลจูล) ในงานวิจัยนี้ มีหลักคิดคำนวณคล้ายกับ %FAME ต่อกิโลจูล ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวแปรในการในการตัดสินใจเลือกสภาวะที่เหมาะสมให้สอดคล้องกับเกณฑ์การพิจารณาที่กำหนดต่อไปได้เช่นกัน ดังนั้นการคำนวณหาร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองต่อพลังงานความร้อนที่ใช้รวมทั้งหมดในการทดลอง (%Yield ต่อกิโลจูล) เพื่อศึกษาร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ต่อกิโลจูลในแต่ละสภาวะการทดลอง โดยสามารถคำนวณจากสมการที่ (3.21)

$$\%\text{Yield ต่อกิโลจูล} = \frac{\text{ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (\%Yield)}}{\text{พลังงานความร้อนที่ใช้รวมทั้งหมด (กิโลจูล)}} \qquad (3.21)$$

3.6 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลกับปริมาณกรดไขมันอิสระที่แตกต่างกัน

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของไบโอดีเซลกับสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งได้แก่ ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) และ ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ (%FAME ต่อบาท) พร้อมทั้งศึกษาแนวโน้มและความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพของไบโอดีเซลกับสภาวะในการผลิตไบโอดีเซล โดยศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้นที่แตกต่างกัน เพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ ศึกษาปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีผลต่อประสิทธิภาพของน้ำมันไบโอดีเซลและ %FAME ต่อบาทที่ได้จากการทดลอง

3.7 วิเคราะห์โมเดลการทำนายประสิทธิภาพของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้เพื่อสร้างเป็นโมเดลในการศึกษาประสิทธิภาพของน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากการผลิตจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) แตกต่างกัน ซึ่งได้แก่ ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) และ %FAME ต่อบาท สำหรับสภาวะที่ใช้ในการทดลองที่เหมาะสม เพื่อสามารถใช้เป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้ว โดยการทำนายหาประสิทธิภาพของไบโอดีเซลและ %FAME ต่อบาท จากปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันใช้แล้วตัวของตนก่อนทำการทดลองหรือลงทุนผลิตจริงซึ่งเป็นการประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย อีกทั้งยังสามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจเลือกที่จะทำการลงทุนผลิตไบโอดีเซลต่อไปในอนาคตหรือไม่

3.8 สรุปขั้นตอนการหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

ขั้นตอนการทำการทดลองเพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยมีเกณฑ์การพิจารณาเลือกที่แตกต่างกันตามวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้ทั้ง 3 กรณี เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของไบโอดีเซล ได้แก่ ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)และสามารถทราบปริมาณร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ได้จากการผลิตจากการคำนวณ เพื่อเกิดประโยชน์แก่ผู้บริหารในการตัดสินใจในการพิจารณาสำหรับการลงทุนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลเพื่อใช้ทดแทนในโรงงานต่อไปในอนาคต เพื่อรองรับวิกฤตการณ์ราคาน้ำมันปาล์มที่สูงขึ้นในปัจจุบันและเพื่อช่วยลดการนำน้ำมันปาล์มใช้แล้วกลับมาสู่วงจรการบริโภคซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดโรคมะเร็งในผู้บริโภค อีกทั้งยังเป็นการร่วมรณรงค์การใช้น้ำมันไบโอดีเซลแทนน้ำมันดีเซลเพื่อช่วยลดปัญหามลพิษด้านสิ่งแวดล้อมในประเทศได้ ซึ่งแสดงขั้นตอนการทดลองไว้ในรูปที่ 3-12

รูปที่ 3-12 แสดงขั้นตอนการทำการทดลองเพื่อศึกษาสภาวะที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล เพื่อนำไปสู่การศึกษาประสิทธิภาพของไบโอดีเซลจากการทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลที่ได้ทางด้านประสิทธิภาพจากการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล

4.1.1 ปริมาณเมทิลเอสเตอร์

จากการออกแบบแผนการทดลอง (Experimental Plan) ในตารางที่ 2-23 ซึ่งมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 4 ปัจจัย ได้แก่ กรดไขมันอิสระในน้ำมัน (%FFA) อุณหภูมิ (°C) เวลา (Mins) และปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์มใช้แล้ว) และมีตัวแปรตอบสนองที่สนใจทั้งหมด 3 ตัวแปร ได้แก่ ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซล (%Yield) และค่า %FAME ต่อบาท ซึ่งสามารถทำการออกแบบแผนการทดลองโดยรวมเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของไบโอดีเซลงานวิจัย

ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) สามารถหาได้จากการอ่านค่าที่วัดได้ด้วยเครื่องแก๊ซโครมาโทกราฟี: model GC – 2010, Shimadzu, Japan (แสดงรายละเอียดของวิธีการติดตั้งเครื่อง GC ไว้ในภาคผนวก ก.) และแสดงผลออกมาเป็นโครมาโทกราฟ (แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับโครมาโตรกราฟไว้ในภาคผนวก ข.) สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการส่งตัวอย่างเมทิลเอสเตอร์ตรวจ ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยจากนั้นนำค่าที่อ่านได้มาคำนวณค่า %FAME ในสมการที่ (2.1) (แสดงรายละเอียดการคิดคำนวณไว้ในภาคผนวก ค.)

ดังนั้นจากตางรางที่ 2-20 พบว่า ในแต่ละตัวอย่างน้ำมันปาล์มใช้แล้วหรือน้ำมันปาล์มใช้แล้วทั้ง 4 ระดับกรดไขมันอิสระต้องมีการทำการทดลองทั้งหมด 22 สภาวะการทดลอง (ที่ระดับกรดไขมันอิสระ 0.427 และ 1.435%FFA) และ 15 สภาวะการทดลอง (ที่ระดับกรดไขมันอิสระ 0.512 และ 0.630 %FFA) สำหรับในงานวิจัยนี้ได้มีการกำหนดให้มีการทดลองซ้ำ 2 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยของปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้เพื่อให้ข้อมูลผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือมากขึ้นและประกอบกับผลการทดลองดังกล่าวเป็นผลทางวิทยาศาสตร์ซึ่งมีความแน่นอนไม่คลาดเคลื่อนมากนักจึงมีความคิดเห็นว่าการทดลองเพียง 2 ครั้งนั้นมีความเพียงพอสำหรับผลการทดลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลต่อไป

ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลในงานวิจัยครั้งนี้ได้ถูกบันทึกผลการทดลองในแต่ละสภาวะ สำหรับทุกการทดลองจากตัวอย่างน้ำมันปาล์มใช้แล้วทั้ง 4 ตัวอย่างซึ่งมีปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) แตกต่างกัน ดังแสดงผลการทดลองในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 แสดงปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)ที่ได้จากกระบวนการทดลองในแต่ละสภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดอิสระ (%FFA) ที่แตกต่างกันทั้ง 4 ระดับเป็นสารตั้งต้น

%FFA	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล											
			อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (Reaction Temp. ;°C)											
			30				45				60			
			ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.
0.427	30	15	82.98	83.01	**83.00**	0.02	91.39	91.31	**91.35**	0.06	95.45	94.35	**94.90**	0.78
		25	89.25	88.73	**88.99**	0.37	91.48	92.20	**91.84**	0.51	96.68	96.94	**96.81**	0.19
		50	✕	✕	✕	✕	92.12	92.56	**92.34**	0.31	✕	✕	✕	✕
	60	15	86.75	86.02	**86.38**	0.52	85.31	86.14	**85.72**	0.59	93.16	93.78	**93.47**	0.44
		25	90.88	91.39	**91.14**	0.36	88.78	89.80	**89.29**	0.72	96.19	96.53	**96.36**	0.24
		50	92.11	92.34	**92.22**	0.16	91.77	90.68	**91.23**	0.77	96.88	96.62	**96.75**	0.18
	120	15	✕	✕	✕	✕	83.44	82.77	**83.11**	0.47	✕	✕	✕	✕
		25	89.01	90.70	**89.85**	1.20	87.58	88.02	**87.80**	0.31	95.44	94.48	**94.96**	0.68
		50	91.25	91.61	**91.43**	0.25	89.55	90.14	**89.85**	0.42	✕	✕	✕	✕

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ ✕ แทน ไม่มีการแสดงผลการทดลอง เนื่องจากไม่มีการทำการทดลองที่สภาวะนั้นๆ

ตารางที่ 4-1แสดงปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)ที่ได้จากกระบวนการทดลอง ในแต่ละสภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดอิสระ (%FFA) ที่แตกต่างกันทั้ง 4 ระดับเป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

%FFA	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล											
			อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (Reaction Temp. ;°C)											
			30				45				60			
			ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.
0.512	30	15	77.05	76.81	**76.93**	0.17	83.50	82.51	**83.01**	0.70	86.22	86.75	**86.49**	0.38
		25	83.40	83.90	**83.65**	0.36	85.73	86.75	**86.24**	0.73	92.19	93.20	**92.70**	0.71
		50	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕
	60	15	81.52	80.26	**80.89**	0.89	81.43	81.77	**81.60**	0.24	84.05	83.96	**84.00**	0.06
		25	86.28	87.41	**86.85**	0.79	84.14	84.90	**84.52**	0.54	89.39	88.80	**89.10**	0.42
		50	88.73	90.77	**89.75**	1.44	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕
	120	15	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕
		25	84.97	85.75	**85.36**	0.55	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕
		50	87.28	87.64	**87.46**	0.25	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ ✕ แทน ไม่มีการแสดงผลการทดลอง เนื่องจากไม่มีการทำการทดลองที่สภาวะนั้นๆ

ตารางที่ 4-1แสดงปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)ที่ได้จากกระบวนการทดลอง ในแต่ละสภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดอิสระ (%FFA) ที่แตกต่างกันทั้ง 4 ระดับเป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

%FFA	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล											
			อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (Reaction Temp. ;°C)											
			30				45				60			
			ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.
0.630	30	15	74.55	74.09	**74.32**	0.33	82.71	83.31	**83.01**	0.42	85.08	86.00	**85.54**	0.65
		25	81.68	81.75	**81.72**	0.05	85.01	85.73	**85.37**	0.51	93.34	93.56	**93.45**	0.16
		50	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	60	15	77.08	78.31	**77.69**	0.87	80.41	79.36	**79.88**	0.74	83.22	82.51	**82.87**	0.50
		25	82.02	83.41	**82.72**	0.99	80.36	80.84	**80.60**	0.34	90.03	91.36	**90.70**	0.94
		50	87.51	86.05	**86.78**	1.03	×	×	×	×	×	×	×	×
	120	15	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
		25	81.81	81.90	**81.86**	0.06	×	×	×	×	×	×	×	×
		50	85.93	85.68	**85.80**	0.17	×	×	×	×	×	×	×	×

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ × แทน ไม่มีการแสดงผลการทดลอง เนื่องจากไม่มีการทำการทดลองที่สภาวะนั้นๆ

ตารางที่ 4-1แสดงปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)ที่ได้จากกระบวนการทดลอง ในแต่ละสภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดอิสระ (%FFA) ที่แตกต่างกันทั้ง 4 ระดับเป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

%FFA	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล											
			อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (Reaction Temp. ;°C)											
			30				45				60			
			ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.
1.435	30	15	62.07	67.91	**64.99**	4.13	77.36	76.85	**77.10**	0.36	83.53	84.83	**84.18**	0.92
		25	76.12	76.81	**76.47**	0.49	79.33	80.31	**79.82**	0.69	91.44	90.89	**91.17**	0.39
		50	✕	✕	✕	✕	82.66	81.26	**81.96**	0.99	✕	✕	✕	✕
	60	15	68.02	70.66	**69.34**	1.86	70.66	73.04	**71.85**	1.68	81.89	82.86	**82.38**	0.69
		25	78.83	79.25	**79.04**	0.29	76.65	77.17	**76.91**	0.37	86.15	88.68	**87.42**	1.79
		50	80.92	81.12	**81.02**	0.14	80.66	81.34	**81.00**	0.48	89.18	90.12	**89.65**	0.66
	120	15	✕	✕	✕	✕	69.64	68.24	**68.94**	0.99	✕	✕	✕	✕
		25	76.05	78.72	**77.39**	1.88	72.84	73.12	**72.98**	0.20	83.64	84.22	**83.93**	0.41
		50	78.83	79.66	**79.25**	0.58	74.45	75.84	**75.15**	0.98	✕	✕	✕	✕

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ ✕ แทน ไม่มีการแสดงผลการทดลอง เนื่องจากไม่มีการทำการทดลองที่สภาวะนั้นๆ

จากตารางที่ 4-1 แสดงปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)ที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้นที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน (%FFA) ในสภาวะที่แตกต่างกัน โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 4 ปัจจัยที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น พบว่า

1) ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้จากการทดลองในแต่ละสภาวะนั้นมีค่าแตกต่างกัน

2) จากผลการทดลองในตารางที่ 4-1 พบว่า ผลการทดลองในครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 2 มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลองทั้งหมดอยู่ในช่วง 0.02 ถึง 1.88 ซึ่งถือเป็นค่าที่ยอมรับได้และแสดงให้เห็นว่าผลการทดลองดังกล่าวมีความน่าเชื่อถือ แต่มีเพียงสภาวะเดียว คือ สภาวะการทดลองที่อุณหภูมิ 30 °C เวลาที่ใช้ 30 นาทีและปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเป็น 15 %โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์มใช้แล้ว ที่ระดับกรดไขมันอิสระ 1.435 %FFA พบว่ามีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 4.13 ซึ่งอาจเกิดการการผิดพลาด(Error) ระหว่างการทำการทดลองของผู้ทำการทดลองได้

3) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้จากการทดลองในสภาวะเดียวกันแต่ปริมาณกรดไขมันอิสระของสารตั้งต้น (%FFA)แตกต่างกันทั้ง 4 ระดับ ได้แก่ 0.427, 0.512, 0.630 และ 1.435 %FFA พบว่า มีค่าเฉลี่ยของปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (Mean of %FAME) ที่แตกต่างกัน โดยเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) ในน้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้น ส่งผลให้ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)ที่ได้ในแต่ละสภาวะมีแนวโน้มลดลงสำหรับทุกสภาวะการทดลอง

4) ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)ที่ได้จากการทดลองทั้งหมด ในแต่ละระดับกรดไขมันอิสระ (%FFA) ทั้ง 4 ระดับหรือ 4 กลุ่มตัวอย่าง สามารถสรุปผลโดยรวมได้ดังนี้

   - ที่ระดับ 0.427%FFA พบว่า ค่าเฉลี่ยของ %FAMEอยู่ในช่วง 83.00 ถึง 96.81
   - ที่ระดับ 0.512%FFA พบว่า ค่าเฉลี่ยของ %FAMEอยู่ในช่วง 76.93 ถึง 92.70
   - ที่ระดับ 0.630%FFA พบว่า ค่าเฉลี่ยของ %FAMEอยู่ในช่วง 74.32 ถึง 93.45
   - ที่ระดับ 1.435%FFA พบว่า ค่าเฉลี่ยของ %FAMEอยู่ในช่วง 64.99 ถึง 91.17

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเมทิลเอสเตอร์กับปัจจัยที่ใช้

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-1 แสดงปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)ที่ได้จากการทดลองในแต่ละสภาวะ โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้นที่มีปริมารกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน สำหรับในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 4 ปัจจัย ได้แก่ กรดไขมันอิสระในน้ำมัน (%FFA) อุณหภูมิ (°C) เวลา (Mins) และปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง (%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์มใช้แล้ว)โดยมีการวิเคราะห์ผลการทดลองในรูปแบบของกราฟเส้นและทำการวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์และแนวโน้มของปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้ในแต่ละปัจจัย ดังนี้

- **ปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันตั้งต้น**

จากการทำการทดลองเพื่อศึกษาปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) ในน้ำมันปาล์มใช้แล้ว สำหรับในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) ที่แตกต่างกัน 4 ระดับ ได้แก่ 0.427, 0.512, 0.630 และ 1.435 %FFA ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซล โดยแสดงข้อมูลไว้ดังตารางที่ 4-2 ซึ่งสามารถศึกษาแนวโน้มระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) กับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)ที่ได้จากการทดลองได้

- **อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา**

จากการทำการทดลองเพื่อศึกษาระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาหรือใช้ในการผลิตไบโอดีเซล สำหรับในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองทั้ง 3 ระดับ ได้แก่ 30, 45 และ 60°C ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซล โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้จากการทดลองและสามารถแสดงผลการทดลองด้วยกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (°C) กับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน สำหรับทุกสภาวะการทดลองดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-3 และ 4-4 ตามลำดับ

ตารางที่ 4-2 แสดงผลการศึกษาความแตกต่างระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA)ในน้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้นกับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)ที่ได้จากการทดลอง (พิจารณาจากค่าเฉลี่ย) สำหรับทุกสภาวะการทดลอง

ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง	**สภาวะที่ใช้ในการทดลอง**	**ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME ; %Fatty Acid Methyl Esters)ที่ได้จากการทดลอง**										
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
	Temperature(°C)	30							45			
	Time(นาที, Mins)	30		60			120		30			60
	Methanol (%v/v)	15	25	15	25	50	25	50	15	25	50	15
%FFA	0.427	83.00	88.99	86.38	91.14	92.22	89.85	91.43	91.35	91.84	92.34	85.72
	0.512	76.93	83.65	80.89	86.85	89.75	85.36	87.46	83.01	86.24	✕	81.60
	0.630	74.32	81.72	77.69	82.72	86.78	81.86	85.80	83.01	85.37	✕	79.88
	1.435	64.99	76.47	69.34	79.04	81.02	77.39	79.25	77.10	79.82	81.96	71.85

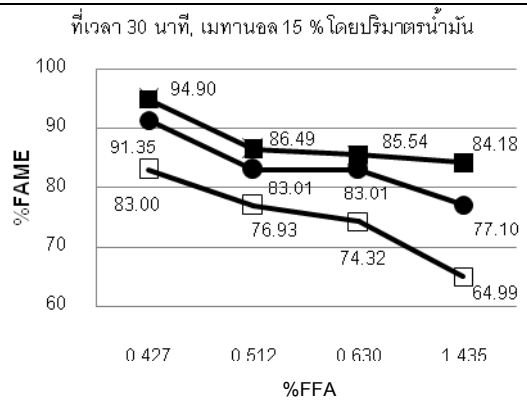
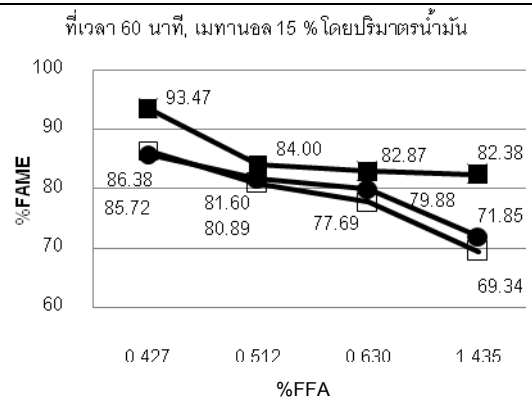
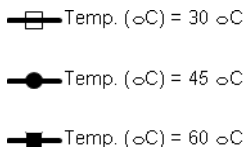
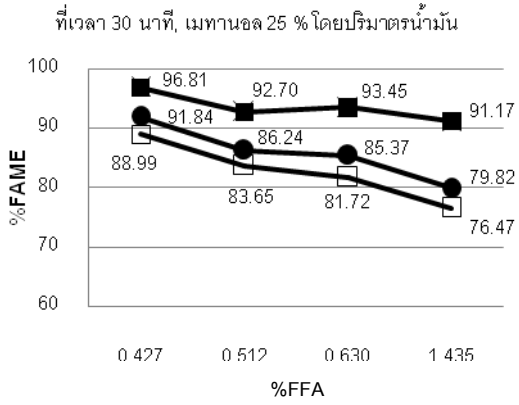
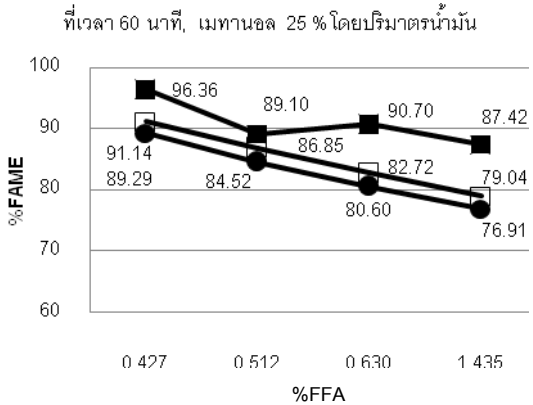
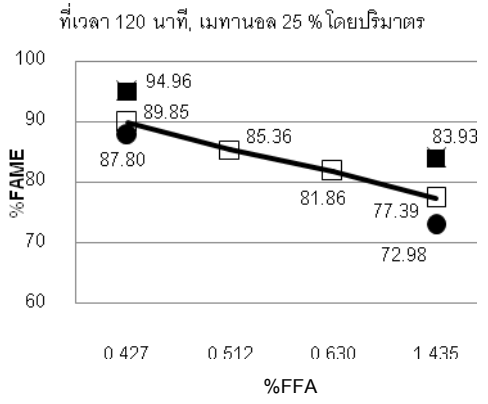
หมายเหตุ : สัญลักษณ์ ✕ แทน ไม่มีการแสดงผลการทดลอง เนื่องจากไม่มีการทำการทดลองที่สภาวะนั้นๆ

ตารางที่ 4-2 แสดงผลการศึกษาความแตกต่างระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA)ในน้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้นกับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)ที่ได้จากการทดลอง (พิจารณาจากค่าเฉลี่ย) สำหรับทุกสภาวะการทดลอง (ต่อ)

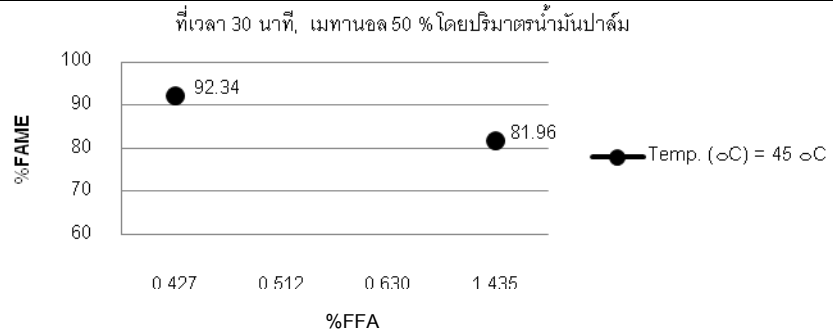
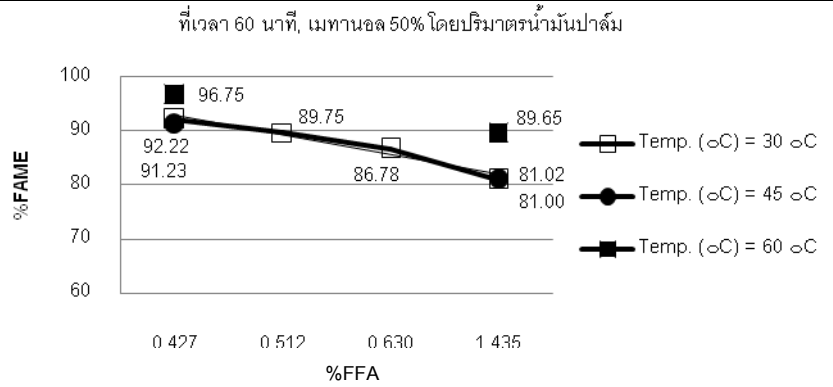
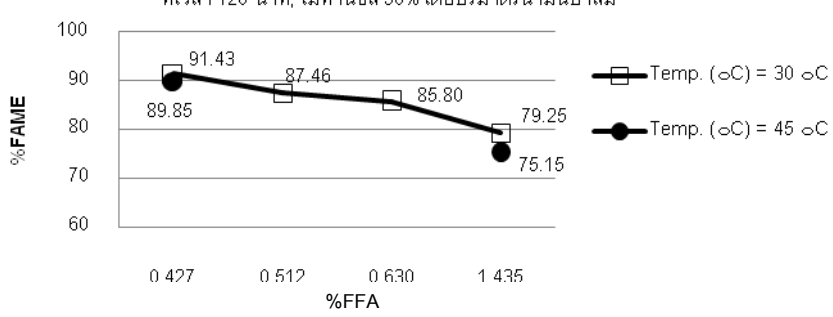
ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง	**สภาวะที่ใช้ในการทดลอง**	**ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME ; %Fatty Acid Methyl Esters)ที่ได้จากการทดลอง**										
		(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)	(22)
	Temperature(°C)	45					60					
	Time(นาที, Mins)	60		120			30		60			120
	Methanol (%v/v)	25	50	15	25	50	15	25	15	25	50	25
%FFA	0.427	89.29	91.23	83.11	87.80	89.85	94.90	96.81	93.47	96.36	96.75	94.96
	0.512	84.52	✕	✕	✕	✕	86.49	92.70	84.00	89.10	✕	✕
	0.630	80.60	✕	✕	✕	✕	85.54	93.45	82.87	90.70	✕	✕
	1.435	76.91	81.00	68.94	72.98	75.15	84.18	91.17	82.38	87.42	89.65	83.93

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ ✕ แทน ไม่มีการแสดงผลการทดลอง เนื่องจากไม่มีการทำการทดลองที่สภาวะนั้นๆ

ตารางที่ 4-3 แสดงกราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA)กับ%FAMEที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกันในแต่ละสภาวะ

<table>
<tr><th rowspan="2">เวลาที่ใช้เมทานอล</th><th colspan="3">ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA)กับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)ที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกันในแต่ละสภาวะ</th></tr>
<tr><th>30 นาที</th><th>60 นาที</th><th>120 นาที</th></tr>
<tr><td>15% โดยปริมาตรน้ำมัน</td><td> 
</td><td> 
</td><td>หมายเหตุ สำหรับสภาวะที่เวลา 120 นาที, เมทานอล 15 %โดยปริมาตรน้ำมันไม่มีการทำการทดลองที่ทุกระดับอุณหภูมิ โดยมีการกำหนดให้
 
</td></tr>
<tr><td>25% โดยปริมาตรน้ำมัน</td><td> 
</td><td> 
</td><td> 
</td></tr>
</table>

ตารางที่ 4-4 แสดงกราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA)กับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)สำหรับสภาวะการทดลอง โดยใช้ปริมาณเมทานอลในการทำปฏิกิริยา 50%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์มใช้แล้วและทั้ง 3 ช่วงเวลา ที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกัน

เวลาที่ใช้ในการทดลอง	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA)กับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกันในแต่ละสภาวะ
30 นาที	 <u>หมายเหตุ</u> ในสภาวะนี้มีการทดลองเฉพาะที่ระดับอุณหภูมิ 45°C ที่ 2 ระดับกรดไขมันอิสระ นั่นคือ 0.427 และ 1.435 %FFA เท่านั้น
60 นาที	
120 นาที	 <u>หมายเหตุ</u>ในสภาวะนี้ได้ทำการทดลองเฉพาะที่ระดับอุณหภูมิ 30 และ 45°C ซึ่งที่ 45°C ทดลองที่ 2 ระดับกรดไขมันอิสระ คือ 0.427 และ 1.435 %FFA

จากตารางที่ 4-3 และ 4-4 แสดงกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA) กับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกันโดยมีการกำหนดระยะเวลาและปริมาณเมทานอลในการทำปฏิกิริยาเป็นค่าคงที่ในแต่ละกราฟหรือแต่ละสภาวะการทดลอง

เมื่อพิจารณา ณ เวลา (Time ; Mins) และปริมาณของเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (Methanol ; %โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม) คงที่แต่ที่ระดับอุณหภูมิ (Temp. ; °C) แตกต่างกันได้แก่ 30, 45 และ 60 °C ซึ่งมีทั้งหมดหลากหลายสภาวะที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ดังนั้นจากการวิเคราะห์ผลจากตารางที่ 4-3 และ 4-4 พบว่า สามารถสรุปได้ดังนี้

1.) เมื่อพิจารณาแยกเป็นแต่ละระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน (30, 45 และ 60 °C) เมื่อพิจารณาที่ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มตั้งต้น 0.427%FFA พบว่า
   - เมื่อระดับอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ค่าเฉลี่ยของ %FAME ที่ได้จากการทดลองจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเช่นกันในทุกๆ สภาวะการทดลอง
   - หากในน้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้นมีปริมาณกรดไขมันอิสระ หรือ %FFA เพิ่มสูงขึ้น ค่าเฉลี่ยของ %FAME ที่ได้จะมีแนวโน้มลดลงในทุกๆ สภาวะการทดลอง

2.) จากการทดลองในหลายสภาวะข้างต้น โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระอยู่ในช่วง (0.427 – 1.435 %FFA) เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการทดลองพบว่า จากการทดลองภายใต้สภาวะที่กำหนดในแต่ละช่วงระดับอุณหภูมิ มีค่าเฉลี่ยของ %FAME (ปริมาณเมทิลเอสเตอร์จากการทดลอง)สามารถสรุปข้อมูลสำหรับค่าเฉลี่ยของปริมาณเมทิลเอสเตอร์สูงสุดในแต่ละระดับอุณหภูมิการทดลอง ได้ดังตารางที่ 4-5

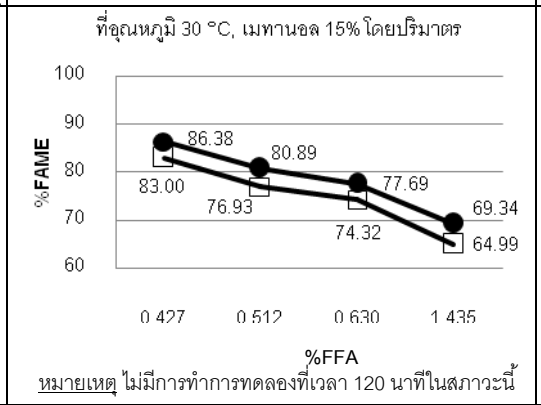
ตารางที่ 4-5 แสดงปริมาณเมทิลเอสเตอร์สูงสุดที่ได้จากการทดลองในแต่ละระดับอุณหภูมิ

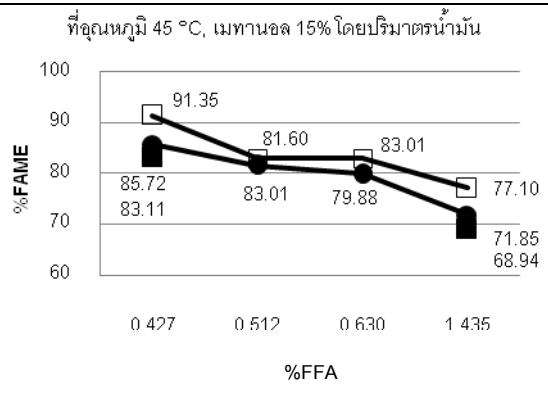
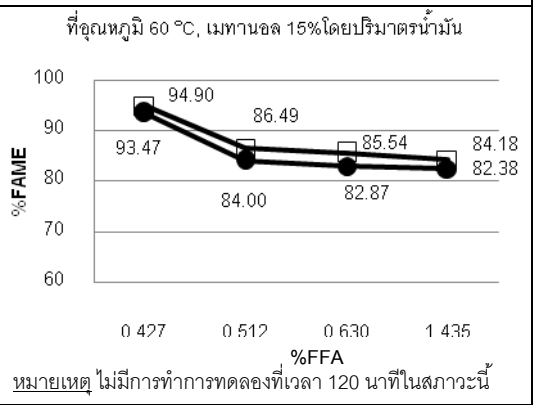
ระดับอุณหภูมิ (°C)	%FAME สูงสุดที่ได้ (%)	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง		
		%FFA	เวลา (นาที)	ปริมาณเมทานอล (%โดยปริมาตรน้ำมันปาล์ม)
30	92.22	0.427	60	50
45	92.34	0.427	30	50
60	96.81	0.427	30	25

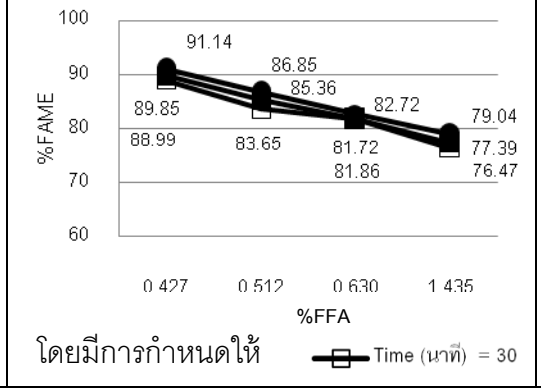
- **เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา**

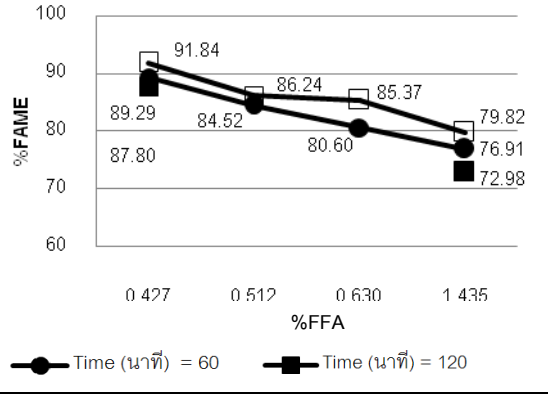
จากการทำการทดลองเพื่อศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาหรือใช้ในการผลิตไบโอดีเซล สำหรับในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองทั้ง 3 ระดับ ได้แก่ 30, 60 และ 120 นาที ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซล โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้กับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้จากการทดลองและสามารถแสดงผลการทดลองด้วยกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (นาที) กับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระแตกต่างกันสำหรับทุกสภาวะการทดลอง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-6 และ 4-7 ตามลำดับ

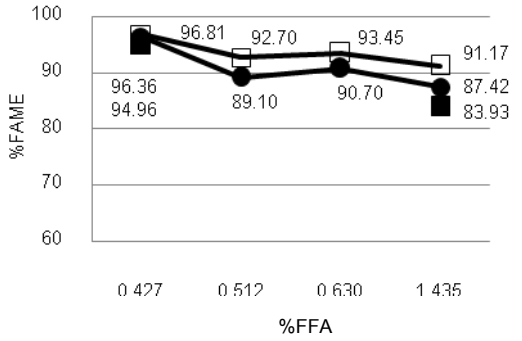
ตารางที่ 4-6 แสดงกราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA)กับ%FAME โดยช่วงเวลาที่ใช้ทำการทดลองต่างกันในแต่ละสภาวะ

<table>
<tr><td>อุณหภูมิที่ใช้
เมทานอล</td><td colspan="3">ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA)กับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)ที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกันในแต่ละสภาวะ</td></tr>
<tr><td></td><td>30 °C</td><td>45°C</td><td>60°C</td></tr>
<tr><td>15% โดยปริมาตรน้ำมัน</td><td> 

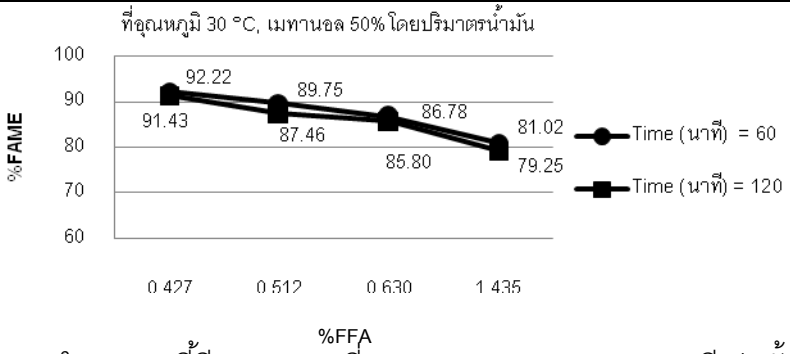
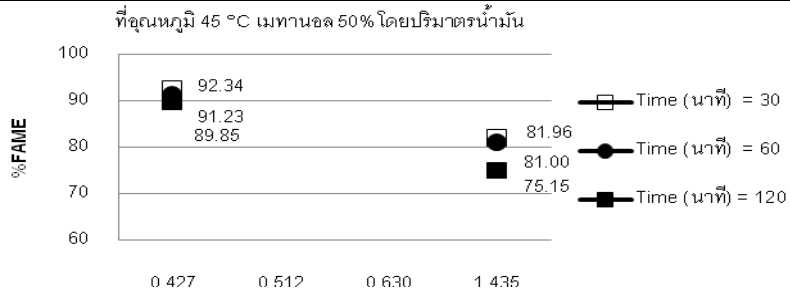
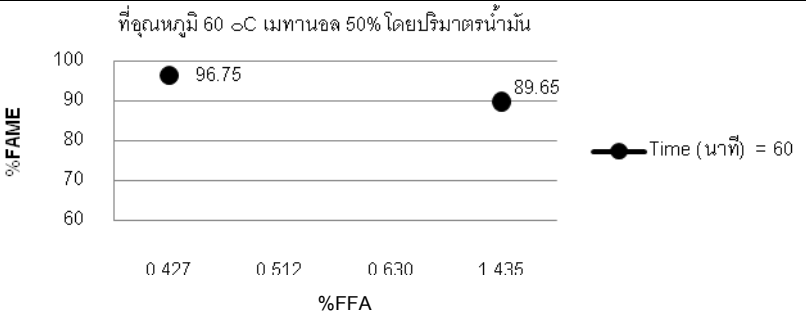
หมายเหตุ ไม่มีการทำการทดลองที่เวลา 120 นาทีในสภาวะนี้</td><td> 
</td><td> 

หมายเหตุ ไม่มีการทำการทดลองที่เวลา 120 นาทีในสภาวะนี้</td></tr>
<tr><td>25% โดยปริมาตรน้ำมัน</td><td> 

โดยมีการกำหนดให้ Time (นาที) = 30</td><td> 

Time (นาที) = 60 Time (นาที) = 120</td><td> 
</td></tr>
</table>

ตารางที่ 4-7 แสดงกราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA)กับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) โดยใช้ปริมาณเมทานอลในการทำปฏิกิริยา 50%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์มใช้แล้วและทั้ง 3 ระดับอุณหภูมิ แต่ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน

อุณหภูมิที่ใช้ทดลอง	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA)กับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ระยะเวลาที่ใช้แตกต่างกันในแต่ละสภาวะ
30 °C	 หมายเหตุ ในสภาวะนี้มีการทดลองที่ระยะเวลา 60 และ 120 นาทีเท่านั้น ไม่ได้ทำการทดลองระยะเวลา 30 นาที
45°C	 หมายเหตุ ในสภาวะนี้มีการทดลองเฉพาะที่ 2 ระดับกรดไขมันอิสระ คือ 0.427 และ 1.435 %FFA ของทั้ง 3 ช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง
60°C	 หมายเหตุ ในสภาวะนี้มีการทดลองเฉพาะที่ระยะเวลา 60 นาทีและทดลองเฉพาะที่ 2 ระดับกรดไขมันอิสระ คือ 0.427 และ 1.435 %FFA

จากตารางที่ 4-6 และ 4-7 แสดงกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA) กับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกัน โดยมีการกำหนดระดับอุณหภูมิและปริมาณเมทานอลในการทำปฏิกิริยาเป็นค่าคงที่ในแต่ละกราฟหรือแต่ละสภาวะการทดลอง

เมื่อพิจารณา ณ ระดับอุณหภูมิ (Temp. ; °C) และปริมาณของเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (Methanol ; %โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม)คงที่ แต่ที่ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง (Time ; Mins.) แตกต่างกัน ได้แก่ 30, 60และ 120 นาทีซึ่งมีทั้งหมดหลากหลายสภาวะที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ดังนั้นจากการวิเคราะห์ผลจากตารางที่ 4-6และ 4-7 พบว่า สามารถสรุปได้ดังนี้

1.) เมื่อพิจารณาระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน (30, 60และ 120 Mins.)จากผลการทดลอง สำหรับสภาวะที่ใช้ระดับอุณหภูมิเดียวกันและที่ระดับปริมาณของเมทานอลเดียวกันนั้น พบว่า
   - สำหรับการทดลองที่ระดับอุณหภูมิ 45 และ 60°C ที่ใช้ระยะเวลา 30 นาที มีค่าเฉลี่ยของ %FAME มากกว่าที่ใช้ระยะเวลา 60 นาทีในการทำปฏิกิริยา ในทุกสภาวะการทดลอง นั่นคือ เมื่อเวลาที่ใช้เพิ่มสูงขึ้น ค่าเฉลี่ยของ %FAME ที่ได้จากการทดลองจะมีแนวโน้มลดลง
   - สำหรับการทดลองที่ระดับอุณหภูมิ 30°Cที่ใช้ระยะเวลา 30 นาที มีค่าเฉลี่ยของ %FAME น้อยกว่าที่ใช้ระยะเวลา 60 นาที และที่เวลา 120 นาทีมีค่าเฉลี่ยของ %FAME มากกว่าที่ระยะเวลา 30 นาทีแต่ยังมีค่าน้อยกว่าที่เวลา 60 นาที ในทุกระดับของปริมาณเมทานอลที่ใช้สรุปได้ว่าที่ระยะเวลา 60,120 และ 30 นาที มีค่าเฉลี่ยของ %FAME เรียงจากมากไปน้อย ตามลำดับ

2.) เมื่อพิจารณาแยกเป็นในแต่ละระยะเวลาที่แตกต่างกัน (30, 60และ 120 นาที) สำหรับสภาวะใดๆ เมื่อระดับอุณหภูมิและปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลองคงที่ ในแต่ละช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองพบว่า ปริมาณกรดไขมันอิสระ หรือ %FFAในน้ำมันปาล์มใช้แล้วเพิ่มสูงขึ้น ค่าเฉลี่ยของ %FAME ที่ได้จะมีแนวโน้มลดลงในทุกๆ สภาวะการทดลอง

3.) จากการทดลองในหลายสภาวะข้างต้น โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระอยู่ในช่วง (0.427 – 1.435 %FFA) เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการทดลองพบว่า จากการทดลองภายใต้สภาวะที่กำหนดในแต่ละช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง มีค่าเฉลี่ยของ %FAME (ปริมาณเมทิลเอสเตอร์จากการทดลอง)สามารถสรุปข้อมูลสำหรับค่าเฉลี่ยของปริมาณเมทิลเอสเตอร์สูงสุดในแต่ละช่วงเวลาที่ใช้ในการทดลอง ได้ดังตารางที่ 4-8

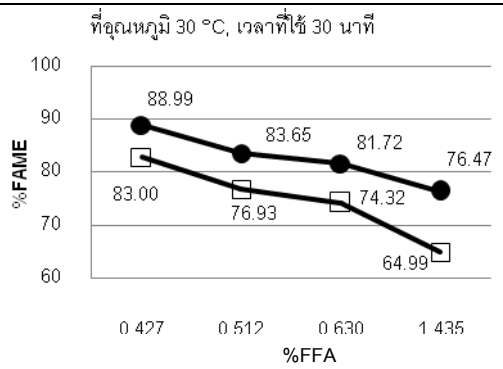
ตารางที่ 4-8 แสดงปริมาณเมทิลเอสเตอร์สูงสุดที่ได้จากการทดลองในแต่ละช่วงระยะเวลา

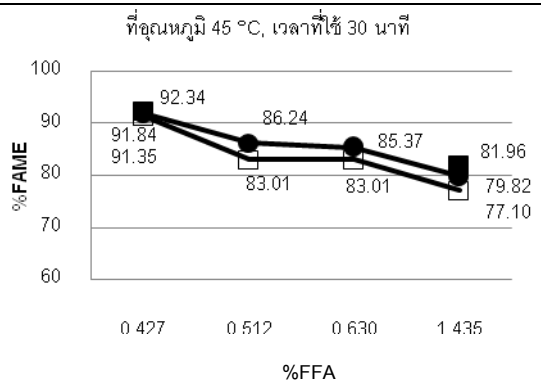
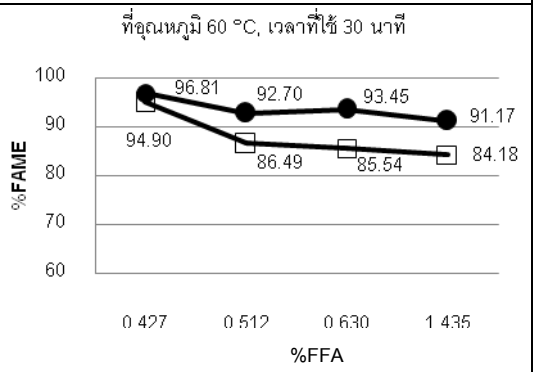
ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง (นาที)	%FAME สูงสุดที่ได้ (%)	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง		
		%FFA	ระดับอุณหภูมิ (°C)	ปริมาณเมทานอล (%โดยปริมาตรน้ำมันปาล์ม)
30	96.81	0.427	60	25
60	96.75	0.427	60	50
120	94.96	0.427	60	25

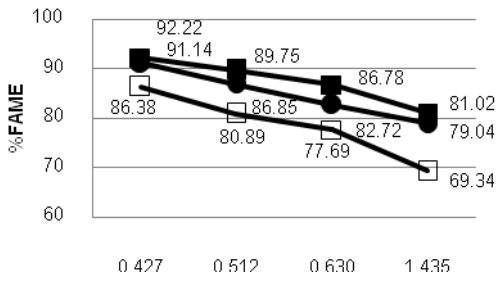
- **ปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา**

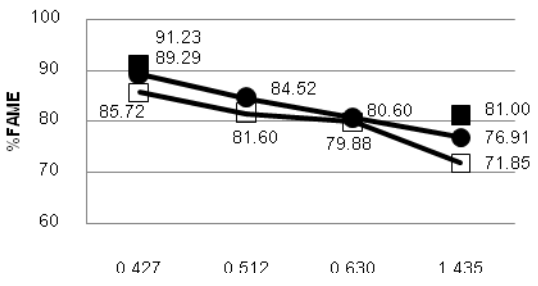
จากการทำการทดลองเพื่อศึกษาปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาหรือใช้ในการผลิตไบโอดีเซล สำหรับในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลองทั้ง 3 ระดับ ได้แก่ 15, 25 และ 50%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซล โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเมทานอลที่ใช้กับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้จากการทดลองและสามารถแสดงผลการทดลองด้วยกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (นาที)กับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน สำหรับทุกสภาวะการทดลอง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-9 และ 4-10 ตามลำดับ

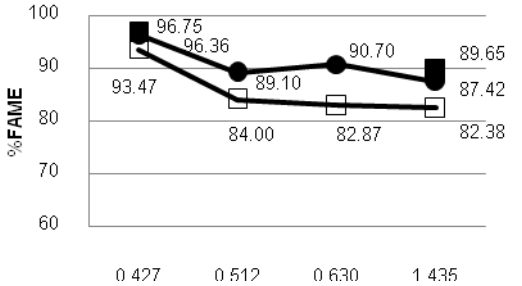
ตารางที่ 4-9 แสดงกราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA)กับ%FAMEที่ปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกัน

<table>
<tr><td>อุณหภูมิที่ใช้
เวลาที่ใช้</td><td colspan="3">ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) กับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) โดยปริมาณเมทานอลที่ใช้ต่างกันในแต่ละสภาวะ</td></tr>
<tr><td></td><td>30 °C</td><td>45°C</td><td>60°C</td></tr>
<tr><td>30 นาที</td><td> 

หมายเหตุ ไม่มีการทดลองที่ใช้เมทานอล 50%v/vในสภาวะนี้</td><td> 
</td><td> 

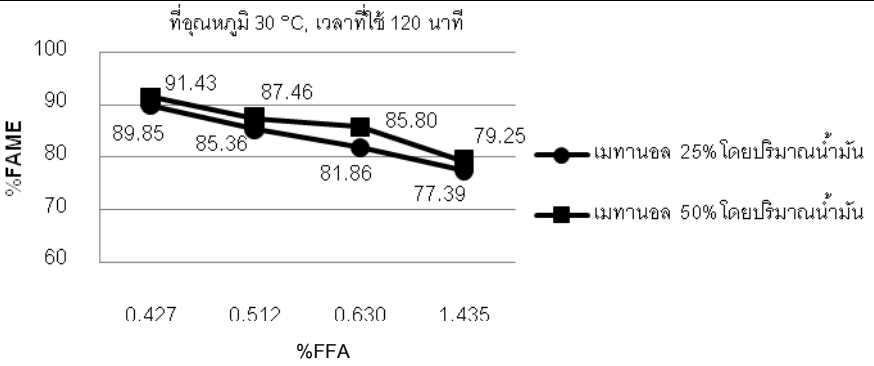
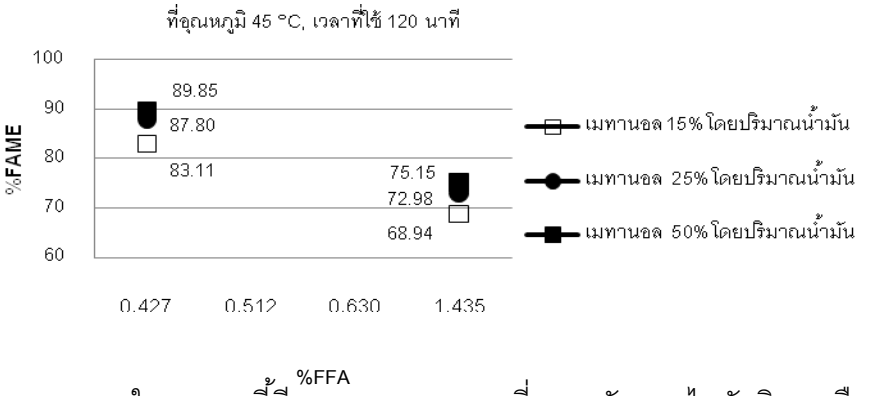
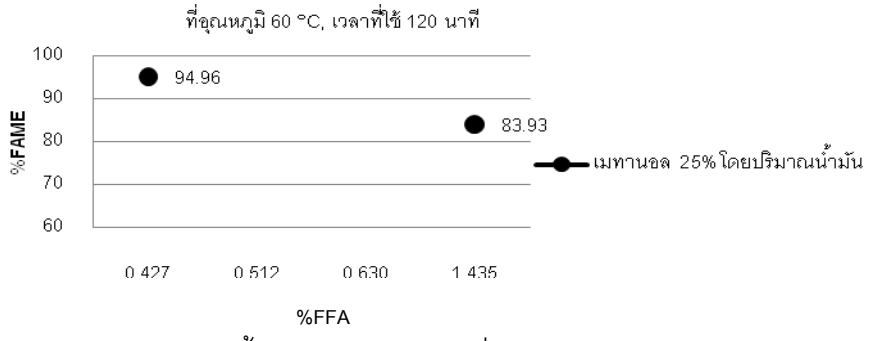
หมายเหตุ ไม่มีการทดลองที่ใช้เมทานอล 50%v/vในสภาวะนี้</td></tr>
<tr><td>60 นาที</td><td> 

โดยมีการกำหนดให้
เมทานอล 15%โดยปริมาณน้ำมัน</td><td> 

เมทานอล 25%โดยปริมาณน้ำมัน</td><td> 

เมทานอล 50%โดยปริมาณน้ำมัน</td></tr>
</table>

ตารางที่ 4-10 แสดงกราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA)กับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) โดยเวลาที่ในการทดลอง 120 นาที สำหรับทั้ง 3 ระดับอุณหภูมิ แต่ใช้ปริมาณเมทานอลในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน

อุณหภูมิที่ใช้ทดลอง	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA)กับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ระดับปริมาณเมทานอลที่ใช้แตกต่างกันในแต่ละสภาวะ
30 °C	 หมายเหตุไม่มีการทดลองที่ใช้ระดับเมทานอล 15% โดยปริมาตรในสภาวะนี้
45°C	 หมายเหตุ ในสภาวะนี้มีการทดลองเฉพาะที่ 2 ระดับกรดไขมันอิสระ คือ 0.427 และ 1.435 %FFA ของทั้ง 3 ระดับของเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง
60°C	 หมายเหตุ ในสภาวะนี้มีการทดลองเฉพาะที่ระดับปริมาณเมทานอล 25%โดยปริมาตรน้ำมัน และที่ 2 ระดับกรดไขมันอิสระ คือ 0.427 และ 1.435 %FFA

จากตารางที่ 4-9 และ 4-10 แสดงกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA) กับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ระดับปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกัน โดยกำหนดระดับอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้การทำการทดลองเป็นค่าคงที่ในแต่ละกราฟหรือแต่ละสภาวะการทดลอง

เมื่อพิจารณา ณ ระดับอุณหภูมิ (Temp. ; °C) และที่ระยะเวลา (Time ; Mins) คงที่แต่ปริมาณของเมทานอลที่ใช้ในการทำการทดลอง (Methanol ; %โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม) แตกต่างกัน ได้แก่ 15, 25 และ 50% โดยปริมาตรของน้ำมันซึ่งมีทั้งหมดหลายสภาวะที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ดังนั้นจากการวิเคราะห์ผลจากตารางที่ 4-9 และ 4-10 พบว่า สามารถสรุปได้ดังนี้

1.) เมื่อพิจารณาระดับปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน (15, 25 และ 50 %โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม)จากผลการทดลอง สำหรับสภาวะที่ใช้ระดับอุณหภูมิเดียวกันและที่ช่วงเวลาเดียวกันนั้น พบว่า
   - สำหรับทุกระดับอุณหภูมิ การทดลองที่ระดับเมทานอล 25 %โดยปริมาตรของน้ำมันมีค่าเฉลี่ยของ %FAME มากกว่าที่ระดับเมทานอล15 %โดยปริมาตรของน้ำมันในทุกสภาวะการทดลอง
   - การทดลองที่ระดับเมทานอล 50 %โดยปริมาตรของน้ำมันมีค่าเฉลี่ยของ %FAME มากกว่าที่ระดับเมทานอล25 %โดยปริมาตรของน้ำมันเล็กน้อยหรือถือได้ว่า ทั้ง 2 ระดับของเมทานอลนี้ให้ค่า %FAME ใกล้เคียงกันมากสำหรับทุกสภาวะการทดลองดังนั้นสามารถเลือกใช้ที่เมทานอล 25 แทนที่ระดับเมทานอล 50 %โดยปริมาตรของน้ำมัน เพื่อเป็นการประหยัดต้นทุนในการผลิต
2.) เมื่อพิจารณาแยกเป็นในแต่ละระดับปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทำทดลองแตกต่างกัน (15, 25และ 50%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม) สำหรับสภาวะใดๆ เมื่อระดับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทดลองคงที่ ในแต่ละระดับปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง พบว่า ปริมาณกรดไขมันอิสระ หรือ %FFA ในน้ำมันปาล์มใช้แล้วเพิ่มสูงขึ้น ค่าเฉลี่ยของ %FAME ที่ได้จะมีแนวโน้มลดลงในทุกๆ สภาวะการทดลอง

3.) จากการทดลองในหลายสภาวะข้างต้น โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระอยู่ในช่วง (0.427 – 1.435 %FFA) เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการทดลองพบว่า จากการทดลองภายใต้สภาวะที่กำหนดในแต่ละระดับปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง มีค่าเฉลี่ยของ %FAME (ปริมาณเมทิลเอสเตอร์จากการทดลอง)และสามารถสรุปข้อมูลสำหรับค่าเฉลี่ยของปริมาณเมทิลเอสเตอร์สูงสุดในแต่ละระดับปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง ได้ดังตารางที่ 4-11

ตารางที่ 4-11 แสดงปริมาณเมทิลเอสเตอร์สูงสุดที่ได้จากการทดลองในแต่ละระดับเมทานอลที่ใช้

ปริมาณเมทานอล (%โดยปริมาตรน้ำมันปาล์ม)	%FAME สูงสุดที่ได้ (%)	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง		
		%FFA	ระดับอุณหภูมิ(°C)	เวลา (นาที)
15	94.90	0.427	60	30
25	96.81	0.427	60	30
50	96.75	0.427	60	60

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) กับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้จากการทดลอง โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการผลิต ได้แก่ ระดับอุณหภูมิ, เวลาและปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลองดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น พบว่า สำหรับทุกปัจจัยทั้งระดับอุณหภูมิ, เวลาและปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลองเมื่อทำการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้นที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) มีแนวโน้มลดลง และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์สำหรับทุกปัจจัยจากกผลารทดลองทั้งหมดสามารถสรุปสภาวะการทดลองที่ให้ปริมาณเมทิลเอสเตอร์สูงสุด 3 อับดับแรกดังได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-12

ตารางที่ 4-12 แสดงปริมาณเมทิลเอสเตอร์สูงสุดที่ได้จากการทดลอง 3 อันดับแรก

Rating	%FAME สูงสุดที่ได้ (%)	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง			
		%FFA	ระดับอุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	ปริมาณเมทานอลที่ใช้ (%โดยปริมาตรของน้ำมัน)
1.	96.81	0.427	60	30	25
2.	96.75	0.427	60	60	50
3.	96.36	0.427	60	60	25

4.1.2 ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์

ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) สามารถหาได้จากการทดลองที่ถูกออกแบบแผนการทดลอง (Experimental Plan) ในตารางที่ 2-23 โดยสามารถหาค่าได้ไปควบคู่กันกับการหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) เนื่องจากทำการพิจารณาจากตัวอย่างเมทิลเอสเตอร์ตัวเดียวกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้ มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 4 ปัจจัย ได้แก่ กรดไขมันอิสระในน้ำมัน (%FFA) อุณหภูมิ (°C) เวลา (Mins) และปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์มใช้แล้ว)

ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน อ่านได้จากการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผลได้ของไบโอดีเซลจากน้ำหนักของน้ำมันวตถุดิบเริ่มต้นและน้ำหนักของไบโอดีเซลที่ได้จากกระบวนการผลิต โดยสามารถคำนวณจากสมการที่ (2.2) ซึ่งได้ถูกกล่าวไว้ในบทที่ 2.(แสดงรายละเอียดการคิดคำนวณไว้ในภาคผนวก ง.)

ดังนั้นจากตางรางที่ 2-20 พบว่า ในแต่ละตัวอย่างน้ำมันปาล์มใช้แล้วหรือน้ำมันปาล์มใช้แล้วทั้ง 4 ระดับกรดไขมันอิสระต้องมีการทำการทดลองทั้งหมด 22 สภาวะการทดลอง (ที่ระดับกรดไขมันอิสระ 0.427 และ 1.435%FFA) และ 15 สภาวะการทดลอง (ที่ระดับกรดไขมันอิสระ 0.512 และ 0.630 %FFA) สำหรับในงานวิจัยนี้ได้มีการกำหนดให้มีการทดลองซ้ำ 2 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยของร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)ที่ได้เพื่อให้ข้อมูลผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือมากขึ้นและประกอบกับผลการทดลองดังกล่าวเป็นผลทางวิทยาศาสตร์ซึ่งมีความแน่นอนไม่คลาดเคลื่อนมากนักจึงมีความคิดเห็นว่าการทดลองเพียง 2 ครั้งนั้นมีความเพียงพอสำหรับผลการทดลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลต่อไป

ร้อยละผลผลิตของปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลในงานวิจัยครั้งนี้ได้ถูกบันทึกผลการทดลองในแต่ละสภาวะ สำหรับทุกการทดลองจากตัวอย่างน้ำมันปาล์มใช้แล้วทั้ง 4 ตัวอย่างซึ่งมีปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) แตกต่างกัน ดังแสดงผลการทดลองในตารางที่ 4-13

ตารางที่ 4-13 แสดงร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)ที่ได้จากกระบวนการทดลอง ในแต่ละสภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดอิสระ (%FFA) ที่แตกต่างกันทั้ง 4 ระดับเป็นสารตั้งต้น

%FFA	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล											
			อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (Reaction Temp. ;°C)											
			30				45				60			
			ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.
0.427	30	15	84.77	83.22	**84.00**	1.10	74.19	75.98	**75.09**	1.27	95.34	94.13	**94.73**	0.85
		25	89.95	87.67	**88.81**	1.61	83.17	82.01	**82.59**	0.82	98.35	96.24	**97.30**	1.49
		50	✕	✕	✕	✕	84.12	83.76	**83.94**	0.25	✕	✕	✕	✕
	60	15	79.45	80.64	**80.05**	0.84	72.92	74.15	**73.53**	0.87	90.45	89.14	**89.79**	0.92
		25	86.01	85.44	**85.72**	0.40	77.84	79.34	**78.59**	1.06	97.03	95.17	**96.10**	1.31
		50	89.37	90.12	**89.74**	0.53	82.86	83.22	**83.04**	0.25	96.42	96.65	**96.54**	0.16
	120	15	✕	✕	✕	✕	70.86	71.34	**71.10**	0.34	✕	✕	✕	✕
		25	84.09	84.45	**84.27**	0.26	76.44	76.04	**76.24**	0.28	94.45	93.76	**94.11**	0.49
		50	90.94	92.16	**91.55**	0.86	78.56	79.34	**78.95**	0.55	✕	✕	✕	✕

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ ✕ แทน ไม่มีการแสดงผลการทดลอง เนื่องจากไม่มีการทำการทดลองที่สภาวะนั้นๆ

ตารางที่ 4-13 แสดงร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)ที่ได้จากกระบวนการทดลอง ในแต่ละสภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดอิสระ (%FFA) ที่แตกต่างกันทั้ง 4 ระดับเป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

%FFA	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล											
			อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (Reaction Temp. ;°C)											
			30				45				60			
			ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.
0.512	30	15	82.11	82.24	**82.18**	0.09	71.09	73.67	**72.38**	1.82	88.58	87.84	**88.21**	0.52
		25	86.86	87.24	**87.05**	0.27	82.33	80.78	**81.56**	1.10	94.21	96.85	**95.53**	1.86
		50	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕
	60	15	77.84	76.12	**76.98**	1.22	69.70	70.75	**70.23**	0.74	82.45	83.78	**83.11**	0.94
		25	84.65	83.87	**84.26**	0.55	74.36	76.86	**75.61**	1.76	90.45	89.77	**90.11**	0.48
		50	88.21	87.56	**87.88**	0.46	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕
	120	15	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕
		25	82.15	81.87	**82.01**	0.20	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕
		50	89.14	88.14	**88.64**	0.71	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ ✕ แทน ไม่มีการแสดงผลการทดลอง เนื่องจากไม่มีการทำการทดลองที่สภาวะนั้นๆ

ตารางที่ 4-13 แสดงร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)ที่ได้จากกระบวนการทดลอง ในแต่ละสภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดอิสระ (%FFA) ที่แตกต่างกันทั้ง 4 ระดับเป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

%FFA	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล											
			อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (Reaction Temp. ;°C)											
			30				45				60			
			ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.
0.630	30	15	81.86	80.64	**81.25**	0.86	73.42	70.14	**71.78**	2.32	88.12	86.11	**87.12**	1.42
		25	86.35	85.65	**86.00**	0.49	80.56	79.12	**79.84**	1.02	95.68	94.12	**94.90**	1.10
		50	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕
	60	15	76.48	75.12	**75.80**	0.96	68.41	69.45	**68.93**	0.74	81.20	82.14	**81.67**	0.66
		25	83.97	83.19	**83.58**	0.55	75.24	74.28	**74.76**	0.68	90.69	88.27	**89.48**	1.71
		50	86.66	85.02	**85.84**	1.16	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕
	120	15	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕
		25	81.01	80.66	**80.84**	0.25	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕
		50	87.76	88.24	**88.00**	0.34	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ ✕ แทน ไม่มีการแสดงผลการทดลอง เนื่องจากไม่มีการทำการทดลองที่สภาวะนั้นๆ

ตารางที่ 4-13 แสดงร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)ที่ได้จากกระบวนการทดลอง ในแต่ละสภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดอิสระ (%FFA) ที่แตกต่างกันทั้ง 4 ระดับเป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

%FFA	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล											
			อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (Reaction Temp. ;°C)											
			30				45				60			
			ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.
1.435	30	15	76.74	76.71	**76.73**	0.02	72.44	69.42	**70.93**	2.13	82.10	83.02	**82.56**	0.65
		25	81.85	81.26	**81.55**	0.41	75.75	76.24	**75.99**	0.35	87.85	89.12	**88.48**	0.90
		50	✕	✕	✕	✕	76.82	77.46	**77.14**	0.45	✕	✕	✕	✕
	60	15	74.12	73.76	**73.94**	0.25	52.38	60.78	**56.58**	5.94	78.79	79.45	**79.12**	0.47
		25	79.91	78.21	**79.06**	1.20	74.39	73.58	**73.98**	0.57	85.50	84.14	**84.82**	0.96
		50	81.34	82.44	**81.89**	0.78	78.54	77.24	**77.89**	0.92	87.62	88.65	**88.14**	0.73
	120	15	✕	✕	✕	✕	57.56	58.44	**58.00**	0.62	✕	✕	✕	✕
		25	76.76	77.58	**77.17**	0.58	71.56	73.08	**72.32**	1.07	82.85	81.92	**82.39**	0.66
		50	83.68	84.77	**84.23**	0.77	74.76	73.24	**74.00**	1.07	✕	✕	✕	✕

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ ✕ แทน ไม่มีการแสดงผลการทดลอง เนื่องจากไม่มีการทำการทดลองที่สภาวะนั้นๆ

จากตารางที่ 4-13 แสดงร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้นที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน (%FFA) ในสภาวะที่แตกต่างกัน โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 4 ปัจจัยที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น พบว่า

1) ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ได้จากการทดลองในแต่ละสภาวะนั้นมีค่าแตกต่างกัน
2) จากผลการทดลองในตารางที่ 4-2 พบว่า ผลการทดลองในครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 2 มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลองทั้งหมดอยู่ในช่วง 0.09ถึง 2.32 ซึ่งถือเป็นค่าที่ยอมรับได้และแสดงให้เห็นว่าผลการทดลองดังกล่าวมีความน่าเชื่อถือ แต่มีเพียงสภาวะเดียว คือ สภาวะการทดลองที่อุณหภูมิ 45°C เวลาที่ใช้ 60 นาทีและปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเป็น 15 %โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่ระดับกรดไขมันอิสระ 1.435 %FFA พบว่ามีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 5.94 ซึ่งอาจเกิดการการผิดพลาด(Error) ระหว่างการทำการทดลองของผู้ทำการทดลองได้
3) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ได้จากการทดลองในสภาวะเดียวกันแต่ปริมาณกรดไขมันอิสระของสารตั้งต้น (%FFA)แตกต่างกันทั้ง 4 ระดับได้แก่ 0.427, 0.512, 0.630 และ 1.435 %FFA พบว่า มีค่าเฉลี่ยของร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (Mean of %Yield) ที่แตกต่างกัน โดยเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) ในน้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้น ส่งผลให้ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)ที่ได้ในแต่ละสภาวะมีแนวโน้มลดลง ทุกสภาวะการทดลอง
4) ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)ที่ได้จากการทดลองทั้งหมด ในแต่ละระดับกรดไขมันอิสระ (%FFA) ทั้ง 4 ระดับหรือ 4 กลุ่มตัวอย่าง สามารถสรุปผลโดยรวมได้ดังนี้
    - ที่ระดับ 0.427%FFA พบว่า ค่าเฉลี่ยของ %Yield อยู่ในช่วง 71.10 ถึง 97.30
    - ที่ระดับ 0.512%FFA พบว่า ค่าเฉลี่ยของ %Yield อยู่ในช่วง 70.23 ถึง 95.53
    - ที่ระดับ 0.630%FFA พบว่า ค่าเฉลี่ยของ %Yield อยู่ในช่วง 68.93 ถึง 94.90
    - ที่ระดับ 1.435%FFA พบว่า ค่าเฉลี่ยของ %Yield อยู่ในช่วง 56.58 ถึง 88.48

ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์กับปัจจัยที่ใช้

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-13 แสดงร้อยละผลผลิตของปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)ที่ได้จากการทดลองในแต่ละสภาวะ โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้นที่มีปริมารกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน สำหรับในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 4 ปัจจัย ได้แก่ กรดไขมันอิสระในน้ำมัน (%FFA) อุณหภูมิ (°C) เวลา (Mins) และปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง (%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์มใช้แล้ว) โดยมีการวิเคราะห์ผลการทดลองในรูปแบบของกราฟเส้นและทำการวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์และแนวโน้มของร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้ในแต่ละปัจจัย ดังต่อไปนี้

- **ปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันตั้งต้น**

จากการทำการทดลองเพื่อศึกษาปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) ในน้ำมันปาล์มใช้แล้ว สำหรับในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) ที่แตกต่างกัน 4 ระดับ ได้แก่ 0.427, 0.512, 0.630 และ 1.435 %FFA ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซล โดยแสดงข้อมูลไว้ดังตารางที่ 4-14 ซึ่งสามารถศึกษาแนวโน้มระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA)กับร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)ที่ได้จากการทดลองได้

- **อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา**

จากการทำการทดลองเพื่อศึกษาระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาหรือใช้ในการผลิตไบโอดีเซล สำหรับในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองทั้ง 3 ระดับ ได้แก่ 30, 45 และ 60°C ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)ที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซล โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)ที่ได้จากการทดลองและสามารถแสดงผลการทดลองด้วยกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (°C)กับร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน สำหรับทุกสภาวะการทดลอง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-15 และ 4-16 ตามลำดับ

ตารางที่ 4-14 แสดงผลการศึกษาความแตกต่างระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA)ในน้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้นกับร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)ที่ได้จากการทดลอง (พิจารณาจากค่าเฉลี่ย) สำหรับทุกสภาวะการทดลอง

ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง	**สภาวะที่ใช้ในการทดลอง**	**ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)ที่ได้จากการทดลอง**										
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
	Temperature(°C)	30							45			
	Time(นาที, Mins)	30		60			120		30			60
	Methanol (%v/v)	15	25	15	25	50	25	50	15	25	50	15
%FFA	0.427	84.00	88.81	80.05	85.72	89.74	84.27	91.55	75.09	82.59	83.94	73.53
	0.512	82.18	87.05	76.98	84.26	87.88	82.01	88.64	72.38	81.56	✕	70.23
	0.630	81.25	86.00	75.80	83.58	85.84	80.84	88.00	71.78	79.84	✕	68.93
	1.435	76.73	81.55	73.94	79.06	81.89	77.17	84.23	70.93	75.99	77.14	56.58

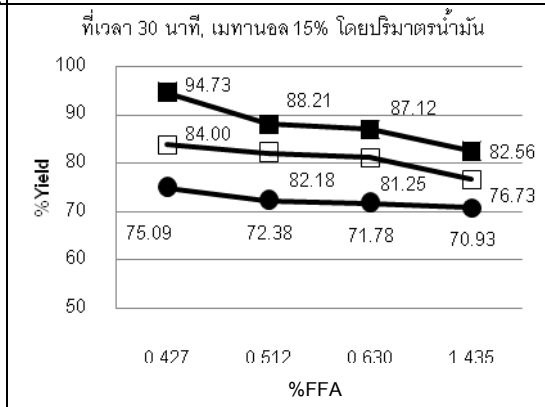
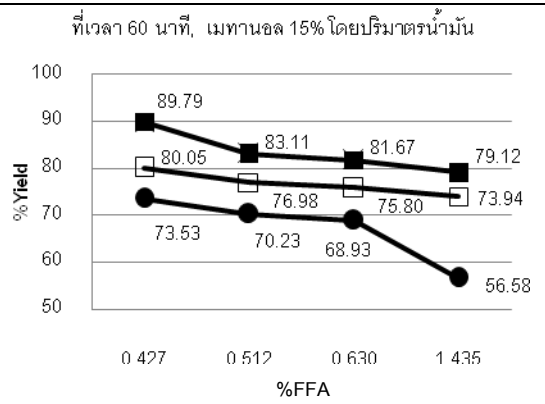
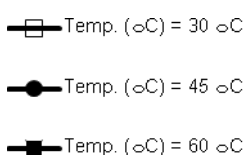
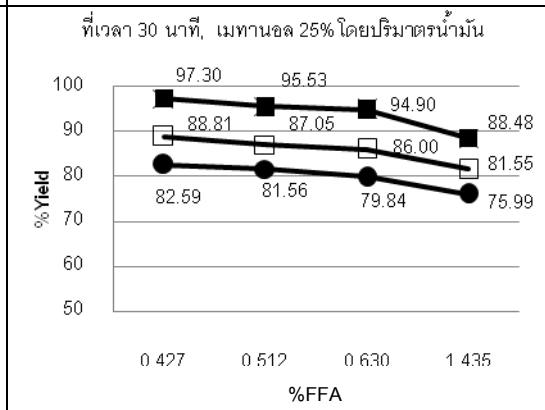
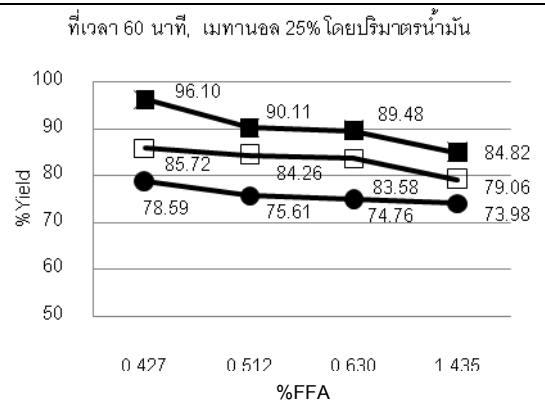
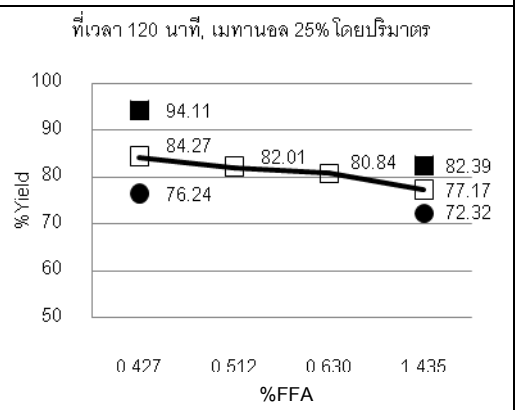
หมายเหตุ : สัญลักษณ์ ✕ แทน ไม่มีการแสดงผลการทดลอง เนื่องจากไม่มีการทำการทดลองที่สภาวะนั้นๆ

ตารางที่ 4-14 แสดงผลการศึกษาความแตกต่างระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA)ในน้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้นกับร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)ที่ได้จากการทดลอง (พิจารณาจากค่าเฉลี่ย) สำหรับทุกสภาวะการทดลอง (ต่อ)

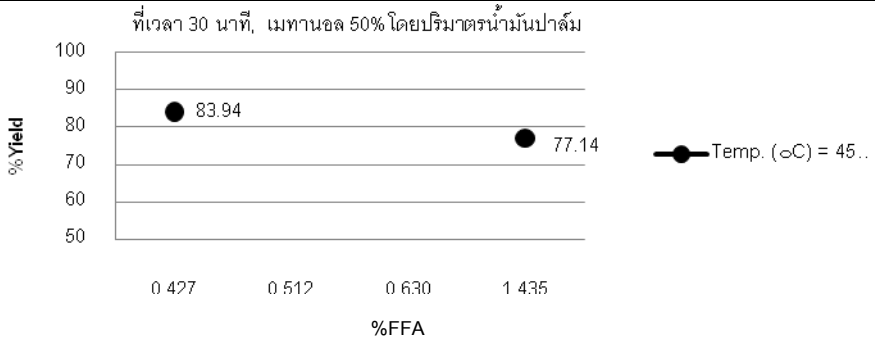
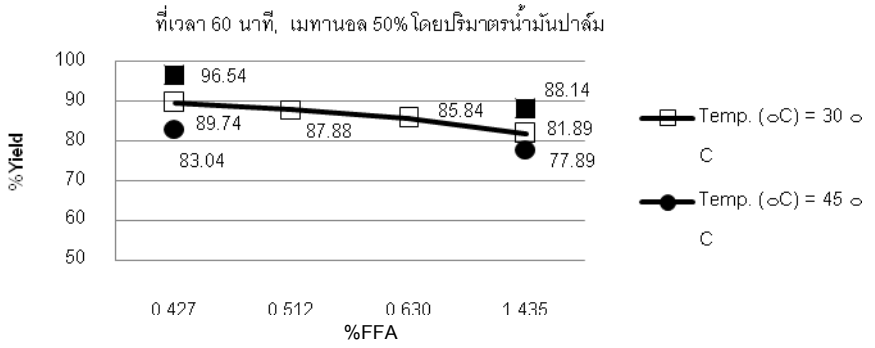
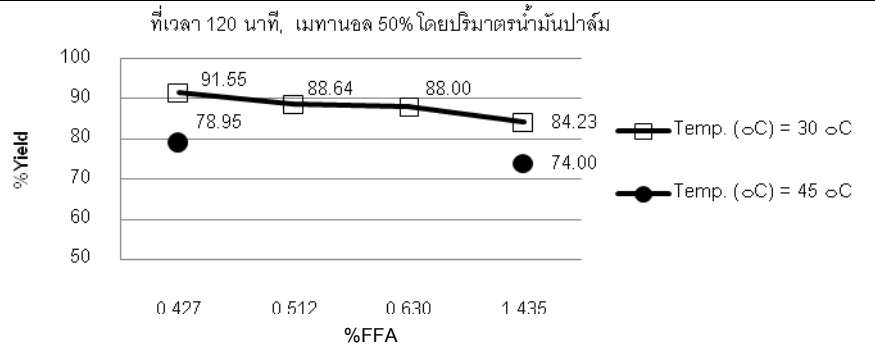
ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง	**สภาวะที่ใช้ในการทดลอง**	**ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)ที่ได้จากการทดลอง**										
		(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)	(22)
	Temperature(°C)	45					60					
	Time(นาที, Mins)	60		120			30		60			120
	Methanol (%v/v)	25	50	15	25	50	15	25	15	25	50	25
%FFA	0.427	78.59	83.04	71.10	76.24	78.95	94.73	97.30	89.79	96.10	96.54	94.11
	0.512	75.61	✕	✕	✕	✕	88.21	95.53	83.11	90.11	✕	✕
	0.630	74.76	✕	✕	✕	✕	87.12	94.90	81.67	89.48	✕	✕
	1.435	73.98	77.89	58.00	72.32	74.00	82.56	88.48	79.12	84.82	88.14	82.39

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ ✕ แทน ไม่มีการแสดงผลการทดลอง เนื่องจากไม่มีการทำการทดลองที่สภาวะนั้นๆ

ตารางที่ 4-15 แสดงกราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA)กับ%Yield ที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกันในแต่ละสภาวะ

<table>
<tr><th>เวลาที่ใช้ / เมทานอล</th><th colspan="3">ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA)กับร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)ที่ระดับอุณหภูมิต่างกันในแต่ละสภาวะ</th></tr>
<tr><th></th><th>30 นาที</th><th>60 นาที</th><th>120 นาที</th></tr>
<tr><td>15% โดยปริมาตรน้ำมัน</td><td> 
</td><td> 
</td><td><u>หมายเหตุ</u> สำหรับสภาวะที่เวลา 120 นาที, เมทานอล 15 %โดยปริมาตรน้ำมันไม่มีการทำการทดลองที่ทุกระดับอุณหภูมิ โดยมีการกำหนดให้
 
</td></tr>
<tr><td>25% โดยปริมาตรน้ำมัน</td><td> 
</td><td> 
</td><td> 
</td></tr>
</table>

ตารางที่ 4-16 แสดงกราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA)กับร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)สำหรับสภาวะการทดลอง โดยใช้ปริมาณเมทานอลในการทำปฏิกิริยา 50%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์มใช้แล้วและทั้ง3 ช่วงเวลา ที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกัน

เวลาที่ใช้ในการทดลอง	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA) กับร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกันในแต่ละสภาวะ
30 นาที	 <u>หมายเหตุ</u> ในสภาวะนี้มีการทดลองเฉพาะที่ระดับอุณหภูมิ 45°C ที่ 2 ระดับกรดไขมันอิสระ นั่นคือ 0.427 และ 1.435 %FFA เท่านั้น
60 นาที	
120 นาที	 <u>หมายเหตุ</u> ในสภาวะนี้มีการทดลองเฉพาะที่ระดับอุณหภูมิ 30 และ 45°C ซึ่งที่อุณหภูมิ 45°C ทดลองที่ 2 ระดับกรดไขมันอิสระ คือ 0.427 และ 1.435 %FFA

จากตารางที่ 4-14 และ 4-15 แสดงกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA) กับร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกันโดยมีการกำหนดระยะเวลาและปริมาณเมทานอลในการทำปฏิกิริยาเป็นค่าคงที่ในแต่ละกราฟหรือแต่ละสภาวะการทดลอง

เมื่อพิจารณา ณ เวลา (Time ; Mins) และปริมาณของเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (Methanol ; %โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม) คงที่ แต่ที่ระดับอุณหภูมิ (Temp. ; °C) แตกต่างกัน ได้แก่ 30, 45 และ 60 °C ซึ่งมีทั้งหมดหลากหลายสภาวะที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ดังนั้นจากการวิเคราะห์ผลจากตารางที่ 4-14 และ 4-15 พบว่า สามารถสรุปได้ดังนี้

1.) เมื่อพิจารณาแยกเป็นแต่ละระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน (30, 45 และ 60 °C)(ที่ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มตั้งต้น 0.427%FFA) พบว่า
   - เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น พบว่า เมื่อทำการทดลองที่ระดับอุณหภูมิ 60°C มีค่าเฉลี่ยของ %Yield สูงสุด รองลงมาเป็นที่ระดับอุณหภูมิ 30°C และ 45°C ตามลำดับ ในทุกๆ สภาวะการทดลอง
   - หากในน้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้นมีปริมาณกรดไขมันอิสระ หรือ %FFA เพิ่มสูงขึ้น ค่าเฉลี่ยของ %Yield ที่ได้จะมีแนวโน้มลดลงในทุกๆ สภาวะการทดลอง

2.) จากการทดลองในหลายสภาวะข้างต้น โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระอยู่ในช่วง (0.427 – 1.435 %FFA) เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการทดลองพบว่า จากการทดลองภายใต้สภาวะที่กำหนดในแต่ละช่วงระดับอุณหภูมิ มีค่าเฉลี่ยของ %Yield สามารถสรุปค่าเฉลี่ยของ %Yield สูงสุดในแต่ละระดับอุณหภูมิ ได้ดังตารางที่ 4-17

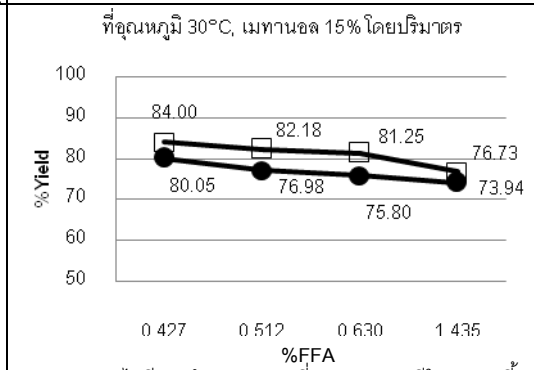
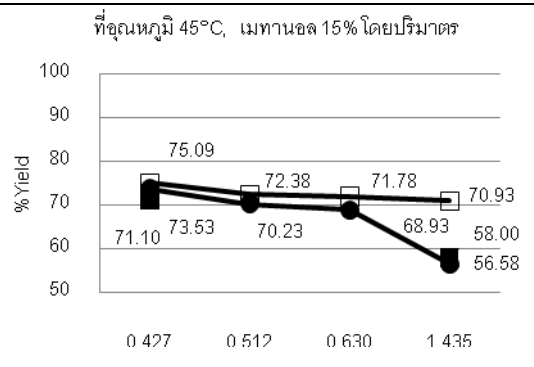
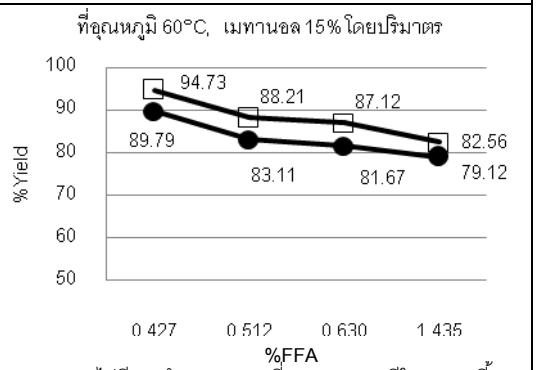
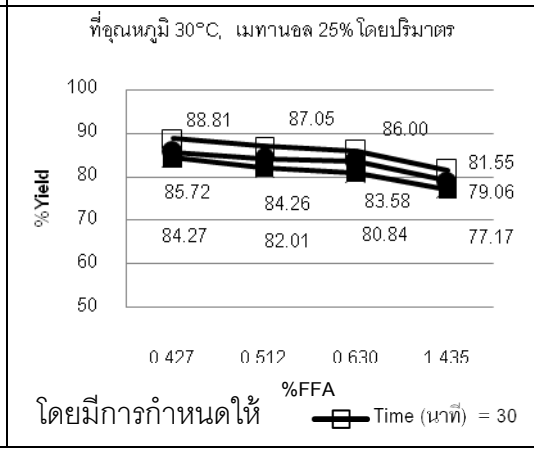
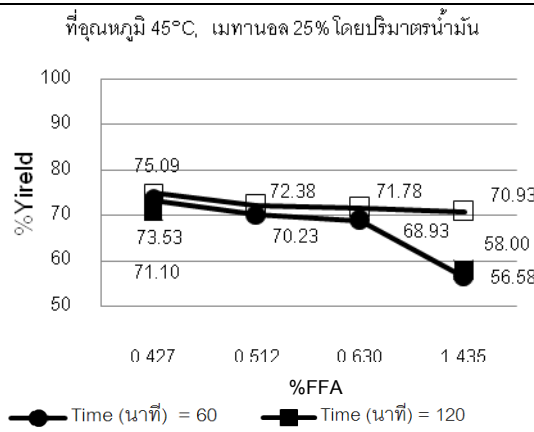
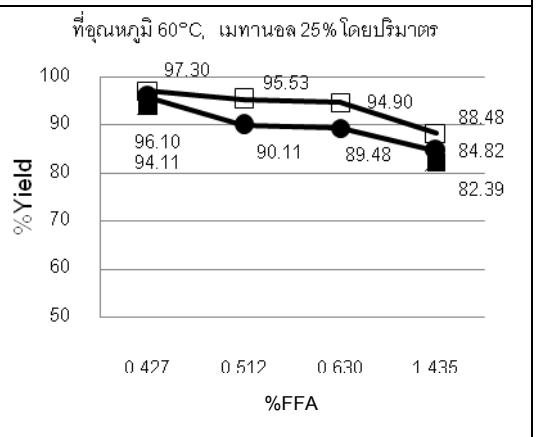
ตารางที่ 4-17 แสดงร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์สูงสุดที่ได้ ในแต่ละระดับอุณหภูมิ

ระดับอุณหภูมิ (°C)	%Yield สูงสุดที่ได้ (%)	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง		
		%FFA	เวลา (นาที)	ปริมาณเมทานอล (%โดยปริมาตรน้ำมันปาล์ม)
30	91.55	0.427	120	50
45	83.94	0.427	30	50
60	97.30	0.427	30	25

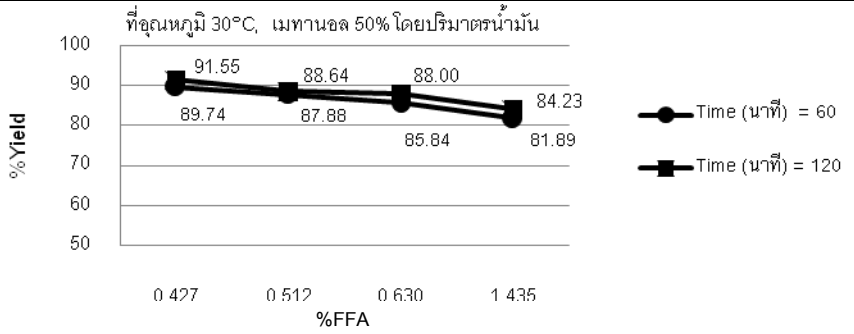
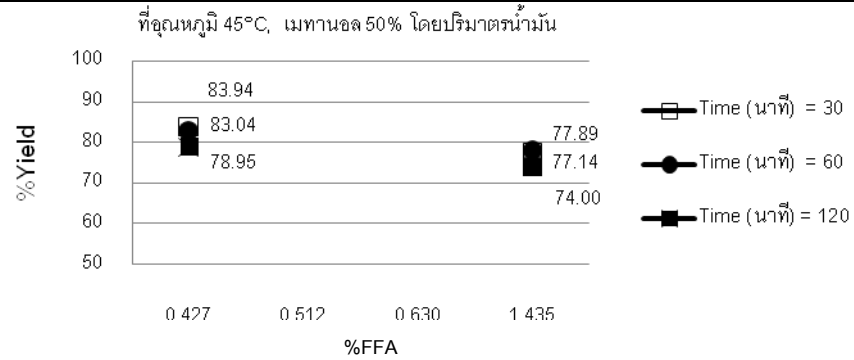
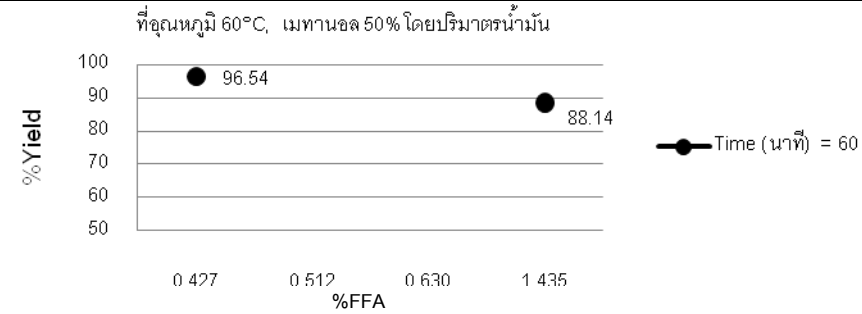
- **เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา**

จากการทำการทดลองเพื่อศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาหรือใช้ในการผลิตไบโอดีเซล สำหรับในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองทั้ง 3 ระดับ ได้แก่ 30, 60 และ 120นาที ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซล โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้กับร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ได้จากการทดลองและสามารถแสดงผลการทดลองด้วยกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (นาที) กับร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระแตกต่างกันสำหรับทุกสภาวะการทดลอง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-18 และ 4-19 ตามลำดับ

ตารางที่ 4-18 แสดงกราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA) กับ %Yield โดยเวลาที่ใช้ทำการทดลองต่างกันในแต่ละสภาวะ

อุณหภูมิที่ใช้ / เมทานอล	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA)กับร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์(%Yield)ที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกันในแต่ละสภาวะ		
	30 °C	45°C	60°C
15% โดยปริมาตรน้ำมัน	 หมายเหตุ ไม่มีการทำการทดลองที่เวลา 120 นาทีในสภาวะนี้		 หมายเหตุ ไม่มีการทำการทดลองที่เวลา 120 นาทีในสภาวะนี้
25% โดยปริมาตรน้ำมัน			

ตารางที่ 4-19 แสดงกราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA)กับร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) โดยใช้ปริมาณเมทานอลในการทำปฏิกิริยา 50%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์มใช้แล้วทั้ง 3 ระดับอุณหภูมิ แต่ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน

อุณหภูมิที่ใช้ทดลอง	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA) กับร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)โดยเวลาที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกันในแต่ละสภาวะ
30 °C	 หมายเหตุ ในสภาวะนี้มีการทดลองที่ระยะเวลา 60 และ 120 นาทีเท่านั้น ไม่ได้ทำการทดลองระยะเวลา 30 นาที
45°C	 หมายเหตุ ในสภาวะนี้มีการทดลองเฉพาะที่ 2 ระดับกรดไขมันอิสระ คือ 0.427 และ 1.435 %FFA ของทั้ง 3 ช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง
60°C	 หมายเหตุ ในสภาวะนี้มีการทดลองเฉพาะที่ระยะเวลา 60 นาทีและทดลองเฉพาะที่ 2 ระดับกรดไขมันอิสระ คือ 0.427 และ 1.435 %FFA

จากตารางที่ 4-18 และ 4-19 แสดงกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA) กับร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกัน โดยมีการกำหนดระดับอุณหภูมิและปริมาณเมทานอลในการทำปฏิกิริยาเป็นค่าคงที่ในแต่ละกราฟหรือแต่ละสภาวะการทดลอง

เมื่อพิจารณา ณ ระดับอุณหภูมิ (Temp. ; °C) และปริมาณของเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (Methanol ; %โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม)คงที่แต่ที่ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง (Time ; Mins.) แตกต่างกัน ได้แก่ 30, 60และ 120 นาทีซึ่งมีทั้งหมดหลากหลายสภาวะที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ดังนั้นจากการวิเคราะห์ผลจากตารางที่ 4-18และ 4-19พบว่า สามารถสรุปได้ดังนี้

1.) เมื่อพิจารณาระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน (30, 60และ 120 Mins.)จากผลการทดลอง สำหรับสภาวะที่ใช้ระดับอุณหภูมิเดียวกันและที่ระดับปริมาณของเมทานอลเดียวกันนั้น พบว่า

   - สำหรับการทดลองทุกระดับอุณหภูมิ (30, 45 และ 60°C)ที่ใช้ระยะเวลา 30 นาทีในการทำปฏิกิริยา มีค่าเฉลี่ยของ %Yield มากกว่าที่ใช้ระยะเวลา 60 และ 120 นาทีในการทำปฏิกิริยา ตามลำดับ ในทุกสภาวะการทดลอง

2.) เมื่อพิจารณาแยกเป็นในแต่ละระยะเวลาที่แตกต่างกัน (30, 60และ 120 นาที) สำหรับสภาวะใดๆ เมื่อระดับอุณหภูมิและปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลองคงที่ ในแต่ละช่วงเวลาที่ใช้ในการทดลองพบว่า ปริมาณกรดไขมันอิสระ หรือ %FFAในน้ำมันปาล์มใช้แล้วเพิ่มสูงขึ้น ค่าเฉลี่ยของ %Yield ที่ได้จะมีแนวโน้มลดลงในทุกๆ สภาวะการทดลอง

3.) จากการทดลองในหลายสภาวะข้างต้น โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระอยู่ในช่วง (0.427 – 1.435 %FFA) เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการทดลองพบว่า จากการทดลองภายใต้สภาวะที่กำหนดในแต่ละช่วงเวลาที่ใช้ในการทดลอง มีค่าเฉลี่ยของ %Yield(ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์จากการทดลอง)สามารถสรุปข้อมูลสำหรับค่าเฉลี่ยร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์สูงสุดในแต่ละช่วงเวลาที่ใช้ในการทดลอง ได้ดังตารางที่ 4-20

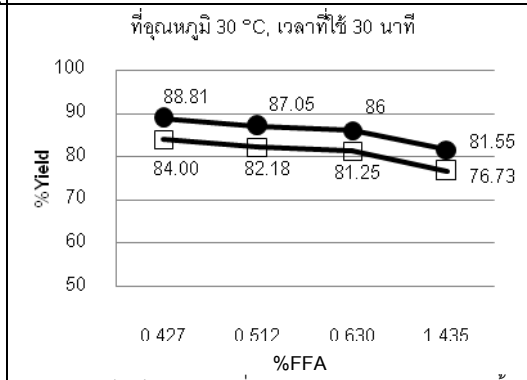
ตารางที่ 4-20 แสดงร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเตอร์สูงสุดที่ได้จากการทดลองในแต่ละช่วงระยะเวลา

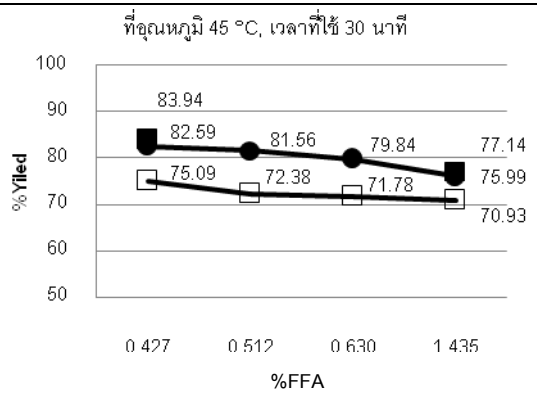
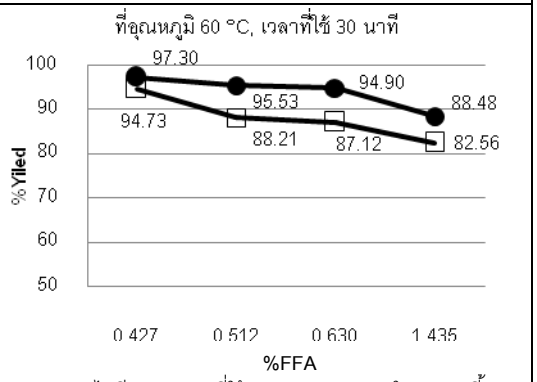
ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง (นาที)	%Yield สูงสุดที่ได้ (%)	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง		
		%FFA	ระดับอุณหภูมิ (°C)	ปริมาณเมทานอล (%โดยปริมาตรน้ำมันปาล์ม)
30	97.30	0.427	60	25
60	96.54	0.427	60	50
120	94.11	0.427	60	25

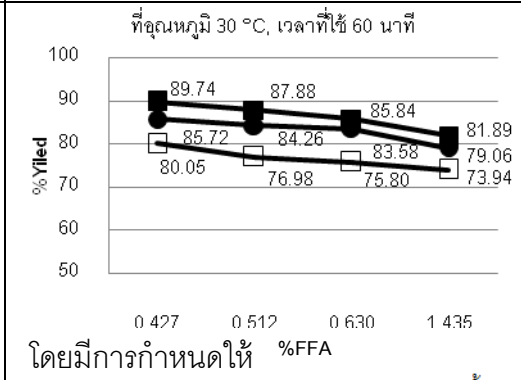
- **ปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา**

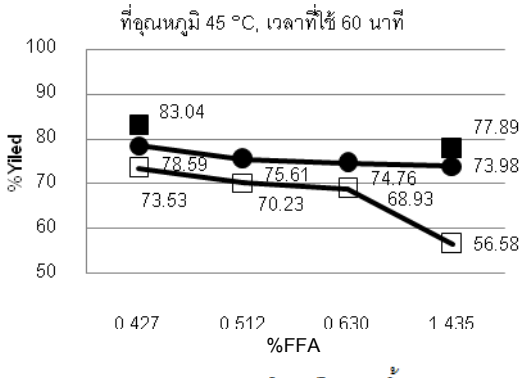
จากการทำการทดลองเพื่อศึกษาปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาหรือใช้ในการผลิตไบโอดีเซล สำหรับในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลองทั้ง 3 ระดับ ได้แก่ 15, 25และ 50%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซล โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเมทานอลที่ใช้กับร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ได้จากการทดลองและสามารถแสดงผลการทดลองด้วยกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (นาที) กับร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน สำหรับทุกสภาวะการทดลอง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-21และ 4-22 ตามลำดับ

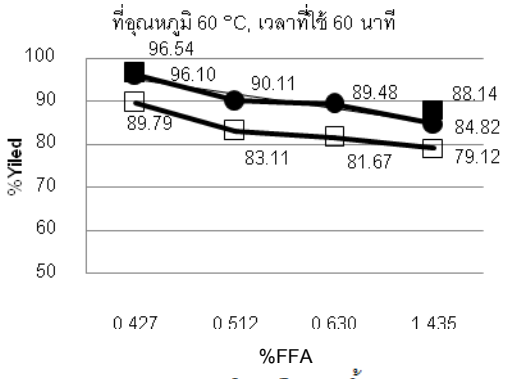
ตารางที่ 4-21 แสดงกราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA)กับ%Yield โดยปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกัน

<table>
<tr><th rowspan="2">อุณหภูมิที่ใช้
เวลาที่ใช้</th><th colspan="3">ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA)กับร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) โดยปริมาณเมทานอลที่ใช้แตกต่างกัน</th></tr>
<tr><th>30 °C</th><th>45°C</th><th>60°C</th></tr>
<tr><td>30 นาที</td><td> 

<u>หมายเหตุ</u> ไม่มีการทดลองที่ใช้เมทานอล 50%v/vในสภาวะนี้</td><td> 
</td><td> 

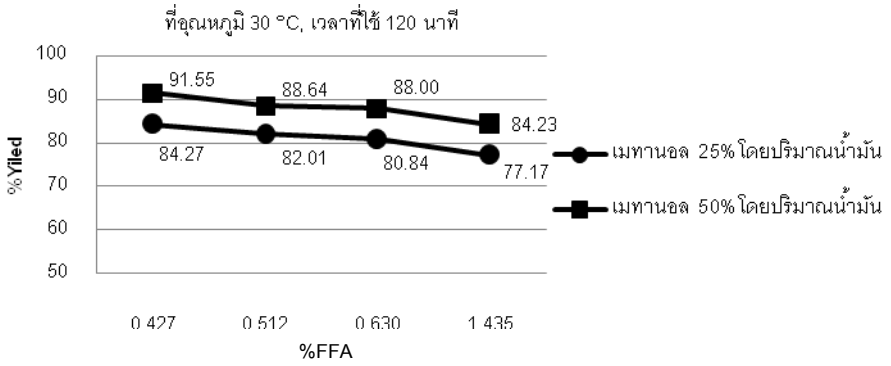
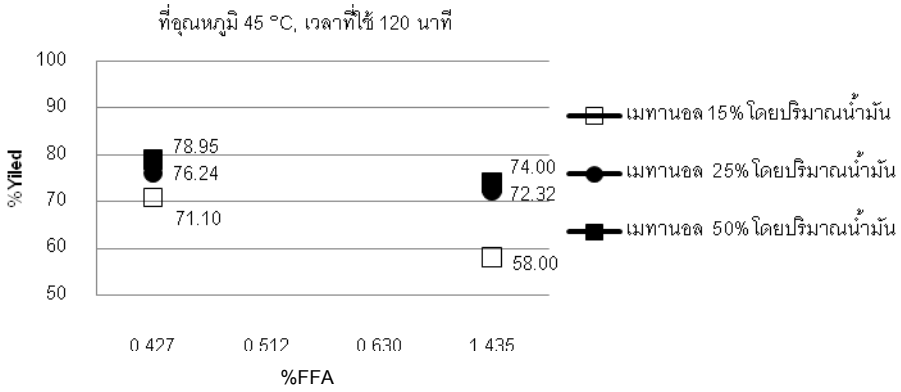
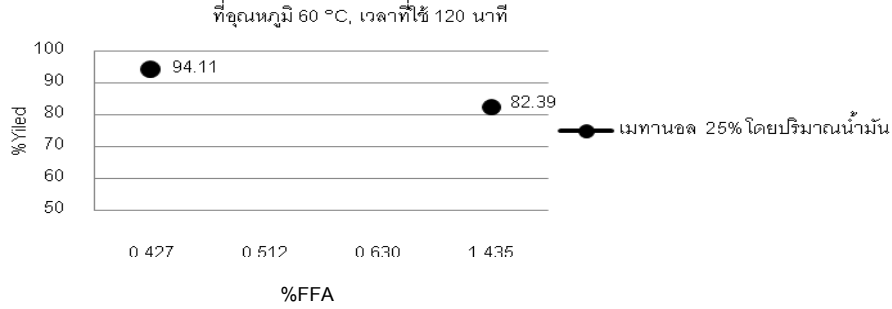
<u>หมายเหตุ</u> ไม่มีการทดลองที่ใช้เมทานอล 50%v/vในสภาวะนี้</td></tr>
<tr><td>60 นาที</td><td> 

โดยมีการกำหนดให้
เมทานอล 15%โดยปริมาณน้ำมัน</td><td> 

เมทานอล 25%โดยปริมาณน้ำมัน</td><td> 

เมทานอล 50%โดยปริมาณน้ำมัน</td></tr>
</table>

ตารางที่ 4-22 แสดงกราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA)กับ ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) โดยเวลาที่ในการทดลอง 120 นาที สำหรับทั้ง 3 ระดับอุณหภูมิ แต่ใช้ปริมาณเมทานอลในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่าง

อุณหภูมิที่ใช้ทดลอง	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA)กับร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ระดับปริมาณเมทานอลที่ใช้ต่างกันในแต่ละสภาวะ
30 °C	 หมายเหตุไม่มีการทดลองที่ใช้ระดับเมทานอล 15% โดยปริมาตรในสภาวะนี้
45°C	 หมายเหตุ ในสภาวะนี้มีการทดลองเฉพาะที่ 2 ระดับกรดไขมันอิสระ คือ 0.427 และ 1.435 %FFA ของทั้ง 3 ระดับของปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง
60°C	 หมายเหตุ ในสภาวะนี้มีการทดลองเฉพาะที่ระดับปริมาณเมทานอล 25%โดยปริมาตรน้ำมัน และที่ 2 ระดับกรดไขมันอิสระ คือ 0.427 และ 1.435 %FFA

จากตารางที่ 4-21 และ 4-22 แสดงกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA) กับร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ระดับปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกัน โดยกำหนดระดับอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้การทำการทดลองเป็นค่าคงที่ในแต่ละกราฟหรือแต่ละสภาวะการทดลอง

เมื่อพิจารณา ณ ระดับอุณหภูมิ (Temp. ; °C) และที่ระยะเวลา (Time ; Mins) คงที่แต่ปริมาณของเมทานอลที่ใช้ในการทำการทดลอง (Methanol ; %โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม) แตกต่างกัน ได้แก่ 15, 25 และ 50% โดยปริมาตรของน้ำมันซึ่งมีทั้งหมดหลายสภาวะที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ดังนั้นจากการวิเคราะห์ผลจากตารางที่ 4-21และ 4-22 พบว่า สามารถสรุปได้ดังนี้

1.) เมื่อพิจารณาระดับปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน (15, 25 และ 50 %ปริมาตรของน้ำมันปาล์ม)จากผลการทดลอง สำหรับสภาวะที่ใช้ระดับอุณหภูมิเดียวกันและที่ช่วงเวลาเดียวกันนั้น พบว่า
   - สำหรับทุกระดับอุณหภูมิ การทดลองที่ระดับเมทานอล 50 %โดยปริมาตรของน้ำมันมีค่าเฉลี่ยของ %Yieldมากกว่าที่ระดับเมทานอล 25 และ 15 %โดยปริมาตรของน้ำมันตามลำดับ โดยเรียงจากน้อยไปมากที่ทุกสภาวะการทดลอง
   - แต่หากต้องการพิจารณาโดยเน้นการประหยัดต้นทุนในการผลิตสำหรับทุกสภาวะการทดลองดังนั้นสามารถเลือกใช้ที่เมทานอล 25 แทนที่ระดับเมทานอล 50 %โดยปริมาตรของน้ำมัน เนื่องจากค่าเฉลี่ย %Yield ที่ได้จากการทดลอง ณ สภาวะการทดลองที่ใช้ปริมาณเมทานอล 25 และ 50 %โดยปริมาตรของน้ำมันมีค่าใกล้เคียงกัน

2.) เมื่อพิจารณาแยกเป็นในแต่ละระดับปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทำทดลองแตกต่างกัน (15, 25และ 50%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม) สำหรับสภาวะใดๆ เมื่อระดับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทดลองคงที่ ในแต่ละระดับปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง พบว่า ปริมาณกรดไขมันอิสระ หรือ %FFA ในน้ำมันปาล์มใช้แล้วเพิ่มสูงขึ้น ค่าเฉลี่ยของร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ได้จะมีแนวโน้มลดลงในทุกๆ สภาวะการทดลอง

3.) จากการทดลองในหลายสภาวะข้างต้น โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระอยู่ในช่วง (0.427 – 1.435 %FFA) เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการทดลองพบว่า จากการทดลองภายใต้สภาวะที่กำหนดในแต่ละระดับปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง มีค่าเฉลี่ยของ %Yield(ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์จากการทดลอง)และสามารถสรุปข้อมูลสำหรับค่าเฉลี่ยของปริมาณเมทิลเอสเตอร์สูงสุดในแต่ละระดับปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง ได้ดังตารางที่ 4-23

ตารางที่ 4-23 แสดงร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์สูงสุดที่ได้จากการทดลองในแต่ละระดับของปริมาณเมทานอลที่ใช้สำหรับการทดลอง

ปริมาณเมทานอล (%โดยปริมาตรน้ำมันปาล์ม)	%Yield สูงสุดที่ได้ (%)	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง		
		%FFA	ระดับอุณหภูมิ(°C)	เวลา (นาที)
15	94.73	0.427	60	30
25	97.30	0.427	60	30
50	96.54	0.427	60	60

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA)กับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)ที่ได้จากการทดลอง โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการผลิต ทั้ง 3 ปัจจัยดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น พบว่า สำหรับทุกปัจจัยทั้งระดับอุณหภูมิ, เวลาและปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลองเมื่อทำการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้นที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ค่าเฉลี่ยร้อยละผลผลิตของปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)มีแนวโน้มลดลง และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์สำหรับทุกปัจจัยจากกผลารทดลองทั้งหมดสามารถสรุปสภาวะการทดลองที่ให้ปริมาณเมทิลเอสเตอร์สูงสุด 3 อับดับแรก ดังได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-24

ตารางที่ 4-24 แสดงร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์สูงสุดที่ได้จากการทดลอง 3 อันดับแรก

Rating	%Yield สูงสุดที่ได้ (%)	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง			
		%FFA	ระดับอุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	ปริมาณเมทานอลที่ใช้ (%โดยปริมาตรของน้ำมัน)
1.	97.30	0.427	60	30	25
2.	96.54	0.427	60	60	50
3.	96.10	0.427	60	60	25

จากผลการทดลองที่ได้กล่าวมาข้างต้นสำหรับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)และร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) สามารถนำมาสรุปแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของไบโอดีเซลทั้ง 2 (%FAME และ %Yield) กับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองทั้ง 4 ปัจจัย ได้ดังตารางที่ 4-25

ตารางที่ 4-25 แสดงอิทธิพลแนวโน้มของปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของไบโอดีเซล

ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง		แนวโน้มการเปลี่ยนแปลง	
รายละเอียด	แนวโน้ม	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)	ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)
%FFA ในน้ำมันปาล์ม	↑	↓	↓
อุณหภูมิที่ใช้ทดลอง	↑	↑	↑ มีค่าต่ำสุด ที่อุณหภูมิ 45°C
เวลาที่ใช้ในการทดลอง	↑	↑ ที่อุณหภูมิ 30°C ↓ ที่อุณหภูมิ 45 - 60°C	↓
ปริมาณเมทานอลที่ใช้	↑	↑	↑

หมายเหตุ ↑ สัญลักษณ์ แทน ค่าเพิ่มขึ้น

↓ สัญลักษณ์ แทน ค่าลดลง

4.2 ค่าใช้จ่ายด้านวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในการทดลอง

4.2.1 ค่าใช้จ่ายโดยรวมด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง

ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง (บาท) ซึ่งเป็นการคิดค่าใช่จ่ายโดยรวมทั้งด้านวัตถุดิบที่ใช้ทางตรงละด้านพลังงานมี่ใช้ในการทดลอง ซึ่งขั้นตอนแรกต้องทำการคำนวณหาปริมาณของผลผลิตที่ใช้ในการทดลองโดยใช้ Mass Balanceโดยได้ถูกกล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 ในสมการที่ (3.3) ถึง (3.12) ซึ่งมีการกำหนดสัญลักษณ์ของตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณไว้ในตารางที่ 3-1สำหรับการคำนวณหาปริมาณของผลผลิตที่ใช้ในการทดลองที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนการผลิต (แสดงการคิดคำนวณอย่างละเอียดในภาคผนวก ฉ) เพื่อนำไปสู่การหาค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดทางด้านวัตถุดิบทางตรง ซึ่งสามารถแทนค่าในสมการที่ (3.14) โดยมีการพิจารณาวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการผลิตและกำหนดสัญลักษณ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องและราคาของวัตถุดิบที่ใช้ในการคำนวณซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 3-3ถึง 3-5ตามลำดับ (แสดงการคิดคำนวณอย่างละเอียดในภาคผนวก ช.)

4.2.2 ค่าใช้จ่ายโดยรวมด้านพลังงานทางตรงที่ใช้ในการทดลอง

สำหรับการหาค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลองที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนการผลิต ซึ่งสามารถแทนค่าได้ในสมการที่ (3.15)โดยมีการพิจารณาพลังงานที่เกิดขั้นในแต่ละขั้นตอน (STEP) ทั้ง 6 ขั้นตอนดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้นและกำหนดสัญลักษณ์ของตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องและอัตราค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณซึ่งได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3 -2 ถึง 3-5 ตามลำดับ (แสดงวิธีการคิดคำนวณอย่างละเอียดในภาคผนวก ซ.) จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ (3.14)และ (3.15) มาแทนค่าสำหรับใช้ในการคำนวณหาค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง (บาท) ในสมการที่ (3.13) ซึ่งได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3.

ในงานวิจัยนี้สามารถสรุปค่าใช้จ่ายโดยรวมด้านวัตถุดิบทางตรงและด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง ตลอดจนค่าใช้จ่ายโดยรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง โดยสามารถคิดเป็นเปอร์เซ็นต์หรือสัดส่วนของค่าใช้จ่ายในแต่ละประเภทในแต่ละการทดลอง ซึ่งแสดงข้อมูลไว้ดังตารางที่ 4-26

ตารางที่ 4-26 แสดงค่าใช้จ่ายโดยรวมที่ใช้ในการทดลองโดยคิดเป็นสัดส่วนในแต่ละด้าน

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าใช้จ่ายรวมที่ใช้ต่อ 1 Batch การทดลอง (300 ml.)				
				ด้านวัตถุดิบ ($Z_{Material}$)		ด้านพลังงาน (Z_{Energy})		รวมทั้งหมด (Z ; บาท)
				(บาท)	(%)	(บาท)	(%)	
0.427	30	30	15	22.409	99.37	0.138	0.61	22.55
			25	28.718	99.51	0.142	0.49	28.86
		60	15	21.466	99.38	0.136	0.63	21.60
			25	28.193	99.52	0.139	0.49	28.33
			50	42.499	99.67	0.142	0.33	42.64
		120	25	27.944	99.52	0.139	0.50	28.08
			50	42.813	99.66	0.143	0.33	42.96
	45	30	15	20.710	99.28	0.146	0.70	20.86
			25	27.552	99.47	0.151	0.55	27.70
			50	41.142	99.62	0.154	0.37	41.30
		60	15	20.391	99.27	0.147	0.71	20.54

ตารางที่ 4-26 แสดงค่าใช้จ่ายโดยรวมที่ใช้ในการทดลองโดยคิดเป็นสัดส่วนในแต่ละด้าน (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าใช้จ่ายรวมที่ใช้ต่อ 1 Batch การทดลอง (300 ml.)				
				ด้านวัตถุดิบ ($Z_{Material}$)		ด้านพลังงาน (Z_{Energy})		รวมทั้งหมด
				(บาท)	(%)	(บาท)	(%)	(Z ; บาท)
0.427	45	60	25	26.519	99.43	0.149	0.56	26.67
			50	40.917	99.63	0.154	0.37	41.07
		120	15	19.807	99.28	0.145	0.72	19.95
			25	26.377	99.42	0.148	0.56	26.53
			50	40.236	99.62	0.152	0.38	40.39
	60	30	15	24.064	99.27	0.172	0.71	24.24
			25	31.589	99.46	0.176	0.55	31.76
		60	15	23.778	99.28	0.169	0.71	23.95
			25	30.372	99.42	0.175	0.57	30.55
			50	43.781	99.59	0.177	0.40	43.96
		120	25	29.342	99.43	0.172	0.58	29.51
0.512	30	30	15	22.198	99.36	0.138	0.62	22.34
			25	28.287	99.50	0.141	0.49	28.43
		60	15	21.123	99.36	0.135	0.63	21.26
			25	27.942	99.51	0.139	0.49	28.08
			50	41.814	99.68	0.141	0.34	41.95
		120	25	27.279	99.49	0.137	0.50	27.42
			50	42.413	99.68	0.142	0.33	42.55
	45	30	15	19.866	99.28	0.146	0.73	20.01
			25	27.306	99.44	0.151	0.55	27.46
		60	15	19.555	99.26	0.144	0.73	19.70
			25	25.996	99.41	0.150	0.57	26.15

ตารางที่ 4-26 แสดงค่าใช้จ่ายโดยรวมที่ใช้ในการทดลองโดยคิดเป็นสัดส่วนในแต่ละด้าน (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าใช้จ่ายรวมที่ใช้ต่อ 1 Batch การทดลอง (300 ml.)				
				ด้านวัตถุดิบ ($Z_{Material}$)		ด้านพลังงาน (Z_{Energy})		รวมทั้งหมด
				(บาท)	(%)	(บาท)	(%)	(Z ; บาท)
0.512	60	30	15	23.204	99.29	0.168	0.72	23.37
			25	29.366	99.41	0.173	0.59	29.54
		60	15	22.100	99.24	0.165	0.74	22.27
			25	29.092	99.43	0.171	0.58	29.26
0.630	30	30	15	21.657	99.39	0.137	0.63	21.79
			25	28.022	99.51	0.140	0.50	28.16
		60	15	20.721	99.38	0.133	0.64	20.85
			25	27.651	99.50	0.139	0.50	27.79
			50	41.667	99.66	0.141	0.34	41.81
		120	25	27.132	99.49	0.137	0.50	27.27
			50	42.584	99.68	0.140	0.33	42.72
	45	30	15	19.972	99.26	0.145	0.72	20.12
			25	26.848	99.44	0.151	0.56	27.00
		60	15	19.480	99.29	0.144	0.73	19.62
			25	26.176	99.45	0.148	0.56	26.32
	60	30	15	22.975	92.75	1.790	7.23	24.77
			25	29.922	99.41	0.175	0.58	30.10
		60	15	21.717	99.26	0.165	0.75	21.88
			25	29.100	99.42	0.170	0.58	29.27
1.435	30	30	15	20.960	99.34	0.135	0.64	21.10
			25	27.046	99.51	0.138	0.51	27.18

ตารางที่ 4-26 แสดงค่าใช้จ่ายโดยรวมที่ใช้ในการทดลองโดยคิดเป็นสัดส่วนในแต่ละด้าน (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าใช้จ่ายรวมที่ใช้ต่อ 1 Batch การทดลอง (300 ml.)				
				ด้านวัตถุดิบ ($Z_{Material}$)		ด้านพลังงาน (Z_{Energy})		รวมทั้งหมด
				(บาท)	(%)	(บาท)	(%)	(Z ; บาท)
1.435	30	60	15	20.537	99.36	0.133	0.65	20.67
			25	26.562	99.48	0.136	0.51	26.70
			50	40.783	99.67	0.137	0.34	40.92
		120	25	26.304	99.49	0.136	0.51	26.44
			50	41.167	99.65	0.139	0.34	41.31
	45	30	15	19.936	99.28	0.145	0.72	20.08
			25	26.582	99.45	0.149	0.56	26.73
			50	40.091	99.63	0.151	0.37	40.24
		60	15	19.237	99.31	0.137	0.71	19.37
			25	25.855	99.44	0.147	0.57	26.00
			50	39.903	99.63	0.151	0.38	40.05
		120	15	19.499	99.28	0.138	0.70	19.64
			25	25.573	99.43	0.146	0.57	25.72
			50	39.366	99.64	0.149	0.38	39.51
	60	30	15	21.976	99.26	0.164	0.74	22.14
			25	28.844	99.43	0.170	0.59	29.01
		60	15	21.545	99.24	0.164	0.76	21.71
			25	27.869	99.39	0.167	0.59	28.04
			50	42.689	99.60	0.172	0.40	42.86
		120	25	27.272	99.39	0.166	0.60	27.44

จากตารางที่ 4-26 พบว่า สัดส่วนค่าใช้จ่ายในแต่ละด้านของแต่ละสภาวะการทดลองทั้ง 4 ระดับกรดไขมันอิสระในน้ำมันมีค่าใกล้เคียงกัน จึงสามารถสรุปค่าเฉลี่ยของสัดส่วนและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการทดลองสำหรับค่าใช้จ่ายโดยรวมในแต่ละด้าน ดังตารางที่ 4-27

ตารางที่ 4-27 ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการทดลอง สำหรับค่าใช้จ่ายโดยรวมในแต่ละด้าน

ค่าที่สนใจ	ค่าใช้จ่ายโดยรวมในแต่ละด้าน	
	ด้านวัตถุดิบ ($Z_{Material}$)	ด้านพลังงาน (Z_{Energy})
Average (%)	99.35	0.65
S.D. (%)	0.789	0.786

จากตารางที่ 4-27 พบว่า ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง คิดเป็น 99.35% สำหรับด้านวัตถุดิบทางตรงซึ่งจะเน้นหนักไปทางค่าใช้จ่ายในส่วนของปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งที่ระดับปริมาณเมทานอล 50%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์มใช้แล้ว มีปริมาณสูงสุดที่ใช้ในการทดลอง รองลงมา คือ 25 และ 15%โดยปริมาตรน้ำมันปาล์มใช้แล้ว ตามลำดับ ส่วน 0.65% คิดเป็นค่าใช้จ่ายในส่วนของพลังงาน ซึ่งถือว่ามีปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายในส่วนของวัตถุดิบทางตรง ดังนั้น สรุปได้ว่าค่าใช้จ่ายโดยรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง 1 Batch (300 ml.) ถือเป็นค่าใช้จ่ายโดยรวมทางด้านวัตถุดิบทางตรงเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ

ดังนั้น ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองผลิตไบโอดีเซลโดยมีปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัยมาเกี่ยวข้องในแต่ละสภาวะการทดลอง สามารถคำนวณผลจากสมการที่ (3.13)ไว้ดังตารางที่ 4-28

ตารางที่ 4-28 แสดงค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลต่อ 1Batch การทดลอง (300 ml.) และประสิทธิภาพของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองในแต่ละสภาวะ

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ประสิทธิภาพของไบโอดีเซล (ค่าเฉลี่ย)		ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการผลิต (บาท)
				(%FAME)	(%Yield)	
0.427	30	30	15	83.00	84.00	22.55
			25	88.99	88.81	28.86
		60	15	86.38	80.05	21.60
			25	91.14	85.72	28.33

ตารางที่ 4-28 แสดงค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลต่อ 1Batch การทดลอง (300 ml.) และประสิทธิภาพของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองในแต่ละสภาวะ (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ประสิทธิภาพของไบโอดีเซล (ค่าเฉลี่ย)		ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการผลิต (บาท)
				(%FAME)	(%Yield)	
0.427	30	120	25	89.85	84.27	28.08
			50	91.43	91.55	42.96
	45	30	15	91.35	75.09	20.86
			25	91.84	82.59	27.70
			50	92.34	83.94	41.30
		60	15	85.72	73.53	20.54
			25	89.29	78.59	26.67
			50	91.23	83.04	41.07
		120	15	83.11	71.10	19.95
			25	87.80	76.24	26.53
			50	89.85	78.95	40.39
	60	30	15	94.90	94.73	24.24
			25	96.81	97.30	31.76
		60	15	93.47	89.79	23.95
			25	96.36	96.10	30.55
			50	96.75	96.54	43.96
		120	25	94.96	94.11	29.51
0.512	30	30	15	76.93	82.18	22.34
			25	83.65	87.05	28.43
		60	15	80.89	76.98	21.26
			25	86.85	84.26	28.08
			50	89.75	87.88	41.95
		120	25	85.36	82.01	27.42

ตารางที่ 4-28 แสดงค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลต่อ 1Batch การทดลอง (300 ml.) และประสิทธิภาพของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองในแต่ละสภาวะ (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ประสิทธิภาพของไบโอดีเซล (ค่าเฉลี่ย)		ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการผลิต (บาท)
				(%FAME)	(%Yield)	
0.512	30	120	50	87.46	88.64	42.55
	45	30	15	83.01	72.38	20.01
			25	86.24	81.56	27.46
		60	15	81.60	70.23	19.70
			25	84.52	75.61	26.15
	60	30	15	86.49	88.21	23.37
			25	92.70	95.53	29.54
		60	15	84.00	83.11	22.27
			25	89.10	90.11	29.26
0.613	30	30	15	74.32	81.25	21.79
			25	81.72	86.00	28.16
		60	15	77.69	75.80	20.85
			25	82.72	83.58	27.79
			50	86.78	85.84	41.81
		120	25	81.86	80.84	27.27
			50	85.80	88.00	42.72
	45	30	15	83.01	71.78	20.12
			25	85.37	79.84	27.00
		60	15	79.88	68.93	19.62
			25	80.60	74.76	26.32
	60	30	15	85.54	87.12	24.77
			25	93.45	94.90	30.10
		60	15	82.87	81.67	21.88

ตารางที่ 4-28 แสดงค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลต่อ 1Batch การทดลอง (300 ml.) และประสิทธิภาพของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองในแต่ละสภาวะ (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ประสิทธิภาพของไบโอดีเซล (ค่าเฉลี่ย)		ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการผลิต (บาท)
				(%FAME)	(%Yield)	
0.630	60	60	25	90.70	89.48	29.27
1.435	30	30	15	64.99	76.73	21.10
			25	76.47	81.55	27.18
		60	15	69.34	73.94	20.67
			25	79.04	79.06	26.70
		120	50	81.02	81.89	40.92
			25	77.39	77.17	26.44
			50	79.25	84.23	41.31
	45	30	15	77.10	70.93	20.08
			25	79.82	75.99	26.73
			50	81.96	77.14	40.24
		60	15	71.85	56.58	19.37
			25	76.91	73.98	26.00
			50	81.00	77.89	40.05
		120	15	68.94	58.00	19.64
			25	72.98	72.32	25.72
			50	75.15	74.00	39.51
	60	30	15	84.18	82.56	22.14
			25	91.17	88.48	29.01
		60	15	82.38	79.12	21.71
			25	87.42	84.82	28.04
			50	89.65	88.14	42.86
		120	25	83.93	82.39	27.44

จากตารางที่ 4-28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด (บาท) ที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลต่อ 1 Batch การทดลอง (300 ml.) และประสิทธิภาพของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองในแต่ละสภาวะ สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำเสนอโมเดลการคำนวณหาค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด (บาท) ที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลต่อ 1Batchซึ่งประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายรวมทางด้านวัตถุดิบทางตรงและค่าใช้จ่ายรวมทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง ในรูปแบบสมการโดยใช้หลักการทางสถิติเบื้องต้นเกี่ยวกับ Hypothesis Testing เพื่อหาค่าที่เหมาะสมมาใช้ในการคิดคำนวณ ซึ่งการสร้างโมเดลสมการทั้ง 3 ข้างต้นนี้ โดยการคิดคำนวณจากผลการทดลองที่ได้ในแต่ละสภาวะดังแสดงไว้ในภาคผนวก ช. และ ซ. สำหรับที่มาของค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง

หลักการสร้างโมเดลทั้ง 3 นี้ได้เลือกใช้ Hypothesis Testing ทางหลักสถิติเบื้องต้นเพื่อหาค่าเฉลี่ยที่เหมาะสมเข้าในใช้ในสมการ ดังนั้น จากวิธีการดังกล่าวสามารถสรุปได้เป็นโมเดลในรูปแบบของสมการทั้ง 3 สมการ ดังนี้ สมการหาค่าใช้จ่ายโดยรวมทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการผลิต สมการหาค่าใช้จ่ายโดยรวมทางด้านพลังงานที่ใช้ในการผลิต และสมการหาค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการผลิต ต่อ 1Batch การทดลอง ซึ่งได้ถูกแสดงไว้ดังสมการที่ (4.1), (4.2) และ (4.3)โดยอ้างอิงหลักการการคิดคำนวณจากสมการข้างต้นซึ่งได้ถูกกล่าวไว้ในบทที่ 3. นั่นคือ สมการที่ (3.14), (3.15) และ (3.13) ตามลำดับ (แสดงวิธีการคิดคำนวณในภาคผนวก ฌ.)

โมเดลการหาค่าใช้จ่ายด้านวัตถุดิบทางตรง (ต่อ 1Batch การทดลอง)

$Z_{Material}$ or Z_1 = $(Z_{Oil} + Z_{KOH} + Z_{MeOH} + Z_{Water})$ มาจากสมการที่ (3.14)

$= \{ (P_{Oil} \times m_{Oil}) + (P_{KOH} \times m_{KOH}) + (P_{MeOH} \times V_{MeOH}) + (P_{Water} \times V_{Water}) \}$

$= (16.50 \times 0.270) + (300 \times 0.00270) + (180 \times V_{MeOH}) + (2 \times 4.321)$

$= 4.455 + 0.81 + 180V_{MeOH} + 8.642$

$= 13.907 + 180V_{MeOH}$

ดังนั้น $Z_{Material}$ (บาท) $= 13.907 + 180V_{MeOH}$ (4.1)

โดยที่

$Z_{Material}$ หรือ Z_1 แทน ค่าใช้จ่ายรวมด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลองต่อ Batch (บาท)

Z_{Oil} แทน ค่าใช้จ่ายของปริมาณน้ำมันปาล์มใช้แล้วเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลอง(บาท)

Z_{KOH} แทน ค่าใช้จ่ายของปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา(บาท)

Z_{MeOH} แทน ค่าใช้จ่ายของปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา(บาท)

Z_{water} แทน ค่าใช้จ่ายของน้ำกลั่นที่ใช้ในกระบวนการล้างเมทิลเอสเตอร์ (บาท)

m_{Oil} แทน มวลของน้ำมันปาล์มใช้แล้วเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลอง(กิโลกรัม)

m_{KOH} แทน มวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา(กิโลกรัม)

V_{MeOH} แทน ปริมาตรของเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา(ลิตร)

V_{water} แทน ปริมาตรของน้ำกลั่นที่ใช้ในกระบวนการล้างน้ำเมทิลเอสเตอร์ในการทดลอง(ลิตร)

P_{Oil} แทน ราคาน้ำมันปาล์มใช้แล้ว ซึ่งมีค่าเท่ากับ 16.50 บาทต่อกิโลกรัม

P_{KOH} แทน ราคาของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 300 บาทต่อกิโลกรัม

P_{MeOH} แทน ราคาเมทานอล (ตัวทำปฏิกิริยาในการทดลอง) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 180 บาทต่อลิตร

P_{Water} แทน ราคาน้ำกลั่น (สำหรับกระบวนการล้างน้ำ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2 บาทต่อลิตร

โมเดลการหาค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ 1Batch การทดลอง)

Z_{Energy} or Z_2 = $(Z_{E1} + Z_{E2} + Z_{E3} + Z_{E4} + Z_{E5} + Z_{E6})$มาจากสมการที่ (3.15)

หมายเหตุ : เมื่อ Z_{E1}และ Z_{E5}มีค่าเท่ากับ 0 เนื่องจากไม่มีการใช้พลังงานความร้อนเกิดขึ้น

$$Z_{Energy} \text{ or } Z_2 = Z_{E2} + Z_{E3} + Z_{E4} + Z_{E6}$$

$$= \{ P_E \times (W_2 + W_3 + W_4 + W_6) \}$$

$$= P_E \times [\{ P_2 \times t_2(h.)\} + \{ P_3 \times t_3(h.) \} + \{ P_4 \times t_4(h.) \} + \{ P_6 \times t_6(h.) \}]$$

$$= 3.0493 \times [\{ 102.2 \text{ (kJ) } /3,600\} + \{ Q_3 \text{ (kJ.) } / 3,600\} + \{ Q_4 \text{ (kJ.) } /3,600 \} + \{ 54.20 \text{ (kJ) } / 3,600 \}]$$

$$= 3.0493 \times \{ 0.0434 \text{ (kWh)} + [(Q_3 \text{ (kJ.) } + Q_4 \text{ (kJ.)}) / 3,600] \}$$

$$= 0.1325 + 3.0493 [(Q_3 + Q_4)/3,600]$$

ดังนั้น Z_{Energy} (บาท) $= 0.1325 + 3.0493 [(Q_3 + Q_4)/3,600]$ (4.2)

โดยที่

Z_{Energy} หรือ Z_2 แทน ค่าใช้จ่ายรวมด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลองต่อ Batch(บาท)

Z_{E2} แทน ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลองที่เกิดใน STEP ที่ 2 (บาท)

Z_{E3} แทน ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลองที่เกิดใน STEP ที่ 3 (บาท)

Z_{E4} แทน ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลองที่เกิดใน STEP ที่ 4 (บาท)

Z_{E6} แทน ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลองที่เกิดใน STEP ที่ 6 (บาท)

P_E แทน อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า(ต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง)มีค่าเท่ากับ 3.0493 บาทต่อหน่วย

W_2 แทน พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองที่เกิดใน STEP ที่ 2(กิโลวัตต์-ชั่วโมง)

W_3 แทน พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองที่เกิดใน STEP ที่ 3 (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)

W_4 แทน พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองที่เกิดใน STEP ที่ 4 (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)

W_6 แทน พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองที่เกิดใน STEP ที่ 6 (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)

P_2 แทน กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองที่เกิดใน STEP ที่ 2 (กิโลวัตต์)

P_3 แทน กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองที่เกิดใน STEP ที่ 3 (กิโลวัตต์)

P_4 แทน กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองที่เกิดใน STEP ที่ 4 (กิโลวัตต์)

P_6 แทน กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองที่เกิดใน STEP ที่ 6 (กิโลวัตต์)

Q_2 แทน พลังงานความร้อนที่ใช้ในการทดลองที่เกิดใน STEP ที่ 2(กิโลจูล)

Q_3 แทน พลังงานความร้อนที่ใช้ในการทดลองที่เกิดใน STEP ที่ 3(กิโลจูล)

Q_4 แทน พลังงานความร้อนที่ใช้ในการทดลองที่เกิดใน STEP ที่ 4(กิโลจูล)

Q_6 แทน พลังงานความร้อนที่ใช้ในการทดลองที่เกิดใน STEP ที่ 6(กิโลจูล)

t_2 แทน เวลาที่ใช้ในการทำการทดลองที่เกิดใน STEP ที่ 2 (วินาทีและ ชั่วโมง)

t_3 แทน เวลาที่ใช้ในการทำการทดลองที่เกิดใน STEP ที่ 3 (วินาทีและ ชั่วโมง)

t_4 แทน เวลาที่ใช้ในการทำการทดลองที่เกิดใน STEP ที่ 4 (วินาทีและ ชั่วโมง)

t_6 แทน เวลาที่ใช้ในการทำการทดลองที่เกิดใน STEP ที่ 6 (วินาทีและ ชั่วโมง)

โมเดลการหาค่าใช้จ่ายรวมที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ 1Batch การทดลอง)

$Z = Z_1 + Z_2$ มาจากสมการที่ (3.13)

$= Z_{Material} + Z_{Energy}$

$$Z = \{13.907 + 180V_{MeOH}\} + [\ 0.1325 + 3.0493 \left\{ \frac{1.861x(m_{initial} + 0.5025) \times (T_{Final} - 25)}{3,600} \right\}$$

$$\text{ดังนั้น } Z \text{ (บาท)} = 14.04 + 180V_{MeOH}\} + [\ 3.05 \left\{ \frac{1.861x\ (m_{initial} + 0.5\ ) \times (T_{Final} - 25)}{3,600} \right\} \quad (4.3)$$

โดยที่

Z แทน ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองต่อ Batch(บาท)

$Z_{Material}$ หรือ Z_1 แทน ค่าใช้จ่ายรวมด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลองต่อ Batch (บาท)

Z_{Energy} หรือ Z_2 แทน ค่าใช้จ่ายรวมด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลองต่อ Batch(บาท)

V_{MeOH} แทน ปริมาตรของเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ลิตร)

$m_{initial}$ แทน มวลของสารตั้งต้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (กิโลกรัม)

T_{Final} แทน อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส ; °C)

จากการใช้ Hypothesis Testing ตามหลักสถิติเบื้องต้นเกี่ยวกับการหาสมการค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลต่อ 1Batch การทดลอง (ดังภาคผนวก ฌ.) เพื่อทำการทดลองการกระจายของข้อมูลต่างๆ เพราะนำมาใช้สร้างเป็นสมการการคิดคำนวณต่อไป ซึ่งจากการทดลองการกระจายของข้อมูลดังกล่าว สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4-29

ตารางที่ 4-29 แสดงการสรุปผลการกระจายของข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการคำนวณหาค่าใช้จ่ายรวม

ชุดข้อมูลที่สนใจศึกษา (Hypothesis Testing)	ที่ระดับ	ค่าเฉลี่ย (หน่วย)	ผลการการกระจายของข้อมูล
ค่าเฉลี่ยของพลังงานความร้อนที่ STEP 3 ณ ระดับอุณหภูมิ (°C)	60	17.57 (kJ.)	เป็นการกระจายแบบปกติ
	45	10.04 (kJ.)	
	30	2.51 (kJ.)	
ค่าเฉลี่ยมวลของสารตั้งต้นที่ทำปฏิกิริยา ($m_{initial}$) ที่ระดับเมทานอล (%โดยปริมาตรของน้ำมัน)	15	0.308 (Kg.)	
	25	0.331 (Kg.)	
	50	0.389 (Kg.)	

จากสมการทั้ง 3 ที่กล่าวมาข้างต้น ได้แก่ สมการที่ (4.1), (4.2) และ (4.3) สามารถนำไปใช้ประโยชน์สำหรับการคำนวณค่าใช้จ่ายรวมที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ 1Batch การทดลอง) เพื่อเป็นการคาดการณ์ต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายทั้งทางด้านวัตถุดิบทางตรงและด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลองสำหรับการผลิตไบโอดีเซลในแต่ละต่างๆ ตามที่กำหนดก่อนที่จะดำเนินการลงทุนจริง ซึ่งเป็นประโยชน์และผู้จัดการโรงงานหรือผู้ที่มีความสนใจเกี่ยวกับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วในการเลือกหรือพิจารณาตัดสินใจในการลงทุนต่อไปในอนาคต

4.3 ผลที่ได้จากการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล

4.3.1 ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้

สำหรับในงานวิจัยนี้ ได้เสนอแนวทางในการวิเคราะห์ต้นทุนเชิงเศรษฐศาสตร์ เพื่อใช้เป็นตัวแปรในการตัดสินใจเลือกสภาวะที่เหมาะสมให้สอดคล้องกับเกณฑ์การพิจารณาที่กำหนดต่อไป โดยมีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)ที่ได้จากการผลิตกับค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง (บาท) ต่อ 1 Batch การทดลอง ดังนั้นการคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ผลิตได้ต่อค่าใช้จ่ายรวมที่ใช้ในการทดลอง (%FAME ต่อบาท) เพื่อศึกษาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อบาทในแต่ละสภาวะที่ใช้ในการทดลอง โดยสามารถคำนวณจากสมการที่ (3.16) ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3. ดังนั้นจากผลทดลองข้างต้นสามารถหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ผลิตได้ต่อบาท (%FAME ต่อบาท) สำหรับทุกสภาวะการทดลอง แสดงไว้ในตารางที่ 4-30

ตารางที่ 4-30 แสดงปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (ค่า%FAME ต่อบาท) ที่ได้จากการทดลอง

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้(บาท)	%FAME ต่อบาท
0.427	30	30	15	83.00	22.55	3.681
			25	88.99	28.86	3.083
		60	15	86.38	21.60	3.999
			25	91.14	28.33	3.217
			50	92.22	42.64	2.163
		120	25	89.85	28.08	3.199

ตารางที่ 4-30 แสดงปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (%FAME ต่อบาท) ที่ได้จากการทดลอง (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้(บาท)	%FAME ต่อบาท
0.427	30	120	50	91.43	42.96	2.128
	45	30	15	91.35	20.86	4.380
			25	91.84	27.70	3.315
			50	92.34	41.30	2.236
		60	15	85.72	20.54	4.174
			25	89.29	26.67	3.348
			50	91.23	41.07	2.221
	60	30	15	94.90	24.24	3.916
			25	96.81	31.76	3.048
		60	15	93.47	23.95	3.903
			25	96.36	30.55	3.154
			50	96.75	43.96	2.201
		120	25	94.96	29.51	3.217
0.512	30	30	15	76.93	22.34	3.444
			25	83.65	28.43	2.943
		60	15	80.89	21.26	3.805
			25	86.85	28.08	3.093
			50	89.75	41.95	2.139
		120	25	85.36	27.42	3.113
			50	87.46	42.55	2.055
	45	30	15	83.01	20.01	4.148
			25	86.24	27.46	3.141
		60	15	81.60	19.70	4.142

ตารางที่ 4-30 แสดงปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (ค่า%FAMEต่อบาท) ที่ได้จากการทดลอง (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ (บาท)	%FAME ต่อบาท
0.512	45	60	25	84.52	26.15	3.233
	60	30	15	86.49	23.37	3.700
			25	92.70	29.54	3.138
		60	15	84.00	22.27	3.773
			25	89.10	29.26	3.045
0.630	30	30	15	74.32	21.79	3.410
			25	81.72	28.16	2.902
		60	15	77.69	20.85	3.726
			25	82.72	27.79	2.976
			50	86.78	41.81	2.076
		120	25	81.86	27.27	3.002
			50	85.80	42.72	2.008
	45	30	15	83.01	20.12	4.126
			25	85.37	27.00	3.162
		60	15	79.88	19.62	4.071
			25	80.60	26.32	3.062
	60	30	15	85.54	24.77	3.454
			25	93.45	30.10	3.105
		60	15	82.87	21.88	3.787
			25	90.70	29.27	3.099
1.435	30	30	15	64.99	21.10	3.081
			25	76.47	27.18	2.813
		60	15	69.34	20.67	3.355
			25	79.04	26.70	2.960

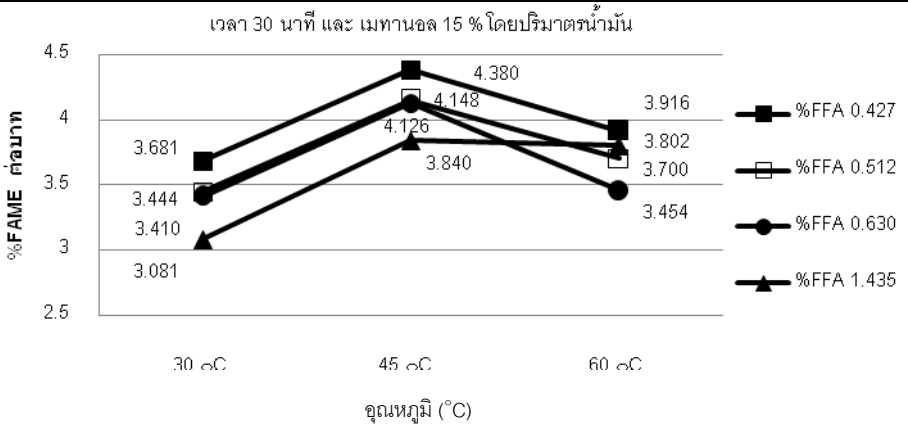
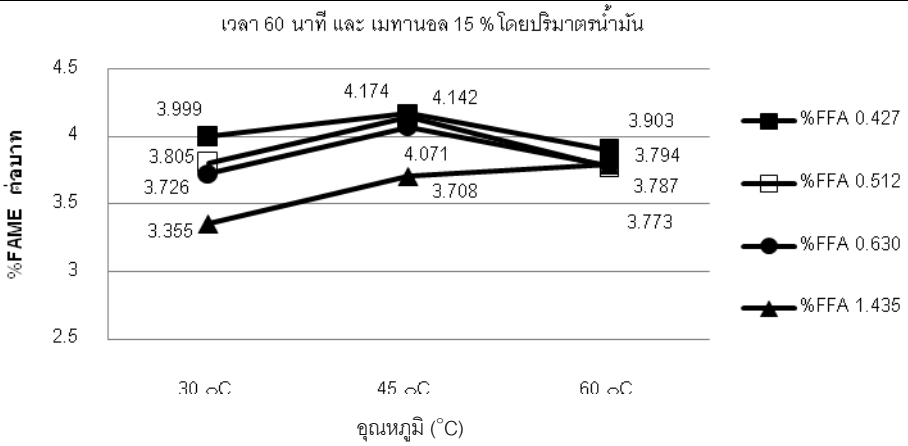
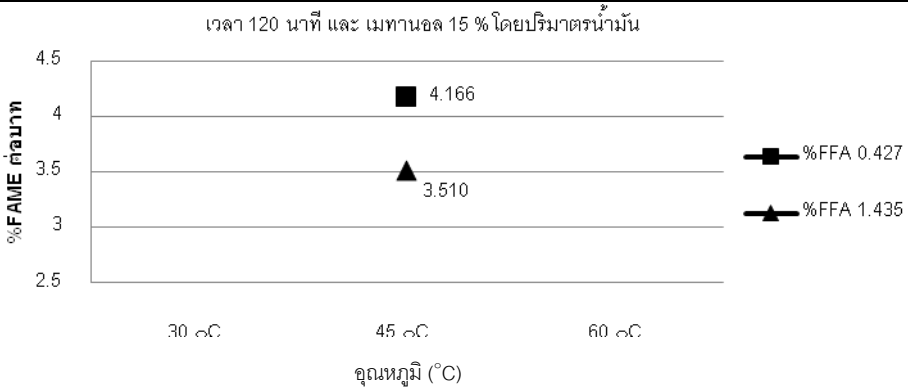
ตารางที่ 4-30 แสดงปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (ค่า%FAMEต่อบาท) ที่ได้จากการทดลอง (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ (บาท)	%FAME ต่อบาท
1.435	30	60	50	81.02	40.92	1.980
		120	25	77.39	26.44	2.927
			50	79.25	41.31	1.919
	45	30	15	77.10	20.08	3.840
			25	79.82	26.73	2.986
			50	81.96	40.24	2.037
		60	15	71.85	19.37	3.708
			25	76.91	26.00	2.958
			50	81.00	40.05	2.022
		120	15	68.94	19.64	3.511
			25	72.98	25.72	2.838
			50	75.15	39.51	1.902
	60	30	15	84.18	22.14	3.802
			25	91.17	29.01	3.142
		60	15	82.38	21.71	3.794
			25	87.42	28.04	3.118
			50	89.65	42.86	2.092
		120	25	83.93	27.44	3.059

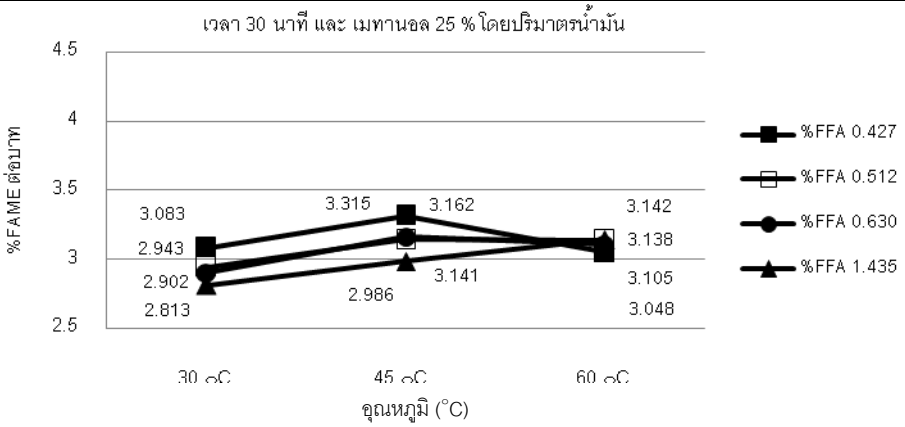
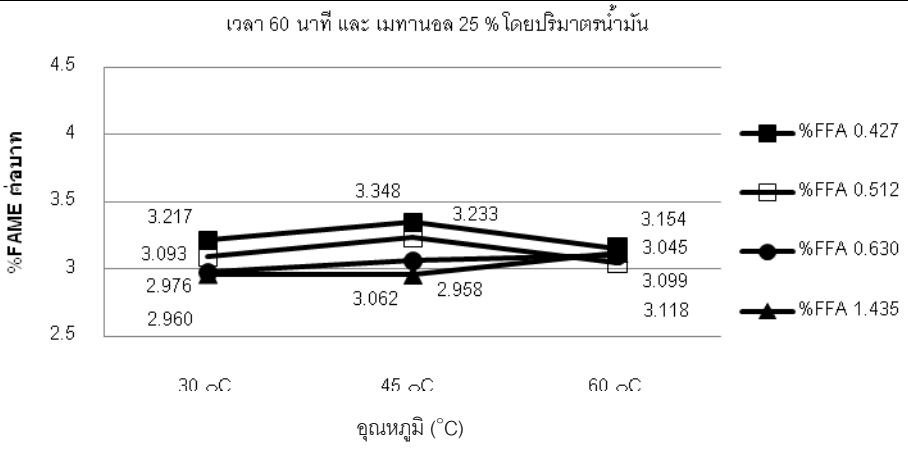
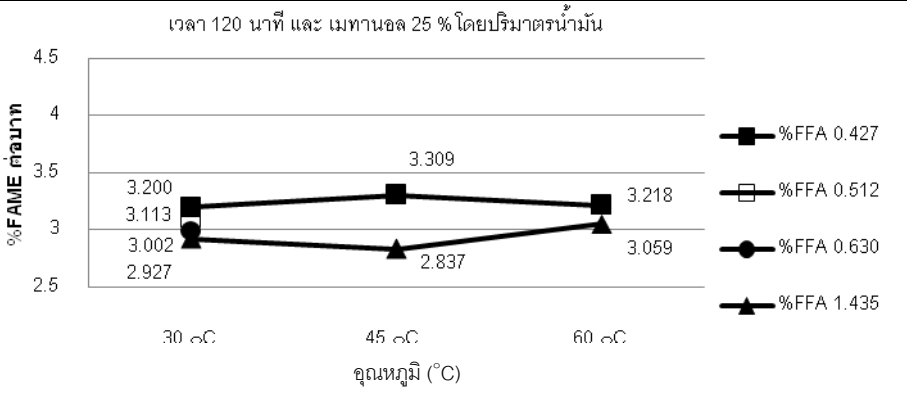
- **อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง**

จากค่าเฉลี่ยของ %FAME ต่อบาทที่ได้จากตารางที่ 4-30 สามารถนำมาวิเคราะห์ผลโดยการใช้กราฟเส้นเพื่อศึกษาแนวโน้มและเปรียบเทียบความแตกต่างของ %FAME ต่อบาทที่ได้จากการทดลอง ดังนั้นสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA)กับ%FAME ต่อบาท โดยศึกษาปัจจัยทางด้านอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองในรูปของกราฟเส้นดังตารางที่ 4-31

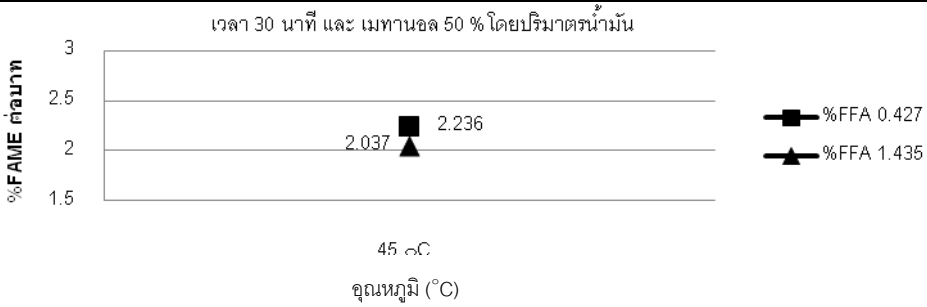
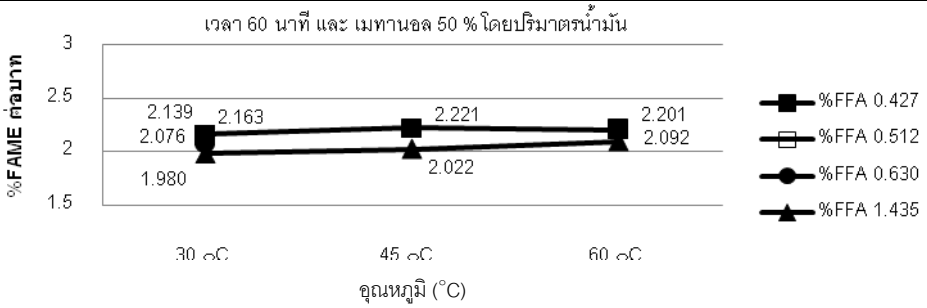
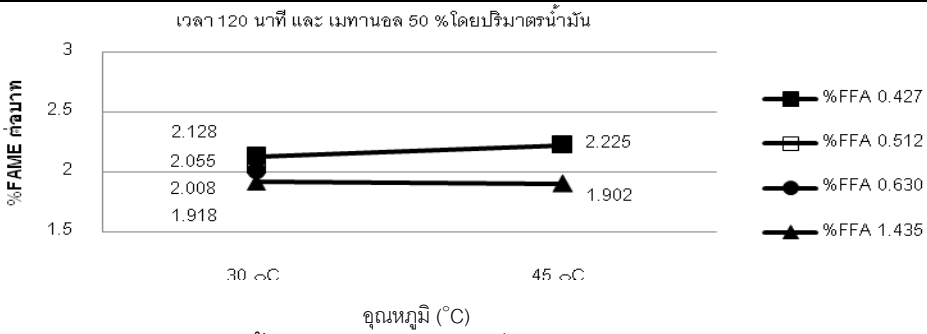
ตารางที่ 4-31 แสดงกราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) กับ%FAME ต่อบาท สำหรับสภาวะการทดลอง โดยใช้เวลาและปริมาณเมทานอลในการทำปฏิกิริยาคงที่ แต่ศึกษาที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกัน

เวลาที่ใช้ในการทดลอง	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) กับ %FAME ต่อบาท ที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกันในแต่ละสภาวะ
30 นาที	
60 นาที	
120 นาที	 <u>หมายเหตุ</u> ในสภาวะนี้มีการทดลองเฉพาะที่ระดับอุณหภูมิ 45°Cและทำการทดลองที่ 2 ระดับกรดไขมันอิสระ คือ 0.427 และ 1.435 %FFA เท่านั้น

ตารางที่ 4-31 แสดงกราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) กับ%FAME ต่อบาท สำหรับสภาวะการทดลอง โดยใช้เวลาและปริมาณเมทานอลในการทำปฏิกิริยาคงที่ แต่ศึกษาที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกัน (ต่อ)

เวลาที่ใช้ในการทดลอง	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) กับ %FAME ต่อบาท ที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกันในแต่ละสภาวะ
30 นาที	
60 นาที	
120 นาที	 <u>หมายเหตุ</u> ในสภาวะนี้มีการทดลองเฉพาะที่ระดับอุณหภูมิ 45และ 60°C ซึ่งทำการทดลองที่ 2 ระดับกรดไขมันอิสระ คือ 0.427 และ 1.435 %FFA เท่านั้น

ตารางที่ 4-31 แสดงกราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA) กับ%FAME ต่อบาท สำหรับสภาวะการทดลอง โดยใช้เวลาและปริมาณเมทานอลในการทำปฏิกิริยาคงที่ แต่ศึกษาที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกัน (ต่อ)

เวลาที่ใช้ในการทดลอง	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) กับ %FAME ต่อบาท ที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกันในแต่ละสภาวะ
30 นาที	 หมายเหตุ ในสภาวะนี้มีการทดลองเฉพาะที่ระดับอุณหภูมิ 45°C ซึ่งทำการทดลองที่ 2 ระดับกรดไขมันอิสระ คือ 0.427 และ 1.435 %FFA เท่านั้น
60 นาที	 หมายเหตุ ในสภาวะนี้มีการทดลองเฉพาะที่ระดับอุณหภูมิ 45 และ 60°C ซึ่งทำการทดลองที่ 2 ระดับกรดไขมันอิสระ คือ 0.427 และ 1.435 %FFA เท่านั้น
120 นาที	 หมายเหตุ ในสภาวะนี้มีการทดลองเฉพาะที่ระดับอุณหภูมิ 30 และ 45°C และที่ 45°C ทดลองที่ 2 ระดับกรดไขมันอิสระ คือ 0.427 และ 1.435 %FFA เท่านั้น

จากตารางที่ 4-31 แสดงกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) กับ %FAME ต่อบาท โดยใช้ระดับอุณหภูมิในการทดลองแตกต่างกัน และกำหนดระดับระยะเวลาและปริมาณเมทานอลที่ใช้การทำการทดลองเป็นค่าคงที่ในแต่ละกราฟหรือแต่ละสภาวะการทดลอง

เมื่อพิจารณาณ เวลา (Time ; Mins) และปริมาณของเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาคงที่ แต่ที่ระดับอุณหภูมิ (Temp. ; °C) แตกต่างกัน ได้แก่ 30, 45 และ 60 °C ซึ่งมีทั้งหมดหลากหลาย สภาวะที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังนั้นจากการวิเคราะห์ผลจากกราฟเปรียบเทียบในตารางที่ 4-31 ข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า

(1.) ระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ระดับแตกต่างกัน มีค่าเฉลี่ยของ %FAME ต่อบาทสูงสุด ดังนี้

- ที่ระดับอุณหภูมิ 30°C มีค่า%FAME ต่อบาท สูงสุดอยู่ในช่วง 1.918 – 3.999
- ที่ระดับอุณหภูมิ 45°C มีค่า%FAME ต่อบาท สูงสุดอยู่ในช่วง 1.902 – 4.380
- ที่ระดับอุณหภูมิ 60°C มีค่า%FAME ต่อบาท สูงสุดอยู่ในช่วง 2.092 – 3.916

ดังนั้นสามารถสรุป ได้ว่าที่ระดับอุณหภูมิ 45°C มีค่า%FAME ต่อบาทมากกว่าที่ระดับอุณหภูมิ 30 และ 60°C ตามลำดับ

(2.) ในแต่ละระดับ %FFA ที่แตกต่างกัน (ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มตั้งต้นในช่วง 0.427 – 1.435 %FFA)พบว่า หากมีค่า %FFA เพิ่มสูงขึ้นค่า %FAME ต่อบาทมีแนวโน้มลดลง สำหรับทุกสภาวะในแต่ละระดับอุณหภูมิ (30, 45 และ 60 °C)

(3.) เมื่อพิจารณาแยกเป็นแต่ละระดับอุณหภูมิ (30, 45 และ 60 °C)สำหรับทุกระดับปริมาณกรดไขมันอิสระ สามารถทำการสรุปสภาวะการทดลองที่ให้ค่า %FAME ต่อบาทสูงสุดในแต่ละระดับของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (°C) ได้ดังตารางที่ 4-32

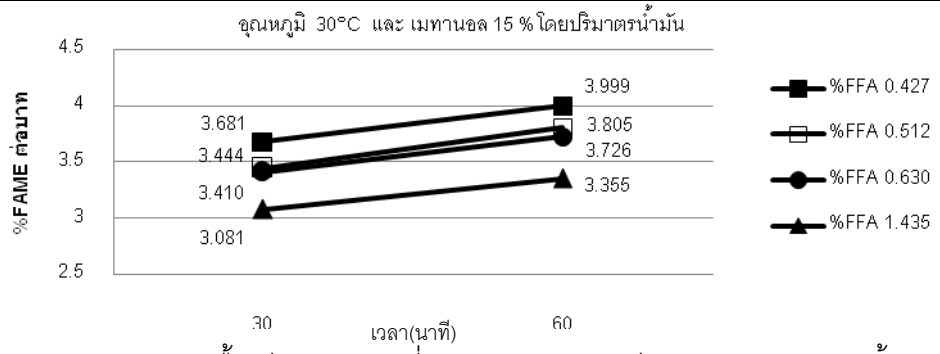
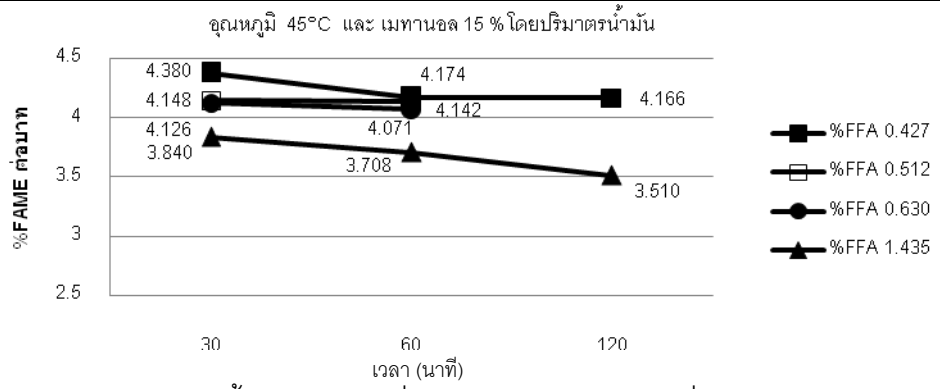
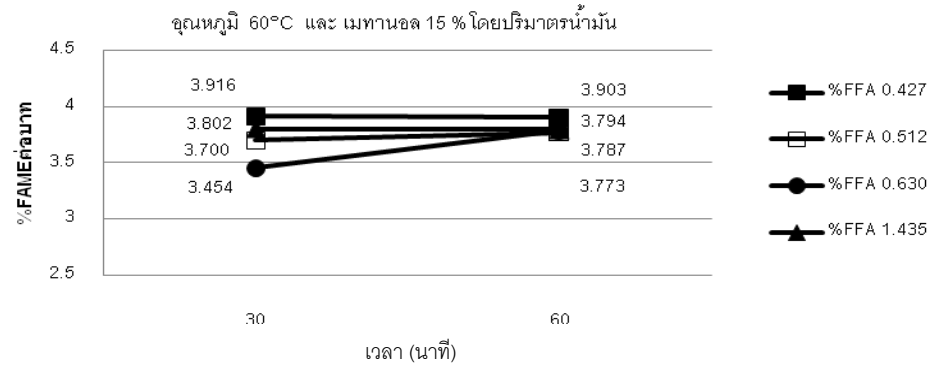
ตารางที่ 4-32 แสดงค่า %FAME ต่อบาทสูงสุดที่ได้จากการทดลองในแต่ละระดับของอุณหภูมิ

ระดับอุณหภูมิ (°C)	%FAME ต่อบาทสูงสุดที่ได้ (%)	%FAME (%)	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง		
			%FFA	เวลา (นาที)	ปริมาณเมทานอล (%โดยปริมาตรน้ำมันปาล์ม)
30	3.999	86.38	0.427	60	15
45	4.380	91.35	0.427	30	15
60	3.916	94.90	0.427	30	15

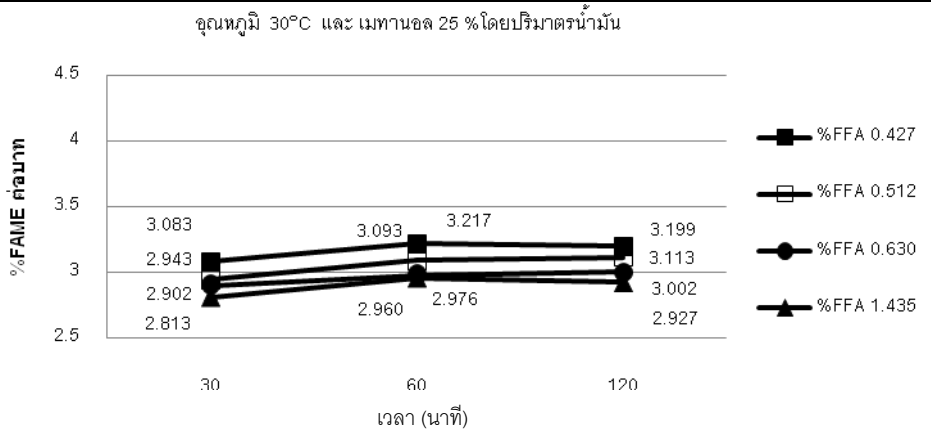
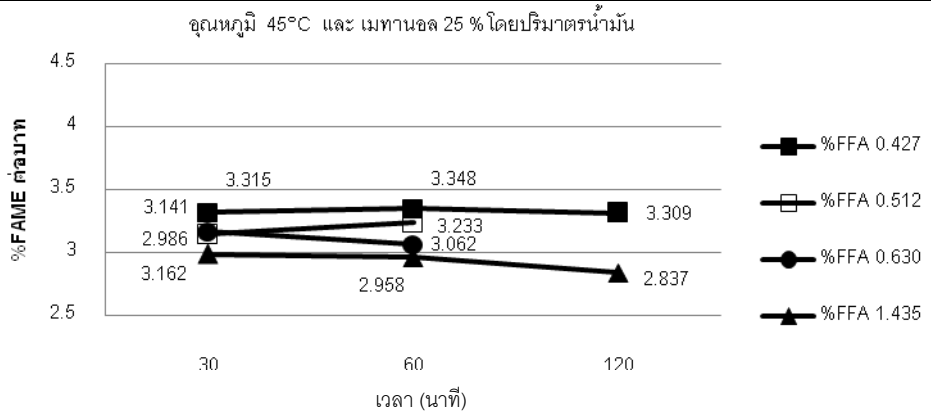
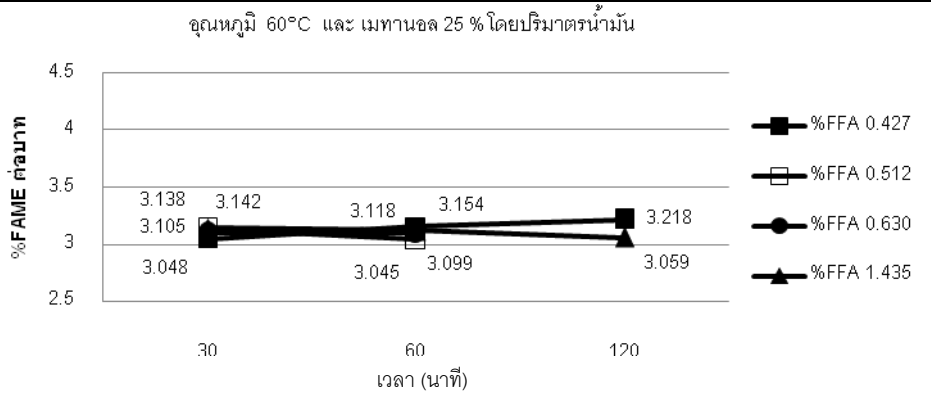
- **เวลาที่ใช้ในการทดลอง**

จากค่าเฉลี่ยของ %FAME ต่อบาทที่ได้จากตารางที่ 4-30 สามารถนำมาวิเคราะห์ผลโดยการใช้กราฟเส้นเพื่อศึกษาแนวโน้มและเปรียบเทียบความแตกต่างของ %FAME ต่อบาทที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำการทดลองในสภาวะที่แตกต่างกันของทั้ง 4 ปัจจัยที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล ดังนั้นสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) กับ%FAME ต่อบาทโดยศึกษาปัจจัยทางด้านเวลาที่ใช้ซึ่งมี 3 ระดับ คือ 30, 60 และ 120 นาทีในรูปของกราฟเส้นดังตารางที่ 4-33

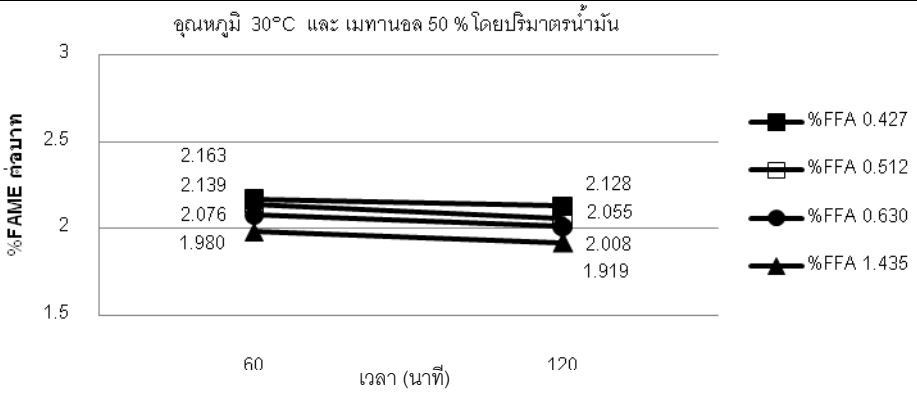
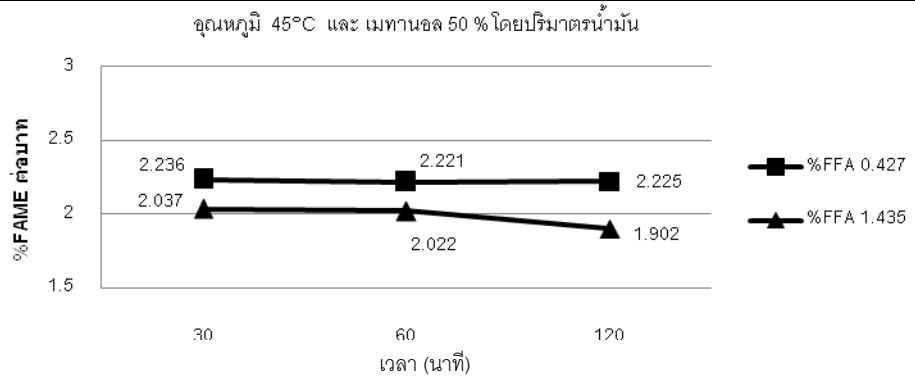
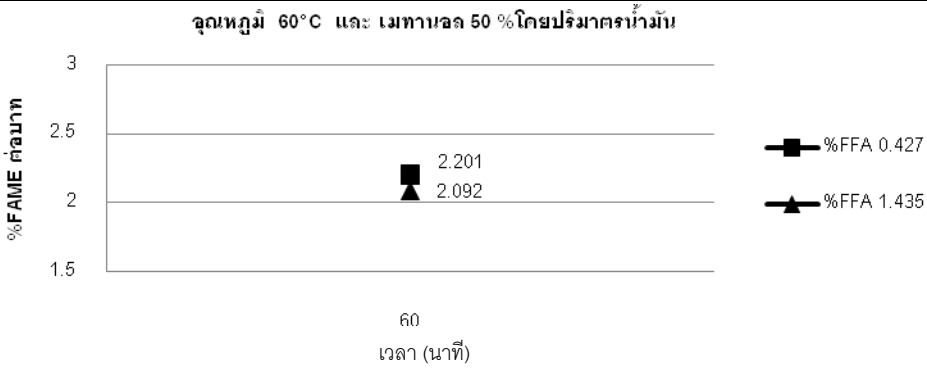
ตารางที่ 4-33 แสดงกราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA) กับ%FAME ต่อบาท สำหรับสภาวะการทดลอง โดยใช้อุณหภูมิและปริมาณเมทานอลในการทำปฏิกิริยาคงที่ แต่ศึกษาที่ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกัน

อุณหภูมิที่ใช้ทดลอง	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) กับ %FAME ต่อบาท ที่ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกันในแต่ละสภาวะ
30°C	 หมายเหตุ สภาวะนี้ไม่มีการทดลองที่ระยะเวลา120 นาที สำหรับทุกตัวอย่างน้ำมัน
45°C	 หมายเหตุ สภาวะนี้มีการทดลองที่เวลา 120 นาทีเฉพาะที่ 2 ระดับปริมาณกรดไขมันอิสระ คือ 0.427 และ 1.435 %FFA เท่านั้น
60°C	 หมายเหตุ สภาวะนี้ไม่มีการทดลองที่ระยะเวลา120 นาที สำหรับทุกตัวอย่างน้ำมัน

ตารางที่ 4-33 แสดงกราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA) กับ%FAME ต่อบาท สำหรับสภาวะการทดลอง โดยใช้อุณหภูมิและปริมาณเมทานอลในการทำปฏิกิริยาคงที่ แต่ศึกษาที่ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกัน (ต่อ)

อุณหภูมิที่ใช้ทดลอง	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) กับ %FAME ต่อบาท ที่ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกันในแต่ละสภาวะ
30°C	
45°C	
60°C	 <u>หมายเหตุ</u> ในสภาวะนี้มีการทดลองที่เวลา 120 นาที สำหรับที่ 2 ระดับกรดไขมันอิสระ คือ 0.427 และ 1.435 %FFA เท่านั้น

ตารางที่ 4-33 แสดงกราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA) กับ%FAME ต่อบาท สำหรับสภาวะการทดลอง โดยใช้อุณหภูมิและปริมาณเมทานอลในการทำปฏิกิริยาคงที่ แต่ศึกษาที่ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกัน (ต่อ)

อุณหภูมิที่ใช้ทดลอง	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) กับ %FAME ต่อบาท ที่ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกันในแต่ละสภาวะ
30°C	 หมายเหตุ สภาวะนี้ไม่มีการทดลองที่ระยะเวลา 30 นาที สำหรับทุกตัวอย่างน้ำมัน
45°C	
60°C	 หมายเหตุ ในสภาวะนี้มีการทดลองที่เวลา 120 นาที สำหรับที่ 2 ระดับกรดไขมันอิสระ คือ 0.427 และ 1.435 %FFA เท่านั้น

จากตารางที่ 4-33 แสดงกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) กับ %FAME ต่อบาท โดยใช้เวลาในการทดลองแตกต่างกัน และกำหนดที่ระดับอุณหภูมิและปริมาณเมทานอลที่ใช้การทำการทดลองเป็นค่าคงที่ในแต่ละกราฟหรือแต่ละสภาวะการทดลอง

เมื่อพิจารณาณ ที่ระดับอุณหภูมิ (Temp. ; °C) และปริมาณของเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาคงที่ แต่ที่เวลา (Time ; Mins) แตกต่างกัน ได้แก่ 30, 60และ 120 นาทีซึ่งมีทั้งหมดหลากหลาย สภาวะที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังนั้นจากการวิเคราะห์ผลจากกราฟเปรียบเทียบในตารางที่ 4-33 ข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า

(1.) เมื่อเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ระดับแตกต่างกัน มีค่าเฉลี่ยของ %FAME ต่อบาทสูงสุด ดังนี้

- ที่ช่วงเวลา 30 นาที มีค่า %FAME ต่อบาท สูงสุดอยู่ในช่วง 2.037 – 4.380
- ที่ช่วงเวลา 60 นาทีมีค่า %FAME ต่อบาท สูงสุดอยู่ในช่วง 1.980 – 4.174
- ที่ช่วงเวลา 120 นาทีมีค่า %FAME ต่อบาท สูงสุดอยู่ในช่วง 1.092 – 4.166

ดังนั้นสามารถสรุป ได้ว่าที่ช่วงเวลา30 นาทีมีค่า %FAME ต่อบาทมากกว่าที่ระดับอุณหภูมิ 60และ 120 นาทีตามลำดับ

(1.) ในแต่ละระดับ %FFA ที่แตกต่างกัน (ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มตั้งต้นในช่วง 0.427 – 1.435 %FFA) พบว่า หากมีค่า %FFA เพิ่มสูงขึ้นค่า %FAME ต่อบาทมีแนวโน้มลดลง สำหรับทุกสภาวะในแต่ละช่วงเวลาที่ใช้ในการทดลอง (30, 60และ 120 นาที)

(2.) เมื่อพิจารณาระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน (30, 60และ 120 นาที)จากผลการทดลอง สำหรับสภาวะที่ใช้ระดับอุณหภูมและที่ระดับปริมาณของเมทานอลเดียวกันนั้น พบว่า

- ที่ระดับอุณหภูมิ 45 และ 60°Cสำหรับการทดลอที่ใช้ระยะเวลา 30 นาที มีแนวโน้มสำหรับค่าเฉลี่ยของ %FAME ต่อบาทมากกว่าการใช้ระยะเวลา 60 และ 120 นาทีในการทำปฏิกิริยา

- สำหรับการทดลองที่ระดับอุณหภูมิ 30°C ใช้ระยะเวลา 60 นาทีในการทำปฏิกิริยา มีแนวโน้มสำหรับค่าเฉลี่ยของ %FAME ต่อบาทมากกว่าการใช้ระยะเวลา 30 นาทีในการทำปฏิกิริยา แต่ที่ระยะเวลา 120 นาที ค่าเฉลี่ยของ %FAME ต่อบาท มีแนวโน้มลดลง ซึ่งมีค่าน้อยกว่าที่ระยะเวลา 60 นาทีและมีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของ %FAME ต่อบาทที่ระยะเวลา 30 นาที ในทุกระดับของปริมาณเมทานอลที่ใช้และทุกสภาวะการทดลอง

(4.) เมื่อพิจารณาแยกเป็นแต่ละช่วงเวลาที่ใช้ในการทดลอง (30, 60 และ 120 นาที)สำหรับทุกระดับปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) สามารถทำการสรุปสภาวะการทดลองที่ให้ค่า %FAME ต่อบาทสูงสุดในแต่ละระดับของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (°C) ได้ดังตารางที่ 4-34

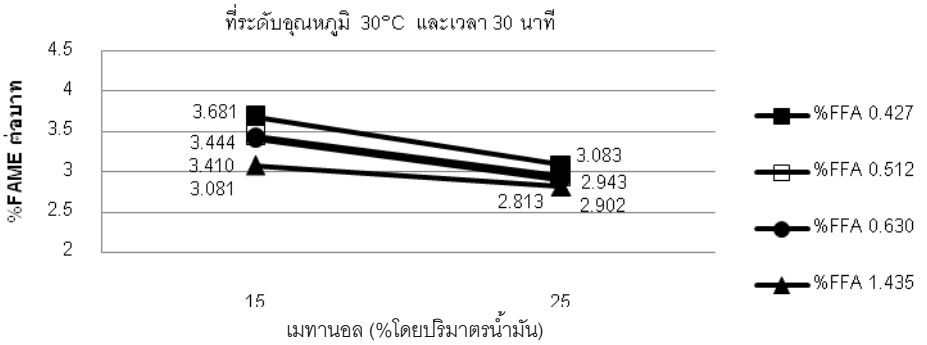
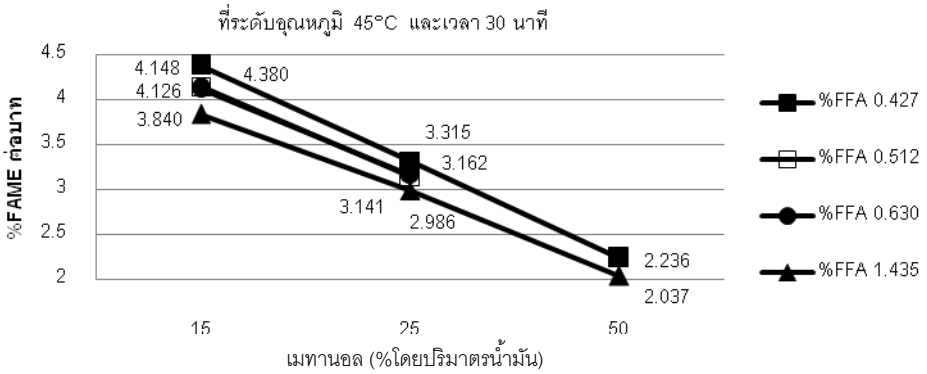
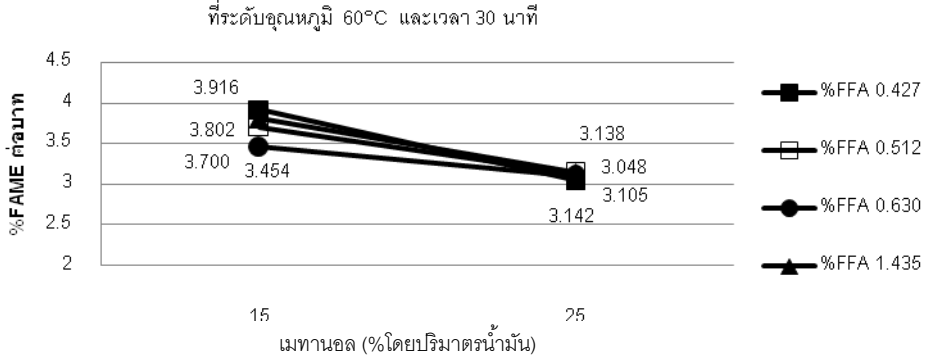
ตารางที่ 4-34 แสดงค่า %FAME ต่อบาทสูงสุดที่ได้จากการทดลองในแต่ละช่วงเวลาที่ใช้

เวลา (นาที)	%FAME ต่อบาท สูงสุดที่ได้ (%)	%FAME (%)	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง		
			%FFA	ระดับอุณหภูมิ(°C)	ปริมาณเมทานอล (%โดยปริมาตรน้ำมันปาล์ม)
30	4.380	91.35	0.427	45	15
60	4.174	85.72	0.427	45	15
120	4.166	83.11	0.427	45	15

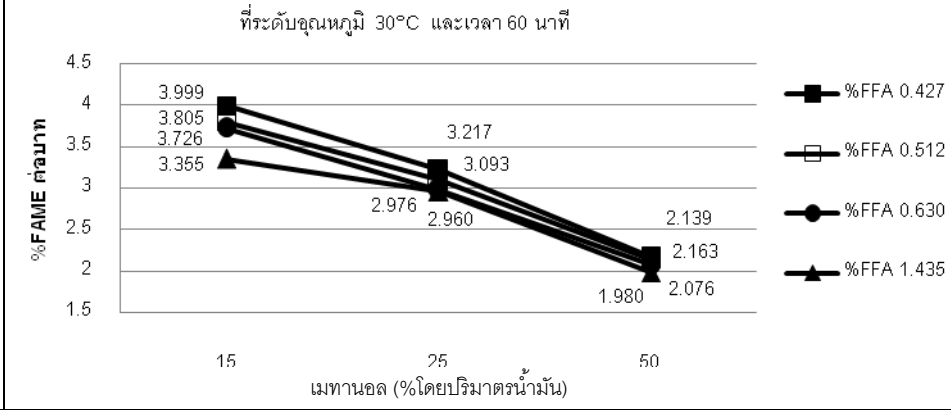
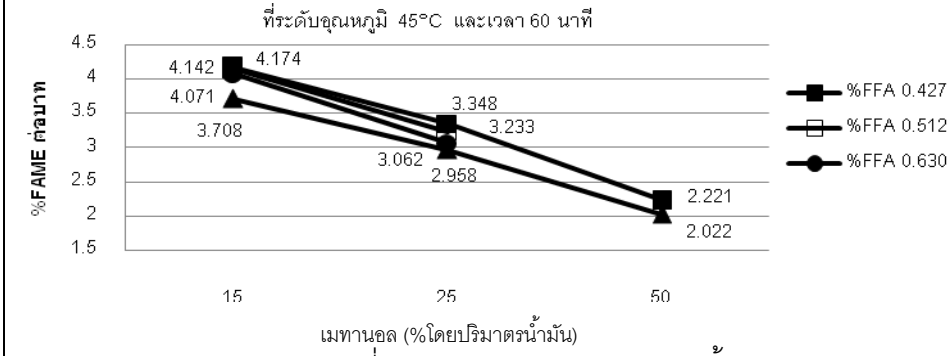
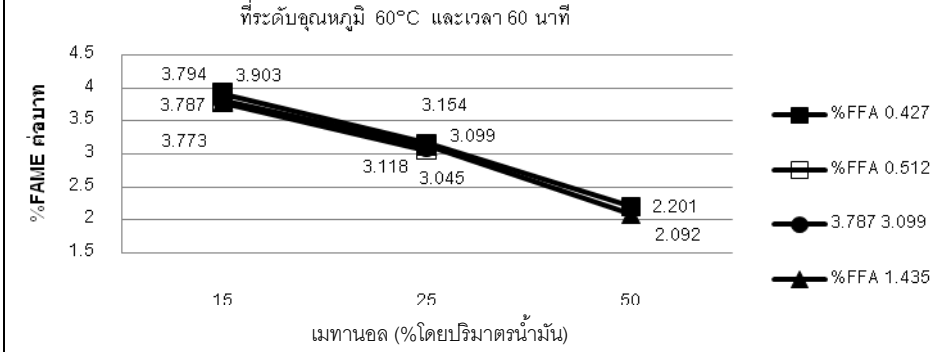
- **ปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง**

จากค่าเฉลี่ยของ %FAME ต่อบาทที่ได้จากตารางที่ 4-30 สามารถนำมาวิเคราะห์ผลโดยการใช้กราฟเส้นเพื่อศึกษาแนวโน้มและเปรียบเทียบความแตกต่างของ %FAME ต่อบาทที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำการทดลองในสภาวะที่แตกต่างกันของทั้ง 4 ปัจจัยที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล ดังนั้นสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) กับ %FAME ต่อบาทโดยศึกษาปัจจัยทางด้านปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลองซึ่งมี 3 ระดับ คือ 15, 25และ 50 %โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม ในรูปของกราฟเส้นดังตารางที่ 4-35

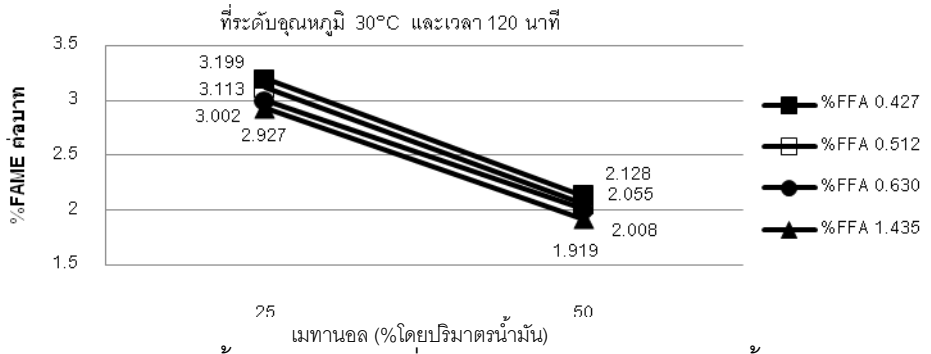
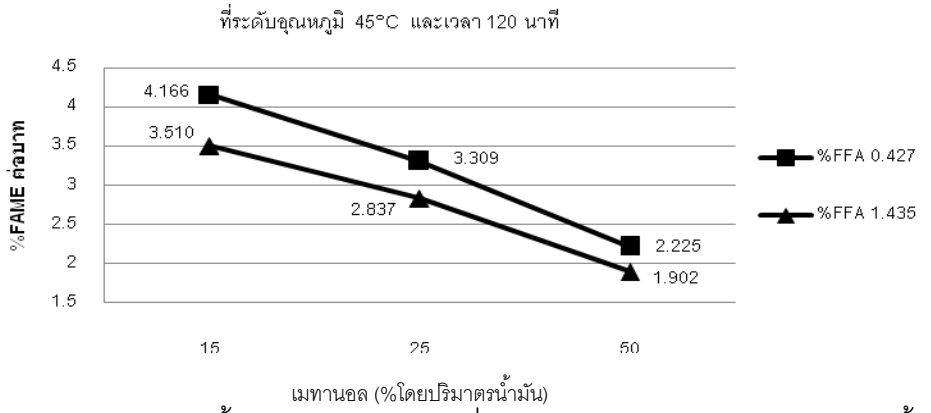
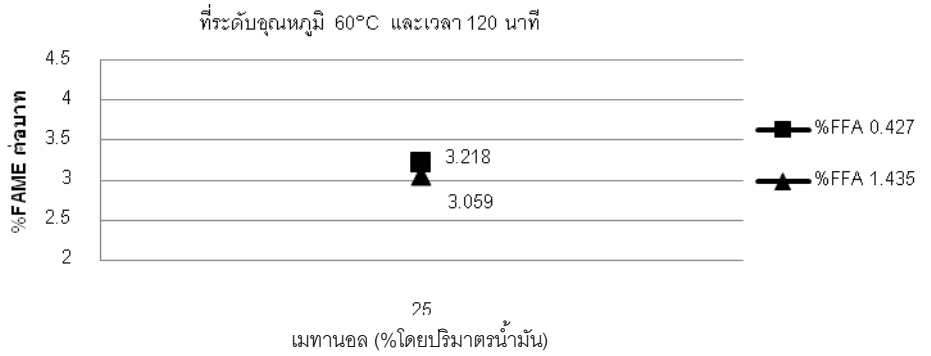
ตารางที่ 4-35 แสดงกราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA) กับ%FAME ต่อบาท สำหรับสภาวะการทดลอง โดยใช้อุณหภูมิและเวลาคงที่ แต่ศึกษาที่ระดับปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกัน

อุณหภูมิที่ใช้ทดลอง	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) กับ %FAME ต่อบาท สำหรับปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกันในแต่ละสภาวะ
30°C	 หมายเหตุสภาวะนี้ไม่มีการทดลองที่เมทานอล 50%โดยปริมาตรน้ำมันปาล์ม
45°C	 หมายเหตุ สภาวะนี้มีการทดลองที่เมทานอล 50%โดยปริมาตรน้ำมัน ทดลองเฉพาะที่ 2 ระดับปริมาณกรดไขมันอิสระ คือ 0.427 และ 1.435 %FFA เท่านั้น
60°C	 หมายเหตุสภาวะนี้ไม่มีการทดลองที่เมทานอล 50%โดยปริมาตรน้ำมันปาล์ม

ตารางที่ 4-35 แสดงกราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA) กับ%FAME ต่อบาท สำหรับสภาวะการทดลอง โดยใช้อุณหภูมิและเวลาคงที่ แต่ศึกษาที่ระดับปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกัน (ต่อ)

อุณหภูมิที่ใช้ทดลอง	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) กับ %FAME ต่อบาท สำหรับปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกันในแต่ละสภาวะ
30°C	
45°C	 <u>หมายเหตุ</u> สภาวะการทดลองที่เมทานอล 50%โดยปริมาตรน้ำมัน ทดลองเฉพาะที่ 2 ระดับปริมาณกรดไขมันอิสระ คือ 0.427 และ 1.435 %FFA เท่านั้น
60°C	 <u>หมายเหตุ</u>สภาวะการทดลองที่เมทานอล 50%โดยปริมาตรน้ำมัน ทดลองเฉพาะที่ 2 ระดับปริมาณกรดไขมันอิสระ คือ 0.427 และ 1.435 %FFA เท่านั้น

ตารางที่ 4-35 แสดงกราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA) กับ%FAME ต่อบาท สำหรับสภาวะการทดลอง โดยใช้อุณหภูมิและเวลาคงที่ แต่ศึกษาที่ระดับปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกัน (ต่อ)

อุณหภูมิที่ใช้ทดลอง	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) กับ %FAME ต่อบาท สำหรับปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกันในแต่ละสภาวะ
30°C	 หมายเหตุ สภาวะนี้ไม่มีการทดลองที่เมทานอล 50%โดยปริมาตรน้ำมันปาล์ม
45°C	 หมายเหตุ สภาวะนี้ทำการทดลองเฉพาะที่ระดับ0.427 และ 1.435 %FFA เท่านั้น
60°C	 หมายเหตุ สภาวะนี้ทำการทดลองที่เมทานอล 25%โดยปริมาตรน้ำมัน และทดลองเฉพาะที่ 2 ระดับปริมาณกรดไขมันอิสระ คือ 0.427 และ 1.435 %FFA เท่านั้น

จากตารางที่ 4-35 แสดงกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) กับ %FAME ต่อบาท โดยใช้ปริมาณเมทานอลในการทดลองที่แตกต่างกัน และกำหนดที่ระดับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้การทำการทดลองเป็นค่าคงที่ ในแต่ละกราฟหรือแต่ละสภาวะการทดลอง

เมื่อพิจารณาณ ที่ระดับอุณหภูมิ (Temp. ; °C) และเวลา (Time ; Mins) คงที่ แต่ที่ปริมาณของเมทานอลที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกัน ได้แก่ 15, 25 และ 50%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์มใช้แล้ว ซึ่งมีทั้งหมดหลากหลาย สภาวะที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังนั้นจากการวิเคราะห์ผลจากกราฟเปรียบเทียบในตารางที่ 4-35 ข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า

(1.) เมื่อปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทำทดลองที่ระดับแตกต่างกัน มีค่าเฉลี่ยของ %FAME ต่อบาทสูงสุด ดังนี้

- เมทานอล 15%โดยปริมาตรน้ำมัน มี %FAME ต่อบาท อยู่ในช่วง 2.927– 4.380
- เมทานอล 25%โดยปริมาตรน้ำมัน มี %FAME ต่อบาท อยู่ในช่วง 2.837– 3.348
- เมทานอล 50%โดยปริมาตรน้ำมัน มี %FAME ต่อบาท อยู่ในช่วง 1.902– 2.236

ดังนั้นสามารถสรุป ได้ว่าที่ระดับปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง 15%โดยปริมาตรน้ำมัน มีค่า %FAME ต่อบาทมากกว่าที่ระดับ 25 และ 50 %โดยปริมาตรน้ำมันปาล์มใช้แล้วตามลำดับ

(2.) เมื่อพิจารณาระดับปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน (15, 25และ 50 %โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม)จากผลการทดลอง สำหรับสภาวะที่ใช้ระดับอุณหภูมิเดียวกันและที่ช่วงเวลาเดียวกันนั้น พบว่า

- ที่ระดับอุณหภูมิ 30, 45 และ 60°C การทดลองที่ระดับเมทานอล 15 %โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม มีค่าเฉลี่ยของ %FAME ต่อบาทมากกว่าที่ระดับ 25 และ 25 %โดยปริมาตรน้ำมันปาล์มใชแล้วในทุกสภาวะการทดลอง
- สำหรับที่ระยะเวลา30นาทีพบว่า การทดลองที่ระดับเมทานอล 15 %โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม มีค่าเฉลี่ยของ %FAME ต่อบาทมากกว่าที่ระดับ 25 และ 50%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์มตามลำดับที่ระยะเวลา 60 และ 120 นาที

(3.) ในแต่ละระดับ %FFA ที่แตกต่างกัน (ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มตั้งต้นในช่วง 0.427 – 1.435 %FFA)พบว่า หากมีค่า %FFA เพิ่มสูงขึ้นค่า %FAME ต่อบาทมีแนวโน้มลดลง สำหรับทุกสภาวะในแต่ละปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง (15, 25 และ 50 %โดยปริมาตรน้ำมันปาล์ม)

(4.) เมื่อพิจารณาแยกเป็นระดับปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาแตกต่างกัน (15, 25 และ 50 %โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม)สำหรับทุกระดับปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) สามารถทำการสรุปสภาวะการทดลองที่ให้ค่า %FAME ต่อบาทสูงสุดในแต่ละระดับของปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง (%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม) และสามารถสรุปสภาวะในการทดลองที่ได้ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อบาทสูงสุด ศึกษาความสัมพันธ์โดยรวมทั้ง 4 ปัจจัยสำหรับ ได้ดังตารางที่ 4-36 และ 4-37 ตามลำดับ

ตารางที่ 4-36 แสดงค่า %FAME ต่อบาทสูงสุดที่ได้ ในแต่ละระดับปริมาณเมทานอลที่ใช้ทดลอง

ปริมาณเมทานอล (%โดยปริมาตรน้ำมันปาล์ม)	%FAME ต่อบาทสูงสุดที่ได้ (%)	%FAME (%)	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง		
			%FFA	ระดับอุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)
15	4.380	91.35	0.427	45	30
25	3.348	89.29	0.427	45	60
50	2.236	92.34	0.427	45	30

ตารางที่ 4-37 แสดงค่า %FAME ต่อบาทสูงสุดที่ได้ สำหรับทุกสภาวะการทดลอง

%FAME ต่อบาทสูงสุดที่ได้ (%)	%FAME (%)	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง			
		%FFA	ระดับอุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	ปริมาณเมทานอล (%โดยปริมาตรน้ำมันปาล์ม)
4.380	91.35	0.427	45	30	15
4.174	85.72	0.427	45	60	25
4.166	83.11	0.427	45	120	15

4.3.2 ร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเตอร์ต่อค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้

สำหรับในงานวิจัยนี้ ได้เสนอแนวทางในการวิเคราะห์ต้นทุนเชิงเศรษฐศาสตร์ เพื่อใช้เป็นตัวแปรในการตัดสินใจเลือกสภาวะที่เหมาะสมให้สอดคล้องกับเกณฑ์การพิจารณาที่กำหนดต่อไป โดยมีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)ที่ได้จากการผลิตกับค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง (บาท) ต่อ 1 Batch การทดลอง ดังนั้นการคำนวณหาร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ผลิตได้ต่อค่าใช้จ่ายรวมที่ใช้ในการทดลอง (%Yieldต่อบาท) เพื่อศึกษาร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ต่อบาทในแต่ละสภาวะที่ใช้ในการทดลอง โดยสามารถคำนวณจากสมการที่ (3.17) ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3. ดังนั้นจากผลทดลองข้างต้นสามารถหาร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ผลิตได้ต่อบาท (%Yieldต่อบาท) สำหรับทุกสภาวะการทดลอง ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4-38

ตารางที่ 4-38 แสดงร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (ค่า%Yieldต่อบาท) ที่ได้จากการผลิต

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ (บาท)	%Yield ต่อ บาท
0.427	30	30	15	84.00	22.55	3.725
			25	88.81	28.86	3.077
		60	15	80.05	21.60	3.705
			25	85.72	28.33	3.026
			50	89.74	42.64	2.105
		120	25	84.27	28.08	3.001
			50	91.55	42.96	2.131
	45	30	15	75.09	20.86	3.600
			25	82.59	27.70	2.981
			50	83.94	41.30	2.033
		60	15	73.53	20.54	3.580
			25	78.59	26.67	2.947
			50	83.04	41.07	2.022

ตารางที่ 4-38 แสดงร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (%Yieldต่อบาท) ที่ได้จากการผลิต(ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ (บาท)	%Yield ต่อบาท
0.427	45	120	15	71.10	19.95	3.564
			25	76.24	26.53	2.874
			50	78.95	40.39	1.955
	60	30	15	94.73	24.24	3.909
			25	97.30	31.76	3.063
		60	15	89.79	23.95	3.750
			25	96.10	30.55	3.146
			50	96.54	43.96	2.196
		120	25	94.11	29.51	3.188
0.512	30	30	15	82.18	22.34	3.679
			25	87.05	28.43	3.062
		60	15	76.98	21.26	3.621
			25	84.26	28.08	3.001
			50	87.88	41.95	2.095
		120	25	82.01	27.42	2.991
			50	88.64	42.55	2.083
	45	30	15	72.38	20.01	3.617
			25	81.56	27.46	2.970
		60	15	70.23	19.70	3.565
			25	75.61	26.15	2.892
	60	30	15	88.21	23.37	3.774
			25	95.53	29.54	3.234
		60	15	83.11	22.27	3.733
			25	90.11	29.26	3.079

ตารางที่ 4-38 แสดงร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (%Yieldต่อบาท) ที่ได้จากการผลิต(ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ (บาท)	%Yield ต่อบาท
0.630	30	30	15	81.25	21.79	3.728
			25	86.00	28.16	3.054
		60	15	75.80	20.85	3.635
			25	83.58	27.79	3.007
			50	85.84	41.81	2.053
		120	25	80.84	27.27	2.964
			50	88.00	42.72	2.060
	45	30	15	71.78	20.12	3.568
			25	79.84	27.00	2.957
		60	15	68.93	19.62	3.512
			25	74.76	26.32	2.840
	60	30	15	87.12	24.77	3.518
			25	94.90	30.10	3.153
		60	15	81.67	21.88	3.732
			25	89.48	29.27	3.057
1.435	30	30	15	76.73	21.10	3.637
			25	81.55	27.18	3.000
		60	15	73.94	20.67	3.577
			25	79.06	26.70	2.961
			50	81.89	40.92	2.001
		120	25	77.17	26.44	2.919
			50	84.23	41.31	2.039

ตารางที่ 4-38 แสดงร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (%Yieldต่อบาท) ที่ได้จากการผลิต(ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ (บาท)	%Yield ต่อบาท
1.435	45	30	15	70.93	20.08	3.532
			25	75.99	26.73	2.843
			50	77.14	40.24	1.917
		60	15	56.58	19.37	2.920
			25	73.98	26.00	2.845
			50	77.89	40.05	1.945
		120	15	58.00	19.64	2.954
			25	72.32	25.72	2.812
			50	74.00	39.51	1.873
	60	30	15	82.56	22.14	3.729
			25	88.48	29.01	3.050
		60	15	79.12	21.71	3.644
			25	84.82	28.04	3.026
			50	88.14	42.86	2.056
		120	25	82.39	27.44	3.003

จากตารางที่ 4-38 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) กับ %Yield ต่อบาทในแต่ละการทดลองที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาแนวโน้มและเปรียบเทียบความแตกต่างของ %Yield ต่อบาทที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำการทดลองในสภาวะที่แตกต่างกันของทั้ง 4 ปัจจัยที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มตั้งต้น (อยู่ในช่วง 0.427 ถึง 1.435 %FFA) อุณหภูมิ (ที่ระดับ 30, 45 และ 60°C) เวลา (ช่วง 30, 60 และ 120 นาที) และปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง (ที่ระดับ 15, 25 และ 50% โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม) ดังนั้นเมื่อพิจารณา ณ เวลาและ ปริมาณของเมทานอลที่ใช้ในการทดลองค่าที่ แต่ที่ระดับอุณหภูมิ (°C) แตกต่างกัน ได้แก่ 30, 45 และ 60 °C ซึ่งมีหลากหลายสภาวะการทดลอง สามารถสรุปได้ว่า

(1.) พิจารณาระดับอุณหภูมิที่ใช้แตกต่างกัน จะมีค่าเฉลี่ยของ %Yield ต่อบาทสูงสุด ดังนี้

- ที่อุณหภูมิ 30°C มีค่าเฉลี่ยของ%Yield ต่อบาท สูงสุดอยู่ในช่วง 2.001– 3.728
- ที่อุณหภูมิ 45°C มีค่าเฉลี่ยของ%Yield ต่อบาท สูงสุดอยู่ในช่วง 1.873 – 3.617
- ที่อุณหภูมิ 60°C มีค่าเฉลี่ยของ%Yield ต่อบาท สูงสุดอยู่ในช่วง 2.056 – 3.909

ดังนั้น สรุปได้ว่าที่ระดับอุณหภูมิ 60°C มีค่าเฉลี่ยของ %Yield ต่อบาท มากกว่าที่ระดับอุณหภูมิ 30 และ 45°C

(2.) เมื่อพิจารณาระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองที่แตกต่างกัน (30,60และ 120 นาที) จากผลการทดลอง สำหรับสภาวะที่ใช้ระดับอุณหภูมิเดียวกันและที่ระดับปริมาณของเมทานอลเดียวกันนั้น พบว่าสำหรับการทดลองทุกระดับอุณหภูมิ (30, 45 และ 60°C) ที่ใช้ระยะเวลา 30 นาทีในการทดลอง มีแนวโน้มสำหรับค่าเฉลี่ยของ %Yield ต่อบาทที่มากกว่าการใช้ระยะเวลา 60 นาทีในการทำการทดลอง สำหรับทุกสภาวะการทดลอง

(3.) เมื่อพิจารณาระดับปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน (15, 25และ 50 %โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม) จากผลการทดลอง สำหรับสภาวะที่ใช้ระดับอุณหภูมิและที่ช่วงเวลาเดียวกันนั้น พบว่าการทดลองที่ระดับปริมาณเมทานอล 15 %โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม มีค่าเฉลี่ยของ %Yield ต่อบาทมากกว่าที่ระดับปริมาณเมทานอล 25 %โดยปริมาตรจองน้ำมันปาล์ม สำหรับทุกสภาวะการทดลอง (แนวโน้มเหมือน %FAME ต่อบาท)

(4.) ในแต่ละระดับ %FFA ที่แตกต่างกัน (ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มตั้งต้นในช่วง 0.427 – 1.435 %FFA) พบว่า หากมีค่า %FFA เพิ่มสูงขึ้นค่าเฉลี่ยของ %Yield ต่อบาทมีแนวโน้มลดลง ในทุกสภาวะแต่ละระดับอุณหภูมิ (30, 45 และ 60 °C)

(5.) เมื่อพิจารณาแยกเป็นแต่ละระดับอุณหภูมิ (30, 45 และ 60 °C) สำหรับทุกระดับปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) สามารถทำการสรุปสภาวะการทดลองที่ให้ค่า %Yield ต่อบาทสูงสุดในแต่ละระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองและสามารถสรุปสภาวะในการทดลองที่ได้ %Yield ต่อบาทสูงสุด ศึกษาความสัมพันธ์โดยรวมทั้ง 4 ปัจจัยสำหรับ ได้ดังตารางที่ 4-39 และ 4-40 ตามลำดับ

ตารางที่ 4-39 แสดงค่า %Yieldต่อบาทสูงสุดที่ได้ ในแต่ละระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง

ระดับอุณหภูมิ (°C)	%Yield ต่อบาทสูงสุดที่ได้ (%)	%FAME (%)	%Yield (%)	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง		
				%FFA	เวลา (นาที)	ปริมาณเมทานอล (%โดยปริมาตรน้ำมันปาล์ม)
30	3.728	74.32	81.25	0.630	30	15
45	3.617	81.25	72.38	0.512	30	15
60	3.909	94.90	94.73	0.427	30	15

ตารางที่ 4-40 แสดงค่า %Yieldต่อบาทสูงสุดที่ได้ สำหรับทุกสภาวะการทดลอง

%Yield ต่อบาทสูงสุดที่ได้ (%)	%FAME (%)	%Yield (%)	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง			
			%FFA	ระดับอุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	ปริมาณเมทานอล (%โดยปริมาตรน้ำมันปาล์ม)
3.909	94.90	94.73	0.427	60	30	15
3.774	86.49	88.21	0.512	60	30	15
3.750	93.47	89.79	0.427	60	60	15

4.3.3 ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อพลังงานทั้งหมดที่ใช้

สำหรับในงานวิจัยนี้ ได้เสนอแนวทางในการวิเคราะห์เชิงพลังงาน ซึ่งอาจช่วยในการตัดสินใจเลือกสภาวะที่เหมาะสมให้สอดคล้องกับเกณฑ์การพิจารณาที่กำหนดในขั้นตอนต่อไป โดยมีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเมทิลเอสเตอร์(%FAME) ที่ได้จากการผลิตกับพลังงานความร้อนที่ใช้รวมทั้งหมดในการทดลอง (กิโลจูล) ต่อ 1 Batch การทดลอง โดยการคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ผลิตได้ต่อพลังงานความร้อนที่ใช้รวมทั้งหมดในการทดลอง (%FAME ต่อกิโลจูล) เพื่อศึกษาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อกิโลจูลในแต่ละสภาวะที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (3.20) ดังนั้นจากผลทดลองสามารถหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ผลิตได้ต่อกิโลจูล (%FAME ต่อกิโลจูล) ทุกสภาวะการทดลอง ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4-41

ตารางที่ 4-41 แสดงปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อกิโลจูล (%FAMEต่อกิโลจูล) ที่ได้จากการผลิต

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)	พลังงานความร้อนที่ใช้ทั้งหมด (Q_3+Q_4) (กิโลจูล)	%FAME ต่อกิโลจูล
0.427	30	30	15	83.00	5.34	15.538
			25	88.99	5.59	15.930
		60	15	86.38	5.33	16.194
			25	91.14	5.58	16.339
			50	92.22	6.15	15.006
		120	25	89.85	5.65	15.910
			50	91.43	6.12	14.946
	45	30	15	91.35	21.47	4.255
			25	91.84	22.25	4.128
			50	92.34	24.51	3.767
		60	15	85.72	21.59	3.971
			25	89.29	22.12	4.036
			50	91.23	24.46	3.729
		120	15	83.11	21.48	3.869
			25	87.80	22.42	3.916
			50	89.85	24.53	3.663
	60	30	15	94.90	37.35	2.541
			25	96.81	39.57	2.446
		60	15	93.47	37.74	2.477
			25	96.36	39.47	2.441
			50	96.75	42.84	2.259
		120	25	94.96	39.18	2.424

ตารางที่ 4-41 แสดงปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อกิโลจูล (%FAMEต่อกิโลจูล) ที่ได้จากการผลิต(ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)	พลังงานความร้อนที่ใช้ทั้งหมด (Q_3+Q_4) (กิโลจูล)	%FAME ต่อกิโลจูล
0.512	30	30	15	76.93	5.39	14.269
			25	83.65	5.59	14.951
		60	15	80.89	5.43	14.909
			25	86.85	5.57	15.582
			50	89.75	6.12	14.666
		120	25	85.36	5.56	15.353
			50	87.46	6.17	14.168
	45	30	15	83.01	21.61	3.842
			25	86.24	22.20	3.884
		60	15	81.60	21.64	3.770
			25	84.52	22.55	3.749
	60	30	15	86.49	37.78	2.289
			25	92.70	38.93	2.381
		60	15	84.00	37.51	2.239
			25	89.10	38.88	2.291
0.630	30	30	15	74.32	5.35	13.881
			25	81.72	5.60	14.599
		60	15	77.69	5.29	14.699
			25	82.72	5.64	14.672
			50	86.78	6.18	14.034
		120	25	81.86	5.63	14.548
			50	85.80	6.07	14.126
	45	30	15	83.01	21.31	3.895

ตารางที่ 4-41 แสดงปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อกิโลจูล (%FAMEต่อกิโลจูล) ที่ได้จากการผลิต (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)	พลังงานความร้อนที่ใช้ทั้งหมด (Q_3+Q_4) (กิโลจูล)	%FAME ต่อกิโลจูล
0.630	45	30	25	85.37	22.44	3.804
		60	15	79.88	21.73	3.677
			25	80.60	22.40	3.599
	60	30	15	85.54	37.90	2.257
			25	93.45	39.67	2.356
		60	15	82.87	37.41	2.215
			25	90.70	38.97	2.327
1.435	30	30	15	64.99	5.36	12.134
			25	76.47	5.59	13.677
		60	15	69.34	5.45	12.718
			25	79.04	5.56	14.212
			50	81.02	6.10	13.274
		120	25	77.39	5.67	13.659
			50	79.25	6.12	12.947
	45	30	15	77.10	21.63	3.565
			25	79.82	22.71	3.514
			50	81.96	24.59	3.333
		60	15	71.85	21.38	3.360
			25	76.91	22.21	3.462
			50	81.00	24.47	3.310
		120	15	68.94	21.58	3.195
			25	72.98	22.43	3.253
			50	75.15	24.48	3.070

ตารางที่ 4-41 แสดงปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อกิโลจูล (%FAMEต่อกิโลจูล) ที่ได้จากการผลิต (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)	พลังงานความร้อนที่ใช้ทั้งหมด (Q_3+Q_4) (กิโลจูล)	%FAME ต่อกิโลจูล
1.435	60	30	15	84.18	37.30	2.257
			25	91.17	39.12	2.330
		60	15	82.38	38.13	2.160
			25	87.42	38.81	2.252
			50	89.65	42.92	2.089
		120	25	83.93	39.26	2.138

จากตารางที่ 4-41 แสดงค่าพลังงานความร้อน (กิโลจูล ; kJ) ที่เกิด เฉพาะใน STEP 3 และ 4 เท่านั้น (Q_3+Q_4) เนื่องจากเป็นพลังงานแปรผันได้ ส่วนพลังงาน Q_2 และ Q_6 เป็นพลังงานคงที่ ในงานวิจัยนี้จึงสามารถ Fixed ค่าในการคำนวณด้านพลังงาน ซึ่งค่าพลังงานความร้อนใน STEP 2 และ 6 นั้นสามารถกำหนดให้เป็นค่าคงที่ได้จากการที่กล่าวไว้ในภาคผนวก ฌ. และจากข้อมูลดังกล่าวสามารถเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA) กับ %FAME ต่อกิโลจูล ในแต่ละการทดลองที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาแนวโน้มและเปรียบเทียบความแตกต่างของ %FAME ต่อกิโลจูลที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำการทดลองในสภาวะที่แตกต่างกันของทั้ง 4 ปัจจัยที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มตั้งต้น (อยู่ในช่วง 0.427 ถึง 1.435 %FFA) อุณหภูมิ (ที่ระดับ 30, 45 และ 60°C) เวลา (ช่วง 30, 60 และ 120 นาที) และปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง (ที่ระดับ 15, 25 และ 50%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม)

ดังนั้นเมื่อพิจารณาณ เวลา (นาที) และปริมาณของเมทานอลที่ใช้ในการทดลองแต่ที่ระดับอุณหภูมิ (°C) แตกต่างกัน ได้แก่ 30, 45 และ 60 °C ซึ่งมีหลากหลายสภาวะการทดลอง สามารถสรุปได้ว่า

(1.) ระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกัน มีค่าเฉลี่ยของ %FAME ต่อ kJ. สูงสุด ดังนี้

- ที่อุณหภูมิ 30 °C มีค่าเฉลี่ยของ %FAME ต่อ kJ. สูงสุดอยู่ในช่วง 12.134 –16.339

- ที่อุณหภูมิ 45 °C มีค่าเฉลี่ยของ %FAME ต่อ kJ. สูงสุดอยู่ในช่วง 3.070 – 4.255
- ที่อุณหภูมิ 60 °C มีค่าเฉลี่ยของ %FAME ต่อ kJ. สูงสุดอยู่ในช่วง 2.089 – 2.541

ดังนั้น สรุปได้ว่าที่อุณหภูมิ 30°C มีค่าเฉลี่ยของ %FAME ต่อ kJ. มากกว่าที่อุณหภูมิ 45 และ 60°C ตามลำดับ

(2.) เมื่อพิจารณาระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกัน (30, 60และ 120 นาที)จากผลการทดลอง สำหรับสภาวะที่ใช้ระดับอุณหภูมิและที่ระดับปริมาณของเมทานอลเดียวกันนั้น พบว่า

- <u>ที่ระดับอุณหภูมิ 45 และ 60°C</u>การทดลองที่ใช้ระยะเวลา 30 นาที มีค่าเฉลี่ยของ %FAME ต่อ kJ. มากกว่าที่ใช้ระยะเวลา 60 นาทีในการทำปฏิกิริยา ในทุกสภาวะการทดลอง
- แต่สำหรับ<u>ที่ระดับอุณหภูมิ 30°C</u>การทดลองที่ใช้เวลา 30 นาที มีค่าเฉลี่ยของ %FAME ต่อ kJ. น้อยกว่าที่ใช้เวลา 60 และ 120 นาที ซึ่งค่าเฉลี่ยของ %FAME ต่อ kJ. ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 และ 120 นาที มีค่าใกล้เคียงกัน

(3.) เมื่อพิจารณาระดับปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลองที่แตกต่างกัน (15, 25และ50 % โดยปริมาตรน้ำมันปาล์ม)จากผลการทดลอง สำหรับสภาวะที่ใช้ระดับอุณหภูมิเดียวกันและที่ช่วงเวลาเดียวกันนั้น พบว่า

- <u>ที่ระดับอุณหภูมิ 30, 45 และ 60°C</u>การทดลองที่ระดับเมทานอล 25 %โดยปริมาตรน้ำมันปาล์ม มีค่าเฉลี่ยของ %FAME ต่อ kJ. มากกว่าที่ระดับเมทานอล 15 %โดยปริมาตรน้ำมัน ในทุกสภาวะการทดลอง ยกเว้นสำหรับการทดลองที่ระดับอุณหภูมิ 45°C ของทั้ง 2 ระดับปริมาตรของเมทานอล มีค่าเฉลี่ยของ %FAME ต่อ kJ. ใกล้เคียงกัน
- สำหรับ<u>ที่ระดับอุณหภูมิ 30°C</u>พบว่า การทดลองที่ระดับเมทานอล 25 %โดยปริมาตรน้ำมันปาล์ม มีค่าเฉลี่ยของ %FAME ต่อkJ. มากกว่าที่ระดับเมทานอล 50 %โดยปริมาตรน้ำมันที่ระยะเวลา 60 นาที แต่สำหรับที่ระยะเวลา 120 นาที

ค่าเฉลี่ยของ %FAME ต่อ kJ. ของทั้งระดับเมทานอล 25 และ 50 %โดยปริมาตรน้ำมันปาล์ม มีค่าใกล้เคียงกัน

(4.) ในแต่ละระดับ %FFA ที่แตกต่างกัน (ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มตั้งต้นในช่วง 0.427 – 1.435 %FFA)พบว่า หากมีค่า %FFA สูงขึ้นค่าเฉลี่ยของ %FAME ต่อ kJ. ยิ่งลดลง ในทุกสภาวะการทดลองและทุกระดับอุณหภูมิ (30, 45 และ 60 °C)

(5.) เมื่อพิจารณาแยกเป็นแต่ละระดับอุณหภูมิ (30, 45 และ 60 °C)(ที่ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มตั้งต้น 0.427%FFA) พบว่า มีค่าเฉลี่ยของ %FAME ต่อ กิโลจูลสูงสุดในแต่ละระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองและสามารถสรุปสภาวะในการทดลองที่ได้ %FAME ต่อกิโลจูลสูงสุด ศึกษาความสัมพันธ์โดยรวมทั้ง 4 ปัจจัยสำหรับ ได้ดังตารางที่ 4-42 และ 4-43 ตามลำดับ

ตารางที่ 4-42 แสดงค่า %FAME ต่อกิโลจูลสูงสุดที่ได้ ในแต่ละระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง

ระดับอุณหภูมิ (°C)	%FAME ต่อกิโลจูลสูงสุดที่ได้ (%)	%FAME (%)	%Yield (%)	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง		
				%FFA	เวลา (นาที)	ปริมาณเมทานอล (%โดยปริมาตรน้ำมันปาล์ม)
30	16.339	91.14	85.72	0.427	60	25
45	4.255	91.35	75.09	0.427	30	15
60	2.541	94.90	94.73	0.427	30	15

ตารางที่ 4-43 แสดงค่า %Yield ต่อบาทสูงสุดที่ได้ สำหรับทุกสภาวะการทดลอง

%FAME ต่อกิโลจูลสูงสุดที่ได้ (%)	%FAME (%)	%Yield (%)	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง			
			%FFA	ระดับอุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	ปริมาณเมทานอล (%โดยปริมาตรน้ำมันปาล์ม)
16.339	91.14	85.72	0.427	30	60	25
16.194	86.38	80.05	0.427	30	60	15
15.930	88.99	88.81	0.427	30	30	25

4.3.4 ร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเตอร์ต่อพลังงานทั้งหมดที่ใช้

สำหรับในงานวิจัยนี้ ได้เสนออีกหนึ่งแนวทางสำหรับการวิเคราะห์เชิงพลังงาน ซึ่งอาจช่วยในการตัดสินใจเลือกสภาวะที่เหมาะสมให้สอดคล้องกับเกณฑ์การพิจารณาที่กำหนดในขั้นตอนต่อไป โดยมีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ได้จากการผลิตกับพลังงานความร้อนที่ใช้รวมทั้งหมดในการทดลอง (กิโลจูล) ต่อ 1 Batch การทดลอง โดยการคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ผลิตได้ต่อพลังงานความร้อนที่ใช้รวมทั้งหมดในการทดลอง (%Yield ต่อกิโลจูล) เพื่อศึกษาร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ต่อกิโลจูลในแต่ละสภาวะที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (3.21) ซึ่งมีหลักคิดคำนวณคล้ายกับ %FAME ต่อกิโลจูล ดังนั้นจากผลทดลองสามารถหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ผลิตได้ต่อกิโลจูล (%Yield ต่อกิโลจูล) ทุกสภาวะการทดลอง ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4-44

ตารางที่ 4-44 แสดงร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ต่อกิโลจูลที่ผลิตได้ (%Yield ต่อกิโลจูล)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ใน (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์(%Yield)	พลังงานความร้อนทั้งหมด (Q_3+Q_4)(กิโลจูล)	%Yield ต่อกิโลจูล
0.427	30	30	15	84.00	5.34	15.725
			25	88.81	5.59	15.898
		60	15	80.05	5.33	15.006
			25	85.72	5.58	15.368
			50	89.74	6.15	14.603
		120	25	84.27	5.65	14.922
			50	91.55	6.12	14.966
	45	30	15	75.09	21.47	3.497
			25	82.59	22.25	3.712
			50	83.94	24.51	3.425
		60	15	73.53	21.59	3.406
			25	78.59	22.12	3.552
			50	83.04	24.46	3.395

ตารางที่ 4-44 แสดงร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ต่อกิโลจูลที่ผลิตได้ (%Yieldต่อกิโลจูล)(ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์(%Yield)	พลังงานความร้อนทั้งหมด (Q_3+Q_4) (กิโลจูล)	%Yield ต่อกิโลจูล
0.427	45	120	15	71.10	21.48	3.310
			25	76.24	22.42	3.400
			50	78.95	24.53	3.219
	60	30	15	94.73	37.35	2.536
			25	97.30	39.57	2.459
		60	15	89.79	37.74	2.379
			25	96.10	39.47	2.435
			50	96.54	42.84	2.253
		120	25	94.11	39.18	2.402
0.512	30	30	15	82.18	5.39	15.241
			25	87.05	5.59	15.559
		60	15	76.98	5.43	14.189
			25	84.26	5.57	15.118
			50	87.88	6.12	14.361
		120	25	82.01	5.56	14.751
			50	88.64	6.17	14.360
	45	30	15	72.38	21.61	3.350
			25	81.56	22.20	3.673
		60	15	70.23	21.64	3.245
			25	75.61	22.55	3.354
	60	30	15	88.21	37.78	2.335
			25	95.53	38.93	2.454
		60	15	83.11	37.51	2.216
			25	90.11	38.88	2.317

ตารางที่ 4-44 แสดงร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ต่อกิโลจูลที่ผลิตได้ (%Yieldต่อกิโลจูล)(ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์(%Yield)	พลังงานความร้อนทั้งหมด (Q_3+Q_4) (กิโลจูล)	%Yield ต่อกิโลจูล
0.630	30	30	15	81.25	5.35	15.176
			25	86.00	5.60	15.365
		60	15	75.80	5.29	14.341
			25	83.58	5.64	14.825
			50	85.84	6.18	13.882
		120	15	80.84	5.63	14.367
			50	88.00	6.07	14.487
	45	30	15	71.78	21.31	3.368
			25	79.84	22.44	3.557
		60	15	68.93	21.73	3.172
			25	74.76	22.40	3.338
	60	30	15	87.12	37.90	2.298
			25	94.90	39.67	2.392
		60	15	81.67	37.41	2.183
			25	89.48	38.97	2.296
1.435	30	30	15	76.73	5.36	14.326
			25	81.55	5.59	14.586
		60	15	73.94	5.45	13.562
			25	79.06	5.56	14.215
			50	81.89	6.10	13.416
		120	25	77.17	5.67	13.620
			50	84.23	6.12	13.760
	45	30	15	70.93	21.63	3.279
			25	75.99	22.71	3.346

ตารางที่ 4-44 แสดงร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ต่อกิโลจูลที่ผลิตได้ (%Yieldต่อกิโลจูล)(ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์(%Yield)	พลังงานความร้อนทั้งหมด (Q_3+Q_4) (กิโลจูล)	%Yield ต่อกิโลจูล
1.435	45	30	50	77.14	24.59	3.137
		60	15	56.58	21.38	2.646
			25	73.98	22.21	3.330
			50	77.89	24.47	3.183
		120	15	58.00	21.58	2.688
			25	72.32	22.43	3.224
			50	74.00	24.48	3.023
	60	30	15	82.56	37.30	2.213
			25	88.48	39.12	2.262
		60	15	79.12	38.13	2.075
			25	84.82	38.81	2.186
			50	88.14	42.92	2.053
		120	25	82.39	39.26	2.098

จากตารางที่ 4-44 แสดงค่าพลังงานความร้อน (กิโลจูล ; kJ) ที่เกิด เฉพาะใน STEP 3 และ 4 เท่านั้น (Q_3+Q_4) เนื่องจากพลังงานความร้อนใน STEP 2 และ 6 นั้นสามารถกำหนดให้เป็นค่าคงที่ได้จากการที่กล่าวไว้ในภาคผนวก ฌ. และจากข้อมูลดังกล่าวสามารถเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ(%FFA) กับ %Yield ต่อกิโลจูล ในแต่ละการทดลองที่แตกต่างกัน เมื่อทำการทดลองในสภาวะที่แตกต่างกันของทั้ง 4 ปัจจัยที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มตั้งต้น (อยู่ในช่วง 0.427 ถึง 1.435 %FFA) อุณหภูมิ (ที่ระดับ 30, 45 และ 60°C) เวลา (ช่วง 30, 60 และ 120 นาที) และปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง (ที่ระดับ 15, 25 และ 50%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม) ดังนั้นเมื่อพิจารณาณ เวลา (นาที) และปริมาณของเมทานอลที่ใช้ในการทดลองแต่ที่ระดับอุณหภูมิ (°C) แตกต่างกัน ได้แก่ 30, 45 และ 60 °C ซึ่งมีหลากหลายสภาวะการทดลอง สามารถสรุปได้ว่า

(1.) ระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกัน มีค่าเฉลี่ยของ %Yield ต่อ kJ. สูงสุด ดังนี้

- ที่อุณหภูมิ 30 °C มีค่าเฉลี่ยของ %Yieldต่อ kJ. สูงสุดอยู่ในช่วง 13.416 -15.898
- ที่อุณหภูมิ 45 °C มีค่าเฉลี่ยของ %Yieldต่อ kJ. สูงสุดอยู่ในช่วง 2.646 - 3.712
- ที่อุณหภูมิ 60 °C มีค่าเฉลี่ยของ %Yieldต่อ kJ. สูงสุดอยู่ในช่วง 2.053- 2.536ดังนั้น สรุปได้ว่าที่ระดับอุณหภูมิ30°C มีค่า%Yield ต่อ kJ. มากกว่าที่ระดับอุณหภูมิ 45 และ 60°C ตามลำดับ

(2.) เมื่อพิจารณาระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองที่แตกต่างกัน (30, 60 และ 120 นาที)จากผลการทดลอง สำหรับสภาวะที่ใช้ระดับอุณหภูมิและที่ระดับปริมาณของเมทานอลเดียวกันนั้น พบว่าการทดลองที่ใช้เวลา 30 นาทีในการทดลอง มีค่าเฉลี่ยของ %Yield ต่อ kJ. มากกว่าที่ใช้เวลา 60 นาที ทุกสภาวะการทดลอง (แนวโน้มเหมือนกับ%FAME ต่อ kJ.)

(3.) เมื่อพิจารณาระดับปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลองที่แตกต่างกัน (15, 25 และ 25%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม)จากผลการทดลอง สำหรับสภาวะที่ใช้ระดับอุณหภูมิและที่ช่วงเวลาเดียวกันนั้น พบว่าการทดลองที่ปริมาณเมทานอล 25 %โดยปริมาตรน้ำมันปาล์มมีค่าเฉลี่ยของ %Yieldต่อ kJ. มากกว่าที่ปริมาณเมทานอล 15 %โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม ทุกสภาวะการทดลอง (แนวโน้มเหมือนกับ %FAME ต่อ kJ)

(4.) ในแต่ละระดับ %FFA ที่แตกต่างกัน (ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มตั้งต้นในช่วง 0.427 – 1.435 %FFA)พบว่า ยิ่งมี %FFA สูงขึ้นค่าเฉลี่ยของ %Yield ต่อ kJ. ยิ่งลดลง ในทุกสภาวะการทดลองและทุกระดับอุณหภูมิ (30, 45 และ 60 °C)

(5.) เมื่อพิจารณาแยกเป็นแต่ละระดับอุณหภูมิ (30, 45 และ 60 °C)(ที่ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มตั้งต้น 0.427%FFA) พบว่า มีค่าเฉลี่ยของ %Yield ต่อ kJ. สูงสุดในแต่ละระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองและสามารถสรุปสภาวะในการทดลองที่ได้ %Yield ต่อกิโลจูลสูงสุด ศึกษาความสัมพันธ์โดยรวมทั้ง 4 ปัจจัยสำหรับ ได้ดังตารางที่ 4-45 และ 4-46 ตามลำดับ

ตารางที่ 4-45 แสดงค่า %Yield ต่อกิโลจูลสูงสุดที่ได้ ในแต่ละระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง

ระดับอุณหภูมิ (°C)	%Yield ต่อกิโลจูลสูงสุดที่ได้ (%)	%FAME (%)	%Yield (%)	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง		
				%FFA	เวลา (นาที)	ปริมาณเมทานอล (%โดยปริมาตรน้ำมันปาล์ม)
30	15.898	88.99	88.81	0.427	30	25
45	3.712	91.84	75.09	0.427	30	25
60	2.536	94.90	94.73	0.427	30	15

ตารางที่ 4-46 แสดงค่า %Yield ต่อกิโลจูลสูงสุดที่ได้ สำหรับทุกสภาวะการทดลอง

%Yield ต่อกิโลจูลสูงสุดที่ได้ (%)	%FAME (%)	%Yield (%)	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง			
			%FFA	ระดับอุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	ปริมาณเมทานอล (%โดยปริมาตรน้ำมันปาล์ม)
15.898	88.99	88.81	0.427	30	30	25
15.725	83.00	84.00	0.427	30	30	15
15.559	83.65	87.05	0.512	30	30	25

จากการศึกษาผลการทดลองข้างต้นสำหรับ %FAME ต่อบาท, %Yield ต่อบาท, %FAME ต่อกิโลจูล และ %Yield ต่อกิโลจูล ข้างต้นสามารถนำมาเปรียบเทียบและสรุปแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างทั้ง 4 ตัวแปรกับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองทั้ง 4 ปัจจัยได้ดังตารางที่ 4-47

ตารางที่ 4-47 แนวโน้มของ %FAME ต่อบาท %Yield ต่อบาท %FAME ต่อกิโลจูล และ %Yield ต่อกิโลจูลกับปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของไบโอดีเซล

ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง		แนวโน้มการเปลี่ยนแปลง			
รายละเอียด	แนวโน้ม	ด้านเศรษฐศาสตร์		ด้านพลังงาน (เฉพาะ Q_3 และ Q_4)	
		%FAME ต่อบาท	%Yield ต่อบาท	%FAME ต่อกิโลจูล	%Yield ต่อกิโลจูล
%FFA ในน้ำมันปาล์ม	↑	↓	↓	↓	↓
อุณหภูมิที่ใช้ทดลอง	↑	↑ มีค่าสูงสุด ที่ 45°C	↑มีค่าสูงสุด ที่ 60°C	↓ มีค่าสูงสุด ที่ 30°C	↓ มีค่าสูงสุด ที่ 30°C
เวลาที่ใช้ในการทดลอง	↑	↑	↓	↑ ที่อุณหภูมิ 30°C ↓ที่อุณหภูมิ 45 และ 60 °C	↓
ปริมาณเมทานอลที่ใช้	↑	↓	↓	↓	↓ มีค่าสูงสุดที่ 25%โดยปริมาตร

หมายเหตุ ↑ สัญลักษณ์ แทน ค่าเพิ่มขึ้น และ ↓ สัญลักษณ์ แทน ค่าลดลง

จากตารางที่ 4-27 พบว่า แนวโน้มของ %FAME ต่อบาท %Yield ต่อบาท %FAME ต่อกิโลจูล และ %Yield ต่อกิโลจูล กับปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA)ในน้ำมันปาล์มใช้แล้วกับปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลองมีความผกผันกัน นั่นคือ เมื่อ %FFAในน้ำมันปาล์มและปริมาณเมทานอลเพิ่มสูงขึ้น ตัวแปรทั้ง 4 ตัวแปรนี้มีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก %FFA สูงขึ้นจะมีผลต่อประสิทธิภาพของไบโอดีเซลและหากมีการใช้ปริมาณเมทานอลในปริมาณสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงเพิ่มขึ้นและส่งผลให้มีการใชเพลังงานความร้อนเพิ่มสูงขึ้นในระหว่างทำการทดลอง สำหรับปัจจัยทางด้านอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของไบโอดีเซลที่ได้เพิ่มสูงขึ้นแต่พลังงานที่ใช้เพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน ดังนั้นค่า %FAME ต่อกิโลจูลและ %Yield ต่อกิโลจูลมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิในการทดลองเพิ่มสูงขึ้น

บทที่ 5

การอภิปรายผลการทดลอง

5.1 การอภิปรายผลที่ได้จากการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล

5.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเมทิลเอสเตอร์กับปัจจัยที่ใช้

อิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) คือ เมื่อปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) ในน้ำมันปาล์มเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ลดลง ในขณะที่อุณหภูมิและปริมาณเมทานอลที่ใช้ทดลอง เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ %FAME เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดลองจากงานวิจัยในอดีต แต่สำหรับปัจจัยทางด้านเวลาที่ใช้ในการทดลองที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ %FAME ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ณ ช่วงเวลา 30 , 60 และ 120 นาที สำหรับการทดลองที่ระดับอุณหภูมิ 45 และ 60°C ที่ใช้ระยะเวลา 30 นาที มีค่าเฉลี่ยของ %FAME มากกว่าที่ใช้ระยะเวลา 60 นาทีในการทำปฏิกิริยา ในทุกสภาวะการทดลอง และที่ระดับอุณหภูมิ 30°C ที่ใช้ระยะเวลา 30 นาที มีค่าเฉลี่ยของ %FAME น้อยกว่าที่ใช้ระยะเวลา 60 นาที และที่เวลา 120 นาทีมีค่าเฉลี่ยของ %FAME มากกว่าที่ระยะเวลา 30 นาทีแต่ยังมีค่าน้อยกว่าที่เวลา 60 นาที ในทุกระดับของปริมาณเมทานอลที่ใช้

5.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลผลิตของมทิลเอสเตอร์กับปัจจัยที่ใช้

อิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) คือ เมื่อปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) ในน้ำมันปาล์มเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ลดลง ในขณะที่อุณหภูมิและปริมาณเมทานอลที่ใช้ทดลอง เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ %Yield เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดลองจากงานวิจัยในอดีต แต่สำหรับปัจจัยทางด้านเวลาที่ใช้ในการทดลองที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ %Yield ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ณ ช่วงเวลา 30 , 60 และ 120 นาที สำหรับการทดลองทุกระดับอุณหภูมิ ทั้ง 30, 45 และ 60°C ที่ใช้ระยะเวลา 30 นาทีในการทำปฏิกิริยา มีค่าเฉลี่ยของ %Yield มากกว่าที่ใช้ระยะเวลา 60 และ 120 นาทีในการทำปฏิกิริยา ตามลำดับ ในทุกสภาวะการทดลอง

5.1.3 ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้

อิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณของเมทิลเอสเตอร์ต่อค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ (%FAME ต่อบาท) คือ เมื่อปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) ในน้ำมันปาล์มเพิ่มสูงขึ้น ส่งผล

ให้%FAME ต่อบาท ลดลง สำหรับระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองสูงขึ้น ส่งผลให้ %FAME ต่อบาทเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งพบว่า ที่ระดับอุณหภูมิ 45°C มีค่า %FAME ต่อบาทมากกว่าที่ระดับอุณหภูมิ 30 และ 60°C ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณเมทานอลที่ใช้เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ %FAME ต่อบาทลดลง เนื่องจากมีการใช้ปริมาณเมทานอลในปริมาณสูงขึ้นส่งผลให้ค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงเพิ่มขึ้น แต่สำหรับปัจจัยทางด้านเวลาที่ใช้ในการทดลองที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ %FAME ต่อบาทที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับทุกช่วงเวลา 30 , 60 และ 120 นาที

5.1.4 ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ต่อค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้

อิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ต่อค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ (%Yield ต่อบาท) คือ เมื่อปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) ในน้ำมันปาล์มเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้%Yield ต่อบาท ลดลง สำหรับระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองสูงขึ้น ส่งผลให้ %Yieldต่อบาทเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งพบว่า ที่ระดับอุณหภูมิ 60°C มีค่า %Yield ต่อบาทมากกว่าที่ระดับอุณหภูมิ 30 และ 45°C ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณเมทานอลที่ใช้เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ %Yieldต่อบาทลดลง เนื่องจากมีการใช้ปริมาณเมทานอลในปริมาณสูงขึ้นส่งผลให้ค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงเพิ่มขึ้น แต่สำหรับปัจจัยทางด้านเวลาที่ใช้ในการทดลองที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ %Yieldต่อบาทที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับทุกช่วงเวลา 30 , 60 และ 120 นาที

5.1.5 ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อพลังงานที่ใช้รวมทั้งหมดในการทดลอง

อิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณของเมทิลเอสเตอร์ต่อพลังงานที่ใช้รวมทั้งหมดในการทดลอง (%FAME ต่อกิโลจูล) คือ เมื่อปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) ในน้ำมันปาล์มเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้%FAME ต่อกิโลจูล ลดลง สำหรับระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองสูงขึ้น ส่งผลให้ %FAME ต่อกิโลจูล เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งพบว่า ที่ระดับอุณหภูมิ 30°C มีค่า %FAME ต่อกิโลจูลมากกว่าที่ระดับอุณหภูมิ 45และ 60°C ตามลำดับโดยมีค่า %FAME ต่อกิโลจูลแตกต่างกันอย่างชัดเจน ในขณะที่ปริมาณเมทานอลที่ใช้เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ %FAME ต่อกิโลจูล เพิ่มขึ้นและสำหรับปัจจัยด้านเวลาที่ใช้ในการทดลองที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ %FAME ต่อกิโลจูล มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยทางด้านอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองมีผลต่อ %FAME ต่อกิโลจูล มากที่สุด เนื่องจาก %FAME ต่อกิโลจูลที่ได้จากการทดลองในแต่ละระดับอุณหภูมิ มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน อีกทั้งยังพบว่าที่สภาวะการทดลองที่ระดับอุณหภูมิ 30°C ให้ %FAME ต่อกิโลจูล สูงสุดสำหรับทุกสภาวะการทดลอง

5.1.6 ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ต่อพลังงานที่ใช้รวมทั้งหมด

อิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ต่อพลังงานที่ใช้รวมทั้งหมดในการทดลอง (%Yield ต่อกิโลจูล) คือ เมื่อปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) ในน้ำมันปาล์มเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้%Yieldต่อกิโลจูล ลดลง สำหรับระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองสูงขึ้น ส่งผลให้ %Yieldต่อกิโลจูล เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งพบว่า ที่ระดับอุณหภูมิ 30°C มีค่า %Yield ต่อกิโลจูลมากกว่าที่ระดับอุณหภูมิ 45และ 60°C ตามลำดับโดยมีค่า %Yield ต่อกิโลจูลแตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยทางด้านอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองมีผลต่อ %Yield ต่อกิโลจูลมากที่สุด อีกทั้งยังพบว่าที่สภาวะการทดลองที่ระดับอุณหภูมิ 30°C ให้ %Yield ต่อกิโลจูล สูงสุดสำหรับทุกสภาวะการทดลอง ในขณะที่ปริมาณเมทานอลที่ใช้เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ %Yieldต่อกิโลจูลเพิ่มขึ้นและสำหรับปัจจัยด้านเวลาที่ใช้ในการทดลองที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ %Yieldต่อกิโลจูลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นโดยมีแนวโน้มคล้ายคลึงกับ %FAME ต่อกิโลจูล

5.2 การวิเคราะห์สภาวะการทดลองที่ในการผลิตไบโอดีเซล

5.2.1 สภาวะการทดลองที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซล

ในงานวิจัยนี้มีการกำหนดเกณฑ์การพิจารณาเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล โดยมีตัวแปรตอบสนองที่สำคัญทั้งหมด 3 ตัวแปร ได้แก่ ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลอง (%Yield) และปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (%FAME ต่อบาท) เป็นตัวช่วยในการตัดสินใจพิจารณาเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล โดยคำนึงถึงประสิทธิภาพของไบโอดีเซลโดยรวม (เชิงคุณภาพ), ต้นทุนที่ใช้ในการผลิต (เชิงเศรษฐศาสตร์) และการคำนึงควบคู่กันระหว่างประสิทธิภาพของไบโอดีเซลกับต้นทุนที่ใช้ในการผลิต (ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงเศรษฐศาสตร์) อีกทั้งยังมีด้านพลังงานมาเกี่ยวข้องด้วย เป็นต้น

ปริมาณเมทิลเอสเตอร์และร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์สูงสุด

ในงานวิจัยนี้ ได้เสนอแนวทางการเลือกสภาวะของการทดลองที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล สำหรับเกณฑ์ที่ (1.) คือ เกณฑ์การพิจารณาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) และร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) สูงสุด ซึ่งเป็นเกณฑ์การพิจารณาที่คำนึงถึงประสิทธิภาพของไบโอดีเซลเป็นสำคัญ (เชิงคุณภาพ) โดยไม่ได้คำนึงถึงต้นทุนที่ใช้ในการผลิต (เชิงเศรษฐศาสตร์) เหมาะสำหรับผู้จัดการโรงงานหรือผู้สนใจเกี่ยวกับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วโดยเน้นทางด้านคุณภาพของไบโอดีเซลเป็นประเด็นหลัก โดยอาจจะมีความ

สนใจพิจารณาเลือกสภาวะการทดลองที่มีค่า %FAME และ %Yield สูงสุด โดยไม่คำนึงถึงต้นทุนในการผลิตหรืออาจจะคำนึงถึงต้นทุนเป็นประเด็นรองลงมาจากด้านคุณภาพของไบโอดีเซล

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพิจารณาเลือกสภาวะการทดลองที่มีค่าปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) และร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่มีค่าสูงสุด ในแต่ละระดับของปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มตั้งต้น จากทุกสภาวะการทดลอง ซึ่งได้ถูกสรุปและแสดงไว้ดังตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1 แสดงการพิจารณาเลือกสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้ว ซึ่งมีระดับกรดไขมันอิสระ (%FFA)แตกต่างกัน สำหรับการพิจารณาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) และร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) สูงสุด

เกณฑ์ที่ (1.) พิจารณาปริมาณเมทิลเอสเตอร์และร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์สูงสุด						
สภาวะการทดลอง				ผลที่ได้จากการทดลอง		
%FFA (%)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตรน้ำมัน)	%FAME (%)	%Yield (%)	%FAME ต่อ บาท
0.427	60	30	25	96.81	97.30	3.050
0.512	60	30	25	92.70	95.53	3.138
0.630	60	30	25	93.45	94.90	3.105
1.435	60	30	25	91.17	88.48	3.142

จากตารางที่ 5-1 พบว่าสำหรับสภาวะการทดลองที่ระดับอุณหภูมิ 60 °C เวลาที่ใช้ 30 นาทีและปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง 25%โดยปริมาณน้ำมันปาล์ม เป็นสภาวะที่ได้ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) และร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) สูงสุดซึ่งจากข้อมูลในตารางแสดงในเห็นว่า เป็นสภาวะการทดลองเดียวกันสำหรับทุกระดับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้น (0.427, 0.512, 0.630 และ 1.435%FFA)

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า การพิจารณาเลือกสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล สำหรับเกณฑ์การพิจารณาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) และร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) สูงสุด คือ การผลิตไบโอดีเซลจากตัวอย่างน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีระดับกรดไขมันอิสระเท่ากับ 0.427%FFA ที่ระดับอุณหภูมิ 60 °C เวลาที่ใช้ 30 นาทีและปริมาณเมทา

นอลที่ใช้ในการทดลอง 25%โดยปริมาณน้ำมันปาล์ม พบว่า มีปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) สูงสุด เท่ากับ 96.81% ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์สูงสุด เท่ากับ 97.30% และมีค่า %FAME ต่อบาท เท่ากับ 3.050

ค่าปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อบาทสูงสุด

ในงานวิจัยนี้ ได้เสนอแนวทางการเลือกสภาวะของการทดลองที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล สำหรับเกณฑ์ที่ (2.) คือ เกณฑ์การพิจารณาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อบาทหรือ %FAME ต่อบาท สูงสุด เป็นเกณฑ์การพิจารณาที่คำนึงถึงต้นทุนการผลิตของไบโอดีเซลเป็นสำคัญ (เชิงเศรษฐศาสตร์) โดยไม่ได้คำนึงถึงประสิทธิภาพของไบโอดีเซล (เชิงคุณภาพ) เหมาะสำหรับผู้จัดการโรงงานหรือผู้สนใจเกี่ยวกับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วโดยเน้นทางด้านต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลเป็นประเด็นหลัก โดยอาจจะมีความสนใจพิจารณาเลือกสภาวะการทดลองที่มีค่าปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (%FAME ต่อบาท) สูงสุด โดยไม่คำนึงถึงคุณภาพหรือประสิทธิภาพของไบโอดีเซลหรืออาจจะคำนึงถึงด้านคุณภาพเป็นประเด็นรองลงมาจากด้านต้นทุนในการผลิต

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพิจารณาเลือกสภาวะการทดลองที่มีค่าปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (%FAME ต่อบาท) สูงสุด ในแต่ละระดับของปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มตั้งต้น จากทุกสภาวะการทดลอง ซึ่งได้ถูกสรุปและแสดงไว้ดังตารางที่ 5-2

ตารางที่ 5-2แสดงการพิจารณาเลือกสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้ว ซึ่งมีระดับกรดไขมันอิสระ (%FFA)แตกต่างกัน สำหรับการพิจารณาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (%FAME ต่อบาท) สูงสุด

เกณฑ์ที่ (2.) พิจารณาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (%FAME ต่อบาท) สูงสุด						
สภาวะการทดลอง				ผลที่ได้จากการทดลอง		
%FFA (%)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตรน้ำมัน)	%FAME (%)	%Yield (%)	%FAME ต่อ บาท
0.427	45	30	15	91.35	75.09	4.380
0.512	45	30	15	83.01	72.38	4.148
0.630	45	30	15	83.01	71.78	4.126
1.435	45	30	15	77.10	70.93	3.840

จากตารางที่ 5-2 พบว่าสำหรับสภาวะการทดลองที่ระดับอุณหภูมิ 45 °C เวลาที่ใช้ 30 นาทีและปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง 15%โดยปริมาณน้ำมันปาล์ม เป็นสภาวะที่ได้ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (%FAME ต่อบาท) สูงสุด ซึ่งจากข้อมูลในตารางแสดงในเห็นว่าเป็นสภาวะการทดลองเดียวกันสำหรับทุกระดับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้น (0.427, 0.512, 0.630 และ 1.435%FFA)

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า การพิจารณาเลือกสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล สำหรับเกณฑ์การพิจารณาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (%FAME ต่อบาท) สูงสุด คือ การผลิตไบโอดีเซลจากตัวอย่างน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีระดับกรดไขมันอิสระเท่ากับ 0.427%FFA ที่ระดับอุณหภูมิ 45 °C เวลาที่ใช้ 30 นาที และปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง 15%โดยปริมาณน้ำมันปาล์ม พบว่า มีค่า %FAME ต่อบาทสูงสุด เท่ากับ 4.380 ส่วนปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้เท่ากับ 91.35% และร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ เท่ากับ 75.09%

ค่าปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อบาทสูงสุดที่ระดับอุณหภูมิต่ำสุด

ในงานวิจัยนี้ ได้เสนอแนวทางการเลือกสภาวะของการทดลองที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล สำหรับเกณฑ์ที่ (3.) คือ เกณฑ์การพิจารณาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท หรือ %FAME ต่อบาทสูงสุด ที่ระดับอุณหภูมิต่ำสุด (ที่ระดับอุณหภูมิ 30°C สำหรับงานวิจัยนี้) ซึ่งเป็นเกณฑ์การพิจารณาที่คำนึงถึงต้นทุนการผลิตของไบโอดีเซลเป็นสำคัญ (เชิงเศรษฐศาสตร์) อีกทั้งยังเป็นการเน้นการประหยัดพลังงานเนื่องจากเป็นสภาวะที่มีการทดลองที่อุณหภูมิต่ำสุดจากการศึกษาในงานวิจัยนี้ โดยมีการคำนึงถึงประสิทธิภาพของไบโอดีเซล (เชิงคุณภาพ) เป็นประเด็นที่รองลงมาเนื่องจากสภาวะที่มีค่า %FAME ต่อบาทสูงสุดที่สภาวะการทดลองที่อุณหภูมิต่ำจะให้ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) สูงสุดเช่นกันในทุกระดับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มใช้แล้ว (%FFA) เหมาะสำหรับผู้จัดการโรงงานหรือผู้สนใจเกี่ยวกับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วโดยเน้นทางด้านต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลและต้องการประหยัดพลังงานที่ใช้ในการผลิตเป็นประเด็นหลักในการเลือกสภาวะที่เหมาะสม

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพิจารณาเลือกสภาวะการทดลองที่มีค่าปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท หรือ %FAME ต่อบาทสูงสุด ที่ระดับอุณหภูมิต่ำสุด (ที่ระดับอุณหภูมิ 30°C สำหรับงานวิจัยนี้) ในแต่ละระดับของปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มตั้งต้น จากทุกสภาวะการทดลอง ซึ่งได้ถูกสรุปและแสดงไว้ดังตารางที่ 5-3

ตารางที่ 5-3 แสดงการพิจารณาเลือกสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้ว ซึ่งมีระดับกรดไขมันอิสระ (%FFA) แตกต่างกัน สำหรับการพิจารณาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อบาทหรือ %FAME ต่อบาทสูงสุด ที่ระดับอุณหภูมิต่ำ (ที่ระดับอุณหภูมิ 30°C)

เกณฑ์ที่ (3.) พิจารณาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (%FAME ต่อบาท) สูงสุด ที่อุณหภูมิต่ำสุด						
สภาวะการทดลอง				ผลที่ได้จากการทดลอง		
%FFA (%)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตรน้ำมัน)	%FAME (%)	%Yield (%)	%FAME ต่อ บาท
0.427	30	60	15	86.38	80.05	3.999
0.512	30	60	15	80.89	76.98	3.805
0.630	30	60	15	77.69	75.80	3.726
1.435	30	60	15	69.34	73.94	3.355

จากตารางที่ 5-3 พบว่าสำหรับสภาวะการทดลองที่ระดับอุณหภูมิ 30 °C เวลาที่ใช้ 60 นาทีและปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง 15%โดยปริมาณน้ำมันปาล์ม เป็นสภาวะที่ได้ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (%FAME ต่อบาท) สูงสุด ที่ระดับอุณหภูมิต่ำสุด (30°C) ซึ่งจากข้อมูลในตารางแสดงในเห็นว่า เป็นสภาวะการทดลองเดียวกันสำหรับทุกระดับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้น (0.427, 0.512, 0.630 และ 1.435%FFA)

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า การพิจารณาเลือกสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล สำหรับเกณฑ์การพิจารณาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (%FAME ต่อบาท) สูงสุด ที่ระดับอุณหภูมิต่ำสุด คือ การผลิตไบโอดีเซลจากตัวอย่างน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีระดับกรดไขมันอิสระเท่ากับ 0.427%FFA ที่ระดับอุณหภูมิ 30 °C เวลาที่ใช้ 60 นาทีและปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง 15%โดยปริมาณน้ำมันปาล์ม พบว่า มีค่า %FAME ต่อบาทสูงสุด เท่ากับ 3.999 ส่วนปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้เท่ากับ 86.38% และร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์เท่ากับ 80.05%

จากตารางที่ 5-1ถึง 5-3ได้แสดงเกณฑ์การพิจารณาทั้ง 3 เกณฑ์สำหรับการเลือกสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้ว ซึ่งมีระดับกรดไขมันอิสระ (%FFA)แตกต่างกัน โดยใช้ค่าใช้จ่ายโดยรวมหรือ %FAME ต่อบาทในการตัดสินใจ ดังนั้นสามารถสรุปผลการเลือกสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลได้ดังตารางที่ 5-4

ตารางที่ 5-4 แสดงการสรุปสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล

เกณฑ์การพิจารณา	สภาวะการทดลอง				ผลที่ได้จากการทดลอง		
	%FFA (%)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตรน้ำมัน)	%FAME (%)	%Yield (%)	%FAME ต่อบาท
ค่า %FAME และ %Yield สูงสุด	0.427	60	30	25	96.81	97.30	3.050
ค่า %FAME ต่อบาทสูงสุด	0.427	45	30	15	91.35	75.09	4.380
ค่า %FAME ต่อบาทสูงสุดที่อุณหภูมิต่ำสุด	0.427	30	60	15	86.38	80.05	3.999

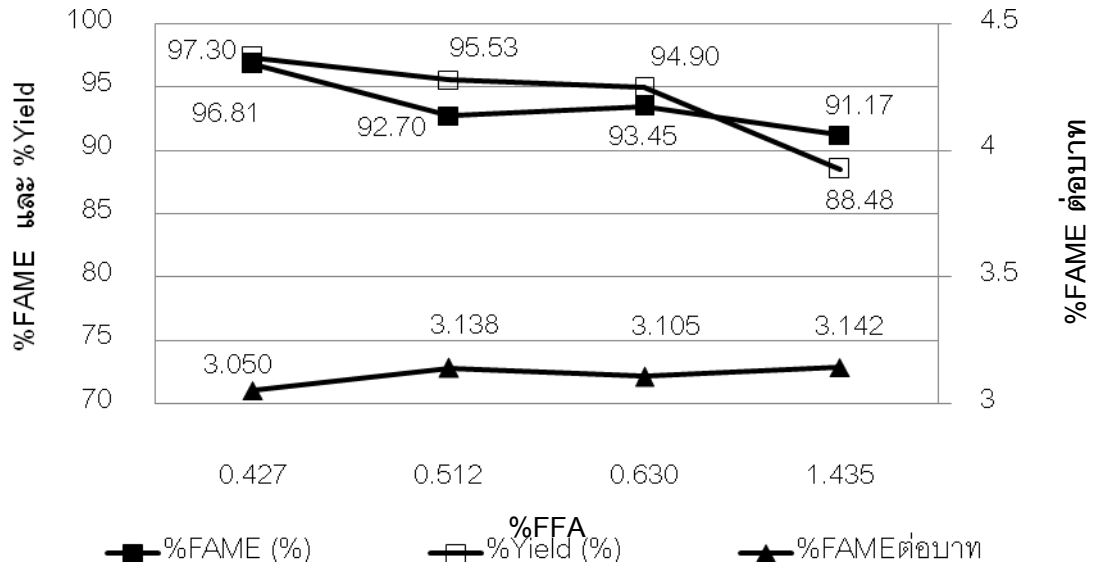
5.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลกับปริมาณกรดไขมันอิสระที่แตกต่างกัน

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของไบโอดีเซงกับสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งประสิทธิภาพของไบโอดีเซลที่สนใจ ได้แก่

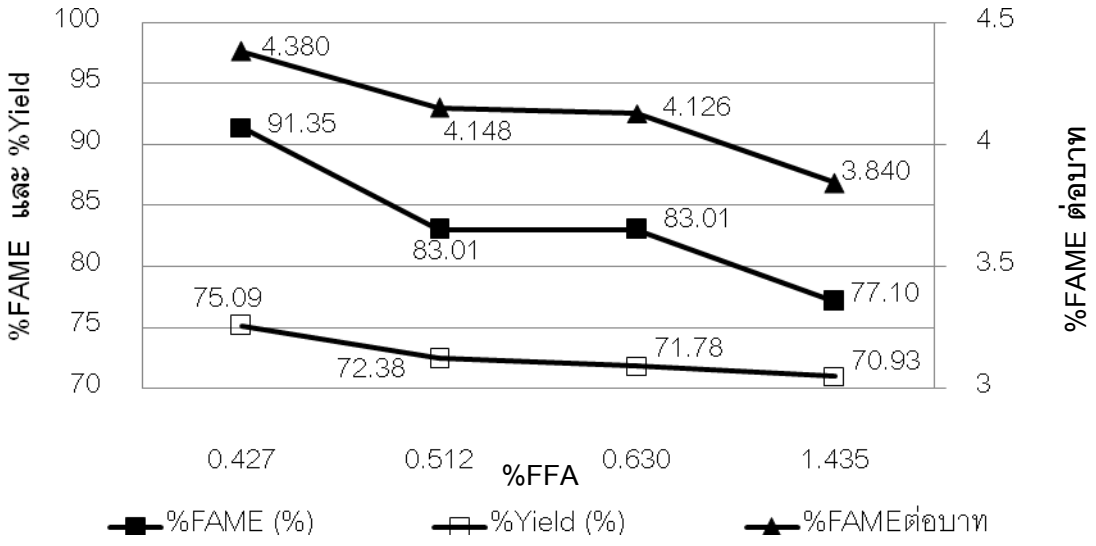
- ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)
- ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)
- ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ (%FAME ต่อบาท)

พร้อมทั้งศึกษาแนวโน้มและความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพขิงไบโอดีเซลกับสภาวะที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล โดยทำการศึกษาความสัมพันธ์สำหรับปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้นที่แตกต่างกัน เพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ เพื่อศึกษาปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีผลต่อประสิทธิภาพของน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากการ

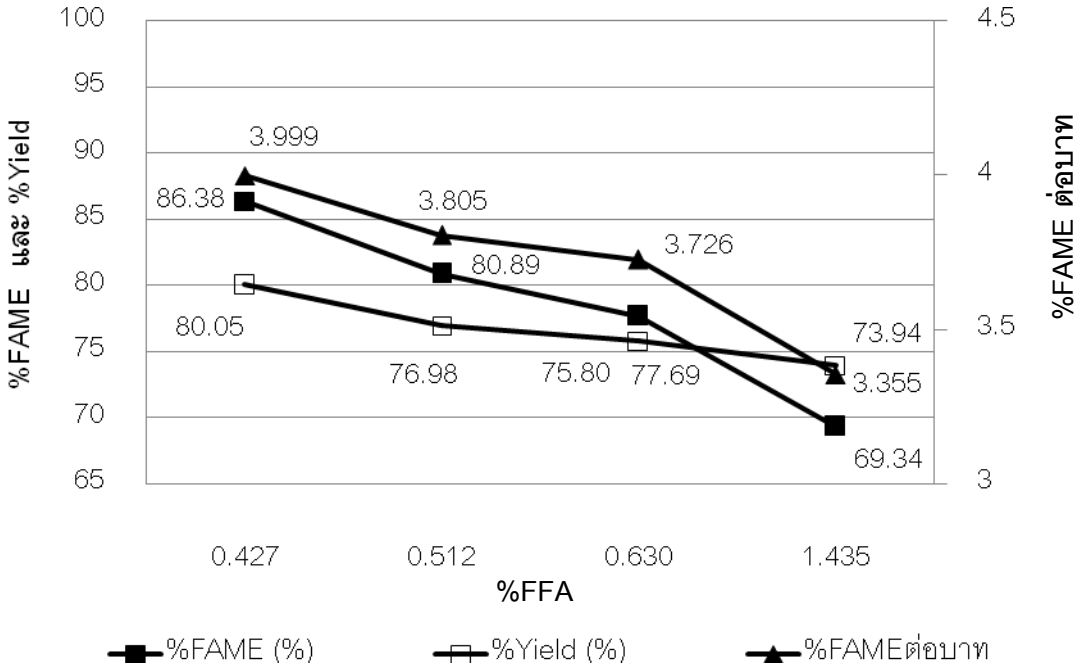
ทดลอง ดังนั้นจากตารางที่ 5-1ถึง 5-3สามารถศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม (%FFA) กับประสิทธิภาพของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลอง โดยใช้กราฟเส้นเพื่อศึกษาแนวโน้มและความสัมพันธ์ โดยถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 5-1 ถึง 5-3 ตามลำดับ



รูปที่ 5-1 แสดงกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของ %FAME, %Yield และ %FAME ต่อบาทที่ได้จากการทดลองที่ระดับอุณหภูมิ 60°C, เวลา 30 นาที และเมทานอล 25% โดยปริมาตรของน้ำมัน เกณฑ์การพิจารณาที่ (1.)ค่า %FAME และ %Yield สูงสุด



รูปที่ 5-2 แสดงกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของ %FAME, %Yield และ %FAME ต่อบาทที่ได้จากการทดลองที่ระดับอุณหภูมิ 45 °C เวลา 30 นาที และเมทานอล 15% โดยปริมาตรของน้ำมัน เกณฑ์การพิจารณาที่ (2.)ค่า %FAME ต่อบาทสูงสุด



รูปที่ 5-3 แสดงกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของ %FAME, %Yield และ %FAME ต่อบาทที่ได้จากการทดลองที่ระดับอุณหภูมิ 30 °C เวลา 60 นาที และเมทานอล 15% โดยปริมาตรของน้ำมัน เกณฑ์การพิจารณาที่ (3.)ค่า %FAME ต่อบาทสูงสุดที่ระดับอุณหภูมิต่ำ (30°C)

จากรูปที่ 5-1 ถึง 5-3 แสดงกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของ %FAME, %Yield และ %FAME ต่อบาท กับปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มใช้แล้ว (%FFA) ทั้ง 3 เกณฑ์การพิจารณาเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลซึ่งมีวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันได้แก่ เกณฑ์ (1.) ค่า %FAME และ %Yield สูงสุด เกณฑ์ (2.) ค่า %FAME ต่อบาทสูงสุด และเกณฑ์ (3.) ค่า %FAME ต่อบาทสูงสุด ที่ระดับอุณหภูมิต่ำสุด (30°C) ตามลำดับสามารถอธิบายได้ดังนี้

จากรูปที่ 5-1 สำหรับเกณฑ์การพิจารณา (1.) ค่า %FAME และ %Yield สูงสุด ที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลจากตัวอย่างน้ำมันปาล์มใช้แล้วทั้ง 4 ระดับปริมาณของกรดไขมันอิสระ พบว่าสำหรับการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิ 60 °C เวลาที่ใช้ 30 นาทีและปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง 25%โดยปริมาณน้ำมันปาล์ม ที่ระดับปริมาณกรดไขมันอิสระ เท่ากับ 0.427%FFA มีปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)สูงสุด เท่ากับ 96.81% ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) สูงสุด เท่ากับ 97.30% และมีค่า %FAME ต่อบาท เท่ากับ 3.050

จากรูปที่ 5-2 สำหรับเกณฑ์การพิจารณา (2.) ค่า %FAME ต่อบาทสูงสุด ที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลจากตัวอย่างน้ำมันปาล์มใช้แล้วทั้ง 4 ระดับปริมาณของกรดไขมันอิสระ พบว่า สำหรับการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิ 45 °C เวลาที่ใช้ 30 นาทีและปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง 15%โดยปริมาณน้ำมันปาล์ม ที่ระดับปริมาณกรดไขมันอิสระ เท่ากับ 0.427%FFA มีค่า %FAME ต่อบาทสูงสุด เท่ากับ 4.380 ส่วนปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)ที่ได้เท่ากับ 91.35% และร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) เท่ากับ 75.09%

จากรูปที่ 5-3 สำหรับเกณฑ์การพิจารณา (3.) ค่า %FAME ต่อบาทสูงสุด (ที่ระดับอุณหภูมิต่ำ เท่ากับ 30°C) ที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลจากตัวอย่างน้ำมันปาล์มใช้แล้วทั้ง 4 ระดับปริมาณของกรดไขมันอิสระ พบว่า สำหรับการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิ 30 °C เวลาที่ใช้ 60 นาทีและปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง 15%โดยปริมาณน้ำมันปาล์ม ที่ระดับปริมาณกรดไขมันอิสระ เท่ากับ 0.427%FFA มีค่า %FAME ต่อบาทสูงสุด เท่ากับ 3.999 ส่วนปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้เท่ากับ 86.38% และร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) เท่ากับ 80.05%

ดังนั้นจากการอภิปรายผลการทดลองที่ได้กล่าวมาข้างต้น พบว่า สามารถทำการสรุปการอภิปรายผลการทดลองได้ว่า สำหรับการทดลองที่ระดับกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นระดับที่ส่งผลให้ได้ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) สูงสุดสำหรับทุกการทดลอง และการทดลองเวลาที่ใช้ 30 นาที พบว่า ให้ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) สูงสุดเช่นกัน

สำหรับปัจจัยทางด้านอุณหภูมิและปริมารณเมาทานอลที่ใช้ในการทดลองมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนจากกราฟเปรียบเทียบผลการทดลองข้างต้น จึงอธิบายได้ว่า ปัจจัยด้านอุณหภูมิและปริมาณเมทานอลที่ใช้มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ส่วนปัจจัยทางด้านเวลานั่น ซึ่งทั้ง 3 ระดับปัจจัยให้ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ใก้เคียงกัน ในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้หลักการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อมาทำการทดสอบว่า ปัจจัยทางด้านเวลามีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) หรือไม่ โดยใช้ Hypothesis Testing ซึ่งทดสอบสมมติฐานโดยโปรแกรม Minitab

Hypothesis Testing (1.) :

ทดสอบว่า ค่าเฉลี่ยของปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้จากการทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ณ สภาวะเวลาที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลแตกต่างกัน (ที่ 30 และ 60 นาที) แต่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA และที่ปริมาณเมทานอลที่ใช้ 15%โดยปริมาตรของน้ำมันเดียวกัน สำหรับทุกระดับอุณหภูมิ

กำหนดให้ - $\mu_{30นาที}$ แทน ค่าเฉลี่ยของ %FAME ที่ใช้เวลาทดลอง 30 นาที

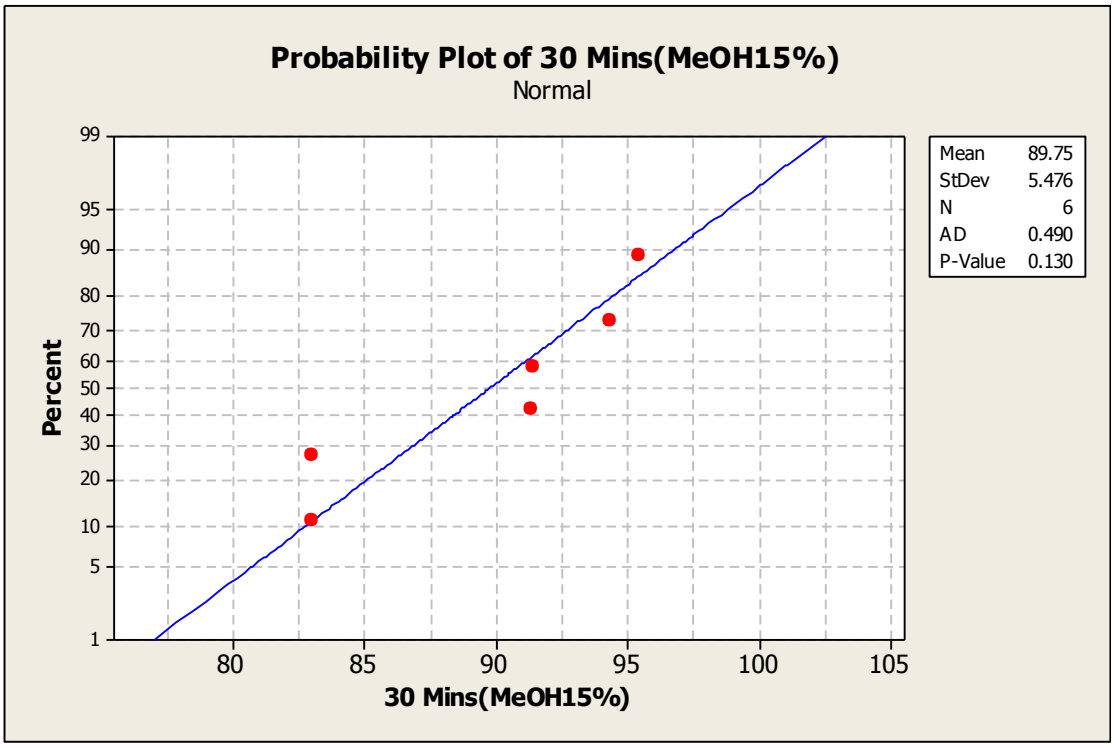
- $\mu_{60นาที}$ แทน ค่าเฉลี่ยของ %FAME ที่ใช้เวลาทดลอง 60 นาที

- ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ ค่า α = 0.05%

Hypothesis Testing $H_0 : \mu_{30นาที} = \mu_{60นาที}$

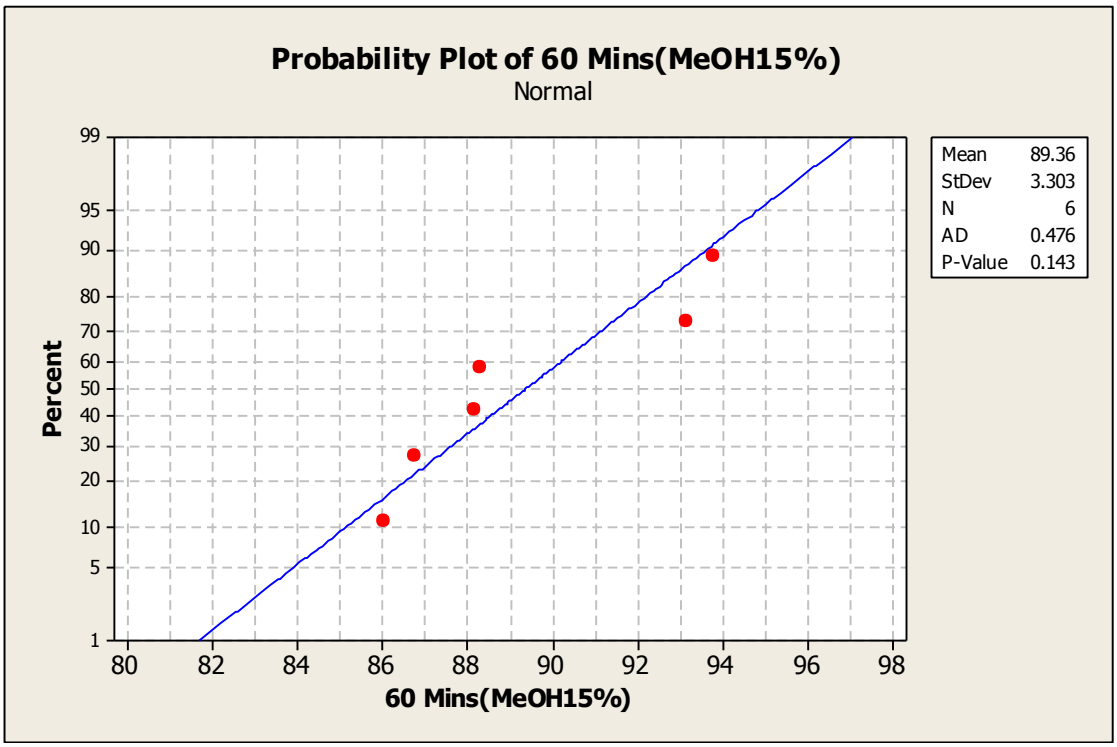
$H_1 : \mu_{30นาที} \neq \mu_{60นาที}$

เลือกประเภทของ Test : Paired t-test



รูปที่ 5-4 แสดง Probability Plot ของ %FAME สำหรับการทดลองที่ใช้เมทานอล 15% โดยปริมาตรน้ำมันปาล์มใช้แล้ว เมื่อใช้เวลา 30 นาที

จากการวิเคราะห์ Normality Test ของ %FAME สำหรับการทดลองที่ใช้เมทานอล 15% โดยปริมาตรน้ำมันปาล์มใช้แล้ว เมื่อใช้เวลา 30 นาที พบว่า ค่า P-Value เท่ากับ 0.130 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่า ค่า %FAME สำหรับการทดลองที่ใช้เมทานอล 15% โดยปริมาตรน้ำมันปาล์มใช้แล้ว เมื่อใช้เวลา 30 นาทีมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution)



รูปที่ 5-5 แสดง Probability Plot ของ %FAME สำหรับการทดลองที่ใช้เมทานอล 15% โดยปริมาตรน้ำมันปาล์มใช้แล้ว เมื่อใช้เวลา 60 นาที

จากการวิเคราะห์ Normality Test ของ %FAME สำหรับการทดลองที่ใช้เมทานอล 15% โดยปริมาตรน้ำมันปาล์มใช้แล้ว เมื่อใช้เวลา 60 นาที พบว่า ค่า P-Value เท่ากับ 0.143 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่า ค่า %FAME สำหรับการทดลองที่ใช้เมทานอล 15% โดยปริมาตรน้ำมันปาล์มใช้แล้ว เมื่อใช้เวลา 60 นาทีมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution)

Paired T-Test and CI: 30 Mins(MeOH15%), 60 Mins(MeOH15%)

```
Paired T for 30 Mins(MeOH15%) - 60 Mins(MeOH15%)

                     N   Mean  StDev  SE Mean
30 Mins(MeOH15%)     6  89.75   5.48     2.24
60 Mins(MeOH15%)     6  88.53   3.86     1.58
Difference           6   1.22   4.09     1.67


95% CI for mean difference: (-3.07, 5.51)
T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0):
T-Value = 0.73  P-Value = 0.497
```

จากการวิเคราะห์สมมติฐานประเภท Paired t-test โดยใช้โปรแกรม Minitab ของ %FAME สำหรับการทดลองที่ใช้เมทานอล 15% โดยปริมาตรน้ำมันปาล์มใช้แล้ว เมื่อใช้เวลา 30 และ 60 นาที พบว่า ค่า P-Value เท่ากับ 0.497 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 (Do not Reject H_0) แสดงว่า ค่าเฉลี่ยของ %FAME สำหรับการทดลองที่ระยะเวลา 30 และ 60 นาที ณ สภาวะการทดลองที่ใช้ปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA และที่ปริมาณเมทานอล15%โดยปริมาตรของน้ำมันเดียวกัน ไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญ

Hypothesis Testing (2.) :

ทดสอบว่า ค่าเฉลี่ยของปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้จากการทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ณ สภาวะเวลาที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลแตกต่างกัน (ที่ 30, 60 และ 120 นาที) แต่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA และที่ปริมาณเมทานอลที่ใช้ 25%โดยปริมาตรของน้ำมันเดียวกัน สำหรับทุกระดับอุณหภูมิ

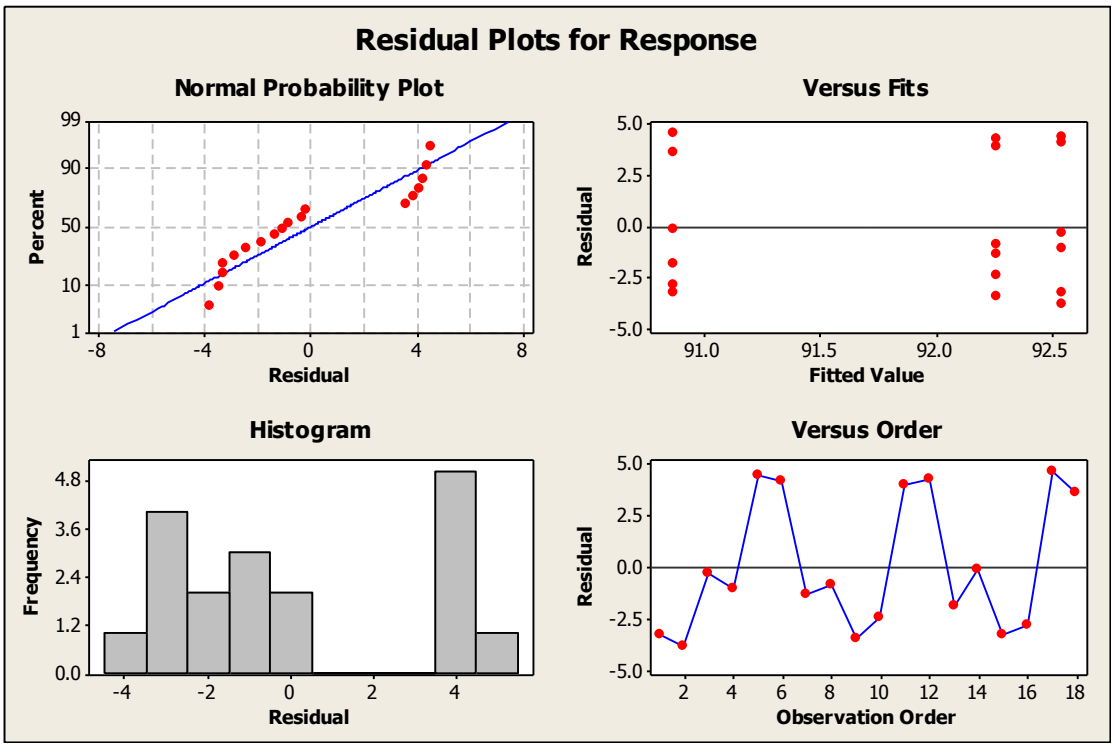
<u>กำหนดให้</u> - $\mu_{30นาที}$ แทน ค่าเฉลี่ยของ %FAME ที่ใช้เวลาทดลอง 30 นาที

- $\mu_{60นาที}$ แทน ค่าเฉลี่ยของ %FAME ที่ใช้เวลาทดลอง 60 นาที
- $\mu_{120นาที}$ แทน ค่าเฉลี่ยของ %FAME ที่ใช้เวลาทดลอง 120 นาที
- ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ ค่า α = 0.05%

<u>Hypothesis Testing</u> $H_0 : \mu_{30นาที} = \mu_{60นาที} = \mu_{120นาที}$

H_1 : at least 2_i's are not equal

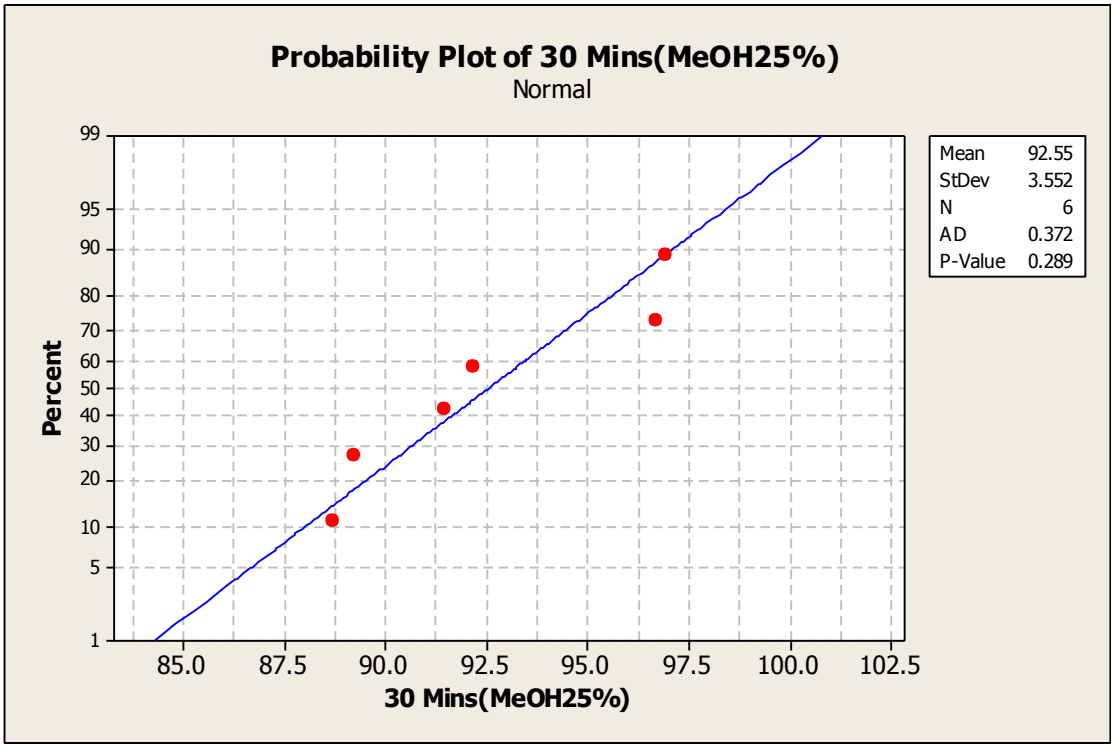
<u>เลือกประเภทของ Test</u> : ANOVA (One Way)



รูปที่ 5-6 แสดง Residual Plots for Response ของ %FAME สำหรับการทดลองที่ใช้เมทานอล 25% โดยปริมาตรน้ำมันปาล์มใช้แล้ว เมื่อใช้เวลา 30, 60 และ 120 นาที

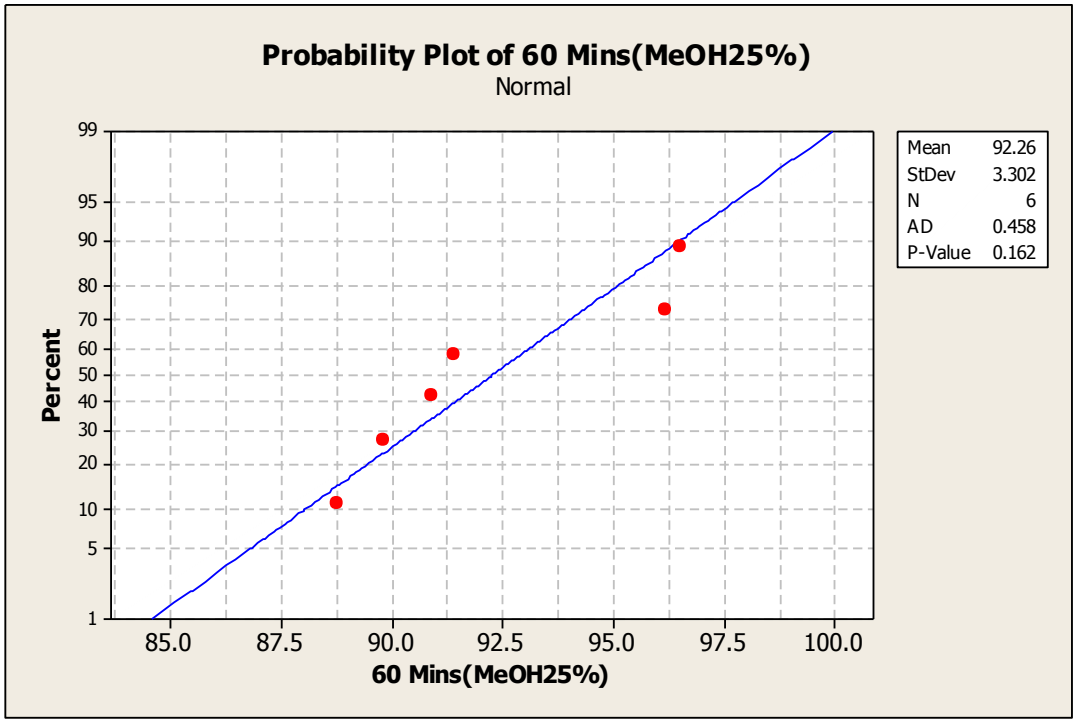
จากกราฟ Residual versus Fitted Value แสดงให้เห็นว่าค่า %FAME ที่ได้ในการทดลองแต่ละระยะเวลา มีค่าความแปรปรวนใกล้เคียงกัน และจากกราฟ Residual versus Observation Order พบว่าข้อมูลมีการกระจายอย่างสุ่มรอบๆค่า Residual เท่ากับ 0

จากราฟ Normal Probability Plot และ Histogram พบว่า Residual ค่อนข้างมีแนวโน้มการกระจายตัวเป็นปกติ เนื่องจากวางตัวอยู่บนแนวเส้นตรง แต่เนื่องจากกราฟที่ได้จาก Minitab ข้างต้น ไม่ได้แสดงค่า P-Value ซึ่งในบางกรณีที่กราฟไม่ได้วางตัวบนแนวเส้นตรงอย่างชัดเจน อาจสรุปได้ยากว่า Residual มีการกระจายแบบปกติหรือไม่ จึงอาจกระทำการทดสอบสมมติฐานข้อนี้ได้โดยการทดสอบ Normality Test ว่าข้อมูลค่าเฉลี่ยของ %FAME ที่ได้จากการทดลองที่เวลาแตกต่างกันมีการกระจายแบบปกติแทน เพราะสามารถอ้างอิงได้เช่นกันว่า Residual มีการกระจายแบบปกติ โดยสามารถวิเคราะห์ Normality Test แยกในแต่ละชุดข้อมูลของระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ 30, 60 และ 120 นาที ดังรูปที่ 5-7 ถึง 5-9 ตามลำดับ



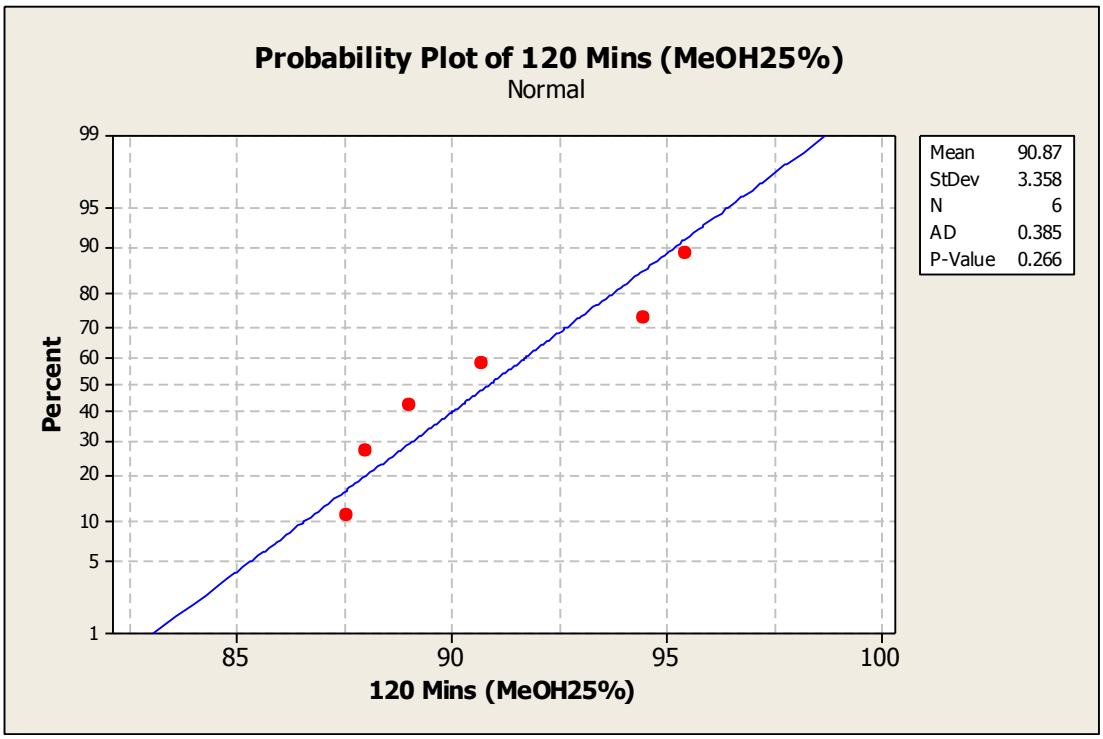
รูปที่ 5-7 แสดง Probability Plot ของ %FAME สำหรับการทดลองที่ใช้เมทานอล 25% โดยปริมาตรน้ำมันปาล์มใช้แล้ว เมื่อใช้เวลา 30 นาที

จากการวิเคราะห์ Normality Test ของ %FAME สำหรับการทดลองที่ใช้เมทานอล 25% โดยปริมาตรน้ำมันปาล์มใช้แล้ว เมื่อใช้เวลา 30 นาที พบว่า ค่า P-Value เท่ากับ 0.289 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่า ค่า %FAME สำหรับการทดลองที่ใช้เมทานอล 25% โดยปริมาตรน้ำมันปาล์มใช้แล้ว เมื่อใช้เวลา 30 นาทีมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution)



รูปที่ 5-8 แสดง Probability Plot ของ %FAME สำหรับการทดลองที่ใช้เมทานอล 25% โดยปริมาตรน้ำมันปาล์มใช้แล้ว เมื่อใช้เวลา 60 นาที

จากการวิเคราะห์ Normality Test ของ %FAME สำหรับการทดลองที่ใช้เมทานอล 25% โดยปริมาตรน้ำมันปาล์มใช้แล้ว เมื่อใช้เวลา 60 นาที พบว่า ค่า P-Value เท่ากับ 0.162 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่า ค่า %FAME สำหรับการทดลองที่ใช้เมทานอล 25% โดยปริมาตรน้ำมันปาล์มใช้แล้ว เมื่อใช้เวลา 60 นาทีมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution)



รูปที่ 5-9 แสดง Probability Plot ของ %FAME สำหรับการทดลองที่ใช้เมทานอล 25% โดยปริมาตรน้ำมันปาล์มใช้แล้ว เมื่อใช้เวลา 120 นาที

จากการวิเคราะห์ Normality Test ของ %FAME สำหรับการทดลองที่ใช้เมทานอล 25% โดยปริมาตรน้ำมันปาล์มใช้แล้ว เมื่อใช้เวลา 120 นาที พบว่า ค่า P-Value เท่ากับ 0.266 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่า ค่า %FAME สำหรับการทดลองที่ใช้เมทานอล 25% โดยปริมาตรน้ำมันปาล์มใช้แล้ว เมื่อใช้เวลา 120 นาทีมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution)

One-way ANOVA: Response versus Time (Mins)

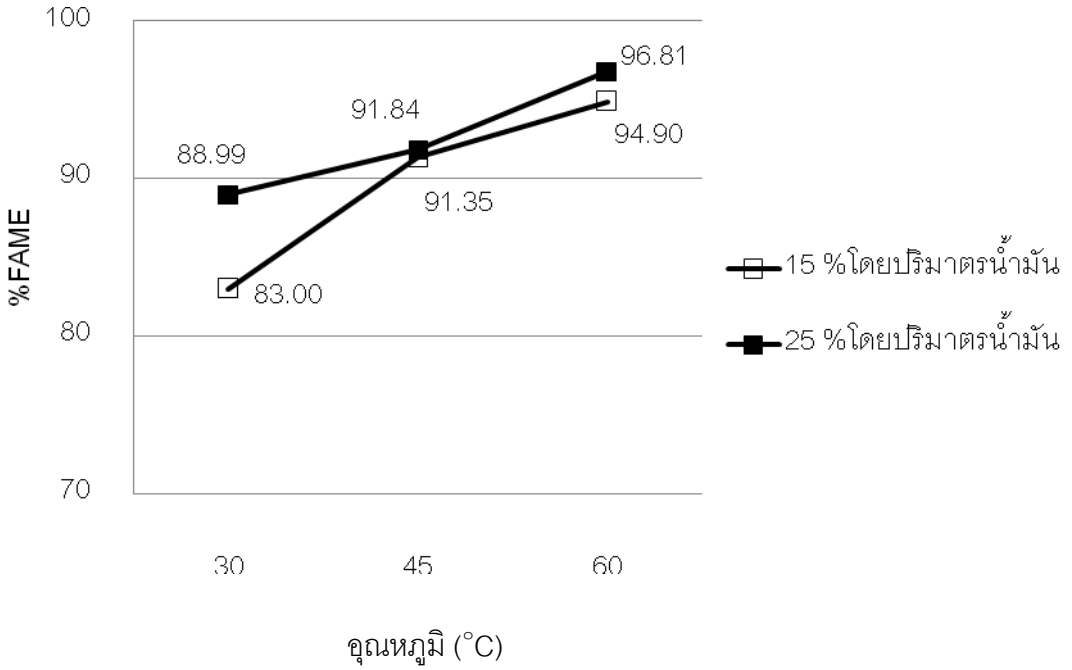
```
Source        DF      SS     MS      F      P
Time (Mins)    2     9.6    4.8   0.42  0.667
Error         15   174.0   11.6
Total         17   183.6

S = 3.406   R-Sq = 5.25%   R-Sq(adj) = 0.00%

                          Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled
StDev
Level   N    Mean   StDev     +---------+---------+---------+---------
 30     6  92.546   3.552               (--------------*--------------)
 60     6  92.261   3.302            (--------------*--------------)
120     6  90.870   3.358      (-------------*--------------)
                              +---------+---------+---------+---------
                             88.0      90.0      92.0      94.0
Pooled StDev = 3.406
```

จากการวิเคราะห์สมมติฐานประเภท ANOVA (ONE WAY) โดยใช้โปรแกรม Minitab ของ %FAME สำหรับการทดลองที่ใช้เมทานอล 15% โดยปริมาตรน้ำมันปาล์มใช้แล้ว เมื่อใช้เวลา 30 และ 60 นาที พบว่า ค่า P-Value เท่ากับ 0.667 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 (Do not Reject H_0 or Accept H_0) แสดงว่า ค่าเฉลี่ยของ %FAME สำหรับการทดลองที่ระยะเวลา 30, 60 และ 120 นาที ณ สภาวะการทดลองที่ใช้ปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA และที่ปริมาณเมทานอล 25%โดยปริมาตรของน้ำมันเดียวกัน ไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญ

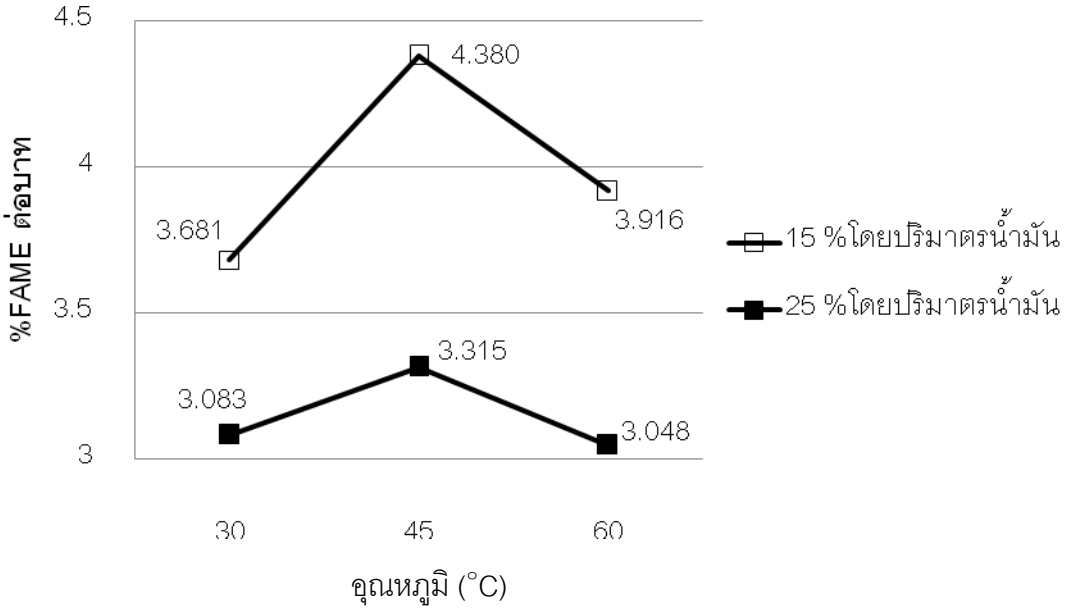
ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้สนใจสภาวะที่ใช้ในการทดลองที่ระดับกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA และเวลาที่ใช้ 30 นาที ของทั้ง 3 ระดับอุณหภูมิ (30, 45 และ 60 °C) และปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง 2 ระดับคือ 15 และ 25 %โดยปริมาตรของนำมันปาล์มใช้แล้ว โดยสามารถสรุปข้อมูลได้ตังตารางที่ 5-5 และรูปที่ 5-10 และ 5-11 ดังนี้

ตารางที่ 5-5 แสดงผลการทดลองที่ได้ ณ สภาวะการทดลองที่ระดับกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA และเวลาที่ใช้ 30 นาที แต่มีระดับของอุณหภูมิและปริมาณเมทานอลที่ใช้แตกต่างกัน

Temp (oC)	สำหรับการทดลองที่ระดับกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA และเวลาที่ใช้ 30 นาที					
	%FAME		%Yield		%FAME ต่อบาท	
	เมทานอล (%โดยปริมาตร)		เมทานอล (%โดยปริมาตร)		เมทานอล (%โดยปริมาตร)	
	15	25	15	25	15	25
30	83.00	88.99	84.00	88.81	3.681	3.083
45	91.35	91.84	75.09	82.59	4.380	3.315
60	94.90	96.81	94.73	97.30	3.916	3.048



รูปที่ 5-10 แสดงปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้จากการทดลอง ณ สภาวะที่ระดับกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA ที่เวลา 30 นาที แต่มีระดับของอุณหภูมิและปริมาณเมทานอลที่ใช้แตกต่างกัน



รูปที่ 5-11 แสดงปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (%FAME ต่อบาท) ที่ได้จากการทดลอง ณ สภาวะที่ระดับกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA ที่เวลา 30 นาที แต่มีระดับของอุณหภูมิและปริมาณเมทานอลที่ใช้แตกต่างกัน

จากรูปที่ 5-10 พบว่า การทดลองที่อุณหภูมิ 45 และ 60 °C ให้ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ใกล้เคียงกันทั้ง 2 ระดับของปริมาณเมทานอลที่ใช้ (15 และ 25 %โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์มใช้แล้ว) ส่วน การทดลองที่อุณหภูมิ 30 °C ที่ใช้ปริมาณเมทานอลทั้ง 2 ระดับ ให้ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) แตกต่างกันอย่างชัดเจน เนื่องจากที่อุณหภูมิ 30 °C การเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเตอริฟิเคชันยังเกิดไม่สมบูรณ์ เนื่องจากใช้อุณหภูมิที่ต่ำ ดังนั้นเมื่อใช้ปริมาณเมทานอล 25% โดยปริมาตรน้ำมัน ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวทำปฏิกิริยา พบว่า ปฏิกิริยาจะเกิดดีขึ้นส่งผลให้ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ได้เพิ่มสูงขึ้น ตามลำดับ

และจากรูปที่ 5-11 พบว่า %FAME ต่อบาทที่ระดับอุณหภูมิ 45°C เมื่อใช้ปริมาณเมทานอล 15% โดยปริมาตรน้ำมัน มีค่าสูงสุดเนื่องจากค่าใช้จ่ายโดยรวมส่วนใหญ่จะอยู่ในส่วนของวัตถุดิบทางตรง โดยเฉพาะในส่วนของเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง ส่งผลให้ %FAME ต่อบาทที่ระดับอุณหภูมิ 45°C เมื่อใช้ปริมาณเมทานอล 15% โดยปริมาตรน้ำมัน มีค่าสูงกว่า เมื่อใช้ปริมาณเมทานอล 25% โดยปริมาตรน้ำมัน

5.2.3. โมเดลการทำนายประสิทธิภาพของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างโมเดลเพื่อทำนายประสิทธิภาพของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลอง สำหรับ 2 กรณี ดังนี้

กรณีที่ (1.) สภาวะการทดลองที่ให้ %FAME และ %Yield สูงสุด

กรณีที่ (2.) สภาวะการทดลองที่ให้ %FAME ต่อบาทสูงสุด

ซึ่งทั้ง 2 กรณีได้ผ่านการพิจารณาสภาวะการทดลองดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งพบว่าทั้ง 2 กรณี หากมีปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) ตั้งต้นในน้ำมันปาล์มแตกต่างกัน สภาวะการทดลองที่ได้ ภายใต้เงื่อนไขทั้ง 2 กรณียังอยู่ภายใต้สภาวะ (Condition) เดิม จากตารางที่ 5-1 และ 5-3 ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้เสนอโมเดลสำหรับการทำนายประสิทธิภาพของไบโอดีเซลที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) แตกต่างกัน โดยทำการกำหนดปัจจัยทางด้านอุณหภูมิ เวลาและปริมาณเมทานอลที่ใช้เป็นค่าคงที่ ซึ่งสามารถอ้างอิงและอธิบายได้จากการพิจารณาสภาวะการทดลองดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ทั้ง 2 กรณีรวมเป็นโมเดลเดียวกันได้โดยใช้การวิเคราะห์ Multiple Linear Regression ดังนี้

จากผลการทดลองในกรณีที่ (1.) สภาวะการทดลองที่ให้ %FAME และ %Yield สูงสุด คือ ที่ระดับอุณหภูมิ 60 °C เวลาที่ใช้ 30 นาทีและปริมาณเมทานอล 25% โดยปริมาตรน้ำมันปาล์มใช้แล้ว และกรณีที่ (2.) สภาวะการทดลองที่ให้ %FAME ต่อบาทสูงสุด คือ ที่ระดับอุณหภูมิ 45 °C เวลาที่ใช้ 30 นาทีและปริมาณเมทานอล 15% โดยปริมาตรน้ำมันปาล์มใช้แล้ว ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไบโอดีเซล 3 ปัจจัย โดยมีการกำหนดสัญลักษณ์สำหรับแทนในสมการหรือโมเดล ดังต่อไปนี้

(1.) ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการผลิตไบโอดีเซล

- ปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA ; %) สัญลักษณ์ F
- อุณหภูมิ (TEMP ; °C) สัญลักษณ์ T
- ปริมาณเมทานอล (%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม) สัญลักษณ์ M

(2.) ตัวแปรตอบสนองที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

- ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ สัญลักษณ์ %FAME
- ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ สัญลักษณ์ %Yield
- ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท สัญลักษณ์ %FAMEต่อบาท

จากผลการทดลองข้างต้น สามารถหาโมเดลจากหลักการวิเคราะห์ความถดถอย (Regression Analysis) แบบ Multiple Linear Regession โดยใช้โปรแกรม Minitab ได้ดังนี้

Hypothesis Testing (1.) :

ทดสอบว่า ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA), อุณหภูมิและปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง กับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้ว่ามีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้นหรือไม่ ณ สภาวะที่ใช้เวลา 30 นาที แต่ที่ระดับอุณหภูมิ ปริมาณเมทานอลที่ใช้และที่ระดับกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน

<u>กำหนดให้</u> - β_F แทน ปริมาณกรดไขมันอิสระ (ตัวแปรอิสระ)

- β_T แทน อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (ตัวแปรอิสระ)
- β_M แทน ปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง (ตัวแปรอิสระ)
- ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ ค่า α = 0.05%

Hypothesis Testing

$H_0 : \beta_F = \beta_T = \beta_M = 0$ ปริมาณกรดไขมันอิสระไม่มีอิทธิพลต่อ %FAME

$H_1 : \beta_i \neq 0$ อย่างน้อย 1 ตัวที่มีอิทธิพลต่อ %FAME

เลือกประเภทของ Test : Multiple Linear Regression

Regression Analysis: %FAME versus F, T, M

```
The regression equation is
%FAME = 63.2 - 9.24 F + 0.397 T + 0.528 M

Predictor      Coef  SE Coef      T      P
Constant    63.236    2.697  23.45  0.000
F           -9.237    1.152  -8.02  0.000
T          0.39652  0.03776  10.50  0.000
M          0.52833  0.09250   5.71  0.000

S = 3.20437   R-Sq = 82.5%   R-Sq(adj) = 81.3%

Analysis of Variance

Source           DF       SS      MS      F      P
Regression        3  2126.95  708.98  69.05  0.000
Residual Error   44   451.79   10.27
Total            47  2578.74

Source    DF   Seq SS
F          1   659.95
T          1  1132.03
M          1   334.96
```

จากการการทำการวิเคราะห์ Multiple linear regression ใช้โปรแกรม Minitab ของ %FAME สำหรับสภาวะการทดลองที่ใช้เวลา 30 นาที แต่ที่ระดับอุณหภูมิ ปริมาณเมทานอลที่ใช้ และที่ระดับกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน พบว่า สมการที่จะได้ คือ

$$\%FAME = 63.2 - 9.24\,F + 0.397\,T + 0.528\,M \qquad (5.1)$$

โดยที่ %FAME แทน ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%)

F แทน ปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA ; %)

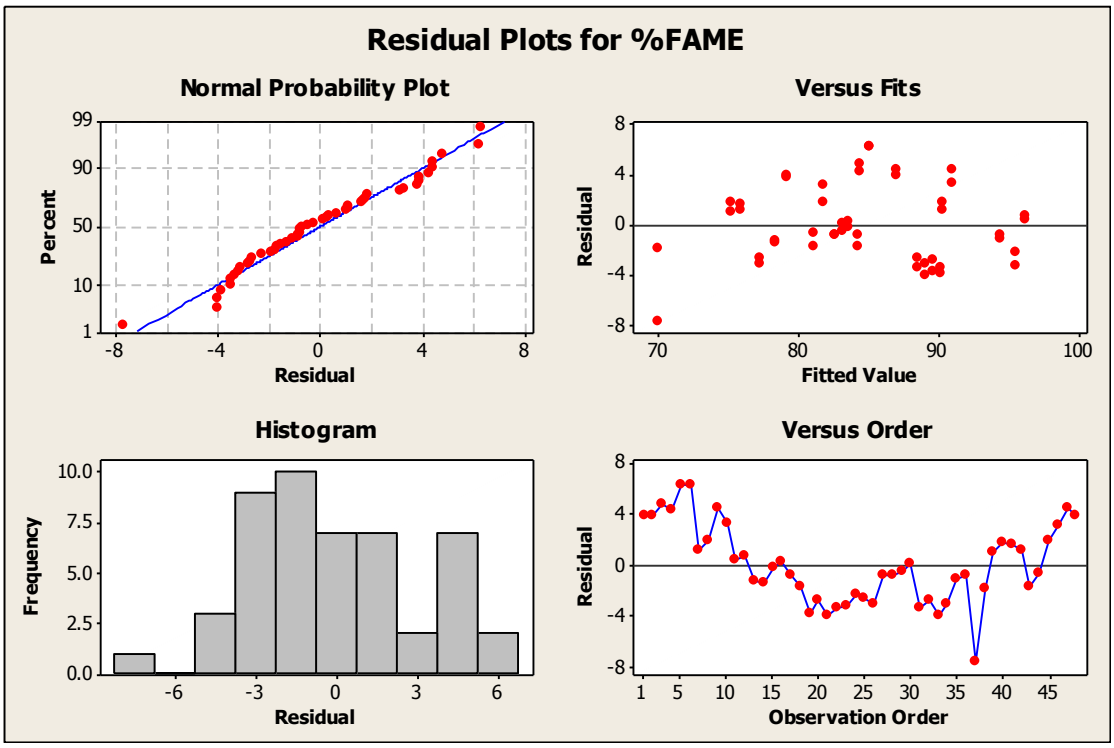
T แทน อุณหภูมิ (TEMP ; °C)

M แทน ปริมาณเมทานอล (%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์มใช้แล้ว)

จากการวิเคราะห์ได้ค่า R Square (สัมประสิทธ์ของการตัดสินใจ ; Coefficient of Determination) เท่ากับ 82.5 % ซึ่งสามารถอธิบายค่า R^2 ได้ดังนี้ ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้มีผลหรือมีอิทธิพลจากปัจจัยของปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มตั้งต้น (%FFA) อุณหภูมิและปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง เท่ากับ 82.5% ส่วนที่เหลือประมาณ 17.5% เป็นผลจากปัจจัยอื่นๆ ที่ไม่ทราบค่า

ดังนั้นถ้าสมการมีค่า R square เพิ่มขึ้นเท่าใด ความแม่นยำของการนำสมการไปใช้เพื่อทำนายหรือคาดคะเนผลลัพธ์ย่อมมีสูงมากขึ้นเช่นกัน [108] โดยทั่วไป สมการที่มักนำไปใช้ควรมีค่า R Square อย่างน้อย 0.75 [109, 110] หากค่า R square สูงกว่า 0.90 ถือว่าดีมาก อย่างไรก็ตามค่า R Square เป็นการประมาณ Goodness of fit ที่เกินจริง จึงมักใช้ค่า adjusted R square ในการวัด Goodness of fit แทน [110] โดยทั่วไป adjusted R Square มักจะมีค่าต่ำกว่าค่า R Square เล็กน้อย

จากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA), อุณหภูมิและปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง กับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ที่ได้ว่ามีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้นหรือไม่ ณ สภาวะที่ใช้เวลา 30 นาที พบว่า มีค่า t-test ของปริมาณกรดไขมันอิสระ อุณหภูมิและปริมาณเมทานอลที่ใช้ เท่ากับ -8.02, 10.50 และ 5.71 ตามลำดับ และมีค่า P-value ของปริมาณกรดไขมันอิสระ อุณหภูมิและปริมาณเมทานอลที่ใช้ น้อยกว่า 0.0005 ทั้ง 3 ปัจจัย ที่ระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 ซึ่งมีค่าน้อยกว่ากว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ทั้ง 3 ปัจจัย แสดงว่า ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_o) นั่นคือ $\beta_i \neq 0$ อย่างน้อย 1 ตัวที่มีอิทธิพลต่อ %FAME หมายความว่า ปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA), อุณหภูมิและปริมาณเมทานอลที่ใช้ มีความสัมพันธ์กับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) แบบเชิงเส้นที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



รูปที่ 5-12 แสดง Residual Plots for Response ของ %FAME กับปัจจัยทั้ง 3 ที่เกี่ยวข้อง ณ สภาวะการทดลองที่ใช้เวลา 30 นาที

Hypothesis Testing (2.) :

ทดสอบว่า ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA), อุณหภูมิและปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง กับร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yiled) ที่ได้ว่ามีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้นหรือไม่ ณ สภาวะที่ใช้เวลา 30 นาที แต่ที่ระดับอุณหภูมิ ปริมาณเมทานอลที่ใช้ และที่ระดับกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน

<u>กำหนดให้</u> - β_F แทน ปริมาณกรดไขมันอิสระ (ตัวแปรอิสระ)

- β_T แทน อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (ตัวแปรอิสระ)

- β_M แทน ปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง (ตัวแปรอิสระ)

- ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ ค่า α = 0.05%

<u>Hypothesis Testing</u>

H_0 : $\beta_F = \beta_T = \beta_M = 0$ ปริมาณกรดไขมันอิสระไม่มีอิทธิพลต่อ %Yield

H_1 : $\beta_i \neq 0$ อย่างน้อย 1 ตัวที่มีอิทธิพลต่อ %Yield

<u>เลือกประเภทของ Test</u> : Multiple Linear Regression

Regression Analysis: %Yield versus F, T, M

```
The regression equation is

%Yield = 75.6 - 16.2 F + 0.358 T + 0.334 M

Predictor      Coef  SE Coef       T      P
Constant     75.647    1.982   38.16  0.000
F          -16.1881   0.8782  -18.43  0.000
T           0.35808  0.02964   12.08  0.000
M           0.33441  0.08273    4.04  0.000

S = 2.04114   R-Sq = 91.8%   R-Sq(adj) = 91.1%

Analysis of Variance

Source          DF       SS      MS      F      P
Regression       3  1240.03  413.34  12.69  0.000
Residual Error  44  1433.65   32.58
Total           47  2673.68

Source    DF  Seq SS
F          1  330.89
T          1  469.22
M          1  439.92
```

จากการการทำการวิเคราะห์ Multiple linear regression ใช้โปรแกรม Minitab ของ %Yield สำหรับสภาวะการทดลองที่ใช้เวลา 30 นาที แต่ที่ระดับอุณหภูมิ ปริมาณเมทานอลที่ใช้และที่ระดับกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน พบว่า สมการที่จะได้ คือ

$$\%Yield = 75.6 - 16.2\ F + 0.358\ T + 0.334\ M \qquad (5.2)$$

โดยที่ %Yield แทน ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%)

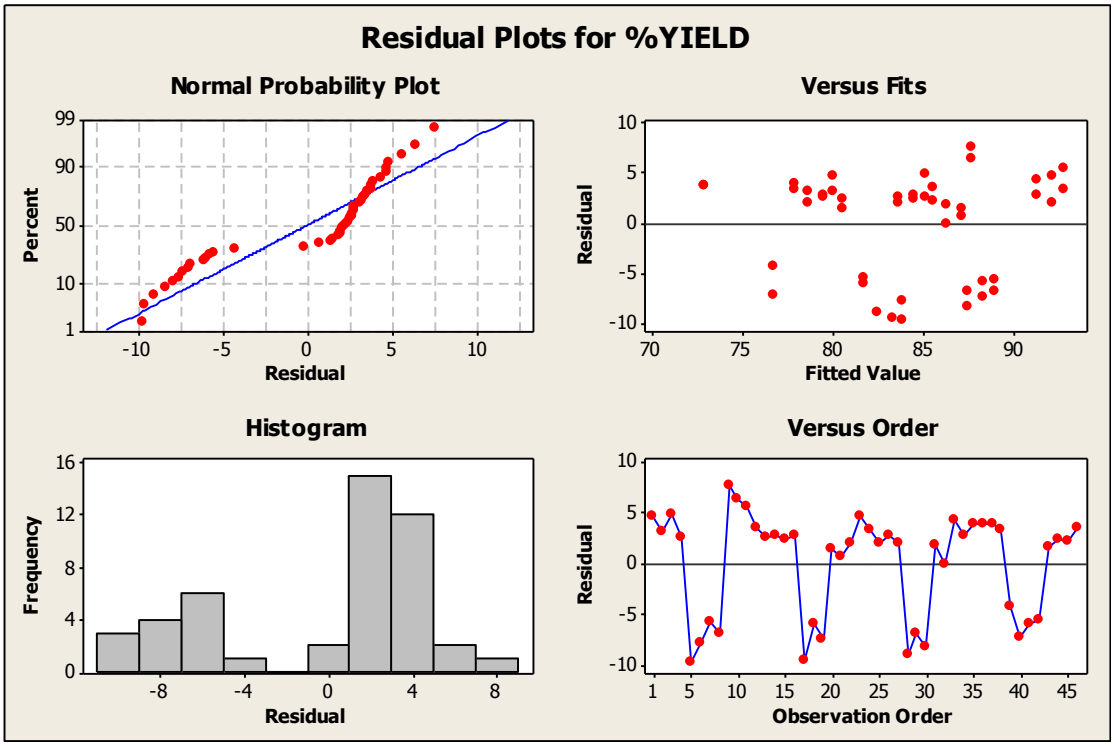
F แทน ปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA ; %)

T แทน อุณหภูมิ (TEMP ; °C)

M แทน ปริมาณเมทานอล (%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์มใช้แล้ว)

จากการวิเคราะห์ได้ค่า R Square (สัมประสิทธ์ของการตัดสินใจ) เท่ากับ 91.8 % ซึ่งสามารถอธิบายค่า R^2 ได้ดังนี้ ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ได้มีผลหรือมีอิทธิพลจากปัจจัยของปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มตั้งต้น (%FFA) อุณหภูมิและปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง 91.8% ส่วนที่เหลือประมาณ 8.2% เป็นผลจากปัจจัยอื่นๆ ที่ไม่ทราบค่า

จากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA), อุณหภูมิและปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง กับร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ได้ว่ามีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้นหรือไม่ ณ สภาวะที่ใช้เวลา 30 นาที พบว่า มีค่า t-test ของปริมาณกรดไขมันอิสระ อุณหภูมิและปริมาณเมทานอลที่ใช้ เท่ากับ -18.43, 12.08 และ 4.04 ตามลำดับ และมีค่า P-value ของปริมาณกรดไขมันอิสระ อุณหภูมิและปริมาณเมทานอลที่ใช้ น้อยกว่า 0.0005 ทั้ง 3 ปัจจัย ที่ระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 ซึ่งมีค่าน้อยกว่ากว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ทั้ง 3 ปัจจัย แสดงว่า ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_o) นั่นคือ $\beta_i \neq 0$ อย่างน้อย 1 ตัวที่มีอิทธิพลต่อ %FAME ต่อบาท หมายความว่า ปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA), อุณหภูมิและปริมาณเมทานอลที่ใช้ มีความสัมพันธ์กับร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) แบบเชิงเส้นที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



รูปที่ 5-13 แสดง Residual Plots for Response ของ %Yield กับปัจจัยทั้ง 3 ที่เกี่ยวข้อง ณ สภาวะการทดลองที่ใช้เวลา 30 นาที

Hypothesis Testing (3.) :

ทดสอบว่า ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA), อุณหภูมิและปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง กับ %FAME ต่อบาท ที่ได้ว่ามีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้นหรือไม่ ณ สภาวะที่ใช้เวลา 30 นาที แต่ที่ระดับอุณหภูมิ ปริมาณเมทานอลที่ใช้ และที่ระดับกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน

<u>กำหนดให้</u> - β_F แทน ปริมาณกรดไขมันอิสระ (ตัวแปรอิสระ)

- β_T แทน อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (ตัวแปรอิสระ)
- β_M แทน ปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง (ตัวแปรอิสระ)
- ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ ค่า α = 0.05%

<u>Hypothesis Testing</u>

$H_0 : \beta_F = \beta_T = \beta_M = 0$ ปริมาณกรดไขมันอิสระไม่มีอิทธิพลต่อ %FAMEต่อบาท

$H_1 : \beta_i \neq 0$ อย่างน้อย 1 ตัวที่มีอิทธิพลต่อ %FAME ต่อบาท

<u>เลือกประเภทของ Test</u> : Multiple Linear Regression

Regression Analysis: %FAME ต่อบาท versus F, T, M

```
The regression equation is
%FAME ต่อบาท = 4.52 - 0.107 F + 0.0108 T - 0.0768 M

Predictor       Coef   SE Coef       T      P
Constant      4.5171    0.1924   23.48  0.000
F           -0.10652   0.08446   -1.26  0.021
T           0.010847  0.002680    4.05  0.000
M          -0.076836  0.006610  -11.62  0.000

S = 0.214938   R-Sq = 80.1%   R-Sq(adj) = 78.6%

Analysis of Variance

Source          DF       SS      MS      F      P
Regression       3   9.0524  3.0175  28.48  0.000
Residual Error  44   4.6612  0.1059
Total           47  13.7137


Source    DF  Seq SS
F          1  0.6919
T          1  1.1273
M          1  7.2333
```

จากการการทำการวิเคราะห์ Multiple linear regression ใช้โปรแกรม Minitab ของ %FAME ต่อบาท สำหรับสภาวะการทดลองที่ใช้เวลา 30 นาที แต่ที่ระดับอุณหภูมิ ปริมาณเมทานอลที่ใช้ และที่ระดับกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน พบว่า สมการที่จะได้ คือ

$$\%FAME \text{ ต่อบาท} = 4.52 - 0.107\ F + 0.0108\ T - 0.0768\ M \qquad (5.3)$$

โดยที่ %FAME ต่อบาท แทน ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อค่าใช้จ่ายโดยรวมในการทดลอง (%)

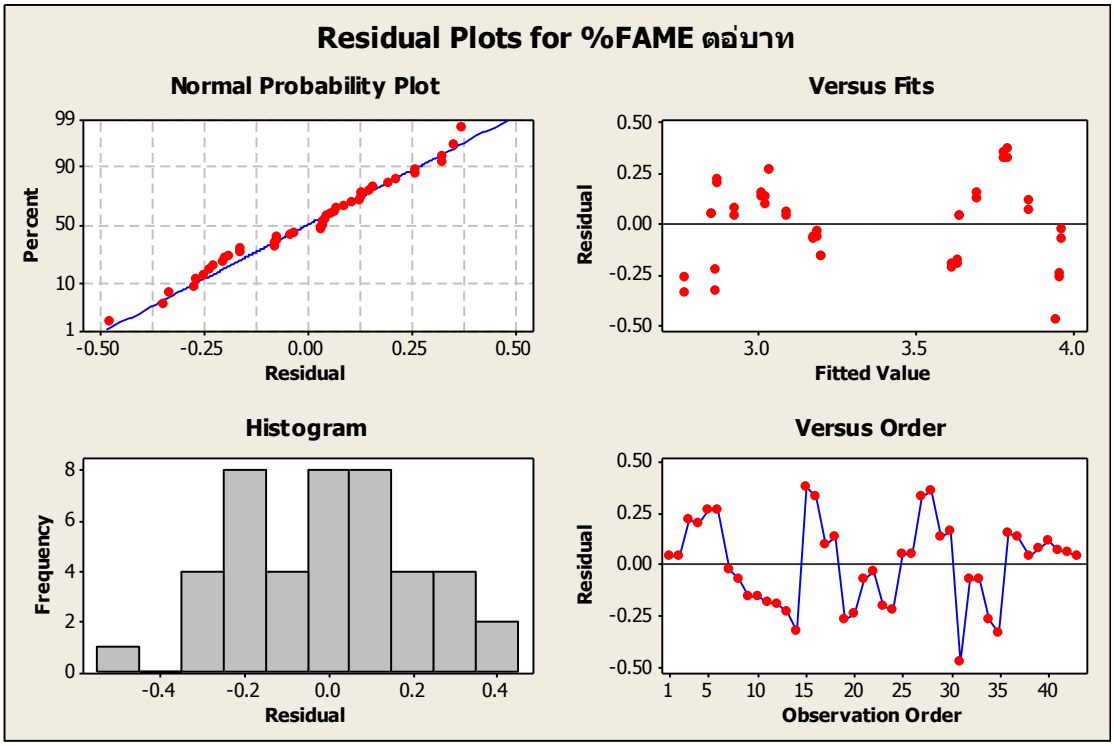
F แทน ปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA ; %)

T แทน อุณหภูมิ (TEMP ; $^{\circ}C$)

M แทน ปริมาณเมทานอล (%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์มใช้แล้ว)

จากการวิเคราะห์ได้ค่า R Square (สัมประสิทธ์ของการตัดสินใจ) เท่ากับ 80.1 % ซึ่งสามารถอธิบายค่า R^2 ได้ดังนี้ ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด (%FAME ต่อบาท) ที่ได้มีผลหรือมีอิทธิพลจากปัจจัยของปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มตั้งต้น (%FFA) อุณหภูมิและปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง เป็น 80.1% ส่วนที่เหลือประมาณ 19.9% เป็นผลจากปัจจัยอื่นๆ ที่ไม่ทราบค่า

จากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA), อุณหภูมิและปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง กับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด (%FAME ต่อบาท) ที่ได้ว่ามีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้นหรือไม่ ณ สภาวะที่ใช้เวลา 30 นาที พบว่า มีค่า t-test ของปริมาณกรดไขมันอิสระ อุณหภูมิและปริมาณเมทานอลที่ใช้ เท่ากับ -1.26, 4.05 และ -11.62 ตามลำดับ และมีค่า P-value ของปริมาณกรดไขมันอิสระ อุณหภูมิและปริมาณเมทานอลที่ใช้ เท่ากับ 0.021 และน้อยกว่า 0.0005 ทั้ง 2 ปัจจัย ที่ระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 ซึ่งมีค่าน้อยกว่ากว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ทั้ง 3 ปัจจัย แสดงว่า ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_o) นั่นคือ $\beta_i \neq 0$ อย่างน้อย 1 ตัวที่มีอิทธิพลต่อ %FAME ต่อบาท หมายความว่า ปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA), อุณหภูมิและปริมาณเมทานอลที่ใช้ มีความสัมพันธ์กับปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อค่าใช้จ่ายโดยรวมทั้งหมด (%FAME ต่อบาท) แบบเชิงเส้นที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

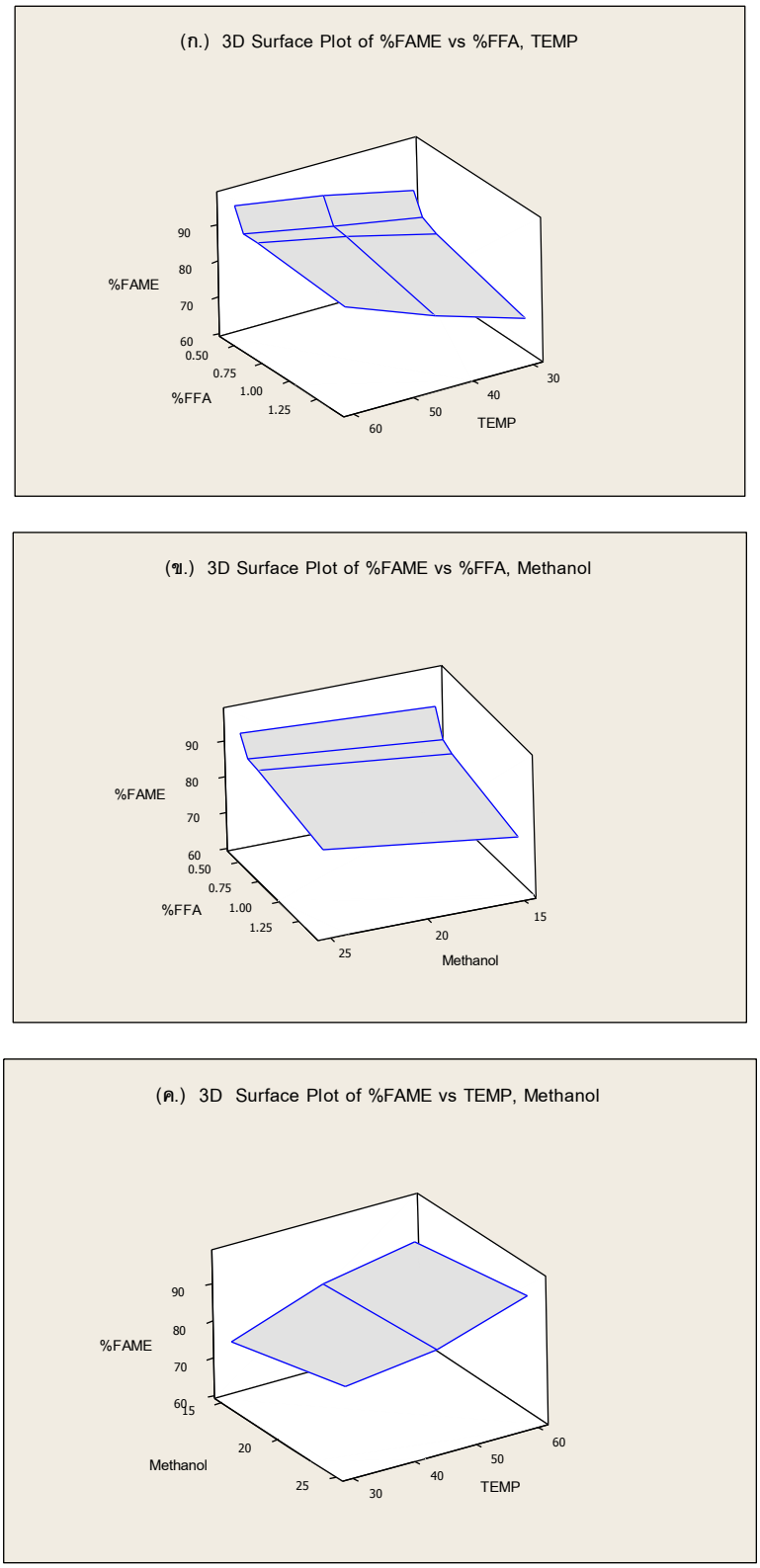


รูปที่ 5-14 แสดง Residual Plots for Response ของ %FAME ต่อบาท กับปัจจัยทั้ง 3 ที่เกี่ยวข้อง ณ สภาวะการทดลองที่ใช้เวลา 30 นาที

จากการสร้างโมเดลหรือสมการเพื่อวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้นที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) อุณหภูมิและปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการผลิตแตกต่างกัน โดยใช้หลักการ Multiple Linear Regression ด้วยโปรแกรม Minitab สามารถสรุปภาพรวมของโมเดลการทำนาย ได้ดังตารางที่ 5-6 และในงานวิจัยนี้ได้ทำแสดง 3D Surface Plot ระหว่างประสิทธิภาพของไบโอดีเซลที่ได้กับปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้ถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 5-15 ถึง 5-17

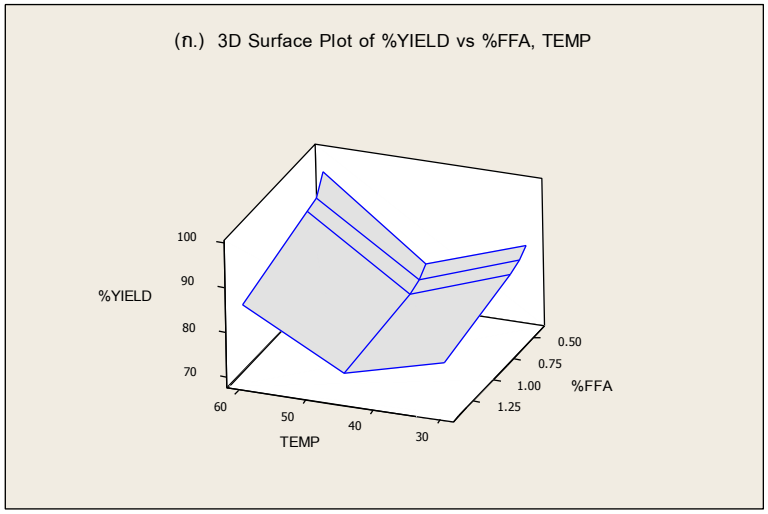
ตารางที่ 5-6 แสดงสมการหรือโมเดลการทำนายประสิทธิภาพที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซล

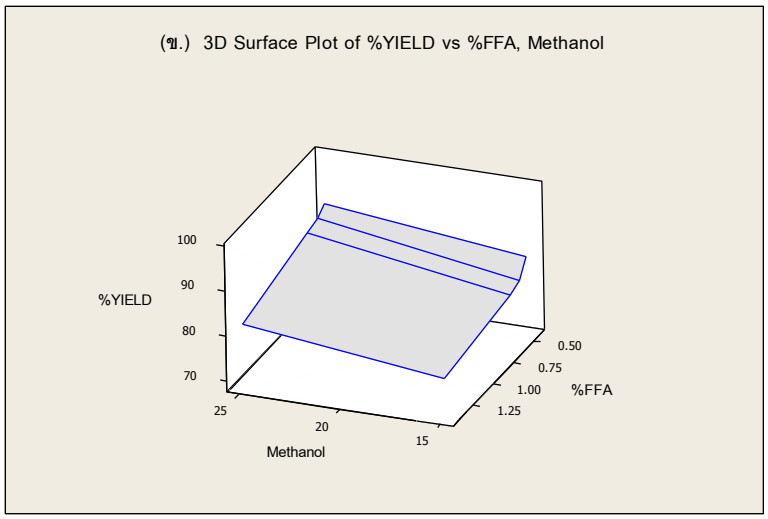
ประสิทธิภาพของไบโอดีเซลที่ได้จากการผลิต	สมการหรือโมเดลการทำนายประสิทธิภาพที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซล
	อุณหภูมิที่ใช้ : 30, 45 และ 60 °C เมื่อเวลาที่ใช้ : 30 นาที
	ปริมาณเมทานอล : 15 และ 25%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์มใช้แล้ว
%FAME	%FAME = 63.2 - 9.24 F + 0.397 T + 0.528 M
%Yield	%Yield = 75.6 - 16.2 F + 0.358 T + 0.334 M
%FAME ต่อบาท	%FAME ต่อบาท = 4.52 - 0.107 F + 0.0108 T - 0.0768 M

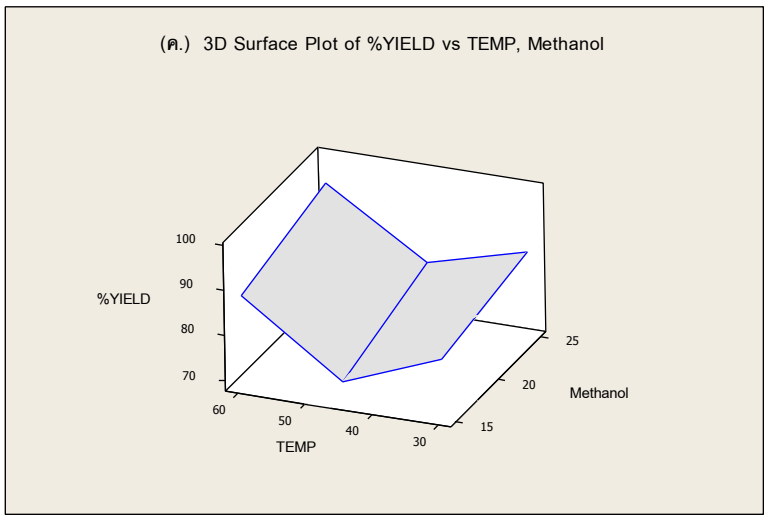


รูปที่ 5-15 แสดง 3D Surface Plot ระหว่าง %FAME และปัจจัยทั้ง 3 ได้แก่

(ก.) %FFA กับอุณหภูมิ (ข.) %FFAกับปริมาณเมทานอล และ (ค.) อุณหภูมิกับปริมาณเมทานอล

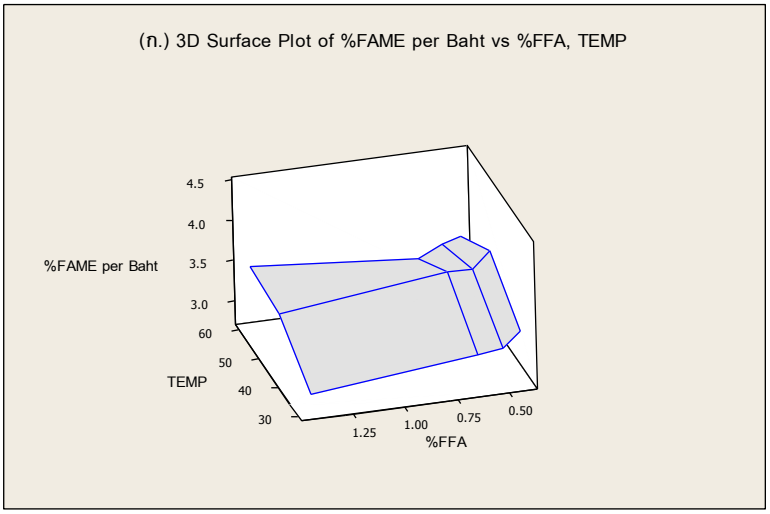


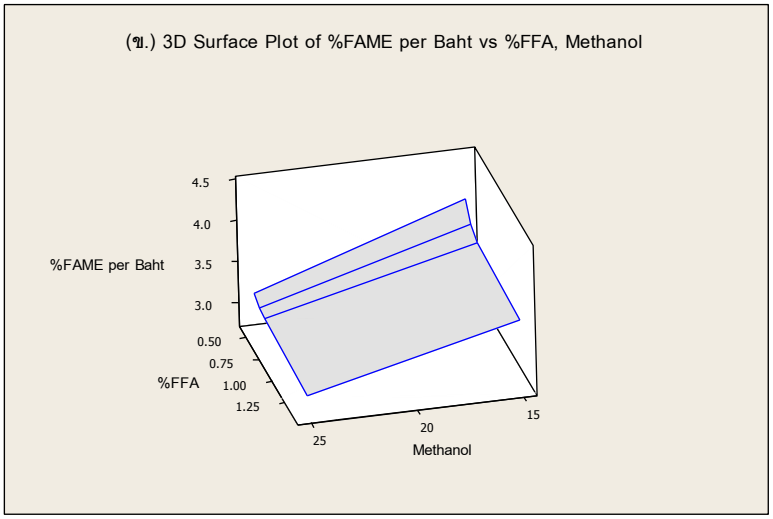


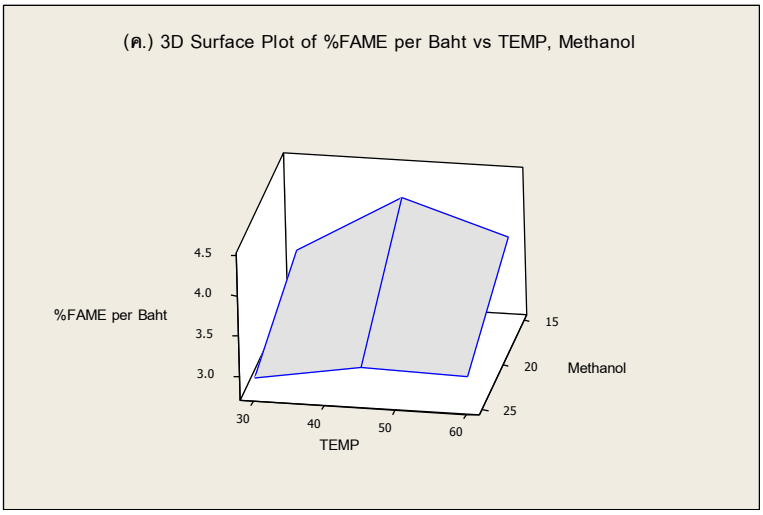


รูปที่ 5-16 แสดง 3D Surface Plot ระหว่าง %Yield และปัจจัยทั้ง 3 ได้แก่

(ก.) %FFA กับอุณหภูมิ (ข.) %FFAกับปริมาณเมทานอล และ (ค.) อุณหภูมิกับปริมาณเมทานอล







รูปที่ 5-17 แสดง 3D Surface Plot ระหว่าง %FAME ต่อบาท และปัจจัยทั้ง 3 ได้แก่ (ข.) %FFA กับอุณหภูมิ (ข.) %FFAกับปริมาณเมทานอล และ (ค.) อุณหภูมิกับปริมาณเมทานอล

จากรูปที่ 5-15 และ 5-16 จาก 3D Surface Plot ระหว่าง %FAME และ %Yield กับปัจจัยทั้ง 3 พบว่า การทดลอง ณ สภาวะอุณหภูมิ 60°C ใช้ปริมาณเมทานอล 25% โดยปริมาตร และที่ระดับกรดไขมันอิสระต่ำกว่า 0.5%FFA ให้ค่า %FAME และ %Yield ในขณะที่จากรูปที่ 5-17 พบว่า การทดลอง ณ สภาวะอุณหภูมิ 45°C ใช้ปริมาณเมทานอล 15% โดยปริมาตรที่ระดับกรดไขมันอิสระต่ำกว่า 0.5%FFA ให้ค่า %FAME ต่อบาทสูงสุด

ตารางที่ 5-7 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการผลิตจริงกับค่าที่ได้จากการทำนาย

T (°C)	M (%v/v)	ประสิทธิภาพของไบโอดีเซล ที่ใช้เวลา 30 นาทีและที่กรดไขมันอิสระ 0.427%FFA								
		%FAME			%Yield			%FAME ต่อบาท		
		Result	Predict	%Diff	Result	Predict	%Diff	Result	Predict	%Diff
30	15	82.98	80.08	**3.49**	84.77	84.43	**0.40**	3.680	3.628	**1.43**
30	15	83.01	80.08	**3.53**	83.22	84.43	**1.46**	3.682	3.628	**1.47**
30	25	89.25	85.36	**4.35**	89.95	87.77	**2.42**	3.093	3.210	**3.79**
30	25	88.73	85.36	**3.79**	87.67	87.77	**0.11**	3.074	3.160	**2.77**
45	15	91.39	87.04	**4.76**	74.19	77.80	**4.87**	4.382	4.240	**3.23**
45	15	91.31	87.04	**4.67**	75.98	77.80	**2.40**	4.378	4.230	**3.37**
45	25	91.48	91.32	**0.18**	83.17	86.14	**3.57**	3.302	3.212	**2.72**
45	25	92.20	91.32	**0.95**	82.01	85.14	**3.82**	3.302	3.412	**3.33**
60	15	95.45	91.99	**3.62**	95.34	95.17	**0.17**	3.938	3.933	**0.13**
60	15	94.35	91.99	**2.50**	94.13	95.17	**1.11**	3.893	3.933	**1.03**
60	25	96.68	97.27	**0.62**	98.35	98.51	**0.16**	3.044	3.165	**3.99**
60	25	96.94	97.27	**0.35**	96.24	98.51	**2.36**	3.044	3.165	**3.99**

หมายเหตุ T แทน อุณหภูมิ (หน่วย : °C) และ M แทน ปริมาณเมทานอล (หน่วย : %โดยปริมาตรของน้ำมัน)

จากตารางที่ 5-7 พบว่า ณ สภาวะอุณหภูมิ 60°C ใช้เมทานอล 25% โดยปริมาตร และที่กรดไขมันอิสระ 0.427%FFA มีค่าความต่างเฉลี่ยระหว่างผลการทดลองจริงกับค่าทำนายของค่า %FAME สูงสุด และ %Yield สูงสุด เท่ากับ 0.49 และ 1.26% ตามลำดับ และในขณะที่การทดลอง ณ อุณหภูมิ 45°C เมทานอล 15% โดยปริมาตร ที่กรดไขมันอิสระเดียวกัน มีค่าความแตกต่างเฉลี่ย สำหรับค่า %FAME ต่อบาทสูงสุด เท่ากับ 3.30% ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเพื่อวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) ในน้ำมันปาล์มใช้แล้ว, อุณหภูมิ, เวลาและปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล ที่มีผลต่อ ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) และผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล และทำการพิจารณาเลือกสภาวะการผลิตไบโอดีเซลโดยพิจารณาจากประสิทธิภาพของไบโอดีเซลและปริมาณเมทิลเอสเตอร์ต่อบาท (%FAME ต่อบาท) ซึ่งได้ถูกประเมินจากค่าใช้จ่ายของปัจจัยที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล ดังนั้นสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

6.1.1 อิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซล

อิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อไบโอดีเซล คือ เมื่อปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) ในน้ำมันปาล์มเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) และร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)ลดลง ในขณะที่อุณหภูมิและปริมาณเมทานอลที่ใช้ทดลอง เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ %FAME และ %Yield เพิ่มสูงขึ้น แต่ปัจจัยด้านเวลาที่ใช้ที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ %FAME และ %Yield มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละสภาวะการทดลอง โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.667 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

6.1.2 สภาวะการทดลองที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซล

(1.) การผลิตไบโอดีเซลที่ระดับกรดไขมันอิสระ 0.427% โดยใช้ปริมาณเมทานอล 25 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของน้ำมัน ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที พบว่า เป็นสภาวะที่ให้ปริมาณเมทิลเอสเตอร์และร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์สูงสุด เท่ากับ 96.81 และ 97.30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

(2.) ในขณะที่การผลิตไบโอดีเซลในสภาวะที่ใช้เวลาและระดับปริมาณกรดไขมันอิสระเดียวกัน คือ 30 นาทีและ0.427%ตามลำดับแต่ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และใช้ปริมาณเมทานอล15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของน้ำมัน พบว่า ให้ค่า%FAMEต่อบาทสูงสุด เท่ากับ 4.38

ดังนั้น การพิจารณาสภาวะการผลิตไบโอดีเซลในงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการตัดสินใจสำหรับผู้ที่มีความสนใจทางด้านการผลิตไบโอดีเซลเพื่อใช้ในการเลือกสภาวะการผลิตให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่ต้องการต่อไปได้ในอนาคต

6.1.3 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลกับปริมาณกรดไขมันอิสระที่แตกต่างกัน

จากการอภิปรายผลการทดลองที่ได้กล่าวมาข้างต้น พบว่า สามารถทำการสรุปการอภิปรายผลการทดลองได้ว่า สำหรับการทดลองที่ระดับกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นระดับที่ส่งผลให้ได้ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) สูงสุดสำหรับทุกการทดลอง และการทดลองเวลาที่ใช้ 30 นาที พบว่า ให้ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) สูงสุดเช่นกัน

6.1.4 โมเดลการทำนายประสิทธิภาพของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลอง

จากการสร้างโมเดลหรือสมการเพื่อหาประสิทธิภาพของไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระแตกต่างกันที่ได้จากผลการทดลอง สามารถทำการเปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับค่าที่ได้จากการทำนายจากโมเดลการทำนาย โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่แตกต่าง ดังนี้

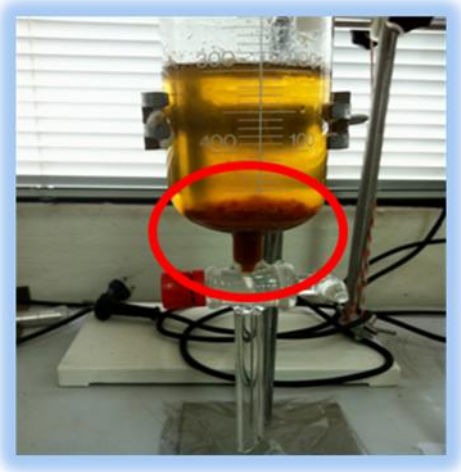
ค่าเปอร์เซ็นต์ความต่างระหว่างประสิทธิภาพของไบโอดีเซลกับค่าที่ทำนายได้จากสมการ (Predict) ของปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield) และ %FAME ต่อบาท พบว่า การทดลอง ณ สภาวะอุณหภูมิ 60°C ใช้เมทานอล 25% โดยปริมาตร และที่กรดไขมันอิสระ 0.427%FFA มีค่าความต่างเฉลี่ยระหว่างผลการทดลองจริงกับค่าทำนายของค่า %FAME สูงสุด และ %Yield สูงสุด เท่ากับ 0.49 และ 1.26% ตามลำดับ และในขณะที่การทดลอง ณ อุณหภูมิ 45°C เมทานอล 15% โดยปริมาตร ที่กรดไขมันอิสระเดียวกัน มีค่าความแตกต่างเฉลี่ย สำหรับค่า %FAME ต่อบาทสูงสุด เท่ากับ 3.30% ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

6.2 ข้อเสนอแนะ

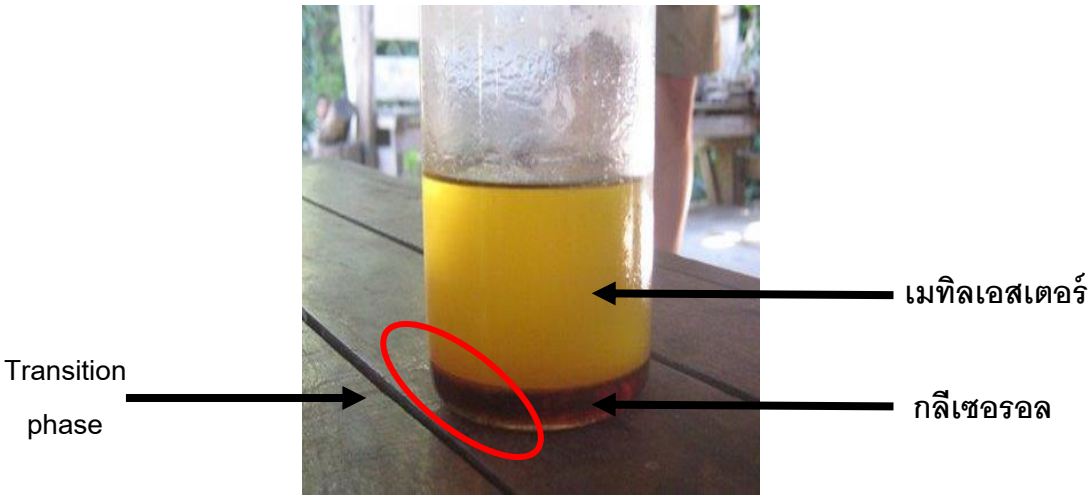
(1.) การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันในการผลิตไบโอดีเซล โดยมีข้อกำหนดที่ว่าหากปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำในปาล์มใช้แล้วตั้งต้นมีค่าสูงกว่า ร้อยละ 2 ต้องนำไปผ่านปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันก่อน โดยนำน้ำมันไปทำปฏิกิริยากับกรดเพื่อลดประมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มใช้แล้วลงก่อนนำมาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน จากงานวิจัยนี้พบว่าปริมาณกรดไขมันอิสระมีผลต่อประสิทธิภาพของไบโอดีเซล ดังนั้นจึงขอเสนอแนะว่าถึงแม้ว่าตัวอย่างน้ำมันจะมีค่า %FFA ต่ำกว่า 2% แล้วอาจจะนำไปผ่านกระบวนการเอสเตอริฟิเคชันก่อนการผลิตเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของไบโอดีเซล

(2.) กระบวนการแยกกลีเซอรอลออกจากเมทิลเอสเตอร์ สำหรับสภาวะการทดลองที่อุณหภูมิ 30°C อาจจะเกิดการสูญเสีย %Yield ของปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จริงจากการทดลองได้ เนื่องจากที่อุณหภูมินี้กลีเซอรอลที่ได้มีลักษณะที่เป็นของเหลวหนืดใกล้เคียงกับเมทิลเอสเตอร์ ส่งผลให้ยากต่อการไขแยก ซึ่งอาจจะพบเมทิลเอสเตอร์ตกค้างอยู่ในช่วง Transition phase เป็นปริมาณมาก

ดังนั้นจึงขอเสนอแนะวิธีการแยกกลีเซอรอลออกจากเมทิลเอสเตอร์ ใน Transition phase เพื่อให้ได้ %Yield ของปริมาณเมทิลเอสเตอร์ในปริมาณที่ใกล้เคียงกับค่าจริง



รูปที่ 6-1 การแยกชั้นของกรีเซอรอลที่สภาวะการทดลอง 60°C พบว่า มีการแยกขั้นอย่างชัดเจน ส่งผลให้ง่ายต่อการไขแยกกลีเซอรอลออกจากเมทิลเอสเตอร์



รูปที่ 6-2 การแยกชั้นของกรีเซอรอลที่สภาวะการทดลอง 30°C

รายการอ้างอิง

[1] วีรชัย สุนทรรังสรรค์. เราไม่ง้อน้ำมัน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : ฐานบุ๊คส์,2551.

[2] United Nations. World Population to 2300. New York : Population Division, Department of Economic and Social Affairs, 2004.

[3] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. สถานการณ์พลังงานปี 2552 และแนวโน้มปี 2553. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.eppo.go.th/info/2010/energy forecast2009_12.html [23 มีนาคม 2555]

[4] Bloomberg and BOT 's calculation. ความผันผวนของราคาน้ำมันในตลาดโลก. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://en.wikipedia.org/wiki/File:Oil_Prices_Medium Term.jpg #filelinks [23 มีนาคม 2555]

[5] บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน).ราคาน้ำมันขายปลีก กทม.และปริมณฑล. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.pttplc.com/TH/news-energy-fact-oil-price-bangkok .aspx [26 มีนาคม 2555]

[6] สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.).การผลิตและการตรวจสอบมาตรฐานไบโอดีเซลเบื้องต้น. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา :www.tistr.or.th [6 กรกฎาคม 2554]

[7] บริษัท สยามไบโอเอนเนอยี่. น้ำมันพืชหรือสัตว์ใช้แล้ว.[ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.siambioenergy.com/siambio/index.php?option=com_content&view=article&id [13 กุมภาพันธ์ 2555]

[8] พลังงานทดแทน : ไบโอดีเซล (biodiesel). สาขาเคมีสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) : 1-4.

[9] Food Network Solution. น้ำมันปาล์ม. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.foodnetwork solution.com/vocab/ wordcap/Palm Oil [30 มกราคม 2555]

[10] อุตสาหกรรมจากน้ำมันปาล์ม. คู่มือองค์ความรู้ เรื่อง การศึกษาดูงานเกี่ยวกับการผลิตและผลผลิตจากไบโอดีเซลตามแผนจัดการความรู้ (KM Action Plan)ประจำปีงบประมาณ 2553 กรมธุรกิจพลังงาน :1-26.

[11] ปิยะวรรณ กฤษชเศรษฐสกุล. การสังเคราะห์กรดไขมันจากน้ำมันปาล์มดิบด้วยโซดาไฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

[12] Health & Nutrition. กรดไขมัน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.nautilus.co.th/health nutrit]bion/tips_fatty.asp [13 กุมภาพันธ์ 2555]

[13] นิธิยา รัตนาปนนท์. วิทยาศาสตร์การอาหารของไขมันและน้ำมัน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2548.

[14] พจน์ ศรีบุญลือ, โสพิศ วงศ์คำและพัชรี บุญศิริ. ตำราชีวเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 3. ขอนแก่น : ภาควิชาชีวเคมี คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2543.

[15] Food Network Solution. ไตรกลีเซอไรด์. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.foodnetwor ksolution.com/vocab/wordcap/triglyceride [30 มกราคม 2555]

[16] Agarwal, A.K. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. Progress in Energy and Combustion Science (2007) : 233 - 271.

[17] Sundram, K. Palm Oil : Chemistry and Nutrition Updates. Malaysia Palm Oil Board(2003) : 1 – 17.

[18] Lee, J.,H , Jones, K.,C., Foglia T,.A., Lee C,.R, Akoh, C., C. and Lee, K,.T. High performance liquid chromatographic separation of interesterified palm oil with tributyrin. LWT41 (2008) : 1446–1451.

[19] ทรงศิริ แต้สมบัติ. การวิเคราะห์การถดถอย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาเกษตรศาสตร์, 2541.

[20] ธารดาว ทองแก้ว. น้ำมันพืช : ใช้อย่างไรให้ถูกต้องและปลอดภัย. วารสารหมอชาวบ้าน 291 (กรกฎาคม 2546) : 22 – 26.

[21] น้ำมันสำหรับประกอบอาหาร.ความต่างของน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์.[ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://202.183.216.170/library/pala/wannapa/oil.html [3 มีนาคม 2555]

[22] B.T. Biotec (Thailand) Co.,Ltd. ความแตกต่างของน้ำมันจากพืชและสัตว์เมื่อนำมาทำเป็นไบโอดีเซล. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.siambiodiesel.page.tl/FAQ.htm [3 มีนาคม 2555]

[23] ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล. วัตถุดิบอะไรบ้างที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล.[ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ef049891c [7 มีนาคม 2555]

[24] CPEWiki. น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.cpe.kmutt.ac.th/wiki/Index.php/น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์. [7 มีนาคม 2555]

[25] พรพจน์ศรีสุขชยะกุล. กรดไขมันชนิดไหนที่เราต้องการ. กรุงเทพมหานคร : สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย : 51-56.

[26] คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์. ประเภทของกรดไขมัน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://science.srru.ac.th/org/sci-elearning/courseonline/4022503/chapter4-fatty%20acid2.htm [18 กุมภาพันธ์ 2555]

[27] Wikipedia. Fatty acid. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://en.wikipedia.org/wiki/Fattyacid [13 กุมภาพันธ์ 2555]

[28] จิรพรรณ เจริญสินวรกุล. การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยใช้สารดูดซับ.วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์โพลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

[29] กรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน. ดีเซลจากพืชทางเลือกใหม่ของพลังงาน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.doeb.go.th/dbd/knowledge/biodiesel2.htm [24 มกราคม 2555]

[30] ดำรง สุนทรกิจประไพ. แบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อผลิตไบโอดีเซลผสมน้ำมันพืชภายใต้เงื่อนไขสมบัติน้ำมัน ราคาและฤดูกาล. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

[31] ราตรี พันธุชา.การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้ตัวทำละลายร่วม. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

[32] กรมวิชาการเกษตร. ส่วนประกอบของกรดไขมันที่ได้จากผลของน้ำมันปาล์ม. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://it.doa.go.th/palm/linkTechnical/oil%20palm%20processing.html [1 มกราคม 2555]

[33] Jan Willem van Gelder. Greasy Palms : European buyers of Indonesian palm oil. Friends of the earth (March 2004) : 1-64

[34] นุชจรี เลาห์ประเสริฐ. การสังเคราะห์เมทิลเอสเตอร์จากน้ำมันประกอบอาหารที่ใช้แล้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, หลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์โพลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

[35] Etinkaya., M.C. and Karaosmanog., F. Optimization of Base-Catalyzed Transesterification Reaction of Used Cooking Oil. Chemical Engineering Department, Istanbul Technical University, Turkey, Energy & Fuels 18 (2004) : 1888-1895.

[36] ABDULLAH., M.B. BIODIESEL FUEL FROM WASTE COOKING OIL & RBD PALM OIL VIA TRANSESTERIFICATION REACTION WITH THE AID OF SODIUM METHOXIDE, METHANOL, AND ULTRASONIC REACTOR. MUGHIRAH BIN. Faculty of Chemical and Natural Resources Engineering (Malaysia) (2008) : 222 – 242.

[37] Food Network Solution. กรดไขมันอิสระ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.foodnetworksolution.com/vocab/wordcap/free%20fatty%20acid [30 มกราคม 2555]

[38] ศูนย์รวมตำราเรียนรามคำแหง. การสกัดแยกและวิเคราะห์ลิพิด. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://e-book.ram.edu/e-book/t/TN3 12(L)51/TN312-4.pdf [16 มกราคม 2555]

[39] KASIM., N. B. SEPARATION TEHCNIQUE OF CRUDE PALM OIL AT CLARIFICATION AREA VIA OPTIMUM PARAMETERS. Faculty of Chemical and Natural Resources Engineering (Malaysia) (2009) : 344 - 356

[40] สุกัญญา มากมี. การทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤตโดยกระบวนการแบบต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต,สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิคคณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

[41] ศศิเกษม ทองยงศ์และพรรณี เดชกำแหง. เคมีอาหารเบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, 2530.

[42] สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน. ไบโอดีเซล (Biodiesel). โครงการการจัดทำระบบฐานข้อมูลพลังงานเพื่อการวิเคราะห์และวางแผนยุทธศาสตร์พลังงานของประเทศ. ภาควิชาเครื่องกลคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2550.

[43] อาภาณี เหลืองนฤมิตร วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ไบโอดีเซล (Biodiesel). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.vcharkarn.com/varticle/409 [9 กุมภาพันธ์ 2555]

[44] สิทธิศักดิ์ครองเดช. การปรับปรุงคุณภาพน้ำมันพืชหลังการใช้เพื่อทดแทนน้ำมันดีเซล. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต,สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงานคณะพลังงานและวัสดุมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543.

[45] สุปรียา ศุขเกษม. การปรับปรุงคุณภาพน้ำมันปาล์มโอเลอีนที่ใช้ทอดแล้วด้วยเถ้าแกลบ. กลุ่มงานวิจัยน้ำมันพืชและสารธรรมชาติที่เกิดจากพืช กองเกษตรเคมี กรมวิชาการเกษตร, 2545.

[46] Noureddini, H.and D. Zhu. Kinetic of Transesterification of Soybean Oil., JAOCS 74(11), (1997) : 1457-1463.

[47] Ma, F., L.D. Clements and M.A. Hanna. The effect of catalyst, free fatty acids, and water on transesterification of beef tallow. American Society of AgriculturalEngineers (1998) : 1261-1264.

[48] Ulf, S., Ricardo, S. and Rogério, M.V. Transesterification of Vegetable Oils: a Review. Journal of the Brazilian Chemical Society. Vol. 9, No. 1, (1998) : 199-210.

[49] Marchetti, J.M., Errazu, A.F. Biodiesel production from acid oils and ethanol using a solid basic resin as catalyst. Biomass & Bioenergy. 34(3), (2010) : 272-277.

[50] อ้อยใจ ทองเฌอ, วิทูรัช กู๊ดวิน, อุกฤษฎ์ สหพัฒน์สมบัติ. รู้จักไบโอดีเซลใน 4 ชั่วโมง. ปทุมธานี : สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2550.

[51] Waste Management and Research Center (2006). Small Scale Biodiesel Production. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : www.wmrc.com [10 ตุลาคม 2554]

[52] Ramadhas, A.S., S. Jayaraj and C. Muraleeharan. Biodiesel production from high FFA rubber seed oil. Fuel. 84 (2005) : 335-340.

[53] นฤภา อาคะพงษ์. การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ของเสียปลาทะเลจากโรงงานอาหารทะเลแช่แข็งเพื่อผลิตไบโอดีเซล. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต,สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2552.

[54] คมสัน หุตะแพทย์, สุทัศนา กำเนิดทอง, กำพล กาหลงและณัฐภูมิ สุดแก้ว. ทำไบโอดีเซลใช้เอง. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์เกษตรกรรมธรรมชาติ, 2552.

[55] ชาคริต ทองอุไร, สัณห์ชัย กลิ่นพิกุล, จรัญ บุญกาญจน์ และพิมพรรณ เกียรติชิมกุล. การผลิตไบโอดีเซลจากผลิตผลปาล์มน้ำมัน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต,ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2544.

[56] Fukuda, H., A. Kondo and H. Noda. Biodiesel fuel production by transesterification of oils. Journal of Bioscience and Bioengineering. 92 (2001) : 405-416.

[57] Alcaine, A., A. Biodiesel from Microalgae Final Degree Project. Master's Thesis, Royal School of Technology Kungliga Tekniska Högskolan, Chemical Engineering & Technology, 2010.

[58] วัชรียา วุฒิสวัสดิ์. กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้ว. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

[59] วิภาดา วันแรก, นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์, วิทยาปั้นสุวรรณ, และรยากรนกแก้ว. การเปรียบเทียบกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วให้ได้คุณสมบัติตามมาตรฐานไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์. วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม, ภาควิชาเคมีคณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2553.

[60] ณัฐพงษ์ พงษ์บุตรและอิสร์รัชช์ ขจรรุ่งศิลป์. การพัฒนาเครื่องผลิตไบโอดีเซลแบบกะขนาด 20 ลิตร โดยใช้ Static Mixer ร่วมกับระบบ Ultrasonic และไมโครเวฟ. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2551.

[61] Meher, L.C., D. Sagar and S.N. Naik. Technical aspects of biodiesel production by Transesterification-a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 10 (2004) : 1-21.

[62] Kapilakarn, K. and Peugtong, A. A Comparison of Costs of Biodiesel Production from Transesterication. Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, International Energy Journal 8 (2007) : 1-6

[63] กรมชลประทาน. ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://irrigation.rid.go.th/rid 17/Myweb/m ahanical/bio1.html [7 กรกฎาคม 2554]

[64] บริษัท เพียวไบโอดีเซล จำกัด. กระบวนการเตรียมและปรับสภาพน้ำมันปาล์มดิบ (Pre-Treatment Process). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.purebiodiesel.co.th/html-th/product/product5.php [9 กุมภาพันธ์ 2555]

[65] Bio-Diesel. ขั้นตอนการเตรียมก่อนการผลิตไบโอดีเซล.[ออนไลน์]. แหล่งที่มา : https://sites.google.com/site/projectbiodiesel2/khan-txn-kar-phlit-bi-xo-disel [7 กรกฎาคม 2554]

[66] Planenergy (Thailand). ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล.[ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.planenergy.co.th/code/22 [7 กรกฎาคม 2554]

[67] กระทรวงพลังงาน. การผลิตไบโอดีเซลตรวจวัดและผลกระทบ.[ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.region1.m-energy.go.th/0gkramrubio/bio/4.pdf [7 กรกฎาคม 2554]

[68] เทคโนโลยีพลังงานชุมชน. ไบโอดีเซล. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.supradit.com/biodiesel/biodiesel2.php [8 สิงหาคม 2554]

[69] สถาบันส่งเสริมการ สอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ข้อดีของไบโอดีเซล. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.energyfantasia.com/ef4/webboard/viewboard.php?Id=11479 [19 กุมภาพันธ์ 2555]

[70] ธราพงษ์ วิทิตศาสตร์ , สุชญา นิติวัฒนนานนท์, นุจรี เลาห์ประเสริฐและธนาทิพย์ อัศวผดุงสิทธิ์. การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำน้ำมันพืชที่ประกอบอาหารมาใช้ประโยชน์แทนด้านพลังงาน (ส่วนที่ 2). กรุงเทพมหานคร : สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 2546.

[71] สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. การผลิตและตรวจสอบมาตรฐานไบโอดีเซล. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.tistr.or.th/tistr2006/source/techno/bio200712.pdf [7 กรกฎาคม 2554]

[72] เครื่องไตเตรทอัตโนมัติ.[ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://th.mt.com/th/th/home/products/Laboratory_Analytics_Browse/Product_Family_Browse_titrators_main/Lowend_titrators_family_page.html [12 กุมภาพันธ์ 2555]

[73] Planenergy (Thailand). การไตเตรทน้ำมันตั้งต้นของไบโอดีเซล.[ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.planenergy.co.th/node/65 [16 กรกฎาคม 2554]

[74] กฤษดา น้อยโรจน์. การศึกษาเปรียบเทียบระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/Al_2O_2และ KOH/NaY สำหรับการผลิตไบโอดีเซลโดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันจากน้ำมันปาล์ม. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาปิโตรเคมีเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.

[75] EN14103 : Fat and oil derivatives – fatty acid methyl esters (FAME) – determination of ester and linolenic acid methyl ester contents. European Committee for Standardization, Brussels (Belgium) 2003 : 1-10

[76] Leung, D.Y.C. and Y. Guo. Transesterification of neat and used frying oil : Optimization for biodiesel production. Fuel Processing Technology. 87 (2006) : 883-890.

[77] ทัศนีย์ สวัสดิ์พาณิชย์. การหาสภาวะที่เหมาะสมทางสถิติของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2550.

[78] กัญจนา บุณยเกียรติ. การคำนวณขั้นต้นในวิชาวิศวกรรมเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.

[79] ปิติ ตรีสุกล. อุณหพลศาสตร์เคมี.[ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://ptt2moons.blogspot.com/2009/10/thermochemistry.html [24 พฤษภาคม 2554]

[80] Patchreeya Pituksuteepong. Mass Balance. Faculty of Food and Agricultural Technology PSRU, 2011.

[81] Nevers,. N. D. Fluid Mechanics for Chemical Engineers. 3rd ed. Boston : McGraw-Hill, 2005.

[82] ทบวงมหาวิทยาลัย. เคมีเล่ม 1. กรุงเทพมหานคร : อักษรเจริญทัศน์, 2540.

[83] หน่วยการเรียนรู้เรื่องไฟฟ้า. การคำนวณหากำลังไฟฟ้า.[ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.rmutphysics.com/charud/scibook/electric3/pan14.htm [12 พฤษภาคม 2554]

[84] ปารเมศชุติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

[85] ธีรยุทธิ์ ยกซิ้ว. การปรับปรุงคุณภาพในกระบวนการผลิตกระเบื้องบิสกิตโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์, 2552.

[86] ชมพูนุช พรเจริญนพ. ไบโอดีเซล : พลังงานทางเลือกใหม่ในยุคน้ำมันแพง.สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ ข่าวรามคำแหง ปี 38 ฉบับที่ 14 (21-27 กรกฎาคม), 2551.

[87] กฎหมายควบคุม, ไบโอดีเซล.[ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.manasu.safety-stou.com/%E0%B9%84%E0%B8%9A%E0%B9%82%E0%B8%AD%E0% B8%94%E0%B8%B5%E0%B9%80%E0%B8%8B%E0%B8%A5. [29 กุมภาพันธ์ 2555]

[88] กรกช ทิณพงษ์และพรประภา บุญสมโชค. Transesterification น้ำมันปาล์ม. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

[89] ยุทธนา จำปาหอม. ไบโอดีเซลจากทรานส์เอสเตอริฟิเคชันเร่งปฏิกิริยาด้วยเบสของน้ำมันไก่. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต,สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

[90] ทรงธรรมโพธิ์ถาวร, รวมพรนิคม, มนัสจันทร์ณรงค์, วรุตย์คงกำเนิดและชาคริตทองอุไร. การผลิตไบโอดีเซลจากไขมันหมูแบบครบวงจร. สถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2549.

[91] B.T. Biotec (Thailand) Co.,Ltd. ความแตกต่างของน้ำมันจากพืชและสัตว์เมื่อนำมาทำเป็นไบโอดีเซล. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.siambiodiesel.page.tl/FAQ.htm [3 มีนาคม 2555]

[92] วสันต์ เธียรสุวรรณ. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว : ผลกระทบของค่าตัวแปรในกระบวนการผลิต. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 2551.

[93] วัฒนา ปิ่นเสม, นพวรรณ ชนัญพาณิชย์, นฤมล เครืออองอาจนุกูลและปิยะ คำสุข. ไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลือง, เมทิลเอสเทอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2552.

[94] วิชณีย์ ออมทรัพย์สิน. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดในปาล์มดิบ. ศูนย์วิจัยปาล์มน้ำมันสุราษฎ์ธานี, 2549.

[95] Bunyakiat, K., Makmee, S., Sawangkeaw, R. and Ngamprasertsith, S. Continuous Production of Biodiesel via Transesterification from Vegetable Oils in Supercritical Methanol. Fuels Research Center, Department of Chemical Technology, Faculty of Science,Chulalongkorn UniVersity. Energy & Fuels 20 (2006) : 812-817.

[96] สมหมาย สารมาทและวิชัยฉัต รทินวัฒน์. การวิเคราะห์ปัจจัยเพื่อกำหนดวิธีปฏิบัติในการเชื่อมแบบทังสเตนอาร์คเพื่อลดการแตกร้าวสำหรับเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นเอสเคดี 11. วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่14 (2-3) (2007) : 34-41.

[97] Darnoko, D. and Cheryan M. Kinetics of Palm Oil Transesterification in a Batch Reactor. JAOCS 77 (2000) : 1263-1267.

[98] Tomasevic, A.V., Siler-Marinkovic, S.S., Methanolysis of used frying oil. Fuel Processing Technology 81 (2003) : 1 – 6.

[99] จุฑาเกศ เทียนเมธางกูร. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ผ่านการใช้ทอดแล้วโดยกระบวนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2551.

[100] วัฒนา บัวภูมิ, ศิริชัย เทพาและเก้ากันยา สุดประเสริฐ. การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ช่วยในการผลิตไบดีเซล. การประชุมวิชาการพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ1. (2550) : 1-9.

[101] คลินิกเทคโนโลยี เครื่องผลิตไบโอดีเซลพลังงานความร่วม. วารสารคลินิกเทคโนโลยี วิทยาลัยอุบลราชธานี (2550) : 38-42.

[102] ฐานิสร์ สุรภาพวงศ์. การประมาณความไม่แน่นอนของปริมาณน้ำมันในแหล่งที่คำนวณจากการสมดุลมวลสาร. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมปิโตรเลียม ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.

[103] กุลธิดา อารีย์สว่างกิจ. ดุลมวลของของแข็งในกระบวนการสร้างเพลเล็ตแบบไหลขึ้นโดยใช้น้ำดิบของ กปน. เป็นน้ำป้อนและสารส้มโคแอกกูแลนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต,สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.

[104] ช่อลดา บุญธนาวงศ์และประกอบ กิจไชยา. แบบจำลองการสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนต่อเนื่องแบบอนุกรมที่มีการป้อนสารกลับ. วารสารวิศวกรรมมหาวิทยาลัยเชียงใหม่16 (1) (2552) : 54-60

[105] วศิน ลีนะนิธิกุล. การออกแบบตัวควบคุมและ HMI สำหรับถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2551.

[106] ทรงสุดา พรหมทอง. การเตรียมตัวอย่างและทดสอบหาปริมาณ FAME ในน้ำมันไบโอดีเซลด้วยเครื่อง GC : 1- 10.

[107] Technical Data. ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันปาล์ม. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.chempro.in/palmoilproperties.htm [9 พฤษภาคม 2555]

[108] คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. การวิเคราะห์รีเกรสชัน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.agro.cmu.ac.th/e_books/605312/regression/regression_analysis/regression_analysis.html [9 พฤษภาคม 2555]

[109] Haaland, P.D. Experimental Design in Biotechnology. Marcel Dekker, Inc. New York, USA, 1989.

[110] Hu, R. Food Product Design : A Computer-Aided Statistical Approach. Techomic Publishing Co., Ltd. Pennsylvania, USA, 1999.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

วิธีการติดตั้งค่าสำหรับเครื่องแก๊ซโครมาโทกราฟี

Method

<Analytical Line 1>

[Auto Sampler AOC-20i+s]
Injection Volume : 1.0 uL
# of Rinses with Solvent(Pre-run) : 2
# of Rinses with Solvent(Post-run) : 2
# of Rinses with Sample : 2
Plunger Speed(Suction) : High
Viscosity Comp. Time : 0.2 sec
Plunger Speed(Injection) : High
Syringe Insertion Speed : High
Injection Mode : Normal
Multi Injection Count : 1
Pumping Times : 5 times
Injection Port Dwell Time : 0.0 sec
Terminal Air Gap : No
Plunger Washing Speed : High
Washing Volume : 8 uL
Syringe Suction Position : 0 mm
Syringe Injection Position : 0 mm
Solvent Selection : only A

[Injection Port SPL1]
Injection Mode : Split
Temperature : 230.0 C
Carrier Gas : He
Flow Control Mode : Velocity
Pressure : 97.7 kPa
Total Flow : 39.6 mL/min
Column Flow : 1.74 mL/min
Linear Velocity : 37.5 cm/sec
Purge Flow : 3.0 mL/min
Split Ratio : 20.0
High Pressure Injection : OFF
Carrier Gas Saver : OFF
Splitter Hold : OFF

[Column Oven]
Initial Temperature : 200.0 C
Equilibration Time : 3.0 min
=Column Oven Temperature Program=
Total Program Time : 14.00 min

Rate(C/min)	Temperature(C)	Hold Time(min)
------	200.0	14.00

รูปที่ ก-1 แสดงการติดตั้งสำหรับเครื่องโครมาโทกราฟี (model GC – 2010, Shimadzu, Japan)

[Column Information]
Column Name : BP-20
Serial Number : 054433
Film Thickness : 0.25 um
Column Length : 30.0 m
Inner Diameter : 0.32 mm ID
Column Max Temp : 220 C

[Detector Channel 1 FID1]
Temperature : 250.0 C
Signal Acquire : Yes
Sampling Rate : 40 msec
Stop Time : 14.00 min
Delay Time : 0.00 min
Subtract Detector : None
Makeup Gas : N2/Air
Makeup Flow : 30.0 mL/min
H2 Flow : 40.0 mL/min
Air Flow : 400.0 mL/min

[General]
< Ready Check Heat Unit >
Column Oven : Yes
SPL1 : Yes
FID1 : Yes
< Ready Check Detector (FTD) >
< Ready Check Baseline Drift >
FID1 : No
< Ready Check Injection Flow >
SPL1 Carrier : Yes
SPL1 Purge : Yes
< Ready Check Add. Flow >
< Ready Check Detector APC Flow >
FID1 Makeup : Yes
FID1 H2 : Yes
FID1 Air : Yes
External Wait : No
Auto Flame On : No
Auto Flame Off : Yes
Reignite : No
Auto Zero After Ready : Yes

รูปที่ ก-1 แสดงการติดตั้งสำหรับเครื่องโครมาโทกราฟี (model GC – 2010, Shimadzu, Japan)

(ต่อ)

[Peak Integration Parameters - Channel 1]

Width	: 3 sec	Slope	: 1000 uV/min
Drift	: 15000 uV/min	T.DBL	: 1000 min
Min.Area/Height	: 30000 counts		

[Quantitative Parameters - Channel 1]

=Quantitative Parameters=			
Quantitative Method	: External Standard		
Calculated by	: Area	Calibration Level#	: 1
Calibration Curve	: Linear	Through Origin	: Not through
Weight Regression	: None	Unit	: ppm
=Identification Parameters=			
Window/Band	: Window	Window	: 5 %
Default Band Time	: ---	Identification Method	: Absolute
Peak Select	: All Peaks	Grouping	: None
Correction RT	: No Change		

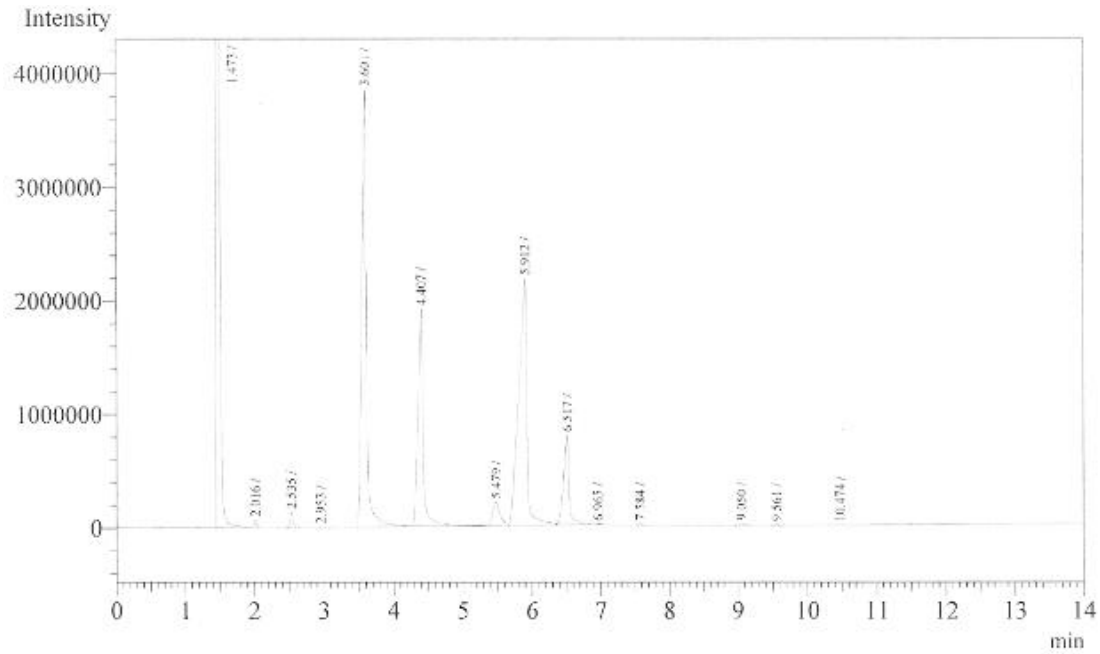
[Column Performance Parameters - Channel 1]

Calc. Method	: JP	Column Length	: 0 mm
Time of Unretained Peak	: Time of 1st Peak	Set Time	: ---
Calculated for Identified Peak	: OFF		

รูปที่ ก-1 แสดงการติดตั้งสำหรับเครื่องโครมาโทกราฟี (model GC – 2010, Shimadzu, Japan) (ต่อ)

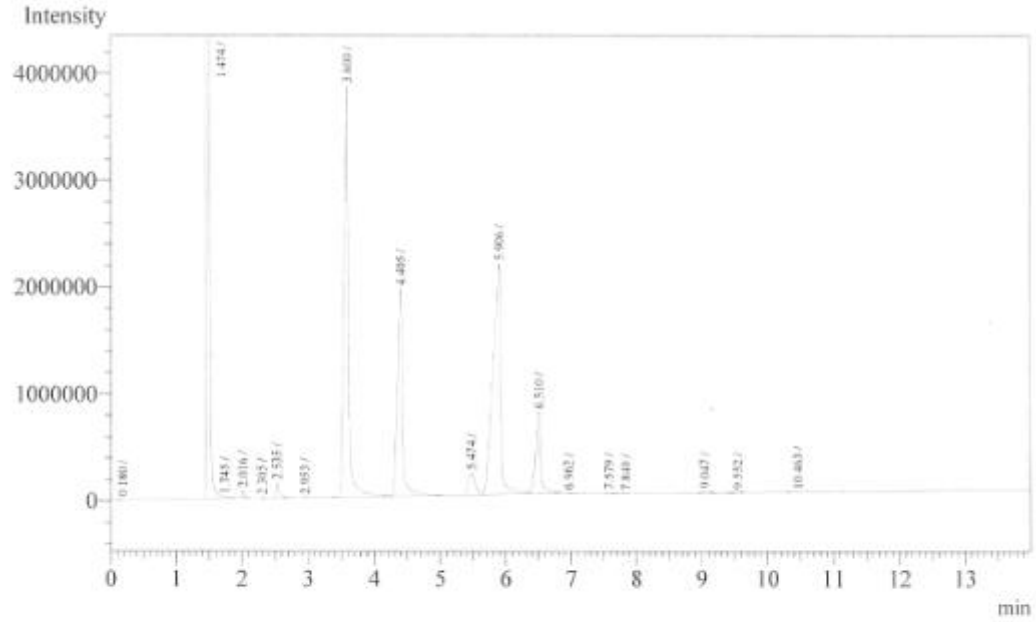
ภาคผนวก ข.

ตัวอย่างกราฟโครมาโทกราฟีที่อ่านค่าได้จากเครื่องแก๊ซโครมาโทกราฟี



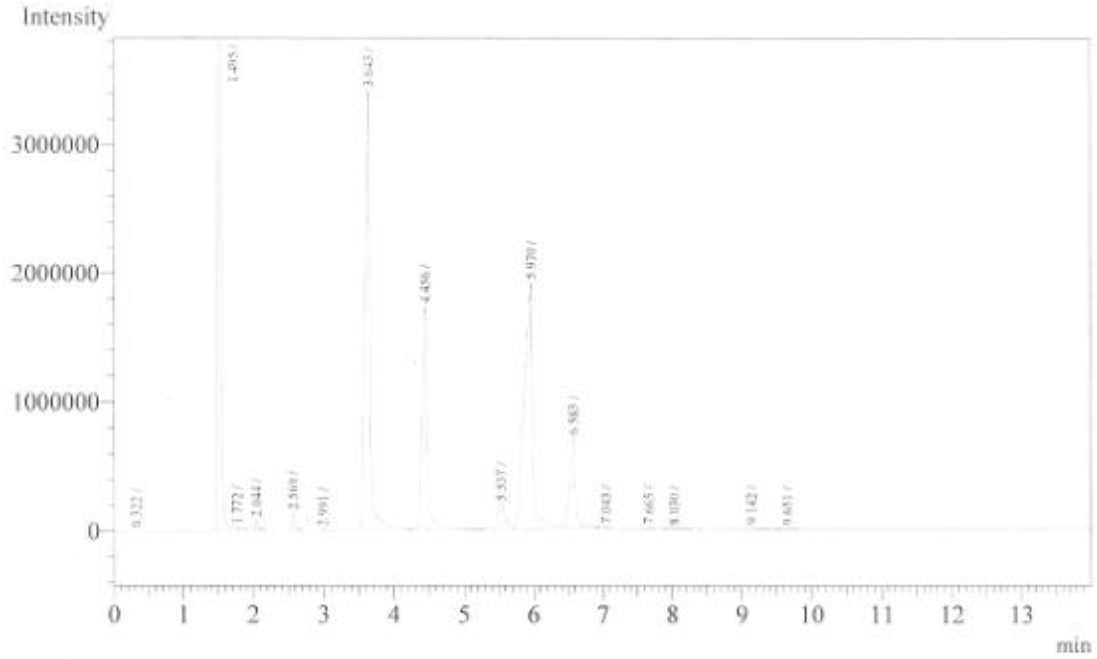
Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	1.473	766155066	18062456	0.000		S		
2	2.016	128907	63017	0.000				
3	2.535	366002	134083	0.000				
4	2.953	15646	4950	0.000				
5	3.601	17605305	3825230	0.000				
6	4.407	9795865	1899411	0.000				
7	5.479	1539265	208265	0.000				
8	5.912	17975083	2164956	0.000		V		
9	6.517	4374874	783818	0.000		V		
10	6.965	14702	3327	0.000				
11	7.584	53260	10312	0.000				
12	9.050	107298	13712	0.000				
13	9.561	41979	5095	0.000				
14	10.474	7238	1077	0.000				
Total		818180490	27179709					

รูป ข-1 แสดงโครมาโทแกรมของเมทิลเอสเตอร์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน ณ สภาวะการทำปฏิกิริยาที่ระดับอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสเวลา 60 นาที และใช้ปริมาณเมทานอล 15%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์มใช้แล้ว โดยใช้น้ำมันปาล์มที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFAเป็นสารตั้งต้น (ทดลองครั้งที่ 2.) และอ่านค่าปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ได้ 86.14%



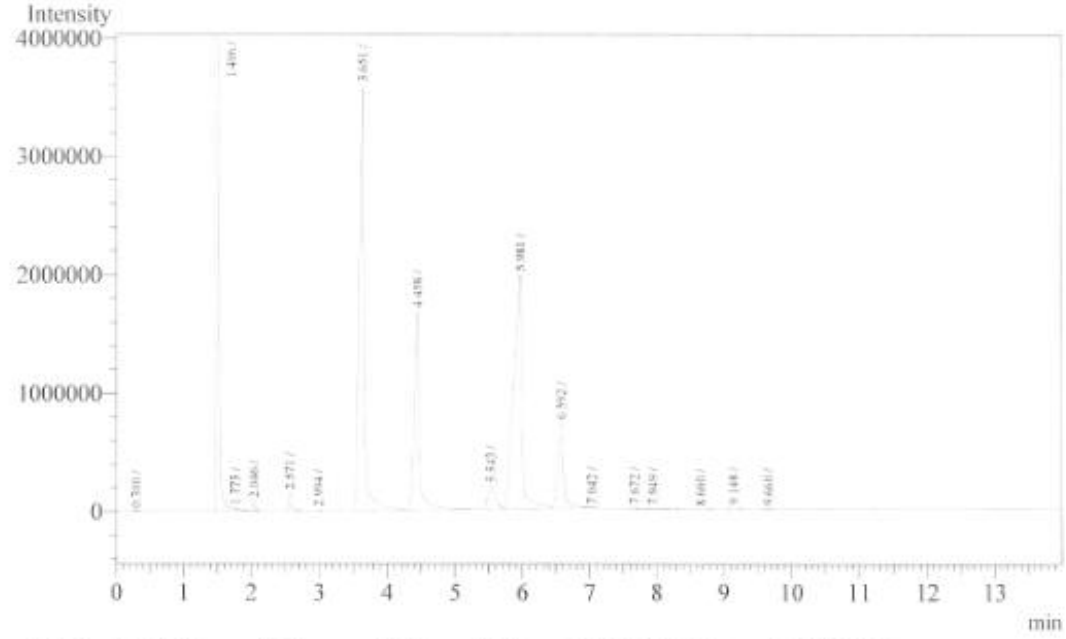
Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	0.180	12502	1204	0.000				
2	1.474	755959153	09760418	0.000		S		
3	1.745	6246	4461	0.000		T		
4	2.016	153347	70825	0.000				
5	2.305	9595	3987	0.000				
6	2.535	418003	142974	0.000				
7	2.953	18352	5625	0.000				
8	3.600	17824203	3830852	0.000				
9	4.405	10050190	1929970	0.000		V		
10	5.474	1575441	207811	0.000				
11	5.906	17704379	2150627	0.000		V		
12	6.510	4270605	762341	0.000		V		
13	6.962	18098	4133	0.000				
14	7.579	56721	10852	0.000				
15	7.840	5804	1246	0.000				
16	9.047	116798	15050	0.000				
17	9.552	43042	5464	0.000				
18	10.463	12670	1102	0.000				
Total		808255149	18908942					

รูป ข-2 แสดงโครมาโทแกรมของเมทิลเอสเตอร์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน ณ สภาวะการทำปฏิกิริยาที่ระดับอุณหภูมิ 30องศาเซลเซียสเวลา30 นาที และใช้ปริมาณเมทานอล 25%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์มใช้แล้ว โดยใช้น้ำมันปาล์มที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFAเป็นสารตั้งต้น (ทดลองครั้งที่ 2.)และอ่านค่าปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ได้ 83.90%



Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	0.322	13421	1231	0.000				
2	1.495	724811650	98824160	0.000		S		
3	1.772	14362	9792	0.000		T		
4	2.044	148316	72277	0.000				
5	2.569	358933	131260	0.000				
6	2.991	16964	5322	0.000				
7	3.643	15477331	3387007	0.000				
8	4.456	8728750	1715111	0.000				
9	5.537	1401313	193254	0.000				
10	5.970	15607062	1897856	0.000		V		
11	6.583	3891081	695084	0.000		V		
12	7.043	15761	3722	0.000				
13	7.665	45373	9613	0.000				
14	8.030	129813	5480	0.000				
15	9.142	102848	13330	0.000				
16	9.651	39873	5012	0.000				
Total		770802851	06969511					

รูป ข-3 แสดงโครมาโทแกรมของเมทิลเอสเตอร์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน ณ สภาวะการทำปฏิกิริยาที่ระดับอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสเวลา 30 นาที และใช้ปริมาณเมทานอล 25%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์มใช้แล้ว โดยใช้น้ำมันปาล์มที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFAเป็นสารตั้งต้น (ทดลองครั้งที่ 1.) และอ่านค่าปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ได้ 85.01%



Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	0.300	14478	1272	0.000				
2	1.496	730434589	05414423	0.000		S		
3	1.773	16117	10869	0.000		T		
4	2.046	161210	78054	0.000				
5	2.571	404635	146835	0.000				
6	2.994	18533	5708	0.000				
7	3.651	16950328	3573032	0.000				
8	4.458	8779998	1672434	0.000		V		
9	5.543	1481296	199573	0.000				
10	5.981	16708523	1971791	0.000		V		
11	6.592	4089094	723771	0.000		V		
12	7.042	14262	3268	0.000				
13	7.672	48209	10046	0.000				
14	7.949	84416	4855	0.000				
15	8.660	10403	1629	0.000				
16	9.148	110999	14220	0.000				
17	9.660	44398	5309	0.000				
Total		779371488	13837089					

รูป ข-4 แสดงโครมาโทแกรมของเมทิลเอสเตอร์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน ณ สภาวะการทำปฏิกิริยาที่ระดับอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสเวลา 30 นาที และใช้ปริมาณเมทานอล 25%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์มใช้แล้ว โดยใช้น้ำมันปาล์มที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFAเป็นสารตั้งต้น (ทดลองครั้งที่ 1.) และอ่านค่าปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) ได้ 91.44%

ภาคผนวก ค.

คำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME)ที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซล

ตารางที่ ค-1 แสดงการคำนวณปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 0.427%FFAเป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.)

				การคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) : อ่านค่าจากกราฟโครมาโทแกรมของสารตัวอย่าง					
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	พื้นที่รวมของเมทิลเอสเทอร์ ($\sum$ A)	พื้นที่ของ Methyl Heptadeanoate (A_{EI})	ความเข้มข้นของ Methyl Heptadeanoate (C_{EI} : mg./ml)	ปริมาตรของ Methyl Heptadeanoate (V_{EI} : ml.)	น้ำหนักของตัวอย่างไบโอดีเซล (m : mg.)	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (C or %FAME)
0.427	30	30	15	42,934,349	8,311,610	10.0001	5	251	**82.98**
			25	46,073,023	8,434,667	10.0001	5	250	**89.25**
		60	15	45,023,075	8,407,763	10.0001	5	251	**86.75**
			25	49,025,580	8,842,739	10.0001	5	250	**90.88**
			50	46,688,683	8,248,147	10.0001	5	253	**92.11**
		120	25	41,883,161	7,610,095	10.0001	5	253	**89.01**
			50	44,713,226	7,960,161	10.0001	5	253	**91.25**

ตารางที่ ค-1 แสดงการคำนวณปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ0.427%FFAเป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.)

(ต่อ)

				การคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) : อ่านค่าจากกราฟโครมาโทแกรมของสารตัวอย่าง					
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	พื้นที่รวมของเมทิลเอสเทอร์ ($\sum$ A)	พื้นที่ของ Methyl Heptadeanoate (A_{EI})	ความเข้มข้นของ Methyl Heptadeanoate (C_{EI} : mg./ml)	ปริมาตรของ Methyl Heptadeanoate (V_{EI} : ml.)	น้ำหนักของตัวอย่างไบโอดีเซล (m : mg.)	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (C or %FAME)
0.427	45	30	15	40,514,833	7,250,401	10.0001	5	251	**91.39**
			25	51,491,132	9,237,486	10.0001	5	250	**91.48**
			50	46,931,683	8,289,747	10.0001	5	253	**92.12**
		60	15	38,809,842	7,347,144	10.0001	5	251	**85.31**
			25	55,719,822	10,211,710	10.0001	5	251	**88.78**
			50	46,961,683	8,320,997	10.0001	5	253	**91.77**
		120	15	40,891,848	7,879,994	10.0001	5	251	**83.44**
			25	42,645,672	7,851,861	10.0001	5	253	**87.58**
			50	46,785,175	8,541,147	10.0001	5	250	**89.55**

ตารางที่ ค-1 แสดงการคำนวณปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ0.427%FFAเป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.)

(ต่อ)

				การคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) : อ่านค่าจากกราฟโครมาโทแกรมของสารตัวอย่าง					
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	พื้นที่รวมของเมทิลเอสเทอร์ ($\sum$ A)	พื้นที่ของ Methyl Heptadeanoate (A_{EI})	ความเข้มข้นของ Methyl Heptadeanoate (C_{EI} : mg./ml)	ปริมาตรของ Methyl Heptadeanoate (V_{EI} : ml.)	น้ำหนักของตัวอย่างไบโอดีเซล (m : mg.)	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (C or %FAME)
0.427	60	30	15	52,119,350	9,029,187	10.0001	5	250	**95.45**
			25	53,218,460	9,062,387	10.0001	5	252	**96.68**
		60	15	51,771,861	9,150,340	10.0001	5	250	**93.16**
			25	51,797,509	8,857,490	10.0001	5	252	**96.19**
			50	43,115,816	7,353,161	10.0001	5	251	**96.88**
		120	25	42,702,696	7,374,161	10.0001	5	251	**95.44**

ตารางที่ ค-2 แสดงการคำนวณปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 0.427%FFAเป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.)

				การคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) : อ่านค่าจากกราฟโครมาโทแกรมของสารตัวอย่าง					
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	พื้นที่รวมของเมทิลเอสเทอร์ ($\sum$ A)	พื้นที่ของ Methyl Heptadeanoate (A_{EI})	ความเข้มข้นของ Methyl Heptadeanoate (C_{EI} : mg./ml)	ปริมาตรของ Methyl Heptadeanoate (V_{EI} : ml.)	น้ำหนักของตัวอย่างไบโอดีเซล (m : mg.)	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (C or %FAME)
0.427	30	30	15	51,873,908	10,342,712	10.0001	5	250	**80.31**
			25	46,548,289	8,534,700	10.0001	5	251	**88.73**
		60	15	44,296,881	8,329,663	10.0001	5	251	**86.02**
			25	40,514,833	7,250,401	10.0001	5	251	**91.39**
			50	46,785,175	8,248,147	10.0001	5	253	**92.34**
		120	25	47,357,382	8,500,669	10.0001	5	252	**90.70**
			50	42,885,333	7,610,095	10.0001	5	253	**91.61**

ตารางที่ ค-2 แสดงการคำนวณปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 0.427%FFAเป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.)

(ต่อ)

				การคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) : อ่านค่าจากกราฟโครมาโทแกรมของสารตัวอย่าง					
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	พื้นที่รวมของเมทิลเอสเทอร์ ($\sum$ A)	พื้นที่ของ Methyl Heptadeanoate (A_{EI})	ความเข้มข้นของ Methyl Heptadeanoate (C_{EI} : mg./ml)	ปริมาตรของ Methyl Heptadeanoate (V_{EI} : ml.)	น้ำหนักของตัวอย่างไบโอดีเซล (m : mg.)	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (C or %FAME)
0.427	45	30	15	48,863,106	8,779,998	10.0001	5	250	**91.31**
			25	50,491,132	9,000,586	10.0001	5	250	**92.20**
			50	46,931,683	8,257,847	10.0001	5	253	**92.56**
		60	15	51,987,838	9,795,865	10.0001	5	250	**86.14**
			25	55,719,822	10,115,910	10.0001	5	251	**89.80**
			50	46,931,683	8,452,997	10.0001	5	251	**90.68**
		120	15	44,929,398	8,688,110	10.0001	5	252	**82.77**
			25	42,660,787	7,821,961	10.0001	5	253	**88.02**
			50	46,785,175	8,495,547	10.0001	5	250	**90.14**

ตารางที่ ค-2 แสดงการคำนวณปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 0.427%FFAเป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.)

(ต่อ)

				การคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) : อ่านค่าจากกราฟโครมาโทแกรมของสารตัวอย่าง					
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	พื้นที่รวมของเมทิลเอสเทอร์ ($\sum$ A)	พื้นที่ของ Methyl Heptadeanoate (A_{EI})	ความเข้มข้นของ Methyl Heptadeanoate (C_{EI} : mg./ml)	ปริมาตรของ Methyl Heptadeanoate (V_{EI} : ml.)	น้ำหนักของตัวอย่างไบโอดีเซล (m : mg.)	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (C or %FAME)
0.427	60	30	15	53,550,906	9,365,827	10.0001	5	250	**94.35**
			25	54,842,927	9,379,933	10.0001	5	250	**96.94**
		60	15	43,146,544	7,559,367	10.0001	5	251	**93.78**
			25	54,002,652	9,177,286	10.0001	5	253	**96.53**
			50	42,702,696	7,251,412	10.0001	5	253	**96.62**
		120	25	42,628,611	7,374,412	10.0001	5	253	**94.48**

ตารางที่ ค-3 แสดงการคำนวณปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 0.512%FFAเป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.)

				การคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) : อ่านค่าจากกราฟโครมาโทแกรมของสารตัวอย่าง					
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	พื้นที่รวมของเมทิลเอสเทอร์ ($\sum$ A)	พื้นที่ของ Methyl Heptadeanoate (A_{EI})	ความเข้มข้นของ Methyl Heptadeanoate (C_{EI} : mg./ml)	ปริมาตรของ Methyl Heptadeanoate (V_{EI} : ml.)	น้ำหนักของตัวอย่างไบโอดีเซล (m : mg.)	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (C or %FAME)
0.512	30	30	15	44,883,676	9,191,164	10.0001	5	252	**77.05**
			25	44,098,802	8,475,396	10.0001	5	252	**83.40**
		60	15	87,332,639	17,205,835	10.0001	5	250	**81.52**
			25	46,961,847	8,780,057	10.0001	5	252	**86.28**
			50	41,778,500	7,610,095	10.0001	5	253	**88.73**
		120	25	41,998,813	7,950,608	10.0001	5	252	**84.97**
			50	43,115,816	7,960,161	10.0001	5	253	**87.28**

ตารางที่ ค-3 แสดงการคำนวณปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 0.512%FFAเป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.)

(ต่อ)

				การคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) : อ่านค่าจากกราฟโครมาโทแกรมของสารตัวอย่าง					
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	พื้นที่รวมของเมทิลเอสเทอร์ ($\sum$ A)	พื้นที่ของ Methyl Heptadeanoate (A_{EI})	ความเข้มข้นของ Methyl Heptadeanoate (C_{EI} : mg./ml)	ปริมาตรของ Methyl Heptadeanoate (V_{EI} : ml.)	น้ำหนักของตัวอย่างไบโอดีเซล (m : mg.)	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (C or %FAME)
0.512	45	30	15	53,102,355	10,261,591	10.0001	5	250	**83.50**
			25	52,755,945	9,979,826	10.0001	5	250	**85.73**
		60	15	52,056,361	10,264,269	10.0001	5	250	**81.43**
			25	54,110,276	10,358,220	10.0001	5	251	**84.14**
	60	30	15	52,025,424	9,795,865	10.0001	5	250	**86.22**
			25	54,233,874	9,668,043	10.0001	5	250	**92.19**
		60	15	52,283,494	10,050,190	10.0001	5	250	**84.05**
			25	56,086,728	10,221,037	10.0001	5	251	**89.39**

ตารางที่ ค-4 แสดงการคำนวณปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 0.512%FFAเป็นสารตั้งต้น(ครั้งที่ 2.)

				การคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) : อ่านค่าจากกราฟโครมาโทแกรมของสารตัวอย่าง					
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	พื้นที่รวมของเมทิลเอสเทอร์ ($\sum$ A)	พื้นที่ของ Methyl Heptadeanoate (A_{EI})	ความเข้มข้นของ Methyl Heptadeanoate (C_{EI} : mg./ml)	ปริมาตรของ Methyl Heptadeanoate (V_{EI} : ml.)	น้ำหนักของตัวอย่างไบโอดีเซล (m : mg.)	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (C or %FAME)
0.512	30	30	15	44,773,833	9,191,164	10.0001	5	252	**76.81**
			25	52,212,729	10,050,190	10.0001	5	250	**83.90**
		60	15	43,217,234	8,593,848	10.0001	5	251	**80.26**
			25	46,667,583	8,661,660	10.0001	5	251	**87.41**
			50	42,866,062	7,639,606	10.0001	5	254	**90.77**
		120	25	42,654,672	7,989,761	10.0001	5	253	**85.75**
			50	42,476,361	7,892,374	10.0001	5	250	**87.64**

ตารางที่ ค-4 แสดงการคำนวณปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 0.512%FFAเป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.)

(ต่อ)

				การคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) : อ่านค่าจากกราฟโครมาโทแกรมของสารตัวอย่าง					
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	พื้นที่รวมของเมทิลเอสเทอร์ ($\sum$ A)	พื้นที่ของ Methyl Heptadeanoate (A_{EI})	ความเข้มข้นของ Methyl Heptadeanoate (C_{EI} : mg./ml)	ปริมาตรของ Methyl Heptadeanoate (V_{EI} : ml.)	น้ำหนักของตัวอย่างไบโอดีเซล (m : mg.)	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (C or %FAME)
0.512	45	30	15	47,180,082	9,145,924	10.0001	5	252	**82.51**
			25	45,023,075	8,407,763	10.0001	5	251	**86.75**
		60	15	46,168,329	9,043,864	10.0001	5	251	**81.77**
			25	45,930,693	8,728,750	10.0001	5	251	**84.90**
	60	30	15	45,023,075	8,407,763	10.0001	5	251	**86.75**
			25	54,020,800	9,544,071	10.0001	5	250	**93.20**
		60	15	54,015,930	10,358,220	10.0001	5	251	**83.96**
			25	50,286,728	9,214,037	10.0001	5	251	**88.80**

ตารางที่ ค-5 แสดงการคำนวณปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 0.630%FFAเป็นสารตั้งต้น(ครั้งที่ 1.)

				การคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) : อ่านค่าจากกราฟโครมาโทแกรมของสารตัวอย่าง					
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	พื้นที่รวมของเมทิลเอสเทอร์ ($\sum$ A)	พื้นที่ของ Methyl Heptadeanoate (A_{EI})	ความเข้มข้นของ Methyl Heptadeanoate (C_{EI} : mg./ml)	ปริมาตรของ Methyl Heptadeanoate (V_{EI} : ml.)	น้ำหนักของตัวอย่างไบโอดีเซล (m : mg.)	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (C or %FAME)
0.630	30	30	15	42,074,524	8,817,051	10.0001	5	253	**74.55**
			25	82,794,448	16,285,500	10.0001	5	250	**81.68**
		60	15	39,314,566	8,099,581	10.0001	5	250	**77.08**
			25	40,111,495	7,863,724	10.0001	5	250	**82.02**
			50	42,424,397	7,892,374	10.0001	5	250	**87.51**
		120	25	44,929,398	8,769,610	10.0001	5	252	**81.81**
			50	42,702,696	7,985,012	10.0001	5	253	**85.93**

ตารางที่ ค-5 แสดงการคำนวณปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 0.630%FFAเป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.)

(ต่อ)

				การคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) : อ่านค่าจากกราฟโครมาโทแกรมของสารตัวอย่าง					
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	พื้นที่รวมของเมทิลเอสเทอร์ ($\sum$ A)	พื้นที่ของ Methyl Heptadeanoate (A_{EI})	ความเข้มข้นของ Methyl Heptadeanoate (C_{EI} : mg./ml)	ปริมาตรของ Methyl Heptadeanoate (V_{EI} : ml.)	น้ำหนักของตัวอย่างไบโอดีเซล (m : mg.)	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (C or %FAME)
0.630	45	30	15	47,270,864	9,145,924	10.0001	5	252	**82.71**
			25	45,977,744	8,728,750	10.0001	5	251	**85.01**
		60	15	51,925,078	10,342,712	10.0001	5	250	**80.41**
			25	43,262,206	8,593,848	10.0001	5	251	**80.36**
	60	30	15	48,476,938	9,226,649	10.0001	5	250	**85.08**
			25	52,773,669	9,312,893	10.0001	5	250	**93.34**
		60	15	37,722,239	7,309,017	10.0001	5	250	**83.22**
			25	50,759,296	9,196,594	10.0001	5	251	**90.03**

ตารางที่ ค-6 แสดงการคำนวณปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 0.630%FFAเป็นสารตั้งต้น(ครั้งที่ 2.)

				การคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) : อ่านค่าจากกราฟโครมาโทแกรมของสารตัวอย่าง					
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	พื้นที่รวมของเมทิลเอสเทอร์ ($\sum$ A)	พื้นที่ของ Methyl Heptadeanoate (A_{EI})	ความเข้มข้นของ Methyl Heptadeanoate (C_{EI} : mg./ml)	ปริมาตรของ Methyl Heptadeanoate (V_{EI} : ml.)	น้ำหนักของตัวอย่างไบโอดีเซล (m : mg.)	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (C or %FAME)
0.630	30	30	15	41,869,331	8,817,051	10.0001	5	253	**74.09**
			25	40,004,776	7,863,724	10.0001	5	250	**81.75**
		60	15	43,125,505	8,717,984	10.0001	5	252	**78.31**
			25	48,283,441	9,308,000	10.0001	5	251	**83.41**
			50	42,754,049	7,985,012	10.0001	5	253	**86.05**
		120	25	44,968,564	8,769,610	10.0001	5	252	**81.90**
			50	42,628,611	7,989,761	10.0001	5	253	**85.68**

ตารางที่ ค-6 แสดงการคำนวณปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 0.630%FFAเป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.)

(ต่อ)

				การคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) : อ่านค่าจากกราฟโครมาโทแกรมของสารตัวอย่าง					
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	พื้นที่รวมของเมทิลเอสเทอร์ ($\sum$ A)	พื้นที่ของ Methyl Heptadeanoate (A_{EI})	ความเข้มข้นของ Methyl Heptadeanoate (C_{EI} : mg./ml)	ปริมาตรของ Methyl Heptadeanoate (V_{EI} : ml.)	น้ำหนักของตัวอย่างไบโอดีเซล (m : mg.)	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (C or %FAME)
0.630	45	30	15	38,474,699	7,424,158	10.0001	5	251	**83.31**
			25	52,755,945	9,979,826	10.0001	5	250	**85.73**
		60	15	43,234,516	8,702,247	10.0001	5	250	**79.36**
			25	47,289,022	9,379,338	10.0001	5	250	**80.84**
	60	30	15	44,687,296	8,431,360	10.0001	5	250	**86.00**
			25	52,596,838	9,263,577	10.0001	5	250	**93.56**
		60	15	45,722,239	8,920,817	10.0001	5	250	**82.51**
			25	51,435,781	9,237,486	10.0001	5	250	**91.36**

ตารางที่ ค-7 แสดงการคำนวณปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 1.435%FFAเป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.)

				การคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) : อ่านค่าจากกราฟโครมาโทแกรมของสารตัวอย่าง					
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	พื้นที่รวมของเมทิลเอสเทอร์ ($\sum$ A)	พื้นที่ของ Methyl Heptadeanoate (A_{EI})	ความเข้มข้นของ Methyl Heptadeanoate (C_{EI} : mg./ml)	ปริมาตรของ Methyl Heptadeanoate (V_{EI} : ml.)	น้ำหนักของตัวอย่างไบโอดีเซล (m : mg.)	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (C or %FAME)
1.435	30	30	15	64,138,454	15,630,712	10.0001	5	250	**62.07**
			25	83,907,436	17,458,404	10.0001	5	250	**76.12**
		60	15	39,066,079	8,876,523	10.0001	5	250	**68.02**
			25	43,355,862	8,717,984	10.0001	5	252	**78.83**
			50	40,891,848	8,077,854	10.0001	5	251	**80.92**
		120	25	41,946,468	8,651,717	10.0001	5	253	**76.05**
			50	43,355,862	8,717,984	10.0001	5	252	**78.83**

ตารางที่ ค-7 แสดงการคำนวณปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 1.435%FFAเป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.)

(ต่อ)

				การคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) : อ่านค่าจากกราฟโครมาโทแกรมของสารตัวอย่าง					
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	พื้นที่รวมของเมทิลเอสเทอร์ ($\sum$ A)	พื้นที่ของ Methyl Heptadeanoate (A_{EI})	ความเข้มข้นของ Methyl Heptadeanoate (C_{EI} : mg./ml)	ปริมาตรของ Methyl Heptadeanoate (V_{EI} : ml.)	น้ำหนักของตัวอย่างไบโอดีเซล (m : mg.)	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (C or %FAME)
1.435	45	30	15	42,714,449	8,746,692	10.0001	5	251	**77.36**
			25	43,677,356	8,794,264	10.0001	5	250	**79.33**
			50	83,823,039	16,329,804	10.0001	5	250	**82.66**
		60	15	69,727,834	15,382,604	10.0001	5	250	**70.66**
			25	40,681,222	8,391,657	10.0001	5	251	**76.65**
			50	44,036,587	8,694,196	10.0001	5	252	**80.66**
		120	15	44,098,802	9,839,199	10.0001	5	250	**69.64**
			25	40,111,495	8,640,724	10.0001	5	250	**72.84**
			50	44,296,881	9,350,863	10.0001	5	251	**74.45**

ตารางที่ ค-7 แสดงการคำนวณปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 1.435%FFAเป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.)

(ต่อ)

				การคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) : อ่านค่าจากกราฟโครมาโทแกรมของสารตัวอย่าง					
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	พื้นที่รวมของเมทิลเอสเทอร์ ($\sum$ A)	พื้นที่ของ Methyl Heptadeanoate (A_{EI})	ความเข้มข้นของ Methyl Heptadeanoate (C_{EI} : mg./ml)	ปริมาตรของ Methyl Heptadeanoate (V_{EI} : ml.)	น้ำหนักของตัวอย่างไบโอดีเซล (m : mg.)	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (C or %FAME)
1.435	60	30	15	44,940,031	8,681,931	10.0001	5	250	**83.53**
			25	48,922,421	8,779,998	10.0001	5	250	**91.44**
		60	15	46,219,905	9,043,864	10.0001	5	251	**81.89**
			25	44,750,589	8,431,360	10.0001	5	250	**86.15**
			50	44,209,537	8,071,963	10.0001	5	251	**89.18**
		120	25	42,798,740	8,205,810	10.0001	5	252	**83.64**

ตารางที่ ค-8 แสดงการคำนวณปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 1.435%FFAเป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.)

				การคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) : อ่านค่าจากกราฟโครมาโทแกรมของสารตัวอย่าง					
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	พื้นที่รวมของเมทิลเอสเทอร์ ($\sum$ A)	พื้นที่ของ Methyl Heptadeanoate (A_{EI})	ความเข้มข้นของ Methyl Heptadeanoate (C_{EI} : mg./ml)	ปริมาตรของ Methyl Heptadeanoate (V_{EI} : ml.)	น้ำหนักของตัวอย่างไบโอดีเซล (m : mg.)	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (C or %FAME)
1.435	30	30	15	39,018,672	8,876,523	10.0001	5	250	**67.91**
			25	44,773,833	9,191,164	10.0001	5	252	**76.81**
		60	15	69,727,834	15,382,604	10.0001	5	250	**70.66**
			25	43,182,963	8,702,247	10.0001	5	250	**79.25**
			50	40,973,422	8,077,854	10.0001	5	251	**81.12**
		120	25	43,114,876	8,651,717	10.0001	5	253	**78.72**
			50	40,645,824	8,156,861	10.0001	5	250	**79.66**

ตารางที่ ค-8 แสดงการคำนวณปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 1.435%FFAเป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.)

(ต่อ)

				การคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) : อ่านค่าจากกราฟโครมาโทแกรมของสารตัวอย่าง					
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	พื้นที่รวมของเมทิลเอสเทอร์ ($\sum$ A)	พื้นที่ของ Methyl Heptadeanoate (A_{EI})	ความเข้มข้นของ Methyl Heptadeanoate (C_{EI} : mg./ml)	ปริมาตรของ Methyl Heptadeanoate (V_{EI} : ml.)	น้ำหนักของตัวอย่างไบโอดีเซล (m : mg.)	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (C or %FAME)
1.435	45	30	15	39,221,119	8,099,581	10.0001	5	250	**76.85**
			25	51,873,908	10,342,712	10.0001	5	250	**80.31**
			50	87,253,873	17,233,835	10.0001	5	250	**81.26**
		60	15	39,994,695	8,597,004	10.0001	5	250	**73.04**
			25	51,232,616	10,545,226	10.0001	5	250	**77.17**
			50	44,098,802	8,703,396	10.0001	5	250	**81.34**
		120	15	39,066,079	8,854,523	10.0001	5	250	**68.24**
			25	42,934,349	9,220,910	10.0001	5	250	**73.12**
			50	43,742,120	9,070,955	10.0001	5	252	**75.84**

ตารางที่ ค-8 แสดงการคำนวณปริมาณเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 1.435%FFAเป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.)

(ต่อ)

				การคำนวณหาปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (%FAME) : อ่านค่าจากกราฟโครมาโทแกรมของสารตัวอย่าง					
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	พื้นที่รวมของเมทิลเอสเทอร์ ($\sum$ A)	พื้นที่ของ Methyl Heptadeanoate (A_{EI})	ความเข้มข้นของ Methyl Heptadeanoate (C_{EI} : mg./ml)	ปริมาตรของ Methyl Heptadeanoate (V_{EI} : ml.)	น้ำหนักของตัวอย่างไบโอดีเซล (m : mg.)	ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ (C or %FAME)
1.435	60	30	15	48,360,131	9,226,649	10.0001	5	250	**84.83**
			25	48,922,421	8,823,998	10.0001	5	250	**90.89**
		60	15	37,591,783	7,309,017	10.0001	5	250	**82.86**
			25	55,673,007	10,211,710	10.0001	5	251	**88.68**
			50	43,616,424	7,869,955	10.0001	5	252	**90.12**
		120	25	48,988,229	9,340,939	10.0001	5	252	**84.22**

ภาคผนวก ง.

คำนวณหาร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ (%Yield)ที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซล

ตารางที่ ง -1 แสดงการคำนวณร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลอง
โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	น้ำหนักของน้ำมันวัตถุดิบเริ่มต้น (300ml.) Weight of raw oil (g.)		น้ำหนักของไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน Weight of product (g.)		ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลอง (%Yield)	
				ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)
0.427	30	30	15	266.93	268.73	226.28	223.64	**84.77**	**83.22**
			25	277.12	265.43	249.26	232.71	**89.95**	**87.67**
		60	15	266.95	266.52	212.09	214.92	**79.45**	**80.64**
			25	269.22	269.56	231.54	230.31	**86.01**	**85.44**
			50	269.46	265.46	240.82	239.23	**89.37**	**90.12**
		120	25	273.54	274.52	230.01	231.84	**84.09**	**84.45**
			50	266.24	267.24	242.13	246.30	**90.94**	**92.16**

ตารางที่ ง -1 แสดงการคำนวณร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลอง
โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น(ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	น้ำหนักของน้ำมันวัตถุดิบเริ่มต้น (300ml.) Weight of raw oil (g.)		น้ำหนักของไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน Weight of product (g.)		ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลอง (%Yield)	
				ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)
0.427	45	30	15	262.78	267.78	194.96	203.46	74.19	75.98
			25	268.24	263.24	223.10	215.88	83.17	82.01
			50	269.66	269.12	226.84	225.42	84.12	83.76
		60	15	271.02	275.02	197.62	203.93	72.92	74.15
			25	261.07	266.07	203.21	211.10	77.84	79.34
			50	268.58	268.88	222.55	223.76	82.86	83.22
		120	15	268.34	270.34	190.15	192.86	70.86	71.34
			25	270.47	270.27	206.75	205.51	76.44	76.04
			50	271.08	268.47	212.96	213.00	78.56	79.34

ตารางที่ ง -1 แสดงการคำนวณร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลอง
โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น(ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	น้ำหนักของน้ำมันวัตถุดิบเริ่มต้น (300ml.) Weight of raw oil (g.)		น้ำหนักของไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน Weight of product (g.)		ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลอง (%Yield)	
				ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)
0.427	60	30	15	261.06	274.06	248.88	257.97	95.34	94.13
			25	274.80	273.80	270.28	263.51	98.35	96.24
		60	15	276.78	268.78	250.34	239.59	90.45	89.14
			25	277.89	275.89	269.63	262.57	97.03	95.17
			50	268.64	269.56	259.02	260.53	96.42	96.65
		120	25	269.56	270.34	254.60	253.47	94.45	93.76

ตารางที่ ง -2 แสดงการคำนวณร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลอง
โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	น้ำหนักของน้ำมันวัตถุดิบเริ่มต้น (300ml.) Weight of raw oil (g.)		น้ำหนักของไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน Weight of product (g.)		ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลอง (%Yield)	
				ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)
0.512	30	30	15	274.45	270.86	225.35	222.75	82.11	82.24
			25	265.10	269.60	230.26	235.19	86.86	87.24
		60	15	272.53	272.03	212.14	207.07	77.84	76.12
			25	268.49	269.99	227.29	226.44	84.65	83.87
			50	270.62	266.62	238.70	233.45	88.21	87.56
		120	25	268.54	267.54	220.61	219.03	82.15	81.87
			50	271.28	276.28	241.82	243.52	89.14	88.14

ตารางที่ ง -2 แสดงการคำนวณร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลอง
โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น(ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	น้ำหนักของน้ำมันวัตถุดิบเริ่มต้น (300ml.) Weight of raw oil (g.)		น้ำหนักของไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน Weight of product (g.)		ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลอง (%Yield)	
				ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)
0.512	45	30	15	262.06	268.57	186.30	197.86	71.09	73.67
			25	262.80	266.04	216.37	214.91	82.33	80.78
		60	15	274.78	272.18	191.53	192.57	69.70	70.75
			25	277.89	272.30	206.65	209.29	74.36	76.86
	60	30	15	270.06	274.16	239.21	240.82	88.58	87.84
			25	270.24	265.37	254.60	257.01	94.21	96.85
		60	15	267.18	268.79	220.28	225.19	82.45	83.78
			25	269.57	266.27	243.82	239.03	90.45	89.77

ตารางที่ ง -3 แสดงการคำนวณร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลอง
โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	น้ำหนักของน้ำมันวัตถุดิบเริ่มต้น (300ml.) Weight of raw oil (g.)		น้ำหนักของไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน Weight of product (g.)		ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลอง (%Yield)	
				ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)
0.630	30	30	15	269.13	267.28	220.31	215.53	81.86	80.64
			25	272.89	268.13	235.63	229.65	86.35	85.65
		60	15	264.18	265.28	202.05	199.28	76.48	75.12
			25	274.98	274.25	230.89	228.15	83.97	83.19
			50	272.53	272.98	236.17	232.09	86.66	85.02
		120	25	272.45	270.56	220.72	218.24	81.01	80.66
			50	266.60	266.96	233.96	235.56	87.76	88.24

ตารางที่ ง -3 แสดงการคำนวณร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลอง
โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	น้ำหนักของน้ำมันวัตถุดิบเริ่มต้น (300ml.) Weight of raw oil (g.)		น้ำหนักของไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน Weight of product (g.)		ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลอง (%Yield)	
				ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)
0.630	45	30	15	268.28	265.84	196.98	186.46	73.42	70.14
			25	268.59	265.29	216.38	209.90	80.56	79.12
		60	15	267.62	276.24	183.08	191.85	68.41	69.45
			25	272.00	270.14	204.65	200.66	75.24	74.28
	60	30	15	270.15	272.81	238.05	234.92	88.12	86.11
			25	272.08	274.82	260.32	258.66	95.68	94.12
		60	15	268.83	267.26	218.29	219.53	81.20	82.14
			25	267.17	269.22	242.31	237.64	90.69	88.27

ตารางที่ ง -4 แสดงการคำนวณร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลอง
โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 1.435 %FFA เป็นสารตั้งต้น

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	น้ำหนักของน้ำมันวัตถุดิบเริ่มต้น (300ml.) Weight of raw oil (g.)		น้ำหนักของไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน Weight of product (g.)		ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลอง (%Yield)	
				ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)
1.435	30	30	15	269.92	267.25	207.15	205.02	76.74	76.71
			25	269.33	269.78	220.43	219.22	81.85	81.26
		60	15	274.86	277.23	203.72	204.48	74.12	73.76
			25	266.95	269.46	213.31	210.73	79.91	78.21
			50	268.02	266.84	218.01	219.98	81.34	82.44
		120	25	272.18	274.84	208.93	213.22	76.76	77.58
			50	270.22	268.27	226.12	227.41	83.68	84.77

ตารางที่ ง -4 แสดงการคำนวณร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลอง
โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 1.435 %FFA เป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	น้ำหนักของน้ำมันวัตถุดิบเริ่มต้น (300ml.) Weight of raw oil (g.)		น้ำหนักของไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน Weight of product (g.)		ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลอง (%Yield)	
				ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)
1.435	45	30	15	270.06	272.56	195.63	189.21	72.44	69.42
			25	276.24	275.42	209.24	209.98	75.75	76.24
			50	270.46	270.06	207.767	209.188	76.82	77.46
		60	15	268.96	266.29	140.89	161.85	52.38	60.78
			25	268.04	267.32	199.39	196.69	74.39	73.58
			50	268.80	269.18	211.12	207.91	78.54	77.24
		120	15	270.54	270.34	155.72	157.99	57.56	58.44
			25	271.58	269.17	194.34	196.71	71.56	73.08
			50	268.08	269.47	200.42	197.36	74.76	73.24

ตารางที่ ง -4 แสดงการคำนวณร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลอง
โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระ 1.435 %FFA เป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	น้ำหนักของน้ำมันวัตถุดิบเริ่มต้น (300ml.) Weight of raw oil (g.)		น้ำหนักของไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน Weight of product (g.)		ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทดลอง (%Yield)	
				ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)
1.435	60	30	15	266.78	264.58	219.02	219.65	82.10	83.02
			25	270.64	268.24	237.75	239.05	87.85	89.12
		60	15	272.02	274.50	214.33	218.09	78.79	79.45
			25	265.07	267.05	226.63	224.69	85.50	84.14
			50	269.64	269.46	236.26	238.88	87.62	88.65
		120	25	270.16	271.14	223.83	222.12	82.85	81.92

ภาคผนวก จ.

คำนวณความหนาแน่นของน้ำมันปาล์มใช้แล้ว ที่มีกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน

ตารางที่ จ-1 แสดงค่าความหนาแน่นของน้ำมันปาล์มใช้แล้วซึ่งมีกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ความหนาแน่นของน้ำมันปาล์มใช้แล้ว ($g./cm^3$)		
				ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ค่าเฉลี่ย
0.427	30	30	15	0.8898	0.8958	0.8983
			25	0.9004	0.8981	
		60	15	0.8932	0.8884	
			25	0.8964	0.8985	
			50	0.8982	0.9049	
		120	25	0.9018	0.9151	
			50	0.9008	0.8908	
	45	30	15	0.8926	0.9026	
			25	0.8941	0.8908	
			50	0.8989	0.8971	
		60	15	0.9034	0.9001	
			25	0.8869	0.8869	
			50	0.8953	0.8963	
		120	15	0.8945	0.9011	
			25	0.9016	0.9009	
			50	0.9036	0.8949	
	60	30	15	0.8969	0.8869	
			25	0.9160	0.9027	
		60	15	0.9059	0.8959	
			25	0.9030	0.9096	
			50	0.8955	0.8985	
		120	25	0.8985	0.9011	

ตารางที่ จ-1 แสดงค่าความหนาแน่นของน้ำมันปาล์มใช้แล้วซึ่งมีกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ความหนาแน่นของน้ำมันปาล์มใช้แล้ว ($g./cm^3$)		
				ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ค่าเฉลี่ย
0.512	30	30	15	0.8982	0.9029	**0.8991**
			25	0.8870	0.9120	
		60	15	0.9084	0.9068	
			25	0.8916	0.9000	
			50	0.9021	0.8921	
		120	25	0.8951	0.8918	
			50	0.9043	0.9076	
	45	30	15	0.9102	0.8952	
			25	0.8893	0.8935	
		60	15	0.9026	0.9073	
			25	0.9067	0.9077	
	60	30	15	0.9002	0.9039	
			25	0.9008	0.8846	
		60	15	0.8939	0.8960	
			25	0.8952	0.8876	

ตารางที่ จ-1 แสดงค่าความหนาแน่นของน้ำมันปาล์มใช้แล้วซึ่งมีกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ความหนาแน่นของน้ำมันปาล์มใช้แล้ว ($g./cm^3$)		
				ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ค่าเฉลี่ย
0.630	30	30	15	0.8971	0.8909	**0.8994**
			25	0.9073	0.8938	
		60	15	0.8806	0.8843	
			25	0.9033	0.9108	
			50	0.9084	0.9076	
		120	25	0.9082	0.9019	
			50	0.8887	0.8899	
	45	30	15	0.8943	0.8861	
			25	0.9020	0.9020	
		60	15	0.8954	0.9208	
			25	0.9067	0.8938	
	60	30	15	0.9005	0.9094	
			25	0.9069	0.9161	
		60	15	0.8961	0.8909	
			25	0.8906	0.8974	

ตารางที่ จ-1 แสดงค่าความหนาแน่นของน้ำมันปาล์มใช้แล้วซึ่งมีกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ความหนาแน่นของน้ำมันปาล์มใช้แล้ว ($g./cm^3$)		
				ครั้งที่ (1.)	ครั้งที่ (2.)	ค่าเฉลี่ย
1.435	30	30	15	0.8997	0.8908	0.8997
			25	0.8978	0.8993	
		60	15	0.9095	0.9141	
			25	0.8898	0.8982	
			50	0.8934	0.8937	
		120	25	0.9073	0.9161	
			50	0.9007	0.8942	
	45	30	15	0.9002	0.9085	
			25	0.9208	0.9081	
			50	0.9015	0.9002	
		60	15	0.8965	0.8910	
			25	0.8935	0.8911	
			50	0.8960	0.8973	
		120	15	0.9018	0.9011	
			25	0.9053	0.8972	
			50	0.8936	0.8982	
	60	30	15	0.8993	0.8819	
			25	0.9021	0.8941	
		60	15	0.9067	0.9150	
			25	0.8902	0.8902	
			50	0.8988	0.8982	
		120	25	0.9005	0.9038	

ภาคผนวก ฉ.

คำนวณหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิต

ตารางที่ ฉ-1 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1-3 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น(ครั้งที่ 1.)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)						
				STEP 1 → STEP 2					STEP 3	
				$m_{O,initial}$ (500 ml.)	m_{solid}	$m_{O,separated}$	m_{water}	$m_{O,final}$	m_{oil} (300 ml.)	$m_{O,boiled}$
0.427	30	30	15	444.1065	4.2832	439.8233	0.6425	439.1809	266.9310	266.9310
			25	444.1461	5.1278	439.0183	0.5552	438.4631	270.1200	270.1200
		60	15	444.1461	5.1278	439.0183	0.5552	438.4631	270.1200	270.1200
			25	444.1065	4.6787	439.4278	0.4683	438.9595	268.9191	268.9191
			50	443.9865	5.4427	438.5438	0.5576	437.9862	269.4600	269.4600
		120	25	445.8765	6.3327	439.5438	0.6022	438.9416	270.5400	270.5400
			50	444.8723	4.4654	440.4069	0.7246	439.6823	270.2400	270.2400

ตารางที่ ฉ-1 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1-3 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.) (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)						
				STEP 1 →		← STEP 2 →			STEP 3	
				$m_{O,initial}$ (500 ml.)	m_{solid}	$m_{O,separated}$	m_{water}	$m_{O,final}$	m_{oil} (300 ml.)	$m_{O,boiled}$
0.427	45	30	15	444.6065	6.1128	438.4937	0.7652	437.7285	267.7774	267.7774
			25	441.1461	5.8775	435.2686	0.5499	434.7187	268.2405	268.2405
			50	444.7685	4.7768	439.9917	0.6114	439.3803	269.6600	269.6600
		60	15	442.9565	4.2431	438.7134	0.6531	438.0603	271.0212	271.0212
			25	442.1065	4.8871	437.2194	0.7653	436.4541	266.0664	266.0664
			50	443.4607	4.2763	439.1844	0.4563	438.7280	268.5791	268.5791
		120	15	444.7786	5.7762	439.0024	0.5442	438.4582	268.3400	268.3400
			25	442.4565	6.7431	435.7134	0.3812	435.3322	270.4729	270.4729
			50	445.1124	4.9966	440.1158	0.4536	439.6622	271.0800	271.0800

ตารางที่ ฉ-1 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1-3 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.) (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)						
				STEP 1 →		← STEP 2 →			STEP 3	
				$m_{O,initial}$ (500 ml.)	m_{solid}	$m_{O,separated}$	m_{water}	$m_{O,final}$	m_{oil} (300 ml.)	$m_{O,boiled}$
0.427	60	30	15	444.4607	4.5683	439.8923	0.5433	439.3491	269.0573	269.0573
			25	442.7461	5.4386	437.3075	0.4342	436.8732	274.8045	274.8045
		60	15	446.3065	6.1232	440.1833	0.6538	439.5295	271.7795	271.7795
			25	445.9461	4.6343	441.3118	0.6885	440.6233	270.8930	270.8930
			50	443.8866	5.8891	437.9975	0.5612	437.4363	268.6400	268.6400
		120	25	444.8876	4.2234	440.6642	0.4336	440.2306	269.5600	269.5600

ตารางที่ ฉ-2 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1-3 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)						
				STEP 1 → STEP 2					STEP 3	
				$m_{O,initial}$ (500 ml.)	m_{solid}	$m_{O,separated}$	m_{water}	$m_{O,final}$	m_{oil} (300 ml.)	$m_{O,boiled}$
0.427	30	30	15	444.9761	4.8283	440.1477	0.4886	439.6591	268.7310	268.7310
			25	447.4146	5.6128	441.8018	0.7666	441.0353	269.4310	269.4310
		60	15	447.4565	5.4784	441.9781	0.5427	441.4353	266.5191	266.5191
			25	443.6065	4.5468	439.0597	0.5125	438.5472	269.5619	269.5619
			50	445.6245	6.4443	439.1802	0.6126	438.5677	271.4600	271.4600
		120	25	444.5324	4.5333	439.9991	0.5402	439.4589	274.5200	274.5200
			50	443.2223	5.7847	437.4376	0.4572	436.9804	267.2400	267.2400

ตารางที่ ฉ-2 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1-3 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.) (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)						
				STEP 1 →		← STEP 2 →			STEP 3	
				$m_{O,initial}$ (500 ml.)	m_{solid}	$m_{O,separated}$	m_{water}	$m_{O,final}$	m_{oil} (300 ml.)	$m_{O,boiled}$
0.427	45	30	15	442.1065	6.5113	435.5952	0.6177	434.9776	270.7774	270.7774
			25	443.9146	5.1878	438.7269	0.4555	438.2714	267.2405	267.2405
			50	443.6285	5.2777	438.3508	0.5411	437.8097	269.1200	269.1200
		60	15	443.2957	4.9243	438.3713	0.7565	437.6148	270.0212	270.0212
			25	444.9107	4.5887	440.3219	0.5477	439.7743	266.0664	266.0664
			50	445.6512	5.1276	439.4618	0.5613	438.9004	268.8818	268.8818
		120	15	443.1278	4.5776	438.5502	0.6254	437.9247	270.3400	270.3400
			25	445.2446	5.3474	438.3041	0.4458	437.8583	270.2682	270.2682
			50	444.2411	6.1300	438.1112	0.5145	437.5966	268.4700	268.4700

ตารางที่ ฉ-2 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1-3 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.) (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)						
				STEP 1 →		STEP 2 →			STEP 3	
				$m_{O,initial}$ (500 ml.)	m_{solid}	$m_{O,separated}$	m_{water}	$m_{O,final}$	m_{oil} (300 ml.)	$m_{O,boiled}$
0.427	60	30	15	444.9607	5.2568	439.7038	0.4733	439.2306	266.0573	266.0573
			25	446.7461	4.2439	442.5022	0.5543	441.9479	270.8045	270.8045
		60	15	444.3065	7.0123	437.2942	0.7665	436.5276	268.7795	268.7795
			25	447.1446	4.7634	442.3812	0.4269	441.9543	272.8930	272.8930
			50	445.3489	4.2289	441.1200	0.6456	440.4744	269.5600	269.5600
		120	25	443.6677	5.1422	438.5255	0.5143	438.0111	270.3400	270.3400

ตารางที่ ฉ-3 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1-3 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)						
				STEP 1 → STEP 2 →					STEP 3	
				$m_{O,initial}$ (500 ml.)	m_{solid}	$m_{O,separated}$	m_{water}	$m_{O,final}$	m_{oil} (300 ml.)	$m_{O,boiled}$
0.512	30	30	15	448.0461	6.1234	441.9227	0.6522	441.2705	269.4456	269.4456
			25	446.3461	5.1275	441.2186	0.6377	440.5809	266.0950	266.0950
		60	15	443.8107	4.9431	438.8676	0.7564	438.1111	272.5298	272.5298
			25	444.9565	4.8971	440.0594	0.8127	439.2467	267.4910	267.4910
			50	446.8856	5.6674	441.2182	0.5614	440.6568	270.6200	270.6200
		120	25	445.2342	6.0876	439.1466	0.6654	438.4812	268.5400	268.5400
			50	444.8876	4.8976	439.9900	0.7046	439.2854	271.2800	271.2800

ตารางที่ ฉ-3 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1-3 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.) (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)						
				STEP 1 →		← STEP 2 →			STEP 3	
				$m_{O,initial}$ (500 ml.)	m_{solid}	$m_{O,separated}$	m_{water}	$m_{O,final}$	m_{oil} (300 ml.)	$m_{O,boiled}$
0.512	45	30	15	443.4607	6.1763	437.2844	0.4368	436.8476	273.0573	273.0573
			25	443.6446	5.6431	438.0015	0.6574	437.3441	266.8045	266.8045
		60	15	441.4565	6.7431	434.7134	0.5987	434.1147	270.7795	270.7795
			25	446.9461	5.5487	441.3974	0.7864	440.6110	272.0130	272.0130
	60	30	15	442.2961	5.7683	436.5277	0.8865	435.6412	270.0572	270.0572
			25	445.5461	5.9439	439.6022	0.7752	438.8270	270.2373	270.2373
		60	15	445.4461	6.2632	439.1829	0.8764	438.3065	268.1791	268.1791
			25	445.8107	5.6343	440.1764	0.5764	439.6000	268.5727	268.5727

ตารางที่ ฉ-4 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1-3 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)						
				STEP 1 →		← STEP 2 →			STEP 3	
				$m_{O,initial}$ (500 ml.)	m_{solid}	$m_{O,separated}$	m_{water}	$m_{O,final}$	m_{oil} (300 ml.)	$m_{O,boiled}$
0.512	30	30	15	446.7160	6.7612	439.9548	0.7743	439.1805	270.8562	270.8562
			25	447.1346	5.4413	441.6933	0.4568	441.2366	273.5950	273.5950
		60	15	442.7311	4.8229	437.9081	0.8013	437.1068	272.0298	272.0298
			25	443.3296	6.3497	436.9799	0.6703	436.3096	269.9910	269.9910
			50	445.1256	6.1274	438.9982	0.6214	438.3768	267.6200	267.6200
		120	25	444.6642	5.3406	439.3236	0.4676	438.8560	267.5400	267.5400
			50	444.7126	4.6612	440.0514	0.6542	439.3972	272.2800	272.2800

ตารางที่ ฉ-4 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1-3 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.) (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)						
				STEP 1 →		← STEP 2 →			STEP 3	
				$m_{O,initial}$ (500 ml.)	m_{solid}	$m_{O,separated}$	m_{water}	$m_{O,final}$	m_{oil} (300 ml.)	$m_{O,boiled}$
0.512	45	30	15	447.4607	6.2176	441.2430	0.5434	440.6996	268.5727	268.5727
			25	444.6446	5.3464	439.2982	0.7137	438.5845	268.0446	268.0446
		60	15	443.9565	7.2743	436.6822	0.6236	436.0586	272.1795	272.1795
			25	447.6745	5.1255	442.5490	0.5665	441.9825	272.2978	272.2978
	60	30	15	444.3796	5.5477	438.8319	0.5429	438.2890	271.1572	271.1572
			25	446.5046	5.4329	441.0717	0.4799	440.5918	265.3729	265.3729
		60	15	447.6301	6.1226	441.5075	0.6555	440.8520	268.7906	268.7906
			25	446.8107	4.6734	442.1372	0.7126	441.4246	266.2745	266.2745

ตารางที่ ฉ-5 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1-3 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)						
				STEP 1 → STEP 2					STEP 3	
				$m_{O,initial}$ (500 ml.)	m_{solid}	$m_{O,separated}$	m_{water}	$m_{O,final}$	m_{oil} (300 ml.)	$m_{O,boiled}$
0.630	30	30	15	446.0946	5.8343	440.2604	0.5014	439.7590	269.1278	269.1278
			25	446.8107	5.8743	440.9363	0.4754	440.4609	272.1893	272.1893
		60	15	443.8046	4.6176	439.1870	0.6312	438.5557	264.1804	264.1804
			25	445.8461	7.1431	438.7029	0.7263	437.9766	270.9845	270.9845
			50	445.1246	5.3348	439.7898	0.5014	439.2884	272.5298	272.5298
		120	25	444.7768	4.8878	439.8890	0.6332	439.2558	272.4456	272.4456
			50	446.3426	6.4582	439.8844	0.7022	439.1822	266.5950	266.5950

ตารางที่ ฉ-5 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1-3 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.) (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)						
				STEP 1 →		← STEP 2 →			STEP 3	
				$m_{O,initial}$ (500 ml.)	m_{solid}	$m_{O,separated}$	m_{water}	$m_{O,final}$	m_{oil} (300 ml.)	$m_{O,boiled}$
0.630	45	30	15	444.5922	7.8673	436.7248	0.7643	435.9605	268.2840	268.2840
			25	444.7821	7.3274	437.4547	0.5641	436.8906	270.5900	270.5900
		60	15	445.9881	8.0075	437.9806	0.6674	437.3132	268.6240	268.6240
			25	443.1073	6.9875	436.1198	0.7743	435.3455	272.0000	272.0000
	60	30	15	445.6446	7.1268	438.5178	0.5888	437.9290	270.1476	270.1476
			25	445.6446	6.8434	438.8012	0.6754	438.1258	272.0820	272.0820
		60	15	446.4446	7.2745	439.1701	0.5325	438.6376	268.8259	268.8259
			25	444.6030	6.6734	437.9296	0.8763	437.0533	267.1670	267.1670

ตารางที่ ฉ-6 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1-3 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)						
				STEP 1 →		← STEP 2 →			STEP 3	
				$m_{O,initial}$ (500 ml.)	m_{solid}	$m_{O,separated}$	m_{water}	$m_{O,final}$	m_{oil} (300 ml.)	$m_{O,boiled}$
0.630	30	30	15	446.0946	5.1243	440.9703	0.4221	440.5481	267.2779	267.2779
			25	447.7181	5.3235	442.3946	0.6654	441.7292	268.1289	268.1289
		60	15	443.3305	4.5436	438.7868	0.5535	438.2334	265.2804	265.2804
			25	447.1346	6.1244	441.0102	0.5564	440.4538	273.2478	273.2478
			50	444.7624	6.4348	438.3276	0.6714	437.6562	272.2781	272.2781
		120	25	446.1268	5.6818	440.4450	0.4352	440.0098	270.5617	270.5617
			50	445.5526	4.8782	440.6744	0.5522	440.1222	266.9550	266.9550

ตารางที่ ฉ-6 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1-3 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.) (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)						
				STEP 1		STEP 2			STEP 3	
				$m_{O,initial}$ (500 ml.)	m_{solid}	$m_{O,separated}$	m_{water}	$m_{O,final}$	m_{oil} (300 ml.)	$m_{O,boiled}$
0.630	45	30	15	442.3092	6.1287	436.1805	0.6554	435.5252	265.8400	265.8400
			25	446.7282	5.4456	441.2826	0.4433	440.8393	270.5900	270.5900
		60	15	447.4881	4.5565	442.9316	0.6655	442.2662	276.2400	276.2400
			25	442.6607	6.2249	436.4359	0.5513	435.8846	268.1400	268.1400
	60	30	15	446.6446	6.3127	440.3319	0.4533	439.8787	272.8148	272.8148
			25	444.4356	5.3284	439.1072	0.7568	438.3505	274.8200	274.8200
		60	15	447.4446	5.4275	442.0172	0.6553	441.3618	267.2592	267.2592
			25	447.4603	4.5673	442.8930	0.4569	442.4361	269.2167	269.2167

ตารางที่ ฉ-7 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1-3 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)						
				STEP 1 → STEP 2					STEP 3	
				$m_{O,initial}$ (500 ml.)	m_{solid}	$m_{O,separated}$	m_{water}	$m_{O,final}$	m_{oil} (300 ml.)	$m_{O,boiled}$
1.435	30	30	15	444.1030	5.6673	438.4357	0.5254	437.9102	269.9241	269.9241
			25	445.4881	6.0201	439.4680	0.5237	438.9443	269.3310	269.3310
		60	15	445.9592	4.3287	441.6305	0.6432	440.9874	272.8564	272.8564
			25	443.7821	4.3433	439.4388	0.4553	438.9836	266.9519	266.9519
			50	445.3422	6.3544	438.9878	0.5678	438.4200	268.0240	268.0240
		120	25	446.7846	5.2234	441.5612	0.4562	441.1050	272.1840	272.1840
			50	444.7866	4.8878	439.8988	0.5442	439.3546	270.2200	270.2200

ตารางที่ ฉ-7 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1-3 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.) (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)						
				STEP 1 →		← STEP 2 →			STEP 3	
				$m_{O,initial}$ (500 ml.)	m_{solid}	$m_{O,separated}$	m_{water}	$m_{O,final}$	m_{oil} (300 ml.)	$m_{O,boiled}$
1.435	45	30	15	444.5411	9.2873	435.2537	0.5874	434.6663	270.0572	270.0572
			25	444.7608	8.8657	435.8951	0.4563	435.4387	276.2373	276.2373
			50	445.8512	5.1278	440.7234	0.5411	440.1823	270.4600	270.4600
		60	15	443.7946	8.6542	435.1404	0.6653	434.4751	268.9588	268.9588
			25	443.3107	7.9022	435.4085	0.5812	434.8272	268.0427	268.0427
			50	444.1224	6.1228	437.9997	0.6326	437.3671	268.8045	268.8045
		120	15	445.6658	4.3478	441.3180	0.4678	440.8502	270.5400	270.5400
			25	445.4354	5.4474	439.9880	0.6122	439.3758	271.5795	271.5795
			50	444.3344	6.2300	438.1044	0.5457	437.5588	268.0800	268.0800

ตารางที่ ฉ-7 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1-3 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.) (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)						
				STEP 1 → STEP 2 →					STEP 3	
				$m_{O,initial}$ (500 ml.)	m_{solid}	$m_{O,separated}$	m_{water}	$m_{O,final}$	m_{oil} (300 ml.)	$m_{O,boiled}$
1.435	60	30	15	443.4461	8.1875	435.2586	0.7653	434.4934	269.7774	269.7774
			25	445.9607	8.8334	437.1273	0.6243	436.5030	270.6356	270.6356
		60	15	443.8446	9.2275	434.6172	0.8433	433.7739	272.0212	272.0212
			25	443.0715	8.5692	434.5023	0.7232	433.7791	267.0664	267.0664
			50	444.2289	4.7889	439.4400	0.4536	438.9864	269.6400	269.6400
		120	25	443.2415	5.1222	438.1193	0.5555	437.5637	270.1600	270.1600

ตารางที่ ฉ-8 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1-3 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)						
				STEP 1 → STEP 2 →					STEP 3	
				$m_{O,initial}$ (500 ml.)	m_{solid}	$m_{O,separated}$	m_{water}	$m_{O,final}$	m_{oil} (300 ml.)	$m_{O,boiled}$
1.435	30	30	15	444.7603	5.4533	439.3070	0.6644	438.6427	267.2492	267.2492
			25	447.7488	5.4432	442.3056	0.5423	441.7633	269.7831	269.7831
		60	15	446.1959	7.2211	438.9748	0.7753	438.1995	274.2266	274.2266
			25	444.8282	6.1266	438.7016	0.5422	438.1593	269.4552	269.4552
			50	445.2218	6.0512	439.1706	0.7118	438.4588	268.1240	268.1240
		120	25	446.0126	4.5234	441.4892	0.5662	440.9230	274.8440	274.8440
			50	444.6246	5.8214	438.8032	0.4342	438.3690	268.2700	268.2700

ตารางที่ ฉ-8 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1-3 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.) (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)						
				STEP 1 →		← STEP 2 →			STEP 3	
				$m_{O,initial}$ (500 ml.)	m_{solid}	$m_{O,separated}$	m_{water}	$m_{O,final}$	m_{oil} (300 ml.)	$m_{O,boiled}$
1.435	45	30	15	443.0411	4.3546	438.6864	0.7859	437.9006	272.5627	272.5627
			25	443.7608	5.3423	438.4185	0.4531	437.9654	272.4237	272.4237
			50	443.2285	4.7477	438.4808	0.6154	437.8654	270.0600	270.0600
		60	15	444.3379	6.1125	438.2255	0.4433	437.7822	267.2916	267.2916
			25	444.9311	6.3490	438.5820	0.6652	437.9169	267.3204	267.3204
			50	445.4512	5.6283	439.8229	0.4533	439.3696	269.1791	269.1791
		120	15	443.7667	6.1135	437.6532	0.4868	437.1664	270.3400	270.3400
			25	444.5444	5.3554	439.1889	0.5765	438.6124	269.1657	269.1657
			50	445.3433	5.6523	439.6910	0.4662	439.2248	269.4700	269.4700

ตารางที่ ฉ-8 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1-3 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.) (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)						
				STEP 1 →		STEP 2 →			STEP 3	
				$m_{O,initial}$ (500 ml.)	m_{solid}	$m_{O,separated}$	m_{water}	$m_{O,final}$	m_{oil} (300 ml.)	$m_{O,boiled}$
1.435	60	30	15	446.2345	7.2342	439.0003	0.5565	438.4438	264.5774	264.5774
			25	446.7461	6.1235	440.6226	0.6613	439.9613	268.2356	268.2356
		60	15	444.8446	4.5423	440.3023	0.7613	439.5410	274.5021	274.5021
			25	444.3572	7.1246	437.2326	0.5616	436.6710	267.0466	267.0466
			50	445.6623	6.1328	439.5295	0.6112	438.9183	269.4600	269.4600
		120	25	444.3424	4.7812	439.5612	0.4579	439.1033	271.1400	271.1400

ตารางที่ ฉ-9 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 4 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 4							
				$m_{O,boiled}$	m_{KOH}	m_{MeOH}	$m_{G+m,initial}$	m_{loss1}	$m_{m,initial}$	m_G	m_{loss2}
0.427	30	30	15	266.9310	2.6693	35.7186	293.9539	11.3650	248.8719	45.0820	1.4680
			25	270.1200	2.7012	58.0980	309.6384	21.2808	281.4606	28.1778	1.6666
		60	15	267.9519	2.6795	36.1195	297.0944	9.6566	241.1567	55.9376	1.9110
			25	268.9191	2.6892	58.2750	301.5961	28.2872	263.4259	38.1702	1.4246
			50	269.4600	2.6946	116.5324	306.1238	82.5632	275.8674	30.2564	1.5975
		120	25	270.5400	2.7054	58.8750	314.2743	17.8461	268.5170	45.7572	1.8556
			50	270.2400	2.7024	117.7026	300.1302	90.5148	274.4583	25.6719	1.5169

ตารางที่ ฉ-9 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 4 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.) (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 4							
				$m_{O,boiled}$	m_{KOH}	m_{MeOH}	$m_{G+m,initial}$	m_{loss1}	$m_{m,initial}$	m_G	m_{loss2}
0.427	45	30	15	267.7774	2.6778	35.5860	296.2510	9.7902	214.2490	82.0020	2.1992
			25	268.2405	2.6824	59.5860	307.2157	23.2932	256.3422	50.8736	1.5066
			50	269.6600	2.6966	116.814	302.6248	86.5458	258.0662	44.5586	1.6183
		60	15	271.0212	2.7102	36.2952	303.4129	6.6136	220.8636	82.5494	1.3615
			25	266.0664	2.6607	59.6160	297.3361	31.0070	220.1374	77.1987	2.7745
			50	268.5791	2.6858	117.292	298.7259	89.8309	251.6601	47.0658	1.2465
		120	15	268.3400	2.6834	35.643	298.6801	7.9863	220.2926	78.3875	1.5953
			25	270.4729	2.7047	58.746	304.4920	27.4316	239.2985	65.1934	2.0759
			50	271.0800	2.7108	116.112	310.7389	79.1639	250.7296	60.0093	1.8449

ตารางที่ ฉ-9 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 4 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.) (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 4							
				$m_{O,boiled}$	m_{KOH}	m_{MeOH}	$m_{G+m,initial}$	m_{loss1}	$m_{m,initial}$	m_G	m_{loss2}
0.427	60	30	15	269.0573	2.6906	35.6766	297.6668	9.7577	280.3539	17.3129	1.7869
			25	274.8045	2.7480	59.2350	310.8130	25.9745	299.6598	11.1532	2.8496
		60	15	271.7795	2.7178	36.1560	303.7207	6.9326	267.2338	36.4869	1.4049
			25	270.8930	2.7089	59.4360	303.2695	29.7684	290.0258	13.2436	1.5345
			50	268.6400	2.6864	116.893	307.8441	80.3753	296.7689	11.0752	1.6392
		120	25	269.5600	2.6956	59.324	302.9951	28.5845	287.1385	15.8566	1.6240

ตารางที่ ฉ-10 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 4 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 4							
				$m_{O,boiled}$	m_{KOH}	m_{MeOH}	$m_{G+m,initial}$	m_{loss1}	$m_{m,initial}$	m_G	m_{loss2}
0.427	30	30	15	268.7310	2.6873	35.7186	295.9361	11.2008	250.5566	45.3795	1.4844
			25	269.4310	2.6943	58.0980	308.8486	21.3747	273.5866	35.2621	1.7852
		60	15	266.5191	2.6652	36.1195	295.5057	9.7981	241.8709	53.6348	1.7724
			25	269.5619	2.6956	58.2750	302.3170	28.2155	260.4185	41.8985	2.0095
			50	271.4600	2.7146	117.1532	308.3959	82.9319	280.6295	27.7664	1.4509
		120	25	274.5200	2.7452	59.3850	318.8976	17.7526	273.8399	45.0578	1.6038
			50	267.2400	2.6724	116.8011	296.7984	89.9151	274.0839	22.7145	2.2216

ตารางที่ ฉ-10 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 4 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.) (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 4							
				$m_{O,boiled}$	m_{KOH}	m_{MeOH}	$m_{G+m,initial}$	m_{loss1}	$m_{m,initial}$	m_G	m_{loss2}
0.427	45	30	15	270.7774	2.7078	35.5860	299.5700	9.5012	231.8794	67.6906	1.8954
			25	267.2405	2.6724	59.5860	306.0704	23.4285	257.6342	48.4363	1.8665
			50	269.1200	2.6912	117.2814	302.0188	87.0738	257.5494	44.4694	1.6151
		60	15	270.0212	2.7002	36.2952	302.2934	6.7231	230.0244	72.2690	1.9008
			25	266.0664	2.6607	59.6160	297.3361	31.0070	241.4659	55.8702	2.0789
			50	268.8818	2.6888	116.9112	301.7515	86.7304	254.6326	47.1188	1.9320
		120	15	270.3400	2.7034	35.8643	300.9062	8.0015	221.9345	78.9717	1.6072
			25	270.2682	2.7027	59.1275	301.5588	30.5395	236.4148	65.1440	1.3732
			50	268.4700	2.6847	117.3112	307.7470	80.7189	251.0003	56.7468	1.9550

ตารางที่ ฉ-10 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 4 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.) (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 4							
				$m_{O,boiled}$	m_{KOH}	m_{MeOH}	$m_{G+m,initial}$	m_{loss1}	$m_{m,initial}$	m_G	m_{loss2}
0.427	60	30	15	266.0573	2.6606	35.6766	294.3478	10.0467	278.6834	15.6644	1.9593
			25	270.8045	2.7080	59.2350	306.2889	26.4586	295.5076	10.7813	1.5189
		60	15	268.7795	2.6878	36.1560	300.3681	7.2552	270.5698	29.7982	1.5458
			25	272.8930	2.7289	59.4360	305.5085	29.5494	292.1935	13.3150	1.5722
			50	269.5600	2.6956	116.6893	308.8983	80.0466	297.7852	11.1132	1.6449
		120	25	270.3400	2.7034	58.5324	303.8719	27.7039	285.2660	18.6059	1.2934

ตารางที่ ฉ-11 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 4 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 4							
				$m_{O,boiled}$	m_{KOH}	m_{MeOH}	$m_{G+m,initial}$	m_{loss1}	$m_{m,initial}$	m_G	m_{loss2}
0.512	30	30	15	269.4456	2.6945	36.3422	296.7227	11.7596	248.3459	48.3768	1.2249
			25	266.0950	2.6610	59.0169	296.1813	31.5916	259.2403	36.9410	1.6851
		60	15	272.5298	2.7253	35.6771	304.3498	6.5824	241.3278	63.0220	1.2400
			25	267.4910	2.6749	58.8692	305.2835	23.7516	262.7667	42.5168	1.8758
			50	270.6200	2.7062	116.5024	303.6616	86.1670	270.4716	33.1900	2.1035
		120	25	268.5400	2.6854	58.6758	298.2422	31.6590	248.7604	49.4818	1.9963
			50	271.2800	2.7128	117.2348	315.2395	75.9881	285.7631	29.4764	1.3092

ตารางที่ ฉ-11 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 4 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.)(ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 4							
				$m_{O,boiled}$	m_{KOH}	m_{MeOH}	$m_{G+m,initial}$	m_{loss1}	$m_{m,initial}$	m_G	m_{loss2}
0.512	45	30	15	273.0573	2.7306	36.1260	302.6768	9.2370	212.6688	90.0080	2.0791
			25	266.8045	2.6680	59.0250	291.7818	36.7157	238.7714	53.0104	2.0978
		60	15	270.7795	2.7078	35.7420	296.0715	13.1578	207.1965	88.8750	1.5135
			25	272.0130	2.7201	58.6920	307.6558	25.7693	228.4149	79.2409	1.7489
	60	30	15	270.0572	2.7006	36.0576	299.9849	8.8305	256.3024	43.6825	2.7465
			25	270.2373	2.7024	59.6460	299.5509	33.0347	280.6563	18.8946	1.8030
		60	15	268.1791	2.6818	36.3420	297.8986	9.3043	245.2515	52.6471	2.6809
			25	268.5727	2.6857	59.9460	300.1370	31.0674	261.3949	38.7421	1.5608

ตารางที่ ฉ-12 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 4 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 4							
				$m_{O,boiled}$	m_{KOH}	m_{MeOH}	$m_{G+m,initial}$	m_{loss1}	$m_{m,initial}$	m_G	m_{loss2}
0.512	30	30	15	270.8562	2.7086	36.5484	300.9846	9.1286	251.0084	49.9762	2.5937
			25	273.5950	2.7360	58.7702	304.5293	30.5719	269.3017	35.2275	2.2264
		60	15	272.0298	2.7203	35.8873	303.7914	6.8459	238.5418	65.2496	1.6148
			25	269.9910	2.6999	58.7687	308.1367	23.3229	263.1416	44.9951	2.4558
			50	267.6200	2.6762	117.0024	300.2953	87.0033	264.7971	35.4982	1.4539
		120	25	267.5400	2.6754	58.8117	297.1316	31.8955	247.8341	49.2975	1.9889
			50	272.2800	2.7228	117.0148	316.4016	75.6160	284.0937	32.3078	1.6202

ตารางที่ ฉ-12 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 4 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.) (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 4							
				$m_{O,boiled}$	m_{KOH}	m_{MeOH}	$m_{G+m,initial}$	m_{loss1}	$m_{m,initial}$	m_G	m_{loss2}
0.512	45	30	15	268.5727	2.6857	36.2113	297.7058	9.7640	225.4963	72.2095	1.9086
			25	268.0446	2.6804	59.0213	293.1380	36.6083	240.4345	52.7035	2.6609
		60	15	272.1795	2.7218	35.9888	297.6022	13.2878	217.4666	80.1356	2.7001
			25	272.2978	2.7230	58.7769	307.9779	25.8198	244.7711	63.2069	1.1507
	60	30	15	271.1572	2.7116	36.2413	301.2068	8.9033	268.0079	33.1989	2.1446
			25	265.3729	2.6537	59.0346	294.1588	32.9024	284.1373	10.0215	1.9834
		60	15	268.7906	2.6879	36.2111	298.5779	9.1117	253.2162	45.3616	2.6275
			25	266.2745	2.6627	58.8946	297.5687	30.2632	269.4293	28.1394	1.6981

ตารางที่ ฉ-13 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 4 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 4							
				$m_{O,boiled}$	m_{KOH}	m_{MeOH}	$m_{G+m,initial}$	m_{loss1}	$m_{m,initial}$	m_G	m_{loss2}
0.630	30	30	15	269.1278	2.6913	36.2319	300.7918	7.2592	250.5187	50.2731	1.4511
			25	272.1893	2.7219	58.5540	314.8355	18.6297	277.5622	37.2733	1.6535
		60	15	264.1804	2.6418	35.8838	292.9117	9.7944	230.4066	62.5051	1.9782
			25	270.9845	2.7098	59.1869	310.8300	22.0513	265.9563	44.8737	2.1734
			50	272.5298	2.7253	117.1869	303.5903	88.8517	265.1558	38.4345	1.1293
		120	25	272.4456	2.7245	58.7869	316.4879	17.4691	264.4430	52.0449	1.3642
			50	266.5950	2.6660	116.5187	299.8041	85.9756	264.8725	34.9316	2.3582

ตารางที่ ฉ-13 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 4 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.) (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 4							
				$m_{O,boiled}$	m_{KOH}	m_{MeOH}	$m_{G+m,initial}$	m_{loss1}	$m_{m,initial}$	m_G	m_{loss2}
0.630	45	30	15	268.2840	2.6828	35.7360	291.8415	14.8613	209.1034	82.7381	2.4492
			25	270.5900	2.7059	59.0460	296.1783	36.1636	241.7368	54.4414	3.1856
		60	15	268.6240	2.6862	36.1320	294.8001	12.6422	201.5682	93.2318	1.3315
			25	272.0000	2.7200	58.9350	294.5052	39.1498	215.0679	79.4373	2.6266
	60	30	15	270.1476	2.7015	36.2550	300.0853	9.0188	254.4682	45.6171	2.6111
			25	272.0820	2.7208	59.5560	298.5950	35.7638	282.4180	16.1770	1.6319
		60	15	268.8259	2.6883	35.5320	302.7349	4.3113	249.3461	53.3887	1.5663
			25	267.1670	2.6717	59.4720	290.6265	38.6842	254.2522	36.3743	1.1406

ตารางที่ ฉ-14 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 4 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 4							
				$m_{O,boiled}$	m_{KOH}	m_{MeOH}	$m_{G+m,initial}$	m_{loss1}	$m_{m,initial}$	m_G	m_{loss2}
0.630	30	30	15	267.2779	2.6728	36.3313	298.7243	7.5577	244.3567	54.3675	2.3467
			25	268.1289	2.6813	58.4538	310.1390	19.1250	270.2234	39.9155	1.9629
		60	15	265.2804	2.6528	35.9545	294.1313	9.7565	226.9034	67.2279	1.7684
			25	273.2478	2.7325	58.6679	313.4262	21.2220	265.4619	47.9643	2.1970
			50	272.2781	2.7228	116.8242	303.3099	88.5152	260.5544	42.7555	1.6288
		120	25	270.5617	2.7056	59.1282	314.2994	18.0961	260.7204	53.5790	1.1810
			50	266.9550	2.6696	116.6642	300.2089	86.0798	267.8997	32.3092	1.8676

ตารางที่ ฉ-14 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 4 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.) (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 4							
				$m_{O,boiled}$	m_{KOH}	m_{MeOH}	$m_{G+m,initial}$	m_{loss1}	$m_{m,initial}$	m_{G}	m_{loss2}
0.630	45	30	15	265.8400	2.6584	35.8813	289.1829	15.1968	208.8254	80.3575	2.1141
			25	270.5900	2.7059	59.2205	296.1783	36.3381	239.6666	56.5116	2.1325
		60	15	276.2400	2.7624	36.2314	303.1582	12.0756	218.4597	84.6985	1.9553
			25	268.1400	2.6814	58.8767	290.3258	39.3723	220.2791	70.0467	1.9829
	60	30	15	272.8148	2.7281	36.2347	303.0480	8.7296	262.4655	40.5826	2.4501
			25	274.8200	2.7482	59.2242	301.5998	35.1925	285.1475	16.4524	1.5358
		60	15	267.2592	2.6726	35.5888	300.9705	4.5501	252.8515	48.1189	2.3197
			25	269.2167	2.6922	59.0435	292.8561	38.0963	260.5919	32.2643	2.3966

ตารางที่ ฉ-15 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 4 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 4							
				$m_{O,boiled}$	m_{KOH}	m_{MeOH}	$m_{G+m,initial}$	m_{loss1}	$m_{m,initial}$	m_G	m_{loss2}
1.435	30	30	15	269.9241	2.6992	35.6423	300.4433	7.8224	235.3592	65.0841	1.5713
			25	269.3310	2.6933	58.7215	308.7340	22.0118	259.2552	49.4788	2.5711
		60	15	272.8564	2.7286	36.2884	304.9891	6.8843	232.2090	72.7801	1.7114
			25	266.9519	2.6695	58.4456	305.9096	22.1574	251.3909	54.5188	1.3769
			50	268.0240	2.6802	117.0448	296.5730	91.1761	245.2123	51.3606	2.4117
		120	25	272.1840	2.7218	59.0556	305.9446	28.0168	240.9405	65.0041	1.5242
			50	270.2200	2.7022	116.4688	301.3699	88.0211	256.1854	45.1846	1.9271

ตารางที่ ฉ-15 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 4 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.) (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 4							
				$m_{O,boiled}$	m_{KOH}	m_{MeOH}	$m_{G+m,initial}$	m_{loss1}	$m_{m,initial}$	m_G	m_{loss2}
1.435	45	30	15	270.0572	2.7006	35.8350	299.3513	9.2415	216.0295	83.3218	1.3552
			25	276.2373	2.7624	58.7460	298.9523	38.7934	220.1584	78.7939	2.7672
			50	270.4600	2.7046	117.448	303.5226	87.0901	239.8996	63.6230	1.8481
		60	15	268.9588	2.6896	35.2920	291.0754	15.8650	193.1705	97.9048	2.9569
			25	268.0427	2.6804	58.8120	308.9184	20.6167	228.2282	80.6902	1.8713
			50	268.8045	2.6880	116.863	297.4366	90.9189	238.6686	58.7679	2.2250
		120	15	270.5400	2.7054	36.126	301.1288	8.2430	184.2231	116.9057	1.5375
			25	271.5795	2.7158	59.247	302.8862	30.6566	224.8847	78.0014	1.4634
			50	268.0800	2.6808	117.441	307.3000	80.9019	237.2316	70.0683	2.1648

ตารางที่ ฉ-15 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 4 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.)(ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 4							
				$m_{O,boiled}$	m_{KOH}	m_{MeOH}	$m_{G+m,initial}$	m_{loss1}	$m_{m,initial}$	m_G	m_{loss2}
1.435	60	30	15	269.7774	2.6978	35.3760	299.0316	8.8196	244.7031	54.3284	1.2175
			25	270.6356	2.7064	59.0976	300.6273	31.8122	253.1530	47.4743	1.3046
		60	15	272.0212	2.7202	36.0120	301.8179	8.9355	234.3097	67.5082	2.4645
			25	267.0664	2.6707	59.0592	296.3205	32.4758	245.5523	50.7681	2.4960
			50	269.6400	2.6964	117.219	308.9900	80.5653	273.6060	35.3840	1.8263
		120	25	270.1600	2.7016	58.763	303.6696	27.9553	255.3585	48.3111	1.1567

ตารางที่ ฉ-16 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 4 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 4							
				$m_{O,boiled}$	m_{KOH}	m_{MeOH}	$m_{G+m,initial}$	m_{loss1}	$m_{m,initial}$	m_G	m_{loss2}
1.435	30	30	15	267.2492	2.6725	35.8713	297.4660	8.3271	233.9259	63.5401	2.4548
			25	269.7831	2.6978	59.4125	309.2522	22.6412	258.6264	50.6259	2.3678
		60	15	274.2266	2.7423	35.9425	306.5206	6.3908	232.8052	73.7154	1.7759
			25	269.4552	2.6946	58.7825	308.7782	22.1540	248.0366	60.7417	1.5791
			50	268.1240	2.6812	117.2156	296.6836	91.3372	247.9851	48.6986	1.5708
		120	25	274.8440	2.7484	59.2156	308.9345	27.8735	246.0436	62.8909	1.8799
			50	268.2700	2.6827	116.7782	299.1951	88.5358	257.0193	42.1758	2.2459

ตารางที่ ฉ-16 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 4 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.) (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 4							
				$m_{O,boiled}$	m_{KOH}	m_{MeOH}	$m_{G+m,initial}$	m_{loss1}	$m_{m,initial}$	m_G	m_{loss2}
1.435	45	30	15	272.5627	2.7256	35.7846	302.1286	8.9443	217.9443	84.1843	1.2783
			25	272.4237	2.7242	58.9124	294.8251	39.2352	229.7529	65.0722	2.1602
			50	270.0600	2.7006	117.448	303.0737	87.1350	239.5448	63.5289	1.8454
		60	15	267.2916	2.6729	35.8876	289.2710	16.5811	183.8429	105.4281	1.9753
			25	267.3204	2.6732	58.7881	308.0860	20.6958	236.2271	71.8589	2.5612
			50	269.1791	2.6918	116.863	297.8511	90.8827	236.3095	61.5416	2.7195
		120	15	270.3400	2.7034	36.126	300.9062	8.2636	186.7903	114.1159	2.3970
			25	269.1657	2.6917	59.247	300.1941	30.9107	225.5776	74.6165	1.7842
			50	269.4700	2.6947	117.441	308.8933	80.7125	235.7670	73.1263	2.0391

ตารางที่ ฉ-16 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 4 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.)(ต่อ)(ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 4							
				$m_{O,boiled}$	m_{KOH}	m_{MeOH}	$m_{G+m,initial}$	m_{loss1}	$m_{m,initial}$	m_G	m_{loss2}
1.435	60	30	15	264.5774	2.6458	35.8872	293.2677	9.8427	245.9443	47.3234	2.3630
			25	268.2356	2.6824	59.1134	297.9614	32.0700	268.5185	29.4429	1.7278
		60	15	274.5021	2.7450	36.2212	304.5706	8.8977	248.1511	56.4195	2.0370
			25	267.0466	2.6705	59.0544	296.2985	32.4731	253.5801	42.7184	1.5509
			50	269.4600	2.6946	117.219	308.7838	80.5898	276.1179	32.6658	2.1593
		120	25	271.1400	2.7114	58.763	304.7711	27.8435	253.5734	51.1977	2.0122

ตารางที่ ฉ-17 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 5-6 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 5					STEP 6		
				$m_{m,initial,Actual}$	$m_{Water,input}$	$m_{m,washed}$	m_{Waste}	$m_{Water,output}$	$m_{m,loss}$	$m_{Water,remained}$	$m_{m,final}$
0.427	30	30	15	247.4039	4,586.24	239.7667	4,593.88	4,572.75	21.1265	13.4893	226.2774
			25	279.7940	5,054.98	257.9785	5,076.80	5,039.97	36.8292	15.0137	242.9648
		60	15	239.2457	4,050.67	227.4579	4,062.46	4,036.10	26.3579	14.5702	212.8878
			25	262.0013	4,784.56	243.0687	4,803.49	4,772.77	30.7150	11.7824	231.2863
			50	274.2699	5,012.64	255.3864	5,031.52	4,998.07	33.4548	14.5713	240.8151
		120	25	266.6614	4,624.89	239.7540	4,651.79	4,612.62	39.1744	12.2670	227.4870
			50	272.9414	5,288.83	258.9387	5,302.83	5,275.65	27.1770	13.1742	245.7645

ตารางที่ ฉ-17 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 5-6 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.) (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 5					STEP 6		
				$m_{m,initial,Actual}$	$m_{Water,input}$	$m_{m,washed}$	m_{Waste}	$m_{Water,output}$	$m_{m,loss}$	$m_{Water,remained}$	$m_{m,final}$
0.427	45	30	15	212.0498	3,602.28	207.4442	3,606.89	3,593.50	13.3841	8.7785	198.6657
			25	254.8355	4,528.12	237.4597	4,545.50	4,513.76	31.7399	14.3640	223.0956
			50	256.4479	4,454.66	237.8379	4,473.27	4,443.66	29.6099	10.9999	226.8380
		60	15	219.5021	3,471.41	211.4545	3,479.46	3,457.58	21.8801	13.8325	197.6220
			25	217.3629	3,954.56	220.9108	3,951.01	3,940.76	10.2572	13.8050	207.1058
			50	250.4136	4,234.56	234.8820	4,250.09	4,222.22	27.8690	12.3374	222.5446
		120	15	218.6973	3,167.13	201.6735	3,184.15	3,155.60	28.5516	11.5278	190.1457
			25	237.2227	3,722.54	219.2150	3,740.55	3,710.08	30.4732	12.4655	206.7495
			50	248.8847	4,082.15	225.9730	4,105.06	4,069.14	35.9243	13.0125	212.9604

ตารางที่ ฉ-17 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 5-6 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.) (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 5					STEP 6		
				$m_{m,initial,Actual}$	$m_{Water,input}$	$m_{m,washed}$	m_{Waste}	$m_{Water,output}$	$m_{m,loss}$	$m_{Water,remained}$	$m_{m,final}$
0.427	60	30	15	278.5669	5,405.01	271.9536	5,411.62	5,389.56	22.0609	15.4476	256.5060
			25	296.8103	6,471.58	288.0578	6,480.33	6,453.80	26.5333	17.7808	270.2770
		60	15	265.8289	5,209.53	262.4862	5,212.87	5,192.86	20.0150	16.6723	245.8139
			25	288.4913	5,845.77	278.3202	5,855.94	5,830.28	25.6551	15.4840	262.8362
			50	295.1296	5,686.83	271.3432	5,710.62	5,674.51	36.1069	12.3205	259.0227
		120	25	285.5146	5,312.13	266.3693	5,331.27	5,300.36	30.9151	11.7699	254.5994

ตารางที่ ฉ-18 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 5-6 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 5					STEP 6		
				$m_{m,initial,Actual}$	$m_{Water,input}$	$m_{m,washed}$	m_{Waste}	$m_{Water,output}$	$m_{m,loss}$	$m_{Water,remained}$	$m_{m,final}$
0.427	30	30	15	249.0723	4,500.33	234.3965	4,515.01	4,489.58	25.4343	10.7585	223.6379
			25	271.8013	4,902.22	250.0415	4,923.98	4,888.40	35.5809	13.8210	236.2205
		60	15	240.0985	4,104.44	226.2417	4,118.30	4,093.12	25.1775	11.3207	214.9210
			25	258.4089	4,658.55	241.1186	4,675.84	4,647.75	28.0953	10.8049	230.3137
			50	279.1787	5,212.48	257.2820	5,234.38	5,199.84	34.5389	12.6422	244.6398
		120	25	272.2361	4,504.64	243.2811	4,533.60	4,493.20	40.3995	11.4446	231.8365
			50	271.8623	5,283.41	260.9413	5,294.33	5,268.77	25.5617	14.6407	246.3006

ตารางที่ ฉ-18 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 5-6 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.) (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 5					STEP 6		
				$m_{m,initial,Actual}$	$m_{Water,input}$	$m_{m,washed}$	m_{Waste}	$m_{Water,output}$	$m_{m,loss}$	$m_{Water,remained}$	$m_{m,final}$
0.427	45	30	15	229.9840	3,756.78	219.1034	3,767.66	3,743.41	24.2473	13.3667	205.7366
			25	255.7676	4,302.67	230.6927	4,327.74	4,291.14	36.6037	11.5288	219.1639
			50	255.9343	4,434.13	237.3617	4,452.70	4,422.18	30.5194	11.9467	225.4149
		60	15	228.1237	3,544.56	212.7938	3,559.89	3,531.98	27.9030	12.5731	200.2207
			25	239.3869	3,876.55	224.9152	3,891.03	3,862.74	28.2898	13.8181	211.0971
			50	252.7006	4,442.56	235.1468	4,460.11	4,431.17	28.9372	11.3833	223.7634
		120	15	220.3273	3,287.45	203.1767	3,304.60	3,277.13	27.4668	10.3161	192.8606
			25	235.0416	3,882.54	217.0475	3,900.54	3,871.01	29.5296	11.5356	205.5119
			50	249.0453	3,892.88	223.7973	3,918.13	3,882.09	36.0412	10.7932	213.0041

ตารางที่ ฉ-18 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 5-6 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.) (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				← STEP 5 →					← STEP 6 →		
				$m_{m,initial,Actual}$	$m_{Water,input}$	$m_{m,washed}$	m_{Waste}	$m_{Water,output}$	$m_{m,loss}$	$m_{Water,remained}$	$m_{m,final}$
0.427	60	30	15	276.7241	5,342.12	267.9278	5,350.92	5,324.64	26.2844	17.4881	250.4397
			25	293.9888	6,297.55	273.8728	6,317.67	6,284.30	33.3665	13.2506	260.6222
		60	15	269.0241	5,197.55	254.4809	5,212.10	5,182.66	29.4340	14.8909	239.5900
			25	290.6213	5,723.89	276.4470	5,738.06	5,707.15	30.9090	16.7347	259.7122
			50	296.1403	5,846.89	272.2725	5,870.76	5,835.14	35.6106	11.7427	260.5297
		120	25	283.9726	5,265.57	267.1400	5,282.41	5,251.90	30.5018	13.6693	253.4708

ตารางที่ ฉ-19 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 5-6 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				← STEP 5 →					← STEP 6 →		
				$m_{m,initial,Actual}$	$m_{Water,input}$	$m_{m,washed}$	m_{Waste}	$m_{Water,output}$	$m_{m,loss}$	$m_{Water,remained}$	$m_{m,final}$
0.512	30	30	15	247.1210	4,504.56	235.9395	4,515.74	4,489.86	25.8792	14.6977	221.2418
			25	257.5552	4,812.89	245.1114	4,825.33	4,798.91	26.4217	13.9779	231.1335
		60	15	240.0878	3,823.44	225.7996	3,837.73	3,809.78	27.9506	13.6625	212.1372
			25	260.8909	4,700.67	239.9551	4,721.60	4,687.15	34.4477	13.5120	226.4432
			50	268.3681	4,810.54	251.1215	4,827.79	4,798.12	29.6640	12.4173	238.7042
		120	25	246.7641	4,296.13	232.7355	4,310.15	4,284.00	26.1525	12.1239	220.6116
			50	284.4539	5,004.24	256.1510	5,032.54	4,989.91	42.6315	14.3285	241.8225

ตารางที่ ฉ-19 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 5-6 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แ
ปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.) (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 5					STEP 6		
				$m_{m,initial,Actual}$	$m_{Water,input}$	$m_{m,washed}$	m_{Waste}	$m_{Water,output}$	$m_{m,loss}$	$m_{Water,remained}$	$m_{m,final}$
0.512	45	30	15	210.5897	3,208.77	206.0633	3,213.29	3,196.82	16.4726	11.9462	194.1171
			25	236.6736	4,309.45	235.9369	4,310.18	4,293.17	17.0107	16.2740	219.6629
		60	15	205.6830	3,056.77	202.1723	3,060.28	3,043.35	16.9371	13.4264	188.7459
			25	226.6660	3,587.77	215.6251	3,598.82	3,574.43	24.3839	13.3430	202.2821
	60	30	15	253.5559	4,855.33	253.7872	4,855.10	4,840.76	14.3415	14.5728	239.2144
			25	278.8534	5,298.77	271.7910	5,305.83	5,281.58	24.2523	17.1899	254.6011
		60	15	242.5706	4,402.89	233.0650	4,412.39	4,390.93	21.4635	11.9579	221.1071
			25	259.8342	5,180.55	261.4307	5,178.96	5,162.04	16.9207	18.5172	242.9135

ตารางที่ ฉ-20 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 5-6 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 5					STEP 6		
				$m_{m,initial,Actual}$	$m_{Water,input}$	$m_{m,washed}$	m_{Waste}	$m_{Water,output}$	$m_{m,loss}$	$m_{Water,remained}$	$m_{m,final}$
0.512	30	30	15	248.4146	4,325.12	237.1747	4,336.36	4,310.70	25.6625	14.4225	222.7521
			25	267.0753	4,712.56	252.0200	4,727.61	4,699.21	28.3976	13.3423	238.6777
		60	15	236.9270	3,890.32	219.9448	3,907.30	3,877.45	29.8580	12.8757	207.0691
			25	260.6858	4,500.77	242.1978	4,519.25	4,485.01	34.2443	15.7563	226.4415
			50	263.3432	4,755.44	248.3376	4,770.44	4,741.43	29.0151	14.0095	234.3281
		120	25	245.8452	4,256.54	231.8688	4,270.52	4,243.71	26.8102	12.8338	219.0350
			50	282.4736	5,108.54	251.0374	5,139.98	5,097.50	42.4821	11.0459	239.9914

ตารางที่ ฉ-20 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 5-6 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.) (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				← STEP 5 →					← STEP 6 →		
				$m_{m,initial,Actual}$	$m_{Water,input}$	$m_{m,washed}$	m_{Waste}	$m_{Water,output}$	$m_{m,loss}$	$m_{Water,remained}$	$m_{m,final}$
0.512	45	30	15	223.5876	3,276.32	209.2617	3,290.65	3,264.92	25.7301	11.4041	197.8575
			25	237.7736	4,281.78	228.9452	4,290.61	4,269.36	21.2472	12.4188	216.5264
		60	15	214.7665	3,104.54	203.2176	3,116.09	3,093.89	22.1995	10.6506	192.5670
			25	243.6204	3,601.12	224.1407	3,620.60	3,586.27	34.3323	14.8526	209.2881
	60	30	15	265.8632	4,971.60	252.5660	4,984.89	4,957.21	27.6788	14.3815	238.1845
			25	282.1539	5,344.61	273.3698	5,353.39	5,328.25	25.1403	16.3561	257.0136
		60	15	250.5888	4,361.78	241.0615	4,371.31	4,345.91	25.3960	15.8688	225.1928
			25	267.7312	5,196.64	254.1333	5,210.24	5,181.55	28.6966	15.0987	239.0346

ตารางที่ ฉ-21 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 5-6 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 5					STEP 6		
				$m_{m,initial,Actual}$	$m_{Water,input}$	$m_{m,washed}$	m_{Waste}	$m_{Water,output}$	$m_{m,loss}$	$m_{Water,remained}$	$m_{m,final}$
0.630	30	30	15	249.0675	4,204.56	232.1351	4,221.49	4,192.73	28.7595	11.8271	220.3080
			25	275.9087	4,686.70	247.0506	4,715.56	4,674.67	40.8847	12.0266	235.0240
		60	15	228.4284	3,754.23	213.1086	3,769.55	3,743.17	26.3832	11.0633	202.0452
			25	263.7829	4,355.55	243.7525	4,375.58	4,339.33	36.2483	16.2179	227.5346
			50	264.0265	4,787.47	248.7207	4,802.77	4,774.92	27.8521	12.5464	236.1743
		120	25	263.0788	4,162.82	231.3221	4,194.58	4,152.22	42.3635	10.6068	220.7153
			50	262.5143	4,841.22	246.1294	4,857.60	4,829.05	28.5505	12.1656	233.9638

ตารางที่ ฉ-21 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 5-6 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.) (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 5					STEP 6		
				$m_{m,initial,Actual}$	$m_{Water,input}$	$m_{m,washed}$	m_{Waste}	$m_{Water,output}$	$m_{m,loss}$	$m_{Water,remained}$	$m_{m,final}$
0.630	45	30	15	206.6543	3,494.12	210.0152	3,490.76	3,481.09	9.6700	13.0309	196.9843
			25	238.5513	4,084.12	234.8816	4,087.79	4,067.23	20.5640	16.8943	217.9873
		60	15	200.2367	3,011.86	194.2265	3,017.87	3,001.39	16.4756	10.4654	183.7611
			25	212.4414	3,802.24	217.9383	3,796.74	3,788.95	7.7886	13.2855	204.6528
	60	30	15	251.8571	4,901.94	253.8722	4,899.93	4,886.13	13.8030	15.8181	238.0541
			25	280.7861	5,480.84	278.3434	5,483.28	5,462.82	20.4665	18.0238	260.3196
		60	15	247.7798	4,134.98	230.7326	4,152.03	4,122.54	29.4876	12.4404	218.2922
			25	253.1116	5,272.01	254.8599	5,270.26	5,259.45	10.8065	12.5549	242.3050

ตารางที่ ฉ-22 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 5-6 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 5					STEP 6		
				$m_{m,initial,Actual}$	$m_{Water,input}$	$m_{m,washed}$	m_{Waste}	$m_{Water,output}$	$m_{m,loss}$	$m_{Water,remained}$	$m_{m,final}$
0.630	30	30	15	242.0100	4,122.78	230.5395	4,134.25	4,107.77	26.4771	15.0066	215.5329
			25	268.2606	4,566.88	243.3652	4,591.78	4,553.17	38.6081	13.7128	229.6524
		60	15	225.1350	3,704.56	213.9959	3,715.70	3,689.84	25.8564	14.7172	199.2787
			25	263.2648	4,489.66	242.1600	4,510.77	4,474.82	35.9492	14.8444	227.3156
			50	258.9256	4,567.45	245.6058	4,580.77	4,553.33	27.4348	14.1150	231.4908
		120	25	259.5394	4,175.24	229.7225	4,205.06	4,163.76	41.3044	11.4874	218.2350
			50	266.0321	5,541.10	246.4618	5,560.67	5,530.20	30.4710	10.9007	235.5611

ตารางที่ ฉ-22 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 5-6 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.) (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 5					STEP 6		
				$m_{m,initial,Actual}$	$m_{Water,input}$	$m_{m,washed}$	m_{Waste}	$m_{Water,output}$	$m_{m,loss}$	$m_{Water,remained}$	$m_{m,final}$
0.630	45	30	15	206.7113	3,170.67	204.2228	3,173.15	3,152.90	20.2512	17.7626	186.4602
			25	237.5342	3,987.66	228.7789	3,996.42	3,972.97	23.4434	14.6881	214.0908
		60	15	216.5044	3,055.77	201.8513	3,070.43	3,045.77	24.6557	10.0026	191.8487
			25	218.2962	3,607.23	214.8455	3,610.69	3,591.56	19.1218	15.6711	199.1744
	60	30	15	260.0154	4,678.88	251.8413	4,687.06	4,661.96	25.0946	16.9205	234.9208
			25	283.6117	5,608.55	274.9608	5,617.20	5,592.25	24.9511	16.3002	258.6606
		60	15	250.5318	4,255.23	235.6820	4,270.08	4,239.08	31.0051	16.1553	219.5267
			25	258.1953	5,098.55	253.6733	5,103.08	5,082.52	20.5577	16.0358	237.6376

ตารางที่ ฉ-23 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 5-6 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 5					STEP 6		
				$m_{m,initial,Actual}$	$m_{Water,input}$	$m_{m,washed}$	m_{Waste}	$m_{Water,output}$	$m_{m,loss}$	$m_{Water,remained}$	$m_{m,final}$
1.435	30	30	15	233.7879	3,720.56	222.1834	3,732.17	3,705.53	26.6349	15.0304	207.1529
			25	256.6841	4,192.12	232.2101	4,216.60	4,180.35	36.2492	11.7753	220.4348
		60	15	230.4977	3,598.34	213.1620	3,615.68	3,587.42	28.2565	10.9208	202.2412
			25	250.0140	3,956.89	227.5463	3,979.36	3,942.65	36.7018	14.2341	213.3122
			50	242.8007	4,232.96	228.4601	4,247.30	4,222.51	24.7899	10.4494	218.0107
		120	25	239.4164	3,785.13	220.0847	3,804.46	3,773.97	30.4879	11.1563	208.9284
			50	254.2583	4,395.13	239.8002	4,409.59	4,381.45	28.1382	13.6801	226.1201

ตารางที่ ฉ-23 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 5-6 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.) (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 5					STEP 6		
				$m_{m,initial,Actual}$	$m_{Water,input}$	$m_{m,washed}$	m_{Waste}	$m_{Water,output}$	$m_{m,loss}$	$m_{Water,remained}$	$m_{m,final}$
1.435	45	30	15	214.6743	3,391.15	208.2120	3,397.61	3,378.57	19.0488	12.5865	195.6255
			25	217.3912	3,888.72	225.1024	3,881.01	3,872.86	8.1499	15.8611	209.2413
			50	238.0515	3,760.56	220.3946	3,778.22	3,747.94	30.2841	12.6272	207.7674
		60	15	190.2137	2,896.18	163.5719	2,922.82	2,873.49	49.3275	22.6857	140.8862
			25	226.3569	3,628.76	213.2752	3,641.84	3,614.86	26.9634	13.8817	199.3935
			50	236.4437	3,732.96	224.4160	3,744.99	3,719.66	25.3246	13.2970	211.1190
		120	15	182.6856	3,012.68	165.3094	3,030.06	3,003.10	26.9627	9.5866	155.7228
			25	223.4213	3,295.13	205.3221	3,313.23	3,284.15	29.0790	10.9798	194.3423
			50	235.0668	3,582.25	212.8108	3,604.50	3,569.85	34.6502	12.3942	200.4166

ตารางที่ ฉ-23 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 5-6 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 1.) (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 5					STEP 6		
				$m_{m,initial,Actual}$	$m_{Water,input}$	$m_{m,washed}$	m_{Waste}	$m_{Water,output}$	$m_{m,loss}$	$m_{Water,remained}$	$m_{m,final}$
1.435	60	30	15	243.4856	4,200.16	236.6669	4,206.98	4,184.98	22.0012	15.1825	221.4845
			25	251.8484	4,881.64	256.5813	4,876.91	4,862.81	14.0984	18.8314	237.7499
		60	15	231.8452	4,018.00	230.9639	4,018.88	4,001.36	17.5188	16.6375	214.3264
			25	243.0563	4,626.16	244.3152	4,624.90	4,610.19	14.7122	15.9710	228.3441
			50	271.7797	4,886.49	246.3715	4,911.90	4,876.37	35.5211	10.1129	236.2586
		120	25	254.2018	4,232.13	236.7976	4,249.54	4,219.16	30.3742	12.9700	223.8276

ตารางที่ ฉ-24 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 5-6 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 5					STEP 6		
				$m_{m,initial,Actual}$	$m_{Water,input}$	$m_{m,washed}$	m_{Waste}	$m_{Water,output}$	$m_{m,loss}$	$m_{Water,remained}$	$m_{m,final}$
1.435	30	30	15	231.4712	3,902.46	219.9817	3,913.95	3,887.49	26.4517	14.9622	205.0194
			25	256.2585	4,097.34	233.4564	4,120.14	4,083.11	37.0369	14.2348	219.2216
		60	15	231.0292	3,504.12	214.2324	3,520.92	3,492.16	28.7597	11.9629	202.2695
			25	246.4575	3,875.43	227.3197	3,894.57	3,858.84	35.7252	16.5874	210.7323
			50	246.4143	4,322.89	233.2428	4,336.06	4,310.69	25.3729	12.2013	221.0414
		120	25	244.1637	3,685.58	224.6431	3,705.10	3,674.16	30.9397	11.4191	213.2240
			50	254.7734	4,521.85	238.0697	4,538.55	4,511.19	27.3609	10.6573	227.4125

ตารางที่ ฉ-24 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 5-6 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.) (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 5					STEP 6		
				$m_{m,initial,Actual}$	$m_{Water,input}$	$m_{m,washed}$	m_{Waste}	$m_{Water,output}$	$m_{m,loss}$	$m_{Water,remained}$	$m_{m,final}$
1.435	45	30	15	216.6660	3,154.54	203.4633	3,167.75	3,140.29	27.4530	14.2502	189.2130
			25	227.5928	3,844.12	221.9948	3,849.72	3,829.82	19.8969	14.2990	207.6959
			50	237.6994	4,060.12	220.0686	4,077.76	4,049.24	28.5109	10.8802	209.1885
		60	15	181.8677	3,012.77	172.7964	3,021.85	3,002.44	19.4078	10.3366	162.4598
			25	233.6659	3,506.78	212.7005	3,527.74	3,490.77	36.9715	16.0061	196.6944
			50	233.5899	3,924.88	220.0129	3,938.46	3,912.78	25.6760	12.0990	207.9139
		120	15	184.3933	3,112.34	169.7941	3,126.94	3,100.53	26.4066	11.8074	157.9867
			25	223.7934	3,505.12	208.2128	3,520.70	3,493.62	27.0871	11.5065	196.7063
			50	233.7279	3,542.57	210.4924	3,565.80	3,529.44	36.3681	13.1326	197.3598

ตารางที่ ฉ-24 แสดงการหาปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 5-6 ของการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสารสำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ครั้งที่ 2.) (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาณของผลผลิตที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนการผลิตตามหลักการสมดุลมวลสาร (กรัม)							
				STEP 5					STEP 6		
				$m_{m,initial,Actual}$	$m_{Water,input}$	$m_{m,washed}$	m_{Waste}	$m_{Water,output}$	$m_{m,loss}$	$m_{Water,remained}$	$m_{m,final}$
1.435	60	30	15	243.5814	4,465.89	232.1051	4,477.36	4,453.43	23.9292	12.4530	219.6521
			25	266.7907	5,208.56	254.3059	5,221.04	5,193.30	27.7392	15.2544	239.0515
		60	15	246.1141	4,098.77	233.0704	4,111.82	4,083.79	28.0222	14.9785	218.0919
			25	252.0292	4,534.89	240.3011	4,546.61	4,519.28	27.3362	15.6081	224.6930
			50	273.9587	5,546.49	250.9278	5,569.52	5,534.44	35.0824	12.0515	238.8763
		120	25	251.5612	4,262.19	232.9063	4,280.85	4,251.41	29.4433	10.7884	222.1179

ภาคผนวก ช.

คำนวณหาค่าใช้จ่ายรวมทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ ช-1 แสดงค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลองซึ่งใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	มวลของน้ำมันปาล์มใช้แล้วเริ่มต้น (m_{Oil} ; Kg.)			ค่าใช้จ่ายของน้ำมันปาล์ม (Z_{Oil} ;บาท)	มวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทดลอง (m_{KOH} ; Kg.)			ค่าใช้จ่ายของ KOH (Z_{KOH}) (บาท)
				ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย	
0.427	30	30	15	0.267	0.269	0.268	**4.419**	0.00267	0.00269	0.00268	**0.803**
			25	0.270	0.269	0.270	**4.451**	0.00270	0.00269	0.00270	**0.809**
		60	15	0.268	0.267	0.267	**4.409**	0.00268	0.00267	0.00267	**0.802**
			25	0.269	0.270	0.269	**4.442**	0.00269	0.00270	0.00269	**0.808**
			50	0.269	0.271	0.270	**4.463**	0.00269	0.00271	0.00270	**0.811**
		120	25	0.271	0.275	0.273	**4.497**	0.00271	0.00275	0.00273	**0.818**
			50	0.270	0.267	0.269	**4.434**	0.00270	0.00267	0.00269	**0.806**

หมายเหตุ : ราคาน้ำมันปาล์มใช้แล้ว (ขายทิ้ง) หรือ (P_{Oil}) เท่ากับ 16.50 บาทต่อกิโลกรัม

ราคาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) หรือ (P_{KOH}) เท่ากับ 300บาทต่อกิโลกรัม

ตารางที่ ช-1 แสดงค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลองซึ่งใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น(ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	มวลของน้ำมันปาล์มใช้แล้วเริ่มต้น (m_{Oil} ; Kg.)			ค่าใช้จ่ายของน้ำมันปาล์ม (Z_{Oil} ; บาท)	มวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทดลอง (m_{KOH} ; Kg.)			ค่าใช้จ่ายของ KOH (Z_{KOH}) (บาท)
				ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย	
0.427	45	30	15	0.268	0.271	0.269	**4.443**	0.00268	0.00271	0.00269	**0.808**
			25	0.268	0.267	0.268	**4.418**	0.00268	0.00267	0.00268	**0.803**
			50	0.270	0.269	0.269	**4.445**	0.00270	0.00269	0.00269	**0.808**
		60	15	0.271	0.270	0.271	**4.464**	0.00271	0.00270	0.00271	**0.812**
			25	0.266	0.266	0.266	**4.390**	0.00266	0.00266	0.00266	**0.798**
			50	0.269	0.269	0.269	**4.434**	0.00269	0.00269	0.00269	**0.806**
		120	15	0.268	0.270	0.269	**4.444**	0.00268	0.00270	0.00269	**0.808**
			25	0.270	0.270	0.270	**4.461**	0.00270	0.00270	0.00270	**0.811**
			50	0.271	0.268	0.270	**4.451**	0.00271	0.00268	0.00270	**0.809**

หมายเหตุ : ราคาน้ำมันปาล์มใช้แล้ว (ขายทิ้ง) หรือ (P_{Oil}) เท่ากับ 16.50 บาทต่อกิโลกรัม

ราคาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) หรือ (P_{KOH}) เท่ากับ 300บาทต่อกิโลกรัม

ตารางที่ ช-1 แสดงค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลองซึ่งใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	มวลของน้ำมันปาล์มใช้แล้วเริ่มต้น (m_{Oil} ; Kg.)			ค่าใช้จ่ายของน้ำมันปาล์ม (Z_{Oil} ; บาท)	มวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทดลอง (m_{KOH} ; Kg.)			ค่าใช้จ่ายของ KOH (Z_{KOH}) (บาท)
				ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย	
0.427	60	30	15	0.269	0.266	0.268	**4.415**	0.00269	0.00266	0.00268	**0.803**
			25	0.275	0.271	0.273	**4.501**	0.00275	0.00271	0.00273	**0.818**
		60	15	0.272	0.269	0.270	**4.460**	0.00272	0.00269	0.00270	**0.811**
			25	0.271	0.273	0.272	**4.486**	0.00271	0.00273	0.00272	**0.816**
			50	0.269	0.270	0.269	**4.440**	0.00269	0.00270	0.00269	**0.807**
		120	25	0.270	0.270	0.270	**4.454**	0.00270	0.00270	0.00270	**0.810**

หมายเหตุ : ราคาน้ำมันปาล์มใช้แล้ว (ขายทิ้ง) หรือ (P_{Oil}) เท่ากับ 16.50 บาทต่อกิโลกรัม

ราคาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) หรือ (P_{KOH}) เท่ากับ 300บาทต่อกิโลกรัม

ตารางที่ ช-1 แสดงค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลองซึ่งใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น(ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาตรของเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง (V_{MeOH} ; Lt.)			ค่าใช้จ่ายของเมทานอล (Z_{MeOH} ; บาท)	ปริมาตรของน้ำกลั่นที่ใช้ในกระบวนการล้างน้ำ (V_{Water}; Lt.)			ค่าใช้จ่ายของน้ำกลั่น (Z_{water} ; บาท)
				ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย	
0.427	30	30	15	0.045	0.045	0.045	**8.10**	4.586	4.500	4.543	**9.087**
			25	0.075	0.075	0.075	**13.50**	5.055	4.902	4.979	**9.957**
		60	15	0.045	0.045	0.045	**8.10**	4.051	4.104	4.078	**8.155**
			25	0.075	0.075	0.075	**13.50**	4.785	4.659	4.722	**9.443**
			50	0.150	0.150	0.150	**27.00**	5.013	5.212	5.113	**10.225**
		120	25	0.075	0.075	0.075	**13.50**	4.625	4.505	4.565	**9.130**
			50	0.150	0.150	0.150	**27.00**	5.289	5.283	5.286	**10.572**

หมายเหตุ : ราคาของเมทานอล หรือ (P_{MeOH})เท่ากับ 180บาทต่อลิตร

ราคาของน้ำกลั่น หรือ (P_{Water})เท่ากับ 2 บาทต่อลิตร

ตารางที่ ช-1 แสดงค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลองซึ่งใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น(ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาตรของเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง (V_{MeOH} ; Lt.)			ค่าใช้จ่ายของเมทานอล (Z_{MeOH} ; บาท)	ปริมาตรของน้ำกลั่นที่ใช้ในกระบวนการล้างน้ำ (V_{Water}; Lt.)			ค่าใช้จ่ายของน้ำกลั่น (Z_{water} ; บาท)
				ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย	
0.427	45	30	15	0.045	0.045	0.045	**8.10**	3.602	3.757	3.680	**7.359**
			25	0.075	0.075	0.075	**13.50**	4.528	4.303	4.415	**8.831**
			50	0.150	0.150	0.150	**27.00**	4.455	4.434	4.444	**8.889**
		60	15	0.045	0.045	0.045	**8.10**	3.471	3.545	3.508	**7.016**
			25	0.075	0.075	0.075	**13.50**	3.955	3.877	3.916	**7.831**
			50	0.150	0.150	0.150	**27.00**	4.235	4.443	4.339	**8.677**
		120	15	0.045	0.045	0.045	**8.10**	3.167	3.287	3.227	**6.455**
			25	0.075	0.075	0.075	**13.50**	3.723	3.883	3.803	**7.605**
			50	0.150	0.150	0.150	**27.00**	4.082	3.893	3.988	**7.975**

หมายเหตุ : ราคาของเมทานอล หรือ (P_{MeOH})เท่ากับ 180บาทต่อลิตร

ราคาของน้ำกลั่น หรือ (P_{Water})เท่ากับ 2 บาทต่อลิตร

ตารางที่ ช-1 แสดงค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลองซึ่งใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น(ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาตรของเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง (V_{MeOH} ; Lt.)			ค่าใช้จ่ายของเมทานอล (Z_{MeOH} ; บาท)	ปริมาตรของน้ำกลั่นที่ใช้ในกระบวนการล้างน้ำ (V_{Water}; Lt.)			ค่าใช้จ่ายของน้ำกลั่น (Z_{water} ; บาท)
				ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย	
0.427	60	30	15	0.045	0.045	0.045	**8.10**	5.405	5.342	5.374	**10.747**
			25	0.075	0.075	0.075	**13.50**	6.472	6.298	6.385	**12.769**
		60	15	0.045	0.045	0.045	**8.10**	5.210	5.198	5.204	**10.407**
			25	0.075	0.075	0.075	**13.50**	5.846	5.724	5.785	**11.570**
			50	0.150	0.150	0.150	**27.00**	5.687	5.847	5.767	**11.534**
		120	25	0.075	0.075	0.075	**13.50**	5.312	5.266	5.289	**10.578**

หมายเหตุ : ราคาของเมทานอล หรือ (P_{MeOH})เท่ากับ 180บาทต่อลิตร

ราคาของน้ำกลั่น หรือ (P_{Water})เท่ากับ 2 บาทต่อลิตร

ตารางที่ ซ-2 แสดงค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลองซึ่งใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	มวลของน้ำมันปาล์มใช้แล้วเริ่มต้น (m_{Oil} ; Kg.)			ค่าใช้จ่ายของน้ำมันปาล์ม (Z_{Oil} ; บาท)	มวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทดลอง (m_{KOH} ; Kg.)			ค่าใช้จ่ายของ KOH (Z_{KOH}) (บาท)
				ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย	
0.512	30	30	15	0.269	0.271	0.270	**4.457**	0.00269	0.00271	0.00270	**0.810**
			25	0.266	0.274	0.270	**4.452**	0.00266	0.00274	0.00270	**0.810**
		60	15	0.273	0.272	0.272	**4.493**	0.00273	0.00272	0.00272	**0.817**
			25	0.267	0.270	0.269	**4.434**	0.00267	0.00270	0.00269	**0.806**
			50	0.271	0.268	0.269	**4.440**	0.00271	0.00268	0.00269	**0.807**
		120	25	0.269	0.268	0.268	**4.423**	0.00269	0.00268	0.00268	**0.804**
			50	0.271	0.272	0.272	**4.484**	0.00271	0.00272	0.00272	**0.815**

หมายเหตุ : ราคาน้ำมันปาล์มใช้แล้ว (ขายทิ้ง) หรือ (P_{Oil}) เท่ากับ 16.50 บาทต่อกิโลกรัม

ราคาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) หรือ (P_{KOH}) เท่ากับ 300บาทต่อกิโลกรัม

ตารางที่ ช-2 แสดงค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลองซึ่งใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น(ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	มวลของน้ำมันปาล์มใช้แล้วเริ่มต้น (m_{Oil} ; Kg.)			ค่าใช้จ่ายของน้ำมันปาล์ม (Z_{Oil} ; บาท)	มวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทดลอง (m_{KOH} ; Kg.)			ค่าใช้จ่ายของ KOH (Z_{KOH}) (บาท)
				ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย	
0.512	45	30	15	0.273	0.269	0.271	**4.468**	0.00273	0.00269	0.00271	**0.812**
			25	0.267	0.268	0.267	**4.413**	0.00267	0.00268	0.00267	**0.802**
		60	15	0.271	0.272	0.271	**4.479**	0.00271	0.00272	0.00271	**0.814**
			25	0.272	0.272	0.272	**4.491**	0.00272	0.00272	0.00272	**0.816**
	60	30	15	0.270	0.271	0.271	**4.465**	0.00270	0.00271	0.00271	**0.812**
			25	0.270	0.265	0.268	**4.419**	0.00270	0.00265	0.00268	**0.803**
		60	15	0.268	0.269	0.268	**4.430**	0.00268	0.00269	0.00268	**0.805**
			25	0.269	0.266	0.267	**4.412**	0.00269	0.00266	0.00267	**0.802**

หมายเหตุ : ราคาน้ำมันปาล์มใช้แล้ว (ขายทิ้ง) หรือ (P_{Oil}) เท่ากับ 16.50 บาทต่อกิโลกรัม

ราคาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) หรือ (P_{KOH}) เท่ากับ 300บาทต่อกิโลกรัม

ตารางที่ ช-2 แสดงค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลองซึ่งใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น(ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาตรของเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง (V_{MeOH} ; Lt.)			ค่าใช้จ่ายของเมทานอล (Z_{MeOH} ; บาท)	ปริมาตรของน้ำกลั่นที่ใช้ในกระบวนการล้างน้ำ (V_{Water}; Lt.)			ค่าใช้จ่ายของน้ำกลั่น (Z_{water} ; บาท)
				ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย	
0.512	30	30	15	0.045	0.045	0.045	**8.10**	4.505	4.325	4.415	**8.830**
			25	0.075	0.075	0.075	**13.50**	4.813	4.713	4.763	**9.525**
		60	15	0.045	0.045	0.045	**8.10**	3.823	3.890	3.857	**7.714**
			25	0.075	0.075	0.075	**13.50**	4.701	4.501	4.601	**9.201**
			50	0.150	0.150	0.150	**27.00**	4.811	4.755	4.783	**9.566**
		120	25	0.075	0.075	0.075	**13.50**	4.296	4.257	4.276	**8.553**
			50	0.150	0.150	0.150	**27.00**	5.004	5.109	5.056	**10.113**

หมายเหตุ : ราคาของเมทานอล หรือ (P_{MeOH})เท่ากับ 180บาทต่อลิตร

ราคาของน้ำกลั่น หรือ (P_{Water})เท่ากับ 2 บาทต่อลิตร

ตารางที่ ช-2 แสดงค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลองซึ่งใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น(ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาตรของเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง (V_{MeOH} ; Lt.)			ค่าใช้จ่ายของเมทานอล (Z_{MeOH} ; บาท)	ปริมาตรของน้ำกลั่นที่ใช้ในกระบวนการล้างน้ำ (V_{Water}; Lt.)			ค่าใช้จ่ายของน้ำกลั่น (Z_{water} ; บาท)
				ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย	
0.512	45	30	15	0.045	0.045	0.045	8.10	3.209	3.276	3.243	6.485
			25	0.075	0.075	0.075	13.50	4.309	4.282	4.296	8.591
		60	15	0.045	0.045	0.045	8.10	3.057	3.105	3.081	6.161
			25	0.075	0.075	0.075	13.50	3.588	3.601	3.594	7.189
	60	30	15	0.045	0.045	0.045	8.10	4.855	4.972	4.913	9.827
			25	0.075	0.075	0.075	13.50	5.299	5.345	5.322	10.643
		60	15	0.045	0.045	0.045	8.10	4.403	4.362	4.382	8.765
			25	0.075	0.075	0.075	13.50	5.181	5.197	5.189	10.377

หมายเหตุ : ราคาของเมทานอล หรือ (P_{MeOH})เท่ากับ 180บาทต่อลิตร

ราคาของน้ำกลั่น หรือ (P_{Water})เท่ากับ 2 บาทต่อลิตร

ตารางที่ ซ-3แสดงค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลองซึ่งใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	มวลของน้ำมันปาล์มใช้แล้วเริ่มต้น (m_{Oil} ; Kg.)			ค่าใช้จ่ายของน้ำมันปาล์ม (Z_{Oil} ; บาท)	มวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทดลอง (m_{KOH} ; Kg.)			ค่าใช้จ่ายของ KOH (Z_{KOH}) (บาท)
				ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย	
0.630	30	30	15	0.269	0.267	0.268	**4.425**	0.00269	0.00267	0.00268	**0.805**
			25	0.272	0.268	0.270	**4.458**	0.00272	0.00268	0.00270	**0.810**
		60	15	0.264	0.265	0.265	**4.368**	0.00264	0.00265	0.00265	**0.794**
			25	0.271	0.273	0.272	**4.490**	0.00271	0.00273	0.00272	**0.816**
			50	0.273	0.272	0.272	**4.495**	0.00273	0.00272	0.00272	**0.817**
		120	25	0.272	0.271	0.272	**4.480**	0.00272	0.00271	0.00272	**0.815**
			50	0.267	0.267	0.267	**4.402**	0.00267	0.00267	0.00267	**0.800**

หมายเหตุ : ราคาน้ำมันปาล์มใช้แล้ว (ขายทิ้ง) หรือ (P_{Oil}) เท่ากับ 16.50 บาทต่อกิโลกรัม

ราคาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) หรือ (P_{KOH}) เท่ากับ 300บาทต่อกิโลกรัม

ตารางที่ ช-3 แสดงค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลองซึ่งใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น(ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	มวลของน้ำมันปาล์มใช้แล้วเริ่มต้น (m_{Oil} ; Kg.)			ค่าใช้จ่ายของน้ำมันปาล์ม (Z_{Oil} ; บาท)	มวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทดลอง (m_{KOH} ; Kg.)			ค่าใช้จ่ายของ KOH (Z_{KOH}) (บาท)
				ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย	
0.630	45	30	15	0.268	0.266	0.267	**4.407**	0.00268	0.00266	0.00267	**0.801**
			25	0.271	0.271	0.271	**4.465**	0.00271	0.00271	0.00271	**0.812**
		60	15	0.269	0.276	0.272	**4.495**	0.00269	0.00276	0.00272	**0.817**
			25	0.272	0.268	0.270	**4.456**	0.00272	0.00268	0.00270	**0.810**
	60	30	15	0.270	0.273	0.271	**4.479**	0.00270	0.00273	0.00271	**0.814**
			25	0.272	0.275	0.273	**4.512**	0.00272	0.00275	0.00273	**0.820**
		60	15	0.269	0.267	0.268	**4.423**	0.00269	0.00267	0.00268	**0.804**
			25	0.267	0.269	0.268	**4.425**	0.00267	0.00269	0.00268	**0.805**

หมายเหตุ : ราคาน้ำมันปาล์มใช้แล้ว (ขายทิ้ง) หรือ (P_{Oil}) เท่ากับ 16.50 บาทต่อกิโลกรัม

ราคาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) หรือ (P_{KOH}) เท่ากับ 300บาทต่อกิโลกรัม

ตารางที่ ช-3 แสดงค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลองซึ่งใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น(ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาตรของเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง (V_{MeOH} ; Lt.)			ค่าใช้จ่ายของเมทานอล (Z_{MeOH} ; บาท)	ปริมาตรของน้ำกลั่นที่ใช้ในกระบวนการล้างน้ำ (V_{Water}; Lt.)			ค่าใช้จ่ายของน้ำกลั่น (Z_{water} ; บาท)
				ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย	
0.630	30	30	15	0.045	0.045	0.045	**8.10**	4.205	4.123	4.164	**8.327**
			25	0.075	0.075	0.075	**13.50**	4.687	4.567	4.627	**9.254**
		60	15	0.045	0.045	0.045	**8.10**	3.754	3.705	3.729	**7.459**
			25	0.075	0.075	0.075	**13.50**	4.356	4.490	4.423	**8.845**
			50	0.150	0.150	0.150	**27.00**	4.787	4.567	4.677	**9.355**
		120	25	0.075	0.075	0.075	**13.50**	4.163	4.175	4.169	**8.338**
			50	0.150	0.150	0.150	**27.00**	4.841	5.541	5.191	**10.382**

หมายเหตุ : ราคาของเมทานอล หรือ (P_{MeOH})เท่ากับ 180บาทต่อลิตร

ราคาของน้ำกลั่น หรือ (P_{Water})เท่ากับ 2 บาทต่อลิตร

ตารางที่ ช-3 แสดงค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลองซึ่งใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น(ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาตรของเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง (V_{MeOH} ; Lt.)			ค่าใช้จ่ายของเมทานอล (Z_{MeOH} ; บาท)	ปริมาตรของน้ำกลั่นที่ใช้ในกระบวนการล้างน้ำ (V_{Water}; Lt.)			ค่าใช้จ่ายของน้ำกลั่น (Z_{water} ; บาท)
				ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย	
0.630	45	30	15	0.045	0.045	0.045	8.10	3.494	3.171	3.332	6.665
			25	0.075	0.075	0.075	13.50	4.084	3.988	4.036	8.072
		60	15	0.045	0.045	0.045	8.10	3.012	3.056	3.034	6.068
			25	0.075	0.075	0.075	13.50	3.802	3.607	3.705	7.409
	60	30	15	0.045	0.045	0.045	8.10	4.902	4.679	4.790	9.581
			25	0.075	0.075	0.075	13.50	5.481	5.609	5.545	11.089
		60	15	0.045	0.045	0.045	8.10	4.135	4.255	4.195	8.390
			25	0.075	0.075	0.075	13.50	5.272	5.099	5.185	10.371

หมายเหตุ : ราคาของเมทานอล หรือ (P_{MeOH})เท่ากับ 180บาทต่อลิตร

ราคาของน้ำกลั่น หรือ (P_{Water})เท่ากับ 2 บาทต่อลิตร

ตารางที่ ซ-4 แสดงค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลองซึ่งใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	มวลของน้ำมันปาล์มใช้แล้วเริ่มต้น (m_{Oil} ; Kg.)			ค่าใช้จ่ายของน้ำมันปาล์ม (Z_{Oil} ; บาท)	มวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทดลอง (m_{KOH} ; Kg.)			ค่าใช้จ่ายของ KOH (Z_{KOH}) (บาท)
				ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย	
1.435	30	30	15	0.270	0.267	0.269	**4.432**	0.00270	0.00267	0.00269	**0.806**
			25	0.269	0.270	0.270	**4.448**	0.00269	0.00270	0.00270	**0.809**
		60	15	0.273	0.274	0.274	**4.513**	0.00273	0.00274	0.00274	**0.821**
			25	0.267	0.269	0.268	**4.425**	0.00267	0.00269	0.00268	**0.805**
			50	0.268	0.268	0.268	**4.423**	0.00268	0.00268	0.00268	**0.804**
		120	25	0.272	0.275	0.274	**4.513**	0.00272	0.00275	0.00274	**0.821**
			50	0.270	0.268	0.269	**4.443**	0.00270	0.00268	0.00269	**0.808**

หมายเหตุ : ราคาน้ำมันปาล์มใช้แล้ว (ขายทิ้ง) หรือ (P_{Oil}) เท่ากับ 16.50 บาทต่อกิโลกรัม

ราคาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) หรือ (P_{KOH}) เท่ากับ 300บาทต่อกิโลกรัม

ตารางที่ ช-4 แสดงค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลองซึ่งใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	มวลของน้ำมันปาล์มใช้แล้วเริ่มต้น (m_{Oil} ; Kg.)			ค่าใช้จ่ายของน้ำมันปาล์ม (Z_{Oil} ; บาท)	มวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทดลอง (m_{KOH} ; Kg.)			ค่าใช้จ่ายของ KOH (Z_{KOH}) (บาท)
				ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย	
1.435	45	30	15	0.270	0.273	0.271	**4.477**	0.00270	0.00273	0.00271	**0.814**
			25	0.276	0.272	0.274	**4.526**	0.00276	0.00272	0.00274	**0.823**
			50	0.270	0.270	0.270	**4.459**	0.00270	0.00270	0.00270	**0.811**
		60	15	0.269	0.267	0.268	**4.424**	0.00269	0.00267	0.00268	**0.804**
			25	0.268	0.267	0.268	**4.417**	0.00268	0.00267	0.00268	**0.803**
			50	0.269	0.269	0.269	**4.438**	0.00269	0.00269	0.00269	**0.807**
		120	15	0.271	0.270	0.270	**4.462**	0.00271	0.00270	0.00270	**0.811**
			25	0.272	0.269	0.270	**4.461**	0.00272	0.00269	0.00270	**0.811**
			50	0.268	0.269	0.269	**4.435**	0.00268	0.00269	0.00269	**0.806**

หมายเหตุ : ราคาน้ำมันปาล์มใช้แล้ว (ขายทิ้ง) หรือ (P_{Oil}) เท่ากับ 16.50 บาทต่อกิโลกรัม

ราคาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) หรือ (P_{KOH}) เท่ากับ 300บาทต่อกิโลกรัม

ตารางที่ ช-4 แสดงค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลองซึ่งใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	มวลของน้ำมันปาล์มใช้แล้วเริ่มต้น (m_{Oil} ; Kg.)			ค่าใช้จ่ายของน้ำมันปาล์ม (Z_{Oil} ; บาท)	มวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทดลอง (m_{KOH} ; Kg.)			ค่าใช้จ่ายของ KOH (Z_{KOH}) (บาท)
				ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย	
1.435	60	30	15	0.270	0.265	0.267	**4.408**	0.00270	0.00265	0.00267	**0.802**
			25	0.271	0.268	0.269	**4.446**	0.00271	0.00268	0.00269	**0.808**
		60	15	0.272	0.275	0.273	**4.509**	0.00272	0.00275	0.00273	**0.820**
			25	0.267	0.267	0.267	**4.406**	0.00267	0.00267	0.00267	**0.801**
			50	0.270	0.269	0.270	**4.448**	0.00270	0.00269	0.00270	**0.809**
		120	25	0.270	0.271	0.271	**4.466**	0.00270	0.00271	0.00271	**0.812**

หมายเหตุ : ราคาน้ำมันปาล์มใช้แล้ว (ขายทิ้ง) หรือ (P_{Oil}) เท่ากับ 16.50 บาทต่อกิโลกรัม

ราคาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) หรือ (P_{KOH}) เท่ากับ 300บาทต่อกิโลกรัม

ตารางที่ ช-4 แสดงค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลองซึ่งใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น(ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาตรของเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง (V_{MeOH} ; Lt.)			ค่าใช้จ่ายของเมทานอล (Z_{MeOH} ; บาท)	ปริมาตรของน้ำกลั่นที่ใช้ในกระบวนการล้างน้ำ (V_{Water}; Lt.)			ค่าใช้จ่ายของน้ำกลั่น (Z_{water} ; บาท)
				ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย	
1.435	30	30	15	0.045	0.045	0.045	**8.10**	3.721	3.902	3.812	**7.623**
			25	0.075	0.075	0.075	**13.50**	4.192	4.097	4.145	**8.289**
		60	15	0.045	0.045	0.045	**8.10**	3.598	3.504	3.551	**7.102**
			25	0.075	0.075	0.075	**13.50**	3.957	3.875	3.916	**7.832**
			50	0.150	0.150	0.150	**27.00**	4.233	4.323	4.278	**8.556**
		120	25	0.075	0.075	0.075	**13.50**	3.785	3.686	3.735	**7.471**
			50	0.150	0.150	0.150	**27.00**	4.395	4.522	4.458	**8.917**

หมายเหตุ : ราคาของเมทานอล หรือ (P_{MeOH})เท่ากับ 180บาทต่อลิตร

ราคาของน้ำกลั่น หรือ (P_{Water})เท่ากับ 2 บาทต่อลิตร

ตารางที่ ช-4 แสดงค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลองซึ่งใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น(ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาตรของเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง (V_{MeOH} ; Lt.)			ค่าใช้จ่ายของเมทานอล (Z_{MeOH} ; บาท)	ปริมาตรของน้ำกลั่นที่ใช้ในกระบวนการล้างน้ำ (V_{Water}; Lt.)			ค่าใช้จ่ายของน้ำกลั่น (Z_{water} ; บาท)
				ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย	
1.435	45	30	15	0.045	0.045	0.045	**8.10**	3.391	3.155	3.273	**6.546**
			25	0.075	0.075	0.075	**13.50**	3.889	3.844	3.866	**7.733**
			50	0.150	0.150	0.150	**27.00**	3.761	4.060	3.910	**7.821**
		60	15	0.045	0.045	0.045	**8.10**	2.896	3.013	2.954	**5.909**
			25	0.075	0.075	0.075	**13.50**	3.629	3.507	3.568	**7.136**
			50	0.150	0.150	0.150	**27.00**	3.733	3.925	3.829	**7.658**
		120	15	0.045	0.045	0.045	**8.10**	3.013	3.112	3.063	**6.125**
			25	0.075	0.075	0.075	**13.50**	3.295	3.505	3.400	**6.800**
			50	0.150	0.150	0.150	**27.00**	3.582	3.543	3.562	**7.125**

หมายเหตุ : ราคาของเมทานอล หรือ (P_{MeOH})เท่ากับ 180บาทต่อลิตร

ราคาของน้ำกลั่น หรือ (P_{Water})เท่ากับ 2 บาทต่อลิตร

ตารางที่ ช-4 แสดงค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลองซึ่งใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น(ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ปริมาตรของเมทานอลที่ใช้ในการทดลอง (V_{MeOH} ; Lt.)			ค่าใช้จ่ายของเมทานอล (Z_{MeOH} ; บาท)	ปริมาตรของน้ำกลั่นที่ใช้ในกระบวนการล้างน้ำ (V_{Water}; Lt.)			ค่าใช้จ่ายของน้ำกลั่น (Z_{water} ; บาท)
				ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1.	ครั้งที่ 2.	ค่าเฉลี่ย	
1.435	60	30	15	0.045	0.045	0.045	**8.10**	4.200	4.466	4.333	**8.666**
			25	0.075	0.075	0.075	**13.50**	4.882	5.209	5.045	**10.090**
		60	15	0.045	0.045	0.045	**8.10**	4.018	4.099	4.058	**8.117**
			25	0.075	0.075	0.075	**13.50**	4.626	4.535	4.581	**9.161**
			50	0.150	0.150	0.150	**27.00**	4.886	5.546	5.216	**10.433**
		120	25	0.075	0.075	0.075	**13.50**	4.232	4.262	4.247	**8.494**

หมายเหตุ : ราคาของเมทานอล หรือ (P_{MeOH})เท่ากับ 180บาทต่อลิตร

ราคาของน้ำกลั่น หรือ (P_{Water})เท่ากับ 2 บาทต่อลิตร

ตารางที่ ซ-5 แสดงค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ 1Batch การทดลอง)

สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง (บาท)				ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง ($Z_{material}$ หรือ Z_1 ; บาท)
				น้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้น (Z_{Oil})	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Z_{KOH})	เมทานอล (Z_{MeOH})	น้ำกลั่น (Z_{water})	
0.427	30	30	15	4.419	0.803	8.10	9.087	**22.409**
			25	4.451	0.809	13.50	9.957	**28.718**
		60	15	4.409	0.802	8.10	8.155	**21.466**
			25	4.442	0.808	13.50	9.443	**28.193**
			50	4.463	0.811	27.00	10.225	**42.499**
		120	25	4.497	0.818	13.50	9.130	**27.944**
			50	4.434	0.806	27.00	10.572	**42.813**

ตารางที่ ช-5 แสดงค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ 1Batch การทดลอง)

สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง (บาท)				ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง ($Z_{material}$ หรือ Z_1 ; บาท)
				น้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้น (Z_{Oil})	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Z_{KOH})	เมทานอล (Z_{MeOH})	น้ำกลั่น (Z_{water})	
0.427	45	30	15	4.443	0.808	8.10	7.359	**20.710**
			25	4.418	0.803	13.50	8.831	**27.552**
			50	4.445	0.808	27.00	8.889	**41.142**
		60	15	4.464	0.812	8.10	7.016	**20.391**
			25	4.390	0.798	13.50	7.831	**26.519**
			50	4.434	0.806	27.00	8.677	**40.917**
		120	15	4.444	0.808	8.10	6.455	**19.807**
			25	4.461	0.811	13.50	7.605	**26.377**
			50	4.451	0.809	27.00	7.975	**40.236**

ตารางที่ ช-5 แสดงค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ 1Batch การทดลอง)

สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง (บาท)				ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง ($Z_{material}$ หรือ Z_1 ; บาท)
				น้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้น (Z_{Oil})	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Z_{KOH})	เมทานอล (Z_{MeOH})	น้ำกลั่น (Z_{water})	
0.427	60	30	15	4.415	0.803	8.10	10.747	**24.064**
			25	4.501	0.818	13.50	12.769	**31.589**
		60	15	4.460	0.811	8.10	10.407	**23.778**
			25	4.486	0.816	13.50	11.570	**30.372**
			50	4.440	0.807	27.00	11.534	**43.781**
		120	25	4.454	0.810	13.50	10.578	**29.342**

ตารางที่ ช-6 แสดงค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ 1Batch การทดลอง)

สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง (บาท)				ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง ($Z_{material}$ หรือ Z_1 ; บาท)
				น้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้น (Z_{Oil})	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Z_{KOH})	เมทานอล (Z_{MeOH})	น้ำกลั่น (Z_{water})	
0.512	30	30	15	4.457	0.810	8.10	8.830	**22.198**
			25	4.452	0.810	13.50	9.525	**28.287**
		60	15	4.493	0.817	8.10	7.714	**21.123**
			25	4.434	0.806	13.50	9.201	**27.942**
			50	4.440	0.807	27.00	9.566	**41.814**
		120	25	4.423	0.804	13.50	8.553	**27.279**
			50	4.484	0.815	27.00	10.113	**42.412**

ตารางที่ ช-6 แสดงค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ 1Batch การทดลอง)

สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง (บาท)				ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง ($Z_{material}$ หรือ Z_1 ; บาท)
				น้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้น (Z_{Oil})	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Z_{KOH})	เมทานอล (Z_{MeOH})	น้ำกลั่น (Z_{water})	
0.512	45	30	15	4.468	0.812	8.10	6.485	**19.866**
			25	4.413	0.802	13.50	8.591	**27.306**
		60	15	4.479	0.814	8.10	6.161	**19.555**
			25	4.491	0.816	13.50	7.189	**25.996**
	60	30	15	4.465	0.812	8.10	9.827	**23.204**
			25	4.419	0.803	13.50	10.643	**29.366**
		60	15	4.430	0.805	8.10	8.765	**22.100**
			25	4.412	0.802	13.50	10.377	**29.092**

ตารางที่ ช-7 แสดงค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ 1Batch การทดลอง)

สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง (บาท)				ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง ($Z_{material}$ หรือ Z_1 ; บาท)
				น้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้น (Z_{Oil})	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Z_{KOH})	เมทานอล (Z_{MeOH})	น้ำกลั่น (Z_{water})	
0.630	30	30	15	4.425	0.805	8.10	8.327	**21.657**
			25	4.458	0.810	13.50	9.254	**28.022**
		60	15	4.368	0.794	8.10	7.459	**20.721**
			25	4.490	0.816	13.50	8.845	**27.651**
			50	4.495	0.817	27.00	9.355	**41.667**
		120	25	4.480	0.815	13.50	8.338	**27.132**
			50	4.402	0.800	27.00	10.382	**42.584**

ตารางที่ ช-7 แสดงค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ 1Batch การทดลอง)

สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง (บาท)				ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง ($Z_{material}$ หรือ Z_1 ; บาท)
				น้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้น (Z_{Oil})	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Z_{KOH})	เมทานอล (Z_{MeOH})	น้ำกลั่น (Z_{water})	
0.630	45	30	15	4.407	0.801	8.10	6.665	**19.972**
			25	4.465	0.812	13.50	8.072	**26.848**
		60	15	4.495	0.817	8.10	6.068	**19.480**
			25	4.456	0.810	13.50	7.409	**26.176**
	60	30	15	4.479	0.814	8.10	9.581	**22.975**
			25	4.512	0.820	13.50	11.089	**29.922**
		60	15	4.423	0.804	8.10	8.390	**21.717**
			25	4.425	0.805	13.50	10.371	**29.100**

ตารางที่ ช-8 แสดงค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ 1Batch การทดลอง)

สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง (บาท)				ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง ($Z_{material}$ หรือ Z_1 ; บาท)
				น้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้น (Z_{Oil})	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Z_{KOH})	เมทานอล (Z_{MeOH})	น้ำกลั่น (Z_{water})	
1.435	30	30	15	4.432	0.806	8.10	7.623	**20.960**
			25	4.448	0.809	13.50	8.289	**27.046**
		60	15	4.513	0.821	8.10	7.102	**20.537**
			25	4.425	0.805	13.50	7.832	**26.562**
			50	4.423	0.804	27.00	8.556	**40.783**
		120	25	4.513	0.821	13.50	7.471	**26.304**
			50	4.443	0.808	27.00	8.917	**41.167**

ตารางที่ ช-8 แสดงค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ 1Batch การทดลอง)

สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง (บาท)				ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง ($Z_{material}$ หรือ Z_1 ; บาท)
				น้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้น (Z_{Oil})	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Z_{KOH})	เมทานอล (Z_{MeOH})	น้ำกลั่น (Z_{water})	
1.435	45	30	15	4.477	0.814	8.10	6.546	**19.936**
			25	4.526	0.823	13.50	7.733	**26.582**
			50	4.459	0.811	27.00	7.821	**40.091**
		60	15	4.424	0.804	8.10	5.909	**19.237**
			25	4.417	0.803	13.50	7.136	**25.855**
			50	4.438	0.807	27.00	7.658	**39.903**
		120	15	4.462	0.811	8.10	6.125	**19.499**
			25	4.461	0.811	13.50	6.800	**25.573**
			50	4.435	0.806	27.00	7.125	**39.366**

ตารางที่ ช-8 แสดงค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ 1Batch การทดลอง)

สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าใช้จ่ายทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง (บาท)				ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดทางด้านวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลอง ($Z_{material}$ หรือ Z_1 ; บาท)
				น้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้น (Z_{Oil})	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Z_{KOH})	เมทานอล (Z_{MeOH})	น้ำกลั่น (Z_{water})	
1.435	60	30	15	4.408	0.802	8.10	8.666	**21.976**
			25	4.446	0.808	13.50	10.090	**28.844**
		60	15	4.509	0.820	8.10	8.117	**21.545**
			25	4.406	0.801	13.50	9.161	**27.869**
			50	4.448	0.809	27.00	10.433	**42.689**
		120	25	4.466	0.812	13.50	8.494	**27.272**

ภาคผนวก ซ.

คำนวณหาค่าใช้จ่ายรวมทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ ซ-1 แสดงค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (STEP 2)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น

				STEP 2 Pretreatment Process (II) ; n = 2 “ต้มน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองแล้วเพื่อทำการไล่น้ำ”								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}C$)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยของมวลน้ำมันที่ผ่านการกรอง (500 ml.) ($m_{O,separated}$;Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_2)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_2 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_2)			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_2; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_2;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E2} ; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
0.427	30	30	15	0.4400	125	102.352	40	2,370	0.66	0.04319	0.0284	**0.0867**
			25	0.4404	125	102.450	36	2,160	0.60	0.04743	0.0285	**0.0868**
		60	15	0.4413	125	102.663	40	2,370	0.66	0.04332	0.0285	**0.0870**
			25	0.4392	125	102.179	40	2,370	0.66	0.04311	0.0284	**0.0865**
			50	0.4389	125	102.090	37	2,220	0.62	0.04599	0.0284	**0.0865**
		120	25	0.4398	125	102.302	39	2,310	0.64	0.04429	0.0284	**0.0867**
			50	0.4389	125	102.104	34	2,010	0.56	0.05080	0.0284	**0.0865**

ตารางที่ ซ-1 แสดงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง(STEP 2)โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

				STEP 2 Pretreatment Process (II) ; n = 2 "ต้มน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองแล้วเพื่อทำการไล่น้ำ"								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยของมวลน้ำมันที่ผ่านการกรอง (500 ml.) ($m_{O,separated}$;Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_2)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_2 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_2)			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_2; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_2;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E2} ; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
0.427	45	30	15	0.4370	125	101.667	39	2,340	0.65	0.04345	0.0282	**0.0861**
			25	0.4370	125	101.657	39	2,310	0.64	0.04401	0.0282	**0.0861**
			50	0.4392	125	102.162	39	2,340	0.65	0.04366	0.0284	**0.0865**
		60	15	0.4385	125	102.016	40	2,400	0.67	0.04251	0.0283	**0.0864**
			25	0.4388	125	102.069	37	2,220	0.62	0.04598	0.0284	**0.0865**
			50	0.4393	125	102.198	38	2,280	0.63	0.04482	0.0284	**0.0866**
		120	15	0.4388	125	102.070	40	2,370	0.66	0.04307	0.0284	**0.0865**
			25	0.4370	125	101.659	39	2,340	0.65	0.04344	0.0282	**0.0861**
			50	0.4391	125	102.149	38	2,250	0.63	0.04540	0.0284	**0.0865**

หมายเหตุ : อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า ต่อหน่วย (หรือต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง) ; P_E เท่ากับ 3.0493 บาทต่อหน่วย

ตารางที่ ซ-1 แสดงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (STEP 2) โดยที่น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

				STEP 2 Pretreatment Process (II) ; n = 2 "ต้มน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองแล้วเพื่อทำการไล่น้ำ"								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยของมวลน้ำมันที่ผ่านการกรอง (500 ml.) ($m_{O,separated}$;Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_2)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_2 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_2)			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_2; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_2;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E2} ; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
0.427	60	30	15	0.4398	125	102.308	37	2,190	0.61	0.04672	0.0284	**0.0867**
			25	0.4399	125	102.333	41	2,460	0.68	0.04160	0.0284	**0.0867**
		60	15	0.4387	125	102.062	38	2,250	0.63	0.04536	0.0284	**0.0864**
			25	0.4418	125	102.785	38	2,250	0.63	0.04568	0.0286	**0.0871**
			50	0.4396	125	102.252	40	2,400	0.67	0.04261	0.0284	**0.0866**
		120	25	0.4396	125	102.261	38	2,250	0.63	0.04545	0.0284	**0.0866**

หมายเหตุ : อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{n,Initial}$)ที่ใช้ในการทดลองหรืออุณหภูมิห้อง($T_{2,Initial}$) เท่ากับ 25°C และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (T_2) เท่ากับ 150 $^{\circ}$C

ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันปาล์ม (c) ที่อุณหภูมิ 25°C เท่ากับ 1.861kJ/kg –C

อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า ต่อหน่วย (หรือต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง) ; P_E เท่ากับ 3.0493 บาทต่อหน่วย

ตารางที่ ซ-2 แสดงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง(STEP 2)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น

				STEP 2 Pretreatment Process (II) ; n = 2 "ต้มน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองแล้วเพื่อทำการไล่น้ำ"								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยของมวลน้ำมันที่ผ่านการกรอง (500 ml.) ($m_{O,separated}$;Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_2)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_2 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_2)			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_2; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_2;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E2} ; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
0.512	30	30	15	0.4409	125	102.573	38	2,280	0.63	0.04499	0.0285	**0.0869**
			25	0.4415	125	102.694	39	2,310	0.64	0.04446	0.0285	**0.0870**
		60	15	0.4384	125	101.980	41	2,430	0.68	0.04197	0.0283	**0.0864**
			25	0.4385	125	102.011	37	2,220	0.62	0.04595	0.0283	**0.0864**
			50	0.4401	125	102.380	40	2,400	0.67	0.04266	0.0284	**0.0867**
		120	25	0.4392	125	102.177	38	2,250	0.63	0.04541	0.0284	**0.0865**
			50	0.4400	125	102.360	38	2,250	0.63	0.04549	0.0284	**0.0867**

หมายเหตุ : อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{n,Initial}$)ที่ใช้ในการทดลองหรืออุณหภูมิห้อง($T_{2,Initial}$) เท่ากับ 25°C และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (T_2) เท่ากับ 150 °C

ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันปาล์ม (c) ที่อุณหภูมิ 25°C เท่ากับ 1.861kJ/kg –C

อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า ต่อหน่วย (หรือต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง) ; P_E เท่ากับ 3.0493 บาทต่อหน่วย

ตารางที่ ซ-2 แสดงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง(STEP 2)โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.512%FFAเป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

				STEP 2 Pretreatment Process (II) ; n = 2 "ต้มน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองแล้วเพื่อทำการไล่น้ำ"								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยของมวลน้ำมันที่ผ่านการกรอง (500 ml.) ($m_{O,separated}$;Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_2)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_2 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_2)			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_2; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_2;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E2} ; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
0.512	45	30	15	0.4393	125	102.184	38	2,280	0.63	0.04482	0.0284	**0.0866**
			25	0.4386	125	102.041	40	2,400	0.67	0.04252	0.0283	**0.0864**
		60	15	0.4357	125	101.354	40	2,400	0.67	0.04223	0.0282	**0.0858**
			25	0.4420	125	102.814	38	2,280	0.63	0.04509	0.0286	**0.0871**
	60	30	15	0.4377	125	101.815	36	2,160	0.60	0.04714	0.0283	**0.0862**
			25	0.4403	125	102.433	39	2,340	0.65	0.04377	0.0285	**0.0868**
		60	15	0.4403	125	102.435	41	2,430	0.68	0.04215	0.0285	**0.0868**
			25	0.4412	125	102.624	36	2,160	0.60	0.04751	0.0285	**0.0869**

หมายเหตุ : อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{n,Initial}$)ที่ใช้ในการทดลองหรืออุณหภูมิห้อง($T_{2,Initial}$) เท่ากับ 25°C และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (T_2) เท่ากับ 150 $^{\circ}$C

อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า ต่อหน่วย (หรือต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง) ; P_E เท่ากับ 3.0493 บาทต่อหน่วย

ตารางที่ ซ-3 แสดงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง(STEP 2)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น

				STEP 2 Pretreatment Process (II) ; n = 2 "ต้มน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองแล้วเพื่อทำการไล่น้ำ"								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยของมวลน้ำมันที่ผ่านการกรอง (500 ml.) ($m_{O,separated}$;Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_2)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_2 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_2)			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_2; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_2;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E2} ; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
0.630	30	30	15	0.4406	125	102.498	37	2,190	0.61	0.04680	0.0285	**0.0868**
			25	0.4417	125	102.742	40	2,370	0.66	0.04335	0.0285	**0.0870**
		60	15	0.4390	125	102.119	41	2,430	0.68	0.04202	0.0284	**0.0865**
			25	0.4399	125	102.322	40	2,400	0.67	0.04263	0.0284	**0.0867**
			50	0.4391	125	102.136	40	2,400	0.67	0.04256	0.0284	**0.0865**
		120	25	0.4402	125	102.394	37	2,190	0.61	0.04676	0.0284	**0.0867**
			50	0.4403	125	102.420	37	2,190	0.61	0.04677	0.0284	**0.0868**

หมายเหตุ : อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{n,Initial}$)ที่ใช้ในการทดลองหรืออุณหภูมิห้อง($T_{2,Initial}$) เท่ากับ 25°C และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (T_2) เท่ากับ 150 $^{\circ}$C

ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันปาล์ม (c) ที่อุณหภูมิ 25°C เท่ากับ 1.861kJ/kg –C

อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า ต่อหน่วย (หรือต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง) ; P_E เท่ากับ 3.0493 บาทต่อหน่วย

ตารางที่ ซ-3 แสดงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง(STEP 2)โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.630%FFAเป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

				STEP 2 Pretreatment Process (II) ; n = 2 "ต้มน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองแล้วเพื่อทำการไล่น้ำ"								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยของมวลน้ำมันที่ผ่านการกรอง (500 ml.) ($m_{O,separated}$;Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_2)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_2 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_2)			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_2; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_2;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E2} ; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
0.630	45	30	15	0.4365	125	101.530	38	2,280	0.63	0.04453	0.0282	**0.0860**
			25	0.4394	125	102.208	39	2,310	0.64	0.04425	0.0284	**0.0866**
		60	15	0.4405	125	102.461	40	2,370	0.66	0.04323	0.0285	**0.0868**
			25	0.4363	125	101.489	40	2,400	0.67	0.04229	0.0282	**0.0860**
	60	30	15	0.4394	125	102.221	39	2,340	0.65	0.04368	0.0284	**0.0866**
			25	0.4390	125	102.112	39	2,340	0.65	0.04364	0.0284	**0.0865**
		60	15	0.4406	125	102.493	39	2,340	0.65	0.04380	0.0285	**0.0868**
			25	0.4404	125	102.451	39	2,340	0.65	0.04378	0.0285	**0.0868**

หมายเหตุ : อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{n,Initial}$)ที่ใช้ในการทดลองหรืออุณหภูมิห้อง($T_{2,Initial}$) เท่ากับ 25°C และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (T_2) เท่ากับ 150 $^{\circ}$C

อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า ต่อหน่วย (หรือต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง) ; P_E เท่ากับ 3.0493 บาทต่อหน่วย

ตารางที่ ซ-4 แสดงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (STEP 2) โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น

				STEP 2 Pretreatment Process (II) ; n = 2 "ต้มน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองแล้วเพื่อทำการไล่น้ำ"								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยของมวลน้ำมันที่ผ่านการกรอง (500 ml.) ($m_{O,separated}$;Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_2)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_2 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_2)			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_2; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_2;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E2} ; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
1.435	30	30	15	0.4389	125	102.092	39	2,310	0.64	0.04420	0.0284	**0.0865**
			25	0.4409	125	102.561	37	2,220	0.62	0.04620	0.0285	**0.0869**
		60	15	0.4403	125	102.425	38	2,250	0.63	0.04552	0.0285	**0.0868**
			25	0.4391	125	102.139	38	2,280	0.63	0.04480	0.0284	**0.0865**
			50	0.4391	125	102.141	40	2,370	0.66	0.04310	0.0284	**0.0865**
		120	25	0.4415	125	102.710	36	2,160	0.60	0.04755	0.0285	**0.0870**
			50	0.4394	125	102.204	37	2,190	0.61	0.04667	0.0284	**0.0866**

หมายเหตุ : อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{n,Initial}$)ที่ใช้ในการทดลองหรืออุณหภูมิห้อง($T_{2,Initial}$) เท่ากับ 25°C และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (T_2) เท่ากับ 150 $^{\circ}$C

ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันปาล์ม (c) ที่อุณหภูมิ 25°C เท่ากับ 1.861kJ/kg –C

อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า ต่อหน่วย (หรือต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง) ; P_E เท่ากับ 3.0493 บาทต่อหน่วย

ตารางที่ ซ-4 แสดงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง(STEP 2)โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

				STEP 2 Pretreatment Process (II) ; n = 2 "ต้มน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองแล้วเพื่อทำการไล่น้ำ"								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยของมวลน้ำมันที่ผ่านการกรอง (500 ml.) ($m_{O,separated}$;Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_2)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_2 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_2)			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_2; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_2;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E2} ; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
1.435	45	30	15	0.4370	125	101.650	37	2,190	0.61	0.04642	0.0282	**0.0861**
			25	0.4372	125	101.694	42	2,490	0.69	0.04084	0.0282	**0.0861**
			50	0.4396	125	102.262	40	2,370	0.66	0.04315	0.0284	**0.0866**
		60	15	0.4367	125	101.583	40	2,370	0.66	0.04286	0.0282	**0.0860**
			25	0.4370	125	101.656	37	2,220	0.62	0.04579	0.0282	**0.0861**
			50	0.4389	125	102.102	39	2,310	0.64	0.04420	0.0284	**0.0865**
		120	15	0.4395	125	102.235	40	2,370	0.66	0.04314	0.0284	**0.0866**
			25	0.4396	125	102.259	40	2,370	0.66	0.04315	0.0284	**0.0866**
			50	0.4389	125	102.099	38	2,250	0.63	0.04538	0.0284	**0.0865**

หมายเหตุ : อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า ต่อหน่วย (หรือต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง) ; P_E เท่ากับ 3.0493 บาทต่อหน่วย

ตารางที่ ซ-4 แสดงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (STEP 2)โดยที่น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

				STEP 2 Pretreatment Process (II) ; n = 2 "ต้มน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองแล้วเพื่อทำการไล่น้ำ"								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยของมวลน้ำมันที่ผ่านการกรอง (500 ml.) ($m_{O,separated}$;Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_2)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_2 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_2)			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_2; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_2;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E2} ; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
1.435	60	30	15	0.4371	125	101.687	39	2,340	0.65	0.04346	0.0282	**0.0861**
			25	0.4389	125	102.093	39	2,340	0.65	0.04363	0.0284	**0.0865**
		60	15	0.4375	125	101.764	41	2,460	0.68	0.04137	0.0283	**0.0862**
			25	0.4359	125	101.394	37	2,220	0.62	0.04567	0.0282	**0.0859**
			50	0.4395	125	102.235	39	2,310	0.64	0.04426	0.0284	**0.0866**
		120	25	0.4388	125	102.085	40	2,370	0.66	0.04307	0.0284	**0.0865**

หมายเหตุ : อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{n,Initial}$)ที่ใช้ในการทดลองหรืออุณหภูมิห้อง($T_{2,Initial}$) เท่ากับ 25°C และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (T_2) เท่ากับ 150 $^{\circ}$C

ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันปาล์ม (c) ที่อุณหภูมิ 25°C เท่ากับ 1.861kJ/kg –C

อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า ต่อหน่วย (หรือต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง) ; P_E เท่ากับ 3.0493 บาทต่อหน่วย

ตารางที่ ซ-5 แสดงค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (STEP 3)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น

				STEP 3 Reaction Process (I) ; n = 3 "ต้มน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองแล้วให้ได้อุณหภูมิที่กำหนด"								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยของมวลน้ำมันที่ผ่านการกรอง (300 ml.) (m_{Oil} ; Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_3)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_3 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_3)			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_3; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_3;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E3}; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
0.427	30	30	15	0.268	5	2.492	6	330	0.09	0.00755	0.0007	**0.0021**
			25	0.270	5	2.510	6	360	0.10	0.00697	0.0007	**0.0021**
		60	15	0.267	5	2.487	6	360	0.10	0.00691	0.0007	**0.0021**
			25	0.269	5	2.505	6	330	0.09	0.00759	0.0007	**0.0021**
			50	0.270	5	2.517	5	270	0.08	0.00932	0.0007	**0.0021**
		120	25	0.273	5	2.536	6	330	0.09	0.00768	0.0007	**0.0021**
			50	0.269	5	2.501	5	300	0.08	0.00834	0.0007	**0.0021**

หมายเหตุ : อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{n,Initial}$)ที่ใช้หรืออุณหภูมิห้อง($T_{3,Initial}$) เท่ากับ 25°C และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (T_3) เท่ากับ 30,45 และ 60 $^{\circ}$C

ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันปาล์ม (c) ที่อุณหภูมิ 25°C เท่ากับ 1.861kJ/kg –C

อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า ต่อหน่วย (หรือต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง) ; P_E เท่ากับ 3.0493 บาทต่อหน่วย

ตารางที่ ซ-5 แสดงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง(STEP 3)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.427%FFAเป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

				STEP 3 Reaction Process (I) ; n = 3 “ต้มน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองแล้วให้ได้อุณหภูมิที่กำหนด”								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยของมวลน้ำมันที่ผ่านการกรอง (300 ml.) (m_{Oil} ; Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_3)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_3 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_3)			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_3; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_3;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E3}; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
0.427	45	30	15	0.269	20	10.023	8	480	0.13	0.02088	0.0028	**0.0085**
			25	0.268	20	9.965	7	420	0.12	0.02373	0.0028	**0.0084**
			50	0.269	20	10.027	8	480	0.13	0.02089	0.0028	**0.0085**
		45	15	0.271	20	10.069	8	480	0.13	0.02098	0.0028	**0.0085**
			25	0.266	20	9.903	9	540	0.15	0.01834	0.0028	**0.0084**
			50	0.269	20	10.002	9	510	0.14	0.01961	0.0028	**0.0085**
		120	15	0.269	20	10.025	8	480	0.13	0.02089	0.0028	**0.0085**
			25	0.270	20	10.063	9	510	0.14	0.01973	0.0028	**0.0085**
			50	0.270	20	10.041	8	450	0.13	0.02231	0.0028	**0.0085**

หมายเหตุ : อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{n,Initial}$)ที่ใช้หรืออุณหภูมิห้อง($T_{3,Initial}$) เท่ากับ 25°C และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (T_3) เท่ากับ 30,45 และ 60 $^{\circ}$C

ตารางที่ ซ-5 แสดงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง(STEP 3) โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.427%FFAเป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

				STEP 3 Reaction Process (I) ; n = 3 “ต้มน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองแล้วให้ได้อุณหภูมิที่กำหนด”								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยของมวลน้ำมันที่ผ่านการกรอง (300 ml.) (m_{Oil} ; Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_3)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_3 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_3)			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_3; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_3;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E3}; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
0.427	60	30	15	0.268	35	17.427	12	690	0.19	0.02526	0.0048	**0.0148**
			25	0.273	35	17.769	11	660	0.18	0.02692	0.0049	**0.0151**
		60	15	0.270	35	17.605	11	660	0.18	0.02667	0.0049	**0.0149**
			25	0.272	35	17.710	11	630	0.18	0.02811	0.0049	**0.0150**
			50	0.269	35	17.528	11	660	0.18	0.02656	0.0049	**0.0148**
		120	25	0.270	35	17.583	11	630	0.18	0.02791	0.0049	**0.0149**

หมายเหตุ : อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{n,Initial}$)ที่ใช้หรืออุณหภูมิห้อง($T_{3,Initial}$) เท่ากับ 25°C และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (T_3) เท่ากับ 30,45 และ 60 $^{\circ}$C

ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันปาล์ม (c) ที่อุณหภูมิ 25°C เท่ากับ 1.861kJ/kg –C

อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า ต่อหน่วย (หรือต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง) ; P_E เท่ากับ 3.0493 บาทต่อหน่วย

ตารางที่ ซ-6 แสดงค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (STEP 3)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น

				STEP 3 Reaction Process (I) ; n = 3 “ต้มน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองแล้วให้ได้อุณหภูมิที่กำหนด”								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยของมวลน้ำมันที่ผ่านการกรอง (300 ml.) (m_{Oil} ; Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_3)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_3 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_3)			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_3; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_3;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E3}; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
0.512	30	30	15	0.270	5	2.514	6	330	0.09	0.00762	0.0007	**0.0021**
			25	0.270	5	2.511	6	360	0.10	0.00697	0.0007	**0.0021**
		60	15	0.272	5	2.534	6	330	0.09	0.00768	0.0007	**0.0021**
			25	0.269	5	2.501	6	360	0.10	0.00695	0.0007	**0.0021**
			50	0.269	5	2.504	7	390	0.11	0.00642	0.0007	**0.0021**
		120	25	0.268	5	2.494	5	300	0.08	0.00831	0.0007	**0.0021**
			50	0.272	5	2.529	6	330	0.09	0.00766	0.0007	**0.0021**

หมายเหตุ : อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{n,Initial}$)ที่ใช้หรืออุณหภูมิห้อง($T_{3,Initial}$) เท่ากับ 25°C และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (T_3) เท่ากับ 30,45 และ 60 $^{\circ}$C

ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันปาล์ม (c) ที่อุณหภูมิ 25°C เท่ากับ 1.861kJ/kg –C

อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า ต่อหน่วย (หรือต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง) ; P_E เท่ากับ 3.0493 บาทต่อหน่วย

ตารางที่ ซ-6 แสดงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง(STEP 3)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.512%FFAเป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

				STEP 3 Reaction Process (I) ; n = 3 “ต้มน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองแล้วให้ได้อุณหภูมิที่กำหนด”								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}C$)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยของมวลน้ำมันที่ผ่านการกรอง (300 ml.) (m_{Oil} ; Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_3)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_3 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_3)			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_3; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_3;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E3}; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
0.512	45	30	15	0.271	20	10.080	8	480	0.13	0.02100	0.0028	**0.0085**
			25	0.267	20	9.954	8	480	0.13	0.02074	0.0028	**0.0084**
		60	15	0.271	20	10.104	8	480	0.13	0.02105	0.0028	**0.0086**
			25	0.272	20	10.130	8	450	0.13	0.02251	0.0028	**0.0086**
	60	30	15	0.271	35	17.626	11	660	0.18	0.02671	0.0049	**0.0149**
			25	0.268	35	17.443	11	630	0.18	0.02769	0.0048	**0.0148**
		60	15	0.268	35	17.488	11	660	0.18	0.02650	0.0049	**0.0148**
			25	0.267	35	17.419	12	720	0.20	0.02419	0.0048	**0.0148**

หมายเหตุ : อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{n,Initial}$)ที่ใช้หรืออุณหภูมิห้อง($T_{3,Initial}$) เท่ากับ 25$^{\circ}C$ และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (T_3) เท่ากับ 30,45 และ 60 $^{\circ}C$

อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า ต่อหน่วย (หรือต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง) ; P_E เท่ากับ 3.0493 บาทต่อหน่วย

ตารางที่ ซ-7 แสดงค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (STEP 3)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น

				STEP 3 Reaction Process (I) ; n = 3 "ต้มน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองแล้วให้ได้อุณหภูมิที่กำหนด"								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยของมวลน้ำมันที่ผ่านการกรอง (300 ml.) (m_{Oil} ; Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_3)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_3 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_3)			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_3; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_3;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E3}; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
0.630	30	30	15	0.268	5	2.496	6	360	0.10	0.00693	0.0007	**0.0021**
			25	0.270	5	2.514	7	420	0.12	0.00599	0.0007	**0.0021**
		60	15	0.265	5	2.463	5	300	0.08	0.00821	0.0007	**0.0021**
			25	0.272	5	2.532	5	300	0.08	0.00844	0.0007	**0.0021**
			50	0.272	5	2.535	5	300	0.08	0.00845	0.0007	**0.0021**
		120	25	0.272	5	2.526	5	300	0.08	0.00842	0.0007	**0.0021**
			50	0.267	5	2.482	5	270	0.08	0.00919	0.0007	**0.0021**

หมายเหตุ : อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{n,Initial}$)ที่ใช้หรืออุณหภูมิห้อง($T_{3,Initial}$) เท่ากับ 25°C และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (T_3) เท่ากับ 30,45 และ 60 $^{\circ}$C

ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันปาล์ม (c) ที่อุณหภูมิ 25°C เท่ากับ 1.861kJ/kg –C

อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า ต่อหน่วย (หรือต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง) ; P_E เท่ากับ 3.0493 บาทต่อหน่วย

ตารางที่ ซ-7 แสดงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง(STEP 3)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.630%FFAเป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

				STEP 3 Reaction Process (I) ; n = 3 “ต้มน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองแล้วให้ได้อุณหภูมิที่กำหนด”								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยของมวลน้ำมันที่ผ่านการกรอง (300 ml.) (m_{Oil} ; Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_3)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_3 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_3)			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_3; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_3;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E3}; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
0.630	45	30	15	0.267	20	9.940	8	450	0.13	0.02209	0.0028	**0.0084**
			25	0.271	20	10.071	8	480	0.13	0.02098	0.0028	**0.0085**
		60	15	0.272	20	10.140	9	540	0.15	0.01878	0.0028	**0.0086**
			25	0.270	20	10.052	9	540	0.15	0.01861	0.0028	**0.0085**
	60	30	15	0.271	35	17.683	12	690	0.19	0.02563	0.0049	**0.0150**
			25	0.273	35	17.811	10	600	0.17	0.02969	0.0049	**0.0151**
		60	15	0.268	35	17.459	11	630	0.18	0.02771	0.0048	**0.0148**
			25	0.268	35	17.469	12	690	0.19	0.02532	0.0049	**0.0148**

หมายเหตุ : อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{n,Initial}$)ที่ใช้หรืออุณหภูมิห้อง($T_{3,Initial}$) เท่ากับ 25°C และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (T_3) เท่ากับ 30,45 และ 60 $^{\circ}$C

อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า ต่อหน่วย (หรือต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง) ; P_E เท่ากับ 3.0493 บาทต่อหน่วย

ตารางที่ ซ-8 แสดงค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (STEP 3)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น

				STEP 3 Reaction Process (I) ; n = 3 "ต้มน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองแล้วให้ได้อุณหภูมิที่กำหนด"								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยของมวลน้ำมันที่ผ่านการกรอง (300 ml.) (m_{Oil} ; Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_3)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_3 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_3)			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_3; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_3;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E3}; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
1.435	30	30	15	0.269	5	2.499	5	270	0.08	0.00926	0.0007	**0.0021**
			25	0.270	5	2.508	7	390	0.11	0.00643	0.0007	**0.0021**
		60	15	0.274	5	2.545	6	330	0.09	0.00771	0.0007	**0.0022**
			25	0.268	5	2.496	5	270	0.08	0.00924	0.0007	**0.0021**
			50	0.268	5	2.494	7	390	0.11	0.00640	0.0007	**0.0021**
		120	25	0.274	5	2.545	6	330	0.09	0.00771	0.0007	**0.0022**
			50	0.269	5	2.505	6	330	0.09	0.00759	0.0007	**0.0021**

หมายเหตุ : อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{n,Initial}$)ที่ใช้หรืออุณหภูมิห้อง($T_{3,Initial}$) เท่ากับ 25°C และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (T_3) เท่ากับ 30,45 และ 60 $^{\circ}$C

ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันปาล์ม (c) ที่อุณหภูมิ 25°C เท่ากับ 1.861kJ/kg –C

อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า ต่อหน่วย (หรือต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง) ; P_E เท่ากับ 3.0493 บาทต่อหน่วย

ตารางที่ ซ-8 แสดงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง(STEP 3)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ1.435%FFAเป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

				STEP 3 Reaction Process (I) ; n = 3 "ต้มน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองแล้วให้ได้อุณหภูมิที่กำหนด"								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยของมวลน้ำมันที่ผ่านการกรอง (300 ml.) (m_{Oil} ; Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_3)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_3 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_3)			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_3; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_3;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E3}; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
1.435	45	30	15	0.271	20	10.098	9	510	0.14	0.01980	0.0028	**0.0086**
			25	0.274	20	10.211	9	510	0.14	0.02002	0.0028	**0.0086**
			50	0.270	20	10.059	9	510	0.14	0.01972	0.0028	**0.0085**
		45	15	0.268	20	9.980	8	480	0.13	0.02079	0.0028	**0.0085**
			25	0.268	20	9.963	8	480	0.13	0.02076	0.0028	**0.0084**
			50	0.269	20	10.012	9	510	0.14	0.01963	0.0028	**0.0085**
		120	15	0.270	20	10.066	8	450	0.13	0.02237	0.0028	**0.0085**
			25	0.270	20	10.063	8	480	0.13	0.02097	0.0028	**0.0085**
			50	0.269	20	10.004	9	510	0.14	0.01962	0.0028	**0.0085**

หมายเหตุ : อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{n,Initial}$)ที่ใช้หรืออุณหภูมิห้อง($T_{3,Initial}$) เท่ากับ 25°C และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (T_3) เท่ากับ 30,45 และ 60 $^{\circ}$C

ตารางที่ ซ-8 แสดงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง(STEP 3) โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ1.435%FFAเป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

				STEP 3 Reaction Process (I) ; n = 3 “ต้มน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองแล้วให้ได้อุณหภูมิที่กำหนด”								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยของมวลน้ำมันที่ผ่านการกรอง (300 ml.) (m_{Oil} ; Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_3)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_3 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_3)			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_3; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_3;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E3}; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
1.435	60	30	15	0.267	35	17.403	12	690	0.19	0.02522	0.0048	**0.0147**
			25	0.269	35	17.550	11	630	0.18	0.02786	0.0049	**0.0149**
		60	15	0.273	35	17.799	11	660	0.18	0.02697	0.0049	**0.0151**
			25	0.267	35	17.395	11	660	0.18	0.02636	0.0048	**0.0147**
			50	0.270	35	17.557	12	690	0.19	0.02545	0.0049	**0.0149**
		120	25	0.271	35	17.629	11	660	0.18	0.02671	0.0049	**0.0149**

หมายเหตุ : อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{n,Initial}$)ที่ใช้หรืออุณหภูมิห้อง($T_{3,Initial}$) เท่ากับ 25°C และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (T_3) เท่ากับ 30,45 และ 60 $^{\circ}$C

ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันปาล์ม (c) ที่อุณหภูมิ 25°C เท่ากับ 1.861kJ/kg –C

อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า ต่อหน่วย (หรือต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง) ; P_E เท่ากับ 3.0493 บาทต่อหน่วย

ตารางที่ ซ-9 แสดงค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (STEP 4)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น

				STEP 4 Reaction Process (II) ; n = 4 แทน "ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันในการผลิตไบโอดีเซล"								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยมวลสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยา ($m_{initial}$; Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_4)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_4 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_4)โดยที่ $t_4 = t_{4,1} + t_{4,2}$			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_4; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_4;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E4}; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
0.427	30	30	15	0.306	5	2.849	35.0	2,100	0.58	0.00136	0.0008	**0.0024**
			25	0.331	5	3.076	34.0	2,040	0.57	0.00151	0.0009	**0.0026**
		60	15	0.306	5	2.848	64.0	3,840	1.07	0.00074	0.0008	**0.0024**
			25	0.330	5	3.073	66.0	3,960	1.10	0.00078	0.0009	**0.0026**
			50	0.390	5	3.629	63.5	3,810	1.06	0.00095	0.0010	**0.0031**
		120	25	0.334	5	3.111	123.5	7,410	2.06	0.00042	0.0009	**0.0026**
			50	0.389	5	3.617	124.0	7,440	2.07	0.00049	0.0010	**0.0031**

หมายเหตุ : อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{n,Initial}$)ที่ใช้หรืออุณหภูมิห้อง($T_{4,Initial}$) เท่ากับ 25°C และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (T_4) เท่ากับ 30,45 และ 60 $^{\circ}$C

มวลของสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชั่น ($m_{initial}$) เท่ากับ ผลรวมระหว่าง m_{Oil} และ m_{KOH}และ m_{MeOH} ในแต่ละการทดลอง

t_4เท่ากับ ผลรวมระหว่างเวลาที่ใช้ในรักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่หลังจากมีการผสมสาร ($t_{4,1}$) กับเวลาที่ใช้ในการทำการทำปฏิกิริยา ($t_{4,2}$)

ตารางที่ ซ-9 แสดงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง(STEP 4)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น(ต่อ)

				STEP 4 Reaction Process (II) ; n = 4 แทน “ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันในการผลิตไบโอดีเซล”								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยมวลสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยา ($m_{initial}$; Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_4)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_4 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_4)โดยที่ $t_4 = t_{4,1} + t_{4,2}$			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_4; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_4;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E4}; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
0.427	45	30	15	0.308	20	11.447	34.0	2,040	0.57	0.00561	0.0032	**0.0097**
			25	0.330	20	12.283	35.0	2,100	0.58	0.00585	0.0034	**0.0104**
			50	0.389	20	14.483	33.5	2,010	0.56	0.00721	0.0040	**0.0123**
		60	15	0.310	20	11.520	65.0	3,900	1.08	0.00295	0.0032	**0.0098**
			25	0.328	20	12.221	64.5	3,870	1.08	0.00316	0.0034	**0.0104**
			50	0.389	20	14.461	65.0	3,900	1.08	0.00371	0.0040	**0.0122**
		120	15	0.308	20	11.456	124.5	7,470	2.08	0.00153	0.0032	**0.0097**
			25	0.332	20	12.357	123.5	7,410	2.06	0.00167	0.0034	**0.0105**
			50	0.389	20	14.485	124.0	7,440	2.07	0.00195	0.0040	**0.0123**

หมายเหตุ : t_4เท่ากับ ผลรวมระหว่างเวลาที่ใช้ในรักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่หลังจากมีการผสมสาร ($t_{4,1}$) กับเวลาที่ใช้ในการทำการทำปฏิกิริยา ($t_{4,2}$)

ตารางที่ ซ-9 แสดงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (STEP 4)โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น(ต่อ)

				STEP 4 Reaction Process (II) ; n = 4 แทน “ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันในการผลิตไบโอดีเซล”								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยมวลสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยา ($m_{initial}$; Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_4)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_4 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_4)โดยที่ $t_4 = t_{4,1} + t_{4,2}$			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_4; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_4;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E4}; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
0.427	60	30	15	0.306	35	19.925	35.0	2,100	0.58	0.00949	0.0055	**0.0169**
			25	0.335	35	21.805	35.0	2,100	0.58	0.01038	0.0061	**0.0185**
		60	15	0.309	35	20.136	65.0	3,900	1.08	0.00516	0.0056	**0.0171**
			25	0.334	35	21.758	65.0	3,900	1.08	0.00558	0.0060	**0.0184**
			50	0.389	35	25.310	63.5	3,810	1.06	0.00664	0.0070	**0.0214**
		120	25	0.332	35	21.597	124.5	7,470	2.08	0.00289	0.0060	**0.0183**

หมายเหตุ : อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{n,Initial}$)ที่ใช้หรืออุณหภูมิห้อง($T_{4,Initial}$) เท่ากับ 25°C และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (T_4) เท่ากับ 30,45 และ 60 $^{\circ}$C

มวลของสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชั่น ($m_{initial}$) เท่ากับ ผลรวมระหว่าง m_{Oil} และ m_{KOH}และ m_{MeOH} ในแต่ละการทดลอง

t_4เท่ากับ ผลรวมระหว่างเวลาที่ใช้ในรักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่หลังจากมีการผสมสาร ($t_{4,1}$) กับเวลาที่ใช้ในการทำการทำปฏิกิริยา ($t_{4,2}$)

ตารางที่ ซ-10 แสดงค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (STEP 4)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น

				STEP 4 Reaction Process (II) ; n = 4 แทน “ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันในการผลิตไบโอดีเซล”								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยมวลสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยา ($m_{initial}$; Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_4)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_4 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_4)โดยที่ $t_4 = t_{4,1} + t_{4,2}$			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_4; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_4;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E4}; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
0.512	30	30	15	0.309	5	2.878	34.5	2,070	0.58	0.00139	0.0008	**0.0024**
			25	0.331	5	3.084	33.5	2,010	0.56	0.00153	0.0009	**0.0026**
		60	15	0.311	5	2.892	64.0	3,840	1.07	0.00075	0.0008	**0.0024**
			25	0.330	5	3.073	65.0	3,900	1.08	0.00079	0.0009	**0.0026**
			50	0.389	5	3.616	63.5	3,810	1.06	0.00095	0.0010	**0.0031**
		120	25	0.329	5	3.066	124.5	7,470	2.08	0.00041	0.0009	**0.0026**
			50	0.392	5	3.644	124.0	7,440	2.07	0.00049	0.0010	**0.0031**

หมายเหตุ : อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{n,Initial}$)ที่ใช้หรืออุณหภูมิห้อง($T_{4,Initial}$) เท่ากับ 25°C และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (T_4) เท่ากับ 30,45 และ 60 $^{\circ}$C

มวลของสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชั่น ($m_{initial}$) เท่ากับ ผลรวมระหว่าง m_{Oil} และ m_{KOH}และ m_{MeOH} ในแต่ละการทดลอง

t_4เท่ากับ ผลรวมระหว่างเวลาที่ใช้ในรักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่หลังจากมีการผสมสาร ($t_{4,1}$) กับเวลาที่ใช้ในการทำการทำปฏิกิริยา ($t_{4,2}$)

ตารางที่ ซ-10 แสดงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง(STEP 4)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น(ต่อ)

				STEP 4 Reaction Process (II) ; n = 4 แทน “ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันในการผลิตไบโอดีเซล”								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยมวลสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยา ($m_{initial}$; Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_4)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_4 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_4) โดยที่ $t_4 = t_{4,1} + t_{4,2}$			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_4; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_4;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E4}; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
0.512	45	30	15	0.310	20	11.527	34.0	2,040	0.57	0.00565	0.0032	**0.0098**
			25	0.329	20	12.250	34.0	2,040	0.57	0.00600	0.0034	**0.0104**
		60	15	0.310	20	11.540	66.0	3,960	1.10	0.00291	0.0032	**0.0098**
			25	0.334	20	12.417	65.0	3,900	1.08	0.00318	0.0034	**0.0105**
	60	30	15	0.309	35	20.157	34.0	2,040	0.57	0.00988	0.0056	**0.0171**
			25	0.330	35	21.483	34.5	2,070	0.58	0.01038	0.0060	**0.0182**
		60	15	0.307	35	20.026	65.5	3,930	1.09	0.00510	0.0056	**0.0170**
			25	0.330	35	21.463	65.0	3,900	1.08	0.00550	0.0060	**0.0182**

หมายเหตุ : t_4เท่ากับ ผลรวมระหว่างเวลาที่ใช้ในรักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่หลังจากมีการผสมสาร ($t_{4,1}$) กับเวลาที่ใช้ในการทำการทำปฏิกิริยา ($t_{4,2}$)

ตารางที่ ซ-11 แสดงค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (STEP 4)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น

				STEP 4 Reaction Process (II) ; n = 4 แทน "ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันในการผลิตไบโอดีเซล"								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยมวลสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยา ($m_{initial}$; Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_4)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_4 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_4)โดยที่ $t_4 = t_{4,1} + t_{4,2}$			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_4; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_4;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E4}; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
0.630	30	30	15	0.307	5	2.858	35.0	2,100	0.58	0.00136	0.0008	**0.0024**
			25	0.331	5	3.083	35.0	2,100	0.58	0.00147	0.0009	**0.0026**
		60	15	0.303	5	2.822	64.5	3,870	1.08	0.00073	0.0008	**0.0024**
			25	0.334	5	3.106	64.5	3,870	1.08	0.00080	0.0009	**0.0026**
			50	0.392	5	3.649	63.5	3,810	1.06	0.00096	0.0010	**0.0031**
		120	25	0.333	5	3.100	124.5	7,470	2.08	0.00042	0.0009	**0.0026**
			50	0.386	5	3.592	124.5	7,470	2.08	0.00048	0.0010	**0.0030**

หมายเหตุ : อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{n,Initial}$)ที่ใช้หรืออุณหภูมิห้อง($T_{4,Initial}$) เท่ากับ 25°C และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (T_4) เท่ากับ 30,45 และ 60 $^{\circ}$C

มวลของสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชั่น ($m_{initial}$) เท่ากับ ผลรวมระหว่าง m_{Oil} และ m_{KOH}และ m_{MeOH} ในแต่ละการทดลอง

t_4เท่ากับ ผลรวมระหว่างเวลาที่ใช้ในรักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่หลังจากมีการผสมสาร ($t_{4,1}$) กับเวลาที่ใช้ในการทำการทำปฏิกิริยา ($t_{4,2}$)

ตารางที่ ซ-11 แสดงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง(STEP 4)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น(ต่อ)

				STEP 4 Reaction Process (II) ; n = 4 แทน "ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันในการผลิตไบโอดีเซล"								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยมวลสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยา ($m_{initial}$; Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_4)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_4 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_4) โดยที่ $t_4 = t_{4,1} + t_{4,2}$			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_4; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_4;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E4}; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
0.630	45	30	15	0.306	20	11.372	36.0	2,160	0.60	0.00526	0.0032	**0.0096**
			25	0.332	20	12.373	34.5	2,070	0.58	0.00598	0.0034	**0.0105**
		60	15	0.311	20	11.588	64.0	3,840	1.07	0.00302	0.0032	**0.0098**
			25	0.332	20	12.345	63.5	3,810	1.06	0.00324	0.0034	**0.0105**
	60	30	15	0.310	35	20.221	33.5	2,010	0.56	0.01006	0.0056	**0.0171**
			25	0.336	35	21.858	34.5	2,070	0.58	0.01056	0.0061	**0.0185**
		60	15	0.306	35	19.950	65.5	3,930	1.09	0.00508	0.0055	**0.0169**
			25	0.330	35	21.503	64.0	3,840	1.07	0.00560	0.0060	**0.0182**

หมายเหตุ : t_4เท่ากับ ผลรวมระหว่างเวลาที่ใช้ในรักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่หลังจากมีการผสมสาร ($t_{4,1}$) กับเวลาที่ใช้ในการทำการทำปฏิกิริยา ($t_{4,2}$)

ตารางที่ ซ-12 แสดงค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (STEP 4)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น

				STEP 4 Reaction Process (II) ; n = 4 แทน "ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันในการผลิตไบโอดีเซล"								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยมวลสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยา ($m_{initial}$; Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_4)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_4 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_4)โดยที่ $t_4 = t_{4,1} + t_{4,2}$			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_4; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_4;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E4}; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
1.435	30	30	15	0.307	5	2.857	34.5	2,070	0.58	0.00138	0.0008	**0.0024**
			25	0.331	5	3.083	33.5	2,010	0.56	0.00153	0.0009	**0.0026**
		60	15	0.312	5	2.907	65.5	3,930	1.09	0.00074	0.0008	**0.0025**
			25	0.329	5	3.066	63.5	3,810	1.06	0.00080	0.0009	**0.0026**
			50	0.388	5	3.609	64.0	3,840	1.07	0.00094	0.0010	**0.0031**
		120	25	0.335	5	3.121	124.5	7,470	2.08	0.00042	0.0009	**0.0026**
			50	0.389	5	3.616	123.5	7,410	2.06	0.00049	0.0010	**0.0031**

หมายเหตุ : อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{n,Initial}$)ที่ใช้หรืออุณหภูมิห้อง($T_{4,Initial}$) เท่ากับ 25°C และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (T_4) เท่ากับ 30,45 และ 60 $^{\circ}$C

มวลของสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชั่น ($m_{initial}$) เท่ากับ ผลรวมระหว่าง m_{Oil} และ m_{KOH}และ m_{MeOH} ในแต่ละการทดลอง

t_4เท่ากับ ผลรวมระหว่างเวลาที่ใช้ในรักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่หลังจากมีการผสมสาร ($t_{4,1}$) กับเวลาที่ใช้ในการทำการทำปฏิกิริยา ($t_{4,2}$)

ตารางที่ ซ-12 แสดงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง(STEP 4)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น(ต่อ)

				STEP 4 Reaction Process (II) ; n = 4 แทน "ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันในการผลิตไบโอดีเซล"								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}C$)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยมวลสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยา ($m_{initial}$; Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_4)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_4 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_4)โดยที่ $t_4 = t_{4,1} + t_{4,2}$			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_4; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_4;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E4}; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
1.435	45	30	15	0.310	20	11.532	34.0	2,040	0.57	0.00565	0.0032	**0.0098**
			25	0.336	20	12.502	35.0	2,100	0.58	0.00595	0.0035	**0.0106**
			50	0.390	20	14.531	34.5	2,070	0.58	0.00702	0.0040	**0.0123**
		60	15	0.306	20	11.404	64.5	3,870	1.08	0.00295	0.0032	**0.0097**
			25	0.329	20	12.251	64.5	3,870	1.08	0.00317	0.0034	**0.0104**
			50	0.389	20	14.462	64.5	3,870	1.08	0.00374	0.0040	**0.0122**
		120	15	0.309	20	11.511	123.5	7,410	2.06	0.00155	0.0032	**0.0098**
			25	0.332	20	12.369	124.5	7,470	2.08	0.00166	0.0034	**0.0105**
			50	0.389	20	14.475	124.5	7,470	2.08	0.00194	0.0040	**0.0123**

หมายเหตุ : t_4เท่ากับ ผลรวมระหว่างเวลาที่ใช้ในรักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่หลังจากมีการผสมสาร ($t_{4,1}$) กับเวลาที่ใช้ในการทำการทำปฏิกิริยา ($t_{4,2}$)

ตารางที่ ซ-12 แสดงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (STEP 4)โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น(ต่อ)

				STEP 4 Reaction Process (II) ; n = 4 แทน “ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันในการผลิตไบโอดีเซล”								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยมวลสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยา ($m_{initial}$; Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_4)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_4 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_4)โดยที่ $t_4 = t_{4,1} + t_{4,2}$			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_4; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_4;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E4}; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
1.435	60	30	15	0.305	35	19.897	35.5	2,130	0.59	0.00934	0.0055	**0.0169**
			25	0.331	35	21.575	33.5	2,010	0.56	0.01073	0.0060	**0.0183**
		60	15	0.312	35	20.329	64.5	3,870	1.08	0.00525	0.0056	**0.0172**
			25	0.329	35	21.415	64.5	3,870	1.08	0.00553	0.0059	**0.0181**
			50	0.389	35	25.368	63.5	3,810	1.06	0.00666	0.0070	**0.0215**
		120	25	0.332	35	21.633	125.0	7,500	2.08	0.00288	0.0060	**0.0183**

หมายเหตุ : อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{n,Initial}$)ที่ใช้หรืออุณหภูมิห้อง($T_{4,Initial}$) เท่ากับ 25°C และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (T_4) เท่ากับ 30,45 และ 60 $^{\circ}$C

มวลของสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชั่น ($m_{initial}$) เท่ากับ ผลรวมระหว่าง m_{Oil} และ m_{KOH}และ m_{MeOH} ในแต่ละการทดลอง

t_4เท่ากับ ผลรวมระหว่างเวลาที่ใช้ในรักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่หลังจากมีการผสมสาร ($t_{4,1}$) กับเวลาที่ใช้ในการทำการทำปฏิกิริยา ($t_{4,2}$)

ตารางที่ ซ-13 แสดงค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง(STEP6)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น

				STEP 6 Drying Process ; n = 6 “ต้มไล่น้ำในเมทิลเอสเตอร์ผลผลิตที่ได้ในการผลิตไบโอดีเซล”								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยของมวลเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการล้างน้ำ ($m_{m,washed}$;Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_6)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_6 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_6)			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_6; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_6;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E6}; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
0.427	30	30	15	0.237	125	55.151	28.5	1,860	0.52	0.02965	0.0153	**0.0467**
			25	0.254	125	59.089	29.5	1,860	0.52	0.03177	0.0164	**0.0501**
		60	15	0.227	125	52.771	28.0	1,800	0.50	0.02932	0.0147	**0.0447**
			25	0.242	125	56.317	25.0	1,560	0.43	0.03610	0.0156	**0.0477**
			50	0.256	125	59.630	27.5	1,740	0.48	0.03427	0.0166	**0.0505**
		120	25	0.242	125	56.183	26.0	1,620	0.45	0.03468	0.0156	**0.0476**
			50	0.260	125	60.469	29.5	1,680	0.47	0.03599	0.0168	**0.0512**

หมายเหตุ : อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{n,Initial}$)ที่ใช้ในการทดลองหรืออุณหภูมิห้อง($T_{6,Initial}$) เท่ากับ 25°C และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (T_6) เท่ากับ 150 $^{\circ}$C

มวลของ $m_{m,washed}$เท่ากับ ผลรวมระหว่าง $m_{m,final}$ และ $m_{Water,remained}$ที่ได้จากการทดลอง

อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า ต่อหน่วย (หรือต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง) ; P_E เท่ากับ 3.0493 บาทต่อหน่วย

ตารางที่ ซ-13 แสดงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง(STEP6) โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.427%FFAเป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

				STEP 6 Drying Process ; n = 6 “ต้มไล่น้ำในเมทิลเอสเตอร์ผลผลิตที่ได้ในการผลิตไบโอดีเซล”								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยของมวลเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการล้างน้ำ ($m_{m,washed}$;Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_6)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_6 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_6)			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_6; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_6;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E6}; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
0.427	45	30	15	0.213	125	49.613	24.5	1,320	0.37	0.03759	0.0138	**0.0420**
			25	0.234	125	54.452	27.0	1,800	0.50	0.03025	0.0151	**0.0461**
			50	0.238	125	55.272	27.5	1,620	0.45	0.03412	0.0154	**0.0468**
		60	15	0.212	125	49.345	27.0	1,740	0.48	0.02836	0.0137	**0.0418**
			25	0.223	125	51.855	29.0	1,680	0.47	0.03087	0.0144	**0.0439**
			50	0.235	125	54.670	29.5	1,800	0.50	0.03037	0.0152	**0.0463**
		120	15	0.202	125	47.089	26.0	1,620	0.45	0.02907	0.0131	**0.0399**
			25	0.218	125	50.743	28.5	1,740	0.48	0.02916	0.0141	**0.0430**
			50	0.225	125	52.314	28.0	1,860	0.52	0.02813	0.0145	**0.0443**

หมายเหตุ : มวลของ $m_{m,washed}$เท่ากับ ผลรวมระหว่าง $m_{m,final}$ และ $m_{Water,remained}$ที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ ซ-13 แสดงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง(STEP6)โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น(ต่อ)

				STEP 6 Drying Process ; n = 6 “ต้มไล่น้ำในเมทิลเอสเตอร์ผลผลิตที่ได้ในการผลิตไบโอดีเซล”								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยของมวลเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการล้างน้ำ ($m_{m,washed}$;Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_6)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_6 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_6)			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_6; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_6;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E6}; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
0.427	60	30	15	0.270	125	62.795	30.0	1,800	0.50	0.03489	0.0174	**0.0532**
			25	0.281	125	65.360	29.5	1,920	0.53	0.03404	0.0182	**0.0554**
		60	15	0.258	125	60.130	31.0	1,920	0.53	0.03132	0.0167	**0.0509**
			25	0.277	125	64.526	31.0	1,920	0.53	0.03361	0.0179	**0.0547**
			50	0.272	125	63.229	29.0	1,800	0.50	0.03513	0.0176	**0.0536**
		120	25	0.267	125	62.054	30.0	1,680	0.47	0.03694	0.0172	**0.0526**

หมายเหตุ : อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{n,Initial}$)ที่ใช้ในการทดลองหรืออุณหภูมิห้อง($T_{6,Initial}$) เท่ากับ 25°C และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (T_6) เท่ากับ 150 $^{\circ}$C

มวลของ $m_{m,washed}$เท่ากับ ผลรวมระหว่าง $m_{m,final}$ และ $m_{Water,remained}$ที่ได้จากการทดลอง

อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า ต่อหน่วย (หรือต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง) ; P_E เท่ากับ 3.0493 บาทต่อหน่วย

ตารางที่ ซ-14 แสดงค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง(STEP6)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น

				STEP 6 Drying Process ; n = 6 “ต้มไล่น้ำในเมทิลเอสเตอร์ผลผลิตที่ได้ในการผลิตไบโอดีเซล”								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยของมวลเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการล้างน้ำ ($m_{m,washed}$;Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_6)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_6 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_6)			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_6; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_6;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E6}; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
0.512	30	30	15	0.237	125	55.029	30.5	1,860	0.52	0.02959	0.0153	**0.0466**
			25	0.249	125	57.823	30.0	1,740	0.48	0.03323	0.0161	**0.0490**
		60	15	0.223	125	51.846	28.5	1,680	0.47	0.03086	0.0144	**0.0439**
			25	0.241	125	56.080	30.0	1,680	0.47	0.03338	0.0156	**0.0475**
			50	0.250	125	58.093	29.0	1,680	0.47	0.03458	0.0161	**0.0492**
		120	25	0.232	125	54.039	28.0	1,620	0.45	0.03336	0.0150	**0.0458**
			50	0.254	125	58.992	28.5	1,860	0.52	0.03172	0.0164	**0.0500**

หมายเหตุ : อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{n,Initial}$)ที่ใช้ในการทดลองหรืออุณหภูมิห้อง($T_{6,Initial}$) เท่ากับ 25°C และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (T_6) เท่ากับ 150 $^{\circ}$C

มวลของ $m_{m,washed}$เท่ากับ ผลรวมระหว่าง $m_{m,final}$ และ $m_{Water,remained}$ที่ได้จากการทดลอง

อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า ต่อหน่วย (หรือต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง) ; P_E เท่ากับ 3.0493 บาทต่อหน่วย

ตารางที่ ซ-14 แสดงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง(STEP6) โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.512%FFAเป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

				STEP 6 Drying Process ; n = 6 “ต้มไล่น้ำในเมทิลเอสเตอร์ผลผลิตที่ได้ในการผลิตไบโอดีเซล”								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยของมวลเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการล้างน้ำ ($m_{m,washed}$;Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_6)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_6 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_6)			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_6; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_6;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E6}; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
0.512	45	30	15	0.208	125	48.307	27.0	1,680	0.47	0.02875	0.0134	**0.0409**
			25	0.232	125	54.072	30.5	1,980	0.55	0.02731	0.0150	**0.0458**
		60	15	0.203	125	47.152	27.5	1,800	0.50	0.02620	0.0131	**0.0399**
			25	0.220	125	51.150	27.5	1,440	0.40	0.03552	0.0142	**0.0433**
	60	30	15	0.253	125	58.895	29.0	1,740	0.48	0.03385	0.0164	**0.0499**
			25	0.273	125	63.409	31.0	1,800	0.50	0.03523	0.0176	**0.0537**
		60	15	0.237	125	55.147	27.5	1,500	0.42	0.03676	0.0153	**0.0467**
			25	0.258	125	59.967	32.5	1,920	0.53	0.03123	0.0167	**0.0508**

หมายเหตุ : อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{n,Initial}$)ที่ใช้ในการทดลองหรืออุณหภูมิห้อง($T_{6,Initial}$) เท่ากับ 25°C และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (T_6) เท่ากับ 150 $^{\circ}$C

มวลของ $m_{m,washed}$เท่ากับ ผลรวมระหว่าง $m_{m,final}$ และ $m_{Water,remained}$ที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ ซ-15 แสดงค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง(STEP6)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น

				STEP 6 Drying Process ; n = 6 “ต้มไล่น้ำในเมทิลเอสเตอร์ผลผลิตที่ได้ในการผลิตไบโอดีเซล”								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยของมวลเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการล้างน้ำ ($m_{m,washed}$;Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_6)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_6 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_6)			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_6; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_6;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E6}; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
0.630	30	30	15	0.231	125	53.815	31.0	1,620	0.45	0.03322	0.0149	**0.0456**
			25	0.245	125	57.041	28.5	1,680	0.47	0.03395	0.0158	**0.0483**
		60	15	0.214	125	49.678	28.0	1,560	0.43	0.03184	0.0138	**0.0421**
			25	0.243	125	56.518	30.0	1,920	0.53	0.02944	0.0157	**0.0479**
			50	0.247	125	57.496	29.0	1,680	0.47	0.03422	0.0160	**0.0487**
		120	25	0.231	125	53.625	26.0	1,500	0.42	0.03575	0.0149	**0.0454**
			50	0.246	125	57.295	26.5	1,620	0.45	0.03537	0.0159	**0.0485**

หมายเหตุ : อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{n,Initial}$)ที่ใช้ในการทดลองหรืออุณหภูมิห้อง($T_{6,Initial}$) เท่ากับ 25°C และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (T_6) เท่ากับ 150 $^{\circ}$C

มวลของ $m_{m,washed}$เท่ากับ ผลรวมระหว่าง $m_{m,final}$ และ $m_{Water,remained}$ที่ได้จากการทดลอง

อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า ต่อหน่วย (หรือต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง) ; P_E เท่ากับ 3.0493 บาทต่อหน่วย

ตารางที่ ซ-15 แสดงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง(STEP6) โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ0.630%FFAเป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

				STEP 6 Drying Process ; n = 6 “ต้มไล่น้ำในเมทิลเอสเตอร์ผลผลิตที่ได้ในการผลิตไบโอดีเซล”								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยของมวลเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการล้างน้ำ ($m_{m,washed}$;Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_6)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_6 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_6)			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_6; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_6;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E6}; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
0.630	45	30	15	0.207	125	48.181	29.5	1,680	0.47	0.02868	0.0134	**0.0408**
			25	0.232	125	53.930	35.0	2,220	0.62	0.02429	0.0150	**0.0457**
		60	15	0.198	125	46.069	26.0	1,500	0.42	0.03071	0.0128	**0.0390**
			25	0.216	125	50.338	33.0	1,740	0.48	0.02893	0.0140	**0.0426**
	60	30	15	0.253	125	58.821	31.0	1,860	0.52	0.03162	0.0163	**1.6716**
			25	0.277	125	64.356	30.5	1,980	0.55	0.03250	0.0179	**0.0545**
		60	15	0.233	125	54.250	30.0	1,680	0.47	0.03229	0.0151	**0.0460**
			25	0.254	125	59.149	34.0	1,800	0.50	0.03286	0.0164	**0.0501**

หมายเหตุ : อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{n,Initial}$)ที่ใช้ในการทดลองหรืออุณหภูมิห้อง($T_{6,Initial}$) เท่ากับ 25°C และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (T_6) เท่ากับ 150 $^{\circ}$C

มวลของ $m_{m,washed}$เท่ากับ ผลรวมระหว่าง $m_{m,final}$ และ $m_{Water,remained}$ที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ ซ-16 แสดงค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง(STEP6)สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น

				STEP 6 Drying Process ; n = 6 “ต้มไล่น้ำในเมทิลเอสเตอร์ผลผลิตที่ได้ในการผลิตไบโอดีเซล”								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยของมวลเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการล้างน้ำ ($m_{m,washed}$;Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_6)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_6 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_6)			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_6; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_6;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E6}; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
1.435	30	30	15	0.221	125	51.429	31.5	1,920	0.53	0.02679	0.0143	**0.0436**
			25	0.233	125	54.163	29.5	1,680	0.47	0.03224	0.0150	**0.0459**
		60	15	0.214	125	49.711	25.5	1,620	0.45	0.03069	0.0138	**0.0421**
			25	0.227	125	52.907	35.0	1,920	0.53	0.02756	0.0147	**0.0448**
			50	0.231	125	53.702	26.5	1,500	0.42	0.03580	0.0149	**0.0455**
		120	25	0.222	125	51.727	26.5	1,560	0.43	0.03316	0.0144	**0.0438**
			50	0.239	125	55.582	26.0	1,620	0.45	0.03431	0.0154	**0.0471**

หมายเหตุ : อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{n,Initial}$)ที่ใช้ในการทดลองหรืออุณหภูมิห้อง($T_{6,Initial}$) เท่ากับ 25°C และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (T_6) เท่ากับ 150 $^{\circ}$C

มวลของ $m_{m,washed}$เท่ากับ ผลรวมระหว่าง $m_{m,final}$ และ $m_{Water,remained}$ที่ได้จากการทดลอง

อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า ต่อหน่วย (หรือต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง) ; P_E เท่ากับ 3.0493 บาทต่อหน่วย

ตารางที่ ซ-16 แสดงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง(STEP6) โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ1.435%FFAเป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

				STEP 6 Drying Process ; n = 6 “ต้มไล่น้ำในเมทิลเอสเตอร์ผลผลิตที่ได้ในการผลิตไบโอดีเซล”								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยของมวลเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการล้างน้ำ ($m_{m,washed}$;Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_6)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_6 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_6)			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_6; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_6;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E6}; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
1.435	45	30	15	0.206	125	47.883	29.5	1,680	0.47	0.02850	0.0133	**0.0406**
			25	0.224	125	52.003	31.0	1,800	0.50	0.02889	0.0144	**0.0440**
			50	0.220	125	51.231	28.0	1,800	0.50	0.02846	0.0142	**0.0434**
		60	15	0.168	125	39.124	29.0	2,040	0.57	0.01918	0.0109	**0.0331**
			25	0.213	125	49.546	30.5	1,740	0.48	0.02847	0.0138	**0.0420**
			50	0.222	125	51.693	30.0	1,860	0.52	0.02779	0.0144	**0.0438**
		120	15	0.168	125	38.977	26.5	1,500	0.42	0.02598	0.0108	**0.0330**
			25	0.207	125	48.099	27.5	1,620	0.45	0.02969	0.0134	**0.0407**
			50	0.212	125	49.235	30.5	1,800	0.50	0.02735	0.0137	**0.0417**

หมายเหตุ : มวลของ $m_{m,washed}$เท่ากับ ผลรวมระหว่าง $m_{m,final}$ และ $m_{Water,remained}$ที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ ซ-16 แสดงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง(STEP6)โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น(ต่อ)

				STEP 6 Drying Process ; n = 6 “ต้มไล่น้ำในเมทิลเอสเตอร์ผลผลิตที่ได้ในการผลิตไบโอดีเซล”								
%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}$C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าเฉลี่ยของมวลเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการล้างน้ำ ($m_{m,washed}$;Kg)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (ΔT_6)	พลังงานความร้อนที่เกิด (Q_6 ; kJ)	ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลอง (t_6)			กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (P_6; kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (W_6;kWh)	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำการทดลอง (Z_{E6}; บาท)
							นาที	วินาที	ชั่วโมง			
1.435	60	30	15	0.234	125	54.524	31.0	1,860	0.52	0.02931	0.0151	**0.0462**
			25	0.255	125	59.423	30.0	1,920	0.53	0.03095	0.0165	**0.0503**
		60	15	0.232	125	53.973	31.0	1,920	0.53	0.02811	0.0150	**0.0457**
			25	0.242	125	56.367	29.0	1,680	0.47	0.03355	0.0157	**0.0477**
			50	0.249	125	57.842	28.0	1,560	0.43	0.03708	0.0161	**0.0490**
		120	25	0.235	125	54.632	28.5	1,800	0.50	0.03035	0.0152	**0.0463**

หมายเหตุ : อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{n,Initial}$)ที่ใช้ในการทดลองหรืออุณหภูมิห้อง($T_{6,Initial}$) เท่ากับ 25°C และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (T_6) เท่ากับ 150 $^{\circ}$C

มวลของ $m_{m,washed}$เท่ากับ ผลรวมระหว่าง $m_{m,final}$ และ $m_{Water,remained}$ที่ได้จากการทดลอง

อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า ต่อหน่วย (หรือต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง) ; P_E เท่ากับ 3.0493 บาทต่อหน่วย

ตารางที่ ซ-17 แสดงปริมาณพลังงานที่ใช้รวมทั้งหมดในการทดลอง และพลังงานรวมเฉพาะ STEP ที่ 3 และ 4 สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	พลังงานความร้อนที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน (กิโลจูล ; kJ.)				พลังงานความร้อนรวมที่เกิดขึ้นทั้งระบบ (Q_{Total} ; kJ.)	พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นใน STEP 3 และ 4 (Q_{Diff} ; kJ.)
				Q_2	Q_3	Q_4	Q_6		
0.427	30	30	15	102.352	2.492	2.849	55.151	**162.844**	**5.342**
			25	102.450	2.510	3.076	59.089	**167.126**	**5.586**
		60	15	102.663	2.487	2.848	52.771	**160.768**	**5.334**
			25	102.179	2.505	3.073	56.317	**164.074**	**5.578**
			50	102.090	2.517	3.629	59.630	**167.866**	**6.146**
		120	25	102.302	2.536	3.111	56.183	**164.132**	**5.647**
			50	102.104	2.501	3.617	60.469	**168.690**	**6.117**

หมายเหตุ : การวิเคราะห์ผลทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลองนั้น ในงานวิจัยนี้จะเลือกคิดเฉพาะพลังงานที่ใช้ใน STEP 3 และ 4 เท่านั้น แทนด้วย Q_{Diff} (หน่วย กิโลจูล ; kJ.) เนื่องจากพลังงานที่ใช้ใน STEP 2 และ 6 นั้นสำหรับทุกสภาวะการทดลองใดๆ ใช้พลังงานที่ใกล้เคียงกันในแต่ละ STEP ตามลำดับ

ตารางที่ ซ-17 แสดงปริมาณพลังงานที่ใช้รวมทั้งหมดในการทดลอง และพลังงานรวมเฉพาะ STEP ที่ 3 และ 4 สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	พลังงานความร้อนที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน (กิโลจูล ; kJ.)				พลังงานความร้อนรวมที่เกิดขึ้นทั้งระบบ (Q_{Total} ; kJ.)	พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นใน STEP 3 และ 4 (Q_{Diff} ; kJ.)
				Q_2	Q_3	Q_4	Q_6		
0.427	45	30	15	101.667	10.023	11.447	49.613	**172.750**	**21.470**
			25	101.657	9.965	12.283	54.452	**178.357**	**22.248**
			50	102.162	10.027	14.483	55.272	**181.944**	**24.510**
		60	15	102.016	10.069	11.520	49.345	**172.950**	**21.589**
			25	102.069	9.903	12.221	51.855	**176.048**	**22.124**
			50	102.198	10.002	14.461	54.670	**181.331**	**24.463**
		120	15	102.070	10.025	11.456	47.089	**170.640**	**21.481**
			25	101.659	10.063	12.357	50.743	**174.823**	**22.421**
			50	102.149	10.041	14.485	52.314	**178.989**	**24.526**

หมายเหตุ : การวิเคราะห์ผลทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลองนั้น ในงานวิจัยนี้จะเลือกคิดเฉพาะพลังงานที่ใช้ใน STEP 3 และ 4 เท่านั้น แทนด้วย Q_{Diff} (หน่วย กิโลจูล ; kJ.) เนื่องจากพลังงานที่ใช้ใน STEP 2 และ 6 นั้นสำหรับทุกสภาวะการทดลองใดๆ ใช้พลังงานที่ใกล้เคียงกันในแต่ละ STEP ตามลำดับ

ตารางที่ ซ-17 แสดงปริมาณพลังงานที่ใช้รวมทั้งหมดในการทดลอง และพลังงานรวมเฉพาะ STEP ที่ 3 และ 4 สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	พลังงานความร้อนที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน (กิโลจูล ; kJ.)				พลังงานความร้อนรวมที่เกิดขึ้นทั้งระบบ (Q_{Total} ; kJ.)	พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นใน STEP 3 และ 4 (Q_{Diff} ; kJ.)
				Q_2	Q_3	Q_4	Q_6		
0.427	60	30	15	102.308	17.427	19.925	62.795	**202.456**	**37.353**
			25	102.333	17.769	21.805	65.360	**207.267**	**39.574**
		60	15	102.062	17.605	20.136	60.130	**199.932**	**37.740**
			25	102.785	17.710	21.758	64.526	**206.779**	**39.468**
			50	102.252	17.528	25.310	63.229	**208.320**	**42.838**
		120	25	102.261	17.583	21.597	62.054	**203.495**	**39.181**

หมายเหตุ : การวิเคราะห์ผลทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลองนั้น ในงานวิจัยนี้จะเลือกคิดเฉพาะพลังงานที่ใช้ใน STEP 3 และ 4 เท่านั้น แทนด้วย Q_{Diff} (หน่วย กิโลจูล ; kJ.) เนื่องจากพลังงานที่ใช้ใน STEP 2 และ 6 นั้นสำหรับทุกสภาวะการทดลองใดๆ ใช้พลังงานที่ใกล้เคียงกันในแต่ละ STEP ตามลำดับ

ตารางที่ ซ-18 แสดงปริมาณพลังงานที่ใช้รวมทั้งหมดในการทดลอง และพลังงานรวมเฉพาะ STEP ที่ 3 และ 4 สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	พลังงานความร้อนที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน (กิโลจูล ; kJ.)				พลังงานความร้อนรวมที่เกิดขึ้นทั้งระบบ (Q_{Total} ; kJ.)	พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นใน STEP 3 และ 4 (Q_{Diff} ; kJ.)
				Q_2	Q_3	Q_4	Q_6		
0.512	30	30	15	102.573	2.514	2.878	55.029	**162.994**	**5.392**
			25	102.694	2.511	3.084	57.823	**166.111**	**5.595**
		60	15	101.980	2.534	2.892	51.846	**159.251**	**5.425**
			25	102.011	2.501	3.073	56.080	**163.665**	**5.574**
			50	102.380	2.504	3.616	58.093	**166.593**	**6.120**
		120	25	102.177	2.494	3.066	54.039	**161.776**	**5.560**
			50	102.360	2.529	3.644	58.992	**167.525**	**6.173**

หมายเหตุ : การวิเคราะห์ผลทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลองนั้น ในงานวิจัยนี้จะเลือกคิดเฉพาะพลังงานที่ใช้ใน STEP 3 และ 4 เท่านั้น แทนด้วย Q_{Diff} (หน่วย กิโลจูล ; kJ.) เนื่องจากพลังงานที่ใช้ใน STEP 2 และ 6 นั้นสำหรับทุกสภาวะการทดลองใดๆ ใช้พลังงานที่ใกล้เคียงกันในแต่ละ STEP ตามลำดับ

ตารางที่ ซ-18 แสดงปริมาณพลังงานที่ใช้รวมทั้งหมดในการทดลอง และพลังงานรวมเฉพาะ STEP ที่ 3 และ 4 สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	พลังงานความร้อนที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน (กิโลจูล ; kJ.)				พลังงานความร้อนรวมที่เกิดขึ้นทั้งระบบ (Q_{Total} ; kJ.)	พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นใน STEP 3 และ 4 (Q_{Diff} ; kJ.)
				Q_2	Q_3	Q_4	Q_6		
0.512	45	30	15	102.184	10.080	11.527	48.307	**172.098**	**21.606**
			25	102.041	9.954	12.250	54.072	**178.316**	**22.203**
		60	15	101.354	10.104	11.540	47.152	**170.151**	**21.645**
			25	102.814	10.130	12.417	51.150	**176.511**	**22.547**
	60	30	15	101.815	17.626	20.157	58.895	**198.493**	**37.783**
			50	102.433	17.443	21.483	63.409	**204.769**	**38.927**
		60	15	102.435	17.488	20.026	55.147	**195.095**	**37.513**
			50	102.624	17.419	21.463	59.967	**201.472**	**38.882**

หมายเหตุ : การวิเคราะห์ผลทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลองนั้น ในงานวิจัยนี้จะเลือกคิดเฉพาะพลังงานที่ใช้ใน STEP 3 และ 4 เท่านั้น แทนด้วย Q_{Diff} (หน่วย กิโลจูล ; kJ.) เนื่องจากพลังงานที่ใช้ใน STEP 2 และ 6 นั้นสำหรับทุกสภาวะการทดลองใดๆ ใช้พลังงานที่ใกล้เคียงกันในแต่ละ STEP ตามลำดับ

ตารางที่ ซ-19 แสดงปริมาณพลังงานที่ใช้รวมทั้งหมดในการทดลอง และพลังงานรวมเฉพาะ STEP ที่ 3 และ 4 สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	พลังงานความร้อนที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน (กิโลจูล ; kJ.)				พลังงานความร้อนรวมที่เกิดขึ้นทั้งระบบ (Q_{Total} ; kJ.)	พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นใน STEP 3 และ 4 (Q_{Diff} ; kJ.)
				Q_2	Q_3	Q_4	Q_6		
0.630	30	30	15	102.498	2.496	2.858	53.815	161.667	5.354
			25	102.742	2.514	3.083	57.041	165.381	5.597
		60	15	102.119	2.463	2.822	49.678	157.082	5.285
			25	102.322	2.532	3.106	56.518	164.477	5.638
			50	102.136	2.535	3.649	57.496	165.816	6.184
		120	25	102.394	2.526	3.100	53.625	161.646	5.627
			50	102.420	2.482	3.592	57.295	165.789	6.074

หมายเหตุ : การวิเคราะห์ผลทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลองนั้น ในงานวิจัยนี้จะเลือกคิดเฉพาะพลังงานที่ใช้ใน STEP 3 และ 4 เท่านั้น แทนด้วย Q_{Diff} (หน่วย กิโลจูล ; kJ.) เนื่องจากพลังงานที่ใช้ใน STEP 2 และ 6 นั้นสำหรับทุกสภาวะการทดลองใดๆ ใช้พลังงานที่ใกล้เคียงกันในแต่ละ STEP ตามลำดับ

ตารางที่ ซ-19 แสดงปริมาณพลังงานที่ใช้รวมทั้งหมดในการทดลอง และพลังงานรวมเฉพาะ STEP ที่ 3 และ 4 สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	พลังงานความร้อนที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน (กิโลจูล ; kJ.)				พลังงานความร้อนรวมที่เกิดขึ้นทั้งระบบ (Q_{Total} ; kJ.)	พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นใน STEP 3 และ 4 (Q_{Diff} ; kJ.)
				Q_2	Q_3	Q_4	Q_6		
0.630	45	30	15	101.530	9.940	11.372	48.181	**171.023**	**21.312**
			25	102.208	10.071	12.373	53.930	**178.582**	**22.444**
		60	15	102.461	10.140	11.588	46.069	**170.258**	**21.728**
			25	101.489	10.052	12.345	50.338	**174.224**	**22.397**
	60	30	15	102.221	17.683	20.221	58.821	**198.945**	**37.903**
			50	102.112	17.811	21.858	64.356	**206.137**	**39.669**
		60	15	102.493	17.459	19.950	54.250	**194.152**	**37.409**
			50	102.451	17.469	21.503	59.149	**200.571**	**38.972**

หมายเหตุ : การวิเคราะห์ผลทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลองนั้น ในงานวิจัยนี้จะเลือกคิดเฉพาะพลังงานที่ใช้ใน STEP 3 และ 4 เท่านั้น แทนด้วย Q_{Diff} (หน่วย กิโลจูล ; kJ.) เนื่องจากพลังงานที่ใช้ใน STEP 2 และ 6 นั้นสำหรับทุกสภาวะการทดลองใดๆ ใช้พลังงานที่ใกล้เคียงกันในแต่ละ STEP ตามลำดับ

ตารางที่ ซ-20 แสดงปริมาณพลังงานที่ใช้รวมทั้งหมดในการทดลอง และพลังงานรวมเฉพาะ STEP ที่ 3 และ 4 สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	พลังงานความร้อนที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน (กิโลจูล ; kJ.)				พลังงานความร้อนรวมที่เกิดขึ้นทั้งระบบ (Q_{Total} ; kJ.)	พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นใน STEP 3 และ 4 (Q_{Diff} ; kJ.)
				Q_2	Q_3	Q_4	Q_6		
1.435	30	30	15	102.092	2.499	2.857	51.429	**158.878**	**5.356**
			25	102.561	2.508	3.083	54.163	**162.315**	**5.591**
		60	15	102.425	2.545	2.907	49.711	**157.589**	**5.452**
			25	102.139	2.496	3.066	52.907	**160.607**	**5.562**
			50	102.141	2.494	3.609	53.702	**161.946**	**6.104**
		120	25	102.710	2.545	3.121	51.727	**160.103**	**5.666**
			50	102.204	2.505	3.616	55.582	**163.907**	**6.121**

หมายเหตุ : การวิเคราะห์ผลทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลองนั้น ในงานวิจัยนี้จะเลือกคิดเฉพาะพลังงานที่ใช้ใน STEP 3 และ 4 เท่านั้น แทนด้วย Q_{Diff} (หน่วย กิโลจูล ; kJ.) เนื่องจากพลังงานที่ใช้ใน STEP 2 และ 6 นั้นสำหรับทุกสภาวะการทดลองใดๆ ใช้พลังงานที่ใกล้เคียงกันในแต่ละ STEP ตามลำดับ

ตารางที่ ซ-20 แสดงปริมาณพลังงานที่ใช้รวมทั้งหมดในการทดลอง และพลังงานรวมเฉพาะ STEP ที่ 3 และ 4 สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	พลังงานความร้อนที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน (กิโลจูล ; kJ.)				พลังงานความร้อนรวมที่เกิดขึ้นทั้งระบบ (Q_{Total} ; kJ.)	พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นใน STEP 3 และ 4 (Q_{Diff} ; kJ.)
				Q_2	Q_3	Q_4	Q_6		
1.435	45	30	15	101.650	10.098	11.532	47.883	**171.163**	**21.630**
			25	101.694	10.211	12.502	52.003	**176.409**	**22.713**
			50	102.262	10.059	14.531	51.231	**178.084**	**24.590**
		60	15	101.583	9.980	11.404	39.124	**162.091**	**21.384**
			25	101.656	9.963	12.251	49.546	**173.417**	**22.214**
			50	102.102	10.012	14.462	51.693	**178.268**	**24.474**
		120	15	102.235	10.066	11.511	38.977	**162.789**	**21.577**
			25	102.259	10.063	12.369	48.099	**172.791**	**22.432**
			50	102.099	10.004	14.475	49.235	**175.813**	**24.479**

หมายเหตุ : การวิเคราะห์ผลทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลองนั้น ในงานวิจัยนี้จะเลือกคิดเฉพาะพลังงานที่ใช้ใน STEP 3 และ 4 เท่านั้น แทนด้วย Q_{Diff} (หน่วย กิโลจูล ; kJ.) เนื่องจากพลังงานที่ใช้ใน STEP 2 และ 6 นั้นสำหรับทุกสภาวะการทดลองใดๆ ใช้พลังงานที่ใกล้เคียงกันในแต่ละ STEP ตามลำดับ

ตารางที่ ซ-20 แสดงปริมาณพลังงานที่ใช้รวมทั้งหมดในการทดลอง และพลังงานรวมเฉพาะ STEP ที่ 3 และ 4 สำหรับน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	พลังงานความร้อนที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน (กิโลจูล ; kJ.)				พลังงานความร้อนรวมที่เกิดขึ้นทั้งระบบ (Q_{Total} ; kJ.)	พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นใน STEP 3 และ 4 (Q_{Diff} ; kJ.)
				Q_2	Q_3	Q_4	Q_6		
1.435	60	30	15	101.687	17.403	19.897	54.524	**193.511**	**37.300**
			25	102.093	17.550	21.575	59.423	**200.641**	**39.125**
		60	15	101.764	17.799	20.329	53.973	**193.865**	**38.128**
			25	101.394	17.395	21.415	56.367	**196.571**	**38.810**
			50	102.235	17.557	25.368	57.842	**203.002**	**42.925**
		120	25	102.085	17.629	21.633	54.632	**195.979**	**39.261**

หมายเหตุ : การวิเคราะห์ผลทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลองนั้น ในงานวิจัยนี้จะเลือกคิดเฉพาะพลังงานที่ใช้ใน STEP 3 และ 4 เท่านั้น แทนด้วย Q_{Diff} (หน่วย กิโลจูล ; kJ.) เนื่องจากพลังงานที่ใช้ใน STEP 2 และ 6 นั้นสำหรับทุกสภาวะการทดลองใดๆ ใช้พลังงานที่ใกล้เคียงกันในแต่ละ STEP ตามลำดับ

ตารางที่ ซ-21 แสดงค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดด้านพลังงานที่ใช้และค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (บาท)				ค่าใช้จ่ายรวม ด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลองต่อ Batch (Z_{Energy}หรือ Z_2; บาท)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง ต่อ 1 Batch (300 ml.) (Z ; บาท)
				Z_{E2}	Z_{E3}	Z_{E4}	Z_{E6}		
0.427	30	30	15	0.0867	0.0021	0.0024	0.0467	**0.1379**	**22.55**
			25	0.0868	0.0021	0.0026	0.0501	**0.1416**	**28.86**
		60	15	0.0870	0.0021	0.0024	0.0447	**0.1362**	**21.60**
			25	0.0865	0.0021	0.0026	0.0477	**0.1390**	**28.33**
			50	0.0865	0.0021	0.0031	0.0505	**0.1422**	**42.64**
		120	25	0.0867	0.0021	0.0026	0.0476	**0.1390**	**28.08**
			50	0.0865	0.0021	0.0031	0.0512	**0.1429**	**42.96**

ตารางที่ ซ-21 แสดงค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดด้านพลังงานที่ใช้และค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (บาท)				ค่าใช้จ่ายรวม ด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลองต่อ Batch (Z_{Energy}หรือ Z_2; บาท)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง ต่อ 1 Batch (300 ml.) (Z ; บาท)
				Z_{E2}	Z_{E3}	Z_{E4}	Z_{E6}		
0.427	45	30	15	0.0861	0.0085	0.0097	0.0420	**0.1463**	**20.86**
			25	0.0861	0.0084	0.0104	0.0461	**0.1511**	**27.70**
			50	0.0865	0.0085	0.0123	0.0468	**0.1541**	**41.30**
		60	15	0.0864	0.0085	0.0098	0.0418	**0.1465**	**20.54**
			25	0.0865	0.0084	0.0104	0.0439	**0.1491**	**26.67**
			50	0.0866	0.0085	0.0122	0.0463	**0.1536**	**41.07**
		120	15	0.0865	0.0085	0.0097	0.0399	**0.1445**	**19.95**
			25	0.0861	0.0085	0.0105	0.0430	**0.1481**	**26.53**
			50	0.0865	0.0085	0.0123	0.0443	**0.1516**	**40.39**

ตารางที่ ซ-21 แสดงค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดด้านพลังงานที่ใช้และค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.427%FFA เป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (บาท)				ค่าใช้จ่ายรวม ด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลองต่อ Batch (Z_{Energy}หรือ Z_2; บาท)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง ต่อ 1 Batch (300 ml.) (Z ; บาท)
				Z_{E2}	Z_{E3}	Z_{E4}	Z_{E6}		
0.427	60	30	15	0.0867	0.0148	0.0169	0.0532	**0.1715**	**24.24**
			25	0.0867	0.0151	0.0185	0.0554	**0.1756**	**31.76**
		60	15	0.0864	0.0149	0.0171	0.0509	**0.1693**	**23.95**
			25	0.0871	0.0150	0.0184	0.0547	**0.1751**	**30.55**
			50	0.0866	0.0148	0.0214	0.0536	**0.1765**	**43.96**
		120	25	0.0866	0.0149	0.0183	0.0526	**0.1724**	**29.51**

ตารางที่ ซ-22 แสดงค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดด้านพลังงานที่ใช้และค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (บาท)				ค่าใช้จ่ายรวม ด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลองต่อ Batch (Z_{Energy}หรือ Z_2; บาท)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง ต่อ 1 Batch (300 ml.) (Z ; บาท)
				Z_{E2}	Z_{E3}	Z_{E4}	Z_{E6}		
0.512	30	30	15	0.0869	0.0021	0.0024	0.0466	**0.1381**	**22.34**
			25	0.0870	0.0021	0.0026	0.0490	**0.1407**	**28.43**
		60	15	0.0864	0.0021	0.0024	0.0439	**0.1349**	**21.26**
			25	0.0864	0.0021	0.0026	0.0475	**0.1386**	**28.08**
			50	0.0867	0.0021	0.0031	0.0492	**0.1411**	**41.95**
		120	25	0.0865	0.0021	0.0026	0.0458	**0.1370**	**27.42**
			50	0.0867	0.0021	0.0031	0.0500	**0.1419**	**42.55**

ตารางที่ ซ-22 แสดงค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดด้านพลังงานที่ใช้และค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.512%FFA เป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (บาท)				ค่าใช้จ่ายรวม ด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลองต่อ Batch (Z_{Energy}หรือ Z_2; บาท)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง ต่อ 1 Batch (300 ml.) (Z ; บาท)
				Z_{E2}	Z_{E3}	Z_{E4}	Z_{E6}		
0.512	45	30	15	0.0866	0.0085	0.0098	0.0409	**0.1458**	**20.01**
			25	0.0864	0.0084	0.0104	0.0458	**0.1510**	**27.46**
		60	15	0.0858	0.0086	0.0098	0.0399	**0.1441**	**19.70**
			25	0.0871	0.0086	0.0105	0.0433	**0.1495**	**26.15**
	60	30	15	0.0862	0.0149	0.0171	0.0499	**0.1681**	**23.37**
			25	0.0868	0.0148	0.0182	0.0537	**0.1734**	**29.54**
		60	15	0.0868	0.0148	0.0170	0.0467	**0.1653**	**22.27**
			25	0.0869	0.0148	0.0182	0.0508	**0.1707**	**29.26**

ตารางที่ ซ-23 แสดงค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดด้านพลังงานที่ใช้และค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (บาท)				ค่าใช้จ่ายรวม ด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลองต่อ Batch (Z_{Energy}หรือ Z_2; บาท)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง ต่อ 1 Batch (300 ml.) (Z ; บาท)
				Z_{E2}	Z_{E3}	Z_{E4}	Z_{E6}		
0.630	30	30	15	0.0868	0.0021	0.0024	0.0456	**0.1369**	**21.79**
			25	0.0870	0.0021	0.0026	0.0483	**0.1401**	**28.16**
		60	15	0.0865	0.0021	0.0024	0.0421	**0.1331**	**20.85**
			25	0.0867	0.0021	0.0026	0.0479	**0.1393**	**27.79**
			50	0.0865	0.0021	0.0031	0.0487	**0.1405**	**41.81**
		120	25	0.0867	0.0021	0.0026	0.0454	**0.1369**	**27.27**
			50	0.0868	0.0021	0.0030	0.0485	**0.1404**	**42.72**

ตารางที่ ซ-23 แสดงค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดด้านพลังงานที่ใช้และค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.630%FFA เป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (บาท)				ค่าใช้จ่ายรวม ด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลองต่อ Batch (Z_{Energy}หรือ Z_2; บาท)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง ต่อ 1 Batch (300 ml.) (Z ; บาท)
				Z_{E2}	Z_{E3}	Z_{E4}	Z_{E6}		
0.630	45	30	15	0.0860	0.0084	0.0096	0.0408	**0.1449**	**20.12**
			25	0.0866	0.0085	0.0105	0.0457	**0.1513**	**27.00**
		60	15	0.0868	0.0086	0.0098	0.0390	**0.1442**	**19.62**
			25	0.0860	0.0085	0.0105	0.0426	**0.1476**	**26.32**
	60	30	15	0.0866	0.0150	0.0171	1.6716	**1.7903**	**24.77**
			25	0.0865	0.0151	0.0185	0.0545	**0.1746**	**30.10**
		60	15	0.0868	0.0148	0.0169	0.0460	**0.1645**	**21.88**
			25	0.0868	0.0148	0.0182	0.0501	**0.1699**	**29.27**

ตารางที่ ซ-24 แสดงค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดด้านพลังงานที่ใช้และค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (บาท)				ค่าใช้จ่ายรวม ด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลองต่อ Batch (Z_{Energy}หรือ Z_2; บาท)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง ต่อ 1 Batch (300 ml.) (Z ; บาท)
				Z_{E2}	Z_{E3}	Z_{E4}	Z_{E6}		
1.435	30	30	15	0.0865	0.0021	0.0024	0.0436	**0.1346**	**21.10**
			25	0.0869	0.0021	0.0026	0.0459	**0.1375**	**27.18**
		60	15	0.0868	0.0022	0.0025	0.0421	**0.1335**	**20.67**
			25	0.0865	0.0021	0.0026	0.0448	**0.1360**	**26.70**
			50	0.0865	0.0021	0.0031	0.0455	**0.1372**	**40.92**
		120	25	0.0870	0.0022	0.0026	0.0438	**0.1356**	**26.44**
			50	0.0866	0.0021	0.0031	0.0471	**0.1388**	**41.31**

ตารางที่ ซ-24 แสดงค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดด้านพลังงานที่ใช้และค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (บาท)				ค่าใช้จ่ายรวม ด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลองต่อ Batch (Z_{Energy}หรือ Z_2; บาท)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง ต่อ 1 Batch (300 ml.) (Z ; บาท)
				Z_{E2}	Z_{E3}	Z_{E4}	Z_{E6}		
1.435	45	30	15	0.0861	0.0086	0.0098	0.0406	**0.1450**	20.08
			25	0.0861	0.0086	0.0106	0.0440	**0.1494**	26.73
			50	0.0866	0.0085	0.0123	0.0434	**0.1508**	40.24
		60	15	0.0860	0.0085	0.0097	0.0331	**0.1373**	19.37
			25	0.0861	0.0084	0.0104	0.0420	**0.1469**	26.00
			50	0.0865	0.0085	0.0122	0.0438	**0.1510**	40.05
		120	15	0.0866	0.0085	0.0098	0.0330	**0.1379**	19.64
			25	0.0866	0.0085	0.0105	0.0407	**0.1464**	25.72
			50	0.0865	0.0085	0.0123	0.0417	**0.1489**	39.51

ตารางที่ ซ-24 แสดงค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดด้านพลังงานที่ใช้และค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง โดยใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 1.435%FFA เป็นสารตั้งต้น (ต่อ)

%FFA	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลา Time (นาที)	Methanol (%โดยปริมาตร)	ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลอง (บาท)				ค่าใช้จ่ายรวม ด้านพลังงานที่ใช้ในการทดลองต่อ Batch (Z_{Energy}หรือ Z_2; บาท)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง ต่อ 1 Batch (300 ml.) (Z ; บาท)
				Z_{E2}	Z_{E3}	Z_{E4}	Z_{E6}		
1.435	60	30	15	0.0861	0.0147	0.0169	0.0462	**0.1639**	**22.14**
			25	0.0865	0.0149	0.0183	0.0503	**0.1699**	**29.01**
		60	15	0.0862	0.0151	0.0172	0.0457	**0.1642**	**21.71**
			25	0.0859	0.0147	0.0181	0.0477	**0.1665**	**28.04**
			50	0.0866	0.0149	0.0215	0.0490	**0.1719**	**42.86**
		120	25	0.0865	0.0149	0.0183	0.0463	**0.1660**	**27.44**

ภาคผนวก ณ.

การคำนวณหาสมการค่าใช้จ่ายรวมที่ใช้ โดยใช้หลักการทางสถิติเบื้องต้น

Hypothesis Testing

เมื่อทำการทดสอบการกระจายของข้อมูลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในขั้นตอนต่างๆ ทั้งทางด้านมวลของวัตถุดิบทางตรงที่ใช้ในการทดลองและทางด้านพลังงานความร้อนที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน ในการศึกษานี้ สนใจทดสอบการกระจายของพลังงานความร้อนที่ใช้ใน STEP ที่ 2(กระบวนการต้มน้ำมันปาล์มที่ผ่านการกรองแล้วเพื่อทำการไล่น้ำ) และ STEP ที่ 6 (กระบวนการต้มไล่น้ำในเมทิลเอสเตอร์ผลผลิตที่ได้ในการผลิตไบโอดีเซล) เท่านั้น เนื่องจากในขั้นตอนหรือ STEP ที่ 2 และ STEP ที่ 6 สำหรับทุกสภาวะและแต่ละตัวอย่างน้ำมันปาล์มใช้แล้วนั้น (ทั้ง 4 ระดับของปริมาณกรดไขมันอิสระ) ซึ่งมีกระบวนการทดลองใกล้เคียงกันในแต่ละขั้นตอน โดยใช้โปรแกรม Minitab16ช่วยในการวิเคราะห์ผลดังต่อไปนี้

วัตถุดิบทางตรง

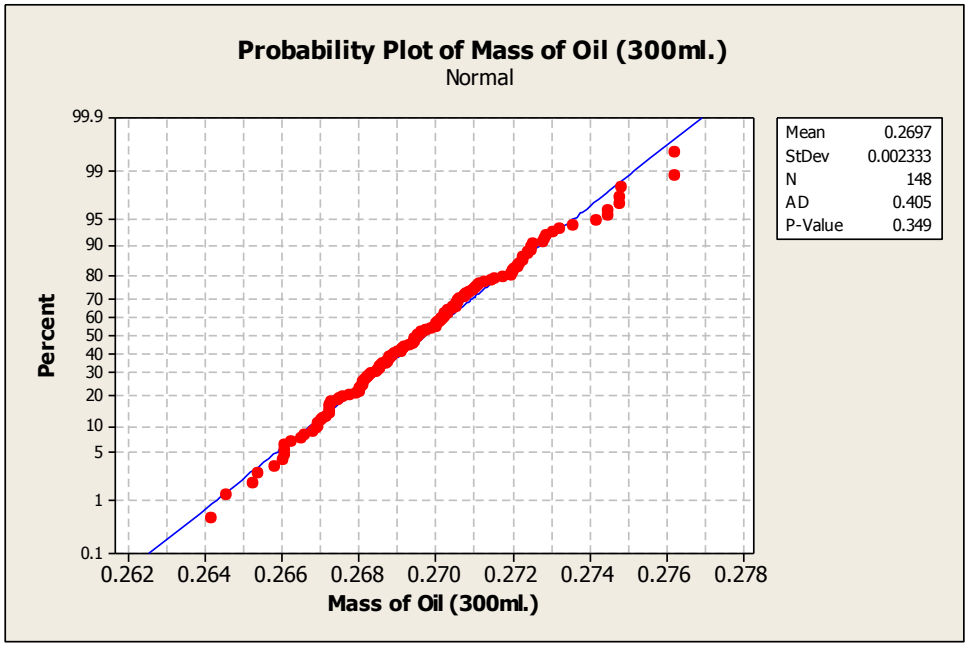
ขั้นตอนที่ 1

ศึกษาการกระจายของข้อมูลสำหรับมวลของน้ำมันปาล์มใช้แล้วเริ่มต้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา โดยมีปริมาตร 300 ml. (m_{Oil}หมายถึง มวลของน้ำมันปาล์มใช้แล้วเริ่มต้น ; หน่วย กิโลกรัม)

1. ทดสอบว่า มวลของน้ำมันปาล์มใช้แล้วเริ่มต้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา โดยมีปริมาตร 300 ml. มีการกระจายตัวแบบปกติ หรือ Normal Distribution หรือไม่
2. กำหนดให้ - m_{Oil} แทน มวลของน้ำมันปาล์มใช้แล้วเริ่มต้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (Kg.)
   - ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ ค่า α = 0.05%
3. Hypothesis Testing

   H_0 : ข้อมูลของ m_{Oil}มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)

   H_1 : ข้อมูลของ m_{Oil}ไม่มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)



รูปที่ ฌ-1 แสดง Probability Plotสำหรับมวลของน้ำมันปาล์มใช้แล้วเริ่มต้นในการทำปฏิกิริยา

จากการวิเคราะห์ Normality Test สำหรับมวลของน้ำมันปาล์มใช้แล้วเริ่มต้นในการทำปฏิกิริยา (ปริมาตร 300ml.) พบว่า ค่า P-Value เท่ากับ 0.349 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 (Do not Reject H_0 or Accept H_0) แสดงว่า ข้อมูลดังกล่าวมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของมวลน้ำมันปาล์มใช้แล้วเริ่มต้นในการทำปฏิกิริยา (ปริมาตร 300ml.) เท่ากับ 0.2697 หรือ 0.270 กิโลกรัม

ขั้นตอนที่ 2

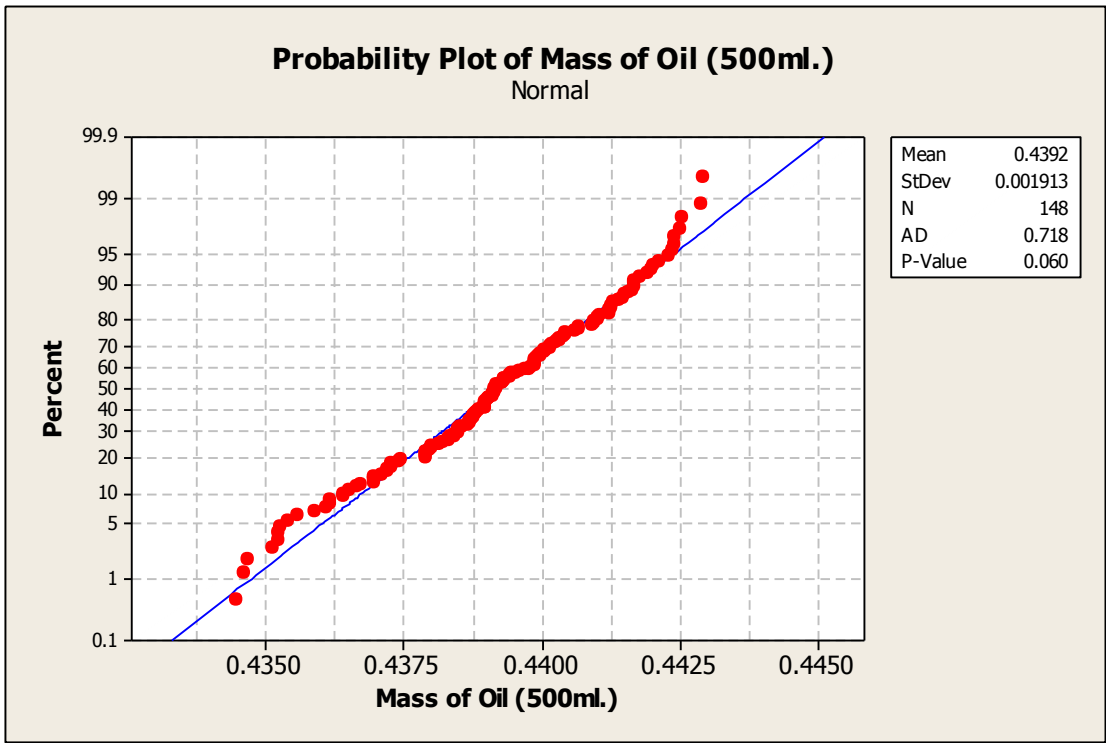
ศึกษาการกระจายของข้อมูลสำหรับมวลของน้ำมันปาล์มใช้แล้วเริ่มต้นที่ใช้ในกระบวนกรองแยก โดยมีปริมาตร 500 ml. ($m_{O,initial}$ หมายถึง มวลของน้ำมันปาล์มใช้แล้วเริ่มต้นที่ใช้ในกระบวนการกรองแยก ; หน่วย กิโลกรัม)

1. ทดสอบว่า การกระจายของข้อมูลสำหรับมวลของน้ำมันปาล์มใช้แล้วเริ่มต้นที่ใช้ในกระบวนการกรองแยก โดยมีปริมาตร 500ml. ($m_{O,initial}$ หมายถึง มวลของน้ำมันปาล์มใช้แล้วเริ่มต้นที่ใช้ในกระบวนการกรองแยก ; หน่วย กิโลกรัม) มีการกระจายตัวแบบปกติ หรือ Normal Distribution หรือไม่
2. กำหนดให้ - $m_{O,initial}$ แทน มวลน้ำมันปาล์มใช้แล้วเริ่มต้นที่ใช้ในกระบวนการกรองแยก (Kg.)
   - ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ ค่า α = 0.05%

3. Hypothesis Testing

H_0 : ข้อมูลของ $m_{O,initial}$มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)

H_1 : ข้อมูลของ $m_{O,initial}$ไม่มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)



รูปที่ ฌ-2 แสดง Probability Plotสำหรับมวลของน้ำมันปาล์มใช้แล้วเริ่มต้นที่ใช้ในกระบวนการกรองแยก

จากการวิเคราะห์ Normality Test สำหรับมวลของน้ำมันปาล์มใช้แล้วเริ่มต้นที่ใช้ในกระบวนการกรองแยก (ปริมาตร 500ml.) พบว่า ค่า P-Value เท่ากับ 0.060 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 (Do not Reject H_0 or Accept H_0) แสดงว่า ข้อมูลดังกล่าวมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของมวลน้ำมันปาล์มใช้แล้วเริ่มต้นที่ใช้ในกระบวนการกรองแยก เท่ากับ 0.4392กิโลกรัม

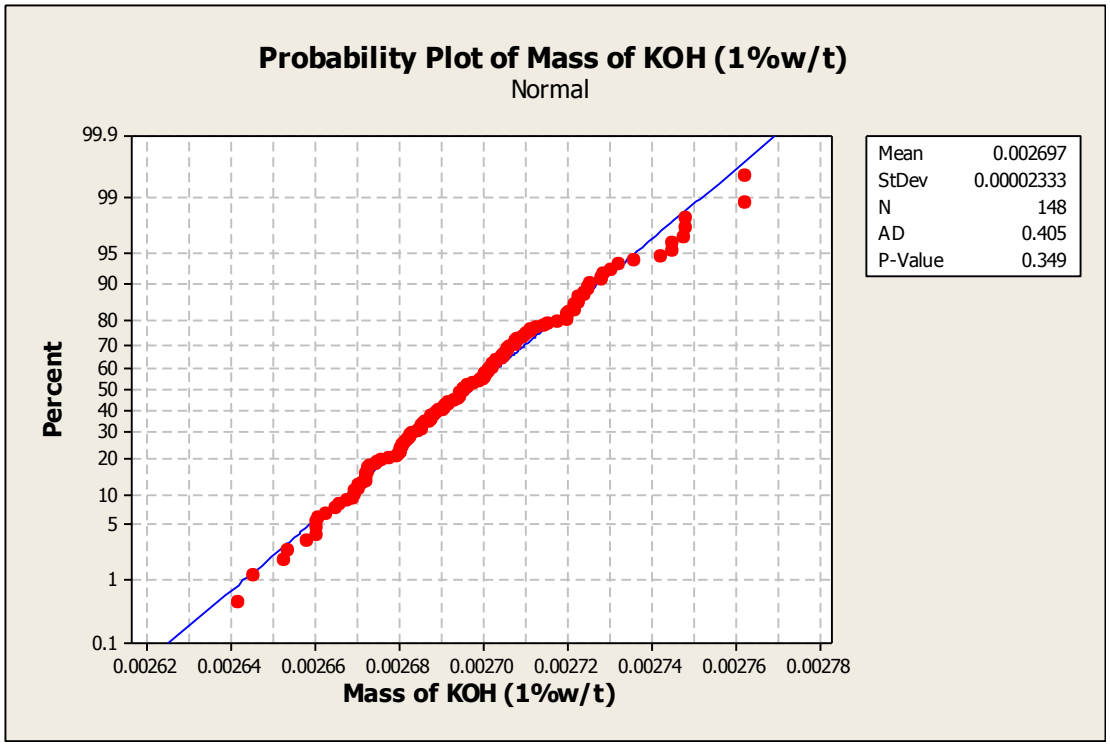
ขั้นตอนที่ 3

ศึกษาการกระจายของข้อมูลสำหรับมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เป็นตัวเร่งในการทำปฏิกิริยา โดยกำหนดปริมาณ 1%โดยมวลของน้ำมันปาล์มใช้แล้วตั้งต้น (1%w/t of Palm Oil)

1. ทดสอบว่า การกระจายของข้อมูลสำหรับมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เป็นตัวเร่งในการทำปฏิกิริยา (Kg.) มีการกระจายตัวแบบปกติ หรือ Normal Distribution หรือไม่
2. <u>กำหนดให้</u> - m_{KOH} แทน มวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นตัวเร่งในการทำปฏิกิริยา (Kg.)
   - ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ ค่า α = 0.05%
3. Hypothesis Testing

   H_0 : ข้อมูลของ m_{KOH} มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)

   H_1 : ข้อมูลของ m_{KOH} ไม่มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)



รูปที่ ณ-3แสดง Probability Plotสำหรับมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

จากการวิเคราะห์ Normality Test สำหรับมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา พบว่า ค่า P-Value เท่ากับ 0.349 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 (Do not Reject H_0 or Accept H_0) แสดงว่า ข้อมูลดังกล่าวมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของมวลโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 0.00270 กิโลกรัม

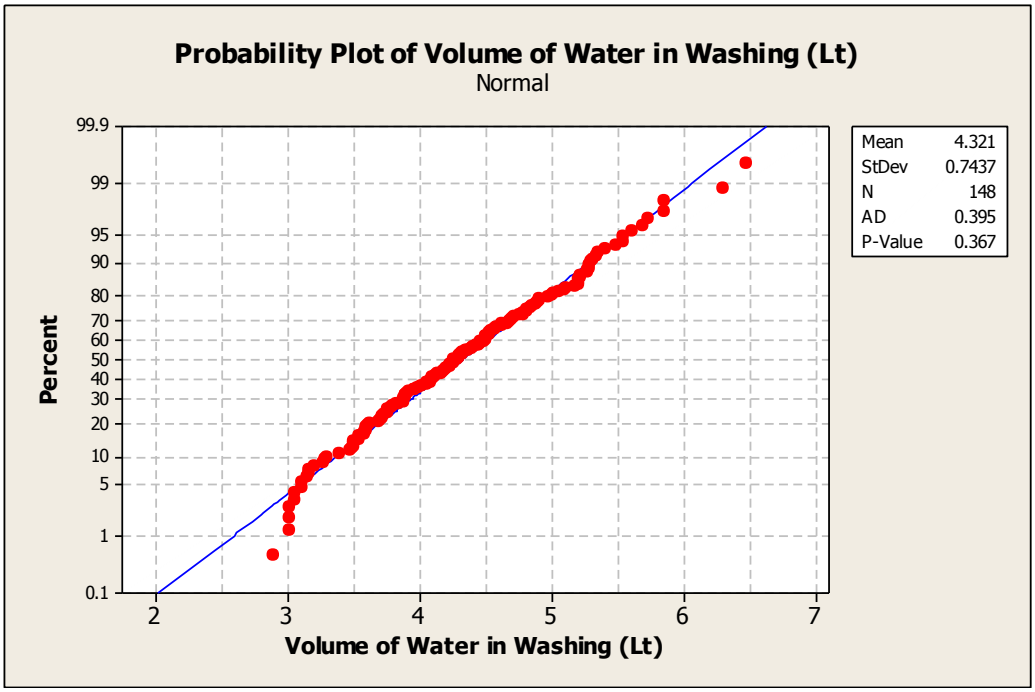
ขั้นตอนที่ 4

ศึกษาการกระจายของข้อมูลสำหรับปริมาตรของน้ำกลั่นที่ใช้ในกระบวนการล้างเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา

1. ทดสอบว่า การกระจายของข้อมูลสำหรับปริมาตรของน้ำกลั่นที่ใช้ในกระบวนการล้างเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา (Lt.) มีการกระจายตัวแบบปกติ หรือ Normal Distribution หรือไม่
2. กำหนดให้ - V_{water} แทน ปริมาตรของน้ำกลั่นที่ใช้ในกระบวนการล้าง (Lt.)
   - ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ ค่า α = 0.05%
3. Hypothesis Testing

   H_0 : ข้อมูลของ V_{water} มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)

   H_1 : ข้อมูลของ V_{water} ไม่มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)



รูปที่ ฌ-4 แสดง Probability Plotของปริมาตรน้ำกลั่นที่ใช้ในกระบวนการล้างเมทิลเอสเตอร์

จากการวิเคราะห์ Normality Test สำหรับปริมาตรของน้ำกลั่นที่ใช้ในกระบวนการล้างเมทิลเอสเตอร์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา (Lt.) พบว่า ค่า P-Value เท่ากับ 0.367 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 (Do not Reject H_0 or Accept H_0) แสดงว่า ข้อมูลดังกล่าวมีการกระจายตัวแบบ

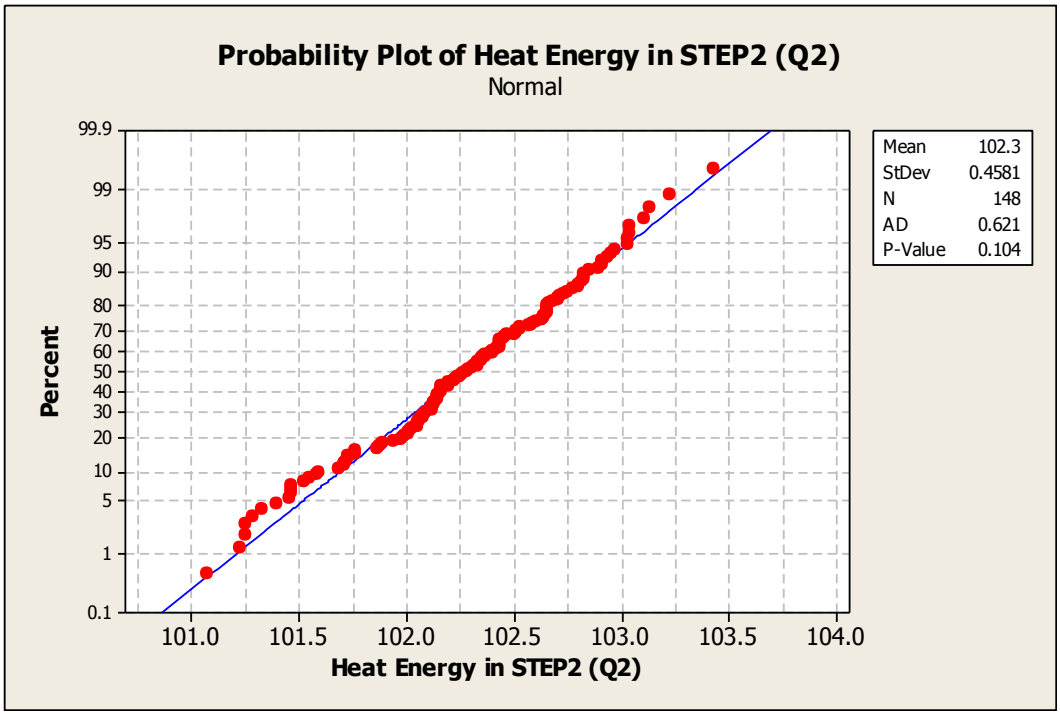
ปกติ (Normal Distribution) ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของปริมาตรของน้ำกลั่นที่ใช้ในกระบวนการล้างเมทิลเอสเตอร์เท่ากับ 4.321 ลิตร

ด้านพลังงาน (คิดเฉพาะพลังงานความร้อนใน STEP 2 และ STEP 6)

ขั้นตอนที่ 5

ศึกษาการกระจายของข้อมูลสำหรับพลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 2 (STEP 2) คือ กระบวนการต้มไล่น้ำในน้ำมันปาล์มซึ่งผ่านการกรองแยกแล้ว(Q_2 หมายถึง พลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 2 ; หน่วย กิโลจูล)

1. ทดสอบว่า การกระจายของข้อมูลสำหรับพลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 2 (kJ.) มีการกระจายตัวแบบปกติ หรือ Normal Distribution หรือไม่
2. กำหนดให้ - Q_2 แทน พลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 2 หรือ STEP 2 (kJ.)
   - ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ ค่า α = 0.05%
3. Hypothesis Testing H_0 : ข้อมูลของ Q_2 มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)
   H_1 : ข้อมูลของ Q_2 ไม่มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)



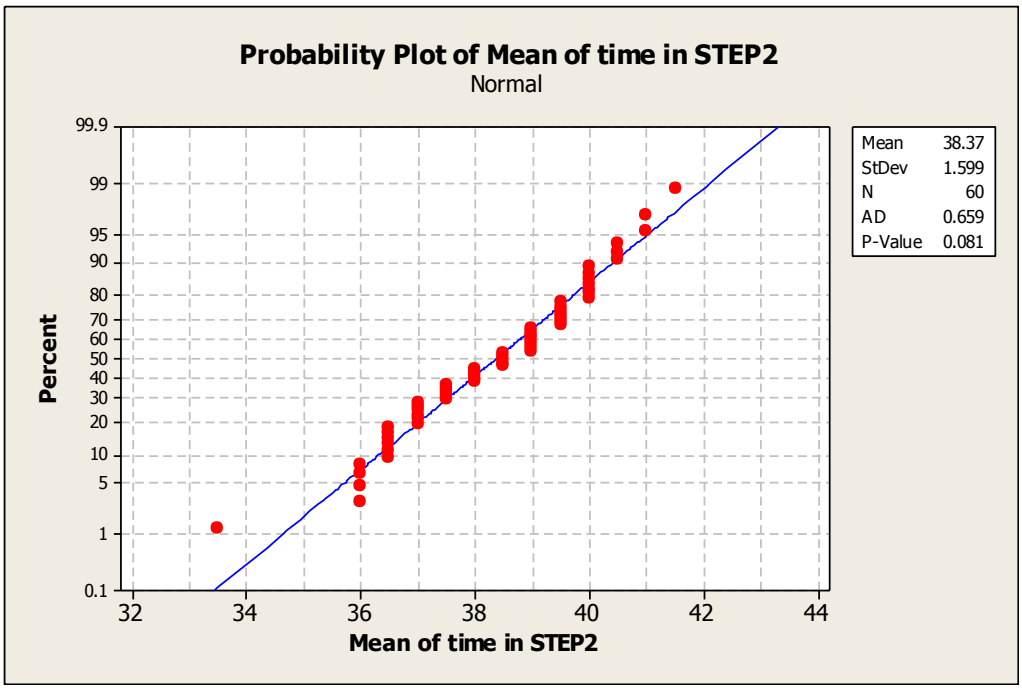
รูปที่ ฌ-5 แสดง Probability Plotสำหรับพลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 2 (kJ.)

จากการวิเคราะห์ Normality Test สำหรับพลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 2 (kJ.) พบว่า ค่า P-Value เท่ากับ 0.104 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 (Do not Reject H_0 or Accept H_0) แสดงว่า ข้อมูลดังกล่าวมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของพลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 2 เท่ากับ 102.3 กิโลจูล (kJ.)

ขั้นตอนที่ 6

ศึกษาการกระจายของข้อมูลสำหรับเวลาที่ใช้ในการทำการทดลองใน STEP 2 (t_2หมายถึง เวลาที่ใช้ในการต้มไล่น้ำในขั้นตอนที่ 2 ; นาที)

1. ทดสอบว่า การกระจายของข้อมูลสำหรับเวลาที่ใช้ในการทำการทดลองใน STEP 2 (t_2 หมายถึง เวลาที่ใช้ในการต้มไล่น้ำในขั้นตอนที่ 2 ; นาที)มีการกระจายตัวแบบปกติ หรือ Normal Distribution หรือไม่
2. กำหนดให้ - μ_{t2} แทน ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการต้มไล่น้ำในขั้นตอนที่ 2 (Mins.)
   - ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ ค่า α = 0.05%
3. Hypothesis Testing H_0 : μ_{t2} มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)
   H_1 : μ_{t2} ไม่มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)



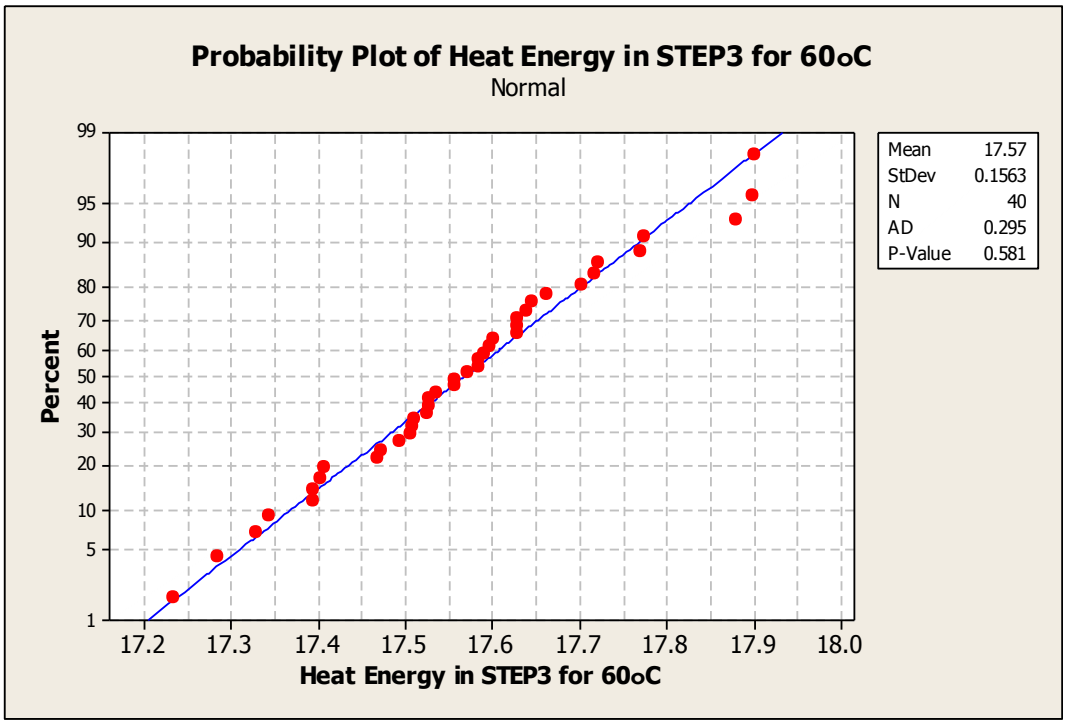
รูปที่ ฌ-6 แสดง Probability Plotสำหรับค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลองใน STEP 2

จากการวิเคราะห์ Normality Test ของเวลาที่ใช้ในการต้มไล่น้ำในขั้นตอนที่ 2 (STEP 2) พบว่า ค่า P-Value เท่ากับ 0.081ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 (Do not Reject H_0 or Accept H_0) แสดงว่า ข้อมูลดังกล่าวมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลองใน STEP 2 เท่ากับ 38.37 นาที(Mins.)

ขั้นตอนที่ 7

ศึกษาการกระจายของข้อมูลสำหรับพลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 3 (STEP 3) ที่ระดับอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส คือ กระบวนการอุ่นน้ำมันเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่กำหนด 60°C ($Q_{3(60^oC)}$ หมายถึง พลังงานความร้อนที่เกิดขั้นตอนที่ 3 ณ ระดับอุณหภูมิ 60°C หน่วย กิโลจูล)

1. ทดสอบว่า การกระจายของข้อมูลสำหรับพลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 3 ณ ระดับอุณหภูมิ 60°C (kJ.) มีการกระจายตัวแบบปกติ หรือ Normal Distribution หรือไม่
2. กำหนดให้ - $Q_{3(60^oC)}$ แทน พลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 3 ณ ที่อุณหภูมิ 60°C (kJ.)
   - ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ ค่า α = 0.05%
3. Hypothesis Testing H_0: ข้อมูลของ $Q_{3(60^oC)}$ มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)
   H_1: ข้อมูลของ$Q_{3(60^oC)}$ไม่มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)



รูปที่ ฌ-7 แสดง Probability Plotของพลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 3 ณ อุณหภูมิ 60°C

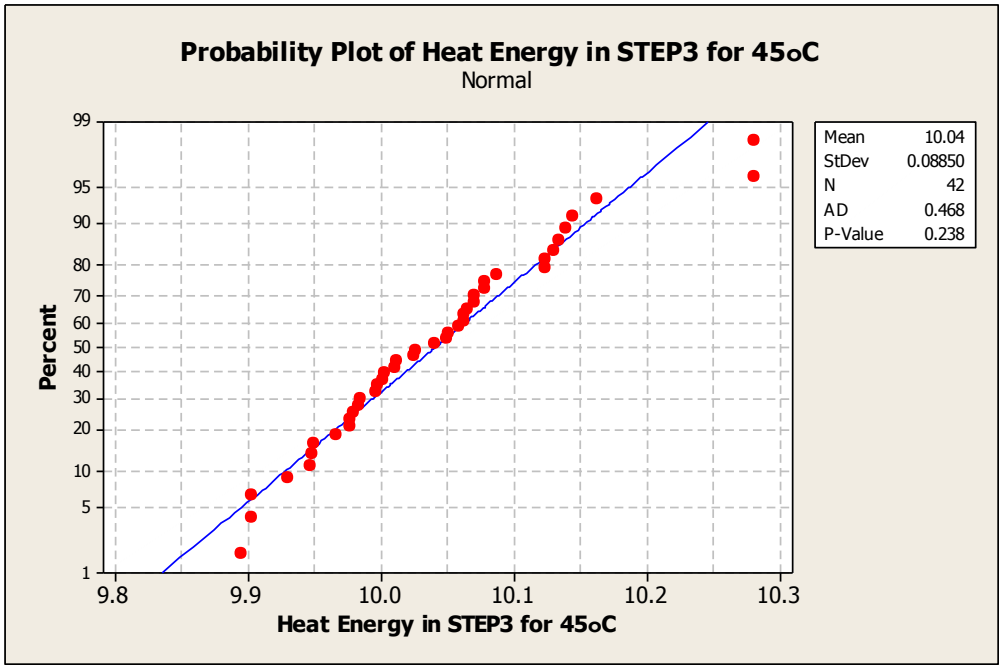
จากการวิเคราะห์ Normality Test สำหรับพลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 3 ณ ระดับอุณหภูมิ 60°C (kJ.) พบว่า ค่า P-Value เท่ากับ 0.581 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 (Do not Reject H_0 or Accept H_0) แสดงว่า ข้อมูลดังกล่าวมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของพลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 3 ณ ระดับอุณหภูมิ 60°C เท่ากับ 17.57กิโลจูล (kJ.)

ขั้นตอนที่ 8

ศึกษาการกระจายของข้อมูลสำหรับพลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 3 (STEP 3) ที่ระดับอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส คือ กระบวนการอุ่นน้ำมันเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่กำหนด 45°C($Q_{3(45^oC)}$ หมายถึง พลังงานความร้อนที่เกิดขั้นตอนที่ 3 ณ ระดับอุณหภูมิ 45°C หน่วย กิโลจูล)

1. ทดสอบว่า การกระจายของข้อมูลสำหรับพลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 3 ณ ระดับอุณหภูมิ 45°C (kJ.) มีการกระจายตัวแบบปกติ หรือ Normal Distribution หรือไม่
2. กำหนดให้ - $Q_{3(45^oC)}$ แทน พลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 3 ณ อุณหภูมิ 45°C (kJ.)
   - ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ ค่า α = 0.05%
3. Hypothesis Testing H_0 : ข้อมูลของ $Q_{3(45^oC)}$ มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)

   H_1 : ข้อมูลของ $Q_{3(45^oC)}$ไม่มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)



รูปที่ ฌ-8 แสดง Probability Plot ของพลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 3 ณ อุณหภูมิ 45°C

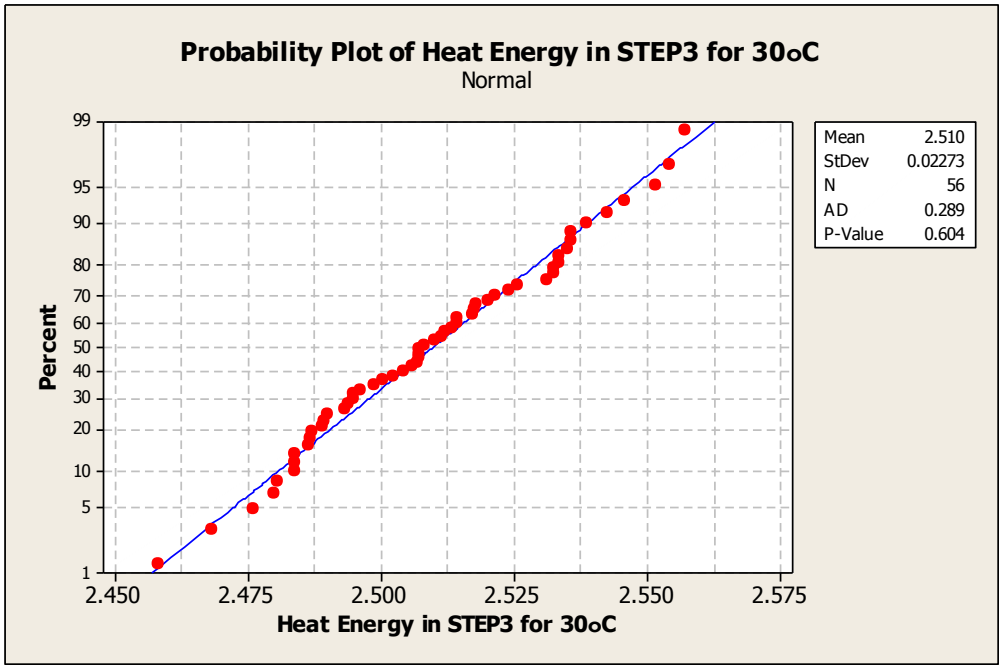
จากการวิเคราะห์ Normality Test สำหรับพลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 3 ณ ระดับอุณหภูมิ 45°C (kJ.) พบว่า ค่า P-Value เท่ากับ 0.238 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 (Do not Reject H_0 or Accept H_0) แสดงว่า ข้อมูลดังกล่าวมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของพลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 3 ณ ระดับอุณหภูมิ 45°C เท่ากับ 10.04กิโลจูล (kJ.)

ขั้นตอนที่ 9

ศึกษาการกระจายของข้อมูลสำหรับพลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 3 (STEP 3) ที่ระดับอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส คือ กระบวนการอุ่นน้ำมันเพื่อให้ได้ระดับอุณหภูมิที่กำหนด 30°C($Q_{3(30^oC)}$ หมายถึง พลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 3 ณ อุณหภูมิ 30°C; หน่วย กิโลจูล)

1. ทดสอบว่า การกระจายของข้อมูลสำหรับพลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 3 ณ ระดับอุณหภูมิ 30°C (kJ.) มีการกระจายตัวแบบปกติ หรือ Normal Distribution หรือไม่
2. กำหนดให้ - $Q_{3(30^oC)}$ แทน พลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 3 ณ อุณหภูมิ 30°C (kJ.)
   - ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ ค่า α = 0.05%
3. Hypothesis Testing H_0: ข้อมูลของ $Q_{3(30^oC)}$ มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)

   H_1: ข้อมูลของ$Q_{3(30^oC)}$ ไม่มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)



รูปที่ ฌ-9 แสดง Probability Plot ของพลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 3 ณ อุณหภูมิ 30°C

จากการวิเคราะห์ Normality Test สำหรับพลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 3 ณ ระดับอุณหภูมิ 30°C (kJ.)พบว่า ค่า P-Value เท่ากับ 0.604 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 (Do not Reject H_0 or Accept H_0) แสดงว่า ข้อมูลดังกล่าวมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของพลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 3 ณ ระดับอุณหภูมิ 30°C เท่ากับ 2.510 กิโลจูล (kJ.)

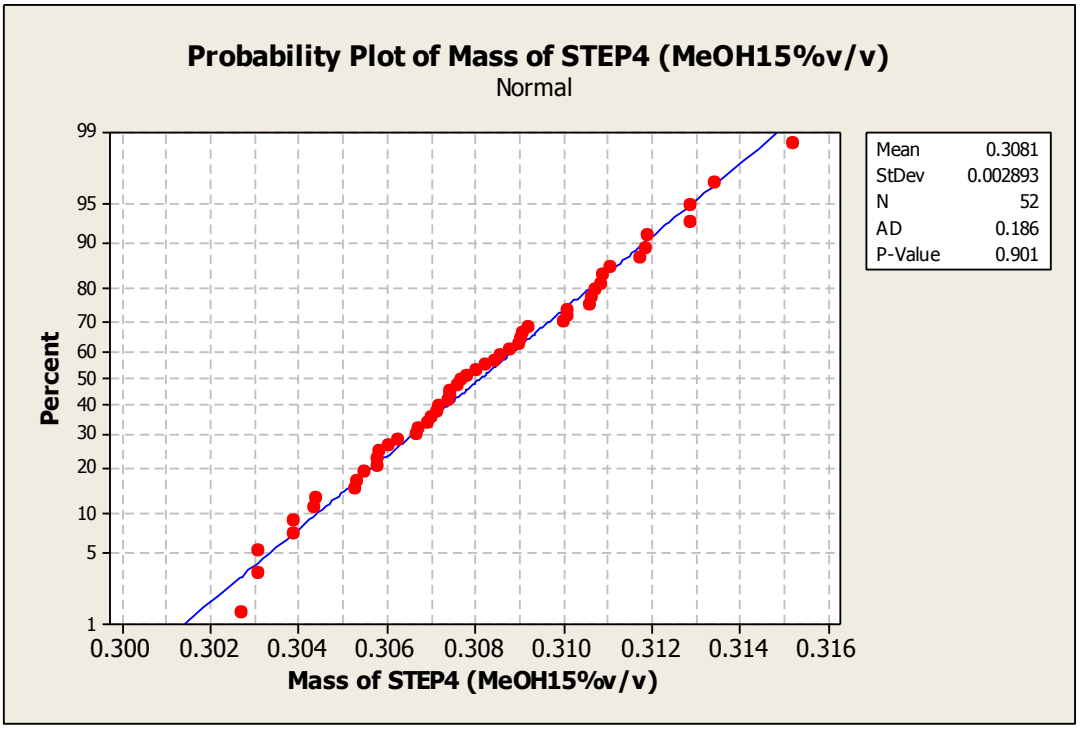
ขั้นตอนที่ 10

ศึกษาการกระจายของข้อมูลสำหรับมวลของสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันในขั้นตอนที่ 4 ณ ระดับเมทานอล 15%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม(หมายถึง ; หน่วยกิโลกรัม)

1. ทดสอบว่า การกระจายของข้อมูลสำหรับมวลของสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันในขั้นตอนที่ 4 ณ ระดับเมทานอล 15%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม (Kg.) มีการกระจายตัวแบบปกติ หรือ Normal Distribution หรือไม่
2. กำหนดให้ - $m_{initial(15\%)}$ แทน มวลของสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 4 ณ ระดับเมทานอล 15%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม (Kg.)
   - ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ ค่า α = 0.05%
3. Hypothesis Testing

   H_0 : ข้อมูลของ $m_{initial(15\%)}$ มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)

   H_1 : ข้อมูลของ $m_{initial(15\%)}$ ไม่มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)



รูปที่ ฌ-10 แสดง Probability Plotมวลของสารตั้งต้นในขั้นตอนที่ 4 ณ ระดับเมทานอล 15%v/v

จากการวิเคราะห์ Normality Test สำหรับมวลของสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 4 ณ ระดับเมทานอล 15%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม พบว่า ค่า P-Value เท่ากับ 0.901 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 (Do not Reject H_0) แสดงว่า ข้อมูลดังกล่าวมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ดังนั้น ค่าเฉลี่ยมวลของสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 4 ณ ระดับเมทานอล 15%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม เท่ากับ 0.308 กิโลกรัม

ขั้นตอนที่ 11

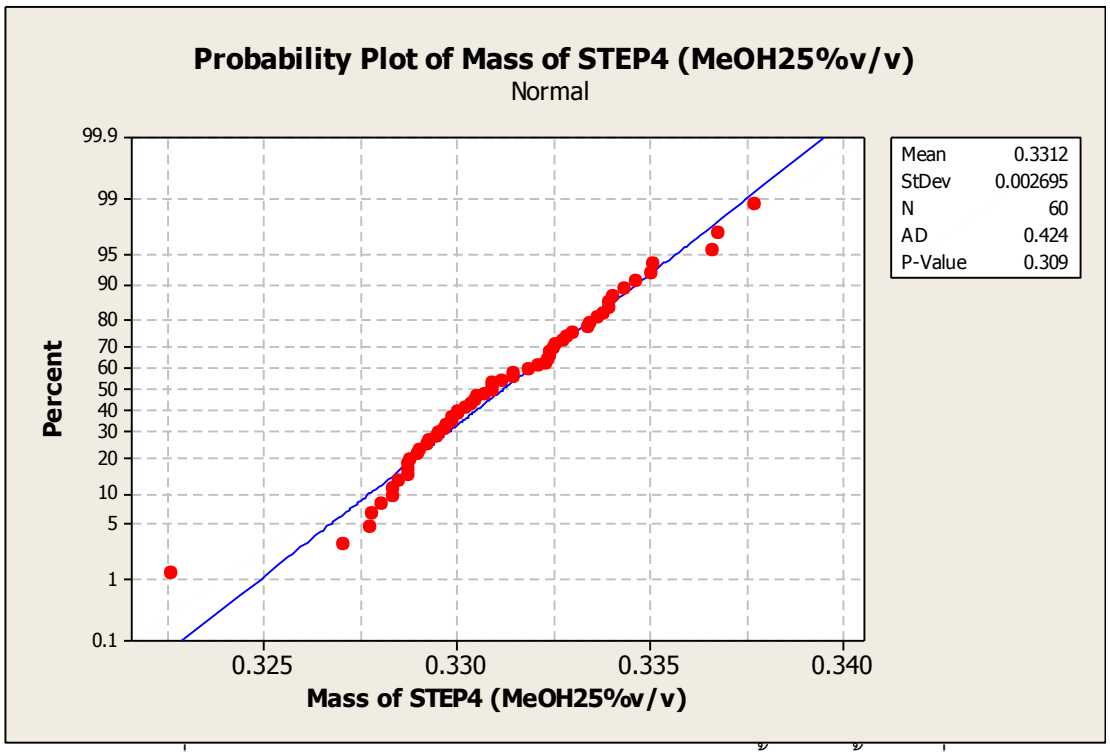
ศึกษาการกระจายของข้อมูลสำหรับมวลของสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันในขั้นตอนที่ 4 ณ ระดับเมทานอล 25%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม (หน่วย กิโลกรัม)

1. ทดสอบว่า การกระจายของข้อมูลสำหรับมวลของสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันในขั้นตอนที่ 4 ณ ระดับเมทานอล 25%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม (Kg.) มีการกระจายตัวแบบปกติ หรือ Normal Distribution หรือไม่
2. กำหนดให้ - $m_{initial(25\%)}$ แทน มวลของสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 4 ณ ระดับเมทานอล 25%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม (Kg.)
   - ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ ค่า α = 0.05%

3. Hypothesis Testing

H_0 : ข้อมูลของ $m_{initial(25\%)}$ มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)

H_1 : ข้อมูลของ $m_{initial(25\%)}$ ไม่มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)



รูปที่ ฌ-11แสดง Probability Plotสำหรับมวลของสารตั้งต้นในขั้นตอนที่ 4 ณ ระดับเมทานอล 25%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม

จากการวิเคราะห์ Normality Test สำหรับมวลของสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 4 ณ ระดับเมทานอล 25%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม พบว่า ค่า P-Value เท่ากับ 0.309 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 (Do not Reject H_0) แสดงว่า ข้อมูลดังกล่าวมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ดังนั้น ค่าเฉลี่ยมวลของสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 4 ณ ระดับเมทานอล 25%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม เท่ากับ 0.3312กิโลกรัม

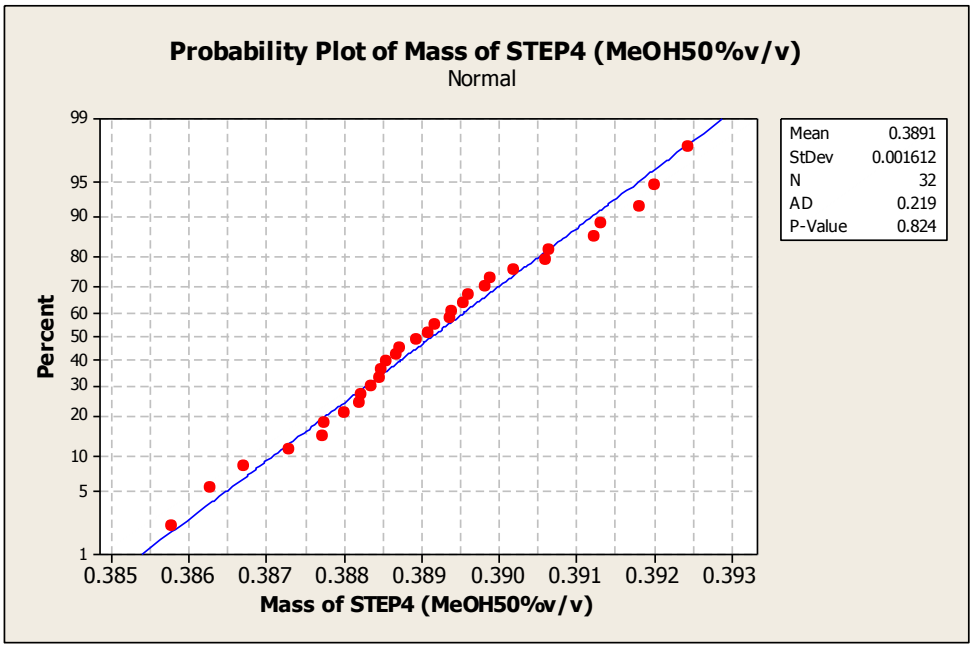
ขั้นตอนที่ 12

ศึกษาการกระจายของข้อมูลสำหรับมวลของสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันในขั้นตอนที่ 4 ณ ระดับเมทานอล 50%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม (หน่วย กิโลกรัม)

1. ทดสอบว่า การกระจายของข้อมูลสำหรับมวลของสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันในขั้นตอนที่ 4 ณ ระดับเมทานอล 50%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม (Kg.) มีการกระจายตัวแบบปกติ หรือ Normal Distribution หรือไม่
2. <u>กำหนดให้</u> - $m_{initial(50\%)}$ แทน มวลของสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 4 ณ ระดับเมทานอล 50%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม (Kg.)
   - ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ ค่า α = 0.05%
3. Hypothesis Testing

   H_0 : ข้อมูลของ $m_{initial(50\%)}$ มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)

   H_1 : ข้อมูลของ $m_{initial(50\%)}$ ไม่มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)



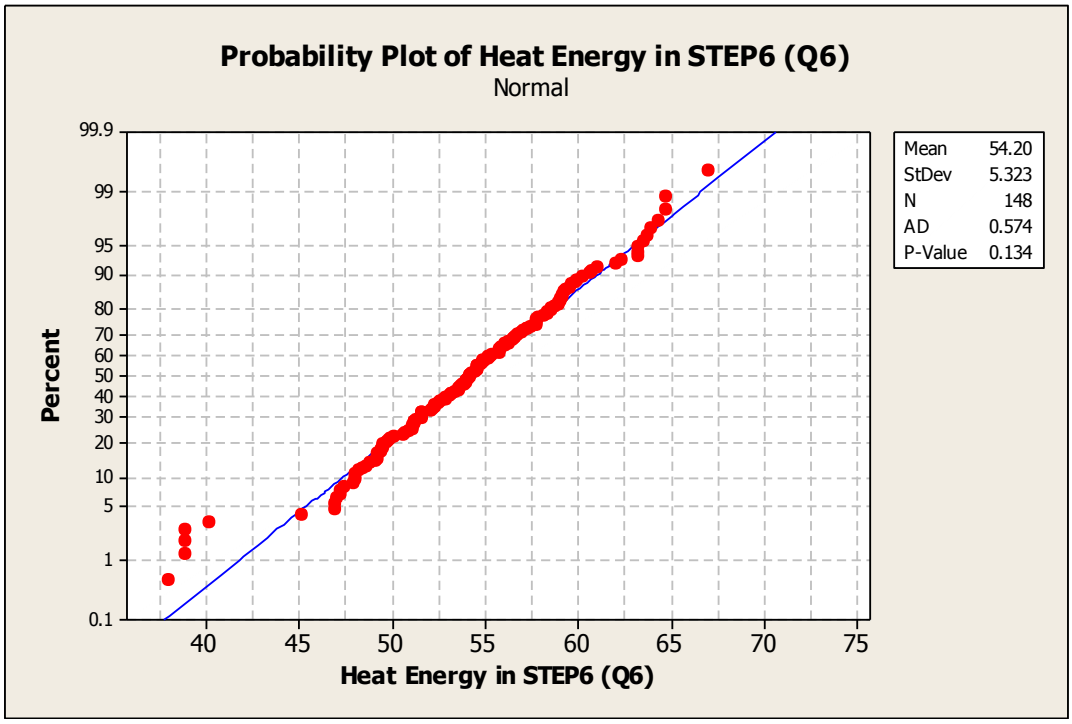
รูปที่ ฌ-12 แสดง Probability Plotสำหรับมวลของสารตั้งต้นในขั้นตอนที่ 4 ณ ระดับเมทานอล 50%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม

จากการวิเคราะห์ Normality Test สำหรับมวลของสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 4 ณ ระดับเมทานอล 50%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม พบว่า ค่า P-Value เท่ากับ 0.824 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 (Do not Reject H_0) แสดงว่า ข้อมูลดังกล่าวมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ดังนั้น ค่าเฉลี่ยมวลของสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 4 ณ ระดับเมทานอล 50%โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม เท่ากับ 0.3891กิโลกรัม

ขั้นตอนที่ 13

ศึกษาการกระจายของข้อมูลสำหรับพลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 2 (STEP 2) คือ กระบวนการต้มไล่น้ำในเมทิลเอสเตอร์ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลซึ่งผ่านกระบวนการล้างน้ำแล้ว (Q_6 หมายถึง พลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 6 ; หน่วย กิโลจูล)

1. ทดสอบว่า การกระจายของข้อมูลสำหรับพลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 6 (kJ.) มีการกระจายตัวแบบปกติ หรือ Normal Distribution หรือไม่
2. กำหนดให้ - Q_2 แทน พลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 6 หรือ STEP 6 (kJ.)
   - ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ ค่า α = 0.05%
3. Hypothesis Testing H_0 : ข้อมูลของ Q_6 มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)
   H_1 : ข้อมูลของ Q_6 ไม่มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)



รูปที่ ฌ-13 แสดง Probability Plotสำหรับพลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 6 (kJ.)

จากการวิเคราะห์ Normality Test สำหรับพลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 6 (kJ.) พบว่า ค่า P-Value เท่ากับ 0.639 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 (Do not Reject H_0 or Accept H_0) แสดงว่า ข้อมูลดังกล่าวมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของพลังงานความร้อนที่เกิดในขั้นตอนที่ 6 เท่ากับ 54.839 กิโลจูล (kJ.)

ขั้นตอนที่ 14

ศึกษาการกระจายของข้อมูลสำหรับเวลาที่ใช้ในการทำการทดลองใน STEP 6 (t_6หมายถึงเวลาที่ใช้ในการต้มไล่น้ำในขั้นตอนที่ 6 ; นาที)

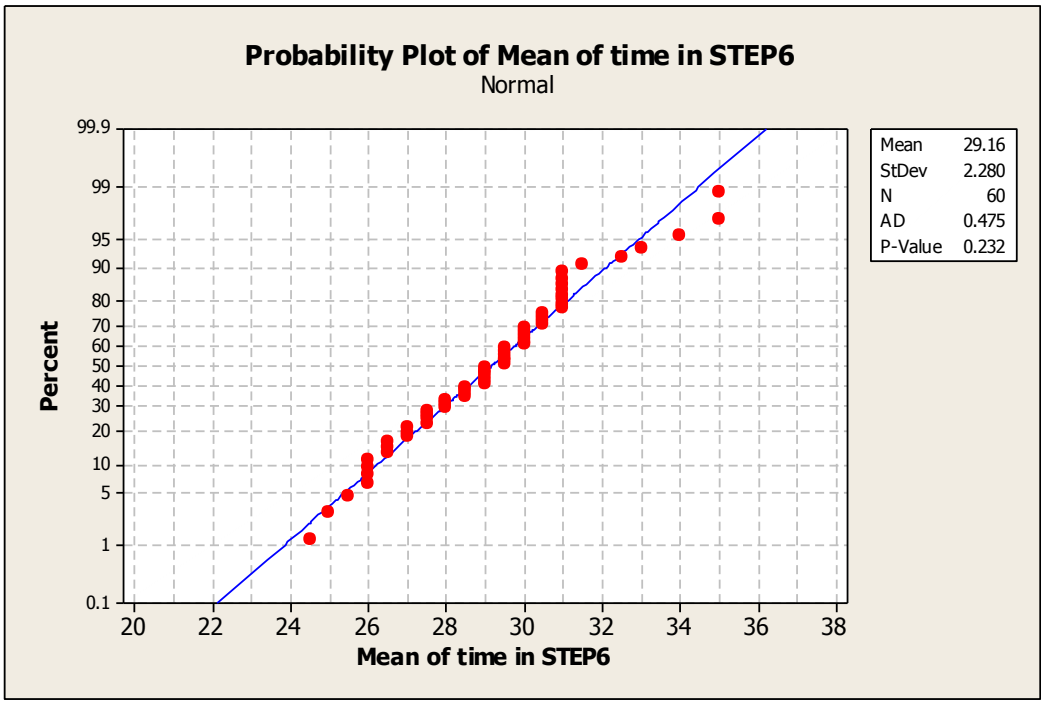
1 ทดสอบว่า การกระจายของข้อมูลสำหรับเวลาที่ใช้ในการทำการทดลองใน STEP 6 (t_6 หมายถึง เวลาที่ใช้ในการต้มไล่น้ำในขั้นตอนที่ 6 ; นาที)มีการกระจายตัวแบบปกติ หรือ Normal Distribution หรือไม่

2 กำหนดให้ - μ_{t6} แทน ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการต้มไล่น้ำในขั้นตอนที่ 6 (Mins.)

- ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ ค่า α = 0.05%

3. Hypothesis Testing H_0 : μ_{t6} มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)

H_1 : μ_{t6} ไม่มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)



รูปที่ ฌ-14 แสดง Probability Plotสำหรับค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลองใน STEP 6

จากการวิเคราะห์ Normality Test ของเวลาที่ใช้ในการต้มไล่น้ำในขั้นตอนที่ 6 (STEP 6) พบว่า ค่า P-Value เท่ากับ 0.232 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 (Do not Reject H_0 or Accept H_0) แสดงว่า ข้อมูลดังกล่าวมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำการทดลองใน STEP 6 เท่ากับ 29.16 นาที (Mins.)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวภัทรติกรณ์ รักษ์ศักดิ์ศรี เกิดเมื่อวันที่ 28 พฤษภาคม พ.ศ. 2530 ที่จังหวัดตรัง ได้เข้ารับการศึกษาในระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนจินตรังษี ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นที่โรงเรียนบูรณะรำลึก ตรัง ระดับมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนจุฬาภรณราชวิทยาลัย ตรัง และสำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2553