

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟบดโดยเอทานอลภาวะเหนือวิกฤต



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

BIODIESEL PRODUCTION FROM SPENT COFFEE GROUNDS OIL USING SUPERCRITICAL
ETHANOL



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2022

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟบดโดยเอทานอล ภาวะเหนียววิกฤต
โดย	นายณัฐกิตต์ เจริญดี
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.เรืองวิทย์ สว่างแก้ว

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์ (ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก (ศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์)
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม (ดร.เรืองวิทย์ สว่างแก้ว)
.....	กรรมการ (ศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย)
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย (ดร.อนุรักษ์ วินิตสร)

ณัฐกิตติ์ เจริญดี : การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟสดโดยเอทานอลภาวะเหนือ
 วิฤต. (BIODIESEL PRODUCTION FROM SPENT COFFEE GROUNDS OIL USING
 SUPERCRITICAL ETHANOL) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์, อ.
 ที่ปรึกษาร่วม : ดร.เรืองวิทย์ สว่างแก้ว

ไบโอดีเซล (Biodiesel) เป็นหนึ่งในพลังงานทางเลือกชีวภาพที่สามารถผลิตได้จากแหล่งพลังงานหมุนเวียนเช่น น้ำมันพืช และไขมันสัตว์ ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลพบปัญหาด้านราคาต้นทุนวัตถุดิบที่มีราคาสูงซึ่งคิดเป็นร้อยละ 70 ของต้นทุนทั้งหมด กากกาแฟเป็นของเสียหลักจากกระบวนการผลิตกาแฟซึ่งมีองค์ประกอบของไขมันอยู่ร้อยละ 18 ถึง 20 ของน้ำหนัก ทำให้สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตไบโอดีเซลเพื่อลดต้นทุนการผลิตได้อีกทางหนึ่ง งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟสดด้วยเอทานอลภาวะเหนือวิฤตในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์ และแบบต่อเนื่อง และหาภาวะที่ให้ร้อยละกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ (Fatty acid ethyl ester, FAEE) สูงสุด จากผลการทดลองพบว่าปริมาณน้ำมันกากกาแฟสดสูงสุดที่สามารถสกัดด้วยวิธีซอกซ์เลตโดยใช้ตัวทำละลายเอทานอลได้ปริมาณน้ำมันกากกาแฟร้อยละ 27.67 ของน้ำหนักกากกาแฟสด ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์พบว่าปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที จะให้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์สูงสุดร้อยละ 88.37 สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลจะทำให้เวลาของสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์ลดลง ส่งผลทำให้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์มีปริมาณลดลง ที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 2 กรัมต่อนาที และเวลาของสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์ 25.16 นาที จะให้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ที่สูงสุดร้อยละ 83.35

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6370063023 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD: Biodiesel, Spent coffee grounds (SCGs), Supercritical ethanol

Nattakit Charoendee : BIODIESEL PRODUCTION FROM SPENT COFFEE
 GROUNDS OIL USING SUPERCRITICAL ETHANOL. Advisor: Prof. SOMKIAT
 NGAMPRASERTSITH, Ph.D. Co-advisor: RUEANGWIT SAWANGKAEW, Ph.D.

Biodiesel is an alternative fuel that can be produced from renewable sources such as vegetable oils and animal fats. In biodiesel production, the process has limitations in terms of feedstock prices which taken for approximately 70% of the total cost of biodiesel production. Spent coffee ground (SCGs) is main residual products of coffee industry that contain a significant amount of lipid up to 18 to 20 %wt. SCGs can be used as raw materials to reduce production cost of biodiesel. This research aims to investigate biodiesel production from SCGs oil with supercritical ethanol in batch and continuous reactors and to locate the condition providing the highest fatty acid ethyl ester (FAEE) yield. The results showed that the maximum oil yield extracted from SCGs with ethanol as solvent was 27.67 %wt. In the biodiesel production process in batch reactor, FAEE yield increases when increasing temperature and reaction time. The optimal condition was found at 275 °C and reaction time 40 min, which gave the highest FAEE yield at 88.37 %wt. For the biodiesel production process with continuous reactors, it was found that when the flow rate was increased, the residence time was reduced. As a result, the FAEE yield decreased. The optimal conditions were found to be 325 °C, a feed flow rate of 2 g/min, and a residence time of 25.16 min to obtain the highest yield of FAEE at 83.35 %wt.

Field of Study: Chemical Technology

Student's Signature

Academic Year: 2022

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือและความกรุณาจากศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.เรืองวิทย์ สว่างแก้วอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ และ นางสาววิลาสินี ศุภางค์ ที่ได้ให้คำแนะนำ แนวคิด การแก้ไขปัญหา ข้อบกพร่องต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยตลอดมาจนวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย และ ดร.อนุรักษ์ วินิจสร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่สละเวลาเข้าร่วมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการสนับสนุนทุนการศึกษา และเครื่องมืออุปกรณ์ในการทำงานวิจัย รวมถึงเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ช่างเทคนิค และบุคลากรทุกท่าน

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัวที่คอยสนับสนุน อบรมสั่งสอน และให้กำลังใจตลอดมา จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

ณัฐกิตติ์ เจริญดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 วัตถุประสงค์การทดลอง.....	2
1.2 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 กากกาแฟ.....	5
2.2 องค์ประกอบของกากกาแฟ.....	5
2.3 วิธีการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟ.....	8
2.3.1 การสกัดเชิงกล (Mechanical extraction).....	8
2.3.2 การสกัดโดยใช้ตัวทำละลาย (Solvent extraction).....	9
2.3.2.1 การสกัดของแข็ง-ของเหลว (Solid-liquid extraction).....	9
2.3.2.2 การสกัดของเหลว-ของเหลว (liquid-liquid extraction).....	10

2.3.3	การสกัดด้วยของไหลภาวะเหนือวิกฤต (Supercritical fluid).....	11
2.4	ไบโอดีเซล (Biodiesel).....	11
2.4.1	วัตถุดิบสำหรับการผลิตไบโอดีเซล	12
2.4.2	ชนิดแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล	14
2.4.3	ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification reaction).....	15
2.4.4	กระบวนการผลิตไบโอดีเซล.....	16
2.4.4.1	กระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic process).....	16
2.4.4.2	กระบวนการที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non - Catalytic process)	18
2.4.5	มาตรฐานไบโอดีเซล	19
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
บทที่ 3	วิธีดำเนินงานวิจัย.....	28
3.1	สารเคมี และเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	28
3.2	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	29
3.2.1	การเตรียมกากกาแฟบด.....	29
3.2.2	การสกัดน้ำมันจากกากกาแฟบดด้วยชุดสกัดซอกซ์เลต	29
3.2.3	การวิเคราะห์หาค่าประกอบในน้ำมันกากกาแฟ	29
3.2.3.1	การเตรียมตัวอย่างน้ำมันในรูปกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์	29
3.2.3.2	การวิเคราะห์หาค่าประกอบในน้ำมันกากกาแฟบดโดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (Gas chromatograph, GC).....	30
3.2.3.3	การวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid, FFA) ในน้ำมันกากกาแฟบด	30
3.2.3.4	การวิเคราะห์หาค่าสะพอนิฟิเคชัน (Saponification value, S.V.) เพื่อคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันกากกาแฟบด	31
3.2.3.5	การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำในน้ำมันกากกาแฟบด	32

3.2.3.6	การวิเคราะห์ปริมาณสารที่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาสะพอนิฟิเคชันได้ (Unsaponifiable matter, UM).....	33
3.2.4	การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟในเอทานอลภาวะเหนือวิกฤต	34
3.2.4.1	การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟด้วยเครื่องปฏิกรณ์ แบบแบตช์ (Batch reactor)	34
3.2.4.2	การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง	35
3.3.5	การวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ (Fatty acid ethyl ester, FAEE) ของไบโอดีเซลด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี	36
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	37
4.1	ปริมาณความชื้นในกากกาแฟ.....	37
4.2	ปริมาณน้ำมันในกากกาแฟ	37
4.3	องค์ประกอบของน้ำมันกากกาแฟ (Spent coffee ground oil, SCGs oil).....	37
4.4	ปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมัน กากกาแฟด้วยเอทานอลภาวะเหนือวิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ (Batch reactor)39	
4.4.1	ผลของอุณหภูมิ (Effect of temperature).....	39
4.4.2	ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา (Effect of reaction time).....	44
4.5	ปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมัน กากกาแฟด้วยเอทานอลภาวะเหนือวิกฤตโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (Continuous reactor).....	48
4.5.1	ผลของอัตราการไหล (Effect of feed flow rate).....	48
4.5.2	ผลของเวลาของสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์ (Effect of residence time)	51
4.6	ผลของประเภทเครื่องปฏิกรณ์ (Effect of reactor type)	53
บทที่ 5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	57
5.1	สรุปผลการทดลอง	57
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	59

บรรณานุกรม.....	60
ภาคผนวก ก ปริมาณความชื้นในกากกาแฟบด และร้อยละปริมาณน้ำมันกากกาแฟบด	64
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันกากกาแฟบด.....	65
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ และการคำนวณเวลาของสารในเครื่องปฏิกรณ์	71
ประวัติผู้เขียน.....	77



สารบัญรูปร่างภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	องค์ประกอบของกากกาแฟบดและการนำกากกาแฟบดไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ	7
รูปที่ 2.2	เครื่องมือสกัดเชิงกลด้วยวิธีการบีบอัดด้วยเครื่องบีบอัดแบบ SCREW PRESS	8
รูปที่ 2.3	การสกัดของแข็ง-ของเหลว (SOLID-LIQUID EXTRACTION) โดยวิธีการแช่	9
รูปที่ 2.4	การสกัดของแข็ง-ของเหลว ด้วยเครื่องสกัดชอกท์เลต.....	10
รูปที่ 2.5	กระบวนการสกัดของเหลว-ของเหลว (LIQUID-LIQUID EXTRACTION).....	11
รูปที่ 2.6	ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างน้ำมัน และแอลกอฮอล์	15
รูปที่ 2.7	กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส.....	16
รูปที่ 2.8	กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด	17
รูปที่ 2.9	แผนภาพความดันและอุณหภูมิที่ภาวะเหนือวิกฤต	19
รูปที่ 2.10	ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน ปี พ.ศ. 2562 เรื่องกำหนดลักษณะและคุณภาพ ของไบโอดีเซล ประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	21
รูปที่ 2.11	ประกาศของกรมธุรกิจและพลังงาน ปี พ.ศ. 2563 เรื่องกำหนดลักษณะและ คุณภาพน้ำมันดีเซล.....	24
รูปที่ 3.1	เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณน้ำโดยวิธีการไตเตรตด้วยเทคนิคคาร์ล ฟิสเชอร์ (KARL FISCHER TITRATION).....	32
รูปที่ 3.2 ก)	เครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ (BATCH REACTOR) และ ข) อ่างทรายฟลูอิดซ์ (FLUIDIZED SAND BATH) และแผงควบคุมอุปกรณ์.....	34
รูปที่ 3.3	เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (CONTINUOUS REACTOR).....	35
รูปที่ 4.1	น้ำมันกากกาแฟบดที่สกัดด้วยวิธีชอกท์เลตโดยใช้ตัวทำละลายเอทานอล	37
รูปที่ 4.2	ผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 นาที อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแฟบดต่อเอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล	39
รูปที่ 4.3	ผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแฟบดต่อเอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล	40

รูปที่ 4.13 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยมีอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแพบต่อ เอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล	46
รูปที่ 4.14 ผลของอัตราการไหลที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแพบต่อ เอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล.....	48
รูปที่ 4.15 ผลของอัตราการไหลที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแพบต่อ เอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล.....	49
รูปที่ 4.16 ผลของอัตราการไหลที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแพบต่อ เอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล.....	49
รูปที่ 4.17 ผลของอัตราการไหลที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยมีอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแพบต่อเอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล	50
รูปที่ 4.18 ผลของเวลาของสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์ที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแพบต่อเอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล	51
รูปที่ 4.19 ผลของประเภทเครื่องปฏิกรณ์ที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแพบต่อ เอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล.....	53
รูปที่ 4.20 ผลของประเภทเครื่องปฏิกรณ์ที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแพบต่อ เอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล.....	53
รูปที่ 4.21 ผลของประเภทเครื่องปฏิกรณ์ที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแพบต่อ เอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล.....	54
รูปที่ ค.1 กราฟมาตรฐานของกรดไขมันเอทิลปาล์มิเตต.....	71

รูปที่ ค.2	กราฟมาตรฐานของกรดไขมันเอทิลลิโนเลอิต	72
รูปที่ ค.3	โคมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐานเอทิลลิโนเลอิต และเอทิลปาล์มิเตต.....	72
รูปที่ ค.4	โคมาโทแกรมของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ (ตัวอย่างที่ 1) จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที.....	73
รูปที่ ค.5	โคมาโทแกรมของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ (ตัวอย่างที่ 2) จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที.....	73
รูปที่ ค.6	โคมาโทแกรมของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ (ตัวอย่างที่ 3) จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที.....	74
รูปที่ ค.8	โคมาโทแกรมของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ (ตัวอย่างที่ 1) จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 2 กรัมต่อนาที และเวลาในสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์ 25.16 นาที	74
รูปที่ ค.9	โคมาโทแกรมของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ (ตัวอย่างที่ 2) จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 2 กรัมต่อนาที และเวลาในสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์ 25.16 นาที	75
รูปที่ ค.10	โคมาโทแกรมของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ (ตัวอย่างที่ 3) จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 2 กรัมต่อนาที และเวลาในสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์ 25.16 นาที	75

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันกากกาแฟบด	6
ตารางที่ 2.2 สมบัติทั่วไปของไบโอดีเซล.....	12
ตารางที่ 2.3 สมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลและน้ำมันดีเซล.....	12
ตารางที่ 2.4 สมบัติของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน	14
ตารางที่ 2.5 อุณหภูมิและความดันวิกฤตของสารชนิดต่างๆ.....	19
ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์หองค์ประกอบในน้ำมันกากกาแฟบดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโท กราฟ	30
ตารางที่ 3.2 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์หองค์ประกอบในน้ำมันกากกาแฟด้วยเครื่องแก๊สโครมาโท กราฟ	36
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำมันกากกาแฟบด.....	38
ตารางที่ 4.2 เวลาที่สารตั้งต้นอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ และร้อยละกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์.....	51
ตารางที่ ก.1 น้ำหนักกากกาแฟบดก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และร้อยละปริมาณความชื้นในกากกาแฟบด.....	64
ตารางที่ ก.2 น้ำหนักกากกาแฟบด และร้อยละปริมาณความชื้นในกากกาแฟบดแห้ง.....	64
ตารางที่ ก.3 น้ำหนักกากกาแฟบด น้ำมันกากกาแฟบด และร้อยละปริมาณน้ำมันกากกาแฟบด	64
ตารางที่ ข.1 ร้อยละปริมาณกรดไขมันในน้ำมันกากกาแฟบด.....	65
ตารางที่ ข.2 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	66
ตารางที่ ข.3 ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก	67
ตารางที่ ข.4 ปริมาณร้อยละกรดไขมันอิสระ	67
ตารางที่ ข.5 ปริมาตรสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 0.5 นอร์มัล ที่ใช้ไตเตรตกับ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในเอทานอล (KOH)	69
ตารางที่ ข.6 ค่าสะพอนิฟิเคชัน และมวลโมเลกุลของน้ำมันกากกาแฟบด.....	69
ตารางที่ ข.7 ร้อยละปริมาณน้ำในน้ำมันกากกาแฟบด.....	69
ตารางที่ ข.8 ร้อยละปริมาณสารที่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาสะพอนิฟิเคชัน	70
ตารางที่ ค.1 ความหนาแน่นของสารตั้งต้นที่ความดัน และอุณหภูมิต่าง ๆ.....	76
ตารางที่ ค.2 ระยะเวลาของสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิ และอัตราการไหลต่าง ๆ.....	76

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันทั่วโลกมีความต้องการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในปริมาณมากซึ่งเพิ่มสูงขึ้นตามความต้องการของเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมที่เติบโตอย่างรวดเร็ว ทำให้หลายประเทศประสบกับปัญหาภาวะขาดแคลนน้ำมัน และราคาน้ำมันที่ปรับตัวสูงขึ้นตามความต้องการอย่างต่อเนื่อง รวมถึงปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการปล่อยแก๊สเรือนกระจกออกสู่ชั้นบรรยากาศ จึงต้องมีการแสวงหาแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงที่จะสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ โดยไบโอดีเซล (Biodiesel) เป็นหนึ่งในพลังงานทางเลือกชีวภาพที่ผลิตได้จากแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น น้ำมันพืช และไขมันสัตว์ ไบโอดีเซลเป็นพลังงานสะอาดที่มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล แต่อย่างไรก็ตามในการผลิตไบโอดีเซลในปัจจุบันยังพบปัญหาด้านราคาต้นทุนวัตถุดิบที่มีราคาสูงคิดเป็นร้อยละ 70 ของต้นทุนทั้งหมดในการลดต้นทุนการผลิตสามารถใช้น้ำมันที่ไม่สามารถบริโภคได้ เช่น น้ำมันที่ไขแล้ว กากของเสียจากอุตสาหกรรมเกษตรที่มีกรดไขมันเหมาะสม เช่น กากกาแฟจากอุตสาหกรรมการผลิตกาแฟ เป็นต้น [1]

ในช่วงปี ค.ศ. 2016 ถึง 2020 ที่ผ่านมามีความต้องการในการบริโภคกาแฟทั่วโลกมีปริมาณเพิ่มขึ้นเป็น 9.92 ล้านตัน และคาดว่าจะเพิ่มสูงขึ้นเป็น 12.24 ล้านตัน ในปี ค.ศ. 2030 ซึ่งส่งผลให้เกิดกากกาแฟจำนวนมากจากกระบวนการสกัดน้ำกาแฟ ซึ่งกากกาแฟที่เกิดขึ้นคิดเป็นร้อยละ 65 ของน้ำหนักกาแฟทั้งหมด กากกาแฟเป็นของเสียชีวมวลที่ต้องการออกซิเจนสูงในการสลายตัว และสามารถปล่อยสาร คาเฟอีน แทนนิน และพอลิฟีนอล ที่ตกค้างออกสู่สิ่งแวดล้อม เพื่อลดผลกระทบที่เกิดขึ้น กากกาแฟจึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ในหลากหลายด้านหนึ่งในนั้นคือการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากในกากกาแฟมีองค์ประกอบของไขมันที่เหมาะสมอยู่ร้อยละ 18 ถึง 20 ของน้ำหนัก [2]

ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลทั่วไปนิยมใช้เมทานอล แต่เมทานอลที่นำมาใช้ส่วนใหญ่ได้มาจากแหล่งพลังงานฟอสซิล ดังนั้นในการลดการใช้สารเคมีจากแหล่งพลังงานฟอสซิลสำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ทางออกหนึ่งคือการใช้แอลกอฮอล์ที่ได้มาจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนโดยเอทานอล (Ethanol) เป็นแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่งที่ได้จากแหล่งพลังงานหมุนเวียนด้วยกระบวนการหมัก โดยมีโครงสร้างโมเลกุลคล้ายกับเมทานอล แต่มีความแตกต่างกันเพียงกลุ่มเมทิล (Methyl group) เท่านั้น จึงทำให้สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของแอลกอฮอล์ทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกันน้อยมาก [3]

เอทานอลภาวะเหนือวิกฤต (Supercritical ethanol) เป็นตัวทำละลายที่สามารถใช้ในการผลิตไบโอดีเซลผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน (Transesterification) ที่อุณหภูมิและความดันเหนือจุดวิกฤต ซึ่งจุดวิกฤตของเอทานอล คือ ที่อุณหภูมิ 241 องศาเซลเซียส และความดัน 6.3 เมกะพาสคัล โดยตัวทำละลายในภาวะนี้มีความหนาแน่นใกล้เคียงของเหลวและมีความหนืดกับสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ใกล้เคียงกับแก๊สทำให้สารในระบบสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างกัน และเกิดการแพร่ของตัวทำละลายได้ดีขึ้น ดังนั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจึงเกิดได้ดีกว่าที่ภาวะปกติ [4]

งานวิจัยนี้มีแนวความคิดการนำน้ำมันกากกาแฟบดไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตไบโอดีเซลในเอทานอลภาวะเหนือวิกฤตซึ่งในส่วนแรกจะทำการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟบด โดยใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย ด้วยวิธีการสกัดแบบซอกท์เลต จากนั้นสารผสมระหว่างน้ำมันกากกาแฟบดและเอทานอลจะถูกป้อนไปยังเครื่องปฏิกรณ์สำหรับผลิตไบโอดีเซลในภาวะเหนือวิกฤต ที่ความดันคงที่ 15 เมกะพาสคัล และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันกากกาแฟบดและเอทานอล 1 ต่อ 30 โดยจะทำการศึกษาอุณหภูมิในช่วง 275 ถึง 350 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 5 ถึง 40 นาที และอัตราการไหลเข้าที่ 2.5 และ 3 กรัมต่อนาที เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ร้อยละปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์สูงสุดในการผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ และแบบต่อเนื่อง

1.1 วัตถุประสงค์การทดลอง

1.1.1 ศึกษาการสกัดน้ำมันกากกาแฟบดโดยใช้เอทานอลในอุณหภูมิ และความดันบรรยากาศ

1.1.2 ศึกษาผลของอุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยาสำหรับการผลิตไบโอดีเซลด้วยเอทานอลภาวะเหนือวิกฤต ที่ความดัน และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันกากกาแฟบดต่อเอทานอลคงที่

1.1.3 ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟบดในเอทานอลภาวะเหนือวิกฤตด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ และแบบต่อเนื่อง

1.2 ขอบเขตงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาปริมาณน้ำมันที่สกัดได้จากกากกาแฟบดด้วยตัวทำละลายเอทานอล ความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ และความดันบรรยากาศเทียบกับปริมาณน้ำมันที่สกัดด้วยวิธีซอกท์เลต

1.2.2 ศึกษาผลของอุณหภูมิในช่วง 275 ถึง 350 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยาในช่วง 5 ถึง 40 นาที สำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟบดในเอทานอลภาวะเหนือวิกฤตด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์

1.2.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิในช่วง 275 ถึง 350 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลขาเข้าที่ 2, 2.5 และ 3 กรัมต่อนาที สำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟบดในเอทานอลภาวะเหนือวิกฤตด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟบดในเอทานอลภาวะเหนือวิกฤตสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ และแบบต่อเนื่อง

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาค้นคว้าทฤษฎี งานวิจัย และข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 วางแผนและออกแบบการทดลองให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์

1.4.3 กระบวนการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟบดด้วยตัวทำละลายเอทานอลความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยปริมาตร

1.4.3.1 ศึกษาปริมาณน้ำมันสูงสุดจากกระบวนการสกัดกากกาแฟบดด้วยวิธีชอกท์เลตโดยใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย

1.4.3.2 ศึกษาองค์ประกอบของน้ำมันกากกาแฟบดที่สกัดได้หลังจากการระเหยตัวทำละลายด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC)

1.4.4 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟบดด้วยเอทานอลภาวะเหนือวิกฤต

1.4.4.1 ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้ได้ปริมาณ

กรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ (Fatty acid ethyl ester, FAEE) สูงที่สุด ที่อุณหภูมิในช่วง 275 300 325 และ 350 องศาเซลเซียส ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ และแบบต่อเนื่อง

1.4.4.2 ศึกษาเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้ได้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์สูงสุด ที่เวลา 5 10 15 20 30 และ 40 นาที ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์

1.4.4.3 ศึกษาอัตราการไหลขาเข้าที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้ได้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์สูงสุด ที่อัตราการไหล 2 2.5 และ 3 กรัมต่อนาที ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

1.4.4.4 วิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี

1.4.5 อภิปรายและเปรียบเทียบผลเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟบดด้วยเอทานอลภาวะเหนือวิกฤตสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ และแบบต่อเนื่อง

1.4.6 สรุปรายชื่อ และเขียนวิทยานิพนธ์



บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กากกาแฟบด

กากกาแฟบด (Spent coffee grounds, SCGs) คือ เศษหรือผงของกาแฟคั่วบดที่ผ่านกระบวนการสกัดน้ำกาแฟจากร้านกาแฟ หรืออุตสาหกรรมการผลิตกาแฟสำเร็จรูป การชงกาแฟสดนั้นไม่สามารถนำกากกาแฟมาใช้ซ้ำอีกได้ เนื่องจากจะทำให้รสชาติ ความหอม ปริมาณคาเฟอีน และคุณภาพที่ได้ลดลง [5] ซึ่งขยะจากกากกาแฟบดมีปริมาณมากกว่า 6 ล้านตันต่อปี และในปัจจุบันกากกาแฟบดเหล่านี้ถูกกำจัดด้วยวิธีการฝังกลบซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพราะในกระบวนการย่อยสลายกากกาแฟบดทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซมีเทนที่สามารถลอยสู่บรรยากาศได้ [6]

2.2 องค์ประกอบของกากกาแฟบด

กากกาแฟบดมีองค์ประกอบสำคัญ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน คาเฟอีน สารประกอบฟีนอล และแร่ธาตุต่าง ๆ โดยสารเหล่านี้อาจแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของกาแฟ แหล่งเพาะปลูก ขั้นตอนการผลิต และวิธีการสกัด เป็นต้น [7], [8] ซึ่งมีองค์ประกอบสำคัญดังต่อไปนี้

- **คาร์โบไฮเดรต** โดยปกติแล้วในเมล็ดกาแฟดิบจะมีสารประกอบหลักคือ พอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) อยู่ประมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของกากกาแฟ ซึ่งจัดเป็นสารในกลุ่มของคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนประกอบด้วย พอลิแซ็กคาไรด์ที่เป็นชนิดเดียวกัน (Homopolysaccharide) เช่น เซลลูโลส หรือต่างชนิดกัน (Heteropolysaccharide) หรือ เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เช่น กาแล็กโทแมนแนน (Galactomannan) และอะราบินอกาแล็กแทน (Arabinogalactan) เป็นต้น
- **โปรตีน** จากการวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีนโดยวิธีเจลดาล์ (Kjeldahl method) ซึ่งเป็นวิธีคำนวณจากปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด พบว่าในกากกาแฟบดมีโปรตีนประมาณร้อยละ 8.5 ถึง 13.6 ต่อน้ำหนักกากกาแฟแห้ง อีกทั้งในกากกาแฟบดมีกรดอะมิโนจำเป็นหลากหลายชนิด เช่น ลิวซีน (Leucine) วาลีน (Valine) ฟีนิลอะลานีน (Phenylalanine) และไอโซลิวซีน (Isoleucine) เป็นต้น
- **ไขมัน** คือปริมาณกรดไขมันหรือน้ำมันที่มีในกากกาแฟบดซึ่งมีอยู่ร้อยละ 18 ถึง 20 โดยน้ำหนักของกากกาแฟ องค์ประกอบของน้ำมันกากกาแฟบด (Spent coffee ground oil, SCGs oil) ประกอบด้วย ไตรเอซิลกลีเซอรอล (Triacylglycerol) ร้อยละ 78 และไดเทอร์เพนส์ (Diterpenes)

ร้อยละ 15 อีกทั้งในน้ำมันกากกาแฟยังพบกรดไขมันสายยาว ได้แก่ กรดลิโนเลอิก (Linoleic acid, C18:2) และกรดปาล์มิติก (Palmitic acid, C16:0) เป็นต้น ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันกากกาแฟบด [8]

กรดไขมัน	สูตรโครงสร้างกรดไขมัน	ร้อยละโดยน้ำหนัก
Caprylic acid	C8: 0	0.01
Capric acid	C10:0	0.01
Lauric acid	C12:0	0.02
Myristic acid	C14:0	0.09
Palmitic acid	C16:0	34.44
Palmitoleic acid	C16:1	0.04
Oleic acid	C18:1	7.74
Linoleic acid	C18:2	43.12
Alpha linolenic acid	C18:3	1.18
Arachidic acid	C20:0	2.83
Paullinic acid	C20:1	0.27
Behenic acid	C22:0	0.59
Erucic acid	C22:1	0.19
Lignoceric acid	C24:0	0.29
Nervonic acid	C24:1	0.01

- **สารประกอบฟีนอล** เป็นสารที่พบตามธรรมชาติในพืชหลายชนิดโดยมีสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) ซึ่งสารประกอบฟีนอลที่พบมากที่สุดในกากกาแฟบดคือ กรดคลอโรจีนิก (Chlorogenic acid)

- **คาเฟอีน** จัดเป็นสารสำคัญและเป็นเอกลักษณ์ของกาแฟ โดยในกากกาแฟบดจะพบปริมาณคาเฟอีนเหลืออยู่ร้อยละ 0.73 ถึง 1.3 ของน้ำหนักกากกาแฟ ซึ่งสามารถสกัดได้ด้วยตัวทำละลาย เช่น เฮกเซน (Hexane) ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane) และเอทานอล (Ethanol) ในปัจจุบันมีการใช้เทคนิคขั้นสูงในการสกัดเช่นเดียวกันกับการสกัดน้ำมัน คือ การสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต ซึ่งในเทคนิคนี้จะทำให้ได้ปริมาณคาเฟอีนที่มากกว่าการสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์

- **แร่ธาตุ** ในกากกาแฟบดจะประกอบไปด้วยแร่ธาตุหลายชนิดเช่น โพแทสเซียม (Potassium, K) ฟอสฟอรัส (Phosphorus, P) แมกนีเซียม (Magnesium, Mg) และแคลเซียม (Calcium, Ca) เป็นต้น นอกจากนี้ในกากกาแฟบดยังมีเถ้า (Ash) ประมาณร้อยละ 0.4 ถึง 1.6 ของน้ำหนัก การที่ปริมาณเถ้าในกากกาแฟบดน้อยแสดงให้เห็นว่าในกากกาแฟบดอุดมไปด้วยคาร์บอน ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านพลังงาน และการเกษตรได้ [9]

กากกาแฟบดถือได้ว่าเป็นวัตถุดิบที่มีประโยชน์มากมายด้วยองค์ประกอบที่หลากหลาย เช่น น้ำมัน เส้นใย สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และสารต้านอนุมูลอิสระ ดังที่แสดงไว้ใน รูปที่ 2.1 อาจจะได้ว่ากากกาแฟบดสามารถนำมาใช้ทดแทนวัตถุดิบที่มาจากปิโตรเลียม หรือมาจากแหล่งอาหาร (Edible feedstock) ซึ่งนอกจากจะช่วยเรื่องสิ่งแวดล้อม และความมั่นคงด้านพลังงานและอาหารแล้วยังเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากกาแฟ และลดต้นทุนในกระบวนการผลิตได้อีกด้วย



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของกากกาแฟบดและการนำกากกาแฟบดไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ [10]

2.3 วิธีการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟบด

การสกัดน้ำมันจากเมล็ดพืชน้ำมันนิยมใช้วิธีการหลัก ๆ 3 วิธี ได้แก่ การสกัดเชิงกล การสกัดโดยใช้ตัวทำละลาย และการสกัดด้วยของไหลภาวะเหนือวิกฤต

2.3.1 การสกัดเชิงกล (Mechanical extraction)

การสกัดเชิงกลเป็นวิธีที่ใช้สกัดแยกน้ำมันออกจากส่วนต่าง ๆ ของพืช เช่น เมล็ด หัว ใบ ดอก ผล และเปลือก วิธีนี้เหมาะกับพืชที่มีปริมาณน้ำมันสูง โดยใช้หลักการในการเปลี่ยนปริมาตรของวัตถุดิบที่เคลื่อนที่ไปตามเกลียวของสกรูโรตอร์ โดยใช้แรงเสียดทานและความดันอย่างต่อเนื่องในการบีบอัดและเคลื่อนย้ายวัตถุดิบไปข้างหน้า ซึ่งแรงอัดที่เกิดขึ้นระหว่างเกลียวกับผนังกระบอกจะทำให้ผนังเซลล์ของเมล็ดพืชแตกออกและบีบน้ำมันแยกออกมา น้ำมันที่ได้จะไหลผ่านช่องตะแกรง ส่วนกากที่เหลือถูกลำเลียงออกทางท้ายเครื่อง โดยการสกัดเชิงกลแบ่งได้ 2 แบบ คือ การสกัดแบบเย็นและการสกัดแบบร้อน [11],[12]

- วิธีการสกัดแบบเย็นเป็นการใช้แรงกดเมล็ดพืชน้ำมันทำให้เมล็ดแตกแล้วบีบน้ำมันออกมาที่อุณหภูมิปกติ ซึ่งเมล็ดพืชที่นำมาสกัดต้องไม่ผ่านความร้อนหรือสารเคมีมาก่อน
- วิธีการสกัดแบบร้อนเป็นการใช้แรงเชิงกลบีบอัดเมล็ดพืชน้ำมันร่วมกับการใช้ความร้อนซึ่งจะทำให้ไขมันเกิดการละลายออกจากเมล็ดพืช

ข้อจำกัดของการสกัดด้วยวิธีเชิงกลคือ จะได้น้ำมันในปริมาณน้อย มีน้ำมันตกค้างในกากสูง และมีสิ่งเจือปนที่ติดกับวัตถุดิบออกมาด้วย



รูปที่ 2.2 เครื่องมือสกัดเชิงกลด้วยวิธีการบีบอัดด้วยเครื่องบีบอัดแบบ Screw press [13]

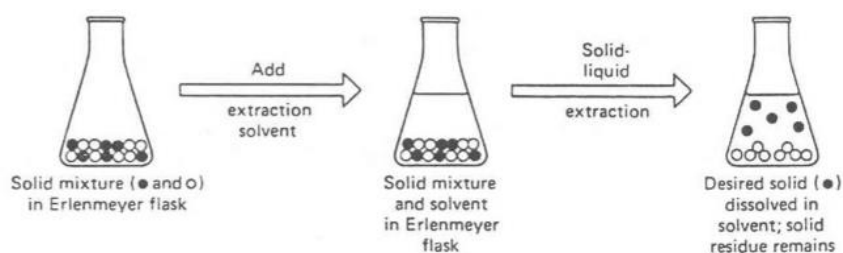
2.3.2 การสกัดโดยใช้ตัวทำละลาย (Solvent extraction)

วิธีการสกัดโดยใช้ตัวทำละลายเป็นวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เนื่องจากวิธีนี้จะทำให้ได้ปริมาณผลผลิตที่สูงกว่าวิธีการสกัดเชิงกล โดยการสกัดน้ำมันจากเมล็ดพืชด้วยตัวทำละลายจะได้ปริมาณน้ำมันร้อยละ 85 ถึง 99.5 ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี ดังนี้ต่อไปนี้เป็น

2.3.2.1 การสกัดของแข็ง-ของเหลว (Solid-liquid extraction)

เป็นการสกัดโดยใช้ตัวทำละลายสกัดสารออกจากของผสมหรือตัวอย่างที่เป็นของแข็ง เช่น การสกัดสารผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ (Natural product) ในพืชต่าง ๆ ซึ่งการสกัดชนิดนี้ทำได้ 2 วิธี [14]

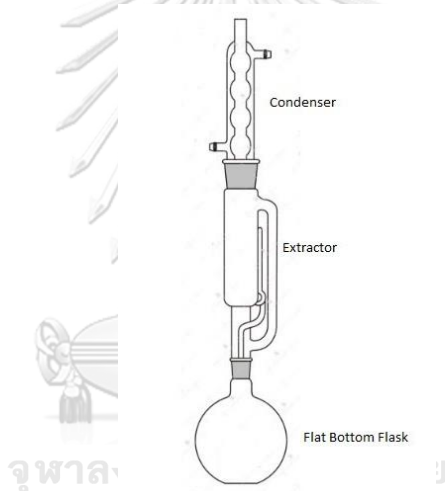
1. การสกัดโดยวิธีการแช่ ทำได้โดยการแช่พืชที่ต้องการสกัดในตัวทำละลายที่เหมาะสม ทิ้งไว้จนกระทั่งสารประกอบอินทรีย์ที่อยู่ในพืชนั้นแพร่ออกมาให้มากที่สุด โดยสังเกตได้เมื่อเปลี่ยนตัวทำละลายใหม่ แล้วตั้งทิ้งไว้ สารละลายจะใสและไม่มีสี แสดงว่าสารอินทรีย์ถูกสกัดออกมาหมดแล้ว หลังจากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปกรอง และนำไประเหยตัวทำละลายด้วยเครื่องระเหยแบบหมุน (Rotary evaporator) จะได้สารประกอบอินทรีย์หลายชนิดปนกันอยู่ภายใน เรียกว่า สารสกัดหยาบ (Crude extract) ซึ่งวิธีการสกัดนี้แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การสกัดของแข็ง-ของเหลว (Solid-liquid extraction) โดยวิธีการแช่

2. การสกัดโดยใช้เครื่องมือชอกท์เลต (Soxhlet extraction) ซึ่งเครื่องมือประกอบไปด้วย 3 ส่วน แสดงดังรูปที่ 2.4 คือ ส่วนที่ 1 คือส่วนบนสุดประกอบด้วยเครื่องควบแน่น (Condenser) เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้ไอของตัวทำละลายควบแน่นกลับเป็นของเหลว ส่วนที่ 2 คือ ส่วนกลาง เป็นส่วนที่ใช้สำหรับกระบวนการสกัด (Extractor) จะมีอุปกรณ์ที่มีลักษณะให้ของเหลวไหลเวียนกลับลงสู่ขวดก้นกลมได้ ซึ่งส่วนนี้จะมีหลอดกระดาษกรองสำหรับการสกัด (Cellulose thimble) ที่ใส่สารที่ต้องการสกัดบรรจุอยู่ และส่วนที่ 3 คือส่วนล่างในส่วนนี้จะมียอดก้นกลม (Flat Round bottom) เป็นภาชนะบรรจุตัวทำละลายที่ใช้สำหรับการสกัด

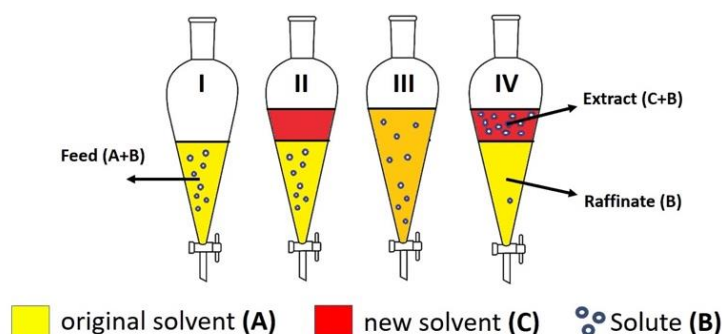
หลักการทำงานของเครื่องซอกซ์เลต (Soxhlet extraction) เริ่มจากการให้ความร้อนกับขวดก้นกลมเพื่อให้ตัวทำละลายระเหยกลายเป็นไอผ่านท่อแก้วด้านข้างขึ้นไปยังเครื่องควบแน่นซึ่งมีความเย็นจากน้ำหล่อเย็น ทำให้ไอระเหยของสารละลายถูกควบแน่นกลายเป็นของเหลวไหลลงสู่อุปกรณ์ส่วนกลาง ซึ่งจะมีสารที่ต้องการสกัดบรรจุอยู่ โดยการควบแน่นจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องสังเกตได้จากระดับของเหลวในอุปกรณ์ส่วนกลางที่จะสูงขึ้นเรื่อย ๆ ดังนั้นสารที่ต้องการสกัดจะแช่และถูกสกัดด้วยตัวทำละลายในขณะหนึ่ง จนกระทั่งเมื่อระดับของตัวทำละลายในอุปกรณ์ส่วนกลางสูงถึงขีดกำหนดแล้ว ตัวทำละลายจะไหลกลับลงสู่ขวดก้นกลมผ่านทางแขนไซฟอน (Siphon arm) พร้อมทั้งนำสารประกอบอินทรีย์ที่สกัดได้ไหลปนลงมาด้วย หลังจากนั้นจะมีการให้ความร้อนเพื่อให้ตัวทำละลายระเหยหมุนเวียนไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งไม่มีสารจากตัวอย่างที่ต้องการสกัดออกมาโดยสารละลายจะมีลักษณะใสไม่มีสี



รูปที่ 2.4 การสกัดของแข็ง-ของเหลว ด้วยเครื่องสกัดซอกซ์เลต

2.3.2.2 การสกัดของเหลว-ของเหลว (liquid-liquid extraction)

เทคนิคการสกัดของเหลวด้วยของเหลว ใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสมละลายสารที่ต้องการออกมาจากของผสมที่เป็นของเหลว ซึ่งของเหลวทั้งสองไม่ละลายซึ่งกัน ตัวทำละลายที่ใช้ต้องละลายสารที่ต้องการสกัดได้ดี และไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับตัวทำละลายเดิม โดยอาศัยสมบัติการละลายของสารที่ต้องการสกัด และสมบัติความมีขั้วของตัวทำละลายที่แตกต่างกัน หรือเรียกว่าหลักการ “like dissolves like” หลังจากการสกัดจะเกิดการแยกชั้น ประกอบไปด้วยชั้นของตัวทำละลายที่อิมตัวด้วยตัวถูกละลาย เรียกว่าส่วนสกัดได้ (Extract) และชั้นของสารที่เหลือจากการสกัด เรียกว่าส่วนที่เหลือ (Raffinate) [15] ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กระบวนการสกัดของเหลว-ของเหลว (liquid-liquid extraction)

2.3.3 การสกัดด้วยของไหลภาวะเหนือวิกฤต (Supercritical fluid)

เทคนิคการสกัดนี้จะใช้สารในภาวะเหนือวิกฤตที่มีอุณหภูมิต่ำและความดันเหนือจุดวิกฤต ซึ่งจะมีสมบัติในการซึมผ่านของแข็งได้เหมือนแก๊ส และสามารถละลายสารได้เหมือนของเหลว ตัวอย่างของตัวทำละลายที่ใช้การสกัดด้วยของไหลภาวะเหนือวิกฤต เช่น เอทิลีน (Ethylene) ไนตรัสออกไซด์ (Nitrous oxide) และโพรเพน (Propane) เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามในการสกัดด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต มีข้อเสีย เช่น การใช้ตัวทำละลายไนตรัสออกไซด์ในภาวะเหนือวิกฤตสามารถทำให้เกิดการระเบิดได้ [16] ทำให้ในปัจจุบันนิยมใช้คาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต (Supercritical carbon dioxide) เนื่องจาก มีความดันและอุณหภูมิวิกฤตต่ำ ไม่ติดไฟ ราคาถูก และสามารถกำจัดออกจากสารสกัดได้ง่าย โดยคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤตมีความเป็นขั้วใกล้เคียงกับน้ำมัน ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับนำมาสกัดน้ำมันออกจากตัวอย่างที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบ [17]

2.4 ไบโอดีเซล (Biodiesel)

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพที่ผลิตได้โดยอาศัยกระบวนการทางเคมีระหว่างน้ำมันพืช หรือไขมันสัตว์ และ แอลกอฮอล์ [18] ซึ่งสมบัติทั่วไปของไบโอดีเซลแสดงดังตารางที่ 2.2 ในปัจจุบัน ไบโอดีเซลเป็นพลังงานทางเลือกที่ได้รับความสนใจและถูกนำไปใช้กันอย่างกว้างขวาง อีกทั้งยังมีแนวโน้มความต้องการที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานที่มีศักยภาพเพราะสามารถผลิตได้จากแหล่งทรัพยากรที่หมุนเวียน โดยไบโอดีเซลมีสมบัติและองค์ประกอบที่คล้ายกับน้ำมันดีเซลแสดงดังตารางที่ 2.3 แต่ไบโอดีเซลมีข้อดีกว่าดีเซลคือ สามารถย่อยสลายได้เองตามกระบวนการทางชีวภาพ

ไม่เป็นพิษ และปราศจากกำมะถัน อีกทั้งยังมีกาปล่อยมลพิษทางอากาศและก๊าซเรือนกระจกในปริมาณน้อย ดังนั้นจึงทำให้น้ำมันไบโอดีเซลมีความได้เปรียบเหนือกว่าน้ำมันดีเซลทั่วไป [19]

ตารางที่ 2.2 สมบัติทั่วไปของไบโอดีเซล [20]

ชื่อทั่วไป	ไบโอดีเซล (Biodiesel)
ชื่อทางเคมี	Fatty acid methyl ester และ Fatty acid ethyl ester
สูตรโครงสร้าง	$C_{15-25}H_{28-48}O_2$
ลักษณะทางกายภาพ	ของเหลวใสโปร่งแสง สีเหลือง

ตารางที่ 2.3 สมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลและน้ำมันดีเซล [20]

สมบัติ	ดีเซล (Diesel)	ไบโอดีเซล (Biodiesel)
Kinematic viscosity (at 40°C)	1.3 ถึง 4.1	4.0 ถึง 6.0
Specific gravity (at 15.5°C)	0.85	0.88
Density (Kg/m ³ at 15.5°C)	850.76	874.73
Carbon (wt%)	87	77
Hydrogen (wt%)	13	12
Oxygen (wt%)	0	11
Sulfur (ppm)	15	0 ถึง 15
Boiling point (°C)	180 ถึง 340	315 ถึง 350
Flash point (°C)	60 ถึง 80	100 ถึง 170
Cloud point (°C)	-35 ถึง 5	-3 ถึง 15
Pour point (°C)	-35 ถึง -15	-5 ถึง 10
Cetane number	40 ถึง 55	47 ถึง 65

2.4.1 วัตถุประสงค์สำหรับการผลิตไบโอดีเซล

วัตถุประสงค์ที่นำมาผลิตไบโอดีเซลส่วนใหญ่ต้องมืองค์ประกอบของไตรกลีเซอไรด์ซึ่งเป็นสารที่อยู่ในน้ำมันและไขมัน มีสมบัติเป็นสารที่ไม่มีขี้ ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น อีเทอร์ (Ether) เฮกเซน (Hexane) และคลอโรฟอร์ม (Chloroform) เป็นต้น โครงสร้างโมเลกุล

ของไตรกลีเซอไรด์ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน [21] ซึ่งวัตถุดิบที่สามารถนำมาผลิตไบโอดีเซลได้นั้นแบ่งออกเป็น 3 รุ่น ได้แก่

- **รุ่นที่หนึ่ง (First generation)** เป็นวัตถุดิบจากพืชผลทางการเกษตร หรือสัตว์ที่สามารถนำมาบริโภค หรือเป็นอาหารของมนุษย์ได้ เช่น น้ำมันพืช และไขมันสัตว์ เป็นต้น

- **น้ำมันพืช** คือ น้ำมันที่สามารถสกัดได้จากพืช เช่น น้ำมันดอกทานตะวัน น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันปาล์ม เป็นต้น ประกอบด้วยกรด 5 ชนิด ได้แก่ กรดปาล์มิติก (Palmitic acid) กรดสเตียริก (Stearic acid) กรดโอเลอิก (Oleic acid) กรดลิโนเลอิก (Linoleic acid) และกรดลิโนเลนิก (Linolenic acid) ในการนำน้ำมันพืชมาใช้สำหรับผลิตไบโอดีเซลมีข้อดีคือ เป็นของเหลวที่สกัดได้จากวัตถุดิบธรรมชาติ ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียน มีปริมาณกำมะถันต่ำ และสามารถย่อยสลายทางชีวภาพ แต่อย่างไรก็ตามการนำน้ำมันพืชที่บริโภคได้มาใช้จะทำให้ราคาต้นทุนการผลิตสูงขึ้น เนื่องจากราคาน้ำมันพืชมีราคาสูงเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล [22] ดังนั้นเพื่อลดต้นทุนการผลิตจึงมีการนำน้ำมันใช้แล้วที่ไม่สามารถบริโภค เช่น น้ำมันจากร้านอาหาร น้ำมันจากครัวเรือน และโรงงานอุตสาหกรรม มาใช้ทดแทน แต่อย่างไรก็ตามน้ำมันที่ใช้แล้วนั้นถือว่ามีคุณภาพต่ำในด้านของปริมาณความชื้น และกรดไขมันอิสระ จึงจำเป็นต้องมีการบำบัดก่อนนำมาผลิตไบโอดีเซลเพื่อลดความเข้มข้นของน้ำ และปริมาณของกรดไขมันอิสระ [23]

- **ไขมันสัตว์** ที่นิยมนำมาผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ ไขมันจากไก่ ไขมันจากหมู และไขมันจากวัว ซึ่งมีองค์ประกอบของกรดโอเลอิก กรดปาล์มิติก และกรดสเตียริก การใช้ไขมันสัตว์ในการผลิตไบโอดีเซลมีข้อดีคือ ราคาไม่แพง หาได้จากโรงงานอุตสาหกรรม และได้ปริมาณไบโอดีเซลมาก แต่มีข้อเสียคือ ไขมันสัตว์เป็นไขมันแข็ง ทำให้ต้องมีการให้ความร้อนในขั้นตอนของกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากไขมันสัตว์จะมีสมบัติในการไหลเทต่ำ แต่สามารถแก้ไขได้โดยการกลั่นแยกส่วนก่อนนำมาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification)

- **รุ่นที่สอง (Second generation)** เป็นวัตถุดิบที่ไม่สามารถนำมาบริโภคได้ หรือส่วนที่เหลือทางการเกษตร และอุตสาหกรรม ที่มีองค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) เป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ฟางข้าว และชานอ้อย เป็นต้น และมีองค์ประกอบของกรดไขมันที่คล้ายกับน้ำมันที่บริโภคได้ เช่น น้ำมันสบู่ดำที่มีองค์ประกอบของกรดไขมันคล้ายกับน้ำมันถั่วเหลือง ซึ่งวัตถุดิบรุ่นที่สองนี้ต้องนำไปผ่านกระบวนการปรับสภาพ (Pre-treatment process) เพื่อปรับสภาพโครงสร้างให้เหมาะสม และเข้าสู่กระบวนการทางเคมีเพื่อเปลี่ยนเป็นโครงสร้างให้พอร์มตัวเป็นองค์ประกอบทางเคมีใหม่ หรือเข้าสู่กระบวนการกลั่นหรือสกัดเพื่อให้เป็นของเหลว

- **รุ่นที่สาม (Third generation)** เป็นวัตถุดิบจากสาหร่ายขนาดเล็กและขนาดใหญ่ (Micro and macro algae) สามารถนำมาผ่านกระบวนการสกัด และแปรรูปทางเคมี

เพื่อผลิตเป็น ไบโอดีเซล หรือเชื้อเพลิงชีวภาพ ในการนำวัตถุดิบรุ่นที่สามมาใช้มีข้อดี คือ ใช้พื้นที่ในการเพาะเลี้ยงน้อยเมื่อเทียบกับชีวมวลรุ่นอื่น และสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตทำให้สามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ (Reducing CO₂ emission) แต่อย่างไรก็ตามยังพบปัญหาทางด้านเทคโนโลยีและลักษณะเฉพาะของสาหร่ายที่ยังเป็นอุปสรรคต่อการผลิตเชื้อเพลิงจากสาหร่ายในอุตสาหกรรม และเชิงพาณิชย์

2.4.2 ชนิดแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

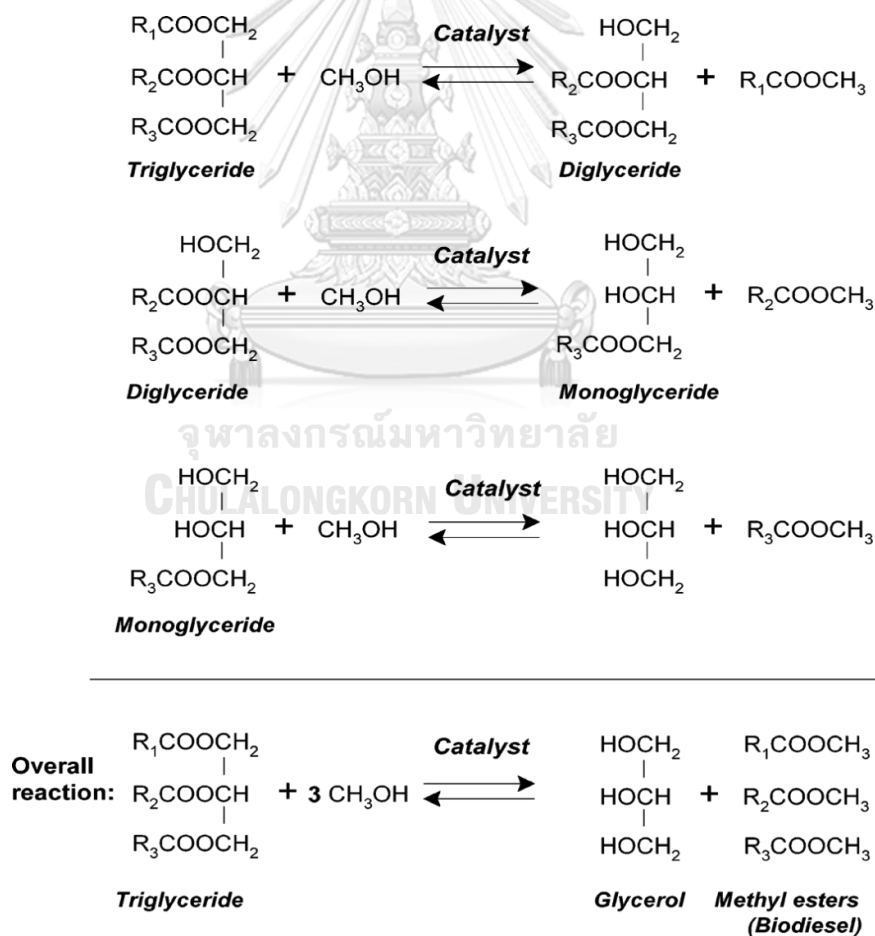
แอลกอฮอล์เป็นสารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะขึ้นอยู่กับแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ซึ่งแอลกอฮอล์ที่นิยมนำมาใช้คือ เมทานอล และเอทานอล เนื่องจากสามารถหาได้ง่าย ราคาถูก เป็นสารประกอบที่มีความเป็นขั้ว และโครงสร้างมีสายโซ่โมเลกุลที่สั้นทำให้สามารถทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นได้ไวกว่า ซึ่งสมบัติของแอลกอฮอล์แสดงดังตารางที่ 2.4 โดยอัตราส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันที่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์คือ 3 ต่อ 1 แต่ในกระบวนการผลิตจริงจำเป็นต้องใช้อัตราส่วนที่มากกว่า [24]

ตารางที่ 2.4 สมบัติของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

สมบัติ	ชนิดแอลกอฮอล์	
	เมทานอล	เอทานอล
ชื่อสามัญ	เมทิลแอลกอฮอล์ (Methyl alcohol)	เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol)
สูตรโครงสร้าง	CH ₃ OH	C ₂ H ₅ OH
Molecular weight	32.04	46.07
Boiling point (°C)	64.6	78.2
ลักษณะทางกายภาพ	ของเหลวใส ไม่มีสี	
ประโยชน์ของแอลกอฮอล์	<ul style="list-style-type: none"> - สารตั้งต้นในการผลิตเชื้อเพลิง - สารตั้งต้นในอุตสาหกรรมการผลิตพลาสติก และยา - ตัวทำละลายอินทรีย์ 	<ul style="list-style-type: none"> - สารตั้งต้นในการผลิตเชื้อเพลิง - สารตั้งต้นในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำหอม และยา - ใช้เป็นสารฆ่าเชื้อโรคในทางการแพทย์

2.4.3 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification reaction)

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างน้ำมันพืช ไขมันสัตว์ หรือน้ำมันพืชใช้แล้วกับ แอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล หรือ เอทานอล โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดหรือเบส โดยปกติใน น้ำมันพืชจะประกอบไปด้วยกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid) น้ำ และสิ่งเจือปนอื่น ๆ ดังนั้นในการนำน้ำมันพืชมาใช้เป็นเชื้อเพลิง จำเป็นต้องผ่านกระบวนการทางเคมีเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างใน ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันและแอลกอฮอล์ โครงสร้างของน้ำมันจะเปลี่ยน จากไตรกลีเซอไรด์ (Triglycerides) เป็นไดกลีเซอไรด์ (Diglycerides) และ โมโนกลีเซอไรด์ (Monoglycerides) เมื่อเสร็จสิ้นปฏิกิริยาผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของเมทิลเอสเทอร์ (Methyl Ester) เมื่อใช้แอลกอฮอล์ชนิด เมทานอล หรือ เอทิลเอสเทอร์ (Ethyl Ester) เมื่อใช้แอลกอฮอล์ชนิดเอทานอล และได้ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงเป็น กลีเซอรอล (Glycerin หรือ Glycerol) [25] ดังภาพที่ 2.1



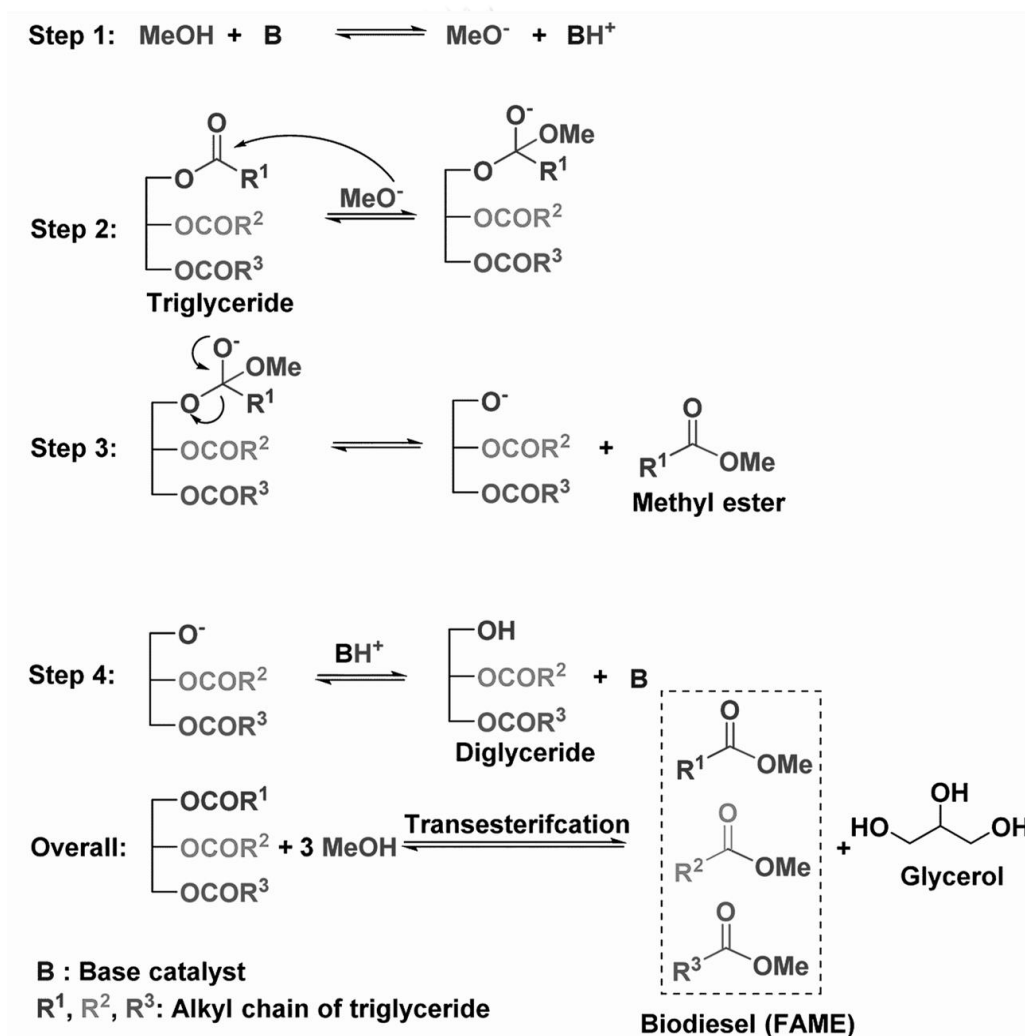
รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมัน และแอลกอฮอล์

2.4.4 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล

การผลิตไบโอดีเซลสามารถแบ่งออกได้ 2 กระบวนการ คือ กระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และกระบวนการที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล

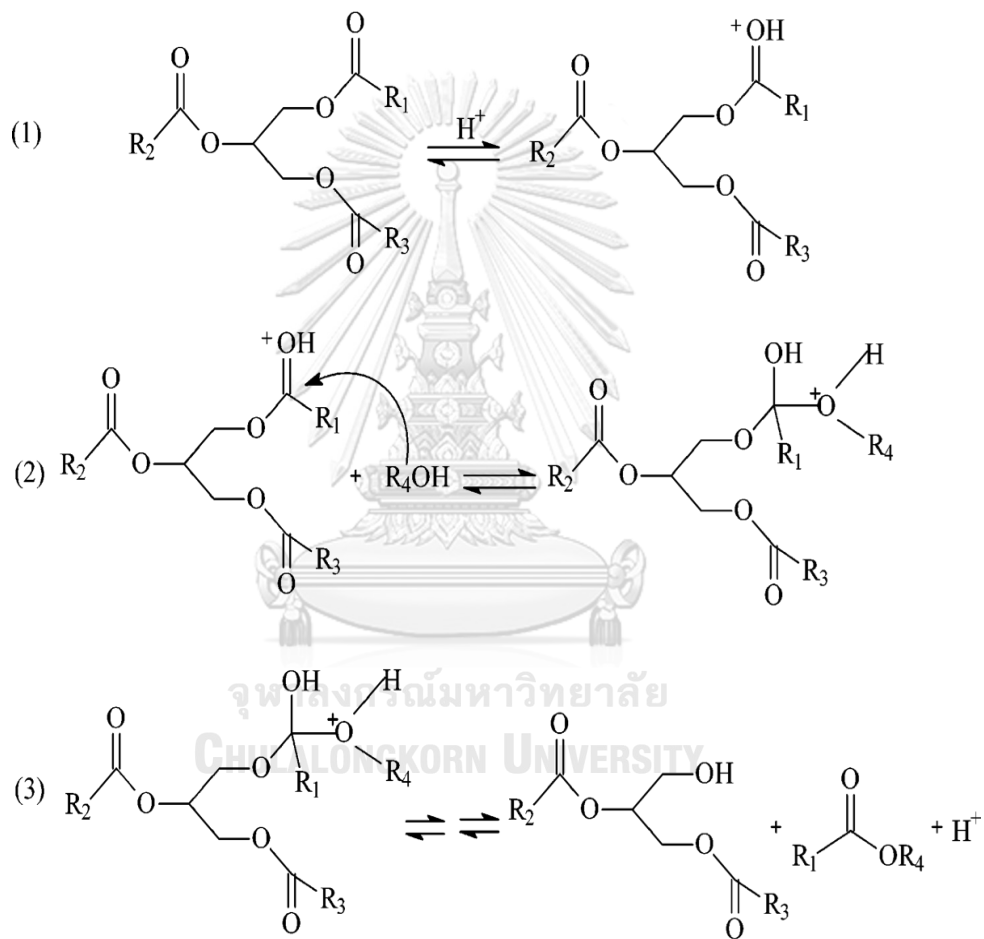
2.4.4.1 กระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic process)

การนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันจะช่วยให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี และผลิตภัณฑ์เกิดได้ดีขึ้น โดยชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแบ่งได้ดังนี้ [26]



รูปที่ 2.7 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส

- **ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส (Base Catalyst)** ที่นิยมในปัจจุบัน คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งควรใช้ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ชนิดเมทานอลหรือเอทานอล โดยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยารวดเร็วกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด อีกทั้งยังให้ผลิตภัณฑ์ในปริมาณที่สูง ซึ่งปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 2.7 แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้มีข้อจำกัดคือ ถ้าปริมาณน้ำและกรดไขมันอิสระในน้ำมันมีสูงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาสะพอนิฟิเคชัน (Saponification) กับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการคือ สบู่ ส่งผลทำให้ร้อยละผลได้ของการเปลี่ยนแปลงไปเป็นไบโอดีเซลที่ได้ลดลง



R_1, R_2, R_3 : carbon chain of the fatty acids

R_4 : alkyl group of the alcohol

รูปที่ 2.8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด [27]

- **ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด (Acid Catalyst)** เช่น กรดซัลฟิวริก กรดฟอสฟอริก และกรดซัลโฟนิก แต่ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ กรดซัลฟิวริก ตัวเร่งชนิดนี้จะทำให้ได้ผลผลิตน้ำมันไบโอดีเซลในปริมาณมาก และไม่เกิดปัญหาการเกิดสบู่จากกรดไขมันอิสระจึงเหมาะสำหรับน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่มีกรดไขมันอิสระมาก ซึ่งปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 2.8 แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยานาน และสามารถทำให้เกิดการสึกกร่อนของอุปกรณ์ต่างๆได้

- **ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอนไซม์ (Enzyme Catalyst)** ที่นิยมใช้คือ เอนไซม์ไลเปส ซึ่งถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการต่างๆ เช่น ไฮโดรไลซิสของกลีเซอรอล แอลกอฮอล์ไลซิส (Alcoholysis) และแอซิโดไลซิส (Acidolysis) ข้อดีของเอนไซม์ไลเปส คือ สามารถแยกกลีเซอรอลออกมาได้ง่าย มีการเกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกโดยไม่มีของเสียออกมาจากกระบวนการ แต่ในทางกลับกันค่าใช้จ่ายในการใช้เอนไซม์ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะค่อนข้างสูง

แต่อย่างไรก็ตามในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งชนิดที่เป็นกรด เบส และเอนไซม์ มีข้อเสียคือ

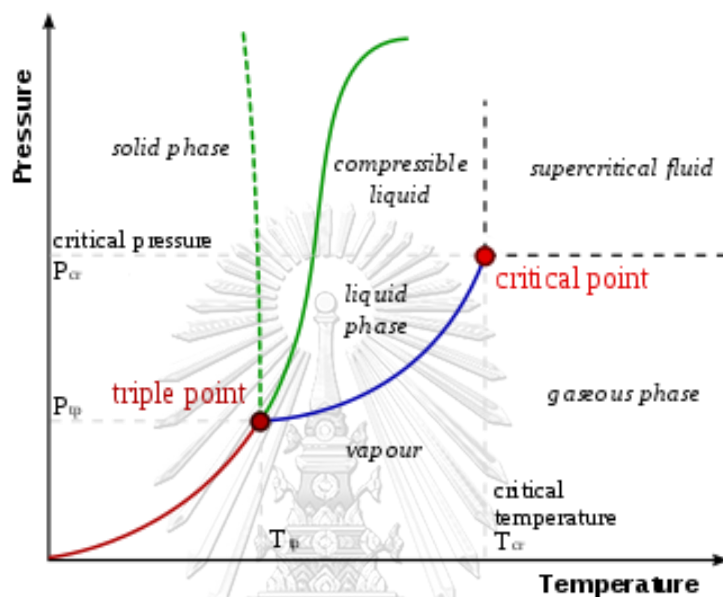
1. การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดจะต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่นาน
2. การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสจะทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระในน้ำมันซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาสะพอนิฟิเคชันได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ
3. การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์มีราคาที่สูงมากอาจจะทำให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้น และไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้ผลิตในระดับอุตสาหกรรม

ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งกรดและเบส เมื่อได้ผลิตภัณฑ์ จะต้องนำไปล้างน้ำเพื่อล้างตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากไบโอดีเซลที่เป็นผลิตภัณฑ์จึงทำให้เกิดน้ำเสียเป็นจำนวนมาก

2.4.4.2 กระบวนการที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non - Catalytic process)

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถทำได้โดยการใช้อุณหภูมิ และความดันที่สูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature, T_c) และความดันวิกฤตของสาร (Critical pressure, P_c) จะทำให้สารตั้งต้นอยู่ในภาวะเหนือวิกฤต (Supercritical condition) ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งสารแต่ละชนิดจะมีอุณหภูมิและความดันวิกฤตที่แตกต่างกันแสดงดังตารางที่ 2.5 ที่ภาวะเหนือวิกฤต สมบัติของน้ำมันและแอลกอฮอล์จะมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ซึ่งของไหลที่ภาวะเหนือวิกฤตจะมีความหนืดและการแพร่ที่ใกล้เคียงกับแก๊ส ทำให้สามารถแพร่กระจายได้อย่างทั่วถึง และระยะห่างระหว่างโมเลกุลของสารตั้งต้นทั้งสองจะลดลงเกิดแรงดึงดูดระหว่างกันมากขึ้น ทำ

ให้สารที่มีสภาพขั้วต่างกัน เช่น น้ำมันและแอลกอฮอล์สามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ซึ่งจะสามารถทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น ในส่วนของความหนาแน่นของของไหลในภาวะเหนือวิกฤตจะมีค่าใกล้เคียงกับของเหลว ทำให้โมเลกุลของน้ำมันถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของของไหลภาวะเหนือวิกฤตทำให้เกิดอันตรกิริยาซึ่งกันและกัน (Interaction) จึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ดี และรวดเร็ว [28]



รูปที่ 2.9 แผนภาพความดันและอุณหภูมิที่ภาวะเหนือวิกฤต

ตารางที่ 2.5 อุณหภูมิและความดันวิกฤตของสารชนิดต่างๆ [29]

สารเคมี	Critical temperature (T_c) ($^{\circ}\text{C}$)	Critical pressure (P_c) (Bar)
เมทานอล (Methanol)	239.6	80.9
เอทานอล (Ethanol)	240.9	61.4
เมทิลแอซีเตต (Methyl acetate)	233.7	45.3
เอทิลแอซีเตต (Ethyl acetate)	250.2	38.3

2.4.5 มาตรฐานไบโอดีเซล

มาตรฐานของไบโอดีเซลทั่วโลกแบ่งออกเป็น 2 มาตรฐานคือ มาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา ASTM D6751 และมาตรฐานของยุโรป EN 14214 ในส่วนประเทศไทยมีการกำหนดมาตรฐานของไบโอดีเซลโดยกรมธุรกิจ และกระทรวงพลังงาน โดยยึดตามมาตรฐานยุโรป EN 14214 เพื่อควบคุมคุณภาพของไบโอดีเซล แบ่งเป็น 2 มาตรฐานคือ มาตรฐานไบโอดีเซล

ประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน และมาตรฐานไบโอดีเซลเครื่องยนตร์การเกษตรแสดงดังประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน ปี พ.ศ. 2562 เรื่องกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน แสดงดังรูปที่ 2.10 นอกจากนี้ยังมีประกาศของกรมธุรกิจ และกระทรวงพลังงานเพื่อควบคุมมาตรฐานของน้ำมันดีเซลซึ่งแสดงดังประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน ปี พ.ศ. 2563 แสดงดังรูปที่ 2.10

รายละเอียดแนบท้ายประกาศกรมธุรกิจพลังงาน
เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน
พ.ศ. ๒๕๖๒

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	ชนิดที่ ๑	ชนิดที่ ๒	วิธีทดสอบ ^{๗๔}	
๑	เมทิลเอสเทอร์ (Methyl esters)	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt.	ไม่ต่ำกว่า	๙๖.๕	๙๖.๕	EN ๑๔๑๐๓
๒	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ ๑๕ องศาเซลเซียส (Density at 15°C)	กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร kg/m ³	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	๘๖๐ ๙๐๐	๘๖๐ ๙๐๐	ASTM D ๑๒๙๘
๓	ความหนืด ณ อุณหภูมิ ๔๐ องศาเซลเซียส (Viscosity at 40°C)	เซนติสโตกส์ cSt	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	๓.๕ ๕.๐	๓.๕ ๕.๐	ASTM D ๔๔๕
๔	จุดวาบไฟ (Flash point)	องศาเซลเซียส °C	ไม่ต่ำกว่า	๑๒๐	๑๒๐	ASTM D ๙๓
๕	กำมะถัน (Sulphur)	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt.	ไม่สูงกว่า	๐.๐๐๑๐	๐.๐๐๑๐	ASTM D ๒๖๒๒
๖	กากถ่าน จากร้อยละ ๑๐ ของส่วนที่เหลือจากการกลั่น (Carbon residue on 10% distillation residue)	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt.	ไม่สูงกว่า	๐.๓๐	๐.๓๐	ASTM D ๔๕๓๐
๗	จำนวนซีเทน (Cetane number)		ไม่ต่ำกว่า	๕๑	๕๑	ASTM D ๖๑๓
๘	เถ้าซัลเฟต (Sulphated ash)	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt.	ไม่สูงกว่า	๐.๐๒	๐.๐๒	ASTM D ๘๗๔
๙	น้ำ (Water)	มิลลิกรัม/กิโลกรัม mg/kg	ไม่สูงกว่า	๕๐๐	๕๐๐	EN ISO ๑๒๙๓๗
๑๐	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด (Total contamination)	มิลลิกรัม/กิโลกรัม mg/kg	ไม่สูงกว่า	๒๔	๒๔	EN ๑๒๖๖๒
๑๑	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper strip corrosion)		ไม่สูงกว่า	หมายเลข ๑	หมายเลข ๑	ASTM D ๑๓๐
๑๒	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ ๑๑๐ องศาเซลเซียส (Oxidation stability at 110°C)	ชั่วโมง hours	ไม่ต่ำกว่า	๑๐	๑๐	EN ๑๕๗๕๑
๑๓	ค่าความเป็นกรด (Acid value)	มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม mg KOH/g	ไม่สูงกว่า	๐.๕๐	๐.๕๐	ASTM D ๖๖๔

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงสุด	ชนิดที่ ๑	ชนิดที่ ๒	วิธีทดสอบ ^{๑/}	
๑๔	ค่าไอโอดีน (Iodine value)	กรัมไอโอดีน/๑๐๐ กรัม g Iodine/100g	ไม่สูงกว่า	๑๒๐	๑๒๐	EN ๑๔๑๑๑
๑๕	กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ (Linolenic acid methyl ester)	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt.	ไม่สูงกว่า	๑๒.๐	๑๒.๐	EN ๑๔๑๐๓
๑๖	เมทานอล (Methanol)	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt.	ไม่สูงกว่า	๐.๒๐	๐.๒๐	EN ๑๔๑๑๐
๑๗	โมนอกลิเซอไรด์ (Monoglyceride)	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt.	ไม่สูงกว่า	๐.๗๐	๐.๔๐	EN ๑๔๑๐๕
๑๘	ไดกลีเซอไรด์ (Diglyceride)	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt.	ไม่สูงกว่า	๐.๒๐	๐.๒๐	EN ๑๔๑๐๕
๑๙	ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride)	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt.	ไม่สูงกว่า	๐.๒๐	๐.๒๐	EN ๑๔๑๐๕
๒๐	กลีเซอรินอิสระ (Free glycerin)	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt.	ไม่สูงกว่า	๐.๐๒	๐.๐๒	EN ๑๔๑๐๕
๒๑	กลีเซอรินทั้งหมด (Total glycerin)	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt.	ไม่สูงกว่า	๐.๒๕	๐.๒๕	EN ๑๔๑๐๕
๒๒	โลหะกลุ่ม ๑ (โซเดียมและโพแทสเซียม) (Group I metals; Na + K)	มิลลิกรัม/กิโลกรัม mg/kg	ไม่สูงกว่า	๕.๐	๕.๐	EN ๑๔๕๓๘
	โลหะกลุ่ม ๒ (แคลเซียมและแมกนีเซียม) (Group II metals; Ca + Mg)	มิลลิกรัม/กิโลกรัม mg/kg	ไม่สูงกว่า	๕.๐	๕.๐	EN ๑๔๕๓๘
๒๓	ฟอสฟอรัส (Phosphorus)	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt.	ไม่สูงกว่า	๐.๐๐๑๐	๐.๐๐๑๐	EN ๑๔๑๐๗
๒๔	จุดขุ่น (Cloud point)	องศาเซลเซียส °C	รายงาน ^{๒/}			
๒๕	จุดอุดตันการไหลที่อุณหภูมิต่ำ (Cold flow plugging point)	องศาเซลเซียส °C	รายงาน ^{๒/}			
๒๖	สารเติมแต่ง (ถ้ามี) (Additives, if any)	ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจาก อธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน				

หมายเหตุ ๑/ ให้ใช้วิธีทดสอบที่กำหนดในรายละเอียดแนบท้ายนี้หรือวิธีอื่นใดที่ให้ผลเทียบเท่า ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดในรายละเอียดแนบท้ายนี้

๒/ ให้ผู้ค้านำมาแนบรายงานค่าจุดขุ่นและค่าจุดอุดตันการไหลที่อุณหภูมิต่ำต่ออธิบดีกรมธุรกิจพลังงานเป็นรายไตรมาส ภายในวันที่ ๑๕ ของเดือนถัดจากเดือนสุดท้ายของไตรมาสนั้น

รูปที่ 2.10 ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน ปี พ.ศ. 2562 เรื่องกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซล ประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน [30]

สำหรับการนำไปใช้ไฮโดรคาร์บอนในทางการค้านั้นจะมีอยู่ 2 ลักษณะคือ การนำไฮโดรคาร์บอนผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนต่างๆ และการใช้ไฮโดรคาร์บอนแทนน้ำมันดีเซล ไฮโดรคาร์บอนที่ใช้ในทางการค้ามีอยู่หลายชนิดโดยใช้สัญลักษณ์แทนไฮโดรคาร์บอน คือ B ส่วนตัวเลขที่ต่อท้ายคือ สัดส่วนของน้ำมันไฮโดรคาร์บอนที่มีการผสมลงไปในน้ำมันดีเซล เช่น B5 คือ การผสมไฮโดรคาร์บอนกับน้ำมันดีเซลให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยมีไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และดีเซลร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก B20 คือ การผสมไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก กับดีเซลร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก และ B100 คือน้ำมันไฮโดรคาร์บอนบริสุทธิ์ โดยมีมาตรฐานของน้ำมันดีเซลตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน ปี พ.ศ. 2563 [29] เพื่อควบคุมมาตรฐานของน้ำมันดีเซลซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.11

ตารางหมายเลข ๑ ลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล
แนบท้ายประกาศกรมธุรกิจพลังงาน
เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล
พ.ศ. ๒๕๖๓

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงสุด	น้ำมันดีเซล				วิธีทดสอบ/
			รวมค่า	บี ๗	บี ๒๐	พิกัด	
๑	ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ ๑๕.๖/๑๕.๖ องศาเซลเซียส (Specific gravity at 15.6/15.6) °C	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	๐.๘๑	๐.๘๑	๐.๘๑	-	ASTM D ๑๖๒๘
๒	จำนวนซีเทน (Cetane number) หรือ ดัชนีซีเทน (Calculated cetane index)	ไม่ต่ำกว่า	๕๐	๕๐	๕๐	๔๕	ASTM D ๖๑๓ ASTM D ๙๗๖
๓	ความหนืด (Viscosity) เซนติสโตกส์ (cSt)						ASTM D ๔๔๕
	๓.๑ ณ อุณหภูมิ ๔๐ องศาเซลเซียส หรือ (at 40 °C)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	๓.๘	๓.๘	๓.๘	-	
	๓.๒ ณ อุณหภูมิ ๕๐ องศาเซลเซียส (at 50 °C)	ไม่สูงกว่า	๔.๑	๔.๑	๔.๑	๘.๐	
๔	จุดไหลเท (Pour point) °C	ไม่สูงกว่า	๑๐	๑๐	๑๐	๑๖	ASTM D ๙๗
๕	กำมะถัน (Sulfur) ғыөнวันที่ ๑ มกราคม พ.ศ. ๒๕๖๗						ASTM D ๒๖๒๒
	มีลิมิตต่อกรัม (mg/kg)	ไม่สูงกว่า	๕๐	๕๐	๕๐	-	
	ร้อยละโดยน้ำหนัก (% wt.)	ไม่สูงกว่า	-	-	-	๑.๕	
	ตั้งแต่วันที่ ๑ มกราคม พ.ศ. ๒๕๖๗ เป็นต้นไป						
	มีลิมิตต่อกรัม (mg/kg)	ไม่สูงกว่า	๑๐	๑๐	๑๐	-	
	ร้อยละโดยน้ำหนัก (% wt.)	ไม่สูงกว่า	-	-	-	๑.๕	
๖	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper strip corrosion)	ไม่สูงกว่า	หมายเลข ๑	หมายเลข ๑	หมายเลข ๑	-	ASTM D ๑๖๐
๗	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation stability)						
	กรัมต่อลูกบาศก์เมตร (g/m ³)	ไม่สูงกว่า	๒๕	๒๕	๒๕	-	ASTM D ๒๖๗๕
	ชั่วโมง (hours)	ไม่ต่ำกว่า	๓๕	๓๕	๓๕	-	FN ๑๕๗๕๑

(ต่อ ๒)

-๒-

ตารางหมายเลข ๑ ลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล (ต่อ)
 แนบท้ายประกาศกรมธุรกิจพลังงาน
 เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล
 พ.ศ. ๒๕๖๓

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงสุด	น้ำมันดีเซล				วิธีทดสอบ ^{๑/}	
			หมุนเร็ว			หมุนช้า		
			ธรรมดา	บี ๗	บี ๒๐			
๘	กากถ่าน จากร้อยละ ๓๐ ของส่วนที่เหลือ จากการกลั่น (Carbon residue on 10% distillation residue)	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt.	ไม่สูงกว่า	๐.๓๐	๐.๓๐	๐.๓๐	-	ASTM D ๔๕๓๐
๙	น้ำและตะกอน (Water and sediment)	ร้อยละโดยปริมาตร % vol.	ไม่สูงกว่า	-	-	-	๐.๓	ASTM D ๒๗๐๔
๑๐	น้ำ (Water)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม mg/kg	ไม่สูงกว่า	๒๐๐	๓๐๐	๓๐๐	-	EN ISO ๑๒๙๓๗
๑๑	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด (Total contamination)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม mg/kg	ไม่สูงกว่า	๒๔	๒๔	๒๔	-	EN ๑๒๖๖๒
๑๒	เถ้า (Ash)	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt.	ไม่สูงกว่า	๐.๐๑	๐.๐๑	๐.๐๑	๐.๐๒	ASTM D ๔๘๓
๑๓	จุดวาบไฟ (Flash point)	องศาเซลเซียส °C	ไม่ต่ำกว่า	๕๒	๕๒	๕๒	๕๒	ASTM D ๙๓
๑๔	การกลั่น (Distillation)	องศาเซลเซียส °C						ASTM D ๘๖
	อนุกรมของส่วนที่กลั่นได้โดยปริมาตรในอัตราร้อยละเก้าสิบ (90% Recovered)		ไม่สูงกว่า	๓๕๗	๓๕๗	๓๕๗	-	
๑๕	โพลีไซคลิก อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbon)	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt.						IP ๓๑๓
	ก่อนวันที่ ๑ มกราคม พ.ศ. ๒๕๖๗		ไม่สูงกว่า	๑๑	๑๑	๑๑	-	
	ตั้งแต่วันที่ ๑ มกราคม พ.ศ. ๒๕๖๗ เป็นต้นไป		ไม่สูงกว่า	๘	๘	๘	-	

(ต่อ -๓-)

-๓-

ตารางหมายเลข ๓ ลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล (ต่อ)
 แนบท้ายประกาศกรมธุรกิจพลังงาน
 เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล
 พ.ศ. ๒๕๖๓

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงสุด	น้ำมันดีเซล				วิธีทดสอบ ^{๓/}
			หมุนเร็ว			หมุนช้า	
			ธรรมดา	ปี ๗	ปี ๒๐		
๑๖	สี (Colour) ๑๖.๑ ชนิดของสี (Hue) ๑๖.๒ ความเข้มของสี (Intensity)		ม่วง เทียบเท่าสี มาตรฐาน ^{๒/}	เหลือง - ๔.๐	แดง เทียบเท่าสี มาตรฐาน ^{๒/}	น้ำตาล ๔.๕ ๗.๕	(๑) น้ำมันดีเซลหมุนเร็ว ปี ๗ และน้ำมันดีเซล หมุนช้า ให้เปรียบเทียบ ความเข้มของสีตามมาตรฐาน ASTM D ๑๕๐๐ (๒) น้ำมันดีเซลหมุนเร็ว ธรรมดา และน้ำมันดีเซล หมุนเร็วปี ๒๐ ให้ เปรียบเทียบความเข้มของ สีกับน้ำมันมาตรฐาน ที่เตรียมขึ้นใหม่ โดยให้สี ละลายในน้ำมันก่อนการ อ่านสีให้มีปริมาณเท่ากับ ที่กำหนด แล้วนำมาบรรจุ แยกกันในภาชนะที่ใช้ ในการวัดสีตามวิธีทดสอบ ASTM D ๑๕๐๐ แล้วตรวจพินิจด้วยสายตา หรือตามมาตรฐาน ASIM D ๒๑๗๒ EN ๑๔๐๗๘
๑๗	ไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ ของกรดไขมัน (Methyl ester of fatty acids) ร้อยละโดยปริมาตร % vol.	ไม่น้อยกว่า และ ไม่สูงกว่า	๔	๖.๖	๑๔	-	
๑๘	คุณสมบัติการหล่อลื่น รอยขีดข่วน (Lubricity wear scar) ไมครอมิเตอร์ micrometer	ไม่สูงกว่า	๑๐	๗	๒๐	-	CEC F-๐๖-๔๖
๑๙	สารเติมแต่ง (ถ้ามี) (Additive, if any)		ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจาก อธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน				

หมายเหตุ ๑/ ให้ใช้วิธีทดสอบที่กำหนดในตารางแนบท้ายนี้หรือวิธีอื่นใดที่ให้ผลเทียบเท่า ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดในตารางแนบท้ายนี้
 ๒/ สีมาตรฐานเตรียมได้จากการนำน้ำมันดีเซลหมุนเร็วธรรมดา ที่มีความเข้มของสีก่อนการอ่าน ซึ่งวัดตามมาตรฐาน ASTM D ๑๕๐๐ เทากับ ๐.๕
 มาช้อนด้วยสีม่วงที่เป็นสารประกอบจำพวก ๑,๔ - dialkylamino anthraquinone และ ๒ - naphthalenol [(phenylazo) phenyl] azo
 alkyl derivatives ในอัตราส่วน ๑ ต่อ ๑ โดยน้ำหนัก ปริมาณเนื้อสีที่ใช้ ๒๐ มิลลิกรัมต่อลิตร
 ๓/ สีมาตรฐานเตรียมได้จากการนำน้ำมันดีเซลหมุนเร็วปี ๒๐ ที่มีความเข้มของสีก่อนการอ่าน ซึ่งวัดตามมาตรฐาน ASTM D ๑๕๐๐ เทากับ ๒.๐
 มาช้อนด้วยสีแดงที่เป็นสารประกอบจำพวก ๒ - naphthalenol [(phenylazo) phenyl] azo alkyl derivatives ปริมาณเนื้อสีที่ใช้
 ๒๐ มิลลิกรัมต่อลิตร

รูปที่ 2.11 ประกาศของกรมธุรกิจและพลังงาน ปี พ.ศ. 2563 เรื่องกำหนดลักษณะและ
 คุณภาพน้ำมันดีเซล [31]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Oliveira ER และคณะ [32] ศึกษาการสกัดน้ำมันกาแฟจากเมล็ดกาแฟบดละเอียด และกาแฟที่ผ่านกระบวนการสกัดน้ำมันด้วยวิธีเชิงกล ด้วยตัวทำละลาย 6 ชนิด คือ แอซีโทน เอทานอล เอทิลแอซีเตต ไอโซโพรพานอล เฮกเซน และปิโตรเลียมอีเทอร์ ด้วยการสกัดแบบซอกท์เลต (Soxhlet) โดยใช้อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวเท่ากับ 1 ต่อ 5 โดยน้ำหนัก และเวลาในการสกัด 3 และ 5 ชั่วโมงผลการทดลองพบว่าเมื่อทำการสกัดเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ปริมาณน้ำมันกาแฟที่สกัดได้อยู่ในช่วงร้อยละ 6.44 ถึง 11.78 สำหรับเมล็ดกาแฟบดละเอียด และร้อยละ 6.65 ถึง 9.98 สำหรับกาแฟที่ผ่านกระบวนการสกัดน้ำมันด้วยวิธีเชิงกล และเมื่อเพิ่มเวลาในการสกัดจาก 3 เป็น 5 ชั่วโมงพบว่า ปริมาณน้ำมันกาแฟที่สกัดได้จากสารตั้งต้นทั้งสองมีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบตัวทำละลายทั้งหมดพบว่า เมื่อใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายจะทำให้สามารถสกัดน้ำมันจากกาแฟออกมาได้ในปริมาณมากที่สุดเท่ากับร้อยละ 14.16 สำหรับเมล็ดกาแฟบดละเอียด และร้อยละ 13.34 สำหรับกาแฟที่ผ่านกระบวนการสกัดน้ำมันด้วยวิธีเชิงกล

Son J. และคณะ [33] ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากกากกาแฟเปียก (Wet spent coffee grounds) โดยเมทานอลภาวะเหนือวิกฤต พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากกากกาแฟเปียกคือที่ ความดัน 9 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที และอัตราส่วนของกากกาแฟเปียกและแอลกอฮอล์ 1 ต่อ 5 จะทำให้ได้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์สูงสุดเท่ากับร้อยละ 86.33 ซึ่งการนำกากกาแฟเปียกมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลจะช่วยลดต้นทุน และขั้นตอนของกระบวนการทำให้แห้ง และยังช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการฝังกลบกากกาแฟ

Rathnam VM และคณะ [34] ศึกษาการสังเคราะห์กรดไขมันเอทิลเอสเทอร์จากสาหร่ายแห้ง (*Schizochitrium limacinum*) ในเอทานอล และเอทิลแอซีเตต ภาวะเหนือวิกฤต โดยศึกษาอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสาหร่ายต่อแอลกอฮอล์ 1 ต่อ 6 ถึง 1 ต่อ 12 ความดัน 16 ถึง 20 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 250 ถึง 320 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 ถึง 60 นาที สำหรับเอทานอลภาวะเหนือวิกฤต และที่อุณหภูมิ 300 ถึง 380 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 ถึง 80 นาที สำหรับเอทิลแอซีเตตภาวะเหนือวิกฤต จากผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนของสาหร่ายต่อแอลกอฮอล์ และความดันที่เหมาะสมทั้งในกระบวนการผลิตด้วยเอทานอล และเอทิลแอซีเตต ภาวะเหนือวิกฤตคือ 1 ต่อ 10 และ 20 เมกะพาสคัล ตามลำดับ สำหรับกระบวนการเอทา

นอลภาวะเหนือวิกฤตภาวะที่เหมาะสมคือที่เวลาการทำปฏิกิริยา 50 นาที และอุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ซึ่งได้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ถึงร้อยละ 95 แต่ในขณะที่กระบวนการเอทิลแอซีเตตภาวะเหนือวิกฤตสามารถผลิตกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ได้เพียงร้อยละ 60 ที่เวลาการทำปฏิกิริยา 50 นาที และอุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าปฏิกิริยาการสังเคราะห์กรดไขมันเอทิลเอสเทอร์จากสาหร่ายด้วยเอทานอลภาวะเหนือวิกฤตสามารถให้ผลิตภัณฑ์ในปริมาณที่สูงกว่าการใช้เอทิลแอซีเตตภาวะเหนือวิกฤต แต่การใช้เอทิลแอซีเตตภาวะเหนือวิกฤตจะช่วยลดปริมาณกลีเซอรอลที่เป็นผลพลอยได้ของกระบวนการได้

Yuliana และคณะ [35] หารภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากของเสียในอุตสาหกรรมฟอกหนัง (Leather tanning waste) โดยเอทานอลภาวะเหนือวิกฤต ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ที่อุณหภูมิ 300 ถึง 375 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 ถึง 50 นาที และอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันและแอลกอฮอล์ 1 ต่อ 35 ถึง 1 ต่อ 45 ที่ความดันคงที่ 15 เมกะพาสคัล ในการศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาพบว่าเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 10 ถึง 40 นาที ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์มีปริมาณเพิ่มขึ้น และปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์จะไม่มีค่าเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเป็น 50 นาที เมื่อทำการศึกษาผลของอุณหภูมิพบว่าปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์จะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และจะลดลงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 400 องศาเซลเซียส และสุดท้ายในการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันและแอลกอฮอล์พบว่าปริมาณแอลกอฮอล์ที่เพิ่มสูงขึ้นจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้จากกระบวนการ ซึ่งภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลด้วยเอทานอลภาวะเหนือวิกฤตคือที่ ความดัน 15 เมกะพาสคัล อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 47 นาที และอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันและแอลกอฮอล์ 1 ต่อ 40 ซึ่งทำให้ได้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์สูงสุดเท่ากับร้อยละ 98.91

Caroline และคณะ [36] ศึกษาผลของการเติมน้ำในตัวทำละลายเอทานอล (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.6) สำหรับการผลิตกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์จากของเสียในปอดักไขมันด้วยเอทานอลภาวะเหนือวิกฤต ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องโดยใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกันตั้งแต่ 275 ถึง 325 องศาเซลเซียส และเวลาของสารในเครื่องปฏิกรณ์ 10 ถึง 30 นาที โดยใช้เอทานอลที่มีความเข้มข้นของน้ำแตกต่างกันตั้งแต่ 2.5 ถึง 10 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองที่ได้พบว่าการเติมน้ำในปริมาณร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก จะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในช่วงเวลา 10 ถึง 20 นาที และเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำเป็นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์จะมีค่าไม่

เปลี่ยนแปลงมากเมื่อเทียบกับการเติมน้ำที่ร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก แต่เมื่อเติมน้ำในปริมาณที่มากขึ้น ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ที่ได้จะลดลง ในงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าสามารถใช้เอทานอลที่มีน้ำเป็น องค์ประกอบ (Hydrous ethanol) แทนเอทานอลปราศจากน้ำ (Anhydrous ethanol) ใน กระบวนการการผลิตกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ซึ่งจะสามารถช่วยลดต้นทุนของการผลิตได้



บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี และเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- กากกาแฟ (Spent coffee grounds, SCGs) จาก Starbucks Coffee สาขา จามจุรีสแควร์ และสามย่านมิตรทาวน์
- เอทานอล 95% (Hydrous ethanol) Food grade จาก SAC SCI-ENG Limited Partnership
- เอทานอล 99.8% (Anhydrous ethanol) Analytical grade จาก RCL Labscan
- เฮปเทน 99.5% (n-Heptane) Analytical grade จาก Fisher Scientific
- เอทิลปาล์มมิเตต 99% (Ethyl palmitate) Analytical grade จาก Sigma Aldrich
- เอทิลลิโนเลต 98% (Ethyl linoleate) Analytical grade จาก Sigma Aldrich
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) จาก Merck Germany
- โพแทสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลต (Potassium hydrogen phthalate, KHP)
- โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide pellets, KOH) จาก KemAus
- กรดไฮโดรคลอริก 37% (Hydrochloric Acid, HCl) จาก Merck Germany
- ฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein)
- ปีโตรเลียมอีเทอร์ (Petroleum Ether) Analytical grade จาก J.T. Baker
- ชุดสกัดซอกซ์เลต (Soxhlet extraction apparatus)
- เครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (Rotary evaporator) ยี่ห้อ Hei-CHILL 350
- ชุดรีฟลักซ์
- อ่างควบคุมอุณหภูมิ
- ขวดก้นกลม (Round bottom flask)
- ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask)
- เครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ (Batch tube reactor)
- เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (Continuous tubular reactor)
- เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography, GC) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC-

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟบดด้วยเอทานอลภาวะเหนือวิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์และแบบต่อเนื่อง ที่ความดันคงที่ 15 เมกาพาสคัล และอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแฟบดต่อเอทานอลคงที่ 1 ต่อ 30 โดยในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์จะศึกษาที่อุณหภูมิ 275 ถึง 350 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 ถึง 40 นาที และในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องจะศึกษาที่อุณหภูมิ 275 ถึง 325 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลขาเข้า 2.25 และ 3 กรัมต่อนาที โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1 การเตรียมกากกาแฟบด

นำกากกาแฟบดไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อคำนวณหาปริมาณความชื้นเริ่มต้น จากนั้นนำกากกาแฟบดที่ผ่านการอบ 20 กรัม ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อหาปริมาณความชื้นภายในกากกาแฟบดก่อนนำไปใช้งาน

3.2.2 การสกัดน้ำมันจากกากกาแฟบดด้วยชุดสกัดซอกท์เลต

ชั่งตัวอย่างกากกาแฟบดแห้งประมาณ 20 กรัม ใส่ในหลอดกระดาษกรองสำหรับการสกัด (Cellulose extraction thimble) โดยใช้ตัวทำละลายเอทานอลบริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยปริมาตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร จากนั้นเปิดเครื่องทำความร้อนให้ตัวทำละลายระเหยขึ้นด้านบนผ่านระบบหล่อเย็น และควบแน่นลงมาผ่านตัวอย่างที่บรรจุในหลอดกระดาษกรองสำหรับการสกัด หลังจากนั้นสารผสมระหว่างตัวทำละลายและสารที่สกัดได้จะไหลลงสู่ขวดก้นกลม และตัวทำละลายจะระเหยกลับขึ้นไป และถูกควบแน่นไหลผ่านตัวอย่างซ้ำแบบนี้จนกระทั่งตัวทำละลายที่ถูกควบแน่นลงมามีลักษณะไม่มีสี จากนั้นนำตัวอย่างที่สกัดได้ไปหล่อเย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง และนำไประเหยตัวทำละลายด้วยเครื่องระเหยแบบหมุน (Rotary evaporator) และชั่งน้ำหนักน้ำมันที่สกัดได้เพื่อคำนวณหาปริมาณน้ำมันสูงสุดที่สามารถสกัดได้

3.2.3 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบในน้ำมันกากกาแฟ

3.2.3.1 การเตรียมตัวอย่างน้ำมันในรูปกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์

ชั่งตัวอย่างน้ำมัน 0.04 กรัม ลงในขวดก้นกลมขนาด 50 มิลลิลิตร นำไปประกอบเข้ากับชุดรีฟลักซ์ และติดตั้งลงในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่มีอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส

จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเมทานอล (Sodium hydroxide) ความเข้มข้น 0.5 นอมลาร์ ปริมาตร 4 มิลลิลิตร ลงไป เมื่อสารเกิดฟองจับเวลาการรีฟลักซ์ 15 นาที และเติมสารละลายโบรอนไตรฟลูออไรด์ในเมทานอล (Boron trifluoride-Methanol, BF_3) ปริมาตร 4 มิลลิลิตร เมื่อสารเกิดฟองให้จับเวลาการรีฟลักซ์ 3 นาที จากนั้นเติมตัวทำละลายเฮปเทน (Heptane) 1 มิลลิลิตร จับเวลาการรีฟลักซ์ 1 นาที เมื่อครบเวลานำออกจากชุดรีฟลักซ์ และทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride) และทิ้งไว้จนสารเกิดการแยกชั้น ดูดสารละลายด้านบนนำไประเหยเฮปเทนออกแล้วนำสารที่ได้ใส่ขวดตัวอย่าง (Vial) เพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography, GC)

3.2.3.2 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบในน้ำมันกากกาแพบดโดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatograph, GC)

ตัวอย่างที่เตรียมจากข้อ 3.2.3.1 นำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีด้วยคอลัมน์ Capillary column ความยาวคอลัมน์ 30 เมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ 0.25 มิลลิเมตร โดยใช้ดีเทคเตอร์ชนิด Flame ionization detector (FID) ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบในน้ำมันกากกาแพบดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

ภาวะที่ใช้	ค่าที่กำหนด
อัตราการไหลแก๊สตัวพา	1.3 มิลลิลิตรต่อนาที
อุณหภูมิดีเทคเตอร์	280 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิหัวฉีด	260 องศาเซลเซียส
ปริมาตรสารที่ฉีด	1 ไมโครลิตร
Split ratio	25:1

3.2.3.3 การวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid, FFA) ในน้ำมันกากกาแพบด

การวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันกากกาแพบดทำภายใต้มาตรฐาน AOCS Ca 5a-40 นำน้ำมันกากกาแพบดปริมาณ 0.2 กรัม ละลายในตัวทำละลายเอทานอล 50 ml ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ จากนั้นหยดฟีนอล์ฟทาลีน 3 ถึง 5 หยด และนำไปไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) ความเข้มข้น 0.1 นอมลาร์ ทำการ

ไทเทรตจนกระทั่งสารตัวอย่างเปลี่ยนเป็นสีชมพูอ่อน ทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง โดยปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันกากกาแฟบสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\% \text{ FFA} = \frac{((V \cdot M \cdot 28.44))}{m}$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้สำหรับการไทเทรต
(หน่วย: มิลลิลิตร, ml)

M คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (หน่วย: นอร์มัล, N)

m คือ น้ำหนักสารตัวอย่าง (หน่วย: กรัม, g)

3.2.3.4 การวิเคราะห์หาค่าสะพอนิฟิเคชัน (Saponification value, S.V.)

เพื่อคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันกากกาแฟบ

การวิเคราะห์หาค่าสะพอนิฟิเคชันของน้ำมันกากกาแฟบทำภายใต้มาตรฐาน AOCS Cd 3-25 นำน้ำมัน 0.2 กรัม ละลายในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในเอทานอลที่มีความเข้มข้น 0.5 นอร์มัล ปริมาตร 25 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปประกอบเข้ากับชุดรีฟลักซ์และติดตั้งลงในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่มีอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส จากนั้นจับเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดนำสารตัวอย่างที่ได้ ออก และปล่อยให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้องก่อนนำไปทดสอบ

ในขั้นตอนแรกนำสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในเอทานอลที่มีความเข้มข้น 0.5 นอร์มัล ปริมาตร 25 มิลลิลิตร และหยดฟีนอล์ฟทาลีน 3 ถึง 5 หยด (เพื่อทำ Blank) และสารตัวอย่างใส่ขวดรูปชมพู่ และหยดฟีนอล์ฟทาลีน 3 ถึง 5 หยด จากนั้นนำตัวอย่างทั้งสองไปไทเทรตด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 0.5 นอร์มัล จนกระทั่งสารตัวอย่างเปลี่ยนจากสีชมพูเข้มเป็นชมพูอ่อนหรือไม่มีสี ทำซ้ำทั้งหมด 3 การทดลองซึ่งค่าสะพอนิฟิเคชันสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{S.V.} = \frac{((B - S) \cdot M)}{W} \times 56.1$$

เมื่อ B คือ ปริมาตรสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 0.5 นอร์มัล ที่ใช้ไทเทรตกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในเอทานอล (หน่วย: มิลลิลิตร, ml)

S คือ ปริมาตรสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 0.5 นอร์มัล ที่ใช้ไทเทรตกับสารตัวอย่าง (หน่วย: มิลลิลิตร, ml)

W คือ น้ำหนักสารตัวอย่าง (หน่วย: กรัม, g)

เมื่อได้ค่าสะพอนิฟิเคชันของน้ำมันกากกาแฟบดจากการทดลองข้างต้น แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight, Mw) ของน้ำมันกากกาแฟบดดังสมการต่อไปนี้

$$Mw = \frac{(3 \cdot Mw_{KOH} \cdot 1000)}{S.V.}$$

เมื่อ Mw_{KOH} คือ มวลโมเลกุลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 56.1

(หน่วย: กรัมต่อโมล, g/mol)

S.V. คือ ค่าสะพอนิฟิเคชัน (หน่วย: มิลลิกรัม KOH ต่อกรัม, mg_{KOH}/g)

3.2.3.5 การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำในน้ำมันกากกาแฟบด

การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำในตัวอย่างด้วยเครื่องวิเคราะห์หาปริมาณน้ำ โดยวิธีการไตเตรตด้วยเทคนิคคาร์ล ฟิสเซอร์ (Karl Fischer titration) จากบริษัท Mettler Toledo รุ่น V20S ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณน้ำโดยวิธีการไตเตรตด้วยเทคนิคคาร์ล ฟิสเซอร์ (Karl Fischer titration)

โดยตัวอย่างจะถูกไตเตรตด้วยสารละลายคอมโพสิต 5K (Composite-5K) ในเมทานอล ซึ่งน้ำในตัวอย่างจะทำปฏิกิริยากับคอมโพสิต 5K เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดลงการไตเตรตถือว่าสิ้นสุด จากนั้นเครื่องจะแสดงปริมาณสารละลายคอมโพสิต 5K ที่ใช้ในการไตเตรต และปริมาณน้ำในตัวอย่าง

3.2.3.6 การวิเคราะห์ปริมาณสารที่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาสะพอนิฟิเคชันได้

(Unsaponifiable matter, UM)

การวิเคราะห์ปริมาณสารที่ไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้ในน้ำมันกากกาแพบดทำภายใต้มาตรฐาน AOCS Cd 6a-40 โดยชั่งน้ำมันกากกาแพบด 2 กรัม ใส่ลงในขวดก้นกลม และเติมเอทานอลบริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยปริมาตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร และนำไปรีฟลักซ์เป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบเวลาดำหนดนำสารที่ได้ตั้งทิ้งไว้จนอุณหภูมิลดลงแล้วเทสารลงในกรวยแยก และล้างขวดก้นกลมด้วยน้ำร้อนปริมาตร 50 มิลลิลิตร และเทรวมลงในกรวยแยก เมื่อสารที่ได้มีอุณหภูมิลดลงแล้วทำการเติมปิโตรเลียมอีเทอร์ 50 มิลลิลิตร แล้วทำการปิดจุกกรวยแยกและเขย่าเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นตั้งกรวยแยกทิ้งไว้จนกว่าสารจะแยกออกเป็นสองชั้นที่ชัดเจน แล้วทำการแยกสารชั้นล่างออก และเทสารส่วนบนที่เป็นสารละลายปิโตรเลียมอีเทอร์ออกทางปากขวด ใส่ลงในกรวยแยกอันที่สองที่มีน้ำกลั่นอยู่ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ทำการเขย่าให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ให้สารผสมแยกออกเป็นสองชั้น และแยกสารชั้นล่างซึ่งเป็นส่วนของน้ำออก แล้วทำการล้างสารละลายอีเทอร์ด้วยน้ำกลั่นอีกสองครั้ง ปริมาตรครั้งละ 20 มิลลิลิตร และล้างด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 นอร์มัล ปริมาตร 20 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร ทำเช่นนี้สลับกันสองครั้ง และนำสารละลายอีเทอร์ไปล้างด้วยน้ำกลั่นจนน้ำที่ล้างไม่เกิดสีชมพูกับสารละลายฟีนอล์ฟทาลินที่ใช้เป็นอินดิเคเตอร์ จากนั้นเทสารละลายอีเทอร์ออกจากกรวยแยกลงในขวดแก้วที่ชั่งน้ำหนักแล้ว และล้างกรวยแยกด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์แล้วนำไปเทรวมในขวดแก้ว และนำไปประเหยออกให้เหลือปริมาณเล็กน้อย จากนั้นเติมอะซีโตน 3 มิลลิลิตร แล้วนำไปประเหยตัวทำละลายออก นำขวดแก้วไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนสารที่เหลือมีน้ำหนักคงที่ จากนั้นนำน้ำหนักที่ได้ไปคำนวณหาร้อยละปริมาณสารที่ไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้ จากสูตร

$$\text{ร้อยละปริมาณสารที่ไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้} = \frac{A \cdot 100}{M}$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักของสารที่เหลือจากการทำปฏิกิริยากับเบส (หน่วย: กรัม)

M คือ น้ำหนักของสารตัวอย่าง (หน่วย: กรัม)

3.2.4 การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟบดในเอทานอลภาวะเหนือวิกฤต

3.2.4.1 การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟบดด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ (Batch reactor)

นำสารผสมระหว่างน้ำมันกากกาแฟบดและเอทานอลที่อัตราส่วนโดยโมล 1 ต่อ 30 ใส่ลงไปเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ดังรูปที่ 3.2 ก เปิดแผงควบคุม เครื่องทำความร้อน (Heater) และคอมเพรสเซอร์ (Compressor) เพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนให้กับทราย จากนั้นปรับอุณหภูมิของเครื่องทำความร้อนที่อยู่ภายในอ่างทรายฟลูอิดิซ (Fluidized sand bath) เมื่ออุณหภูมิของระบบถึงค่าที่ตั้งไว้ (อุณหภูมิของเครื่องทำความร้อนและทรายต้องมีค่าใกล้เคียงกัน) นำเครื่องปฏิกรณ์ใส่ลงในอ่างทรายฟลูอิดิซในชุดการทดลองที่แสดงดังรูปที่ 3.2 ข และเริ่มจับเวลา เมื่อครบเวลากำหนด นำเครื่องปฏิกรณ์ออกและแช่ในน้ำแข็งจนแน่ใจว่าอุณหภูมิของสารภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึงอุณหภูมิห้องแล้วจึงทำการเปิดฝา และเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณร้อยละผลได้ต่อไป



รูปที่ 3.2 ก) เครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ (Batch reactor) และ ข) อ่างทรายฟลูอิดิซ (Fluidized sand bath) และแผงควบคุมอุปกรณ์

3.2.4.2 การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟบดด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่ใช้สำหรับการผลิตไบโอดีเซลแสดงดังรูปที่ 3.3 เริ่มต้นจากการปรับอุณหภูมิของเครื่องทำความร้อนในอ่างทรายฟลูอิดซ์เพื่อให้อุณหภูมิของระบบมีค่าที่ต้องการทดลอง (อุณหภูมิของเครื่องทำความร้อนและทรายต้องมีค่าใกล้เคียงกัน) จากนั้นปรับความดันจากวาล์วความดันต้านกลับ (Back pressure regulator) เพื่อให้ความดันคงที่ 15 เมกะพาสคัล (MPa) เมื่อระบบมีภาวะที่ต้องการ สารผสมระหว่างน้ำมันกากกาแฟบดและเอทานอลในอัตราส่วน 1 ต่อ 30 จะถูกป้อนด้วยปั๊มแรงดันสูง (High pressure liquid pump) ด้วยอัตราการป้อนที่กำหนด ผ่านไปยังท่อบริเวณให้ความร้อนก่อนเข้าสู่ระบบ (Preheater) ซึ่งมีความยาว 500 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 3.14 มิลลิเมตร และความหนา 0.71 มิลลิเมตร จากนั้นสารจะไหลเข้าสู่ท่อปฏิกรณ์ (Tube reactor) ซึ่งมีความยาว 300 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 9.52 มิลลิเมตร และความหนา 0.88 มิลลิเมตร เมื่อสารผสมไหลผ่านส่วนของบริเวณให้ความร้อนก่อนเข้าสู่ระบบ และท่อปฏิกรณ์ จะได้ผลิตภัณฑ์ไหลออกมาตามท่อเข้าสู่ระบบหล่อเย็น (Cooling system) เพื่อลดอุณหภูมิ จากนั้นผลิตภัณฑ์จะถูกเก็บลงขวดเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 3.3 เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (Continuous reactor)

3.3.5 การวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ (Fatty acid ethyl ester, FAEE) ของไบโอดีเซลด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์ และแบบต่อเนื่อง จากข้อที่ 3.2.4.1 และ 3.2.4.2 ปริมาณ 1 กรัม นำมาละลายในตัวทำละลายเฮปเทน 0.9 กรัม จากนั้นเตรียมสารตัวอย่าง เอทิลปาล์มมิเตต และเอทิลลิโนเลอิต ปริมาณ 0.1 กรัม มาละลายในตัวทำละลายเฮปเทน เพื่อใช้สำหรับทำกราฟเทียบมาตรฐาน

การวิเคราะห์หาค่ากรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี โดยใช้คอลัมน์ Capillary column ความยาวคอลัมน์ 30 เมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ 0.25 มิลลิเมตร โดยใช้ดีเทคเตอร์ชนิด Flame ionization detector (FID) ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบในน้ำมันกากกาแพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

ภาวะที่ใช้	ค่าที่กำหนด
อัตราการไหลแก๊สตัวพา (ฮีเลียม)	1.3 มิลลิลิตรต่ออนาที
อุณหภูมิดีเทคเตอร์	280 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิหัวฉีด	260 องศาเซลเซียส
ปริมาตรสารที่ฉีด	1 ไมโครลิตร
Split ratio	25:1

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ปริมาณความชื้นในกากกาแฟ

กากกาแฟเปียก (Wet spent coffee ground, WSCGs) ทั้งหมดถูกนำมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อลดปริมาณน้ำในกากกาแฟซึ่งจะช่วยทำให้ง่ายต่อการเก็บรักษาและลดการเกิดเชื้อรา พบว่าปริมาณความชื้นในกากกาแฟเริ่มต้นมีปริมาณร้อยละ 58.69 โดยน้ำหนักกากกาแฟเปียก หลังจากนั้นนำตัวอย่างกากกาแฟแห้ง (Dried spent coffee ground, DSCGs) ประมาณ 20 กรัม ไปอบที่ภาวะเดิม เพื่อหาปริมาณความชื้นในกากกาแฟก่อนนำไปสกัดน้ำมัน พบว่ามีปริมาณความชื้นอยู่ร้อยละ 1.40 โดยน้ำหนักกากกาแฟแห้ง

4.2 ปริมาณน้ำมันในกากกาแฟ

กากกาแฟแห้งปริมาณ 20 กรัม จะถูกบรรจุลงในหลอดกระดาษสำหรับการสกัด เพื่อสกัดน้ำมันด้วยวิธีซอกซ์เลตโดยใช้ตัวทำละลายเอทานอลบริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยปริมาตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร และใช้เวลาในการสกัด 6 ชั่วโมง พบว่าปริมาณน้ำมันในกากกาแฟมีปริมาณร้อยละ 27.67 โดยน้ำหนักกากกาแฟแห้ง ลักษณะของน้ำมันกากกาแฟแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 น้ำมันกากกาแฟที่สกัดด้วยวิธีซอกซ์เลตโดยใช้ตัวทำละลายเอทานอล

4.3 องค์ประกอบของน้ำมันกากกาแฟ (Spent coffee ground oil, SCGs oil)

น้ำมันกากกาแฟที่สกัดด้วยวิธีซอกซ์เลตโดยใช้ตัวทำละลายเอทานอลบริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยปริมาตร ถูกนำวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำในน้ำมันกากกาแฟด้วยเทคนิคคาร์ลฟิสเซอร์ด้วยมาตรฐาน ASTM D6304 การวิเคราะห์

หาค่าองค์ประกอบกรดไขมัน (Fatty acid, FA) ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี การวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free Fatty acid, FFA) ด้วยมาตรฐาน AOCS Ca 5a-40 และการวิเคราะห์หาค่าสะพอนิฟิเคชันเพื่อนำไปหาค่ามวลโมเลกุลของน้ำมันจากกาแฟบดด้วยมาตรฐาน AOCS Cd 3-25 ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำมันจากกาแฟบด

องค์ประกอบของน้ำมันจากกาแฟบด		ร้อยละโดยน้ำหนัก	
Fatty acid (FA) group	Saturated fatty acids (SFA)	Palmitic acid (C16:0)	36.99
		Arachidic acid (C20:0)	3.52
	Unsaturated fatty acids (UFA)	Oleic acid (C18:1)	8.22
		Linoleic acid (C18:2)	51.27
Free fatty acid (FFA, %wt)		5.64	
Water content (%wt)		2.69	
Saponification value (S.V, mg _{KOH} /g)		202.13	
Molecular weight (Mw, g/mol)		832.92	
Unsaponifiable matter (%wt)		1.60	

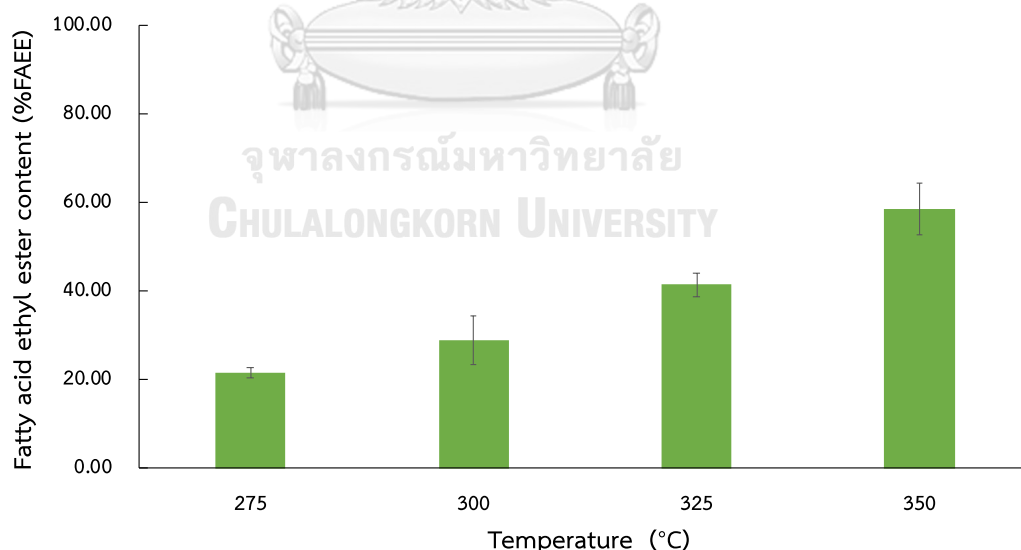
จากตารางที่ 4.1 พบว่าปริมาณกรดไขมันในน้ำมันจากกาแฟบดที่สกัดด้วยวิธีซอกท์เลตโดยใช้ตัวทำละลายเอทานอลบริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยปริมาตร ประกอบด้วย กรดไขมันชนิดอิ่มตัวได้แก่ กรดปาล์มิติก และกรดอะราซิดิก ร้อยละ 36.99 และ 3.52 ตามลำดับ และกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวได้แก่ กรดโอเลอิก และ กรดลิโนเลอิก ร้อยละ 8.22 และ 51.27 ตามลำดับ อีกทั้งในน้ำมันจากกาแฟบดที่สกัดได้ยังพบกรดไขมันอิสระอยู่ปริมาณร้อยละ 5.64 โดยน้ำหนัก และน้ำอยู่ร้อยละ 2.69 โดยน้ำหนัก ซึ่งปริมาณน้ำที่วิเคราะห์ได้อาจเป็นผลมาจากความชื้นในกาแฟบด และปริมาณน้ำในเอทานอลที่ใช้สำหรับการสกัด และเมื่อนำน้ำมันจากกาแฟบดไปทดสอบเพื่อหามวลโมเลกุล พบว่าน้ำมันจากกาแฟบดมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 832.92 กรัมต่อโมล โดยในน้ำมันจากกาแฟบดที่สกัดได้ด้วยเอทานอลจะมีปริมาณสารที่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาสะพอนิฟิเคชันได้ (Unsaponifiable matter) อยู่ร้อยละ 1.60 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นสารประกอบในกลุ่มของสเตอรอล (Sterol) ได้แก่ คาเฟสตอล (Cafestol) และคาเวออล (Kahweol) เป็นต้น [37]

4.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟบดด้วยเอทานอลภาวะเหนือวิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ (Batch reactor)

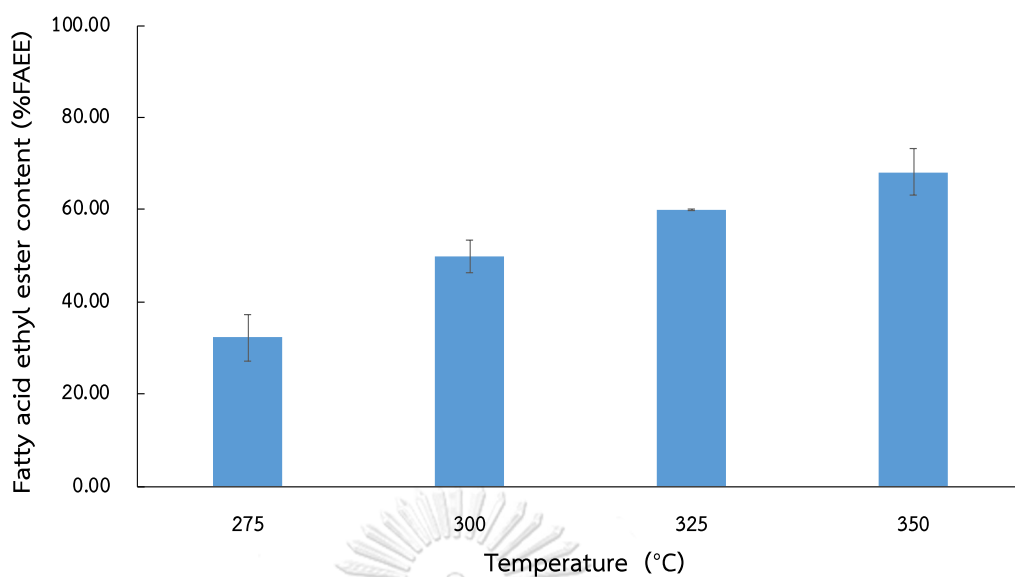
ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ สารตั้งต้นที่ใช้ได้แก่ น้ำมันกากกาแฟบด และเอทานอลบริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยปริมาตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแฟบดต่อเอทานอล 1 ต่อ 30 และความดันคงที่ 15 เมกะพาสคัล

4.4.1 ผลของอุณหภูมิ (Effect of temperature)

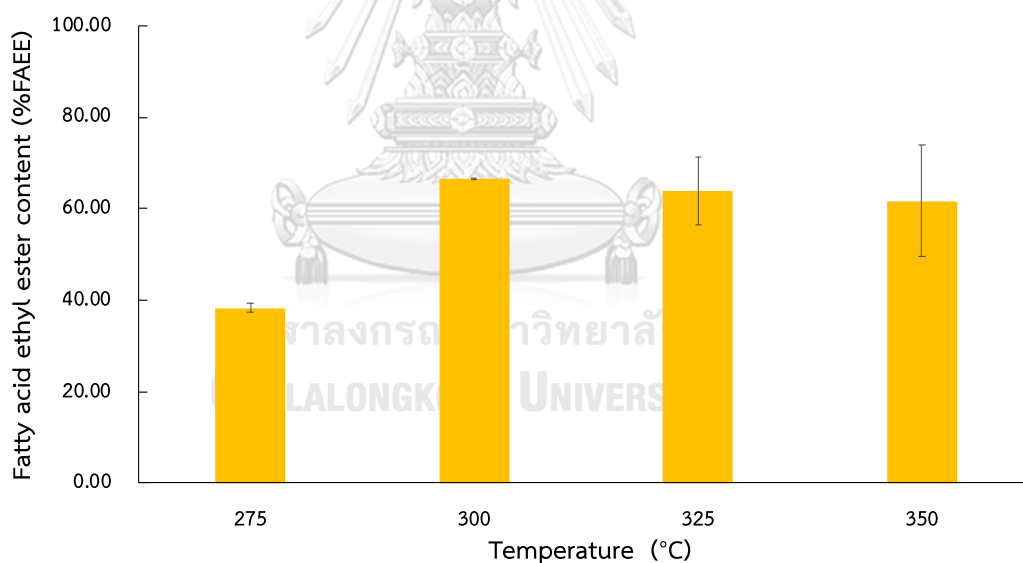
ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิสำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟบดด้วยเอทานอลภาวะเหนือวิกฤตที่อุณหภูมิ 275 300 325 และ 350 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของเอทานอลคือที่อุณหภูมิ 240.9 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 5 นาที การเพิ่มอุณหภูมิจาก 275 เป็น 300 325 และ 350 องศาเซลเซียส ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ (Fatty acid ethyl ester, FAEE) ที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 21.45 เป็นร้อยละ 28.87 41.50 และ 58.64 ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้เอทานอลที่ภาวะเหนือวิกฤตมีสมบัติการแพร่ใกล้เคียงกับแก๊สทำให้สามารถแพร่ไปล้อมรอบโมเลกุลของน้ำมัน ทำให้ปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นเกิดได้ทั่วถึง แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 นาที อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแฟบดต่อเอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล



รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแพบต่อเอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล



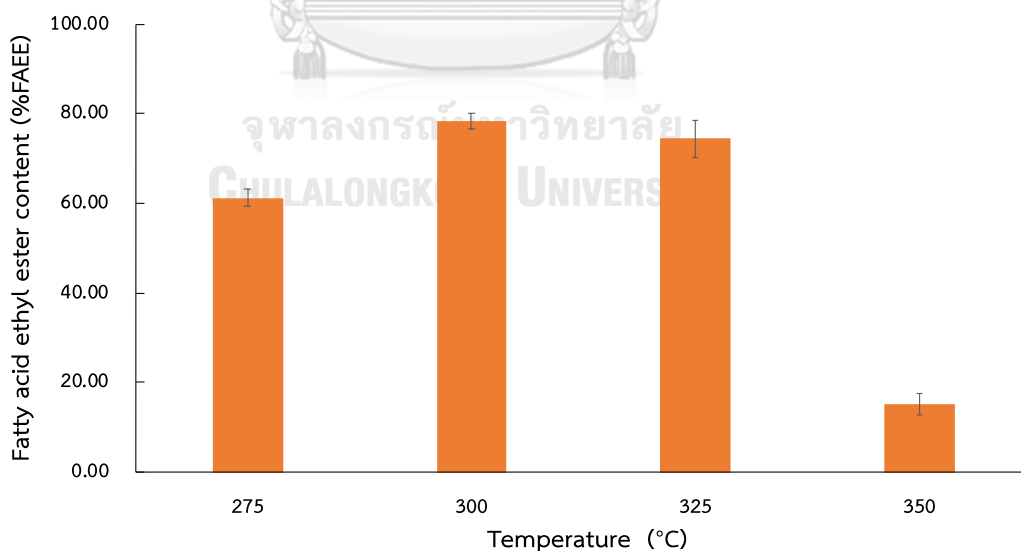
รูปที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 15 นาที อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแพบต่อเอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล

เมื่อพิจารณาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 10 นาที มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ที่คล้ายคลึงกันกับที่เวลา 5 นาที โดยปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์จะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 32.28 เป็นร้อยละ 49.82 60.05 และ 68.18 ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิจะ

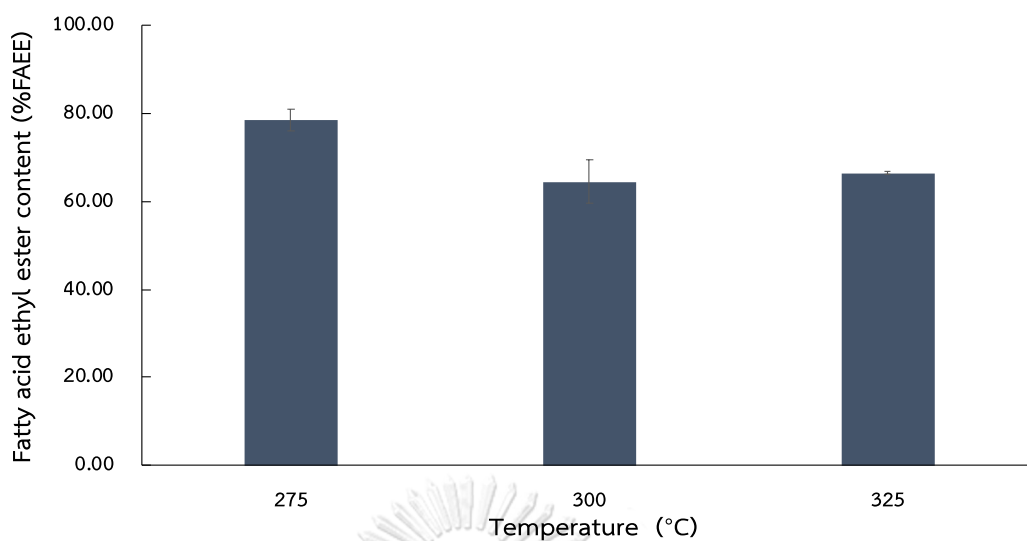
ช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของน้ำมันในเอทานอลทำให้สารทั้งสองสามารถละลายซึ่งกันและกันจนสามารถรวมกันเป็นเฟสเดียว โมเลกุลของสารตั้งต้นจึงเกิดการชนกันได้ดีทำให้ปฏิกิริยาสามารถดำเนินไปข้างหน้า แสดงดังรูปที่ 4.3

เมื่อพิจารณาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 15 นาที ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์จะเพิ่มขึ้นในช่วงของการเพิ่มอุณหภูมิจาก 275 ถึง 300 องศาเซลเซียส จากร้อยละ 38.28 เป็นร้อยละ 66.47 และจะมีค่าค่อยๆลดลงเล็กน้อยจากร้อยละ 66.47 เป็นร้อยละ 63.94 และ 61.67 ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 325 และ 350 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.4

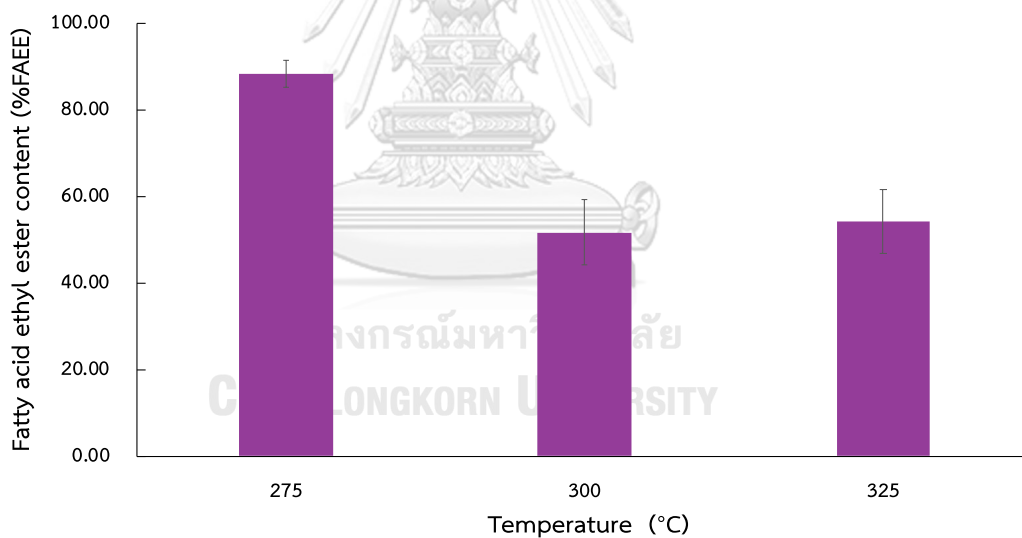
เมื่อพิจารณาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 20 นาที ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์จะเพิ่มขึ้นในช่วงของการเพิ่มอุณหภูมิจาก 275 ถึง 300 องศาเซลเซียส จากร้อยละ 61.19 เป็นร้อยละ 78.36 และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 325 ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์จะค่อยๆลดลงเป็นร้อยละ 74.43 แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 350 องศาเซลเซียส ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์มีค่าเพียงร้อยละ 15.10 การลดลงของปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ที่ 350 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นเกิดได้รวดเร็วปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลได้ง่าย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้กรดไขมันเอทิลเอสเทอร์เกิดการสลายตัวทางความร้อน ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์จึงลดลง แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแพบต่อเอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล



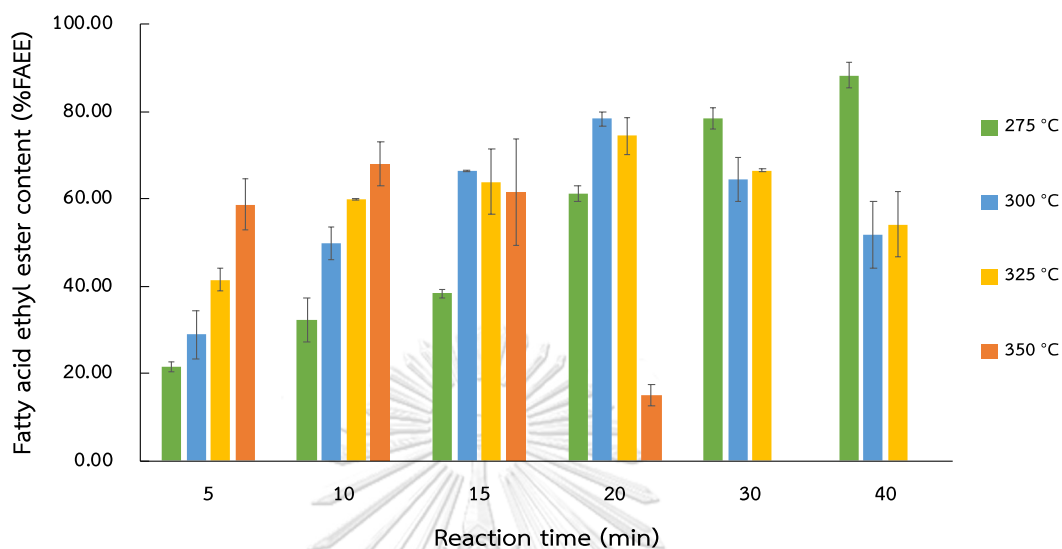
รูปที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแพบต่อเอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล



รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิที่ส่งผลปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแพบต่อเอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล

เมื่อพิจารณาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 30 และ 40 นาที พบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจาก 275 เป็น 300 และ 325 องศาเซลเซียส จะทำให้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์มีค่าลดลง โดยปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 30 นาที คิดเป็นร้อยละ 78.50 64.54

และ 66.55 ตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.6 และที่เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 40 นาที คิดเป็นร้อยละ 88.37 51.73 และ 54.21 ตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.7



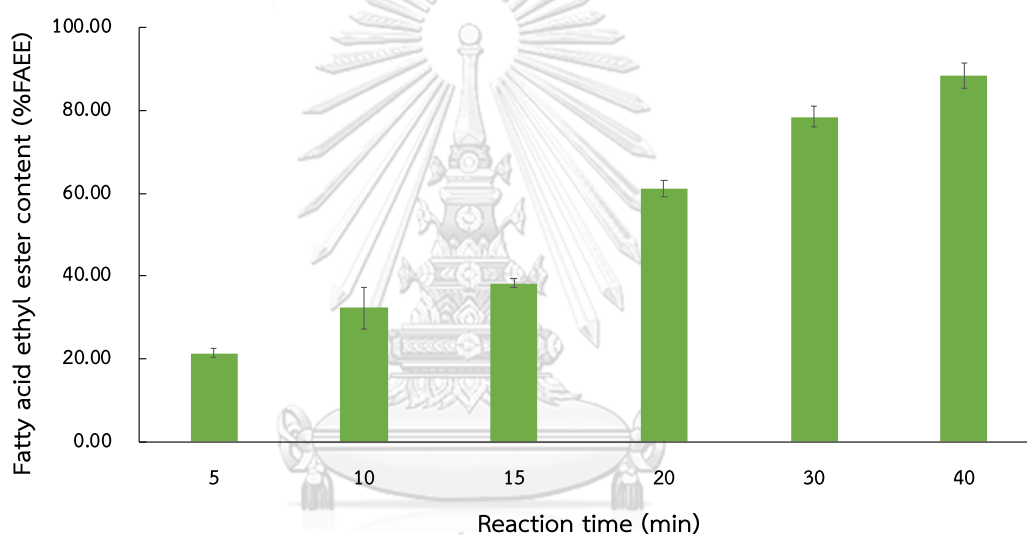
รูปที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์ ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ โดยมีอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแพบต่อเอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะส่งผลทำให้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาการทำปฏิกิริยา 5 ถึง 20 นาที ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแอลกอฮอล์ลดลง ทำให้โมเลกุลเกิดการเคลื่อนไหวได้ง่าย และเกิดการชนกันระหว่างโมเลกุลของน้ำมันและแอลกอฮอล์ รวมถึงโมเลกุลของสารตั้งต้นมีพลังงานจลน์ที่สูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นไปตามสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) อีกทั้งในการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความเข้ากันได้ระหว่างเฟสน้ำมันและแอลกอฮอล์สามารถรวมเป็นเฟสเดียวกันได้ ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์จึงมีค่าเพิ่มขึ้น และจากผลการทดลองเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นจะทำให้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ลดลง เป็นผลมาจากการสลายตัวทางความร้อน (Thermal decomposition) ของกรดไขมันเอทิลลิโนเลต (18:2) ซึ่งมีการรายงานไว้ในงานวิจัยของ Hee-Yong Shin และ คณะ [38] ถึงการสลายตัวทางความร้อนของกรดไขมันเมทิลลิโนเลต (18:2) ที่จะเริ่มการสลายตัวที่อุณหภูมิตั้งแต่ 325 ถึง 350 องศาเซลเซียส ซึ่งมีการรายงานอีกว่ากรดไขมันอิ่มตัวเชิงซ้อนจะมีความเสถียรน้อยกว่ากรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยวในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤต และในการผลิตไบโอดีเซลที่อุณหภูมิ 350 องศา

เซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที จะส่งผลทำให้กรดไขมันเมทิลโอเลเอต (18:1) เกิดการสลายตัวทางความร้อนได้เช่นกัน

4.4.2 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา (Effect of reaction time)

ในการศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่เวลา 5 10 15 20 30 และ 40 นาที สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟบดด้วยเอทานอลภาวะเหนือวิกฤตเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 5 เป็น 40 นาที ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจากร้อยละ 21.45 เป็นร้อยละ 32.28 38.28 61.19 78.50 และ 88.37 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.9

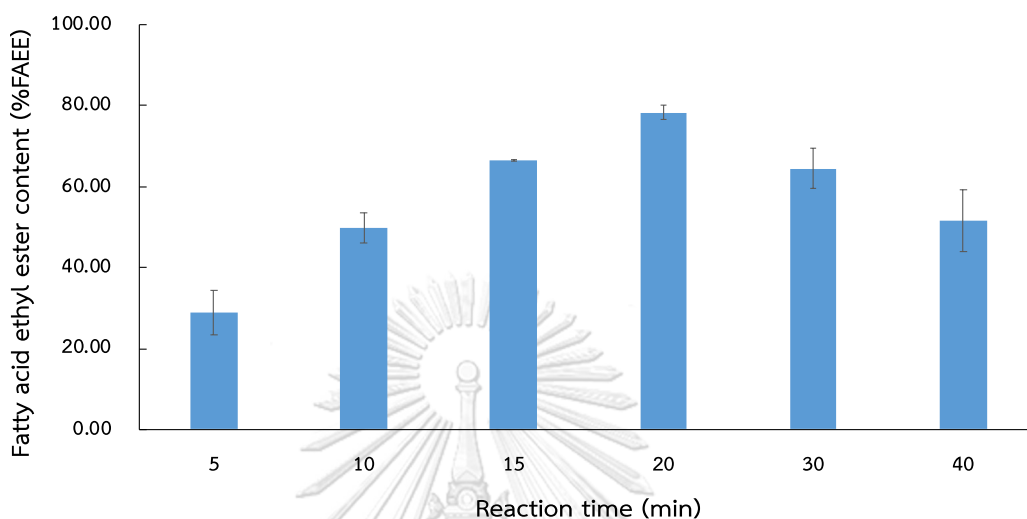


รูปที่ 4.9 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแฟบดต่อเอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล

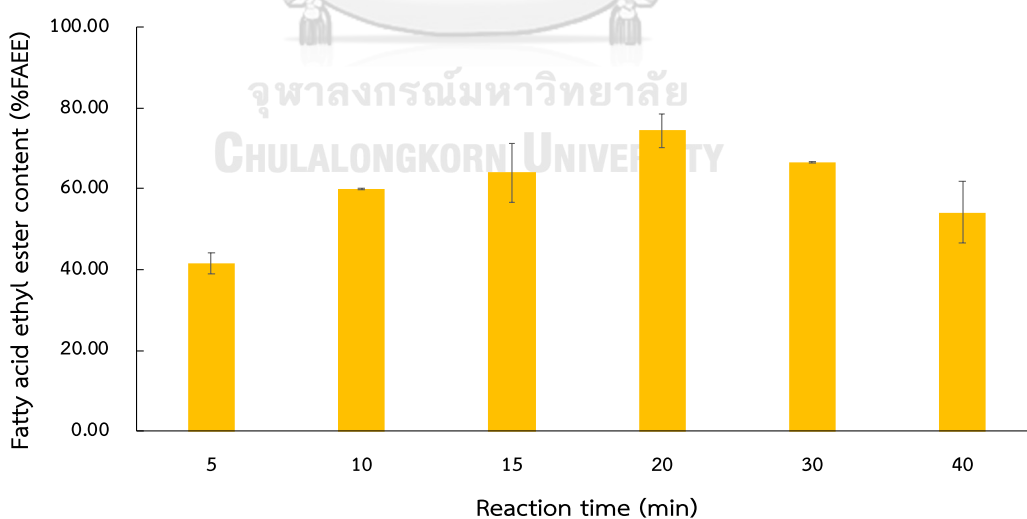
เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 ถึง 20 นาที ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจากร้อยละ 28.87 เป็นร้อยละ 49.82 66.47 และ 78.36 แต่เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเป็น 30 ถึง 40 นาที ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์มีค่าลดลงเป็นร้อยละ 64.54 และ 51.73 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.10

เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 ถึง 20 นาที ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจากร้อยละ 41.50 เป็นร้อยละ 60.05 63.94 และ 74.43 แต่เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเป็น 30 ถึง 40 นาที ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอส

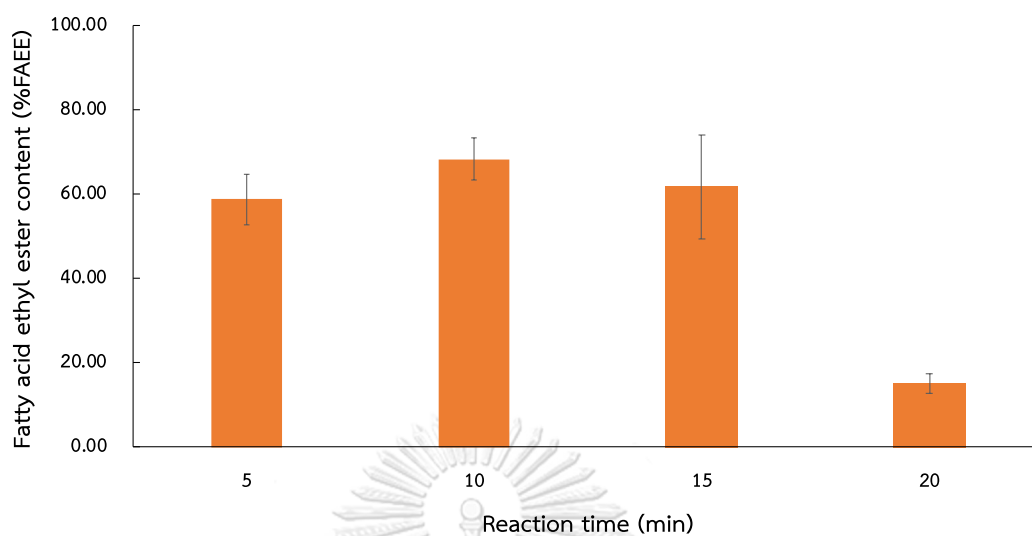
เทอร์มีค่าลดลงเป็นร้อยละ 66.55 และ 54.21 ตามลำดับ พบว่าที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที ให้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์สูงสุดร้อยละ 74.43 แสดงดังรูปที่ 4.11



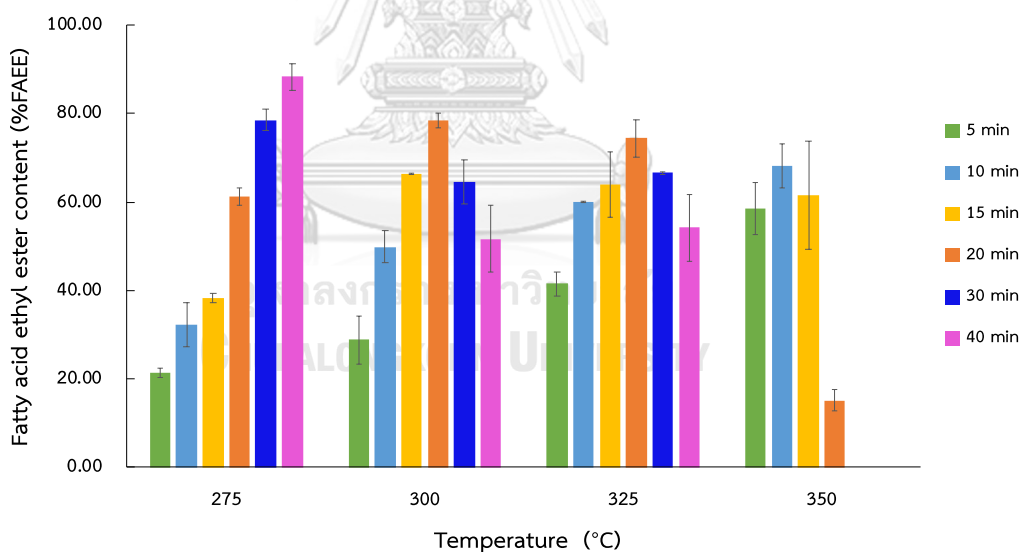
รูปที่ 4.10 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแฟต่อเอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล



รูปที่ 4.11 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแฟต่อเอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล



รูปที่ 4.12 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแพดต่อเอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล



รูปที่ 4.13 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยมีอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแพดต่อเอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล

เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ในรูปที่ 4.12 ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 ถึง 10 นาที ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจากร้อยละ 58.64 เป็นร้อยละ 68.18 แต่เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเป็น 15 ถึง 20 นาที ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์จะมีค่า

ลดลงเป็นร้อยละ 61.67 และ 15.10 ตามลำดับ โดยที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นของแข็ง ซึ่งอาจจะเกิดจากปฏิกิริยาควบแน่นของสารประกอบในน้ำมันกากกาแฟบด เช่น สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compound) และ ฟิวแรน (Furan) รวมถึงการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของกรดไขมันที่อุณหภูมิสูงได้อีกด้วย [39] จึงทำให้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์มีค่าลดลง

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าที่แต่ละอุณหภูมิเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์มีปริมาณที่เพิ่มขึ้น ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยของ Maria Yuliana และคณะ [35] ที่ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากบอดักไขมันในอุตสาหกรรมฟอกหนังที่อุณหภูมิ 300 ถึง 350 องศาเซลเซียส ความดัน 15 เมกะพาสคัล และเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 ถึง 40 นาที พบว่าการเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจะส่งผลให้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นในช่วงเวลาตั้งแต่ 5 ถึง 30 นาที และปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์จะมีปริมาณคงที่เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเป็น 40 นาที การเพิ่มขึ้นของปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ เนื่องจากการเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็นการเพิ่มระยะเวลาสัมผัสกันของสารตั้งต้นทำให้เกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันได้ดีขึ้น ส่งผลให้สารตั้งต้นเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์ได้สมบูรณ์ แต่ในทางกลับกันเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มากเกินไปจะทำให้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์มีปริมาณลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างแอลกอฮอล์ ภาวะเหนือวิกฤตกับน้ำมันเข้าสู่ภาวะสมดุลแล้วที่เวลาหนึ่ง ทำให้เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์เปลี่ยนไปเป็นกรดไขมัน รวมถึงการสลายตัวทางความร้อนของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ด้วย

ดังนั้นภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ร้อยละปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์สูงสุดในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟบดเอทานอลภาวะเหนือวิกฤตโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์คือที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที ที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแฟต่อเอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล ซึ่งให้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ร้อยละ 88.37

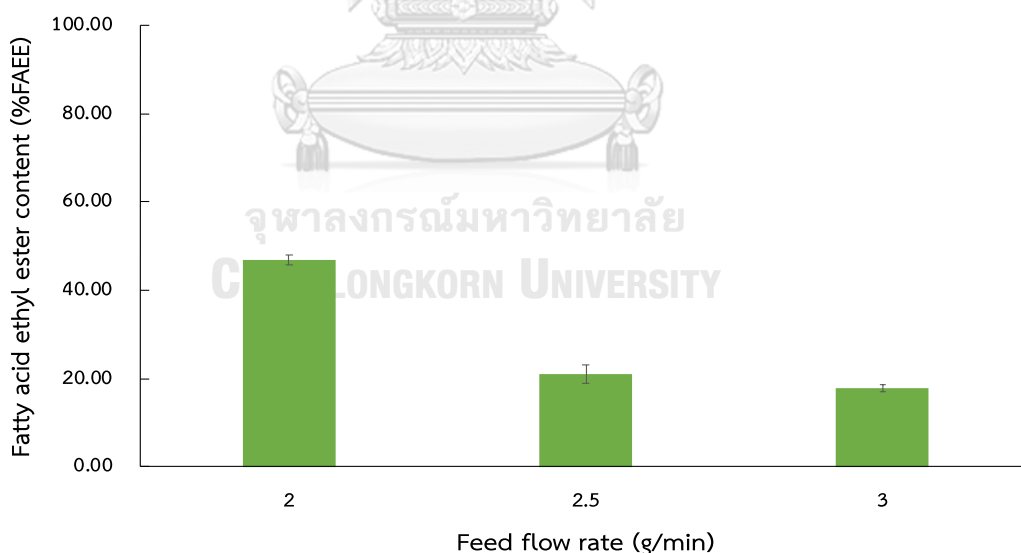
จากผลการศึกษาระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟบดด้วยเอทานอลภาวะเหนือวิกฤตโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์ข้างต้น จึงเลือกภาวะที่อุณหภูมิ 275 ถึง 325 องศาเซลเซียส มาทำการศึกษาในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟบดด้วยเอทานอลภาวะเหนือวิกฤตโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง โดยจะพิจารณาร้อยละปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ ที่อัตราการไหล 2 2.5 และ 3 กรัมต่อนาที ซึ่งผลการทดลองแสดงดังหัวข้อ 4.4

4.5 ปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟบดด้วยเอทานอลภาวะเหนือวิกฤตโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (Continuous reactor)

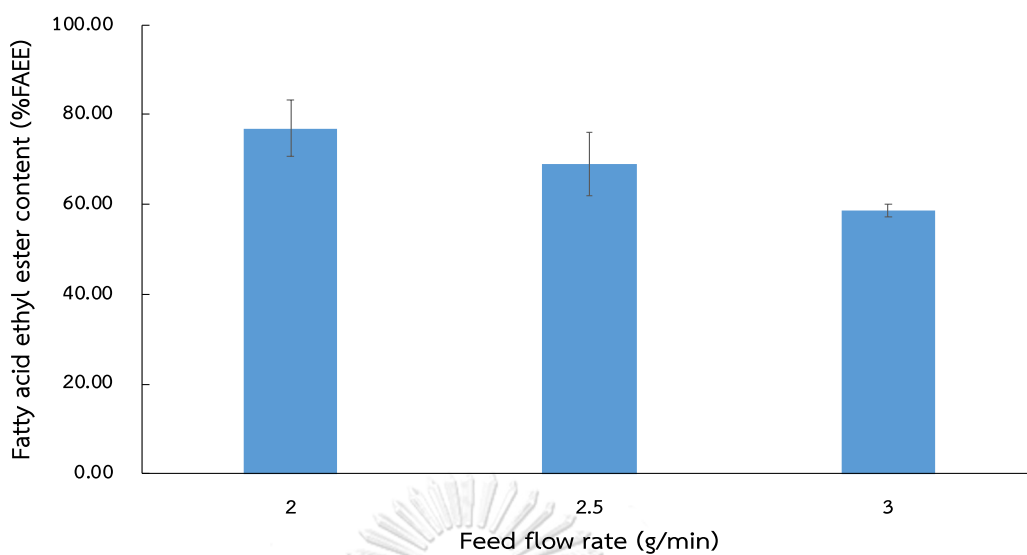
ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง สารตั้งต้นที่ใช้ได้แก่ น้ำมันกากกาแฟบด และเอทานอลบริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยปริมาตร โดยศึกษาผลของอัตราการไหล (Feed flow rate, g/min) และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแฟต่อเอทานอลคือ 1 ต่อ 30 และความดันคงที่ 15 เมกะพาสคัล (MPa)

4.5.1 ผลของอัตราการไหล (Effect of feed flow rate)

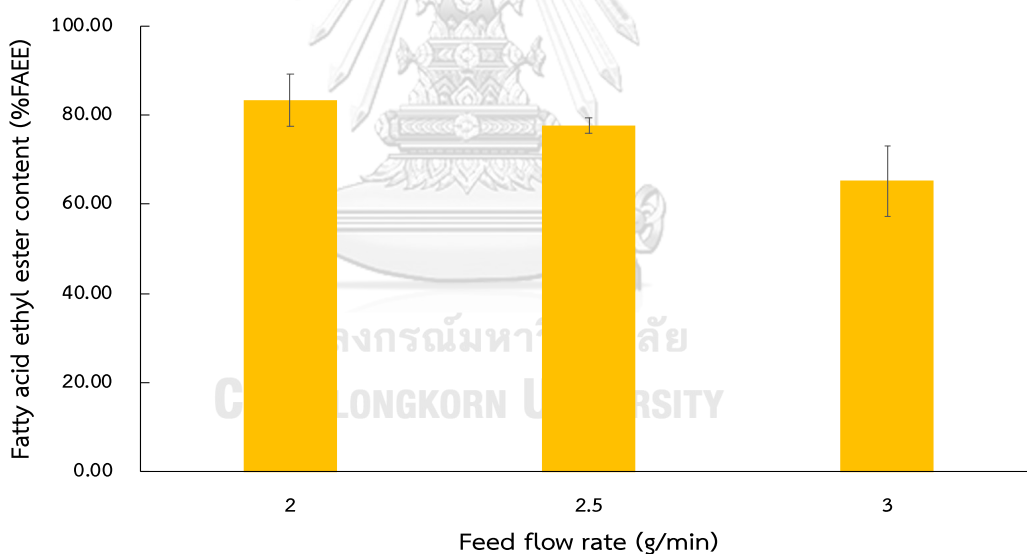
เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราการไหลเพิ่มขึ้นจาก 2 เป็น 2.5 และ 3 กรัมต่อนาที ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์มีปริมาณลดลงจากร้อยละ 46.90 เป็นร้อยละ 21.10 และ 17.84 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.14 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์มีปริมาณต่ำเป็นผลมาจากที่อุณหภูมินี้เป็นอุณหภูมิที่ใกล้อุณหภูมิวิกฤตของเอทานอลส่งผลให้ที่ภาวะนี้เป็นภาวะเหนือวิกฤตที่ยังไม่เสถียร



รูปที่ 4.14 ผลของอัตราการไหลที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแฟบดต่อเอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล



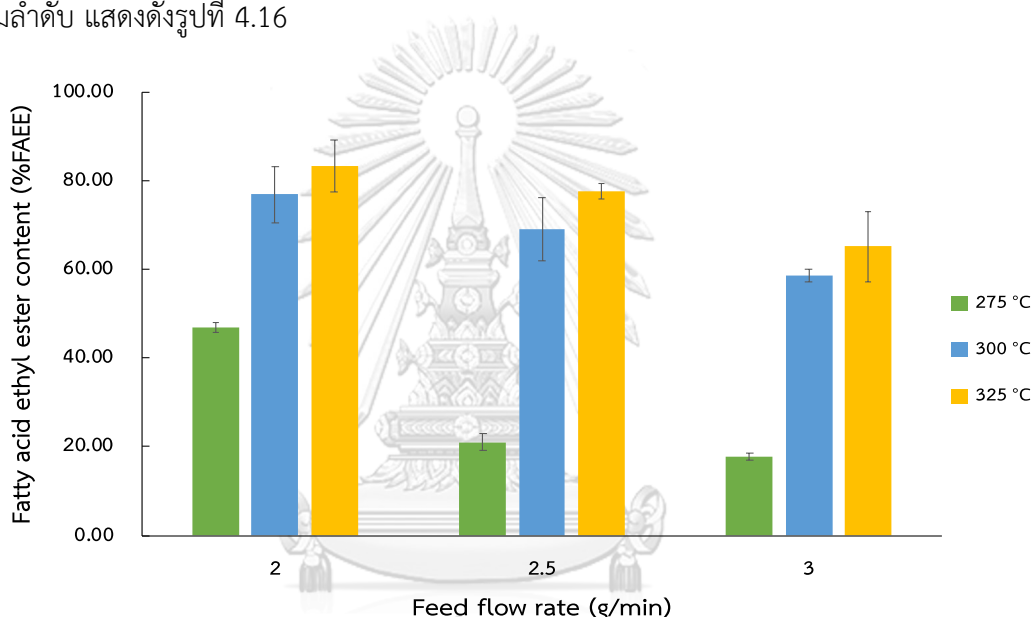
รูปที่ 4.15 ผลของอัตราการไหลที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแพบต่อเอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล



รูปที่ 4.16 ผลของอัตราการไหลที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแพบต่อเอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล

เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราการไหล 2 กรัมต่อนาที ให้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์มีปริมาณร้อยละสูงถึงร้อยละ 76.92 และปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์จะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลเป็น 2.5 และ 3 กรัมต่อนาที คิดเป็นร้อยละ 69.00 และ 58.56 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.15

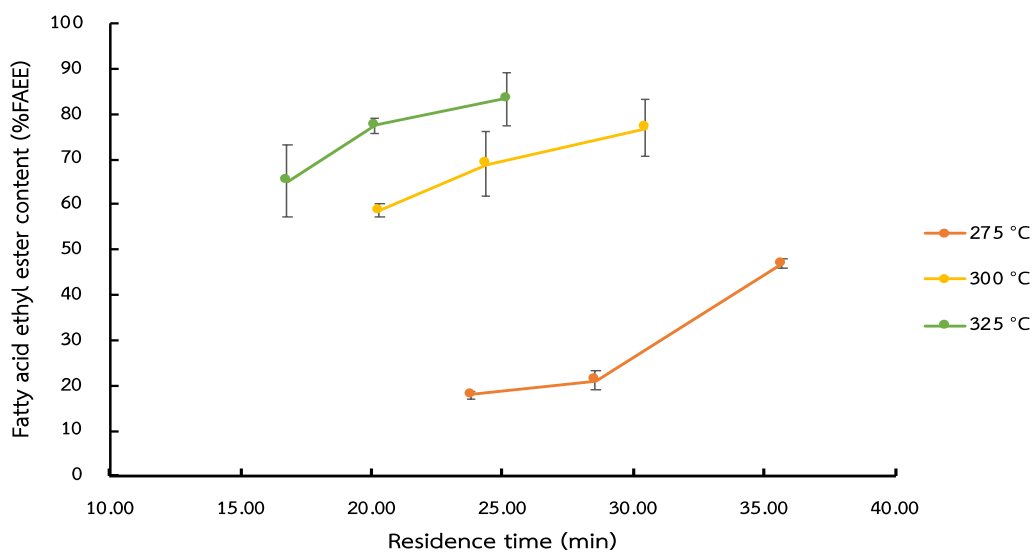
เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราการไหล 2 กรัมต่อนาที ให้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์มีปริมาณร้อยละสูงที่สุดถึงร้อยละ 83.35 และปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์จะลดลงเหลือร้อยละ 77.59 และ 65.21 ที่อัตราการไหล 2.5 และ 3 กรัมต่อนาที ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.17 ผลของอัตราการไหลที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยมีอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแพบต่อเอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล

จากรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มอัตราการไหลจาก 2 เป็น 2.5 และ 3 กรัมต่อนาที จะส่งผลทำให้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ที่ได้ลดลงที่ทุกอุณหภูมิ เนื่องจากอัตราการไหลจะแปรผกผันกับเวลาที่สารตั้งต้นอยู่ในระบบ (Residence time) แสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ระยะเวลาของสารตั้งต้นในระบบมีระยะเวลาที่สั้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นเกิดปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์

4.5.2 ผลของเวลาของสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์ (Effect of residence time)



รูปที่ 4.18 ผลของเวลาของสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์ที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแพบต่อเอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล

ตารางที่ 4.2 เวลาที่สารตั้งต้นอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ และร้อยละกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์

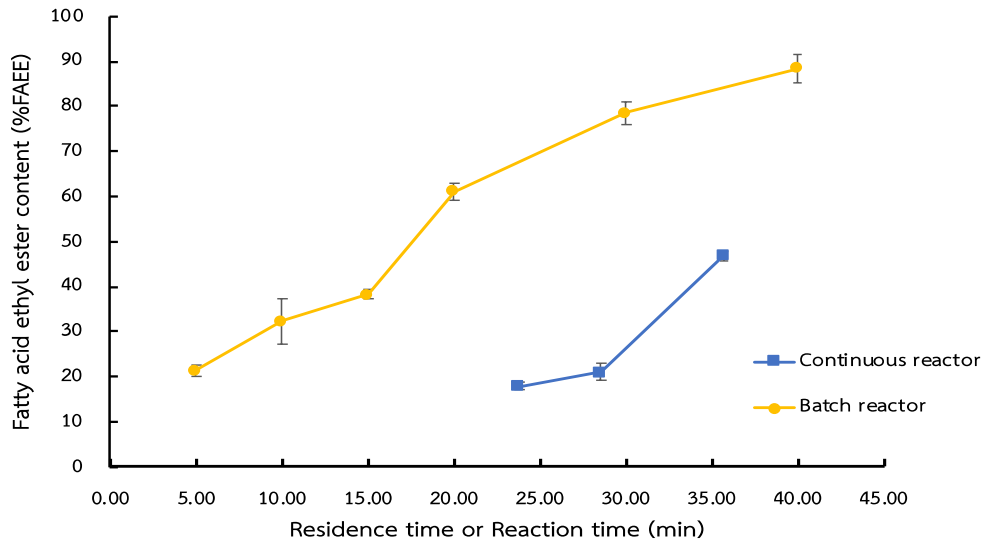
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการใช้ (กรัมต่อนาที)	เวลาที่สารตั้งต้นอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ (นาที)	ร้อยละกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์
275	2	35.69	46.90
	2.5	28.55	21.10
	3	23.79	17.84
300	2	30.46	76.92
	2.5	24.37	69.00
	3	20.30	58.56
325	2	25.16	83.35
	2.5	20.13	77.59
	3	16.77	65.21

จากรูปที่ 4.18 และตารางที่ 4.2 แสดงผลของเวลาของสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์ที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 275 องศาเซลเซียส เวลาของสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 35.69 28.55 และ 23.79 นาที มีปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ร้อยละ 46.90 21.10 และ 17.84 ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลาของสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 30.46 24.37 และ 20.30 นาที มีปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ร้อยละ 76.92 69.00 และ 58.56 ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส เวลาของสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 25.16 20.13 และ 16.77 นาที มีปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ร้อยละ 83.35 77.59 และ 65.21 ตามลำดับ โดยเวลาของสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์จะขึ้นกับอุณหภูมิ และอัตราการไหล โดยเมื่ออัตราการไหลและอุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้เวลาของสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์มีค่าลดลง จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิหนึ่งเมื่อเวลาของสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลจะส่งผลทำให้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ลดลงโดยที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 325 องศาเซลเซียส และเวลาของสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์ 25.16 นาที จะให้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์สูงสุดร้อยละ 83.35

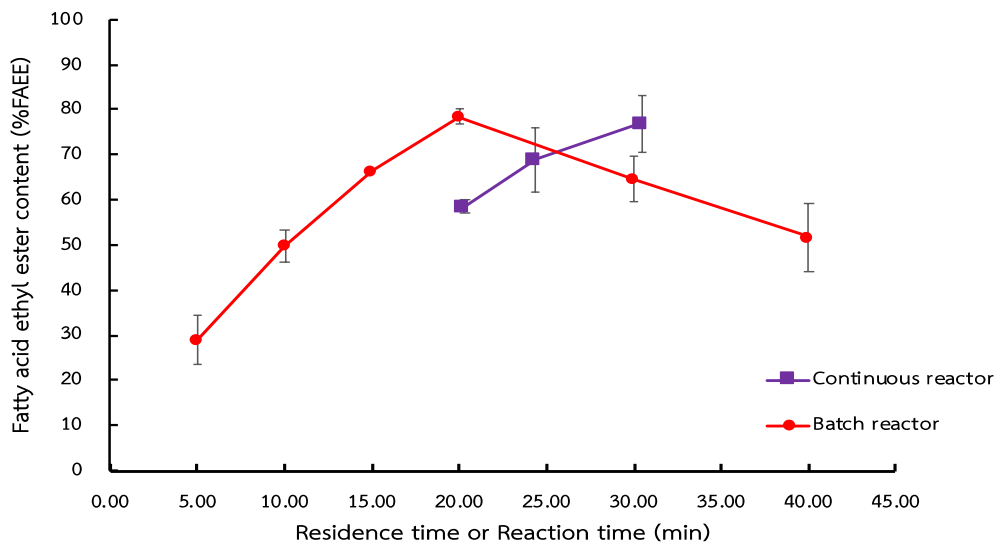
ดังนั้นภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ร้อยละปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์สูงสุดในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟบดด้วยด้วยเอทานอลภาวะเหนือวิกฤตโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องในช่วงภาวะการทดลองนี้ คือที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส และอัตราการไหล 2 กรัมต่อนาที และเวลาของสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์ 25.16 นาที ที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแฟบดต่อเอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล ซึ่งให้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์สูงที่สุดร้อยละ 83.35

สำหรับการผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ถ้าต้องการให้ได้ร้อยละปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์มากขึ้นที่อุณหภูมิหนึ่งๆ ทำได้โดยการเพิ่มความยาวท่อของเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งจะช่วยเพิ่มระยะเวลาของสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์ทำให้สารตั้งต้นมีระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยานานขึ้น

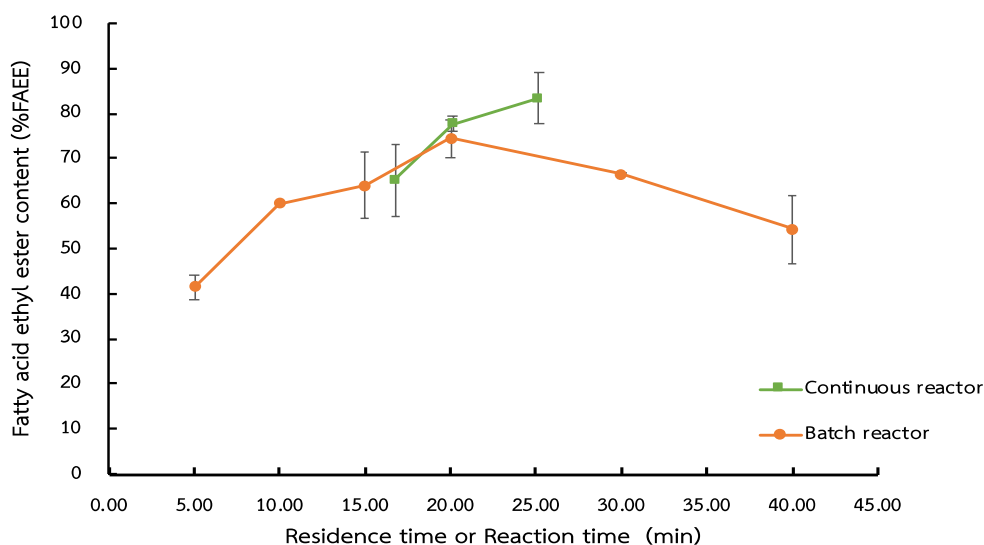
4.6 ผลของประเภทเครื่องปฏิกรณ์ (Effect of reactor type)



รูปที่ 4.19 ผลของประเภทเครื่องปฏิกรณ์ที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแพบต่อเอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล



รูปที่ 4.20 ผลของประเภทเครื่องปฏิกรณ์ที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแพบต่อเอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล



รูปที่ 4.21 ผลของประเภทเครื่องปฏิกรณ์ที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแพคต่อเอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล

จากรูปที่ 4.19 พบว่าที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์จะมากกว่าปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่ทุกๆเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์จะมีค่าสูงสุดร้อยละ 88.7 ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที และมีปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์สูงสุดร้อยละ 46.90 ที่เวลาของสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์ 35.69 นาที สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

จากรูปที่ 4.20 พบว่าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาประมาณ 20 นาที ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองแบบจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นที่เวลาประมาณ 30 นาที เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องจะให้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ที่สูงกว่าถึงร้อยละ 12.38

จากรูปที่ 4.21 พบว่าที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส เครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองแบบจะให้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ที่ใกล้เคียงกัน เวลาในการทำปฏิกิริยาประมาณ 15 นาที และเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องจะให้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ที่สูงกว่าที่เวลาประมาณ 20 และ 25 นาที เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องสารตั้งต้นจะถูกป้อนและไหลผ่านไปตามท่อทำให้สารตั้งต้นสามารถเกิดปฏิกิริยาระหว่างกันได้อย่างต่อเนื่อง แต่ในทางกลับกันเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์

สารตั้งต้นที่ถูกเปลี่ยนเป็นกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์แล้วบางส่วนยังอยู่ที่บริเวณผิวท่อที่มีความร้อนทำให้เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ และเกิดการสลายตัวทางความร้อนของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ได้

จากผลการทดลองข้างต้นจะเห็นได้ว่ากระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ จะให้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์สูงสุดร้อยละ 88.37 ที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที แต่สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องจะให้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์สูงสุดร้อยละ 83.35 ที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 2 กรัมต่อนาที และระยะเวลาของสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์ 25.16 นาที ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระบวนการผลิตไบโอดีเซลในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์จะต้องใช้อุณหภูมิต่ำและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่นาน ซึ่งแตกต่างจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่ใช้อุณหภูมิสูง แต่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ต่ำ เป็นผลมาจากการถ่ายโอนความร้อนและการผสมของสารภายในเครื่องปฏิกรณ์ เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องจะมีการถ่ายโอนความร้อนที่ดี จากอัตราส่วนพื้นที่ผิวของท่อต่อปริมาตรที่มีมากกว่าเมื่อเทียบกับปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ เมื่อสารตั้งต้นถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ด้วยปั๊มจะทำให้สารตั้งต้นเกิดการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) [40] ทำให้โมเลกุลของสารผสมระหว่างน้ำมันกากกาแฟบดและเอทานอลที่ภาวะเหนือวิกฤตที่อยู่บริเวณผนังท่อและบริเวณเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อสามารถเคลื่อนที่ไปมาอย่างไม่เป็นระเบียบและเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา สารตั้งต้นจึงเกิดการสัมผัสพื้นผิวของท่อระหว่างการไหลทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างท่อ ปฏิกิริยาจึงเกิดขึ้นได้สมบูรณ์และมีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงทำให้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาสั้นกว่ากระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ซึ่งในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์จะต้องใช้ระยะเวลาในการถ่ายโอนความร้อนที่นาน เนื่องจากไม่มีการไหลในเครื่องปฏิกรณ์การผสมกันของสารเกิดจากการเขย่าเครื่องปฏิกรณ์ในแนวตั้งเท่านั้น ทำให้สารตั้งต้นที่อยู่ใกล้กับผนังจะมีอุณหภูมิสูงสุด และสารตั้งต้นที่บริเวณเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจะมีอุณหภูมิต่ำสุด ซึ่งการถ่ายโอนความร้อนจะค่อยๆถ่ายโอนจากผิวท่อสู่ภายในจนถึงบริเวณเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าอย่างช้าๆ รวมกับการสลายตัวทางความร้อนบริเวณผนังท่อ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์จึงใช้เวลานานกว่า

ในการเลือกใช้เครื่องปฏิกรณ์สำหรับการผลิตไบโอดีเซลด้วยภาวะเหนือวิกฤต ต้องคำนึงถึงร้อยละผลิตผลิตภัณฑ์ และการใช้พลังงานในกระบวนการผลิต ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าปริมาณ

กรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองแบบจะมีปริมาณกรดไขมันที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาในการใช้พลังงาน พบว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์จะมีการใช้พลังงานที่สูงกว่า เนื่องจากในกระบวนการต้องมีการใช้พลังงานในการให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเริ่มต้นการผลิตทุกครั้ง และต้องมีการลดอุณหภูมิลงเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการ ทำให้ต้องใช้พลังงานสูงในแต่ละรอบของการผลิตจึงทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานที่มากกว่า แต่ในทางกลับกันเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องจะมีการให้พลังงานความร้อนแก่ระบบในการขึ้นเริ่มต้นการผลิตโดยไม่จำเป็นต้องมีการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิเพื่อเริ่มต้นการผลิตใหม่ ทำให้พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบคงที่ และสามารถนำไปใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อใช้สำหรับกระบวนการสกัดสารตั้งต้นได้หรือใช้สำหรับอุ่นวัตถุดิบโดยติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกระแสที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน ซึ่งจะช่วยลดการใช้พลังงาน และต้นทุนการผลิตได้ อีกทั้งในการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องมีข้อดีคือสามารถควบคุมอุณหภูมิ และความดันภายในระบบได้ง่ายทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพสม่ำเสมอ ดังนั้นจึงสรุปเบื้องต้นได้ว่าการเลือกใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องน่าจะเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจในการนำมาใช้สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยภาวะเหนือวิกฤต

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟบดในเอทานอลภาวะเหนือวิกฤตด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ และแบบต่อเนื่อง เพื่อศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ และหาภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ในขั้นตอนการเตรียมกากกาแฟบดแห้งสำหรับนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล กากกาแฟบดจะถูกนำมาอบไล่ความชื้นก่อนการนำไปใช้งาน พบว่าปริมาณความชื้นในกากกาแฟบดมีปริมาณร้อยละ 58.69 โดยน้ำหนักกากกาแฟบดเปียก และปริมาณความชื้นในกากกาแฟบดหลังการอบมีปริมาณร้อยละ 1.40 โดยน้ำหนักกากกาแฟบดแห้ง

5.1.2 จากการศึกษากระบวนการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟบดด้วยวิธีการชอกท์เลตโดยใช้ตัวทำละลายเอทานอลบริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยปริมาตร พบว่าตัวทำละลายเอทานอลสามารถสกัดน้ำมันจากกากกาแฟบดได้ร้อยละ 27.67 โดยน้ำหนักกากกาแฟบดแห้ง และเมื่อนำน้ำมันไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบ พบว่าองค์ประกอบของน้ำมันกากกาแฟบดประกอบไปด้วย กรดไขมันได้แก่ กรดปาล์มิติก กรดอะราซดิก กรดโอเลอิก และ กรดลิโนเลอิก และยังพบกรดไขมันอิสระ และน้ำ ในองค์ประกอบอีกด้วย เมื่อนำน้ำมันกากกาแฟบดไปวิเคราะห์หาโมเลกุลพบว่าน้ำมันกากกาแฟมีโมเลกุล 832.92 กรัมต่อโมล

5.1.3 จากการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟบดด้วยเอทานอลภาวะเหนือวิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาจาก 275 เป็น 350 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 ถึง 20 นาที จะส่งผลทำให้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น แต่เมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มสูงกว่า 20 นาที ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

5.1.4 จากการศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟบดด้วยเอทานอลภาวะเหนือวิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ พบว่าการเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจะทำให้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์เพิ่มสูงขึ้น แต่ถ้าเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่สูงเกินไปอาจทำให้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ลดลง

5.1.5 ภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ร้อยละปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์สูงสุดในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟบดด้วยเอทานอลภาวะเหนือวิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ได้แก่ ที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที ที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแฟบดต่อเอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล ซึ่งจะให้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ร้อยละ 88.37

5.1.6 จากการศึกษาผลของอัตราการไหลต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟบดด้วยเอทานอลภาวะเหนือวิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง พบว่าการเพิ่มอัตราการไหลของสารตั้งต้นจะส่งผลทำให้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์มีปริมาณลดลงที่ทุกอุณหภูมิของการทดลอง

5.1.7 จากการศึกษาผลของเวลาของสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์ต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟบดด้วยเอทานอลภาวะเหนือวิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ซึ่งระยะเวลาของสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์แปรผกผันกับอัตราการไหล และอุณหภูมิ พบว่าเมื่ออัตราการไหล และอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้เวลาของสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์ลดลง ส่งผลทำให้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์มีปริมาณลดลง

5.1.8 ภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ร้อยละปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์สูงสุดในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟบดด้วยเอทานอลภาวะเหนือวิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ได้แก่ ที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 2 กรัมต่อนาที และระยะเวลาของสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์ 25.16 นาที ที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกากกาแฟบดต่อเอทานอล 1 ต่อ 30 และความดัน 15 เมกะพาสคัล ซึ่งจะให้ปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์สูงสุดร้อยละ 83.35

5.1.9 จากการศึกษาผลของประเภทเครื่องปฏิกรณ์ต่อปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันกากกาแฟบดด้วยเอทานอลภาวะเหนือวิกฤต พบว่าที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส เครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์จะมีปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ที่สูงกว่า แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่ 300 องศาเซลเซียสขึ้นไป เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องจะมีปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ที่ใกล้เคียงและสูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ใกล้เคียงกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 กากกาแปบดที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลควรนำมาอบแห้งเพื่อไล่ความชื้นในกากกาแปบดออกก่อน ซึ่งจะช่วยให้การเก็บรักษากากกาแปบดได้ยาวนาน และลดการเกิดเชื้อราอีกทั้งยังช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำกับกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ ที่เป็นผลทำให้ปริมาณกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้น

5.2.2 ปริมาณน้ำมันที่สกัดได้จะขึ้นอยู่กับชนิดของเมล็ดกาแฟ ระดับการคั่ว หรือชนิดของตัวทำละลายที่นำมาใช้ ดังนั้นควรเลือกชนิดของกาแฟ และตัวทำละลายที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ปริมาณร้อยละน้ำมันที่สูง

5.2.3 การนำตัวทำละลายที่สามารถผลิตได้จากแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น เอทานอล มาใช้ในการกระบวนการผลิตไบโอดีเซลเป็นการช่วยลดการใช้ตัวทำละลายที่ได้จากแหล่งพลังงานฟอสซิล ซึ่งช่วยให้กระบวนการผลิตไบโอดีเซลเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น

5.2.4 การศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นเพียงการทดลองทางด้านวิทยาศาสตร์เท่านั้น ในการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมควรพิจารณาและนำผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ มาใช้ในการวิเคราะห์ร่วมด้วยเพื่อให้ทราบถึงความเป็นไปได้ในระดับอุตสาหกรรม

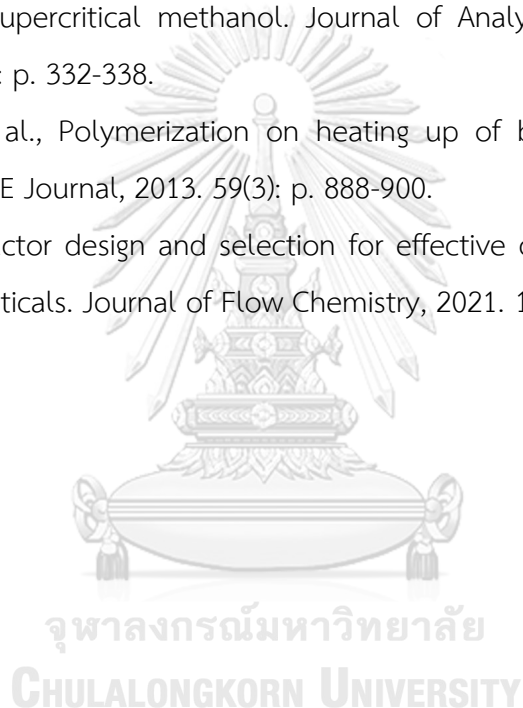
บรรณานุกรม

- [1] Efthymiopoulos, I., et al., Integrated strategies for water removal and lipid extraction from coffee industry residues. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2018. 29: p. 26-35.
- [2] Atelge, M.R., et al., Anaerobic co-digestion of oil-extracted spent coffee grounds with various wastes: Experimental and kinetic modeling studies. *Bioresour Technol*, 2021. 322: p. 124470.
- [3] Gui, M.M., K.T. Lee, and S. Bhatia, Supercritical ethanol technology for the production of biodiesel: Process optimization studies. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2009. 49(2): p. 286-292.
- [4] Sánchez-Camargo, A.P., et al., Supercritical Fluid Extraction, in *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*. 2014.
- [5] M., P., Coffee aroma candle. (Cooperative Education), in *Liberal Arts*. 2017, Siam.
- [6] เอี้ยวเล็ก, พ., การใช้ประโยชน์จากกากกาแฟเพื่อผลิตเชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงแข็ง, in *การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8*, ก. สมนึก, Editor. 2563, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [7] Mussatto, S.I., et al., A study on chemical constituents and sugars extraction from spent coffee grounds. *Carbohydrate Polymers*, 2011. 83(2): p. 368-374.
- [8] Mota, D.A., et al., Synthesis of Dietetic Structured Lipids from Spent Coffee Grounds Crude Oil Catalyzed by Commercial Immobilized Lipases and Immobilized *Rhizopus oryzae* Lipase on Biochar and Hybrid Support. *Processes*, 2020. 8(12).
- [9] N. Duang-in, W.Y., and A. Ketpeerasit, , The design and construction of hot press oil extraction machine, in *Mechanical Engineering Technology*. 2019, Rajamangala University of Technology Lanna.
- [10] ดันดิวัฒน์พันธ์., ณ., กากกาแฟ จากแก้วกาแฟสู่แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนสำหรับผลิตภัณฑ์ชีวภาพ. *วารสารสิ่งแวดล้อม*, ปีที่ 23 (ฉบับที่ 1). 2562.
- [11] Bandara, D.M.S.P., et al., Performance Evaluation of a Screw Type Oil Expeller for Extraction of Sesame Oil. *Engineer: Journal of the Institution of Engineers*, Sri

- Lanka, 2014. 47(1).
- [12] Yate, A.V., et al., A systematic evaluation of the mechanical extraction of *Jatropha curcas* L. oil for biofuels production. *Food and Bioproducts Processing*, 2020. 122: p. 72-81.
- [13] Kataria Mahendra B, H.K., Pankit Kondhiya, DESIGN OF A SCREW PRESS FOR DEWATERING OF CATTLE DUNG SLURRY, in Department of Mechanical Engineering. p. 296-302.
- [14] Priego-Capote, F., Solid-liquid extraction techniques, in *Analytical Sample Preparation With Nano- and Other High-Performance Materials*. 2021. p. 111-130.
- [15] Losier, F.F.C.a.M., *Comprehensive Analytical Chemistry XXXVII*. Chapter 11 Liquid-liquid extraction 2002. 297-340.
- [16] Taylor, M.A.-K.a.L.T., Nitrous Oxide versus Carbon Dioxide for Supercritical Fluid Extraction and Chromatography of Amines. *Anal. Cham*, 1990. 62: p. 1177-1180.
- [17] Pourmortazavi, S.M. and S.S. Hajimirsadeghi, Supercritical fluid extraction in plant essential and volatile oil analysis. *J Chromatogr A*, 2007. 1163(1-2): p. 2-24.
- [18] Biodiesel: The Use of Vegetable Oils and Methyl Esters as Alternative Diesel Fuels. *Indian Streams Research Journal*, 2012. 2(7): p. 1-10.
- [19] Gebremariam, S.N. and J.M. Marchetti, Economics of biodiesel production: Review. *Energy Conversion and Management*, 2018. 168: p. 74-84.
- [20] Othman, M.F., et al., Green fuel as alternative fuel for diesel engine: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017. 80: p. 694-709.
- [21] Wongjaikham, W., et al., Low-cost alternative biodiesel production apparatus based on household food blender for continuous biodiesel production for small communities. *Sci Rep*, 2021. 11(1): p. 13827.
- [22] Alnuami W., B.A., Etti C. J., Jassim L. I., Gomes G. A. C., Evaluation of Different Materials for Biodiesel Production. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 2014. 3(8).
- [23] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการศึกษาและจัดทำเครื่องต้นแบบผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบ และน้ำมันเมล็ดในปาล์มระดับชุมชน.
- [24] Felix, J.D., et al., Methanol and ethanol concentrations in a Greenland ice core. *Atmospheric Environment*, 2019. 217.

- [25] Tajuddin, N.A., A.F. Lee, and K. Wilson, Production of biodiesel via catalytic upgrading and refining of sustainable oleaginous feedstocks, in Handbook of Biofuels Production. 2016. p. 121-164.
- [26] Meher, L., D. Vidyasagar, and S. Naik, Technical aspects of biodiesel production by transesterification—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2006. 10(3): p. 248-268.
- [27] Aransiola, E.F., et al., A review of current technology for biodiesel production: State of the art. *Biomass and Bioenergy*, 2014. 61: p. 276-297.
- [28] Demirbas, A., Biodiesel production from vegetable oils via catalytic and non-catalytic supercritical methanol transesterification methods. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2005. 31(5-6): p. 466-487.
- [29] Pal, J., A. Patla, and R. Subramanian, Thermodynamic properties of forming methanol-water and ethanol-water clusters at various temperatures and pressures and implications for atmospheric chemistry: A DFT study. *Chemosphere*, 2021. 272: p. 129846.
- [30] ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. ๒๕๖๒. p. 37- 39.
- [31] ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล พ.ศ. ๒๕๖๓. 2563. p. 11-13.
- [32] Oliveira, É.R., et al., Potential of alternative solvents to extract biologically active compounds from green coffee beans and its residue from the oil industry. *Food and Bioproducts Processing*, 2019. 115: p. 47-58.
- [33] Son, J., et al., Wet in situ transesterification of spent coffee grounds with supercritical methanol for the production of biodiesel. *Bioresour Technol*, 2018. 259: p. 465-468.
- [34] Mani Rathnam, V., J.M. Modak, and G. Madras, Non-catalytic transesterification of dry microalgae to fatty acid ethyl esters using supercritical ethanol and ethyl acetate. *Fuel*, 2020. 275.
- [35] Yuliana, M., et al., A one-pot synthesis of biodiesel from leather tanning waste using supercritical ethanol: Process optimization. *Biomass and Bioenergy*, 2020. 142.

- [36] Trentini, C.P., et al., Production of esters from grease trap waste lipids under supercritical conditions: Effect of water addition on ethanol. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2019. 147: p. 9-16.
- [37] Jenkins, R.W., et al., Production of Biodiesel from Vietnamese Waste Coffee Beans: Biofuel Yield, Saturation and Stability are All Elevated Compared with Conventional Coffee Biodiesel. *Waste and Biomass Valorization*, 2016. 8(4): p. 1237-1245.
- [38] Shin, H.-Y., et al., Thermal decomposition and stability of fatty acid methyl esters in supercritical methanol. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2011. 92(2): p. 332-338.
- [39] Hu, X., et al., Polymerization on heating up of bio-oil: A model compound study. *AIChE Journal*, 2013. 59(3): p. 888-900.
- [40] Hu, C., Reactor design and selection for effective continuous manufacturing of pharmaceuticals. *Journal of Flow Chemistry*, 2021. 11(3): p. 243-263.



ภาคผนวก ก

ปริมาณความชื้นในกากกาแฟบด และร้อยละปริมาณน้ำมันกากกาแฟบด

ก.1 ปริมาณความชื้นในกากกาแฟบด

ตารางที่ ก.1 น้ำหนักกากกาแฟบดก่อนและหลังการอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และร้อยละปริมาณความชื้นในกากกาแฟบด

ตัวอย่าง	น้ำหนักกากกาแฟบดก่อนอบ (กรัม)	น้ำหนักกากกาแฟบดหลังอบ (กรัม)	ร้อยละปริมาณความชื้นในกากกาแฟบด
1	21.47	8.86	58.73
2	20.34	8.47	58.36
3	21.43	8.79	58.98

ตารางที่ ก.2 น้ำหนักกากกาแฟบด และร้อยละปริมาณความชื้นในกากกาแฟบดแห้ง

ตัวอย่าง	น้ำหนักกากกาแฟบดก่อนอบ (กรัม)	น้ำหนักกากกาแฟบดหลังอบ (กรัม)	ร้อยละปริมาณความชื้นในกากกาแฟบด
1	20.02	19.75	1.35
2	20.03	19.79	1.20
3	20.02	19.70	1.65

ก.2 ปริมาณน้ำมันที่สกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอลโดยวิธีชอกท์เลต

ตารางที่ ก.3 แสดงปริมาณน้ำมันที่สกัดได้จากกากกาแฟบดสกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอลบริสุทธิ์ร้อยละ 95 ของน้ำหนัก โดยวิธีชอกท์เลตเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก.3 น้ำหนักกากกาแฟบด น้ำมันกากกาแฟบด และร้อยละปริมาณน้ำมันกากกาแฟบด

ตัวอย่าง	น้ำหนักกากกาแฟบด (กรัม)	น้ำหนักน้ำมันกากกาแฟบด (กรัม)	ร้อยละปริมาณน้ำมันกากกาแฟบด
1	20.02	5.66	28.30
2	20.02	5.49	27.45
3	20.00	5.47	27.27

ภาคผนวก ข
การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันกากกาแฟบด

ข.1 การวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมัน

ตารางที่ ข.1 ร้อยละปริมาณกรดไขมันในน้ำมันกากกาแฟบด

ชนิดของกรดไขมัน	พื้นที่ใต้กราฟ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
Palmitic acid (C16:0)	3122.6	36.99
Arachidic acid (C20:0)	296.9	3.52
Oleic acid (C18:1)	694.1	8.22
Linoleic acid (C18:2)	4327.3	51.27
รวม	8440.9	100

ข.2 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายมาตรฐาน

1 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน 0.1 นอม่ลร์ ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

สารละลาย NaOH 0.1 M = 1 N = 40 กรัม

ถ้าต้องการสารละลาย 0.1 N NaOH ต้องใช้ NaOH $40 \times 0.1 = 4$ กรัม

จากนั้นนำ NaOH 4 กรัม มาเติมน้ำกลั่นจนครบ 1000 มิลลิลิตร ในขวดปรับปริมาตร

2 หาความเข้มข้นของ 0.1 นอม่ลร์ ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

หาความเข้มข้นของ NaOH โดยใช้โพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต (KHP) ประมาณ 0.5 กรัม ผสมน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร แล้วนำมาไตเตรตกับ 0.1 N NaOH โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ เมื่อถึงจุดยุติสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีชมพูอ่อน โดยความเข้มข้นของ NaOH สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$N \text{ ของ NaOH} = \frac{\text{น้ำหนักของ KHP} \times 1000}{\text{มวลโมเลกุล KHP} \times \text{ปริมาตร NaOH ที่ใช้ในการไตเตรต}}$$

จากการเทียบมาตรฐานหาความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ด้วย KHP ผลแสดงดังตารางที่ ข.2

ตารางที่ ข.2 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ตัวอย่าง	น้ำหนัก KHP (กรัม)	ปริมาณ NaOH (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นของ NaOH
1	0.5139	31.8	0.0792
2	0.5113	32.3	0.0776
3	0.5137	32.0	0.0787
		ค่าเฉลี่ย	0.0785

2 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน 0.5 นอร์มัล ของกรดไฮโดรคลอริก (HCl)

สารละลาย HCl มีความเข้มข้นข้างขวดร้อยละ 37 โดยน้ำหนัก

โดยสารละลาย 100 กรัม มี HCl 37 กรัม (มวลโมเลกุล HCl = 36)

ใน 1 N HCl มี HCl อยู่ 36 กรัม

ถ้าต้องการสารละลาย 0.5 N HCl ต้องชั่ง HCl $36 \times 0.5 = 18$ กรัม ในน้ำ 1 ลิตร

ถ้าต้อง HCl 37 กรัม ต้องชั่งสารละลาย HCl ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 37 โดยน้ำหนัก มา 100 กรัม

ดังนั้นต้องการ HCl 18 กรัม ต้องชั่งสารละลาย HCl 48.64 กรัม

แต่อย่างไรก็ตามสารละลาย HCl อยู่ในรูปของของเหลว ดังนั้นต้องเปลี่ยน กรัม ให้เป็น มิลลิลิตร

โดย ความหนาแน่นของ HCl เท่ากับ 1.19 กรัมต่อมิลลิลิตร

ถ้าต้องการสารละลาย HCl 48.64 กรัม จะต้องใช้ 40.882 มิลลิลิตร

ดังนั้น ถ้าต้องการสารละลายความเข้มข้น 0.5 N HCl ต้องใช้สารละลาย HCl ความเข้มข้นร้อยละ 37

โดยน้ำหนัก ปริมาตร 40.882 มิลลิลิตร ในน้ำ 1000 มิลลิลิตร

3 หาความเข้มข้นของ 0.5 นอร์มัล ของกรดไฮโดรคลอริก (HCl)

โดยการนำ NaOH ที่ได้จากข้อที่ 2 มา 25 มิลลิลิตร แล้วนำมาไตเตรตกับสารละลาย HCl

โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ เมื่อถึงจุดยุติสารละลายจะเปลี่ยนจากสีชมพูเป็นสีชมพูอ่อน

โดยความเข้มข้นของ HCl สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$N_1V_1 = N_2V_2$$

จากการเทียบมาตรฐานหาความเข้มข้นของสารละลาย HCl ด้วยสายละลาย NaOH ผลแสดงดัง

ตารางที่ ข.3

ตารางที่ ข.3 ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก

ตัวอย่าง	ปริมาตร NaOH (มิลลิลิตร)	ปริมาณ HCl (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น ของ HCl
1	20	2.2	0.7136
2	20	2.3	0.6825
3	20	2.2	0.7135
ค่าเฉลี่ย			0.7032

ข.3 การวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระ

การวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระด้วยมาตรฐาน AOCS Ca 5a-40 ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\% \text{ FFA} = \frac{((V \cdot M \cdot 28.44))}{m}$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้สำหรับการไตเตรต

(หน่วย: มิลลิลิตร, ml)

M คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (หน่วย: นอร์มัล, N)

m คือ น้ำหนักสารตัวอย่าง (หน่วย: กรัม, g)

ตารางที่ ข.4 ปริมาณร้อยละกรดไขมันอิสระ

ตัวอย่าง	น้ำหนักน้ำมันกากกาแฟบด (กรัม)	ปริมาตรของ NaOH (มิลลิลิตร)	ร้อยละกรดไขมันอิสระ
1	1.05	2.70	5.66
2	1.12	2.90	5.70
3	1.03	2.60	5.56
ค่าเฉลี่ย			5.64

ข.4 การวิเคราะห์หาค่าสะพอนิฟิเคชัน (Saponification value, S.V.) เพื่อคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันกากกาแฟ

การวิเคราะห์หาค่าสะพอนิฟิเคชันของน้ำมันกากกาแฟทำภายใต้มาตรฐาน AOCS Cd 3-25 : ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$S.V. = \frac{((B - S) \cdot M)}{W} \times 56.1$$

เมื่อ B คือ ปริมาตรสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 0.5 นอร์มัล ที่ใช้ไตเตรตกับ

สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในเอทานอล (หน่วย: มิลลิลิตร, ml)

S คือ ปริมาตรสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 0.5 นอร์มัล ที่ใช้ไตเตรตกับ

สารตัวอย่าง (หน่วย: มิลลิลิตร, ml)

W คือ น้ำหนักสารตัวอย่าง (หน่วย: กรัม, g)

จากนั้นนำค่าสะพอนิฟิเคชันที่ได้ไปคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight, Mw) ของน้ำมันกากกาแฟดังสมการต่อไปนี้

$$Mw = \frac{(3 \cdot Mw_{KOH} \cdot 1000)}{S.V.}$$

เมื่อ Mw_{KOH} คือ มวลโมเลกุลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 56.1

(หน่วย: กรัมต่อโมล, g/mol)

S.V. คือ ค่าสะพอนิฟิเคชัน (หน่วย: มิลลิกรัม KOH ต่อกรัม, mg_{KOH}/g)

โดยค่าสะพอนิฟิเคชันและมวลโมเลกุลของน้ำมันกากกาแฟที่คำนวณได้แสดงดังตารางที่ ข.6

ตารางที่ ข.5 ปริมาตรสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 0.5 นอร์มัล ที่ใช้ไตเตรตกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในเอทานอล (KOH)

ตัวอย่าง	น้ำหนักของ KOH (กรัม)	ปริมาตรของ HCl (มิลลิลิตร)
1	25	17.80
2	25	17.70
3	25	18.10
	ค่าเฉลี่ย	17.87

ตารางที่ ข.6 ค่าสะพอนิฟิเคชัน และมวลโมเลกุลของน้ำมันกากกาแฟบด

ตัวอย่าง	น้ำหนักน้ำมันกากกาแฟบด (กรัม)	ปริมาตรของ HCl (มิลลิลิตร)	ค่าสะพอนิฟิเคชัน	มวลโมเลกุลของน้ำมันกากกาแฟบด
1	0.25	16.60	199.88	842.11
2	0.28	16.40	206.64	814.55
3	0.25	16.60	199.88	842.11
		ค่าเฉลี่ย	202.13	832.92

ข.6 การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำในน้ำมันกากกาแฟบด

การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำในตัวอย่างด้วยเครื่องวิเคราะห์หาปริมาณน้ำโดยวิธีการไตเตรตด้วยเทคนิคคาร์ล ฟิสเซอร์ (Karl Fischer titration) ผลแสดงดังตารางที่ ข.7

ตารางที่ ข.7 ร้อยละปริมาณน้ำในน้ำมันกากกาแฟบด

ตัวอย่าง	น้ำหนักน้ำมันกากกาแฟบด (กรัม)	ร้อยละปริมาณน้ำในน้ำมันกากกาแฟบด
1	0.0089	3.72
2	0.0083	1.67
	ค่าเฉลี่ย	2.69

ข.7 การวิเคราะห์ปริมาณสารที่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาสะพอนิฟิเคชันได้ (Unsaponifiable matter, UM)

การวิเคราะห์ปริมาณสารที่ไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้ในน้ำมันกากกาแพบดทำภายใต้มาตรฐาน AOCS Cd 6a-40 ซึ่งสามารถคำนวณหาร้อยละปริมาณสารที่ไม่สะพอนิฟิเคชันได้จากสูตร

$$\text{ร้อยละปริมาณสารที่ไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้} = \frac{A \cdot 100}{M}$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักของสารที่เหลือจากการทำปฏิกิริยากับเบส (หน่วย: กรัม)

M คือ น้ำหนักของสารตัวอย่าง (หน่วย: กรัม)

ตารางที่ ข.8 ร้อยละปริมาณสารที่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาสะพอนิฟิเคชัน

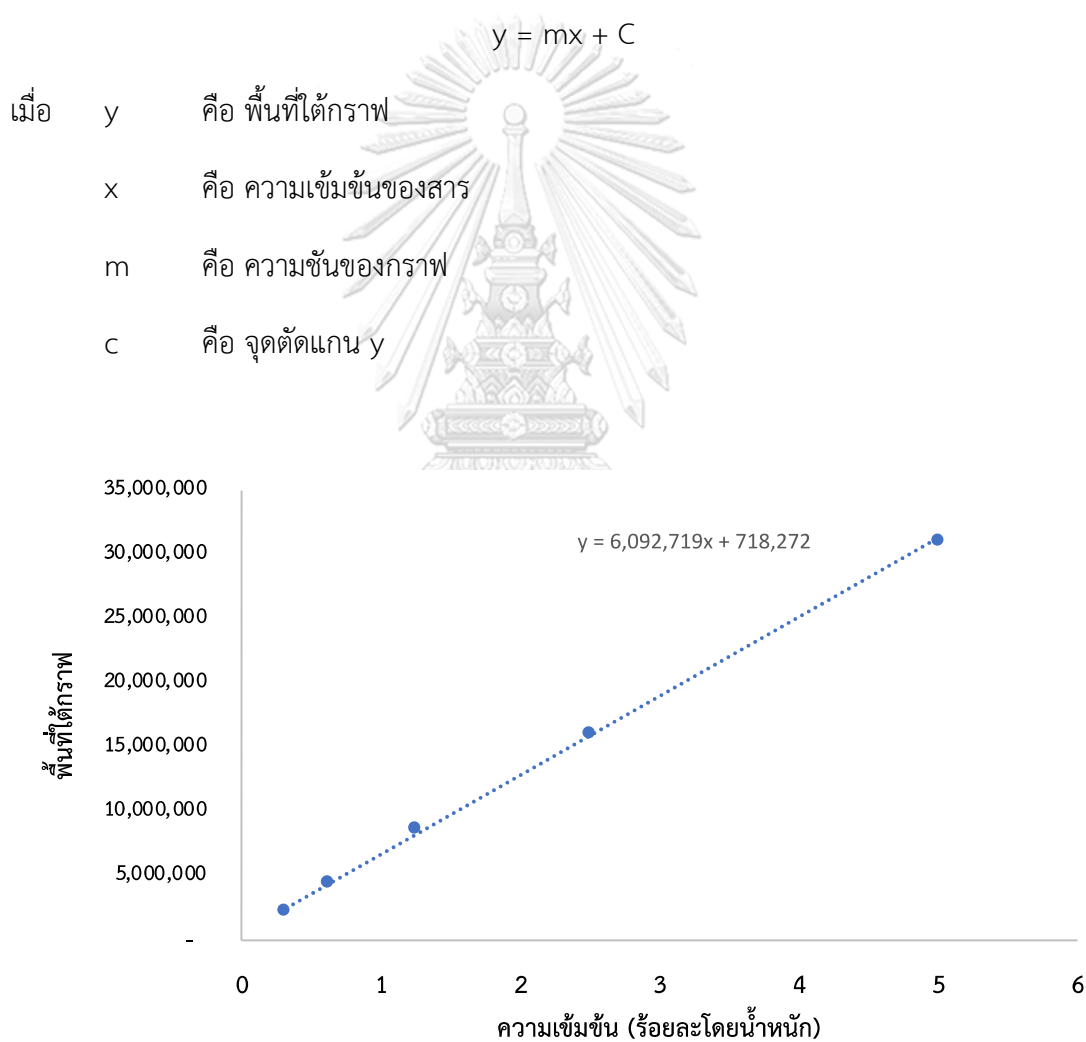
ตัวอย่าง	น้ำหนักน้ำมันกากกาแพบด (กรัม)	น้ำหนักสารที่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยา (กรัม)	ร้อยละปริมาณสารที่ไม่สามารถทำปฏิกิริยา
1	2.04	0.03	1.47
2	2.11	0.04	1.89
3	2.08	0.03	1.44
		ค่าเฉลี่ย	1.60

ภาคผนวก ค

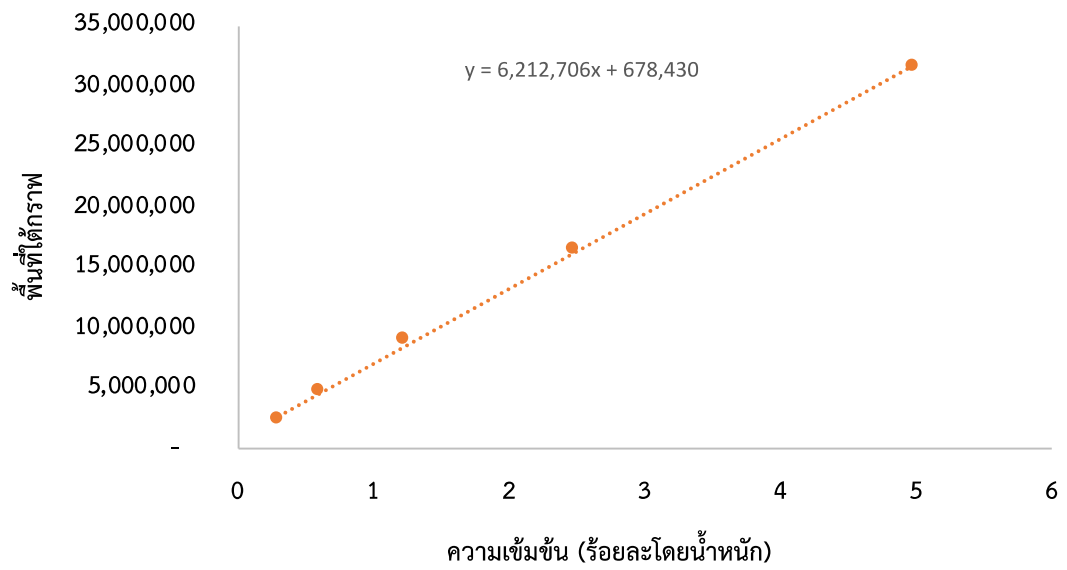
การวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ และการคำนวณเวลาของสารในเครื่องปฏิกรณ์

ค.1 การวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์

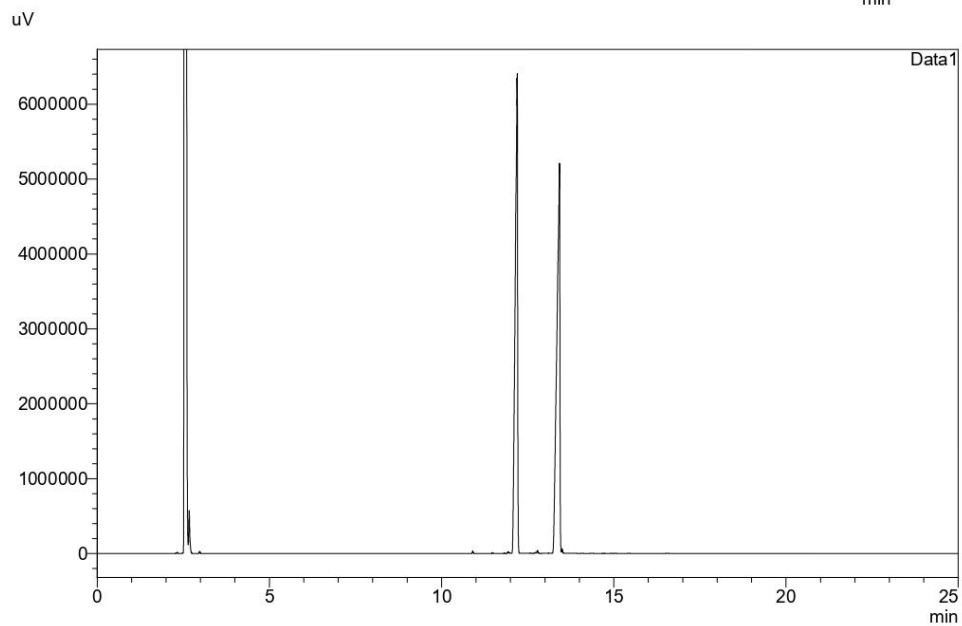
การวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมัน สามารถคำนวณเทียบกับกราฟมาตรฐานที่ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานต่าง ๆ โดยกราฟมาตรฐานประกอบไปด้วยแกน x คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน แกน y คือ พื้นที่ใต้กราฟ และสมการเส้นตรง ดังสมการ



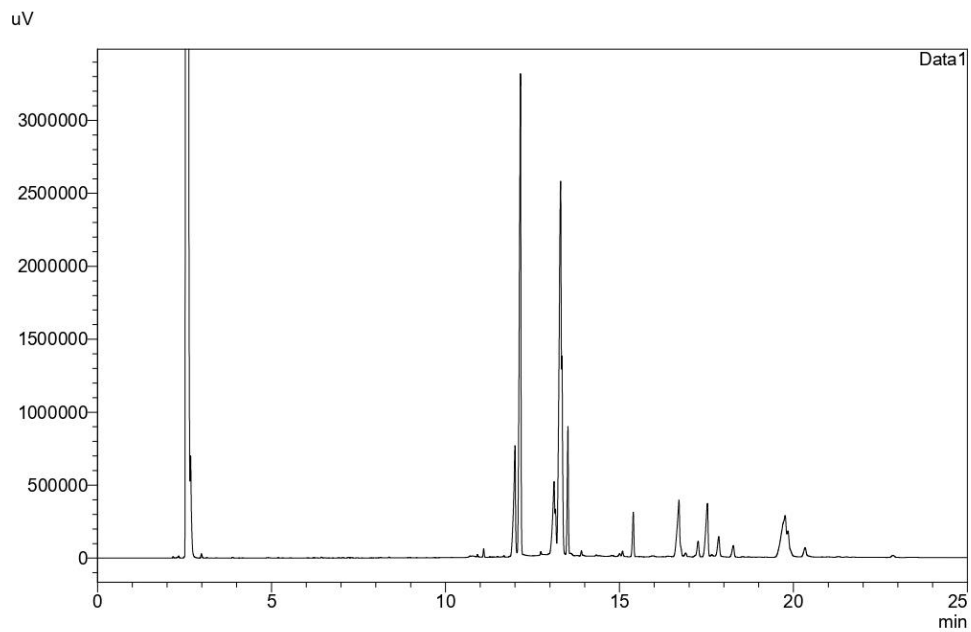
รูปที่ ค.1 กราฟมาตรฐานของกรดไขมันเอทิลปาล์มิเตต



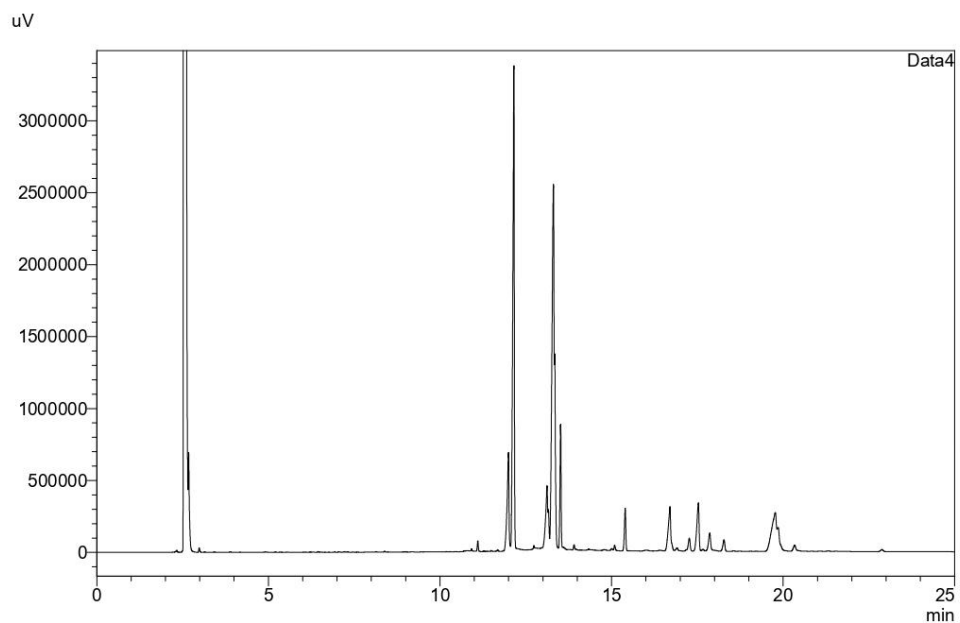
รูปที่ ค.2 กราฟมาตรฐานของกรดไขมันเอทิลลิโนลิเอต



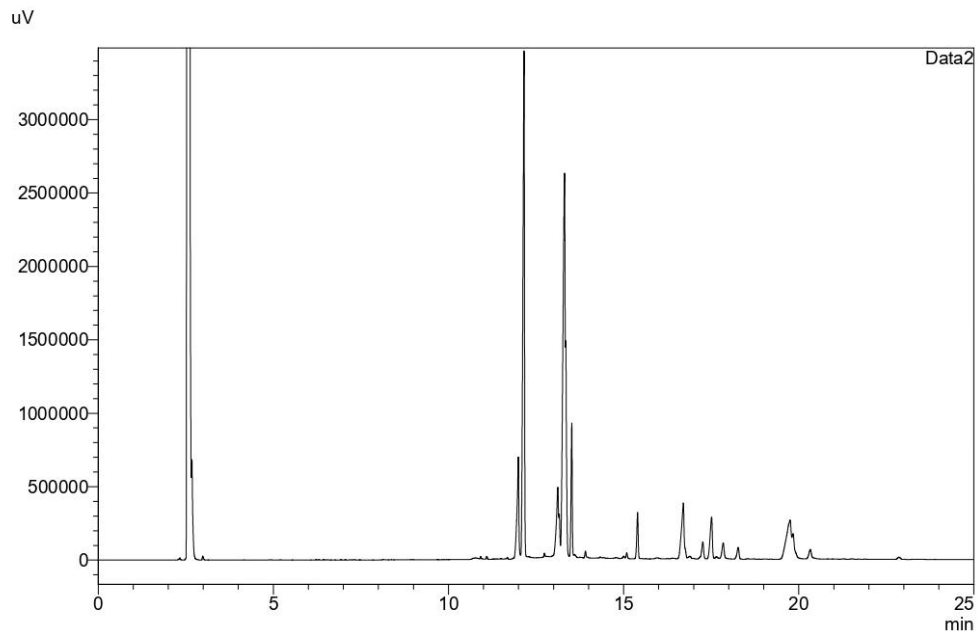
รูปที่ ค. 3 โคมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐานเอทิลลิโนลิเอต และเอทิลปาล์มิเตต



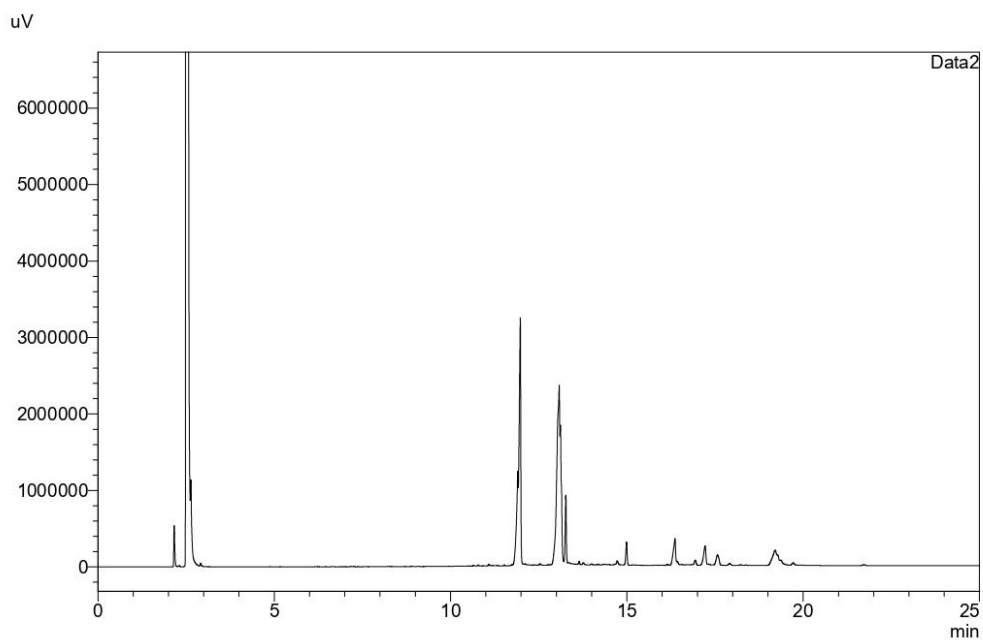
รูปที่ ๓.๔ โคมาโทแกรมของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ (ตัวอย่างที่ 1) จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที



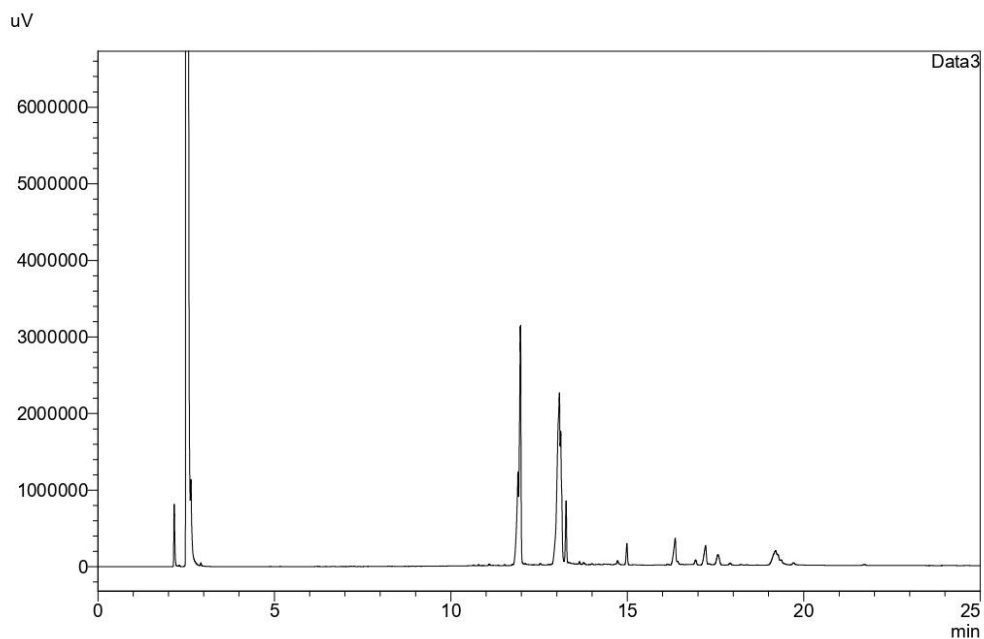
รูปที่ ๓.๕ โคมาโทแกรมของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ (ตัวอย่างที่ 2) จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที



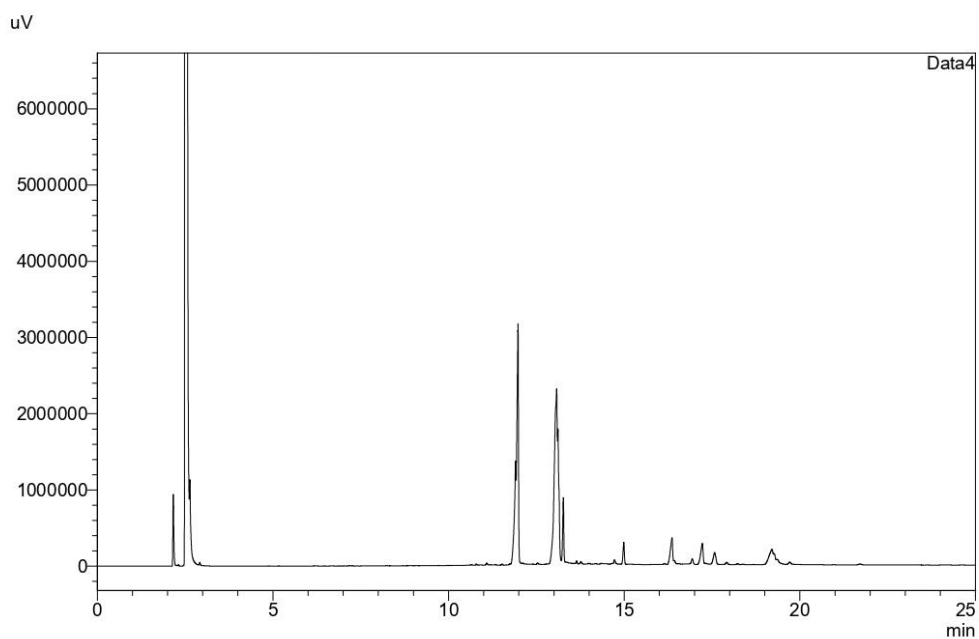
รูปที่ ค.6 โคมาโทแกรมของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ (ตัวอย่างที่ 3) จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที



รูปที่ ค.7 โคมาโทแกรมของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ (ตัวอย่างที่ 1) จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 2 กรัมต่อนาที และเวลาในสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์ 25.16 นาที



รูปที่ ค.8 โคมาโทแกรมของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ (ตัวอย่างที่ 2) จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 2 กรัมต่อนาที และ เวลาในสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์ 25.16 นาที



รูปที่ ค.9 โคมาโทแกรมของกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์ (ตัวอย่างที่ 3) จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 2 กรัมต่อนาที และ เวลาในสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์ 25.16 นาที

ค.2 การคำนวณเวลาของสารในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

การคำนวณเวลาของสารในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องสามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$\text{ดังต่อไปนี้} \quad \tau = \frac{V}{V_0} \quad \text{และ} \quad V_0 = \frac{W_{\text{feed}}}{\rho_{\text{mixture at reaction condition}}}$$

โดย τ คือ ระยะเวลาของสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์
(Residence time, หน่วย: นาที, min)

V คือ ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ (หน่วย: ลูกบาศก์เซนติเมตร, cm^3)

V_0 คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารตั้งต้น
(หน่วย: กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร, g/cm^3)

W_{feed} คือ อัตราการไหลของสารตั้งต้น (หน่วย: กรัมต่อนาที, g/min)

ρ คือ ความหนาแน่นของสารตั้งต้นที่ความดัน และอุณหภูมิต่าง ๆ
(หน่วย: กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร, g/cm^3)

ตารางที่ ค.1 ความหนาแน่นของสารตั้งต้นที่ความดัน และอุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (เมกะพาสคัล)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
275	18	0.465
300		0.397
325		0.328

ตารางที่ ค.2 ระยะเวลาของสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิ และอัตราการไหลต่าง ๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการไหล (กรัมต่อนาที)		
	2	2.5	3
275	35.69	28.55	23.79
300	30.46	24.37	20.30
325	25.16	20.13	16.77

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ณัฐกิตต์ เจริญดี
วัน เดือน ปี เกิด	21 มกราคม 2541
สถานที่เกิด	นครราชสีมา
วุฒิการศึกษา	ระดับปริญญาตรีคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ภาควิชา วิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ สาขาวิชาวิศวกรรมปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์
ที่อยู่ปัจจุบัน	108 ม.4 ต.เริงรัมย์ อ.บำเหน็จณรงค์ จ.ชัยภูมิ 36160



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY