

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสุปุดำและน้ำมันปาล์มโดยใช้เอทิลแอลกอฮอล์ที่ภาวะเหนือวิกฤตในเครื่อง  
ปฏิกรณ์ไมโคร



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2558  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

BIODIESEL PRODUCTION FROM JATROPHA OIL AND PALM OIL  
USING SUPERCRITICAL ETHYL ACETATE IN MICROREACTOR

Miss Nanthana Sootchiewcharn



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Petrochemistry and Polymer Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสุปุดำและน้ำมันปาล์มโดยใช้
โดย	เอทิลแอลกอฮอล์ที่ภาวะเหนือวิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร
สาขาวิชา	นางสาวนันทนา สุตรเชี่ยวชาญ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ
	ดร.ลลิตา อตันโถ

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ดร.ลลิตา อตันโถ)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.มงคล สุขวัฒนาสินธุ์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนาธิป สามารถ)

นันทนา สุตรเชี่ยวชาญ : การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและน้ำมันปาล์มโดยใช้เอทิลแอสเททที่ภาวะเหนือวิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร (BIODIESEL PRODUCTION FROM JATROPHA OIL AND PALM OIL USING SUPERCRITICAL ETHYL ACETATE IN MICROREACTOR) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร.ลลิตา อัดนโถ, 95 หน้า.

การผลิตไบโอดีเซลโดยทั่วไปจะผลิตจากน้ำมันพืชและแอลกอฮอล์ด้วยปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) เกิดเป็นเอสเทอร์ของกรดไขมัน และมีกลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิต อุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซลมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นในอนาคต ซึ่งจะส่งผลให้มีปริมาณกลีเซอรอลมากเกินไปเกินความต้องการและจะต้องถูกจัดการในรูปของเสีย ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลแบบไม่เกิดกลีเซอรอล โดยการทำให้ปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอริฟิเคชัน (Interesterification reaction) ระหว่างน้ำมันพืชกับเอทิลแอสเททที่ภาวะเหนือวิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร ซึ่งจะได้เอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty Acid Ethyl Ester, FAEE) และ ไตรแอสทีนเป็นผลพลอยได้แทนที่กลีเซอรอล โดยศึกษาผลของปัจจัยในกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้อง เช่น ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสเททต่อน้ำมัน (30:1-50:1) ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (330-380 องศาเซลเซียส) ผลของความดันในการทำปฏิกิริยา (100-200 บาร์) ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (1-60 นาที) และผลของชนิดน้ำมันพืช (น้ำมันสบู่ดำและน้ำมันปาล์ม) จากผลการทดลองพบว่า การใช้อุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล(เอทิลเอสเทอร์และไตรแอสทีน) เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามอุณหภูมิและระยะเวลาที่สูงเกินไป จะส่งผลให้ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ลดลงเนื่องจากการสลายตัวทางความร้อน โดยเมื่อใช้น้ำมันปาล์มเป็นสารตั้งต้น จะได้รับร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และไบโอดีเซลสูงกว่าน้ำมันสบู่ดำ เนื่องจากน้ำมันปาล์มมีปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวสูงกว่า ทำให้มีเสถียรภาพทางความร้อนดีกว่า นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาผลของการเติมกรดแอสติกและน้ำเพื่อเป็นสารเติม แต่งในน้ำมันปาล์ม โดยพบว่าการเติมกรดแอสติก 2.5% และน้ำ 7.5% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสเททต่อน้ำมัน 50:1 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที จะได้รับร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นเป็น 70.0% และ 88.3% ตามลำดับ

สาขาวิชา ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 5671998023 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS: BIODIESEL / INTERESTERIFICATION REACTION / MICROREACTOR / SUPERCRITICAL / ETHYL ACETATE

NANTHANA SOOTCHIEWCHARN: BIODIESEL PRODUCTION FROM JATROPHA OIL AND PALM OIL USING SUPERCRITICAL ETHYL ACETATE IN MICROREACTOR. ADVISOR: ASST. PROF.PRASERT REUBROYCHAROEN, Ph.D., CO-ADVISOR: LALITA ATTANATHO, Ph.D., 95 pp.

The glycerol-free process for producing biodiesel was investigated in this study. Biodiesel production from the interesterification reaction of vegetable oil with supercritical ethyl acetate was performed in microreactor. The influence of reaction temperature (330-380°C) pressure (100-200 bar) residence time (1-60 min) and ethyl acetate to oil molar ratio (30:1-50:1) was evaluated. Two different oil with different fatty acid composition were utilized; Jatropha oil and Palm oil. Results showed that reaction temperature and residence time had positive effect on fatty acid ethyl esters (FAEE) and biodiesel yield (FAEE and triacetin). However, the partly decomposition which led to the decreasing of FAEE yield was observed at high temperature and long residence time. The higher FAEE and biodiesel yield were obtained when using palm oil as feedstock, due to the higher saturated fatty acid content and higher thermal stability of palm oil compared to Jatropha oil. Moreover, the addition of additive (acetic and water) in palm oil had positive effect on FAEE and biodiesel yield. The higher FAEE yield of 70.0% and biodiesel yield of 88.3% were obtained when using 2.5 wt% acetic acid and 7.5 wt% water at temperature of 350°C pressure of 200 bar ethyl acetate to oil molar ratio of 50:1 and residence time of 20 min.

Field of Study: Petrochemistry and  
Polymer Science

Academic Year: 2015

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ดีด้วยความช่วยเหลือที่ดีของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ซึ่งให้คำแนะนำและแนะแนวทางการวิจัยมาโดยตลอด ขอขอบคุณดร.ลลิตา อັตนโถ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ให้คำปรึกษาการวางแผนการทำงานวิจัย ให้ความรู้ แนะนำแนวทาง ตลอดจนการเขียนเล่มวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.มงคล สุขวัฒนาสินธิ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนาธิป สามารถ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ที่มอบทุนในการวิจัยรวมถึงขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่อำนวยความสะดวกด้านอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง สารเคมีต่างๆ ตลอดจนอำนวยความสะดวกด้านสถานที่ทำการทดลอง สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณคุณพ่อคุณแม่ผู้อบรมสั่งสอนให้กำลังใจช่วยเหลือและให้โอกาสทางการศึกษาที่ดีตลอดมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.4 ขอบเขตงานวิจัย .....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	4
2.2 ไบโอดีเซล .....	4
2.3 วัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล .....	4
2.3.1 สบู่ดำ.....	5
2.3.2 ปาล์มน้ำมัน .....	5
2.3.3 เอทิลแอซีเตต (Ethyl acetate) .....	7
2.4 ปฏิกิริยาที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล.....	8
2.4.1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน (Transesterification reaction).....	8
2.4.2 ปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอร์ิฟิเคชัน (Interesterification reaction).....	8
2.5 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล .....	9
2.5.1 กระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic process).....	10
2.5.1.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส (alkaline catalyst).....	10

2.5.1.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด (acid catalyst).....	10
2.5.1.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอนไซม์ (enzyme catalyst).....	10
2.5.2 กระบวนการที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-catalytic process).....	10
2.6 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อการผลิตไบโอดีเซลในภาวะเหนือวิกฤต.....	12
2.6.1 อุณหภูมิ.....	12
2.6.2 ความดัน.....	14
2.6.3 อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันพืช.....	15
2.6.4 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา.....	16
2.6.5 ชนิดและคุณภาพของน้ำมันพืช.....	17
2.7 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล.....	17
2.7.1 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบไม่ต่อเนื่อง.....	17
2.7.2 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง.....	17
2.7.2.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง (Continuous stirred tank reactor: CSTR).....	18
2.7.2.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล (Plug flow reactor, Tubular reactor).....	18
2.8 เครื่องปฏิกรณ์ไมโคร (Microreactor).....	18
2.8.1 ประสิทธิภาพทางด้านการถ่ายเทมวลสารและการถ่ายเทความร้อน.....	18
2.8.2 ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์.....	19
2.8.3 การขยายกำลังการผลิตของเครื่องปฏิกรณ์.....	20
2.8.4 ความปลอดภัยในการดำเนินงาน.....	20
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 3 เครื่องมือและการทดลอง.....	26
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง.....	26



3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ไมโคร (Microreactor).....	27
3.1.2 บีบแรงดันสูง (High performance liquid chromatography pump).....	28
3.1.3 อุปกรณ์ควบคุมความดัน (Back pressure regulator).....	28
3.1.4 เครื่องระเหยแบบหมุน (Rotary evaporator).....	29
3.1.5 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด (Acid value).....	29
3.2 สารที่ใช้ในการทดลอง.....	30
3.3 การดำเนินการทดลอง.....	30
3.4 การวิเคราะห์ปริมาณเอทิลเอสเทอร์.....	31
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	32
4.1 การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสุปุดำ.....	32
4.1.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันสุปุดำ.....	32
4.1.2 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา.....	33
4.1.3 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา.....	37
4.1.4 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอซีเตตต่อน้ำมันสุปุดำ.....	39
4.2 การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม.....	41
4.2.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันปาล์ม.....	41
4.2.2 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา.....	42
4.2.3 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา.....	48
4.2.4 ผลของความดันในการทำปฏิกิริยา.....	50
4.3 ผลของสารเติมแต่งต่อการผลิตไบโอดีเซล.....	52
4.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยที่ผ่านมา.....	56
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	58
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	58

5.2 ข้อเสนอแนะ .....	59
รายการอ้างอิง .....	60
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์.....	65
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันพืช.....	67
ภาคผนวก ค การคำนวณเวลาในการทำปฏิกิริยา (Residence time).....	70
ภาคผนวก ง ผลการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการผลิตไบโอดีเซล .....	74
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	94



## สารบัญรูป

รูปที่ 2.1	ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	8
รูปที่ 2.2	ปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอร์ฟิเคชัน .....	8
รูปที่ 2.3	กลไกการเกิดปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอร์ฟิเคชัน .....	9
รูปที่ 2.4	แผนภาพความดันและอุณหภูมิที่ภาวะเหนือวิกฤต .....	11
รูปที่ 2.5	ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล (เอทิลเอสเทอร์ร่วมกับไตรแอสีติน) ที่ผลิตจากน้ำมันเมล็ดเรพกับเมทิลแอสีเทตในภาวะเหนือวิกฤต.....	12
รูปที่ 2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันและไตรแอสีตินต่ออุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ภาวะเหนือวิกฤตของเมทิลแอสีเทต ความดัน 200 บาร์ .....	13
รูปที่ 2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเมทิลเอสเทอร์ต่อความดันในการทำปฏิกิริยาที่ภาวะเหนือวิกฤตของเมทิลแอสีเทต .....	14
รูปที่ 2.8	ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทิลแอสีเทตต่อน้ำมันและปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ที่ภาวะเหนือวิกฤตของเมทิลแอสีเทต อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสและความดัน 200 บาร์ .....	15
รูปที่ 2.9	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละเอทิลเอสเทอร์ที่ภาวะเหนือวิกฤตของเอทิลแอสีเทต อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสีเทตต่อน้ำมันปาล์ม 30:1 อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ และใช้อะลูมินาบอลขนาด 6 มิลลิเมตร.....	16
รูปที่ 2.10	การถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลสารในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร .....	19
รูปที่ 2.11	เปรียบเทียบการขยายกำลังการผลิตของเครื่องปฏิกรณ์ไมโครและเครื่องปฏิกรณ์แบบทั่วไป.....	20
รูปที่ 3.1	แผนภาพเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองผลิตไบโอดีเซล .....	26
รูปที่ 3.2	เครื่องปฏิกรณ์ไมโคร.....	27
รูปที่ 3.3	ปั๊มแรงดันสูง.....	28
รูปที่ 3.4	อุปกรณ์ควบคุมความดัน.....	28
รูปที่ 3.5	เครื่องระเหยแบบหมุน .....	29
รูปที่ 3.6	เครื่องวัดค่าความเป็นกรด.....	29

- รูปที่ 4.1** ความสัมพันธ์ของปริมาณไตรกลีเซอไรด์และเอทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ และ Time-on-stream ที่อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอซีเทตต่อน้ำมันสุปุดำ 50:1 อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ และเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที..... 34
- รูปที่ 4.2** ความสัมพันธ์ของปริมาณองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ และเวลาในการทำปฏิกิริยา 3-20 นาที ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ และอัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอซีเทตต่อน้ำมัน 50:1..... 35
- รูปที่ 4.3** ความสัมพันธ์ของปริมาณองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-8 นาที ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ และอัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอซีเทตต่อน้ำมัน 50:1..... 36
- รูปที่ 4.4** ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ที่อุณหภูมิ 350 และ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอซีเทตต่อน้ำมัน 50:1 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 3-20 นาที..... 37
- รูปที่ 4.5** ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่อุณหภูมิ 350 และ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอซีเทตต่อน้ำมัน 50:1 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-20 นาที ..... 38
- รูปที่ 4.6** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และอัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอซีเทตต่อน้ำมันสุปุดำที่ 30:1 และ 50:1 ที่อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 นาที..... 40
- รูปที่ 4.7** ความสัมพันธ์ของปริมาณองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ และเวลาในการทำปฏิกิริยา 3-56 นาที ที่อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ และอัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอซีเทตต่อน้ำมัน 50:1..... 43
- รูปที่ 4.8** ความสัมพันธ์ของปริมาณองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ และเวลาในการทำปฏิกิริยา 3-30 นาที ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ และอัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอซีเทตต่อน้ำมัน 50:1..... 43
- รูปที่ 4.9** ความสัมพันธ์ของปริมาณองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ และเวลาในการทำปฏิกิริยา 3-20 นาที ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ และอัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอซีเทตต่อน้ำมัน 50:1..... 44

- รูปที่ 4.10** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ต่อน้ำมันสบูดำและน้ำมันปาล์ม ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสีเทตต่อน้ำมัน 50:1 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 3-20 นาที..... 46
- รูปที่ 4.11** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ต่อน้ำมันสบูดำและน้ำมันปาล์ม ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสีเทตต่อน้ำมัน 50:1 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 3-20 นาที..... 47
- รูปที่ 4.12** ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ที่อุณหภูมิ 330 350 และ 370 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสีเทตต่อน้ำมัน 50:1 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 3-56 นาที ..... 48
- รูปที่ 4.13** ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่อุณหภูมิ 330 350 และ 370 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสีเทตต่อน้ำมัน 50:1 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 3-56 นาที ... 49
- รูปที่ 4.14** ความสัมพันธ์ระหว่างความดันในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ที่ความดันในการทำปฏิกิริยา 100 และ 200 บาร์ อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสีเทตต่อน้ำมัน 50:1 อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที..... 51
- รูปที่ 4.15** ผลของสารเติมแต่งต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสีเทตต่อน้ำมัน 50:1 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที..... 53
- รูปที่ 4.16** ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลเมื่อใช้กรดแอสีติกรวมกับน้ำที่ความเข้มข้นของกรดแอสีติกร้อยละ 25 และการใช้น้ำเป็นสารเติมแต่งในการผลิตไบโอดีเซล ที่อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสีเทตต่อน้ำมัน 50:1 อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 และ 20 นาที ..... 54
- รูปที่ 4.17** การเกิดปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์และกรดแอสีติก ..... 54
- รูปที่ 4.18** การเกิดปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์และน้ำ ..... 55
- รูปที่ 4.19** การเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันอิสระและเอทิลแอสีเทต ..... 55

**รูปที่ 4.20** ปริมาณน้ำที่ใช้เป็นสารเติมแต่งในการผลิตไบโอดีเซลต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอซีเทตต่อน้ำมัน 50:1 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที ..... 55



## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	สมบัติทั่วไปของเอทิลแอลกอฮอล์.....	7
ตารางที่ 2.2	อุณหภูมิและความดันวิกฤตของสารชนิดต่างๆ .....	12
ตารางที่ 3.1	สถานะที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ.....	31
ตารางที่ 4.1	ชนิดและปริมาณของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันสบู่ดำ .....	33
ตารางที่ 4.2	ชนิดและปริมาณของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันปาล์ม .....	41
ตารางที่ 4.3	เปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยที่ผ่านมา .....	57



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากการที่ราคาน้ำมันปิโตรเลียมมีการปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงมีความจำเป็นที่ต้องพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนอื่นๆ เพื่อทดแทนการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศและเพื่อให้สอดคล้องกับแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 30% ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายในปี 2579 (พ.ศ. 2558-2579) ที่วางเป้าหมายเพื่อเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนให้เป็นร้อยละ 30 ของการใช้พลังงานรวมทั้งหมดของประเทศภายในปี พ.ศ. 2579 [กระทรวงพลังงาน, 2558] ไบโอดีเซลเป็นหนึ่งในพลังงานทางเลือกซึ่งผลิตจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ โดยผ่านกระบวนการทรานเอสเทอร์ริเฟเคชัน (transesterification) ระหว่างแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอลหรือเอทานอล และไตรกลีเซอไรด์ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ โดยจะได้ผลิตภัณฑ์เป็น Fatty Acid Methyl Ester (FAME) และกลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้ ซึ่งการผลิตไบโอดีเซลที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้มีกลีเซอรอลมากเกินไปเกินความต้องการและจะถูกจัดอยู่ในส่วนของเสียในอนาคต เพื่อป้องกันปัญหาจากกลีเซอรอลมากเกินไปเกินความต้องการ จึงมีการพัฒนาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เมทิลเอซีเตแทนเมทานอล ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไบโอดีเซลและไตรเอซีดีนเป็นผลพลอยได้แทนที่กลีเซอรอล ซึ่งมีมูลค่าสูงกว่า และสามารถรวมอยู่ในไบโอดีเซลได้ เป็นการลดขั้นตอนการผลิต ส่งผลให้การดำเนินการผลิตทำได้ง่ายและรวดเร็ว นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นสารเติมแต่งในไบโอดีเซลได้อีกด้วย [Casas et al., 2010]

ปฏิกิริยาที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลจากไตรกลีเซอไรด์และเมทิลเอซีเต เรียกว่า ปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอร์ริเฟเคชัน (interesterification) ซึ่งในงานวิจัยต่างๆสามารถผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอร์ริเฟเคชันโดยใช้เอนไซม์ [Usai et al., 2010] หรือใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา [Casas et al., 2011 และ Miesiac et al., 2012] โดยตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่จะใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส ข้อเสียของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้คือทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสบู่ (saponification) ส่งผลให้ปริมาณผลได้ (Yield) ของไบโอดีเซลลดลง ซึ่งหากใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะไม่ทำให้เกิดปัญหาดังกล่าวแต่ต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์จะต้องมีขั้นตอนการกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากไบโอดีเซลโดยกระบวนการล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำ ซึ่งนอกจากจะเป็นการเพิ่มขึ้นขั้นตอนในกระบวนการผลิตแล้วยังทำให้มีน้ำเสียเกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลอีกด้วย



งานวิจัยในปัจจุบันจึงมีความสนใจในการพัฒนาการผลิตไบโอดีเซลโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ภาวะเหนือวิกฤต เนื่องมาจากกระบวนการดังกล่าวสามารถใช้วัตถุดิบที่มีความหลากหลาย โดยที่ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชและปริมาณน้ำไม่มีผลต่อกระบวนการผลิต ไม่มีการสูญเสียไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาข้างเคียง เช่น ปฏิกิริยาการเกิดสบู่ ลดขั้นตอนในกระบวนการผลิต และลดปริมาณน้ำเสียจากกระบวนการผลิต [Ang et al., 2013]

วิธีการผลิตไบโอดีเซลส่วนใหญ่ต้องการเวลาในการทำปฏิกิริยานานเพื่อจะได้ไบโอดีเซล แต่การใช้เทคโนโลยีไมโคร (microtechnology) เช่น เครื่องปฏิกรณ์ไมโคร (microreactor) เป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจเนื่องจากสามารถผลิตไบโอดีเซลได้อย่างรวดเร็ว โดยเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีช่องในการทำปฏิกิริยาขนาดเล็ก มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร [Šalić and Zelić 2011] จากการทำขนาดเล็กทำให้เครื่องปฏิกรณ์ไมโครมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง ซึ่งทำให้การถ่ายเทมวลสาร (Mass transfer) และการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) เกิดขึ้นได้ดี ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า และสามารถควบคุมการผลิตได้ดีกว่าการใช้เครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ นอกจากนี้การเพิ่มกำลังการผลิตของเครื่องปฏิกรณ์ไมโครสามารถทำได้ง่าย เนื่องจากการเพิ่มจำนวนเครื่องปฏิกรณ์ (Numbering up) ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์เท่าเดิม ต่างจากเครื่องปฏิกรณ์ทั่วไปที่เพิ่มกำลังการผลิตโดยการขยายขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ (Scaling up) ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์เหล่านั้นเปลี่ยนแปลงไป

ในปัจจุบัน งานวิจัยที่ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอริฟิเคชันยังมีไม่มากนัก ส่วนใหญ่ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอริฟิเคชันระหว่างไตรกลีเซอไรด์และเมทิลแอลกอฮอล์ แต่เนื่องจากประเทศไทยมีศักยภาพในการผลิตเอทานอลอย่างมากเพราะมีความพร้อมด้านวัตถุดิบ เช่น มันสำปะหลังและอ้อย ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตเอทานอลและอุตสาหกรรมต่อเนื่องจากเอทานอล เช่น เอทิลแอลกอฮอล์ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอริฟิเคชันระหว่างน้ำมันสบู่ดำและน้ำมันปาล์มที่ภาวะเหนือวิกฤตของเอทิลแอลกอฮอล์ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร โดยศึกษาปัจจัยต่างๆในการผลิต เช่น อุณหภูมิ ความดัน เวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน และการเติมสารเติมแต่งเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 หาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและน้ำมันปาล์มโดยใช้เอทิลแอลกอฮอล์ที่ภาวะเหนือวิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร

1.2.2 เปรียบเทียบผลของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำและน้ำมันปาล์มโดยใช้เอทิลแอสซิเตตที่ภาวะเหนือวิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร

### 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลโดยไม่เกิดกลีเซอรอลผ่านปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอริฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร

### 1.4 ขอบเขตงานวิจัย

ศึกษาภาวะและปัจจัยต่างๆในการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้น้ำมันสบู่ดำ (Crude jatropha oil), น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ยังไม่แยกไข (RBDPO) และเอทิลแอสซิเตต (Ethyl acetate) ที่ภาวะเหนือวิกฤตด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร โดยใช้อุณหภูมิในช่วง 330-380 องศาเซลเซียส ความดัน 100-200 บาร์ อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสซิเตตต่อน้ำมัน 30:1-50:1 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-60 นาที

### 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 ค้นคว้าข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศ

1.5.2 เตรียมระบบเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร

1.5.3 ดำเนินการผลิตไบโอดีเซลที่ภาวะเหนือวิกฤตของเอทิลแอสซิเตตด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ประกอบด้วย

- อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสซิเตตต่อน้ำมัน 30:1 และ 50:1
- อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 330-380 องศาเซลเซียส
- ความดันในการทำปฏิกิริยาที่ 100 และ 200 บาร์
- อัตราการไหลของสารตั้งต้น ในช่วง 0.05 - 1.50 มิลลิลิตร/นาที
- เวลาในการทำปฏิกิริยา 1-60 นาที
- การใส่กรดแอสติค น้ำ และกรดแอสติครวมกับน้ำเพื่อเป็นสารเติมแต่ง ปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของน้ำมัน

1.5.4 วิเคราะห์องค์ประกอบ หาปริมาณเอสเทอร์ ไตรกลีเซอไรด์ โมโนแอสติดีน ไดกลีเซอไรด์ ไดแอสติดีน โมโนกลีเซอไรด์ ไตรแอสติดีน และสารอื่นๆในผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph) ตามมาตรฐาน EN 14105 ที่มีการประยุกต์ให้เหมาะสมต่อการทดลอง

1.5.5 วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลงานวิจัย และจัดทำวิทยานิพนธ์

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แนวคิดและทฤษฎี

ในปัจจุบัน ประเทศไทยประสบปัญหาวิกฤตพลังงานเช่นเดียวกับหลายประเทศที่พึ่งพาการนำเข้าพลังงาน เนื่องจากราคาน้ำมันปิโตรเลียมที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลกระทบต่อภาคเศรษฐกิจโดยรวม ทั้งนี้เพราะประเทศไทยมีแหล่งน้ำมันดิบไม่เพียงพอต่อความต้องการ ทำให้ต้องพึ่งพาการนำเข้าจากต่างประเทศ ในขณะที่ความต้องใช้งานมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยส่วนใหญ่ใช้ในการคมนาคมและขนส่ง ซึ่งน้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่มีปริมาณการใช้สูงที่สุด ดังนั้นจึงมีการศึกษาวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนน้ำมันปิโตรเลียม โดยเฉพาะพลังงานทดแทนน้ำมันดีเซล โดยการนำพืชผลทางการเกษตรที่เป็นวัตถุดิบภายในประเทศมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซล และใช้ไบโอดีเซลเป็นพลังงานทดแทน ซึ่งเป็นวิธีที่ช่วยสร้างความมั่นคงด้านพลังงานให้กับประเทศ ลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ สร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลผลิตทางการเกษตร และลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมได้ในเวลาเดียวกัน [พิสมัย, 2552]

#### 2.2 ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซลที่ผลิตจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ โดยผ่านกระบวนการทางเคมีเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างไขมันให้เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมัน ซึ่งมีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล สามารถใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยไม่ต้องทำการปรับแต่งเครื่องยนต์ เป็นเชื้อเพลิงสะอาด เผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์และไม่มีกำมะถันเป็นส่วนประกอบ ซึ่งส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อม

#### 2.3 วัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล

วัตถุดิบสำหรับการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ น้ำมันพืช น้ำมันพืชใช้แล้ว และน้ำมันจากไขมันสัตว์ เช่น น้ำมันปาล์ม มะพร้าว ถั่วเหลือง ถั่วลิสง ละหุ่ง งา และทานตะวัน แต่ยังมีพืชน้ำมันอีกชนิดหนึ่งที่มีการส่งเสริมให้นำมาใช้ผลิตเป็นไบโอดีเซลมากขึ้น ได้แก่ สบู่ดำ เนื่องจากในเมล็ดของสบู่ดำมีปริมาณน้ำมันสูงถึงร้อยละ 52.8 ของน้ำหนักเนื้อใน และในน้ำมันสบู่ดำมีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวในปริมาณสูง ซึ่งส่งผลให้ไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีความหนืดที่เหมาะสมและมีคุณภาพดี นอกจากนี้การใช้น้ำมันสบู่ดำซึ่งเป็นน้ำมันที่ไม่สามารถบริโภคได้ยังลดปัญหาความขัดแย้งระหว่างการนำน้ำมันพืชไปใช้ในด้านเชื้อเพลิงหรือด้านบริโภคอีกด้วย [ศศิเกษม, 2530]

ในขณะเดียวกัน ปาล์มน้ำมัน นับเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย เนื่องจากมีการปลูกมากเป็นอันดับ 3 ของโลก รองจากอินโดนีเซียและมาเลเซีย และมีปริมาณการใช้น้ำมันปาล์มในการผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นทั้งในเชิงปริมาณและสัดส่วน โดยระหว่างปี พ.ศ. 2550 – 2557 ประเทศไทยมีการใช้น้ำมันปาล์มเพื่อผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นจาก 0.06 ล้านตัน เป็น 0.87 ล้านตัน แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มความต้องการน้ำมันที่เพิ่มขึ้นและความจำเป็นในการใช้น้ำมันปาล์มเพื่อผลิตไบโอดีเซล

### 2.3.1 สบู่ดำ

สบู่ดำเป็นพืชน้ำมันอย่างหนึ่งที่ภาครัฐมีนโยบายส่งเสริมให้ปลูกเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากเป็นพืชที่เพาะปลูกง่าย ทนต่อสภาพอากาศร้อน ทำให้ปลูกได้ในพื้นที่ทั่วประเทศแม้แต่ในพื้นที่ที่ใช้ประโยชน์ทางการเกษตรได้น้อย ให้ผลผลิตเร็ว สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้ภายในหนึ่งปี หลังปลูกและมีอายุยืนกว่า 30 ปี จึงทำให้สบู่ดำเป็นพืชน้ำมันทางเลือกที่เหมาะสมอีกชนิดหนึ่งที่ผู้เชี่ยวชาญด้านการเกษตรระบุว่าหากมีการพัฒนาเมล็ดพันธุ์และมีวิธีดูแลการเพาะปลูกที่เหมาะสมแล้วจะสามารถให้น้ำมันต่อไร่ได้สูงถึงปีละ 300 ลิตรต่อไร่ต่อปี นอกจากนี้การที่น้ำมันจากสบู่ดำไม่สามารถใช้ในการบริโภคได้ จึงทำให้ราคาน้ำมันสบู่ดำไม่ผันผวนมากนัก สบู่ดำจึงเป็นพืชน้ำมันทางเลือกที่น่าสนใจเพราะเป็นพืชน้ำมันที่ให้พลังงานบริสุทธิ์จากธรรมชาติโดยไม่สร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

### 2.3.2 ปาล์มน้ำมัน

ผลปาล์มมีส่วนที่ให้น้ำมันสองส่วน คือ เมล็ดใน (kernel) และเนื้อหุ้มเมล็ด การสกัดน้ำมันปาล์มในแต่ละส่วนจะได้น้ำมันแตกต่างกัน โดยน้ำมันที่สกัดได้จากเนื้อผลปาล์มจะได้น้ำมันปาล์มดิบ (crude palm oil, CPO) น้ำมันที่สกัดได้จากเมล็ดในปาล์มจะได้น้ำมันจากเมล็ดในปาล์มดิบ (crude palm kernel oil, CPKO) และน้ำมันที่สกัดรวมกันทั้งเนื้อปาล์มและเมล็ดในปาล์มจะได้น้ำมันที่เรียกว่าน้ำมันปาล์มดิบรวม (mixed crude palm oil, MCPO)

โดยทั่วไปน้ำมันปาล์มดิบมีองค์ประกอบดังต่อไปนี้ คือ

1. ไตรกลีเซอไรด์ (triglycerides) ประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์
2. กรดไขมัน (fatty acids) ประมาณ 3 – 5 เปอร์เซ็นต์
3. องค์ประกอบอื่นๆ ประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์

น้ำมันที่สกัดได้นี้ยังไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์โดยตรงได้ จะต้องผ่านกระบวนการกลั่นเพื่อให้ได้น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆได้ ซึ่งกระบวนการกลั่นบริสุทธิ์น้ำมันปาล์ม (Refine Processing) เป็นกระบวนการทำให้น้ำมันปาล์มดิบ และน้ำมันเมล็ดในปาล์ม

ดิบเปลี่ยนเป็นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์และน้ำมันเมล็ดในปาล์มบริสุทธิ์ ซึ่งกระบวนการกลั่นสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีการ คือ วิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี

### 1. วิธีทางกายภาพ (Physical or Steam Refining)

เป็นกระบวนการกำจัดกรดไขมันอิสระโดยผ่านไอน้ำเข้าไปในน้ำมันร้อน แล้วกลั่นแยกเอากกรดไขมันอิสระและสารที่ให้กลิ่นระเหยออก จึงเป็นการกำจัดกลิ่นและทำให้น้ำมันเป็นกลางพร้อมๆ กัน การกลั่นน้ำมันปาล์มโดยวิธีทางกายภาพทำได้โดยการเตรียมน้ำมันปาล์มดิบหรือน้ำมันเมล็ดในปาล์มดิบผ่านการกำจัดออกด้วยน้ำ แล้วทำปฏิกิริยาด้วยกรดฟอสฟอริก ความเข้มข้น 80 ถึง 85 เปอร์เซ็นต์ ประมาณ 0.05 ถึง 0.2 เปอร์เซ็นต์ของน้ำมันปาล์มดิบผสมกับน้ำมันที่อุณหภูมิ 90 ถึง 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 15 ถึง 30 นาที จากนั้นจึงเติมผงฟอกสี (Bleaching Earth) ประมาณ 0.8 ถึง 2.0 เปอร์เซ็นต์ของน้ำมันปาล์มดิบและฟอกสีภายใต้สภาพสุญญากาศที่อุณหภูมิ 95 ถึง 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 ถึง 45 นาที จากนั้นจึงนำน้ำมันปาล์มไปผ่านเข้าเครื่องกรอง ก็จะได้น้ำมันที่ไม่มีฟอสโฟลิปิด และทำการกลั่นโดยใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิ น้ำมัน 240 ถึง 270 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1 ถึง 2 ชั่วโมง ภายใต้สภาพสุญญากาศ จะได้น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (Refined Bleached and Deodorized Palm Oil, RBD PO) หรือน้ำมันเมล็ดในปาล์มบริสุทธิ์ (Refined Bleached and Deodorized Palm Kernel Oil, RBD PKO)

### 2. วิธีทางเคมี (Chemical Refining)

เป็นกระบวนการกำจัดกรดไขมันอิสระโดยการใช้สารเคมี ที่นิยมคือ ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโซเดียมคาร์บอเนต ทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระในน้ำมัน ทำให้เกิดเป็นสบู่ จากนั้นแยกสบู่ออกโดยใช้วิธีการหมุนเหวี่ยง สำหรับความเข้มข้นของด่างที่ใช้ ปริมาณมากหรือน้อยแปรผันไปตามปริมาณของกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม การกลั่นน้ำมันปาล์มด้วยสารละลายด่าง เริ่มต้นด้วยการให้ความร้อนแก่น้ำมันปาล์มดิบที่อุณหภูมิ 80 ถึง 90 องศาเซลเซียส แล้วเติมกรดฟอสฟอริก ความเข้มข้น 80 ถึง 85 เปอร์เซ็นต์ ในปริมาณ 0.05 ถึง 0.2 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นจึงเติมสารละลายด่าง ซึ่งจะทำให้เกิดสบู่ และแยกสบู่ออกด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง และล้างโซสบู่ด้วยน้ำ จากนั้นจึงให้ความร้อนแก่น้ำมันเพื่อเป็นการไล่น้ำให้ระเหยออก แล้วจึงนำน้ำมันมาฟอกสี และกำจัดกลิ่นด้วยไอน้ำ ก็จะได้น้ำมันปาล์มที่เรียกว่า Neutralized Bleached and Deodorized Palm Oil เป็นน้ำมันปาล์มที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์แล้ว โดยจะแยกเป็นสองส่วนคือ ส่วนล่างมีลักษณะเป็นไขและส่วนบนมีลักษณะเป็นน้ำมันมีสีเหลืองอ่อนถึงเหลืองเข้ม เนื่องจากน้ำมันที่ได้มีคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพบางประการที่ไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์บางชนิด จึงได้มีการศึกษาการดัดแปรคุณสมบัติของน้ำมันปาล์มโดยใช้กระบวนการต่างๆ เพื่อให้สามารถนำไปใช้ในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ได้

หลากหลายชนิดมากขึ้น และมีผลผลิตที่เป็นผลพลอยได้ที่สำคัญ จากการกลั่นบริสุทธิ์น้ำมันปาล์ม คือ กรดไขมันปาล์ม หรือ Palm Fatty Acid Distillated (PFAD) ซึ่งนิยมใช้เป็นวัตถุดิบในการทำสบู่ อาหารสัตว์ และใช้เป็นสารตั้งต้นในการสกัดกรดไขมันชนิดต่างๆ หรือการสกัดวิตามินอีใน อุตสาหกรรมออร์โอะเคมีคอล

### 2.3.3 เอทิลแอสีเทต (Ethyl acetate)

ปัจจุบันมีการพัฒนาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชและคาร์บอกซิเลตเอสเทอร์ เช่น เมทิล แอสีเทตและเอทิลแอสีเทต เป็นต้น แทนการใช้แอลกอฮอล์โดยผ่านปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอริฟิเคชัน ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นไบโอดีเซลและมีไตรแอสีตินเป็นผลพลอยได้แทนที่กลีเซอรอลโดยสามารถใช้ เป็นสารเติมแต่งในไบโอดีเซลได้ เพื่อช่วยแก้ปัญหาด้านกลีเซอรอลที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการ ผลิตไบโอดีเซลมากเกินความต้องการหากมีอัตราการผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นในอนาคต

หากพิจารณาด้านการพึ่งพาตนเองในประเทศไทยที่มีทรัพยากรทางการเกษตร เช่น อ้อย และมันสำปะหลัง ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิตเอทานอลและนำไปสู่อุตสาหกรรมต่อเนื่องจากเอทานอล เช่น เอทิลแอสีเทต ดังนั้นการใช้เอทิลแอสีเทตในการผลิตไบโอดีเซลจึงมีความเหมาะสมใน ประเทศไทย

เอทิลแอสีเทตเป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทเอสเทอร์ที่มีสูตรโครงสร้างเป็น  $\text{CH}_3\text{COOCH}_2\text{CH}_3$  สังเคราะห์ได้จากเอทานอลและกรดแอสีติกผ่านปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันที่ อุณหภูมิห้อง มีลักษณะเป็นของเหลวใสไม่มีสี มีกลิ่นไม่รุนแรง และมีความเป็นพิษต่ำ ในอุตสาหกรรม นิยมนำมาผลิตน้ำยาล้างเล็บและใช้เป็นตัวทำละลาย สำหรับสมบัติทั่วไปของเอทิลแอสีเทตแสดงดัง ตารางที่ 2.1

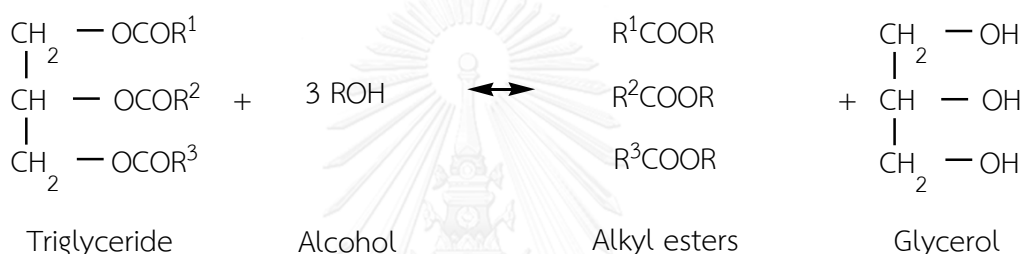
ตารางที่ 2.1 สมบัติทั่วไปของเอทิลแอสีเทต

สมบัติทั่วไป	
สูตรโครงสร้างทางเคมี	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$
น้ำหนักโมเลกุล (กรัม/โมล)	88.11
ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.902
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	-83.6
จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	77.1
อุณหภูมิวิกฤต (องศาเซลเซียส)	250.2
ความดันวิกฤต (บาร์)	38.3

## 2.4 ปฏิกริยาที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

### 2.4.1 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน (Transesterification reaction)

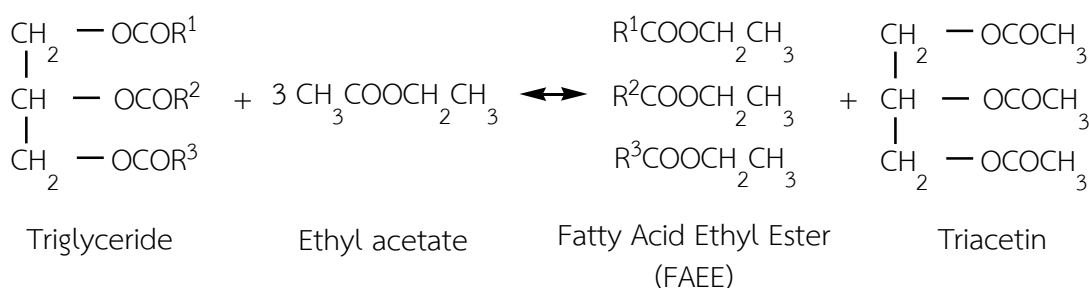
ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน คือ ปฏิกริยาการเปลี่ยนหมู่แอลคอกซิล (alkoxyl group, RO-) ของเอสเทอร์ด้วยแอลกอฮอล์ หรือแอลกอฮอล์ไฮซิส (Alcoholysis) เพื่อเปลี่ยนโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์เป็นเอสเทอร์และกลีเซอรอล ดังรูปที่ 2.1 โดยแอลกอฮอล์ที่นิยมในปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันคือเมทานอล เนื่องจากเป็นแอลกอฮอล์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กจึงสามารถเข้าทำปฏิกริยากับไตรกลีเซอไรด์ได้รวดเร็ว ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty Acid Methyl Ester : FAME) หรือไบโอดีเซล และกลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้



รูปที่ 2.1 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน

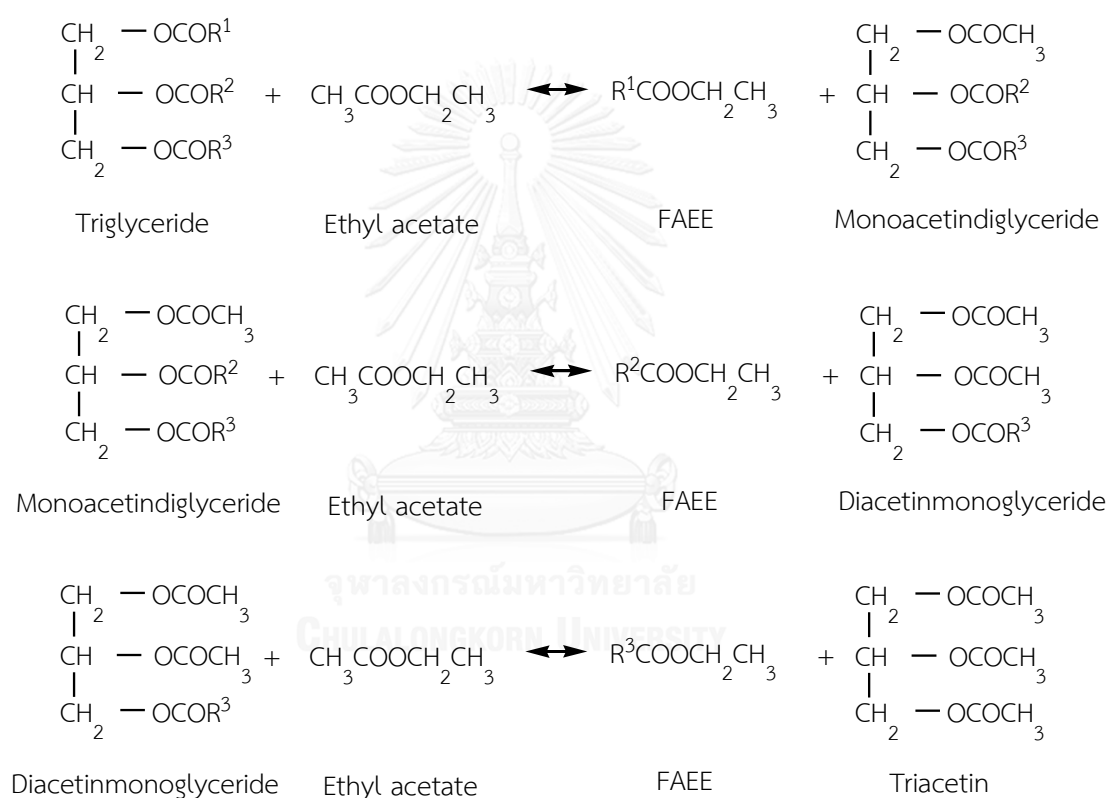
### 2.4.2 ปฏิกริยาอินเทอร์เอสเทอร์ิฟิเคชัน (Interesterification reaction)

ปฏิกริยาอินเทอร์เอสเทอร์ิฟิเคชัน คือ ปฏิกริยาการเปลี่ยนหมู่เอสเทอร์ระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับคาร์บอกซิเลตเอสเทอร์ เพื่อเกิดเป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันและได้ไตรแอซีตินเป็นผลพลอยได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยไตรแอซีตินสามารถใช้เป็นสารเติมแต่งในไบโอดีเซลเพื่อปรับปรุงสมบัติการไหลที่อุณหภูมิต่ำของไบโอดีเซลได้



รูปที่ 2.2 ปฏิกริยาอินเทอร์เอสเทอร์ิฟิเคชัน

กลไกการเกิดปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอริฟิเคชันสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันพืชจะทำปฏิกิริยากับเอทิลแอสีเทตเกิดเป็นเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty Acid Ethyl Ester : FAEE) และโมนอแอซีดีนไดกลีเซอไรด์ (monoacetylindiglyceride) ขั้นตอนที่สองโมนอแอซีดีนไดกลีเซอไรด์จะทำปฏิกิริยากับเอทิลแอสีเทตเกิดเป็นเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันและไดแอซีดีนโมนอกลีเซอไรด์ (diacetylmonoglyceride) และขั้นตอนสุดท้ายไดแอซีดีนโมนอกลีเซอไรด์จะทำปฏิกิริยากับเอทิลแอสีเทตเกิดเป็นเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันและไตรแอซีดีน (triacetyl) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอริฟิเคชัน

## 2.5 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล

การผลิตไบโอดีเซลสามารถแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการ คือ กระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และกระบวนการที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล



### 2.5.1 กระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic process)

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมีอยู่หลายวิธี ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ อาจเป็นสารเคมีที่มีสมบัติเป็นกรด เบส หรือเอนไซม์ที่มาจากสิ่งมีชีวิต

#### 2.5.1.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส (alkaline catalyst)

วิธีนี้จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสมบัติเป็นเบส โดยทั่วไปมักจะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นต้น แต่วิธีนี้จะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน มีขั้นตอนในการผลิตมากเนื่องจากต้องมีการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ น้ำมันที่ใช้เป็นสารตั้งต้นต้องมีกรดไขมันอิสระ (free fatty acid) ในปริมาณน้อย เนื่องจากกรดไขมันอิสระสามารถเกิดปฏิกิริยาสะพอนิฟิเคชัน (saponification) กับเบสเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ คือ สบู่ ส่งผลให้ไบโอดีเซลที่ได้ลดลง

#### 2.5.1.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด (acid catalyst)

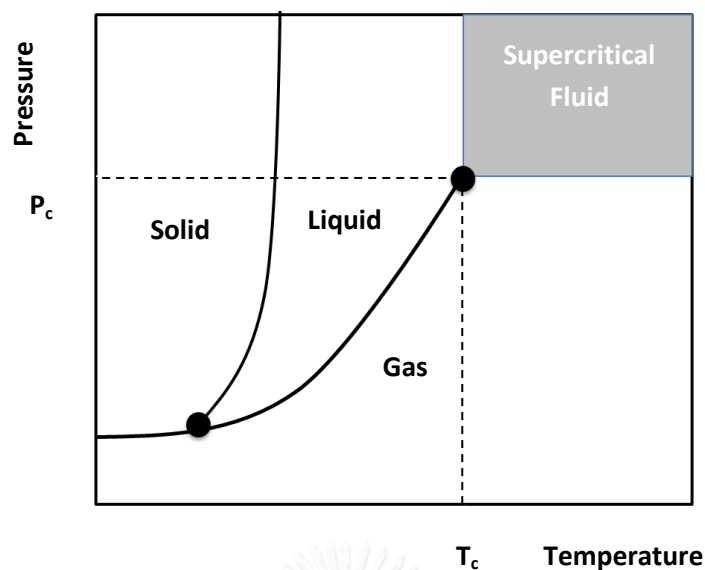
วิธีนี้จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสมบัติเป็นกรด โดยทั่วไปมักจะใช้ กรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เป็นต้น โดยวิธีนี้จะไม่เกิดปัญหาการเกิดสบู่จากกรดไขมันอิสระจึงเหมาะสำหรับน้ำมันพืชหรือสัตว์ที่มีกรดไขมันอิสระมาก แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยานาน อีกทั้งการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยายังไม่ค่อยเหมาะสมสำหรับการผลิตในระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากอาจทำให้เกิดการสึกกร่อนของอุปกรณ์ต่างๆได้

#### 2.5.1.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอนไซม์ (enzyme catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยาของวิธีนี้คือเอนไซม์ที่ได้จากพืช รา แบคทีเรียหรือสัตว์ต่างๆ การผลิตไบโอดีเซลโดยวิธีนี้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้ไม่สิ้นเปลืองพลังงาน โดยเอนไซม์ที่นิยมใช้ในการผลิตไบโอดีเซล คือ เอนไซม์ไลเปส (lipase) อย่างไรก็ตามเอนไซม์ยังคงมีราคาสูงและการเติมสารบางชนิดเข้าไปในกระบวนการผลิตอาจไปขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ได้

### 2.5.2 กระบวนการที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-catalytic process)

การผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถทำได้โดยการใช้อุณหภูมิและความดันสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสาร (critical temperature :  $T_c$ ) และความดันวิกฤตของสาร (critical pressure :  $P_c$ ) ซึ่งจะทำให้สารตั้งต้นอยู่ในภาวะเหนือวิกฤต (supercritical stage) ที่ภาวะนี้สารจะอยู่ในรูปของไหลและมีสมบัติอยู่ระหว่างของเหลวและแก๊ส โดยจะมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับของเหลวและมีความหนืดใกล้เคียงกับแก๊ส [ภัทรพรรณ, 2552]



รูปที่ 2.4 แผนภาพความดันและอุณหภูมิที่ภาวะเหนือวิกฤต

สารแต่ละชนิดมีอุณหภูมิและความดันวิกฤตที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.2 โดยเอทิลแอสีเทตมีอุณหภูมิวิกฤตเท่ากับ 250.2 องศาเซลเซียส และมีความดันวิกฤตที่ 38.3 บาร์ ซึ่งการทำให้อยู่ในภาวะเหนือวิกฤตจะต้องใช้อุณหภูมิและความดันสูงกว่าอุณหภูมิและความดันวิกฤตเพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดี เนื่องจากของไหลที่ภาวะเหนือวิกฤตมีความหนืดและการแพร่ใกล้เคียงกับแก๊ส จึงสามารถแพร่กระจายได้อย่างทั่วถึงและเกิดการทำปฏิกิริยากันระหว่างสารตั้งต้นได้ดี ซึ่งข้อดีในการทำปฏิกิริยาที่ภาวะเหนือวิกฤตนั้นไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยา ของเสียในกระบวนการมีน้อยและปฏิกิริยาเกิดได้ดี

แม้ว่ากระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ภาวะเหนือวิกฤตจะใช้อุณหภูมิและความดันสูงกว่ากระบวนการผลิตแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แต่การทำปฏิกิริยาที่ภาวะเหนือวิกฤตสามารถเกิดปฏิกิริยาได้เร็วและไม่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นจึงไม่มีขั้นตอนการกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยาในผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นการลดขั้นตอนการผลิตและส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความบริสุทธิ์สูงกว่าการผลิตไบโอดีเซลแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้การผลิตไบโอดีเซลแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอาจก่อให้เกิดน้ำเสียเนื่องมาจากการใช้น้ำในการกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์อีกด้วย

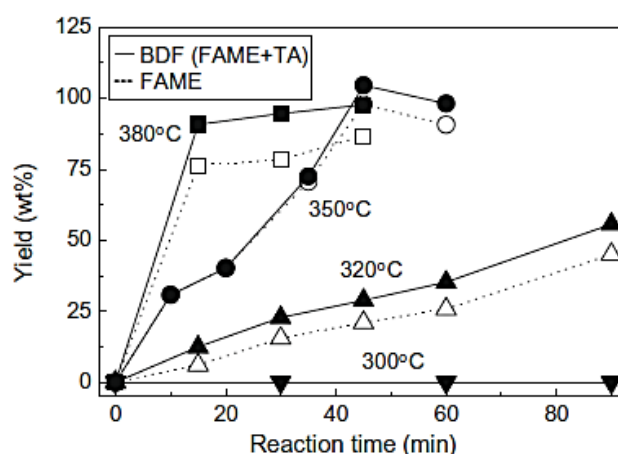
ตารางที่ 2.2 อุณหภูมิและความดันวิกฤตของสารชนิดต่างๆ [กัญญา, 2550]

สารเคมี	อุณหภูมิวิกฤต (องศาเซลเซียส)	ความดันวิกฤต (บาร์)
เมทานอล (methanol)	239.6	80.9
เอทานอล (ethanol)	240.9	61.4
น้ำ (water)	374.3	221.2
เมทิลแอสีเทต (methyl acetate)	233.7	45.3
เอทิลแอสีเทต (ethyl acetate)	250.2	38.3

## 2.6 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อการผลิตไบโอดีเซลในภาวะเหนือวิกฤต

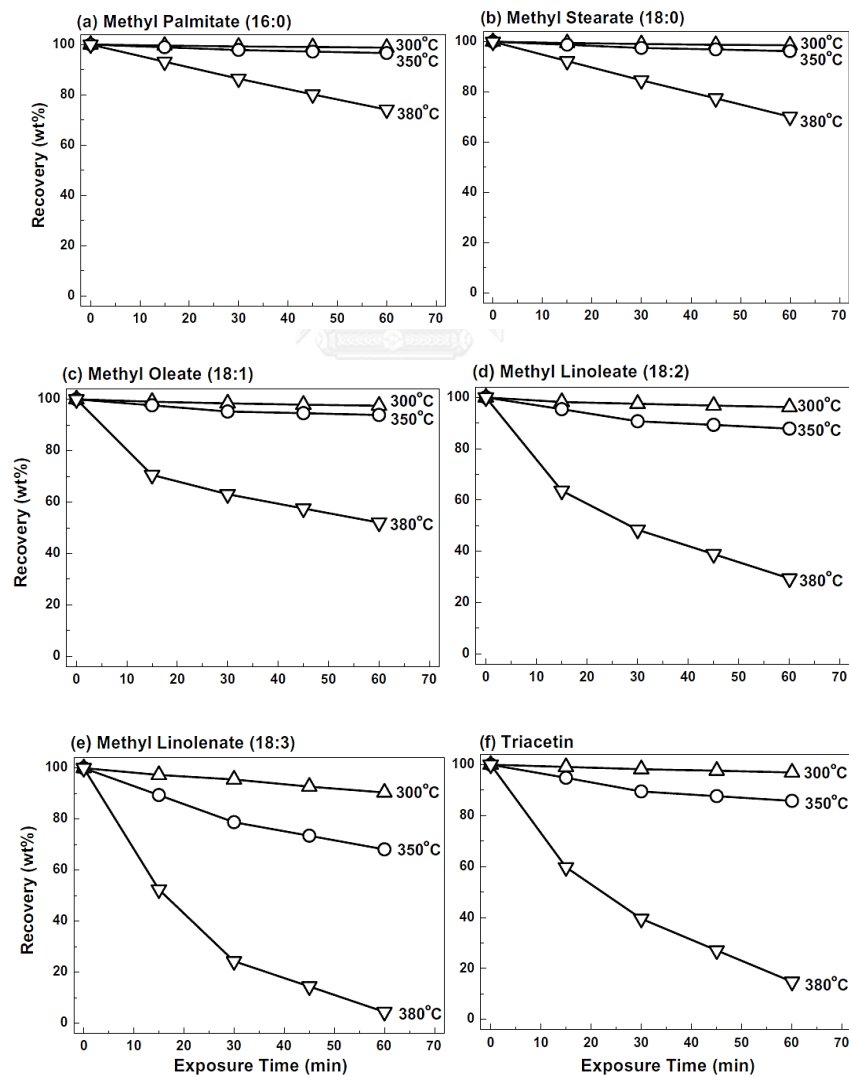
### 2.6.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อปริมาณไบโอดีเซลที่ผลิตได้ในภาวะเหนือวิกฤต ซึ่ง Saka และ Isayama (2009) ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพที่ภาวะเหนือวิกฤตของเมทิลแอสีเทต จากการศึกษาพบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิสูงกว่า 320 องศาเซลเซียสจะได้ผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (FAME) อย่างชัดเจน แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์และเมทิลแอสีเทตที่ภาวะเหนือวิกฤต และได้ร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์สูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า 380 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยามากกว่า 45 นาที ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์มีค่าลดลงเนื่องจากการสลายตัวของความร้อนของเมทิลเอสเทอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล (เอทิลเอสเทอร์ร่วมกับไตรแอสีดิน) ที่ผลิตจากน้ำมันเมล็ดเรพกับเมทิลแอสีเทตในภาวะเหนือวิกฤต [Saka, 2009]

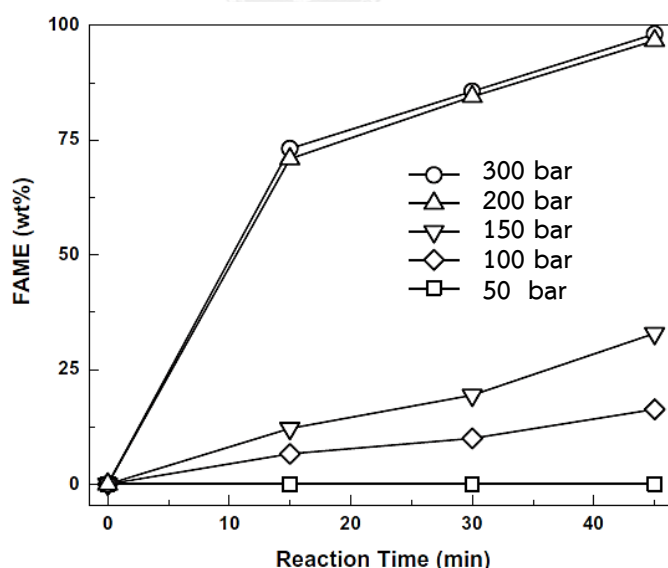
Imahara และคณะ (2007) รายงานผลการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของไบโอดีเซลที่ภาวะเหนือวิกฤตของเมทานอล พบว่าการลดลงของไบโอดีเซลเนื่องมาจากกรดไขมันไม่อิ่มตัว เช่น เมทิลโอเลเอท (C18:1) เมทิลไลโนเลเอท (C18:2) และเมทิลไลโนเลนเอท (C18:3) ซึ่งมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำจึงเกิดการสลายตัวเมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส ในขณะที่กรดไขมันอิ่มตัวจะเกิดการสลายตัวเพียงเล็กน้อยเมื่อใช้อุณหภูมิสูงกว่า 350 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับงานวิจัยของ Goembira และ Saka (2012) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพและเมทิลเอซีเทต พบการสลายตัวทางความร้อนของกรดไขมันไม่อิ่มตัวเมื่อใช้อุณหภูมิสูงกว่า 380 องศาเซลเซียส และการสลายตัวทางความร้อนของกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียสตามชนิดของกรดไขมันและเวลาในการทำปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันและไตรเอซีตินต่ออุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ภาวะเหนือวิกฤตของเมทิลเอซีเทต ความดัน 200 บาร์ [Goembira, 2012]

### 2.6.2 ความดัน

ความดันเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ซึ่งงานวิจัยของ Konimtarachat และคณะ (2015) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มและเอทิลแอลกอฮอล์ที่ภาวะเหนือวิกฤต โดยพบว่า การเพิ่มความดันส่งผลให้ร้อยละผลได้เอทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความดันจะทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น สารตั้งต้นจึงมีโอกาสในการชนกันและเกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น งานวิจัยของ Campanelli และคณะ (2010) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันทานตะวัน และน้ำมันสบูดำที่ภาวะเหนือวิกฤตของเมทิลแอลกอฮอล์ พบว่าการเพิ่มความดันส่งผลให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล (เมทิลเอสเทอร์ร่วมกับไตรเอซีดีน) เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความดันจาก 100, 150 และ 200 บาร์ ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มความดันเป็น 300 บาร์ พบว่าร้อยละผลได้ไบโอดีเซลมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Goembira และ Saka (2012) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพและเมทิลแอลกอฮอล์ที่ภาวะเหนือวิกฤต พบว่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความดัน โดยเมทิลเอสเทอร์มีค่าเพิ่มขึ้นสูงเมื่อเพิ่มความดันจาก 150 บาร์ เป็น 200 บาร์ แต่มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มความดันจาก 200 บาร์ เป็น 300 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ดังนั้นความดันที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลที่ภาวะเหนือวิกฤตของเมทิลแอลกอฮอล์คือ 200 บาร์

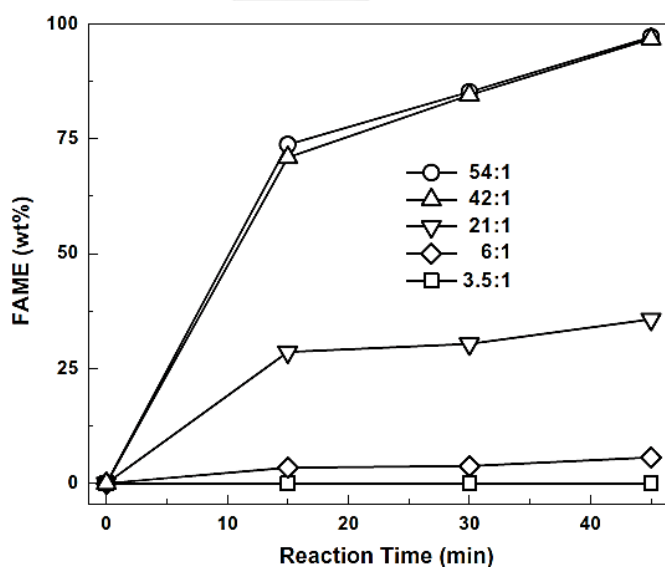


รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเมทิลเอสเทอร์ต่อความดันในการทำปฏิกิริยาที่ภาวะเหนือวิกฤตของเมทิลแอลกอฮอล์ [Goembira and Saka, 2012]

### 2.6.3 อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสเทตต่อน้ำมันพืช

อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสเทตต่อน้ำมันพืชเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณไบโอดีเซล ตามปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอริฟิเคชันจะต้องใช้เอทิลแอสเทตจำนวน 3 โมล ต่อการทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์จำนวน 1 โมล แต่สำหรับการผลิตไบโอดีเซลที่ภาวะเหนือวิกฤตการใช้อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสเทตต่อน้ำมันพืชสูงส่งผลให้เอทิลเอสเทอร์และไตรแอสทีนมากขึ้น โดยงานวิจัยของ Tan และคณะ (2011) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มและเมทิลแอสเทตที่ภาวะเหนือวิกฤต พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทิลแอสเทตต่อน้ำมันพืชเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของเมทิลแอสเทตช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีและยังช่วยให้สมดุลของปฏิกิริยาเข้าหาด้านผลิตภัณฑ์มากขึ้นส่งผลให้ได้เมทิลเอสเทอร์และไตรแอสทีนสูงขึ้น

งานวิจัยของ Goembira และ Saka (2012) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากเมล็ดเรพและเมทิลแอสเทตที่ภาวะเหนือวิกฤต ในช่วงอัตราส่วนโดยโมลของเมทิลแอสเทตต่อน้ำมันพืช 3.5:1 ถึง 54:1 ดังแสดงในรูปที่ 2.8 พบว่าการใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทิลแอสเทตสูงขึ้นส่งผลให้ได้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงขึ้นตามลำดับ โดยการเกิดเมทิลเอสเทอร์สามารถพบได้ตั้งแต่อัตราส่วนโดยโมลของเมทิลแอสเทตต่อน้ำมัน 6:1 อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนโดยโมลจาก 42:1 เป็น 54:1 ส่งผลให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

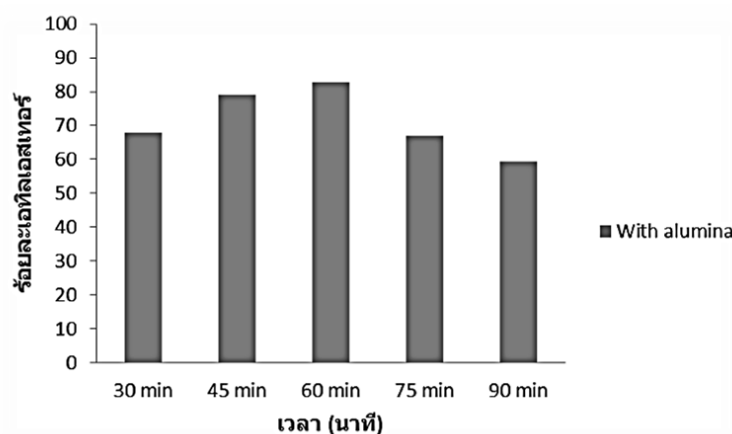


**รูปที่ 2.8** ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทิลแอสเทตต่อน้ำมันและปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ที่ภาวะเหนือวิกฤตของเมทิลแอสเทต อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสและความดัน 200 บาร์ [Goembira and Saka, 2012]

#### 2.6.4 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาส่งผลต่อปริมาณไบโอดีเซลที่ผลิตได้ โดย Tan และคณะ (2011) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มที่ภาวะเหนือวิกฤตของเมทิลเอซีเทต พบว่าเมื่อใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้นส่งผลให้ปริมาณร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากการเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้นทำให้สารตั้งต้นมีเวลาในการสัมผัสกันในเครื่องปฏิกรณ์นานขึ้น จึงเกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น โดยเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมคือ 60 นาที เมื่อใช้อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสและอัตราส่วนโดยโมลของเมทิลเอซีเทตต่อน้ำมันพืช 30:1 อย่างไรก็ตามการใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานเกินไปส่งผลให้เกิดการสลายตัวทางความร้อนของเมทิลเอสเทอร์และทำให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์มีค่าลดลง

งานวิจัยของสิริโสภา (2013) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มที่ภาวะเหนือวิกฤตของเอทิลเอซีเทตในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง พบว่าการเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 30 นาที ถึง 60 นาที ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 60 นาที ถึง 90 นาที พบว่าร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์มีค่าลดลงเนื่องจากเกิดการสลายตัวทางความร้อนของกรดไขมันไม่อิ่มตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.9



**รูปที่ 2.9** ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละเอทิลเอสเทอร์ที่ภาวะเหนือวิกฤตของเอทิลเอซีเทต อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลเอซีเทตต่อน้ำมันปาล์ม 30:1 อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ และใช้อะลูมินาบอลขนาด 6 มิลลิเมตร [สิริโสภา, 2013]

## 2.6.5 ชนิดและคุณภาพของน้ำมันพืช

น้ำมันพืชแต่ละชนิดมีปริมาณกรดไขมันอิสระที่แตกต่างกันตามชนิดและกรรมวิธีในการผลิตน้ำมันพืช ซึ่งปริมาณกรดไขมันอิสระและปริมาณน้ำในน้ำมันพืชมีผลอย่างมากต่อการผลิตไบโอดีเซลแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเฉพาะตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสเนื่องจากสามารถเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง เช่น การเกิดสบู่ เป็นต้น ส่งผลให้มีการสูญเสียไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาข้างเคียง แต่ปริมาณกรดไขมันอิสระและปริมาณน้ำส่งผลต่อการผลิตไบโอดีเซลที่ภาวะเหนือวิกฤต เนื่องจากน้ำสามารถทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) กับไตรกลีเซอไรด์เกิดเป็นกรดไขมันอิสระ ซึ่งกรดไขมันอิสระสามารถทำปฏิกิริยากับเอทิลแอลกอฮอล์ได้ได้ดีและรวดเร็วกว่าไตรกลีเซอไรด์ โดยงานวิจัยของ Goembira และ Saka (2014) พบว่าการใช้น้ำเป็นสารเติมแต่งในปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอริฟิเคชันระหว่างน้ำมันเมล็ดเรพและเมทิลแอลกอฮอล์ที่ภาวะเหนือวิกฤตส่งผลให้ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ น้ำมันพืชแต่ละชนิดยังมีชนิดและปริมาณของกรดไขมันแตกต่างกันซึ่งส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนและปริมาณไบโอดีเซลที่ผลิตได้

## 2.7 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

การผลิตไบโอดีเซลสามารถแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการ คือ กระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบไม่ต่อเนื่องและกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง ซึ่งจะใช้เครื่องปฏิกรณ์ที่แตกต่างกันดังนี้

### 2.7.1 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบไม่ต่อเนื่อง

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบไม่ต่อเนื่องจะใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (batch reactor) ซึ่งเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่มีการป้อนสารเข้าและนำผลิตภัณฑ์ออกอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงบรรจุสารตั้งต้นและเกิดปฏิกิริยาภายในภาชนะที่มีลักษณะเป็นถังผสม ซึ่งอาจมีใบกวนอยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์ช่วยให้สารตั้งต้นผสมกันได้ดีขึ้น นอกจากนี้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะแต่ละชนิดจะมีวิธีการให้ความร้อนหรือความเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิของผสมให้เหมาะสมและคงที่แตกต่างกัน การให้ความร้อนอาจทำได้โดยการให้ความร้อนผ่านแผ่นความร้อนไฟฟ้า (electric heating pad) หรือการให้ความร้อนผ่านขดไอน้ำ (steam coil) สำหรับการให้ความเย็นของผสมอาจทำได้โดยการให้ความเย็นผ่านขดไอน้ำเช่นเดียวกัน

### 2.7.2 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องเป็นกระบวนการผลิตที่มีการป้อนสารเข้าและมีการนำผลิตภัณฑ์ออกอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนและเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล



### 2.7.2.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง (Continuous stirred tank reactor: CSTR)

เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้มีลักษณะเป็นถังรูปทรงกระบอกและมีใบกวนภายในเครื่องปฏิกรณ์ นิยมใช้สำหรับปฏิกิริยาในวัฏภาคของเหลวซึ่งจะมีการป้อนสารตั้งต้นเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่องและมีผลิตภัณฑ์ออกมาทางท่อด้านข้างของเครื่องปฏิกรณ์ นอกจากนี้อาจมีอุปกรณ์ช่วยควบคุมอุณหภูมิและความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์ด้วย

### 2.7.2.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล (Plug flow reactor, Tubular reactor)

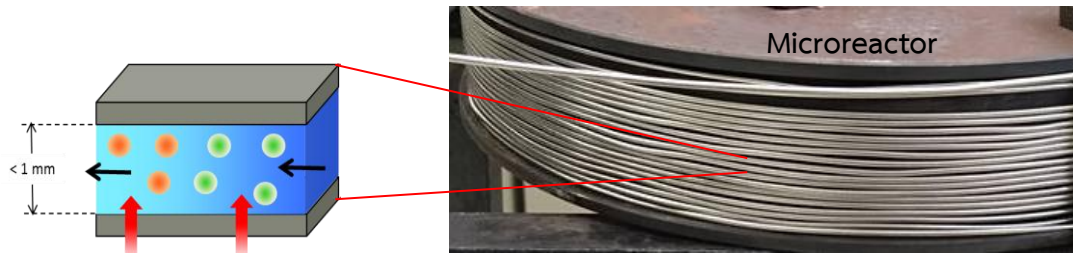
เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้มีลักษณะเป็นท่อ โดยมีการป้อนสารตั้งต้นเข้าทางด้านหนึ่งของเครื่องปฏิกรณ์และผลิตภัณฑ์ออกทางปลายอีกด้านหนึ่งซึ่งมีลักษณะการไหลเป็นไปในทิศทางเดียว ในภาวะคงที่ (steady state) องค์ประกอบของของผสม ณ จุดใดๆ ตามความยาวของท่อปฏิกรณ์จะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับเวลา ความยาวที่เหมาะสมของเครื่องปฏิกรณ์ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน เช่น สำหรับภาชนะที่ใช้ไฮดรอการ์บอนต่ำอาจต้องใช้เครื่องปฏิกรณ์ที่มีความยาวมากเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์ การให้ความร้อนหรือความเย็นต่อเครื่องปฏิกรณ์สามารถทำได้โดยผ่านผนังท่อ เช่น การให้ความร้อนผ่านอุปกรณ์ให้ความร้อนชนิดไฟฟ้า (electric heater)

## 2.8 เครื่องปฏิกรณ์ไมโคร (Microreactor)

เครื่องปฏิกรณ์ไมโครคือเครื่องปฏิกรณ์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางหรือช่องในการทำปฏิกิริยาขนาดเล็กอยู่ในช่วง 10 ไมโครเมตรจนถึง 1 มิลลิเมตร จากการทำขนาดเล็กทำให้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้มีการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสารภายในเครื่องปฏิกรณ์สูง ส่งผลให้การทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเกิดได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

### 2.8.1 ประสิทธิภาพทางการถ่ายเทมวลสารและการถ่ายเทความร้อน

จากการที่เครื่องปฏิกรณ์มีเส้นผ่านศูนย์กลางหรือช่องในการทำปฏิกิริยาขนาดเล็ก ส่งผลให้เครื่องปฏิกรณ์มีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ (surface to volume ratio) อยู่ในช่วง 10,000 - 50,000 ตารางเมตร/ลูกบาศก์เมตร ต่างจากเครื่องปฏิกรณ์ทั่วไปที่มีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ในช่วง 100 - 1,000 ตารางเมตร/ลูกบาศก์เมตร [Šalić and Zelić 2011] ซึ่งส่งผลให้เครื่องปฏิกรณ์ไมโครมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์สูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์ทั่วไป ทำให้ระยะทางในการแพร่ (diffusion path) ของการถ่ายเทมวลสาร (mass transfer) และการถ่ายเทความร้อน (heat transfer) ในเครื่องปฏิกรณ์มีระยะทางสั้นลง ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ดังนั้นเครื่องปฏิกรณ์ไมโครจึงมีประสิทธิภาพทางการถ่ายเทมวลสารและการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์ทั่วไป



$$r_A = -kC_A$$



Reaction time ( $T_R$ )  $T_R = \frac{1}{k}$

Diffusion time ( $T_D$ )  $T_D = \frac{l^2}{D}$

เมื่อ  $k$  = ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (Reaction rate constant)

$l$  = รัศมีของช่องสำหรับทำปฏิกิริยา

$D$  = ค่าการแพร่ของสาร (Diffusivity)

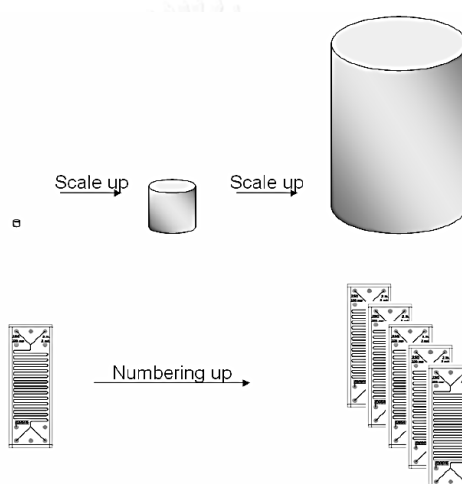
**รูปที่ 2.10** การถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลสารในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร [ลลิตา, 2015]

### 2.8.2 ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์

จากการที่เครื่องปฏิกรณ์ไมโครมีขนาดเล็ก ส่งผลให้ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์มีขนาดลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบทั่วไปที่ใช้ในห้องปฏิบัติการหรือในระดับอุตสาหกรรม เครื่องปฏิกรณ์ไมโครจึงใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อยกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบทั่วไป จากการที่ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อยแต่มีความปลอดภัยและมีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบทั่วไปส่งผลให้เครื่องปฏิกรณ์ไมโครเป็นเครื่องปฏิกรณ์หนึ่งที่น่าสนใจ

### 2.8.3 การขยายกำลังการผลิตของเครื่องปฏิกรณ์

เครื่องปฏิกรณ์ไมโครเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการขยายกำลังการผลิตแบบการเพิ่มจำนวนเครื่องปฏิกรณ์ (numbering up) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งเป็นการต่อเครื่องปฏิกรณ์เข้าด้วยกันแบบขนานหรือแบบอนุกรม ซึ่งสามารถทำได้เร็วและแต่ละหน่วย (unit) ของเครื่องปฏิกรณ์มีประสิทธิภาพเท่าเดิมเนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ นอกจากนี้หากเกิดความผิดพลาดของเครื่องปฏิกรณ์ในบางหน่วย สามารถแก้ไขได้โดยที่เครื่องปฏิกรณ์ในหน่วยอื่นยังคงดำเนินการผลิตอยู่ แตกต่างจากเครื่องปฏิกรณ์แบบทั่วไปที่มีการขยายกำลังการผลิตแบบเพิ่มขนาดเครื่องปฏิกรณ์ (scale up) ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพในการผลิตเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งมีขั้นตอนยุ่งยาก ใช้เวลานานและมีค่าใช้จ่ายสูง



รูปที่ 2.11 เปรียบเทียบการขยายกำลังการผลิตของเครื่องปฏิกรณ์ไมโครและเครื่องปฏิกรณ์แบบทั่วไป [Salić and Zelić 2011]

### 2.8.4 ความปลอดภัยในการดำเนินงาน

จากการที่เครื่องปฏิกรณ์ไมโครเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์ทั่วไป ส่งผลให้เครื่องปฏิกรณ์ไมโครมีความปลอดภัยสูงในการดำเนินงาน นอกจากนี้เครื่องปฏิกรณ์ไมโครสามารถทำการทดลองที่ภาวะรุนแรง เช่น ที่อุณหภูมิสูงหรือความดันสูง ซึ่งไม่สามารถดำเนินการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบทั่วไปได้

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Goembira และ Saka (2012) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพที่ภาวะเหนือวิกฤตของเมทิลเอซีเทตโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทิลเอซีเทตต่อน้ำมัน

พีช 3.5:1-54:1 อุณหภูมิ 300-380 องศาเซลเซียส ความดัน 50-300 บาร์ และเวลาในการทำปฏิกิริยาไม่เกิน 60 นาที พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทิลแอสซีเตตต่อน้ำมันส่งผลให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงขึ้นตามลำดับและมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลจาก 42:1 เป็น 54:1 เช่นเดียวกับผลของความดันในการทำปฏิกิริยาที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับเมื่อเพิ่มความดันตั้งแต่ 10 จนถึง 20 บาร์ แต่การใช้ความดันสูงขึ้นจาก 20 เป็น 30 บาร์ พบว่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์เพิ่มสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย และเมื่อทำการพิจารณาผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 300 องศาเซลเซียสจนถึง 350 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์เพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า 350 องศาเซลเซียสพบการลดลงของเมทิลเอสเทอร์ เนื่องจากเกิดการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิสูง โดยน้ำมันเมล็ดเรพที่มีจำนวนกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงจึงมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ เมื่อทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการสลายตัวของกรดไขมันไม่อิ่มตัวจากงานวิจัยนี้พบภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพที่ภาวะเหนือวิกฤตของเมทิลแอสซีเตตคือที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ อัตราส่วนโดยโมลของเมทิลแอสซีเตตต่อน้ำมันพีช 42:1 และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที ซึ่งจะได้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ 96.7

Goembira และคณะ (2012) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพที่ภาวะเหนือวิกฤตของคาร์บอกซิเลตเอสเทอร์โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 178 บาร์ และเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที พบว่าการผลิตไบโอดีเซลที่ภาวะเหนือวิกฤตของคาร์บอกซิเลตเอสเทอร์สามารถแลกเปลี่ยนโครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์ แล้วเกิดการจัดเรียงตัวเป็นเอสเทอร์ใหม่ผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่าปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอริฟิเคชัน โดยคาร์บอกซิเลตเอสเทอร์ที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้คือเมทิลคาร์บอกซิเลต เอทิลคาร์บอกซิเลต โพรพิลคาร์บอกซิเลต และบิวทิลคาร์บอกซิเลต ผลการทดลองพบว่าการใช้เมทิลคาร์บอกซิเลตที่ภาวะเหนือวิกฤตส่งผลให้ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลมีค่า 97.7 เนื่องจากความยาวของสายโซ่หมู่คาร์บอกซิลมีผลต่อร้อยละผลได้ที่เกิดขึ้น การเข้าทำปฏิกิริยาของสายโซ่สั้นจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้รวดเร็วกว่าสายโซ่ยาวจึงทำให้ผลการทดลองที่ได้มีค่าร้อยละผลได้สูงสุดเมื่อใช้เมทิลคาร์บอกซิเลตเอสเทอร์

Dona และคณะ (2012) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองและน้ำมันมาเคบาที่ภาวะเหนือวิกฤตของเมทิลแอสซีเตตโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทิลแอสซีเตตต่อน้ำมันพีช 20:1-60:1 อุณหภูมิ 300-400 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 18-45 นาที พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทิลแอสซีเตตต่อน้ำมันพีช อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยาส่งผลให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น โดยภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองและน้ำมันมาเคบาที่ภาวะเหนือวิกฤตของเมทิลแอสซีเตตคือที่อัตราส่วนโดยโม

ลของเมทิลแอสีเทตต่อน้ำมันพีช 60:1 อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที ซึ่งการใช้ไขมันถั่วเหลืองเป็นสารตั้งต้นจะได้อ้อยผลผลิตได้ของเอสเทอร์เท่ากับ 44 แต่การใช้ไขมันมาเคบาเป็นสารตั้งต้นพบว่าได้อ้อยผลผลิตได้ของเอสเทอร์เท่ากับ 83 ที่ภาวะเดียวกันกับน้ำมันถั่วเหลือง ซึ่งการใช้ไขมันมาเคบาเป็นสารตั้งต้นส่งผลให้อ้อยผลผลิตได้ของเอสเทอร์สูงกว่าน้ำมันถั่วเหลือง เนื่องจากน้ำมันมาเคบามีกรดไขมันอิสระสูงกว่าน้ำมันถั่วเหลือง ซึ่งความแตกต่างของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันสองชนิดนี้ส่งผลให้อ้อยผลผลิตได้ของเอสเทอร์ของน้ำมันทั้งสองชนิดมีค่าแตกต่างกัน

Saka และ Isayama (2009) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพที่ภาวะเหนือวิกฤตของเมทิลแอสีเทตที่อุณหภูมิ 270-380 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ อัตราส่วนโดยโมลของเมทิลแอสีเทตต่อน้ำมันพีช 42:1 และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 10-120 นาที จากการทดลองพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้นส่งผลให้อ้อยผลผลิตได้ของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มสูงขึ้น โดยมีค่าร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 91 ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสและเวลาในการทำปฏิกิริยามากกว่า 40 นาที อย่างไรก็ตามการเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาให้นานขึ้นเป็น 60 นาทีส่งผลให้อ้อยผลผลิตได้ของเมทิลเอสเทอร์ลดลงเนื่องจากเกิดการสลายตัวทางความร้อน นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อทำการผสมไตรเอซิดินกับเมทิลโอเลเอตสามารถปรับปรุงสมบัติทางด้านการไหลของไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่ำให้ดีขึ้น

Tan และคณะ (2011) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มที่ภาวะเหนือวิกฤตของเมทิลแอสีเทตโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 340-420 องศาเซลเซียส ความดัน 150-250 บาร์ อัตราส่วนโดยโมลของเมทิลแอสีเทตต่อน้ำมันพีช 20:1-60:1 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 15-75 นาที พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาส่งผลให้อ้อยผลผลิตได้ไบโอดีเซลมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์และเมทิลแอสีเทตเกิดได้รวดเร็ว ส่งผลต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์และร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซล ส่วนการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทิลแอสีเทตต่อน้ำมันพีชส่งผลให้อ้อยผลผลิตได้เพิ่มขึ้นเช่นกัน และเมื่อพิจารณาปริมาณและองค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันปาล์ม พบว่ามีจำนวนกรดไขมันอิ่มตัวสูงกว่ากรดไขมันไม่อิ่มตัว ซึ่งกรดไขมันอิ่มตัวจะมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่ากรดไขมันไม่อิ่มตัว จำนวนกรดไขมันอิ่มตัวที่มีอยู่มากในน้ำมันปาล์มจึงทำให้เกิดการสลายตัวของผลิตภัณฑ์น้อยเมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาสูง นอกจากนี้ยังทำการศึกษาผลของปริมาณน้ำและกรดไขมันอิสระในน้ำมันพีช โดยพบว่าปริมาณน้ำและกรดไขมันอิสระในน้ำมันพีชส่งผลต่อการผลิตไบโอดีเซลที่ภาวะเหนือวิกฤตของเมทิลแอสีเทต เนื่องจากไตรกลีเซอไรด์จะทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) กับน้ำเกิดเป็นกรดไขมันอิสระ และกรดไขมันอิสระจะทำปฏิกิริยากับเมทิลแอสีเทตเพื่อผลิตเมทิลเอส

เทอร์และกรดแอสติก ซึ่งกรดแอสติกสามารถประพุดิตัวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น ดังนั้นการผลิตไบโอดีเซลที่ภาวะเหนือวิกฤตของเมทิลแอสเทตสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตให้มีร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลเพิ่มสูงขึ้นได้โดยการเพิ่มปริมาณน้ำในสารตั้งต้น

Imahara และคณะ (2007) ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของเมทิลเอสเทอร์ ประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัวและกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่ภาวะเหนือวิกฤตของเมทานอลในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 270-350 องศาเซลเซียส ที่ความดันแตกต่างกัน และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 5-60 นาที พบว่าที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสและความดัน 430 บาร์ พบว่าการลดลงของเมทิลเอสเทอร์เนื่องมาจากกรดไขมันไม่อิ่มตัว เช่น เมทิลโอเลเอท (C18:1) เมทิลไลโนเลเอท (C18:2) และเมทิลไลโนเลเนท (C18:3) ซึ่งมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำจึงเกิดการสลายตัวเมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส ในขณะที่กรดไขมันอิ่มตัวจะเกิดการสลายตัวเพียงเล็กน้อยเมื่อใช้อุณหภูมิสูงกว่า 350 องศาเซลเซียส

Niza และคณะ (2012) ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสุปุดำที่ภาวะเหนือวิกฤตของเมทิลแอสเทต โดยศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของเมทิลโอเลเอท (C18:1) และเมทิลไลโนเลเอท (C18:2) ที่อุณหภูมิ 330-420 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาไม่เกิน 60 นาที พบว่าเมทิลไลโนเลเอท (C18:2) มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 330-420 องศาเซลเซียสเนื่องจากเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูง ในขณะที่เมทิลโอเลเอท (C18:1) จะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 350 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าเมทิลโอเลเอทมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่าเมทิลไลโนเลเอทเนื่องจากมีจำนวนพันธะคู่ต่ำกว่า

Niza และคณะ (2013) ศึกษาผลของปริมาณน้ำและกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชต่อการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสุปุดำที่ภาวะเหนือวิกฤตของเมทิลแอสเทต โดยการเติมน้ำลงในน้ำมันพืชร้อยละ 5-20 โดยน้ำหนักของน้ำมัน ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทิลแอสเทตต่อน้ำมันสุปุดำ 50:1 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 32 นาที พบว่าปริมาณน้ำไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และเมื่อพิจารณาผลของการเติมกรดโอเลอิกที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงในปริมาณร้อยละ 5-20 โดยน้ำหนักของน้ำมันที่ภาวะเดียวกันกับการเติมน้ำ พบว่าการเติมกรดโอเลอิกส่งผลให้ร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากกรดไขมันอิสระสามารถทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเกิดเป็นไบโอดีเซลมากขึ้น

Campanelli และคณะ (2010) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันทานตะวัน และน้ำมันสุปุดำที่ภาวะเหนือวิกฤตของเมทิลแอสเทตในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทิลแอสเทตต่อน้ำมันพืช 25:1-59:1 อุณหภูมิ 300-350 องศาเซลเซียส ความ

ดัน 100-300 บาร์ และเวลาในการทำปฏิกิริยาไม่เกิน 120 นาที พบว่าในการศึกษาการผลิตที่ภาวะเหนือวิกฤตจำเป็นต้องใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทิลแอสีเทตต่อน้ำมันพืชสูงเนื่องจากทำให้สมดุลของปฏิกิริยาเข้าหาผลิตภัณฑ์มากขึ้นโดยในงานวิจัยนี้พบว่าจะได้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์สูงเมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทิลแอสีเทตต่อน้ำมันพืชตั้งแต่ 42:1 เป็นต้นไป ส่วนผลของอุณหภูมิพบว่าน้ำมันทั้งสามชนิดจะได้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ 100% เมื่อใช้อุณหภูมิ 345 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 50 นาที เนื่องจากการใช้อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้นส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์เพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้อุณหภูมิและความดันสูงเกินไปส่งผลให้เกิดการสลายตัวของกรดไขมันไม่อิ่มตัวในเมทิลเอสเทอร์ เมื่อพิจารณาผลของความดันพบว่าการใช้ความดันสูงกว่า 200 บาร์ทำให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้คือที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทิลแอสีเทตต่อน้ำมันพืช 42:1 อุณหภูมิ 345 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ และเวลาในการทำปฏิกิริยา 50 นาที ซึ่งจะได้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ 100% นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการผลิตกรดแอสติกในสารตั้งต้นเพื่อช่วยพัฒนากระบวนการผลิตไบโอดีเซลเนื่องจากกรดแอสติกสามารถทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์เกิดเป็นไตรแอสทีนมากขึ้นส่งผลให้ปริมาณไตรแอสทีนในผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยทำการผสมกรดแอสติกร้อยละ 1-10 โดยน้ำหนักของน้ำมันพืช ซึ่งปริมาณกรดแอสติกที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์และไตรแอสทีนเพิ่มสูงขึ้น

Goembira และ Saka (2014) ศึกษาการเติมสารเติมแต่งได้แก่ กรดแอสติก น้ำ และกรดแอสติกผสมน้ำ ในการทำปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอริฟิเคชันระหว่างน้ำมันเมล็ดเรพและเมทิลแอสีเทตที่ภาวะเหนือวิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ซึ่งพบว่าการเติมกรดแอสติก น้ำ และกรดแอสติกผสมน้ำ ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของน้ำมันส่งผลให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์และร้อยละผลได้ของไตรแอสทีนเพิ่มสูงขึ้น โดยมีปริมาณสูงที่สุดเมื่อใช้กรดแอสติกผสมน้ำในความเข้มข้นของกรดแอสติกร้อยละ 26 โดยน้ำหนัก เนื่องจากกรดแอสติกจะทำปฏิกิริยา acidolysis กับไตรกลีเซอไรด์เกิดเป็นกรดไขมันอิสระและไตรแอสทีน ในขณะเดียวกันน้ำจะทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) กับไตรกลีเซอไรด์เกิดเป็นกรดไขมันอิสระ ซึ่งทำให้ร้อยละผลได้ของเมทิลแอสีเทตและไตรแอสทีนมีค่าเพิ่มขึ้นจากการเกิดไตรแอสทีนในปฏิกิริยา acidolysis และกรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้นจากการเติมน้ำและกรดแอสติกสามารถทำปฏิกิริยากับเมทิลแอสีเทตเกิดเป็นเมทิลเอสเทอร์ได้รวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับไตรกลีเซอไรด์ ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์และร้อยละผลได้ของไตรแอสทีนเพิ่มสูงขึ้น

Casas และคณะ (2010) ศึกษาผลของไตรแอสทีนต่อคุณภาพของไบโอดีเซล โดยทำการศึกษาสมบัติต่างๆของไบโอดีเซลเมื่อผสมไตรแอสทีนปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ต่อไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชที่แตกต่างกัน พบว่าการเติมไตรแอสทีนลงในไบโอดีเซลส่งผลให้ความ

หนาแน่นและความหนืดของของผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากความหนาแน่นที่มีค่ามากของไตรแอสิติน อย่างไรก็ตามปริมาณไตรแอสิตินไม่มีข้อจำกัดต่อความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM D6751 สำหรับสมบัติที่อุณหภูมิต่ำ พบว่าไตรแอสิตินช่วยปรับปรุงสมบัติทางการไหลที่อุณหภูมิต่ำของของผสม เช่น จุดไหลเท (pour point) และจุดอุดตัน (cold filter plugging point) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในสภาพอากาศหนาวเย็นได้ อย่างไรก็ตามไตรแอสิตินส่งผลให้จุดวาบไฟ (flash point) ของของผสมมีค่าลดลงเล็กน้อยแต่ยังคงอยู่ในมาตรฐานของ ASTM D6751 ดังนั้นหากพิจารณาตามมาตรฐาน ASTM D6751 พบว่าสามารถมีไตรแอสิตินอยู่ในไบโอดีเซลได้ถึงร้อยละ 20 โดยที่คุณภาพของไบโอดีเซลยังคงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน



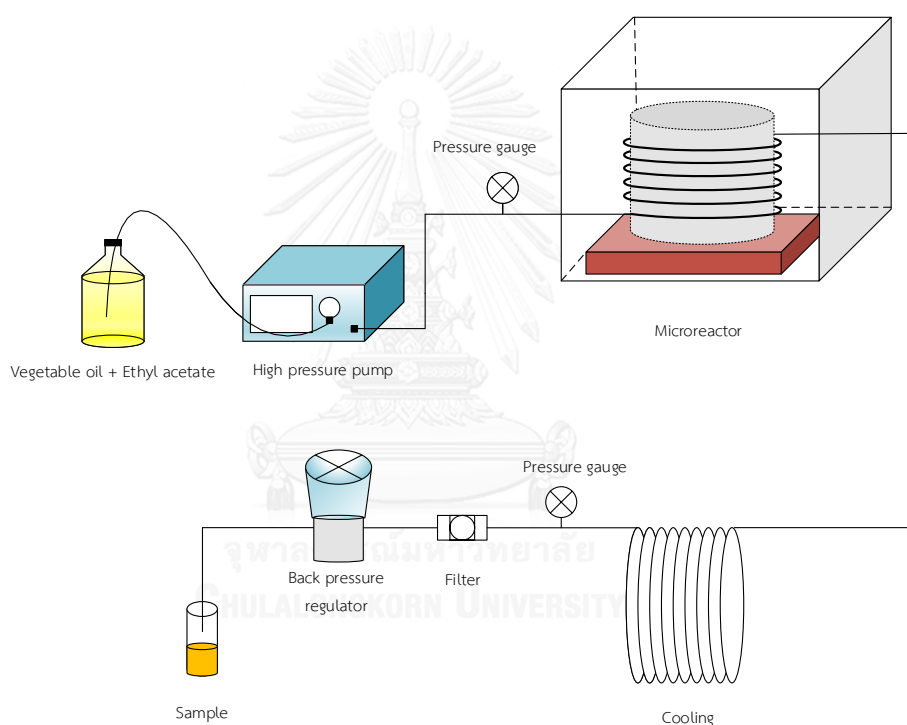


### บทที่ 3

## เครื่องมือและการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันพืชสองชนิด คือ น้ำมันสบู่ดำ และ น้ำมันปาล์ม โดยใช้เอทิลแอลกอฮอล์ที่ภาวะเหนือวิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร ซึ่งศึกษาตัวแปรต่างๆในการผลิตที่ส่งผลต่อร้อยละเอสเทอร์และสภาวะที่เหมาะสม

### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

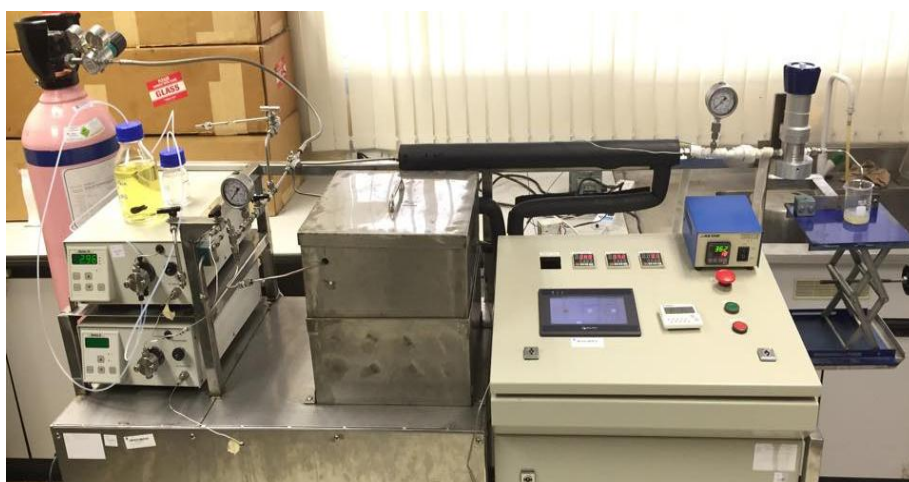


รูปที่ 3.1 แผนภาพเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองผลิตไบโอดีเซล

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันพืชที่ภาวะเหนือวิกฤตของเอทิลแอลกอฮอล์ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนป้อนสาร ส่วนการทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร และส่วนการเก็บตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.1 โดยส่วนป้อนสารทำหน้าที่ป้อนสารตั้งต้น ได้แก่ น้ำมันพืชและเอทิลแอลกอฮอล์เข้าสู่ระบบ เนื่องจากสารตั้งต้นทั้งสองชนิดสามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ ดังนั้นจึงทำการผสมสารตั้งต้นก่อนป้อนเข้าสู่ระบบโดยปั๊มแรงดันสูง สารผสมจะเข้าสู่ส่วนการทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครที่มีลักษณะเป็นท่อขนาดเล็กพันอยู่รอบแกนเหล็ก ที่ได้รับความร้อน

จากอุปกรณ์ให้ความร้อนชนิดไฟฟ้า (Electric heater) จากนั้นสารผลิตภัณฑ์จะเข้าสู่อุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนโดยใช้อากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน ก่อนเข้าสู่อุปกรณ์ควบคุมความดัน (Back Pressure Regulator) และส่วนการเก็บตัวอย่างต่อไป ซึ่งตัวอย่างที่ได้จะถูกนำไปประเหยเอทิลเอซีเทตออก จากนั้นจะทำการวิเคราะห์ปริมาณเอทิลเอสเทอร์ ไตรกลีเซอไรด์ โมโนแอสิติน ไตรกลีเซอไรด์ ไดแอสิติน โมโนกลีเซอไรด์ ไตรแอสิติน และกรดไขมันอิสระด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatograph)

### 3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ไมโคร (Microreactor)



รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์ไมโคร

เครื่องปฏิกรณ์ไมโครทำจากท่อสแตนเลส (stainless steel tube) ชนิด 316 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1/16 นิ้ว เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 762 ไมโครเมตร ความยาวของท่อ 15.14 เมตร และมีปริมาตร 6.9363 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยพันอยู่รอบแกนเหล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 เซนติเมตร และสูง 4.8 เซนติเมตร บรรจุอยู่ในกล่องเหล็กที่มีฉนวนกันความร้อน พร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิประกอบด้วย อุปกรณ์ให้ความร้อนชนิดไฟฟ้า (Electric heater) ซึ่งอยู่ด้านล่างของแกนเหล็กทำหน้าที่ให้ความร้อน และมีเทอร์โมคัปเปิล 3 ชุด ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิที่อุปกรณ์ให้ความร้อน แกนเหล็ก และที่ผิวท่อของเครื่องปฏิกรณ์

### 3.1.2 ปั๊มแรงดันสูง (High performance liquid chromatography pump)



รูปที่ 3.3 ปั๊มแรงดันสูง

ปั๊มแรงดันสูงรุ่น Series III Pump 10 mL Heads จากบริษัท Scientific Systems, Inc. ทำหน้าที่ป้อนสารตั้งต้นคือน้ำมันพืชและเอทิลแอลกอฮอล์ที่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันเข้าสู่ระบบ ซึ่งสามารถป้อนสารตั้งต้นที่อัตราการไหลสูงสุด 10 มิลลิลิตร/นาที และทำความดันได้สูงสุด 413 บาร์ โดยมีการเทียบมาตรฐาน (Calibration) อัตราการไหลของน้ำมันพืชและเอทิลแอลกอฮอล์ก่อนทำการทดลอง

### 3.1.3 อุปกรณ์ควบคุมความดัน (Back pressure regulator)



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ควบคุมความดัน

อุปกรณ์ควบคุมความดันรุ่น BP-66-1A11QEN161 จากบริษัท GO Regulator สามารถควบคุมความดันของระบบได้ในช่วง 0-272 บาร์

### 3.1.4 เครื่องระเหยแบบหมุน (Rotary evaporator)



รูปที่ 3.5 เครื่องระเหยแบบหมุน

เครื่องระเหยแบบหมุน รุ่น R205 จากบริษัท Buchi สำหรับระเหยเอทิลแอลกอฮอล์ออกจากผลิตภัณฑ์

### 3.1.5 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด (Acid value)



รูปที่ 3.6 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด

เครื่องวัดค่าความเป็นกรด Auto-Titrator รุ่น DL53 จากบริษัท Mettler Toledo จำกัด สำหรับใช้วัดค่าความเป็นกรดในน้ำมันพืชซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณกรดไขมันอิสระ โดยค่าความเป็นกรดหมายถึง จำนวนมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทำให้กรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในน้ำมันหรือน้ำมันจำนวน 1 กรัมเป็นกลาง ซึ่งค่าความเป็นกรดจะแตกต่างกันตามชนิดของน้ำมัน การใช้งานและการเก็บรักษา

3.1.6 เครื่องชั่งสาร (Analytical balance) จากบริษัท Metter-Toledo ความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง

### 3.2 สารที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 น้ำมันสบู่ดำ (Crude jatropha oil) จากบริษัท ไบโอดีเอ็นเออร์รี่ดีเวลลอปเม้นท์ จำกัด

3.2.1 น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ยังไม่แยกไข (Refined Bleached Deodorized Palm Oil, RBDPO) จากบริษัทน้ำมันพืชปทุม จำกัด

3.2.2 เอทิลแอซีเตต (Commercial grade ethyl acetate 99.8%) จากบริษัท RCL Labscan

3.2.3 สารมาตรฐานโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ จากบริษัท Supelco, ไตรกลีเซอไรด์ (99%) จากบริษัท Fluka และไตรเอซีติน (99%) จากบริษัท Applichem

3.2.4 สารมาตรฐานเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ซึ่งได้แก่ เอทิลปาล์มมิเตต (Ethyl palmitate) และเอทิลโอเลอเตต (Ethyl oleate) จากบริษัท Sigma-Aldrich

### 3.3 การดำเนินการทดลอง

3.3.1 ผสมเอทิลแอซีเตตกับน้ำมันสบู่ดำหรือน้ำมันปาล์มตามอัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอซีเตตต่อน้ำมันที่กำหนด (30:1 หรือ 50:1)

3.3.2 ให้ความร้อนกับเครื่องปฏิกรณ์โดยใช้อุปกรณ์ให้ความร้อนชนิดไฟฟ้าจนกระทั่งได้อุณหภูมิที่ต้องการ (330, 350 และ 370 องศาเซลเซียส) โดยสังเกตจากมอนิเตอร์ที่แสดงอุณหภูมิที่ผิวท่อของเครื่องปฏิกรณ์

3.3.3 เมื่อได้อุณหภูมิตามที่กำหนดจึงป้อนสารผสมในข้อ (3.3.1) เข้าสู่ระบบตามอัตราการไหลที่กำหนดโดยใช้ปั๊มแรงดันสูงจนมีสารผสมเต็มระบบ

3.3.4 หมุนวาล์วปรับค่าความดันของอุปกรณ์ควบคุมความดันเพื่อเพิ่มความดันในระบบให้เป็น 200 บาร์ เมื่อได้ความดันตามที่ต้องการแล้วจึงเริ่มจับเวลา

3.3.5 ทำการเก็บตัวอย่างทุกชั่วโมง จดบันทึกน้ำหนักและลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้

3.3.6 นำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองแต่ละชั่วโมงไประเหยเอทิลเอซีเทตออกด้วยเครื่องระเหยแบบหมุนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความดัน 20 มิลลิบาร์ และความเร็วรอบการหมุน 100 รอบ/นาที เป็นระยะเวลา 40 นาที พร้อมจดบันทึกน้ำหนักผลิตภัณฑ์หลังขั้นตอนการระเหย

3.3.7 นำผลิตภัณฑ์หลังขั้นตอนการระเหยไปวิเคราะห์ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ โมโนเอซีดีนไดกลีเซอไรด์ ไดเอซีดีนโมโนกลีเซอไรด์ กรดไขมันอิสระ เอทิลเอสเทอร์และไตรเอซีดีน ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

### 3.4 การวิเคราะห์ปริมาณเอทิลเอสเทอร์

วิเคราะห์ปริมาณเอทิลเอสเทอร์และองค์ประกอบอื่นๆในผลิตภัณฑ์ประกอบด้วย ไตรกลีเซอไรด์ โมโนเอซีดีนไดกลีเซอไรด์ ไดเอซีดีนโมโนกลีเซอไรด์ กรดไขมันอิสระ และไตรเอซีดีน ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี รุ่น GC-2010 ของบริษัท Shimadzu ประกอบกับเครื่องฉีดตัวอย่างอัตโนมัติ (Auto injector) โดยใช้คอลัมน์ DB5-HT จากบริษัท Agilent Technologies จำกัด (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.32 มิลลิเมตร, ความหนาของชั้นฟิล์ม 0.10 ไมโครเมตร และยาว 15 เมตร) และใช้ FID (Flame Ionization Detector) เป็นดีเทคเตอร์ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ที่ปรับปรุงจาก EN 14105 ซึ่งมีสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3.1

**ตารางที่ 3.1** สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

Condition	Value
Injection volume	1.0 $\mu$ L
Injection temperature	350 $^{\circ}$ C
Split ratio	20:1
Column temperature program	50 $^{\circ}$ C hold 1 min Rate 10 $^{\circ}$ C/min to 100 $^{\circ}$ C Rate 5 $^{\circ}$ C/min to 110 $^{\circ}$ C Rate 10 $^{\circ}$ C/min to 160 $^{\circ}$ C Rate 5 $^{\circ}$ C/min to 280 $^{\circ}$ C Rate 10 $^{\circ}$ C/min to 380 $^{\circ}$ C hold 5 min
FID detector temperature	380 $^{\circ}$ C
Carrier gas (He) flow rate	1.59 ml/min

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชด้วยปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอริฟิเคชันที่ภาวะเหนือวิกฤตของเอทิลแอสซิเตตในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร เป็นกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และไม่มีกลีเซอรอลเกิดขึ้นในปฏิกิริยา แต่จะมีไตรแอสิตินเป็นผลพลอยได้ของกระบวนการผลิต ซึ่งสามารถรวมเป็นวัฏภาคเดียวกันกับเอทิลเอสเทอร์ได้ นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารเติมแต่งในไบโอดีเซล และปรับปรุงสมบัติทางการไหลที่อุณหภูมิต่ำของไบโอดีเซลได้อีกด้วย

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากน้ำมันพืชสองชนิด ได้แก่ น้ำมันสบู่ดำและน้ำมันปาล์มที่ภาวะเหนือวิกฤตของเอทิลแอสซิเตตในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร โดยศึกษาปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องในการผลิต ประกอบด้วยผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา ผลของอุณหภูมิ ผลของความดัน ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสซิเตตต่อน้ำมันพืช และผลของการเติมสารเติมแต่ง โดยทำการเก็บตัวอย่างทุกชั่วโมง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะนำไประเหยเอทิลแอสซิเตตออกก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณและองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ไตรกลีเซอไรด์ โมโนแอสิตินไดกลีเซอไรด์ ไดแอสิตินโมโนกลีเซอไรด์ ไตรแอสิตินเอทิลเอสเทอร์ และกรดไขมันอิสระ

#### 4.1 การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ

##### 4.1.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันสบู่ดำ

น้ำมันพืชประกอบด้วยไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) เป็นองค์ประกอบหลัก มีชนิดและปริมาณของกรดไขมันแตกต่างกันตามชนิดของน้ำมันพืช ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันสบู่ดำตามมาตรฐาน AOAC 969.33, AOAC 991.39 (2005) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันสบู่ดำแสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่า น้ำมันสบู่ดำมีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ กรดปาล์มิติก (C16:0) ร้อยละ 13.92 กรดสเตียริก (C18:0) ร้อยละ 6.26 กรดโอเลอิก (C18:1) ร้อยละ 43.10 และกรดไลโนเลอิก (C18:2) ร้อยละ 35.19 ซึ่งมีปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวทั้งหมดร้อยละ 20.52 และ 79.27 ตามลำดับ การที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงจะทำให้ถูกออกซิไดส์ได้ง่ายและมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ จากข้อมูลที่ได้สามารถคำนวณน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของน้ำมันสบู่ดำได้เท่ากับ 872 กรัม/โมล นอกจากนี้ได้ทำการวัดค่ากรดในน้ำมันสบู่ดำเพื่อหาปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมัน น้ำมันพืชที่มีค่ากรดสูงจะมีกรดไขมันอิสระมาก ซึ่งกรดไขมันอิสระสามารถเกิดปฏิกิริยากับเอทิลแอสซิเตตได้ง่ายกว่าไตรกลีเซอไรด์เนื่องจากขนาดที่เล็กกว่า แต่การที่มีกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชสูงจะทำให้ น้ำมันพืชมี

ความเป็นกรดสูง ซึ่งสามารถวัดค่าความเป็นกรดได้โดยใช้เครื่อง Auto-Titrator ตามวิธี AOCS Cd 3a-63 พบว่าน้ำมันสบู่ดำมีค่าความเป็นกรด 7.89 mg of KOH / g of oil หรือคิดเป็นกรดไขมันอิสระร้อยละ 3.96 โดยน้ำหนัก

**ตารางที่ 4.1** ชนิดและปริมาณของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันสบู่ดำ

Fatty acid	(C:X)	Wt%
Myristic acid	C14:0	0.05
Palmitic acid	C16:0	13.92
Palmitoleic acid	C16:1	0.76
Heptadecanoic acid	C17:0	0.08
Stearic acid	C18:0	6.26
Oleic acid	C18:1	43.10
Linoleic acid	C18:2	35.19
Linolenic acid	C18:3	0.16
Arachidic acid	C20:0	0.18
Cis-11-Eicosenoic acid	C20:1	0.06
Lignoceric acid	C24:0	0.03
Unidentified peak		0.21
Total		100
Average Molecular weight		872 g/mol

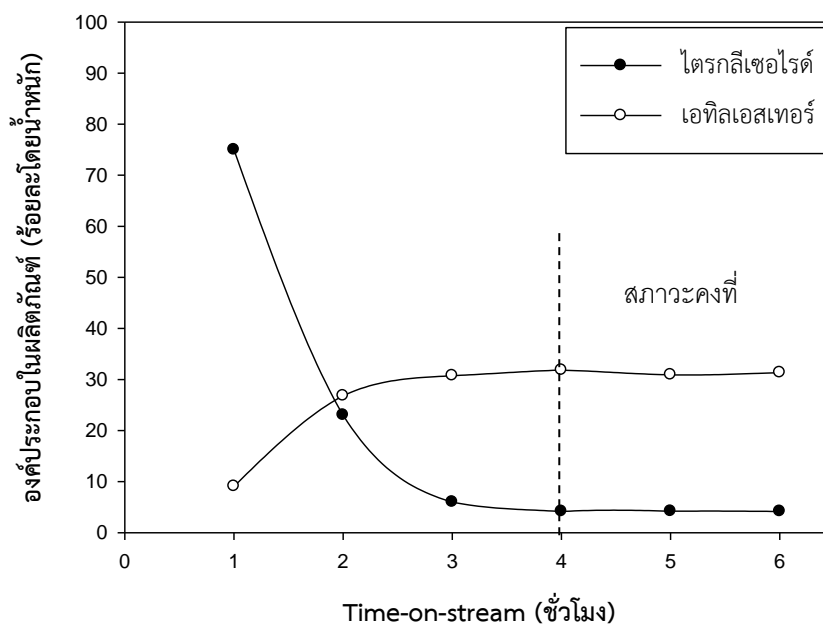
หมายเหตุ C:X = จำนวนคาร์บอน : จำนวนพันธะคู่

#### 4.1.2 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา

ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลดีเซลโดยใช้น้ำมันสบู่ดำที่ภาวะเหนือวิกฤตของเอทิลแอลกอฮอล์ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร พิจารณาเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 1-20 นาที โดยคำนวณจากทฤษฎีของไหลเหนือวิกฤต ซึ่งอุณหภูมิจากการทำปฏิกิริยา ความดัน และอัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันพืชส่งผลต่อเวลาในการทำปฏิกิริยาทั้งสิ้น โดยในกระบวนการแบบต่อเนื่องซึ่งมีสารไหลเข้าและออกตลอดเวลาจะเรียกเวลาในการทำปฏิกิริยานี้ว่า Residence time หรือระยะเวลาที่สารอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ (แสดงการคำนวณในภาคผนวก ค) ซึ่งแตกต่างจากเวลาที่ใช้จริงในการดำเนินการ



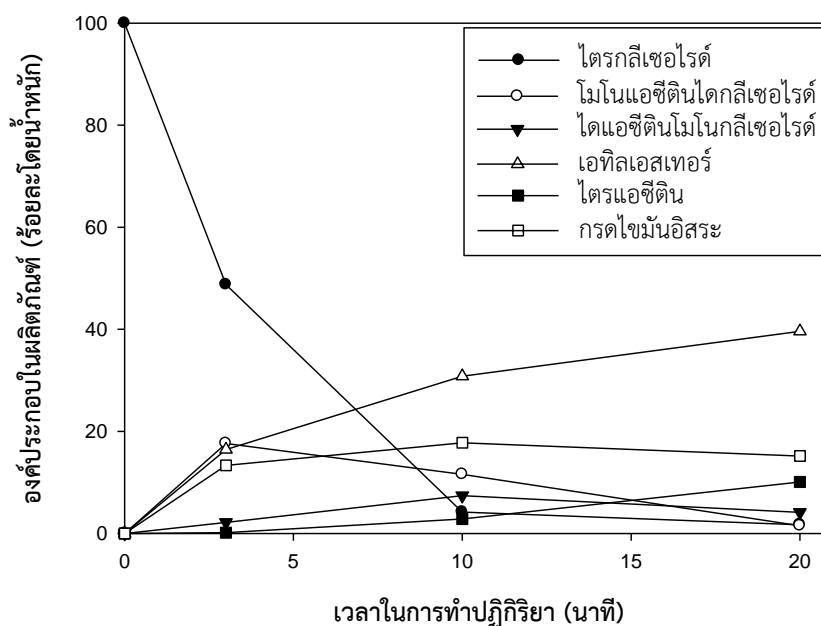
ทดลอง หรือเรียกว่า Time-on-stream (TOS) ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร เครื่องปฏิกรณ์ไมโครเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางหรือช่องในการทำปฏิกิริยาขนาดเล็ก ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนสูงและใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อย แต่เนื่องจากเป็นกระบวนการแบบต่อเนื่องจึงต้องใช้เวลา Time-on-stream นานเพื่อจะได้ผลิตภัณฑ์ที่สภาวะคงที่ (steady state) ดังแสดงในรูปที่ 4.1



**รูปที่ 4.1** ความสัมพันธ์ของปริมาณไดเอทิลเซอไรด์และเอทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ และ Time-on-stream ที่อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอซีเทตต่อน้ำมันสุุดำ 50:1 อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ และเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที

จากรูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณไดเอทิลเซอไรด์และเอทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ และ Time-on-stream พบว่า ไดเอทิลเซอไรด์มีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็วในชั่วโมงที่ 1 และชั่วโมงที่ 2 พร้อมกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณเอทิลเอสเทอร์ เนื่องจากการเก็บตัวอย่างจะทำการเก็บเป็นช่วงเวลาหนึ่งชั่วโมงเพื่อให้เพียงพอต่อการนำไปวิเคราะห์ ซึ่งอาจมีสารที่เข้าสู่สภาวะคงที่และยังไม่เข้าสู่สภาวะคงที่ผสมกันอยู่ในชั่วโมงที่ 1-2 จากนั้นจะเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ในชั่วโมงที่ 3 และเพื่อให้ได้ผลการทดลองในสภาวะคงที่จริงจึงทำการเก็บตัวอย่างตั้งแต่ชั่วโมงที่ 4 เป็นต้นไป โดยทำการเก็บตัวอย่างที่สภาวะคงที่ทุกชั่วโมงจำนวนอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง ทั้งนี้ระยะเวลาที่สารเข้าสู่สภาวะคงที่นั้นขึ้นอยู่กับเวลาในการทำปฏิกิริยาและอัตราการไหลของสารผสม หากอัตราการไหลต่ำจะทำให้สารตั้งต้นเคลื่อนที่ในระบบช้าลง ส่งผลให้ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงที่นานยิ่งขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของเวลาที่ใช้ในปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอร์ฟิเคชันจากเอทิลแอสเทตที่ภาวะเหนือวิกฤตโดยใช้น้ำมันสบู่ดำเป็นสารตั้งต้น ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสเทตต่อน้ำมันสบู่ดำ 50:1 และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 1-20 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ รูปที่ 4.3



**รูปที่ 4.2** ความสัมพันธ์ของปริมาณองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ และเวลาในการทำปฏิกิริยา 3-20 นาที ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ และอัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสเทตต่อน้ำมัน 50:1

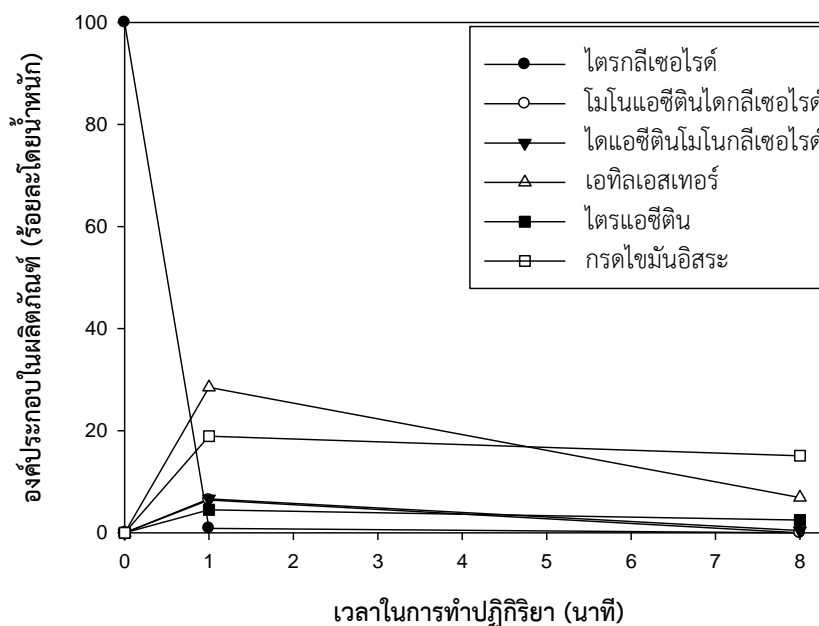
รูปที่ 4.2 พบว่าการใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 3-20 นาที ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ลดลงเพื่อเปลี่ยนเป็นสารมัธยันตร์ (intermediate) และผลิตภัณฑ์เอทิลแอสเทต ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วที่เวลา 3-10 นาที โดยที่เวลา 10 นาที ไตรกลีเซอไรด์ลดลงเหลือร้อยละ 4.20 เอทิลแอสเทตและไตรแอสทีนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 31.83 และ 2.84 ตามลำดับ เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 20 นาที ไตรกลีเซอไรด์ลดลงเหลือร้อยละ 1.70 เอทิลแอสเทตและไตรแอสทีนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 39.62 และ 10.10 ซึ่งการเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจะทำให้สารตั้งต้นมีเวลาในการสัมผัสกันนานขึ้น ส่งผลให้ไตรกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับเอทิลแอสเทตเกิดเป็นสารมัธยันตร์และผลิตภัณฑ์มากขึ้น และสารมัธยันตร์เปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์มากขึ้นตามการเกิดปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอร์ฟิเคชันดังสมการที่ (4.1) ถึง (4.3) ซึ่งในขั้นตอนแรกไตรกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับเอทิลแอสเทตเกิดเป็นเอทิลแอสเทต (FAEE) และโมโนแอสทีนไดกลีเซอไรด์ จากนั้นโมโนแอสทีนไดกลีเซอไรด์จะทำปฏิกิริยากับเอทิลแอสเทตเกิดเป็นเอทิลแอสเทตและไดแอสทีนโมโนกลีเซอ

ไรต์ สุดท้ายไตรแอสิตินโมนอกลิเซอไรด์จะทำปฏิกิริยากับเอทิลแอสิตเตเกิดเป็นเอทิลเอสเทอร์และไตรแอสิติน ทั้งนี้เนื่องจากเอทิลเอสเทอร์และไตรแอสิตินรวมเป็นวัฏภาคเดียวกันอยู่ในผลิตภัณฑ์ ทำให้ร้อยละเอทิลเอสเทอร์และไตรแอสิตินในผลิตภัณฑ์ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีมีค่าสูงสุดตามทฤษฎีคือร้อยละ 80 และ 20 ตามลำดับ

Triglyceride + Ethyl acetate  $\longleftrightarrow$  FAEE + Monoacetylindiglyceride (4.1)

Monoacetylindiglyceride + Ethyl acetate  $\longleftrightarrow$  FAEE + Diacetylmonoglyceride (4.2)

Diacetylmonoglyceride + Ethyl acetate  $\longleftrightarrow$  FAEE + Triacetin (4.3)



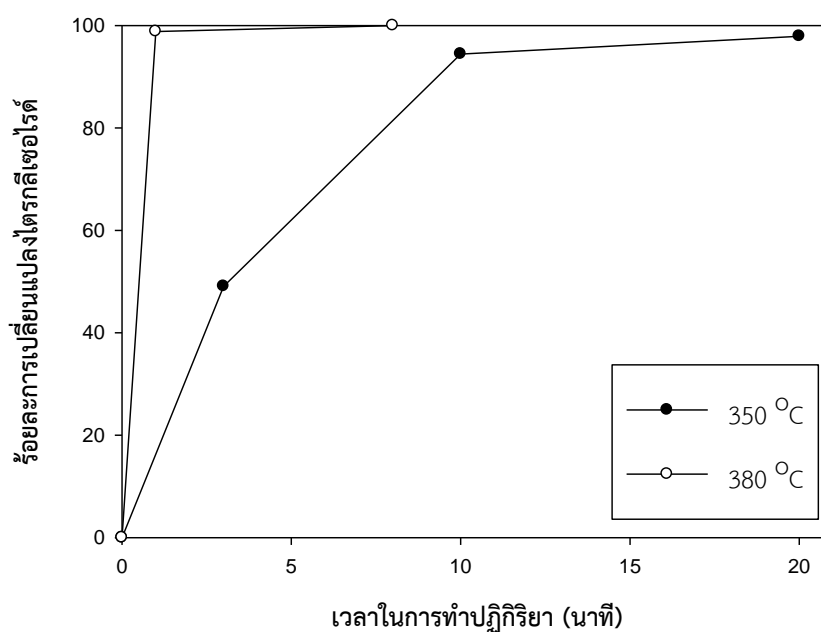
**รูปที่ 4.3** ความสัมพันธ์ของปริมาณองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-8 นาที ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ และอัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสิตเตต่อน้ำมัน 50:1

โดยรูปที่ 4.3 แสดงผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียสและเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-8 นาที พบว่าที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 นาที ไตรกลีเซอไรด์มีการลดลงอย่างรวดเร็วพร้อมกับการเพิ่มขึ้นของสารมัธยันตร์ เอทิลเอสเทอร์และไตรแอสิติน จากนั้นที่เวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น ไตรกลีเซอไรด์ สารมัธยันตร์ เอทิลเอสเทอร์และไตรแอสิตินมีค่าลดลงเนื่องจากเกิดการสลายตัวทางความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tan และคณะ

(2011) ที่ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มที่ภาวะเหนือวิกฤตของเมทิลแอสีเทต พบว่าร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 15 นาที ถึง 60 นาที แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 75 นาที ทำให้ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลมีค่าลดลงเนื่องจากเกิดการสลายตัวของไบโอดีเซล

#### 4.1.3 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

การศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา พิจารณาที่อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสีเทต ต่อน้ำมันสุบุดำ 50:1 ที่อุณหภูมิ 350 และ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-20 นาที ต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล แสดงดังรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5

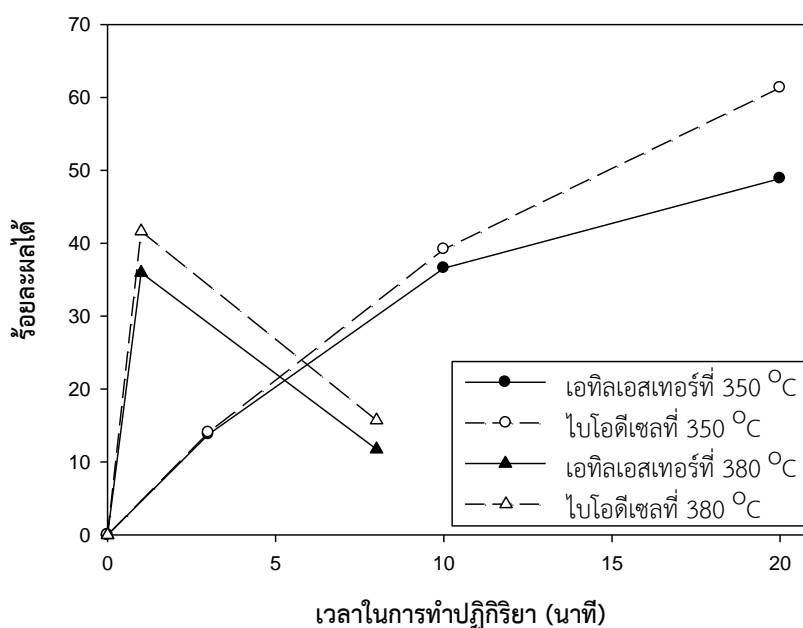


**รูปที่ 4.4** ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ที่อุณหภูมิ 350 และ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสีเทตต่อน้ำมัน 50:1 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 3-20 นาที

จากรูปที่ 4.4 แสดงผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นทำให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนลดลง [สุภาพร ,2007] ส่งผลให้เอทิลแอสีเทตทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ได้มากขึ้น ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์เพิ่มสูงขึ้น โดยที่

อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสจะได้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ 97.91 ในขณะที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 380 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์มีค่าสูงถึง 98.83 โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพียง 1 นาที และเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างสมบูรณ์ (ร้อยละ 100) ที่เวลา 8 นาที ซึ่งพบว่าอุณหภูมิในการทดลองทั้งสองค่ามีการเพิ่มขึ้นของร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์อย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทำปฏิกิริยา จากนั้นจะเริ่มช้าลงและคงที่ โดยจากความชันของกราฟตั้งแต่เวลา 0-3 นาที ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียสมีการเพิ่มขึ้นของร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์สูงกว่าที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดได้เร็วขึ้นตามสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าคงที่อัตราตั้งสมการที่ (4.4)

$$k = Ae^{-Ea/RT} \quad (4.4)$$



**รูปที่ 4.5** ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และร้อยละผลได้ของไอโซโอคเทิลที่อุณหภูมิ 350 และ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสซีเตตต่อน้ำมัน 50:1 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-20 นาที โดยเส้นทึบ (—) แสดงปริมาณร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และเส้นประ (---) แสดงปริมาณร้อยละผลได้ของไอโซโอคเทิล (เอทิลเอสเทอร์+ไตรแอสิติน)

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล (เอทิลเอสเทอร์รวมกับไตรแอสดีน) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 นาที การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจาก 350 องศาเซลเซียส เป็น 380 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และไบโอดีเซลเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้นพบว่าที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสจะได้อ้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และไบโอดีเซลเพิ่มสูงขึ้น โดยมีค่าร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล 39.16 และ 61.31 เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 10 เป็น 20 นาที ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาดังที่กล่าวไว้ข้างต้น อย่างไรก็ตามการใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่สูงเกินไปและระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยานานเกินไป ส่งผลให้ปริมาณร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลมีค่าลดลง ซึ่งเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 1 นาที เป็น 8 นาที ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และไบโอดีเซลมีค่าลดลงเนื่องมาจากเกิดการสลายตัวทางความร้อนของไบโอดีเซล

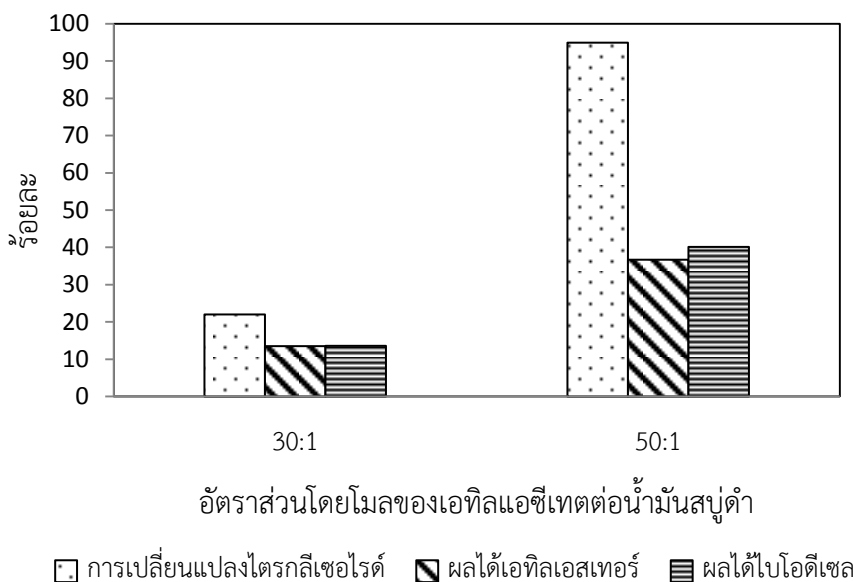
ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Silva และคณะ (2010) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องในเอทานอลที่ภาวะเหนือวิกฤตจากน้ำมันถั่วเหลืองในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์เพิ่มสูงขึ้น งานวิจัยของ Goembira และ Saka (2012) ทำการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากเมล็ดเรพที่ภาวะเหนือวิกฤตของเมทิลแอสซีเตต พบว่าที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 380 องศาเซลเซียสพบการลดลงของผลิตภัณฑ์อย่างชัดเจนจากการสลายตัวทางความร้อนเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น แต่ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสพบเพียงการสลายตัวทางความร้อนของเมทิลไลโนเลเอท (methyl linoleate) และที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสพบการสลายตัวทางความร้อนเพียงเล็กน้อย

จากผลการทดลองข้างต้น พบว่าอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่ภาวะเหนือวิกฤตของเอทิลแอสซีเตตในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร เมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสซีเตตต่อน้ำมันสบู่ดำ 50:1 ความดัน 200 บาร์ คือที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที โดยมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ 97.91 ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ 48.86 และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล 61.31

#### 4.1.4 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสซีเตตต่อน้ำมันสบู่ดำ

การศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสซีเตตต่อน้ำมันสบู่ดำที่ภาวะเหนือวิกฤตของเอทิลแอสซีเตตในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร พิจารณาอัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสซีเตตต่อน้ำมันสบู่ดำ 30:1 และ 50:1 ต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และร้อยละ

ละผลได้ของไบโอดีเซลที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 330 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 นาที ดังรูปที่ 4.6



**รูปที่ 4.6** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และอัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอซีเทตต่อน้ำมันสบู่ดำที่ 30:1 และ 50:1 ที่อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ และเวลาในการทำปฏิกิริยา 8 นาที

ปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอร์ฟิเคชันตามทฤษฎีจะใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทิลแอซีเทตต่อไตรกลีเซอไรด์ 3:1 แต่สำหรับที่ภาวะเหนือวิกฤตนั้นต้องการเอทิลแอซีเทตที่มากเกินไปเพื่อผลักดันของปฏิกิริยาไปข้างหน้าและเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์และเอทิลแอซีเทต จากรูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และอัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอซีเทตต่อ น้ำมันสบู่ดำ พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนของเอทิลแอซีเทตต่อ น้ำมันสบู่ดำจาก 30:1 เป็น 50:1 ส่งผลให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลเพิ่มสูงขึ้น

ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hawash และคณะ (2008) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำที่ภาวะเหนือวิกฤตของเมทานอล พบว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อ น้ำมันสบู่ดำส่งผลให้ได้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น งานวิจัยของ Campanelli และคณะ (2010) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันดอกทานตะวัน และน้ำมันสบู่ดำที่ภาวะเหนือวิกฤตของเมทิลแอซีเทต พบว่าร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วน

โดยโมลของเมทิลแอสซีเทตต่อน้ำมันพืชจาก 25:1 เป็น 42:1 แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลสูงเกินไป เป็น 59:1 พบว่าร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลมีค่าคงที่เท่ากับที่อัตราส่วน 42:1

## 4.2 การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม

### 4.2.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันปาล์ม

วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มตามมาตรฐาน AOAC 969.33, AOAC 991.39 (2005) ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ชนิดและปริมาณของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันปาล์ม

Fatty acid	(C:X)	Wt%
Lauric acid	C12:0	0.4
Myristic acid	C14:0	1.0
Palmitic acid	C16:0	41.3
Palmitoleic acid	C16:1	0.2
Heptadecanoic acid	C17:0	0.1
Stearic acid	C18:0	4.2
Oleic acid	C18:1	41.3
Linoleic acid	C18:2	10.6
Linolenic acid	C18:3	0.2
Arachidic acid	C20:0	0.3
Cis-11-Eicosenoic acid	C20:1	0.1
Lignoceric acid	C24:0	0.1
Unidentified peak		0.2
Total		100
Average Molecular weight		850 g/mol

หมายเหตุ C:X = จำนวนคาร์บอน : จำนวนพันธะคู่

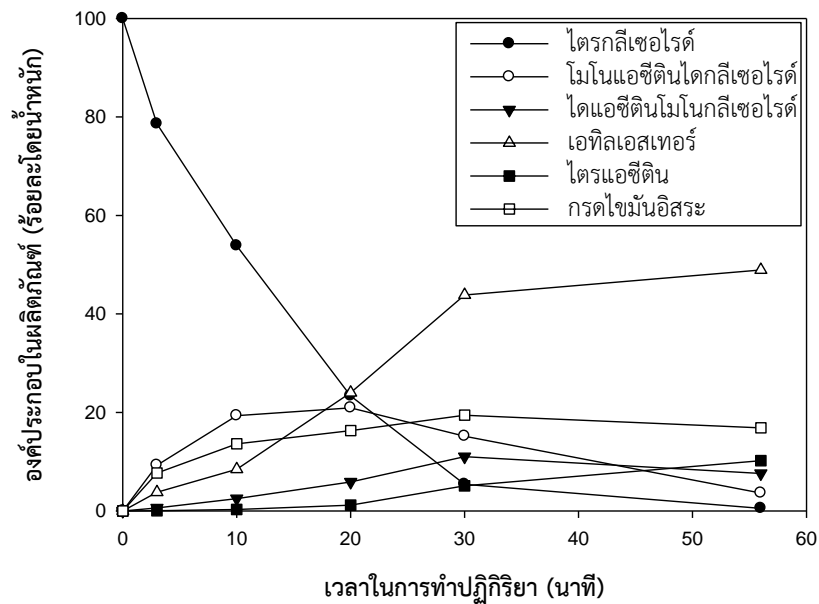


จากตารางที่ 4.2 พบว่า น้ำมันปาล์มมีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ กรดปาล์มติก (C16:0) ร้อยละ 41.3 กรดสเตียริก (C18:0) ร้อยละ 4.2 กรดโอเลอิก (C18:1) ร้อยละ 41.3 และกรดไลโนเลอิก (C18:2) ร้อยละ 10.6 ซึ่งมีปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวทั้งหมดร้อยละ 47.4 และ 52.4 ตามลำดับ การที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงจะทำให้ถูกออกซิไดส์ได้ง่ายและมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ จากข้อมูลที่ได้สามารถคำนวณน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของน้ำมันปาล์มได้เท่ากับ 850 กรัม/โมล นอกจากนี้ได้ทำการวัดค่ากรดในน้ำมันปาล์มเพื่อหาปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมัน น้ำมันพืชที่มีค่ากรดสูงจะมีกรดไขมันอิสระมาก ซึ่งกรดไขมันอิสระสามารถเกิดปฏิกิริยากับเอทิลแอลกอฮอล์ได้ง่ายกว่า ไตรกลีเซอไรด์เนื่องจากขนาดที่เล็กกว่า แต่การที่มีกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชสูงจะให้น้ำมันพืชมีความเป็นกรดสูง ซึ่งสามารถวัดค่าความเป็นกรดได้โดยใช้เครื่อง Auto-Titrator ตามวิธี AOCS Cd 3a-63 พบว่าน้ำมันปาล์มมีค่าความเป็นกรด 0.01 mg of KOH/g of oil หรือไม่มีกรดไขมันอิสระเป็นองค์ประกอบ

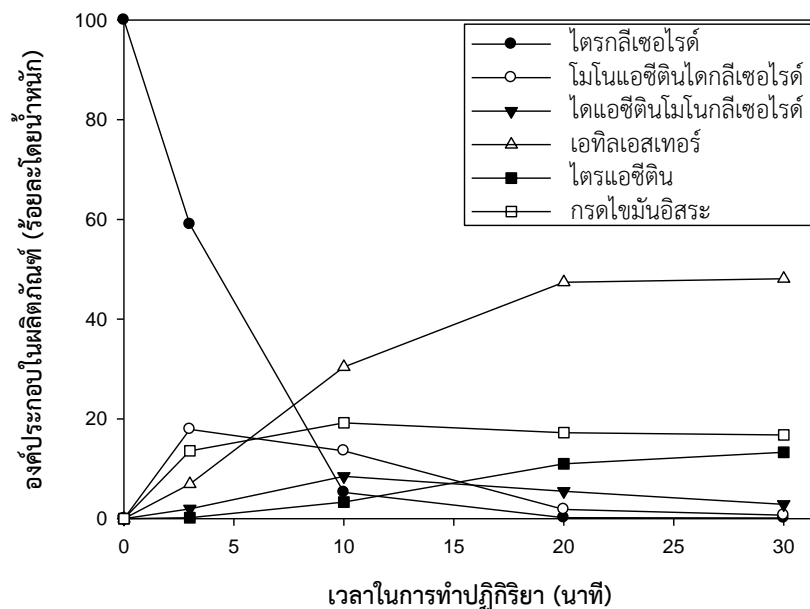
เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มจากตารางที่ 4.2 และองค์ประกอบของน้ำมันสบู่ดำจากตารางที่ 4.1 พบว่าน้ำมันปาล์มมีกรดไขมันอิ่มตัวสูงกว่าน้ำมันสบู่ดำ โดยมีกรดไขมันอิ่มตัวร้อยละ 47.4 ในขณะที่น้ำมันสบู่ดำมีกรดไขมันอิ่มตัวร้อยละ 20.52 ซึ่งการที่น้ำมันปาล์มมีกรดไขมันอิ่มตัวสูงกว่า จะทำให้ถูกออกซิไดส์ได้ยากกว่าและมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่าน้ำมันสบู่ดำ

#### 4.2.2 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา

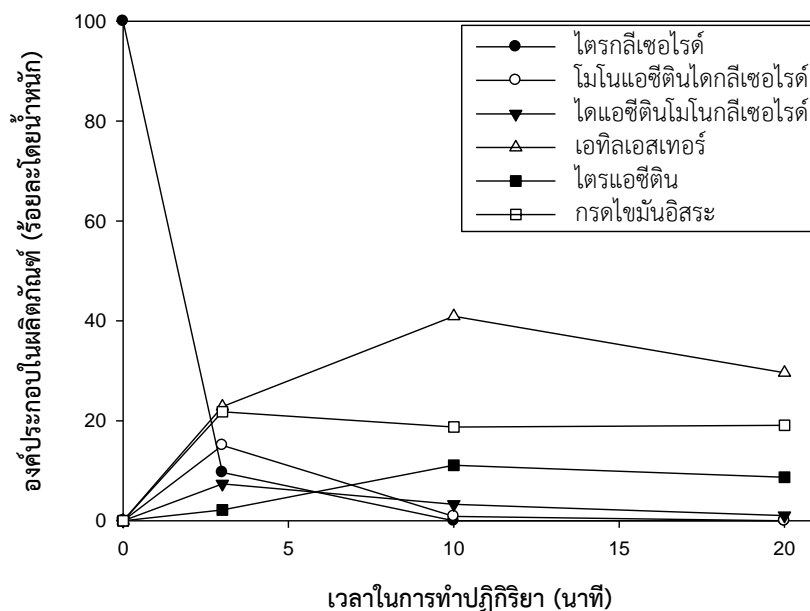
ศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอร์ฟิเคชันจากเอทิลแอลกอฮอล์ที่ภาวะเหนือวิกฤตโดยใช้น้ำมันปาล์มเป็นสารตั้งต้น ที่อุณหภูมิ 330-370 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันปาล์ม 50:1 และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 3-56 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ถึง 4.9



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของปริมาณองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ และเวลาในการทำปฏิกิริยา 3-56 นาที ที่อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ และอัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอซีเตตต่อน้ำมัน 50:1



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของปริมาณองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ และเวลาในการทำปฏิกิริยา 3-30 นาที ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ และอัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอซีเตตต่อน้ำมัน 50:1



**รูปที่ 4.9** ความสัมพันธ์ของปริมาณองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ และเวลาในการทำปฏิกิริยา 3-20 นาที ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ และอัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสิตินต่อน้ำมัน 50:1

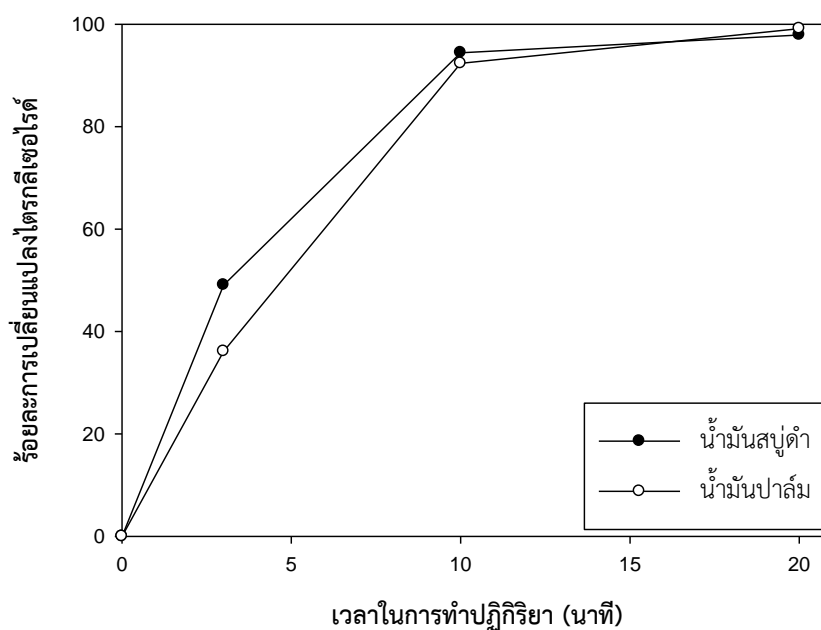
จากผลการทดลองในรูปที่ 4.7-4.9 พบว่าการใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ลดลง เพื่อเปลี่ยนเป็นสารมัธยันต์ (intermediate) ผลิตภัณฑ์เอทิลเอสเทอร์ และไตรแอสิติน สอดคล้องกับการเกิดปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอริฟิเคชัน ซึ่งในขั้นตอนแรกไตรกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับเอทิลแอสิตินเกิดเป็นเอทิลเอสเทอร์ (FAEE) และโมนโนแอสิตินไดกลีเซอไรด์ จากนั้นโมนโนแอสิตินไดกลีเซอไรด์จะทำปฏิกิริยากับเอทิลแอสิตินเกิดเป็นเอทิลเอสเทอร์และไดแอสิตินโมนโนกลีเซอไรด์ สุดท้ายไดแอสิตินโมนโนกลีเซอไรด์จะทำปฏิกิริยากับเอทิลแอสิตินเกิดเป็นเอทิลเอสเทอร์และไตรแอสิติน ทั้งนี้เนื่องจากเอทิลเอสเทอร์และไตรแอสิตินสามารถเกิดเป็นวัฏภาคเดียวกันอยู่ในผลิตภัณฑ์ ทำให้ปริมาณร้อยละเอทิลเอสเทอร์และไตรแอสิตินในผลิตภัณฑ์ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีมีค่าสูงสุดตามทฤษฎีคือ 80 และ 20 ตามลำดับ

โดยเมื่อพิจารณารูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 3-56 นาที ที่อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าไตรกลีเซอไรด์มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วพร้อมกับการเพิ่มขึ้นของเอทิลเอสเทอร์เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 3 นาที ถึง 30 นาที แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที จนถึง 56 นาที พบว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอริฟิเคชันได้ช้าลงโดยพิจารณาจากความชันกราฟ ซึ่งมีปริมาณเอทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นจาก

43.85 เป็น 50.00 เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 30 นาที เป็น 56 นาที ตามลำดับ แสดงถึงปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอร์ฟิเคชันเริ่มเข้าสู่ภาวะสมดุลจึงทำให้ปริมาณเอทิลเอสเทอร์มีค่าเพิ่มขึ้นไม่สูงมากนัก ซึ่งเป็นไปในแนวโน้มเดียวกันกับผลการทดลองในรูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ และเวลาในการทำปฏิกิริยา 3-30 นาที ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส โดยพบว่า การเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้นทำให้ได้ปริมาณเอทิลเอสเทอร์และไตรแอสิตินมากขึ้น เนื่องจากสารตั้งต้นมีเวลาในการสัมผัสกันนานขึ้น ส่งผลให้ไตรกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับเอทิลแอสิตेटเกิดเป็นสารมัธยันตร์และผลิตภัณฑ์มากขึ้น และสารมัธยันตร์เปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้น โดยมีค่าเพิ่มขึ้นที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 1-20 นาที แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 20 เป็น 30 นาที พบว่าปริมาณเอทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยเพิ่มจาก 49.04 เป็น 52.37 ตามลำดับ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอร์ฟิเคชันเริ่มเข้าสู่สมดุลทำให้ปริมาณเอทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

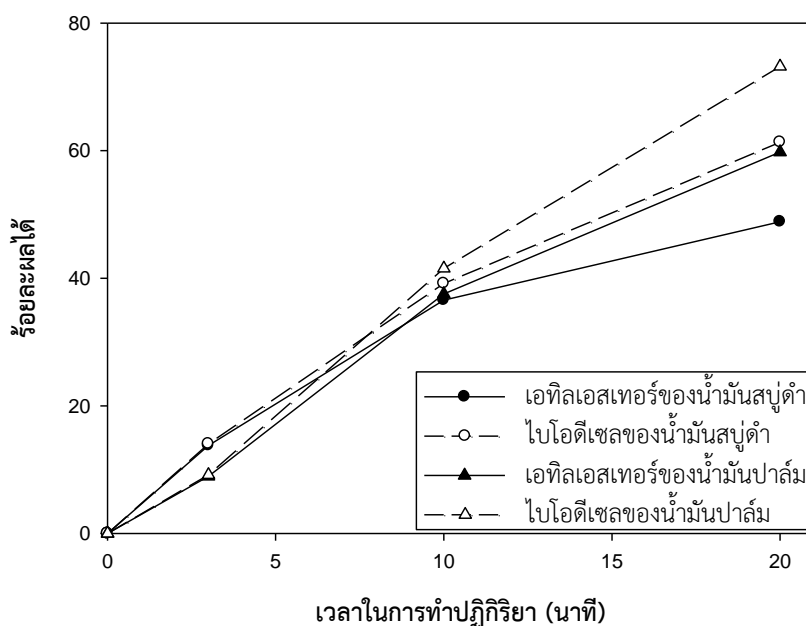
อย่างไรก็ตามการใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานเกินไปส่งผลให้ปริมาณองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง ดังรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ และเวลาในการทำปฏิกิริยา 3-20 นาที ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อทำการเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 10 นาที เป็น 20 นาที ส่งผลให้ปริมาณเอทิลเอสเทอร์และองค์ประกอบต่างๆในผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง เนื่องจากเกิดการสลายตัวของเอทิลเอสเทอร์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tan และคณะ (2011) ที่ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มที่ภาวะเหนือวิกฤตของเมทิลแอสิตेट พบว่าร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 15 นาที ถึง 60 นาที แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 75 นาที ทำให้ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลมีค่าลดลงเนื่องจากเกิดการสลายตัวของไบโอดีเซล และสอดคล้องกับงานวิจัยของ สิริโสภา (2556) ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากน้ำมันปาล์มและเอทิลแอสิตेटที่ภาวะเหนือวิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง พบว่าการเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 30 นาที ถึง 60 นาที ส่งผลให้ร้อยละเอทิลเอสเทอร์มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 60 นาที ถึง 90 นาที พบว่าร้อยละเอทิลเอสเทอร์มีค่าลดลงเนื่องจากเกิดการสลายตัวของกรดไขมันไม่อิ่มตัว

จากผลการทดลองข้างต้นจึงเลือกภาวะที่อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสิตेटต่อน้ำมันปาล์ม 50:1 ความดัน 200 บาร์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 3-20 นาที มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของน้ำมันสบู่ดำที่ภาวะเดียวกัน โดยพิจารณาร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้เอทิลเอสเทอร์ และร้อยละผลได้ไบโอดีเซล (เอทิลเอสเทอร์รวมกับไตรแอสิติน) ดังรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11



**รูปที่ 4.10** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ต่อน้ำมันสบูดำและน้ำมันปาล์ม ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 50:1 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 3-20 นาที

จากรูปที่ 4.10 พบว่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันสบูดำมีการเพิ่มขึ้นสูงกว่าน้ำมันปาล์มที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 นาที โดยสังเกตจากความชันของกราฟ แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้นเป็น 20 นาที พบว่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันสบูดำและน้ำมันปาล์มมีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่า 97.91 และ 99.13 ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงไตรกลีเซอไรด์ในสารตั้งต้นเปลี่ยนแปลงไปมากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยา เนื่องจากการเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาส่งผลให้สารตั้งต้นมีเวลาสัมผัสกันในเครื่องปฏิกรณ์มากขึ้นทำให้ปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอริฟิเคชันเกิดได้ดีขึ้น

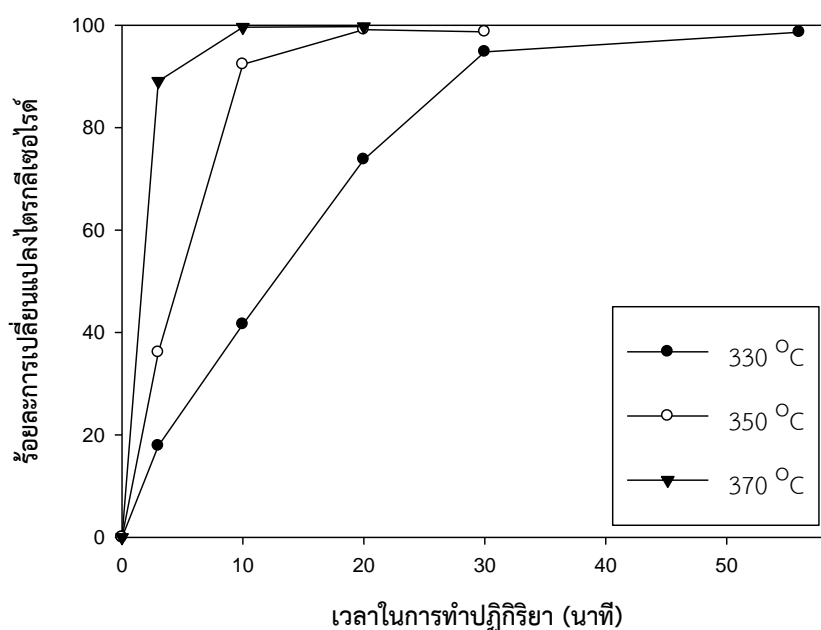


**รูปที่ 4.11** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลต่อ น้ำมันสบูดำและน้ำมันปาล์ม ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอซีเทตต่อน้ำมัน 50:1 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 3-20 นาที โดยเส้นทึบ (—) แสดงปริมาณร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และเส้นประ (---) แสดงปริมาณร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล (เอทิลเอสเทอร์+ไตรแอซีติน)

ร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันสบูดำและน้ำมันปาล์มที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลมีค่าแตกต่างกันมาก จากรูปที่ 4.11 พบว่าเมื่อใช้น้ำมันปาล์มเป็นสารตั้งต้นจะได้ปริมาณร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลสูงกว่าน้ำมันสบูดำที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที โดยมีปริมาณร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล 59.77 และ 73.19 ตามลำดับ ในขณะที่น้ำมันสบูดำได้เพียง 48.86 และ 61.31 ตามลำดับ เนื่องจากความแตกต่างของปริมาณกรดไขมันในน้ำมันต่างชนิดกัน โดยน้ำมันปาล์มมีกรดไขมันอิ่มตัวสูงกว่าน้ำมันสบูดำ ส่งผลให้น้ำมันปาล์มมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่าน้ำมันสบูดำ ดังนั้นการเลือกใช้น้ำมันปาล์มเป็นสารตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซลที่ภาวะเหนือวิกฤตของเอทิลแอซีเทตในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครส่งผลให้ได้ปริมาณร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลสูงกว่าน้ำมันสบูดำ

#### 4.2.3 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

การศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา พิจารณาที่อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอซีเตต ต่อน้ำมันปาล์ม 50:1 ความดัน 200 บาร์ ที่อุณหภูมิ 330 350 และ 370 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 3-56 นาที ต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล แสดงดังรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13

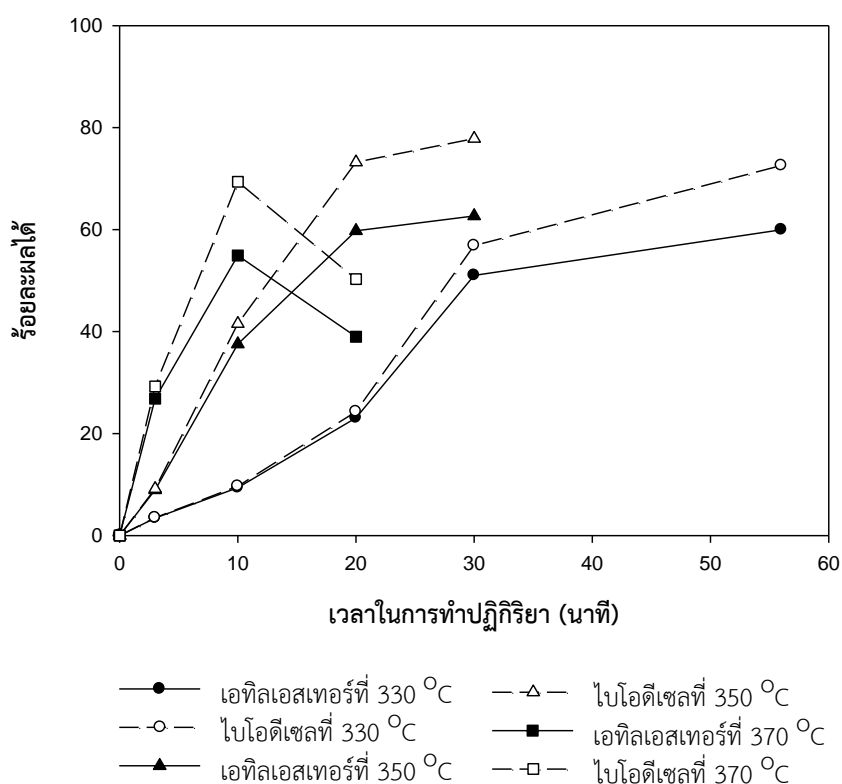


**รูปที่ 4.12** ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ที่อุณหภูมิ 330 350 และ 370 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอซีเตตต่อน้ำมัน 50:1 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 3-56 นาที

จากรูปที่ 4.12 แสดงผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นทำให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการแพร่ของเอทิลแอซีเตตดียิ่งขึ้น เอทิลแอซีเตตเข้าทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ได้มากขึ้น ร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์เพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ที่เวลา 10 นาที พบว่าที่อุณหภูมิ 330 350 และ 370 มีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ 41.60 92.36 และ 99.62 ตามลำดับ แสดงถึงการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์เพิ่มสูงขึ้น

อย่างไรก็ตามร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ที่อุณหภูมิทั้งสามค่ามีค่าเกิน 95% เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

อุณหภูมิในการทดลองทั้งสามค่ามีการเพิ่มขึ้นของร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์อย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทำปฏิกิริยา จากนั้นจะเริ่มช้าลงและคงที่ โดยจากความชันของกราฟ ตั้งแต่เวลา 0-3 นาที ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียสมีการเพิ่มขึ้นของร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์สูงกว่าที่อุณหภูมิ 330 และ 350 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้โมเลกุลของสารในระบบมีพลังงานจลน์สูงและมีการชนกันมากขึ้น จึงเกิดปฏิกิริยาเคมีได้เร็วขึ้นตามสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าคงที่อัตราดังสมการที่ (4.4)



**รูปที่ 4.13** ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และร้อยละผลได้ของไอโอดีเซลที่อุณหภูมิ 330 350 และ 370 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอซีเทตต่อน้ำมัน 50:1 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 3-56 นาที โดยเส้นทึบ (—) แสดงปริมาณร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และเส้นประ (---) แสดงปริมาณร้อยละผลได้ของไอโอดีเซล (เอทิลเอสเทอร์+ไตรแอซีดีน)



เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล (เอทิลเอสเทอร์รวมกับไตรแอสีติน) ดังแสดงในรูปที่ 4.13 พบว่า ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที การเพิ่มอุณหภูมิจาก 330 องศาเซลเซียส เป็น 350 และ 370 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และไบโอดีเซลเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาดังที่กล่าวไว้ข้างต้น อย่างไรก็ตามการใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่สูงเกินไปและระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยานานเกินไป ส่งผลให้ปริมาณร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลมีค่าลดลง โดยเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 10 นาที เป็น 20 นาที ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และไบโอดีเซลมีค่าลดลง เนื่องจากเกิดการสลายตัวทางความร้อนของไบโอดีเซล

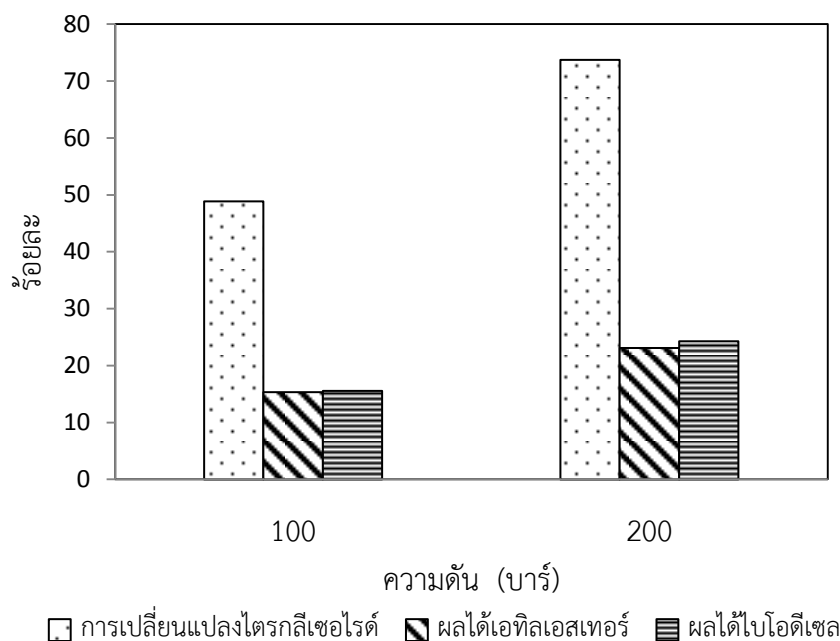
ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Silva และคณะ (2010) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องในเอทานอลที่ภาวะเหนือวิกฤตจากน้ำมันถั่วเหลืองในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์เพิ่มสูงขึ้น งานวิจัยของ Goembira และ Saka (2012) ทำการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากเมล็ดเรพที่ภาวะเหนือวิกฤตของเมทิลแอสีเตต พบว่าที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 380 องศาเซลเซียสพบการลดลงของผลิตภัณฑ์อย่างชัดเจนจากการสลายตัวทางความร้อนเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น แต่ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสพบเพียงการสลายตัวทางความร้อนของเมทิลไลโนเลเอท (methyl linoleate) และที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสพบการสลายตัวทางความร้อนเพียงเล็กน้อย

จากผลการทดลองข้างต้น พบว่าอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มที่ภาวะเหนือวิกฤตของเอทิลแอสีเตตในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร เมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสีเตตต่อน้ำมันปาล์ม 50:1 ความดัน 200 บาร์ คือที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที โดยมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ 99.13 ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ 59.77 และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล 73.19 และที่เวลา 30 นาที มีร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ 98.71 ปริมาณร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ 62.68 และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล 77.84

#### 4.2.4 ผลของความดันในการทำปฏิกิริยา

ความดันในการทำปฏิกิริยาเป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญต่อปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอริฟิเคชันที่ภาวะเหนือวิกฤตของเอทิลแอสีเตต โดยในงานวิจัยนี้ศึกษาผลของความดันต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล พิจารณาที่อัตราส่วน

โดยโมลของเอทิลแอซีเตตต่อน้ำมันปาล์ม 50:1 อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที ที่ความดัน 100 และ 200 บาร์



**รูปที่ 4.14** ความสัมพันธ์ระหว่างความดันในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ที่ความดันในการทำปฏิกิริยา 100 และ 200 บาร์ อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอซีเตตต่อน้ำมัน 50:1 อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที

จากรูปที่ 4.14 แสดงผลของความดันในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล พบว่าการเพิ่มความดันจาก 100 เป็น 200 บาร์ ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลเพิ่มสูงขึ้น โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม 48.88, 15.35 และ 15.57 เป็น 73.75, 23.09 และ 24.30 ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มความดันทำให้โมเลกุลของสารตั้งต้นมีโอกาสชนกัน และเกิดปฏิกิริยาเคมีได้มากขึ้น

ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Silva และคณะ (2010) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองที่ภาวะเหนือวิกฤตของเอทานอล พบว่าเมื่อเพิ่มความดันส่งผลให้ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นตามลำดับ งานวิจัยของ Campanelli และคณะ (2010) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันทานตะวัน และน้ำมันสบู่ดำที่ภาวะเหนือวิกฤตของเมทิลแอซีเตต พบว่าการเพิ่มความดันส่งผลให้ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล

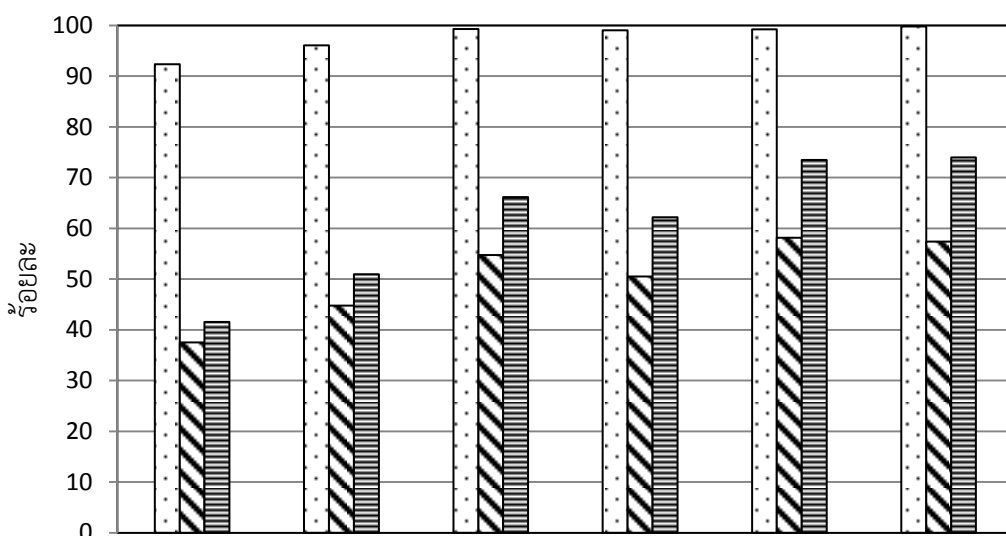
(เมทิลเอสเทอร์ร่วมกับไตรเอซีดีน) เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความดันจาก 100, 150 และ 200 บาร์ ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มความดันเป็น 300 บาร์ พบว่าร้อยละผลได้ไบโอดีเซลมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ดังนั้นความดันที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลที่ภาวะเหนือวิกฤตของเมทิลเอซีเทตคือ 200 บาร์

#### 4.3 ผลของสารเติมแต่งต่อการผลิตไบโอดีเซล

ศึกษาการพัฒนาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ภาวะเหนือวิกฤตของเอทิลเอซีเทตในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร โดยการเติมสารเติมแต่งในสารตั้งต้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์และเอทิลเอซีเทตให้ได้ผลิตภัณฑ์มากขึ้น ซึ่งจากงานวิจัยของ Campanelli และคณะ (2010) พบว่าการเติมกรดเอซีติกเพื่อเป็นสารเติมแต่งในปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอริฟิเคชันระหว่างน้ำมันสุปุดำและเมทิลเอซีเทตปริมาณร้อยละโดนน้ำหนักของน้ำมัน 1-10 ส่งผลต่อร้อยละไบโอดีเซล โดยมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณกรดเอซีติกเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาไม่เกิน 50 นาที นอกจากนี้ งานวิจัยของ Goembira และ Saka (2014) ได้ศึกษาการผสมกรดเอซีติกและน้ำเพื่อเป็นสารเติมแต่งในการผลิตไบโอดีเซลจากเมล็ดเรพที่ภาวะเหนือวิกฤตของเมทิลเอซีเทต ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมัน 10 ประกอบด้วยกรดเอซีติกและน้ำที่ความเข้มข้นร้อยละโดยน้ำหนัก 26, 51 และ 76 ซึ่งพบว่าการผสมกรดเอซีติกและน้ำเพื่อเป็นสารเติมแต่งทำให้ร้อยละผลได้เมทิลเอสเทอร์สูงกว่ากรณีที่ไม่ผสมสารเติมแต่ง และได้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์สูงสุดเมื่อใช้กรดเอซีติกและน้ำที่มีความเข้มข้นร้อยละ 26

ในงานวิจัยนี้ศึกษาผลของสารเติมแต่ง ซึ่งได้แก่ กรดเอซีติก น้ำ และกรดเอซีติกร่วมกับน้ำที่ความเข้มข้นร้อยละ 25, 50 และ 75 ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม ที่อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลเอซีเทตต่อน้ำมันปาล์ม 50:1 ความดัน 200 บาร์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.15

จากรูปที่ 4.15 พบว่าการผสมกรดเอซีติก น้ำ และกรดเอซีติกร่วมกับน้ำเป็นสารเติมแต่งทำให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ไม่ผสมสารเติมแต่ง ซึ่งการเติมสารเติมแต่งที่เหมาะสมได้แก่การผสมกรดเอซีติกและน้ำที่ความเข้มข้นของกรดเอซีติกร้อยละ 25 โดยมีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ 99.26 ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ 58.13 และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล 73.46 นอกจากนี้การผสมน้ำเป็นสารเติมแต่งเพียงชนิดเดียวส่งผลให้ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์สูงเช่นกัน โดยมีค่าร้อยละ 57.36 และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล 73.98 ในขณะที่ร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์มีค่าสูงคือ 99.78



สารเติมแต่ง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	แอสติติก	0	100	75	50	25	0
น้ำ	น้ำ	0	0	25	50	75	100

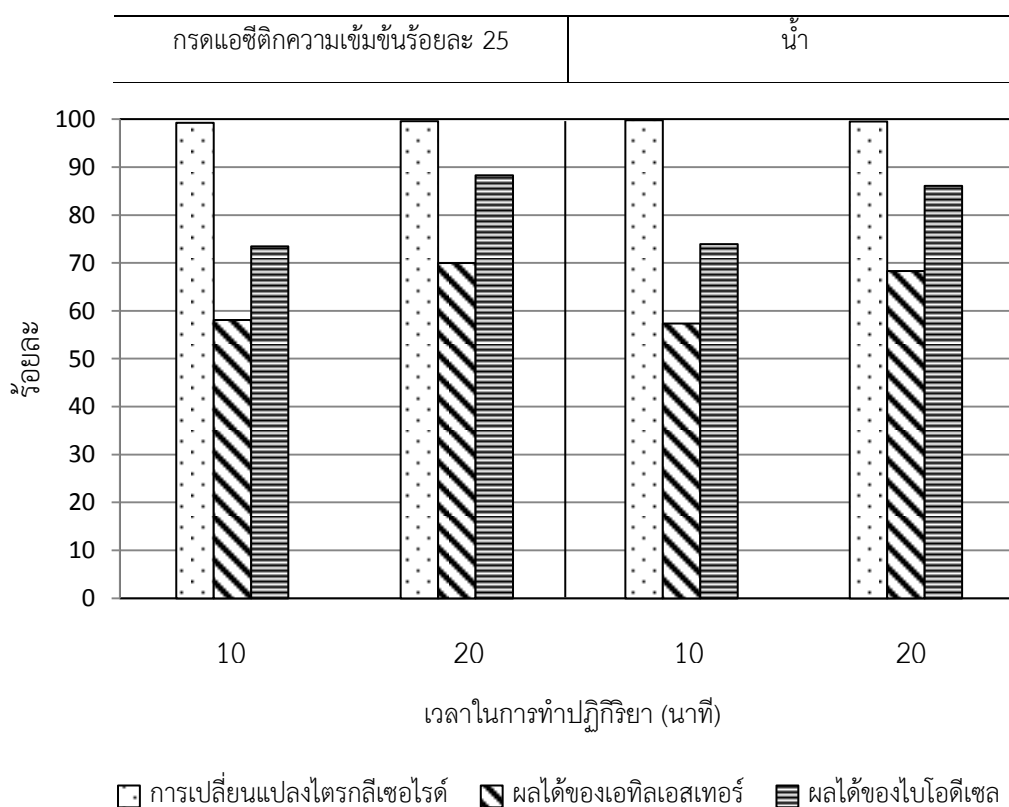
การเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์
  ผลได้ของเอทิลเอสเทอร์
  ผลได้ของไอโซโอคเทน

**รูปที่ 4.15** ผลของสารเติมแต่งต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และร้อยละผลได้ของไอโซโอคเทน ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ อัตราส่วนโมลของเอทิลแอสติเตตต่อน้ำมัน 50:1 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที

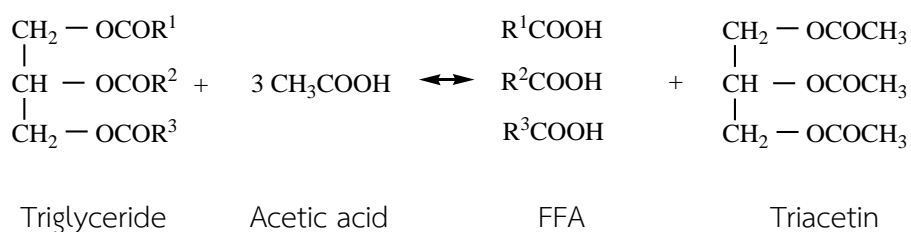
จากการทดลองข้างต้นจึงทำการเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาเมื่อใช้สารเติมแต่งร่วมในการผลิตไอโซโอคเทนเพื่อให้ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และไอโซโอคเทนเพิ่มสูงขึ้นดังรูปที่ 4.16

จากรูปที่ 4.16 พบว่าการเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาส่งผลให้ร้อยละผลได้เอทิลเอสเทอร์และร้อยละผลได้ไอโซโอคเทนเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบการใช้กรดแอสติติกรวมกับน้ำที่ความเข้มข้นของกรดแอสติติกร้อยละ 25 และการใช้น้ำเป็นสารเติมแต่งในการผลิตไอโซโอคเทน ซึ่งจากผลการทดลองการใช้กรดแอสติติกความเข้มข้นร้อยละ 25 ส่งผลให้มีค่าร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ 70.04 และร้อยละผลได้ของไอโซโอคเทน 88.32 ซึ่งสูงกว่าการใช้น้ำที่มีค่าร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และไอโซโอคเทน 68.31 และ 86.14 ตามลำดับ เนื่องจากการใช้กรดแอสติติกเป็นสารเติมแต่งในการผลิตไอโซโอคเทนจะทำปฏิกิริยา Acidolysis กับไตรกลีเซอไรด์ เกิดเป็นกรดไขมันอิสระ (FFA) และไตรแอสติน ซึ่งกรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้นนี้สามารถทำปฏิกิริยากับเอทิลแอสติเตตเกิดเป็นเอทิลเอสเทอร์ได้รวดเร็วกว่าไตรกลีเซอไรด์เนื่องจากขนาดโมเลกุลที่เล็กกว่าไตรกลีเซอไรด์ แสดงปฏิกิริยาในรูปที่ 4.17 เช่นเดียวกับการเติมน้ำลงในสารตั้งต้นในการผลิตไอโซโอคเทน เพื่อทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

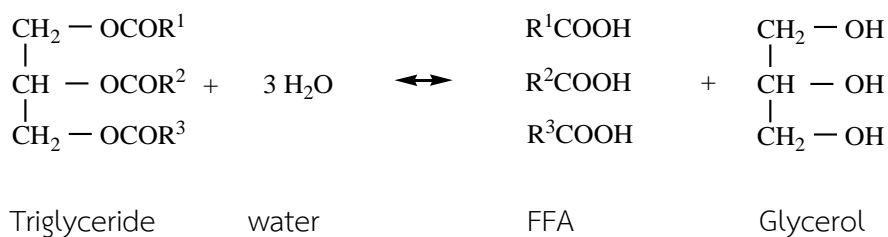
(Hydrolysis) กับไตรกลีเซอไรด์ โดยจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดไขมันอิสระและกลีเซอรอล ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ซึ่งกรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับเอทิลแอลกอฮอล์ได้รวดเร็วกว่าไตรกลีเซอไรด์เนื่องจากขนาดที่เล็กกว่าของกรดไขมันอิสระ ส่งผลให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์เอทิลเอสเทอร์สูงกว่ากรณีที่ไม่ใช้สารเติมแต่งในการผลิตไบโอดีเซล ดังแสดงในรูปที่ 4.19



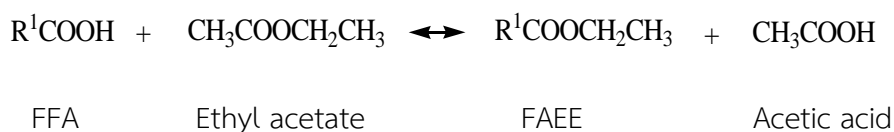
**รูปที่ 4.16** ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลเมื่อใช้กรดแอสติคร่วมกับน้ำที่ความเข้มข้นของกรดแอสติกร้อยละ 25 และการใช้น้ำเป็นสารเติมแต่งในการผลิตไบโอดีเซล ที่อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 50:1 อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 และ 20 นาที



**รูปที่ 4.17** การเกิดปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์และกรดแอสติค

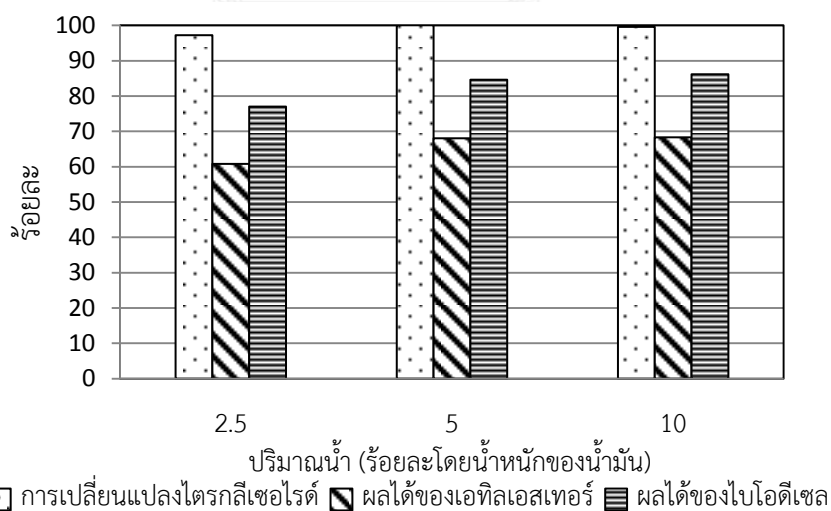


รูปที่ 4.18 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์และน้ำ



รูปที่ 4.19 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันอิสระและเอทิลแอสีเทต

เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำเป็นสารเติมแต่งที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลในปริมาณร้อยละ 2.5, 5 และ 10 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ที่อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสีเทตต่อน้ำมันปาล์ม 50:1 ความดัน 200 บาร์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ปริมาณน้ำที่ใช้เป็นสารเติมแต่งในการผลิตไบโอดีเซลต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสีเทตต่อน้ำมัน 50:1 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที

จากรูปที่ 4.20 พบว่าการเพิ่มปริมาณน้ำส่งผลให้ได้ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และไบโอดีเซลสูงขึ้น โดยร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นจาก 84.61 เป็น 86.14 เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำจากร้อยละ 5 เป็น 10 โดยน้ำหนักของน้ำมันตามลำดับ

#### 4.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยที่ผ่านมา

ในงานวิจัยนี้เป็นการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ภาวะเหนือวิกฤตของเอทิลแอสีเทตในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร จากการทดลองข้างต้นพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลคือที่อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสีเทตต่อน้ำมันปาล์ม 50:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที และใช้กรดแอสีติกรวมกับน้ำที่ความเข้มข้นของกรดแอสีติกร้อยละ 25 เป็นสารเติมแต่ง ซึ่งจะได้ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ 70.04 และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล 88.32 เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่างานวิจัยนี้ใช้เอทิลแอสีเทตในการทำปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอริฟิเคชัน แตกต่างจากงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ใช้เมทิลแอสีเทตซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าเนื่องจากขนาดโมเลกุลของเมทิลแอสีเทตมีขนาดเล็กกว่าเอทิลแอสีเทต อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้มีค่าร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลสูงกว่างานวิจัยอื่นเมื่อเปรียบเทียบที่ภาวะในการทดลองใกล้เคียงกัน เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องปฏิกรณ์ไมโคร ซึ่งเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางหรือช่องในการทำปฏิกิริยาขนาดเล็ก ส่งผลให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสารของสารตั้งต้นเกิดได้ดี ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ จึงทำให้ในงานวิจัยนี้มีร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลมีค่าสูง

**ตารางที่ 4.3** เปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยที่ผ่านมา

Author	Oil	Condition	Time (min)	%FAEE	%Biodiesel
Saka, 2009	Rapeseed oil/ Methyl acetate	42:1, 350°C, 200 bar	20	40	40
Campanelli, 2010	Jatropha oil/ Methyl acetate, acetic	42:1, 345°C, 200 bar	20	47	57
Tan, 2011	Purified palm oil/ Methyl acetate	30:1, 400°C, 220 bar	30	N/A	55
Daengsanun, 2013	Palm olein oil/ Ethyl acetate	40:1, 350°C, 200 bar	60	38	N/A
Komintarachat, 2015	Refined palm oil/ Ethyl acetate	30:1, 350°C, 160 bar	24.2	N/A	70
This work, 2015	Refined palm oil/ Ethyl acetate, acetic acid and water	50:1, 350°C, 200 bar	20	70.04	88.32



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากน้ำมันพืชสองชนิด ได้แก่ น้ำมันสบูดำและน้ำมันปาล์มที่ภาวะเหนือวิกฤตของเอทิลแอลกอฮอล์ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร โดยศึกษาปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องในการผลิต ประกอบด้วยผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา ผลของอุณหภูมิ ผลของความดัน ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันพืช และผลของสารเติมแต่งต่อการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 จากการศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา พบว่าการเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้นส่งผลให้ ร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาส่งผลให้สารตั้งต้นมีเวลาทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์นานขึ้นจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาเป็นผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานเกินไปจะทำให้ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลมีค่าลดลงเนื่องจากเกิดการสลายตัวทางความร้อน

5.1.2 จากการศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาส่งผลให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้โมเลกุลของสารในระบบมีพลังงานจลน์สูงและมีการชนกันมากขึ้นตามสมการของอาร์เรเนียส ซึ่งในงานวิจัยนี้พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิจาก 330 เป็น 350 องศาเซลเซียส ทำให้ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น แต่เมื่อใช้อุณหภูมิสูงกว่า 350 องศาเซลเซียสพบการสลายตัวทางความร้อนของผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และไบโอดีเซลลดลง

5.1.3 จากการศึกษาผลของความดันในการทำปฏิกิริยา พบว่าการเพิ่มความดันส่งผลให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความดันทำให้โมเลกุลของสารตั้งต้นมีโอกาสชนกันและเกิดปฏิกิริยาเคมีได้มากขึ้น

5.1.4 จากการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันพืช พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันพืชทำให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละ

ผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเอทิลแอสซีเทตส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์และเอทิลแอสซีเทตเพิ่มสูงขึ้น

5.1.5 จากการศึกษาผลของสารเติมแต่งต่อการผลิตไบโอดีเซล พบว่าการผสมสารเติมแต่ง ได้แก่ กรดแอสติก น้ำ และกรดแอสติกกรวมกับน้ำส่งผลให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลเพิ่มสูงขึ้น โดยมีค่าสูงเมื่อใช้กรดแอสติกกรวมกับน้ำ เนื่องจากกรดแอสติกจะทำปฏิกิริยา Acidolysis กับไตรกลีเซอไรด์ และน้ำจะทำปฏิกิริยา Hydrolysis กับไตรกลีเซอไรด์เกิดเป็นกรดไขมันอิสระซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับเอทิลแอสซีเทตได้รวดเร็วกว่าไตรกลีเซอไรด์เกิดเป็นผลิตภัณฑ์เอทิลเอสเทอร์มากขึ้น

5.1.6 ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ภาวะเหนือวิกฤตของเอทิลแอสซีเทตในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครคือ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 200 บาร์ อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสซีเทตต่อน้ำมันพืช 50:1 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที โดยมีค่าร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล 61.3 และ 73.19 เมื่อใช้น้ำมันสบู่ดำและน้ำมันปาล์มเป็นสารตั้งต้นตามลำดับ ซึ่งหากมีการใช้สารเติมแต่งด้วยจะได้ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล 88.32 เมื่อใช้น้ำมันปาล์มเป็นสารตั้งต้น

5.1.7 การเปรียบเทียบน้ำมันพืชสองชนิดได้แก่น้ำมันสบู่ดำและน้ำมันปาล์มในการผลิตไบโอดีเซลที่ภาวะเหนือวิกฤตของเอทิลแอสซีเทตในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร พบว่าน้ำมันปาล์มมีกรดไขมันอิ่มตัวสูงกว่าน้ำมันสบู่ดำ ส่งผลให้น้ำมันปาล์มมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่าน้ำมันสบู่ดำ ดังนั้นการเลือกใช้น้ำมันปาล์มเป็นสารตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซลที่ภาวะเหนือวิกฤตของเอทิลแอสซีเทตในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครส่งผลให้ได้ปริมาณร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลสูงกว่าน้ำมันสบู่ดำ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของกรดไขมันในน้ำมันพืชต่อการผลิตไบโอดีเซล พบว่าการใช้น้ำมันพืชที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงส่งผลให้มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ จึงเกิดการสลายตัวได้ง่าย ดังนั้นจึงควรทำให้น้ำมันที่ใช้เป็นสารตั้งต้นมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวน้อยที่สุด เช่น การทำไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation) ก่อนนำน้ำมันมาใช้เป็นสารตั้งต้น

5.2.2 เนื่องจากงานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลทางด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์เท่านั้น ซึ่งในทางปฏิบัติจริงข้อมูลที่ต้องนำมาพิจารณาร่วมด้วยคือข้อมูลทางด้านเศรษฐศาสตร์ ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอดีเซลในเอทิลแอสซีเทตที่ภาวะเหนือวิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

รายการอ้างอิง



## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

กระทรวงพลังงาน. แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579, กันยายน 2558.

กัญญา บุญเกียรติ. การคำนวณขั้นต้นในวิชาวิศวกรรมเคมี. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550, หน้า 521-525

พิสมัย เจนวนิชปัญจกุลและลลิตา อัตนโธ. รอบรู้...เรื่องราว ไบโอดีเซล. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.), 2552.

ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ. เทอร์โมไดนามิกส์วิศวกรรมเคมี. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552, หน้า 12-30.

รักษ์ พุกษชาติ. การปลูกและการพัฒนาสบู่ดำเพื่อทดแทนน้ำมันดีเซล. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์น็อน บู้ค มีเดีย, 2549, หน้า 13-24.

ลลิตา อัตนโธ. การพัฒนาปฏิกรณ์สมรรถนะสูงสำหรับผลิตไบโอดีเซลแบบไม่ใช้สารเร่งปฏิกิริยา. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2558, หน้า 19

ศศิเกษม ทองยงค์และพรรณิ เดชกำแหง. เคมีอาหารเบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, 2530, หน้า 117-120

สำนักวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. กว่าจะได้มาเป็นน้ำมันไบโอดีเซลสายพันธุ์ ม.อ. 2554, หน้า 31-49.

สิริโสภา แต่งสนั่น. การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เอทิลแอลกอฮอล์สถานะเหนือวิกฤตในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556.

สุภาพร สุทธิภักดี. ผลของตัวทำละลายร่วมต่อการผลิตไบโอดีเซลในเมทานอลสถานะเหนือวิกฤต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.

### ภาษาอังกฤษ

- Ang, G.T., Tan, K.T., Lee, K.T. Recent development and economic analysis of glycerol-free processes via supercritical fluid transesterification for biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 31 (2014): 61-70.
- Aransiola, E.F., Ojumu, T.V., Oyekola, O.O., Madzimbamuto, T.F., Ikhu-Omoregbe, D.I.O. A review of current technology for biodiesel production: State of the art. *Biomass and Bioenergy*. 61 (2014): 276-297.
- Campanelli, P., Banchemo, M., Manna, L. Synthesis of biodiesel from edible, non-edible and waste cooking oils via supercritical methyl acetate transesterification. *Fuel*. 89 (2010): 3675-3682.
- Casas, A., Ruiz, J.R., Ramos, M.J., Perez, A. Effects of triacetin on biodiesel quality. *Energy Fuels*. 24 (2010): 4481-4489.
- Casas, A., Ramos, M.J., Perez, A. New trends in biodiesel production: Chemical interesterification of sunflower oil with methyl acetate. *Biomass and Bioenergy*. 35 (2011): 1702-1709.
- Dona, G., Cardozo-Filo, L., Silva, C., Castilhos, F. Biodiesel production using supercritical methyl acetate in a tubular packed bed reactor. *Fuel Processing Technology*. 106 (2013): 605-610.
- Goembira, F., Matsuura, K., Saka, S. Biodiesel production from rapeseed oil by various supercritical carboxylate esters. *Fuel*. 97 (2012): 373-378.
- Goembira, F., and Saka, S. Effect of additives to supercritical methyl acetate on biodiesel production. *Fuel Processing Technology*. 125 (2014): 114-118.
- Hawash, S., Kamal, N., Zaher, F., Kenawi, O., Diwani, G.E. Biodiesel fuel from *Jatropha* oil via non-catalytic supercritical methanol transesterification. *Fuel*. 88 (2009): 579-582.
- Himmelblau, D.M., and Riggs, J.B. *Basic principles and calculations in chemical engineering*. 2012, page 845-846.

- Imahara, H., Minami, E., Hari, S., Saka, S. Thermal stability of biodiesel in supercritical methanol. *Fuel*. 87 (2008): 1-6.
- Komintarachat, C., Sawangkeaw, R., Ngamprasertsith, S. Continuous production of palm biofuel under supercritical ethyl acetate. *Energy Conversion and Management*. 93 (2015): 332-338.
- Lee, J.S., and Saka, S. Biodiesel production by heterogeneous catalysts and supercritical technologies. *Bioresource Technology*. 101 (2010): 7191-7200.
- Miesiac, I., Rogalinski, A., Jozwiak, P. Transesterification of triglycerides with ethyl acetate. *Fuel*. 105 (2013): 169-175.
- Niza, N.M., Tan, K.T., Lee, K.T., Ahmad, Z. Biodiesel production by non-catalytic supercritical methyl acetate: Thermal stability study. *Applied Energy*. 101 (2012): 198-202.
- Niza, N.M., Tan, K.T., Lee, K.T., Ahmad, Z. Influence of impurities on biodiesel production from *Jatropha curcas* L. by supercritical methyl acetate process. *The Journal of Supercritical Fluids*. 79 (2013): 73-75.
- Saka, S., and Isayama, Y. A new process for catalyst-free production of biodiesel using supercritical methyl acetate. *Fuel*. 88 (2009): 1307-1313.
- Šalić, A., and Zelić, B. Microreactors – Portable factories for biodiesel fuel production. *Gomabn*. 50 (2011): 85-110.
- Silva, C.D., Castilhos, F.D., Oliveira, J.V., Filho, L.C. Continuous production of soybean biodiesel with compressed ethanol in a microtube reactor. *Fuel Processing Technology*. 91 (2010): 1274-1281.
- Tan, K.T., Lee, K.T., Mohamed, A.R. Prospects of non-catalytic supercritical methyl acetate process in biodiesel production. *Fuel Processing Technology*. 92 (2011): 1905-1909.
- Usai, E.M., Gualdi, E., Solinas, V., Battistel, E. Simultaneous enzymatic synthesis of FAME and triacetyl glycerol from triglycerides and methyl acetate. *Bioresource Technology*. 101 (2010): 7707-7712.



## ภาคผนวก ก

### การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์

วิเคราะห์ปริมาณเอทิลเอสเทอร์และองค์ประกอบอื่นๆในผลิตภัณฑ์ซึ่งประกอบด้วย ไตรกลีเซอไรด์ โมโนแอสิตินไดกลีเซอไรด์ ไดแอสิตินโมโนกลีเซอไรด์ กรดไขมันอิสระ และไตรแอสิติน ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatograph) โดยวิเคราะห์โรรมาโทแกรมที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์จาก Retention time แสดงถึงตำแหน่งของสารแต่ละชนิด และพื้นที่ใต้กราฟของสารแต่ละชนิดเพื่อหาปริมาณและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

#### 1. การวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์

- 1.1 เตรียมตัวอย่างประมาณ 0.02 กรัม ใส่ขวดเตรียมสาร (vial) ขนาด 10 มิลลิลิตร
- 1.2 เติมสารละลายมาตรฐาน ดังนี้ butanetriol, tricaprin และ MSTFA
- 1.3 เติม Heptane 8 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน และถ่ายสารใส่ขวดเตรียมสารขนาด 2 มิลลิลิตร
- 1.4 วิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี
- 1.5 นำผลของพื้นที่ใต้พีคของสารตัวอย่างและสารมาตรฐานไปเทียบกับ Calibration curve ของสารแต่ละชนิด

#### 2. การคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์

จากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีสามารถหาปริมาณไตรกลีเซอไรด์ได้แล้วสามารถคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ได้ดังนี้

$$\text{ค่าการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์} = \frac{\text{น้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์ที่ทำปฏิกิริยา}}{\text{น้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์ตั้งต้น}} \times 100$$

#### 3. การคำนวณร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์

จากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีสามารถหาปริมาณเอทิลเอสเทอร์ได้แล้วสามารถคำนวณร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ได้ดังนี้



$$\text{ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์} = \frac{\text{น้ำหนักของเอทิลเอสเทอร์ที่ได้}}{\text{น้ำหนักของน้ำมันพืชตั้งต้น}} \times 100$$


สำหรับร้อยละผลได้ของไปโอดีเซล (เอทิลเอสเทอร์ร่วมกับไตรแอสดีน) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ร้อยละผลได้ของไปโอดีเซล} = \frac{\text{น้ำหนักของเอทิลเอสเทอร์ที่ได้} + \text{น้ำหนักของไตรแอสดีน}}{\text{น้ำหนักของน้ำมันพืชตั้งต้น}} \times 100$$



**ภาคผนวก ข**  
**การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันพืช**

น้ำมันพืชที่ศึกษาประกอบด้วยน้ำมันสบู่ดำและน้ำมันปาล์ม โดยส่งวิเคราะห์ที่ศูนย์ทดสอบและมาตรฐาน สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) จากรายงานผลการวิเคราะห์แสดงดังนี้



วว-TISTR

รายงานเลขที่ 0990 / 2558  
 กำขบวกรที่ 26-58/0142  
 กทม. หป. ขจ. 0306-1 / 58

**รายงานผลการทดสอบและวิเคราะห์**  
**ให้แก่**  
**ฝ่ายเทคโนโลยีพลังงาน**

การทดสอบ / วิเคราะห์ น้ำมันสบู่ดำ (A)  
 วิธีทดสอบ / วิเคราะห์ GC  
 ภาวะการทดสอบ / วิเคราะห์ : อุณหภูมิ ..... °C ความชื้นสัมพัทธ์ ..... %  
 ผลการทดสอบ / วิเคราะห์

น้ำมันสบู่ดำ (A)			
Fatty acid composition, กรัม/100 กรัม			
Myristic acid	C14:0	=	0.05
Palmitic acid	C16:0	=	13.92
Palmitoleic acid	C16:1 n-7	=	0.76
Heptadecanoic acid	C17:0	=	0.08
Stearic acid	C18:0	=	6.26
Cis-9-Octadecenoic acid	C18:1 n-9	=	43.10
Cis-9,12-Octadecadienoic acid	C18:2 n-6	=	35.19
Cis-9,12,15-Octadecatrienoic acid	C18:3 n-3	=	0.16
Arachidic acid	C20:0	=	0.18
Cis-11-Eicosenoic acid	C20:1 n-9	=	0.06
Lignoceric acid	C24:0	=	0.03
Unidentified peak			0.21

Remark : Unit % is the weight percentages indicated as individual components of the fatty acid composition, based on 100% area normalization.

ผู้ทดสอบ/วิเคราะห์ ..... ผู้รับรอง .....  
 1 ..... (นางสาววิไลพร พงษ์พิทักษ์)  
 2 ..... ผู้อำนวยการห้องปฏิบัติการชีวเคมีและจุลชีววิทยา  
 3 .....

วันที่ 2 มีนาคม 2558 Ref. 2026158020400420001/1

รายงานผลการทดสอบ/ใบรับรองการสอบเทียบมีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบ หรือ สอบเทียบเท่านั้น แล้วยังกรณี  
 การนำรายงานผล/ใบรับรองนี้ไปโฆษณาและการคัดค้านการนำผลบางส่วนไปเผยแพร่ต่อสาธารณะต้องได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากผู้ว่าการ วว.

FM.BL.MTC.001 Rev.3

สำนักงานใหญ่ 35 หมู่ 3 ตำบลคลองห้า อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี 12120 โทรศัพท์ (66) 0 2577 9000 โทรสาร (66) 0 2577 9009 E-mail : rumpai@tistr.or.th Website : www.tistr.or.th	สำนักงานห้องปฏิบัติการ ซอย 1C นิคมอุตสาหกรรมบางปู ถนนสุขุมวิท ตำบลแพรกษา อำเภอมือจึง จังหวัดสมุทรปราการ 10280 โทรศัพท์ (66) 0 2323 1672-80 ต่อ 115, 116 โทรสาร (66) 0 2323 9165 E-mail : mtc@tistr.or.th	สำนักงาน 196 ถนนพหลโยธิน เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900 โทรศัพท์ (66) 0 2579 1121-30 ต่อ 5219,5225,5217 โทรสาร (66) 0 2579 8592 E-mail : sumalee@tistr.or.th
--	---	---

รูปที่ ข.1 ปริมาณกรดไขมันของน้ำมันสบู่ดำ



หมายเลขทะเบียน 1105/50

รายงานเลขที่ 0991/2558

รายงานผลทดสอบ

คำขอบริการที่ : 26-58/0142  
 ที่ กทม. หน. : ขอ. 0306-2 / 58  
 ถูกทำ : ฝ่ายเทคโนโลยีพลังงาน  
 ที่อยู่ : 35 หมู่ 3 ตำบลคลองห้า อำเภอลำลูกกา  
 จังหวัดปทุมธานี 12120

หน้า : 1 ของ 1  
 วันที่รับตัวอย่าง : 12 กุมภาพันธ์ 2558  
 วันที่ทดสอบ : 26 กุมภาพันธ์ 2558

อุณหภูมิ : 25°C ± 5°C  
 ความชื้นสัมพัทธ์ : 50% ± 20%

ชื่อของตัวอย่าง : น้ำมันปาล์ม (B)  
 เป็นของเหลวใส บรรจุในขวดแก้ว ปิดสนิท จำนวน 1 ขวด ๆ ละ 100 มิลลิกรัม

วิธีทดสอบ : In-house Method : T-BC-01 based on AOAC 969.33, AOAC 991.39 (2005)

ผลทดสอบ :

น้ำมันปาล์ม (B)

Fatty acid composition, กรัม/100 กรัม

Lauric acid	C12:0	=	0.4
Myristic acid	C14:0	=	1.0
Palmitic acid	C16:0	=	41.3
Palmitoleic acid	C16:1 n-7	=	0.2
Heptadecanoic acid	C17:0	=	0.1
Stearic acid	C18:0	=	4.2
Oleic acid	C18:1 n-9	=	41.3
Linoleic acid	C18:2 n-6	=	10.6
Cis-9,12,15-Octadecatrienoic acid	C18:3 n-3	=	0.2
Arachidic acid	C20:0	=	0.3
Cis-11-Eicosenoic acid	C20:1 n-9	=	0.1
Lignoceric acid	C24:0	=	0.1
Unidentified peak			0.3

Remark : Unit % is the weight percentages indicated as individual components of the fatty acid methyl ester (FAME) composition.

ผู้ทดสอบ ...  
(นางสาวอรทัย หนูสุวรรณ)

ผู้รับรอง ...  
(นางสาวกรวิทย์ งามพิทักษ์)

ผู้อำนวยการห้องปฏิบัติการชีวเคมีและจุลชีววิทยา  
Ref. 2026158020400420001/2

วันที่ 2 มีนาคม 2558

รายงานผลการทดสอบ/ใบรับรองการสอบเทียบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบ หรือ สอบเทียบเท่านั้น กรณีการดำเนินการนำรายงานผล/ใบรับรองนี้ไปโฆษณาและการค้าขายหรือการนำผลบางส่วนไปเผยแพร่ต่อสาธารณะต้องได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากผู้ว่าการ ว.

FM.BLMTC.001 Rev.3

สำนักงานใหญ่  
35 หมู่ 3 ตำบลคลองห้า อำเภอลำลูกกา  
จังหวัดปทุมธานี 12120  
โทรศัพท์ (66) 0 2577 9000  
โทรสาร (66) 0 2577 9009  
E-mail : rumpa@tistr.or.th Website : www.tistr.or.th

สำนักงานห้องปฏิบัติการ  
ชอย 1C นิคมอุตสาหกรรมบางปู ถนนสุขุมวิท  
ตำบลแพรกษา อำเภอมือทอง จังหวัดสมุทรปราการ 10280  
โทรศัพท์ (66) 0 2323 1672-80 ต่อ 115, 116  
โทรสาร (66) 0 2323 9165  
E-mail : mtc@tistr.or.th

สำนักงาน  
196 ถนนพรหมโมลี เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900  
โทรศัพท์ (66) 0 2579 1121-30 ต่อ 5219,5225,5217  
โทรสาร (66) 0 2579 8592  
E-mail : sumalee@tistr.or.th

รูปที่ ข.2 ปริมาณกรดไขมันของน้ำมันปาล์ม

### 1. การคำนวณน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของน้ำมันสบู่ดำ

$$\text{น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย} = \sum \left( \frac{\text{ปริมาณกรดไขมัน} \times \text{น้ำหนักโมเลกุลของกรดไขมัน}}{100} \right)$$

จากรูปที่ ข.1 จะได้

$$\text{น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของน้ำมันสบู่ดำ} =$$

$$\begin{aligned} & (723.16 \times 0.05) + (807.32 \times 13.96) + (801.27 \times 0.76) + (849.39 \times 0.08) + (891.47 \times 6.28) + \\ & (885.43 \times 43.22) + (879.38 \times 35.29) + (873.34 \times 0.16) + (975.63 \times 0.18) + (1143.96 \times 0.03) / 100 \\ & = 872 \end{aligned}$$

ดังนั้น จะได้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของน้ำมันสบู่ดำ = 872 กรัม/โมล

### 2. การคำนวณน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของน้ำมันปาล์ม

$$\text{น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย} = \sum \left( \frac{\text{ปริมาณกรดไขมัน} \times \text{น้ำหนักโมเลกุลของกรดไขมัน}}{100} \right)$$

จากรูปที่ ข.2 จะได้

$$\text{น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของน้ำมันปาล์ม} =$$

$$\begin{aligned} & (639 \times 0.40) + (723.16 \times 1) + (807.32 \times 41.38) + (801.27 \times 0.2) + (849.39 \times 0.1) + (891.47 \times 4.21) + (885.43 \\ & \times 41.38) + (879.38 \times 10.62) + (873.34 \times 0.20) + (975.63 \times 0.30) + (969.59 \times 0.1) + (1143 \times 0.1) / 100 \\ & = 850 \end{aligned}$$

ดังนั้น จะได้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของน้ำมันปาล์ม = 850 กรัม/โมล

### ภาคผนวก ค

#### การคำนวณเวลาในการทำปฏิกิริยา (Residence time)

การคำนวณเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (Residence time) สามารถคำนวณได้จากทฤษฎีของแก๊ส ดังนี้

จากทฤษฎีของแก๊ส [Himmelblau และคณะ, 2012]

$$PV' = ZnRT$$

$$V' = \frac{ZQ\rho RT}{MwP}$$

และ

$$\tau = \frac{V}{V'}$$

โดย  $\tau$  = เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)

$V$  = ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ (มิลลิลิตร)

$V'$  = อัตราการไหลของสารผสม (มิลลิลิตร/นาที)

จากวิธีของ Pitzer สามารถคำนวณหาค่า  $Z$  ได้ดังนี้

$$Z = Z(P_r, T_r, \omega)$$

$$Z = Z^0(P_r, T_r) + \omega Z^1(P_r, T_r)$$

$$T_r = \frac{T}{T_c}$$

$$P_r = \frac{P}{P_c}$$

ตารางที่ ค.1 แสดงค่า  $z^0$  ของ Pitzer [Himmelblau และคณะ, 2012]

$T_r$	$p_r$														
	0.010	0.050	0.100	0.200	0.400	0.600	0.800	1.000	1.200	1.500	2.000	3.000	5.000	7.000	10.000
0.30	0.0029	0.0145	0.0290	0.0579	0.1158	0.1737	0.2315	0.2892	0.3470	0.4335	0.5775	0.8648	1.4366	2.0048	2.8507
0.35	0.0026	0.0130	0.0261	0.0522	0.1043	0.1564	0.2084	0.2604	0.3123	0.3901	0.5195	0.7775	1.2902	1.7987	2.5539
0.40	0.0024	0.0119	0.0239	0.0477	0.0953	0.1429	0.1904	0.2379	0.2853	0.3563	0.4744	0.7095	1.1758	1.6373	2.3211
0.45	0.0022	0.0110	0.0221	0.0442	0.0882	0.1322	0.1762	0.2200	0.2638	0.3294	0.4384	0.6551	1.0841	1.5077	2.1338
0.50	0.0021	0.0103	0.0207	0.0413	0.0825	0.1236	0.1647	0.2056	0.2465	0.3077	0.4092	0.6110	1.0094	1.4017	1.9801
0.55	0.9804	0.0098	0.0195	0.0390	0.0778	0.1166	0.1553	0.1939	0.2323	0.2899	0.3853	0.5747	0.9475	1.3137	1.8520
0.60	0.9849	0.0093	0.0186	0.0371	0.0741	0.1109	0.1476	0.1842	0.2207	0.2753	0.3657	0.5446	0.8959	1.2398	1.7440
0.65	0.9881	0.9377	0.0178	0.0356	0.0710	0.1063	0.1415	0.1765	0.2113	0.2634	0.3495	0.5197	0.8526	1.1773	1.6519
0.70	0.9904	0.9504	0.8958	0.0344	0.0687	0.1027	0.1366	0.1703	0.2038	0.2538	0.3364	0.4991	0.8161	1.1241	1.5729
0.75	0.9922	0.9598	0.9165	0.0336	0.0670	0.1001	0.1330	0.1656	0.1981	0.2464	0.3260	0.4823	0.7854	1.0787	1.5047
0.80	0.9935	0.9669	0.9319	0.8539	0.0661	0.0985	0.1307	0.1626	0.1942	0.2411	0.3182	0.4690	0.7598	1.0400	1.4456
0.85	0.9946	0.9725	0.9436	0.8810	0.0661	0.0983	0.1301	0.1614	0.1924	0.2382	0.3132	0.4591	0.7388	1.0071	1.3943
0.90	0.9954	0.9768	0.9528	0.9015	0.7800	0.1006	0.1321	0.1630	0.1935	0.2383	0.3114	0.4527	0.7220	0.9793	1.3496
0.93	0.9959	0.9790	0.9573	0.9115	0.8059	0.6635	0.1359	0.1664	0.1963	0.2405	0.3122	0.4507	0.7138	0.9648	1.3257
0.95	0.9961	0.9803	0.9600	0.9174	0.8206	0.6967	0.1410	0.1705	0.1998	0.2432	0.3138	0.4501	0.7092	0.9561	1.3108
0.97	0.9963	0.9815	0.9625	0.9227	0.8338	0.7240	0.5580	0.1779	0.2055	0.2474	0.3164	0.4504	0.7052	0.9480	1.2968
0.98	0.9965	0.9821	0.9637	0.9253	0.8398	0.7360	0.5887	0.1844	0.2097	0.2503	0.3182	0.4508	0.7035	0.9442	1.2901
0.99	0.9966	0.9826	0.9648	0.9277	0.8455	0.7471	0.6138	0.1959	0.2154	0.2538	0.3204	0.4514	0.7018	0.9406	1.2835
1.00	0.9967	0.9832	0.9659	0.9300	0.8509	0.7574	0.6353	0.2001	0.2237	0.2583	0.3229	0.4522	0.7004	0.9372	1.2772
1.01	0.9968	0.9837	0.9669	0.9322	0.8561	0.7671	0.6542	0.4648	0.2370	0.2640	0.3260	0.4533	0.6991	0.9339	1.2710
1.02	0.9969	0.9842	0.9679	0.9343	0.8610	0.7761	0.6710	0.5146	0.2629	0.2715	0.3297	0.4547	0.6980	0.9307	1.2650
1.05	0.9971	0.9855	0.9707	0.9401	0.8743	0.8002	0.7130	0.6026	0.4437	0.3131	0.3452	0.4604	0.6956	0.9222	1.2481
1.10	0.9975	0.9874	0.9747	0.9485	0.8930	0.8323	0.7649	0.6880	0.5984	0.4580	0.3953	0.4770	0.6950	0.9110	1.2232
1.15	0.9978	0.9891	0.9780	0.9554	0.9081	0.8576	0.8032	0.7443	0.6803	0.5798	0.4760	0.5042	0.6987	0.9033	1.2021
1.20	0.9981	0.9904	0.9808	0.9611	0.9205	0.8779	0.8330	0.7858	0.7363	0.6605	0.5605	0.5425	0.7069	0.8990	1.1844
1.30	0.9985	0.9926	0.9852	0.9702	0.9396	0.9083	0.8764	0.8438	0.8111	0.7624	0.6908	0.6344	0.7358	0.8998	1.1580
1.40	0.9988	0.9942	0.9884	0.9768	0.9534	0.9298	0.9062	0.8827	0.8595	0.8256	0.7753	0.7202	0.7761	0.9112	1.1419
1.50	0.9991	0.9954	0.9909	0.9818	0.9636	0.9456	0.9278	0.9103	0.8933	0.8689	0.8328	0.7887	0.8200	0.9297	1.1339
1.60	0.9993	0.9964	0.9928	0.9856	0.9714	0.9575	0.9439	0.9308	0.9180	0.9000	0.8738	0.8410	0.8617	0.9518	1.1320
1.70	0.9994	0.9971	0.9943	0.9886	0.9775	0.9667	0.9563	0.9463	0.9367	0.9234	0.9043	0.8809	0.8984	0.9745	1.1343
1.80	0.9995	0.9977	0.9955	0.9910	0.9823	0.9739	0.9659	0.9583	0.9511	0.9413	0.9275	0.9118	0.9297	0.9961	1.1391
1.90	0.9996	0.9982	0.9964	0.9929	0.9861	0.9796	0.9735	0.9678	0.9624	0.9552	0.9456	0.9359	0.9557	1.0157	1.1452
2.00	0.9997	0.9986	0.9972	0.9944	0.9892	0.9842	0.9796	0.9754	0.9715	0.9664	0.9599	0.9550	0.9772	1.0328	1.1516
2.20	0.9998	0.9992	0.9983	0.9967	0.9937	0.9910	0.9886	0.9865	0.9847	0.9826	0.9806	0.9827	1.0094	1.0600	1.1635
2.40	0.9999	0.9996	0.9991	0.9983	0.9969	0.9957	0.9948	0.9941	0.9936	0.9935	0.9945	1.0011	1.0313	1.0793	1.1728
2.60	1.0000	0.9998	0.9997	0.9994	0.9991	0.9990	0.9990	0.9993	0.9998	1.0010	1.0040	1.0137	1.0463	1.0926	1.1792
2.80	1.0000	1.0000	1.0001	1.0002	1.0007	1.0013	1.0021	1.0031	1.0042	1.0063	1.0106	1.0223	1.0565	1.1016	1.1830
3.00	1.0000	1.0002	1.0004	1.0008	1.0018	1.0030	1.0043	1.0057	1.0074	1.0101	1.0153	1.0284	1.0635	1.1075	1.1848
3.50	1.0001	1.0004	1.0008	1.0017	1.0035	1.0055	1.0075	1.0097	1.0120	1.0156	1.0221	1.0368	1.0723	1.1138	1.1834
4.00	1.0001	1.0005	1.0010	1.0021	1.0043	1.0066	1.0090	1.0115	1.0140	1.0179	1.0249	1.0401	1.0747	1.1136	1.1773

The shaded region contains values for the liquid phase.

ตารางที่ ค.2 แสดงค่า  $z^1$  ของ Pitzer [Himmelblau และคณะ, 2012]

$T_r$	$p_r$														
	0.10	0.50	0.100	0.200	0.400	0.600	0.800	1.000	1.200	1.500	2.000	3.000	5.000	7.000	10.000
0.30	-0.0008	-0.0040	-0.0081	-0.0161	-0.0323	-0.0484	-0.0645	-0.0806	-0.0966	-0.1207	-0.1608	-0.2407	-0.3996	-0.5572	-0.7915
0.35	-0.0009	-0.0046	-0.0093	-0.0185	-0.0370	-0.0554	-0.0738	-0.0921	-0.1105	-0.1379	-0.1834	-0.2738	-0.4523	-0.6279	-0.8863
0.40	-0.0010	-0.0048	-0.0095	-0.0190	-0.0380	-0.0570	-0.0758	-0.0946	-0.1134	-0.1414	-0.1879	-0.2799	-0.4603	-0.6365	-0.8936
0.45	-0.0009	-0.0047	-0.0094	-0.0187	-0.0374	-0.0560	-0.0745	-0.0929	-0.1113	-0.1387	-0.1840	-0.2734	-0.4475	-0.6162	-0.8606
0.50	-0.0009	-0.0045	-0.0090	-0.0181	-0.0360	-0.0539	-0.0716	-0.0893	-0.1069	-0.1330	-0.1762	-0.2611	-0.4253	-0.5831	-0.8099
0.55	-0.0014	-0.0053	-0.0106	-0.0212	-0.0424	-0.0641	-0.0862	-0.1089	-0.1321	-0.1669	-0.2169	-0.2765	-0.4391	-0.5946	-0.8251
0.60	-0.0020	-0.0061	-0.0122	-0.0244	-0.0476	-0.0714	-0.0956	-0.1203	-0.1455	-0.1812	-0.2312	-0.2918	-0.4523	-0.6057	-0.8386
0.65	-0.0037	-0.0097	-0.0194	-0.0388	-0.0700	-0.1029	-0.1371	-0.1727	-0.2097	-0.2480	-0.2976	-0.3584	-0.5183	-0.6700	-0.9046
0.70	-0.0093	-0.0307	-0.0614	-0.1228	-0.2456	-0.4309	-0.6786	-1.0000	-1.4171	-1.9400	-2.5900	-3.3800	-4.3300	-5.4700	-6.8300
0.75	-0.0064	-0.0339	-0.0744	-0.1443	-0.2822	-0.4417	-0.6550	-0.9681	-1.3908	-1.9496	-2.6728	-3.5900	-4.7300	-6.0100	-7.4700
0.80	-0.0044	-0.0228	-0.0487	-0.1160	-0.2272	-0.4001	-0.6262	-0.9248	-1.3064	-1.7940	-2.4000	-3.1500	-4.0700	-5.1800	-6.4900
0.85	-0.0029	-0.0152	-0.0319	-0.0715	-0.1268	-0.2091	-0.3209	-0.4622	-0.6331	-0.8348	-1.0688	-1.3460	-1.6680	-2.0360	-2.4510
0.90	-0.0019	-0.0099	-0.0205	-0.0442	-0.1118	-0.2096	-0.3396	-0.5003	-0.6904	-0.9100	-1.1599	-1.4463	-1.7695	-2.1315	-2.5338
0.93	-0.0015	-0.0075	-0.0154	-0.0326	-0.0763	-0.1362	-0.2154	-0.3162	-0.4400	-0.5880	-0.7610	-0.9590	-1.1830	-1.4340	-1.7116
0.95	-0.0012	-0.0062	-0.0126	-0.0262	-0.0589	-0.1110	-0.1840	-0.2807	-0.4007	-0.5467	-0.7200	-0.9230	-1.1470	-1.3930	-1.6639
0.97	-0.0010	-0.0050	-0.0101	-0.0208	-0.0450	-0.0770	-0.1247	-0.1863	-0.2669	-0.3699	-0.4999	-0.6599	-0.8499	-1.0649	-1.3063
0.98	-0.0009	-0.0044	-0.0090	-0.0184	-0.0390	-0.0641	-0.1100	-0.1641	-0.2361	-0.3280	-0.4410	-0.5760	-0.7340	-0.9160	-1.1230
0.99	-0.0008	-0.0039	-0.0079	-0.0161	-0.0335	-0.0531	-0.0796	-0.1160	-0.1646	-0.2260	-0.3010	-0.3900	-0.5030	-0.6410	-0.8040
1.00	-0.0007	-0.0034	-0.0069	-0.0140	-0.0285	-0.0435	-0.0588	-0.0759	-0.1009	-0.1368	-0.1838	-0.2428	-0.3138	-0.3968	-0.4918
1.01	-0.0006	-0.0030	-0.0060	-0.0120	-0.0240	-0.0351	-0.0429	-0.0523	-0.0643	-0.0791	-0.1059	-0.1447	-0.1955	-0.2585	-0.3335
1.02	-0.0005	-0.0026	-0.0051	-0.0102	-0.0198	-0.0277	-0.0303	-0.0362	-0.0427	-0.0524	-0.0622	-0.0722	-0.0821	-0.0920	-0.1019
1.05	-0.0003	-0.0015	-0.0029	-0.0054	-0.0092	-0.0097	-0.0032	0.0220	0.1059	0.4451	-0.0432	-0.0838	-0.1370	-0.1835	-0.2476
1.10	-0.0000	0.0000	0.0001	0.0007	0.0038	0.0106	0.0236	0.0476	0.0897	0.1630	0.0698	-0.0373	-0.1021	-0.1469	-0.2056
1.15	0.0002	0.0011	0.0023	0.0052	0.0127	0.0237	0.0396	0.0625	0.0943	0.1548	0.1667	0.0332	-0.0611	-0.1084	-0.1642
1.20	0.0004	0.0019	0.0039	0.0084	0.0190	0.0326	0.0499	0.0719	0.0991	0.1477	0.1990	0.1095	-0.0141	-0.0678	-0.1231
1.30	0.0006	0.0030	0.0061	0.0125	0.0267	0.0429	0.0612	0.0819	0.1048	0.1420	0.1991	0.2079	0.0875	0.0176	-0.0423
1.40	0.0007	0.0036	0.0072	0.0147	0.0306	0.0477	0.0661	0.0857	0.1063	0.1383	0.1894	0.2397	0.1737	0.1008	0.0350
1.50	0.0008	0.0039	0.0078	0.0158	0.0323	0.0497	0.0677	0.0864	0.1055	0.1345	0.1806	0.2433	0.2309	0.1717	0.1058
1.60	0.0008	0.0040	0.0080	0.0162	0.0330	0.0501	0.0677	0.0855	0.1035	0.1303	0.1729	0.2381	0.2631	0.2255	0.1673
1.70	0.0008	0.0040	0.0081	0.0163	0.0329	0.0497	0.0667	0.0838	0.1008	0.1259	0.1658	0.2305	0.2788	0.2628	0.2179
1.80	0.0008	0.0040	0.0081	0.0162	0.0325	0.0488	0.0652	0.0816	0.0978	0.1216	0.1593	0.2224	0.2846	0.2871	0.2576
1.90	0.0008	0.0040	0.0079	0.0159	0.0318	0.0477	0.0635	0.0792	0.0947	0.1173	0.1532	0.2144	0.2848	0.3017	0.2876
2.00	0.0008	0.0039	0.0078	0.0155	0.0310	0.0464	0.0617	0.0767	0.0916	0.1133	0.1476	0.2069	0.2819	0.3097	0.3096
2.20	0.0007	0.0037	0.0074	0.0147	0.0293	0.0437	0.0579	0.0719	0.0857	0.1057	0.1374	0.1932	0.2720	0.3135	0.3355
2.40	0.0007	0.0035	0.0070	0.0139	0.0276	0.0411	0.0544	0.0675	0.0803	0.0989	0.1285	0.1812	0.2602	0.3089	0.3459
2.60	0.0007	0.0033	0.0066	0.0131	0.0260	0.0387	0.0512	0.0634	0.0754	0.0929	0.1207	0.1706	0.2484	0.3009	0.3475
2.80	0.0006	0.0031	0.0062	0.0124	0.0245	0.0365	0.0483	0.0598	0.0711	0.0876	0.1138	0.1613	0.2372	0.2915	0.3443
3.00	0.0006	0.0029	0.0059	0.0117	0.0232	0.0345	0.0456	0.0565	0.0672	0.0828	0.1076	0.1529	0.2268	0.2817	0.3385
3.50	0.0005	0.0026	0.0052	0.0103	0.0204	0.0303	0.0401	0.0497	0.0591	0.0728	0.0949	0.1356	0.2042	0.2584	0.3194
4.00	0.0005	0.0023	0.0046	0.0091	0.0182	0.0270	0.0357	0.0443	0.0527	0.0651	0.0849	0.1219	0.1857	0.2379	0.2994

The shaded region contains values for the liquid phase.

## ตัวอย่างการคำนวณ

ที่อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลเอซีเทตต่อน้ำมันสบู่ดำ 50:1 อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 100 บาร์ อัตราการไหล 0.15 มิลลิลิตร/นาที และปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 6.9363 มิลลิลิตร หาเวลาในการทำปฏิกิริยา

จาก ข้อมูลของเอทิลเอซีเทต ประกอบด้วย

$T_c = 250.2$  องศาเซลเซียส,  $P_c = 38.3$  บาร์,  $\omega = 0.3611$ ,  $\rho = 0.9$  g.ml,  $M_w = 88$  g/mol

$$\text{จะได้ } T_r = \frac{350}{250.2}$$

$$T_r = 1.40$$

$$P_r = \frac{200}{38.3}$$

$$P_r = 5.22$$

นำ  $T_r$  และ  $P_r$  ไปหาค่า  $Z^0$  และ  $Z^1$  จากตารางที่ ค.1 และ ค.2 ได้ดังนี้

$$Z^0 = 0.7909$$

$$Z^1 = 0.1656$$

จะได้

$$Z = 0.7909 + 0.1656$$

$$Z = 0.85$$

แทนค่าในสมการ

$$V' = \frac{0.85 \cdot 0.15 \cdot 0.9 \cdot (273 + 350) \cdot 0.08314 \cdot 1000}{88 \cdot 200}$$

จะได้

$$V' = 0.3377$$

แทนค่าในสมการ

$$\tau = \frac{V}{V'}$$

$$\tau = \frac{6.9363}{0.3377}$$

จะได้

$$\tau = 20$$

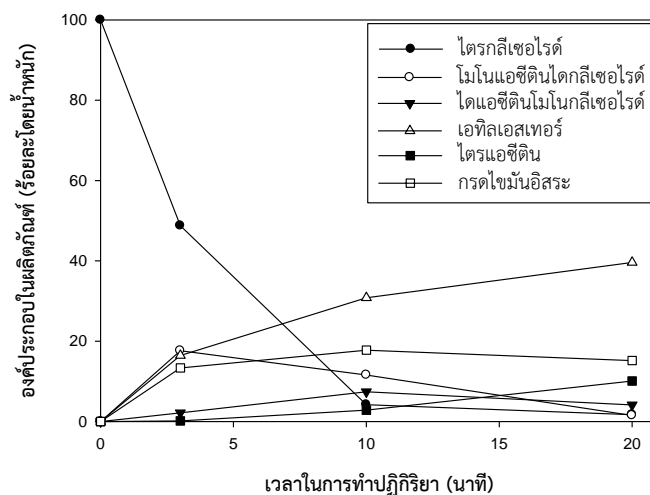
ดังนั้น ที่ภาวะนี้จะได้ residence time เท่ากับ 20 นาที



## ภาคผนวก ง

## ผลการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการผลิตไบโอดีเซล

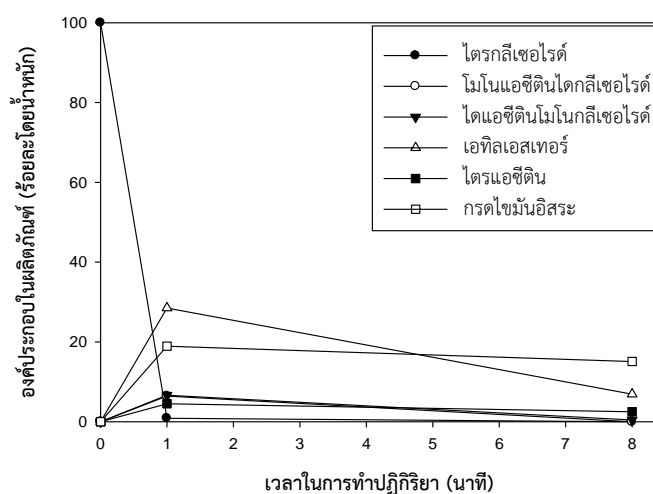
## 1. น้ำมันสุุดำ



รูปที่ ง.1 ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์และเวลาในการทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอซิดิต่อน้ำมันสุุดำ 50:1 อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส และความดัน 200 บาร์

ตารางที่ ง.1 ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์และเวลาในการทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอซิดิต่อน้ำมันสุุดำ 50:1 อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส และความดัน 200 บาร์

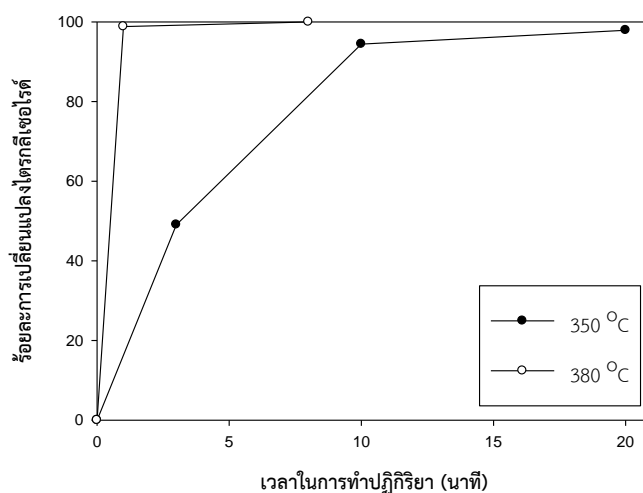
	เวลาในการทำปฏิกิริยา(นาที)		
	3	10	20
ไตรกลีเซอไรด์	48.77	4.19	1.69
โมนอแอซิดินไตรกลีเซอไรด์	17.64	11.58	1.51
ไดแอซิดินโมนอไตรกลีเซอไรด์	2.17	7.40	4.13
เอทิลเอสเทอร์	16.44	30.82	39.62
ไตรแอซิดิน	0.16	2.83	10.10
กรดไขมันอิสระ	13.33	17.78	15.18



รูปที่ ง.2 ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์และเวลาในการทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสิตินต่อน้ำมันสบู่ดำ 50:1 อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส และความดัน 200 บาร์

ตารางที่ ง.2 ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์และเวลาในการทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสิตินต่อน้ำมันสบู่ดำ 50:1 อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส และความดัน 200 บาร์

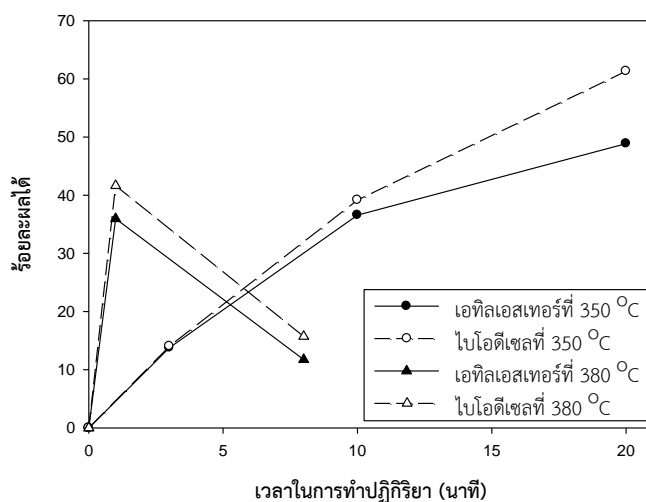
	เวลาในการทำปฏิกิริยา(นาทิต)	
	1	8
ไตรกลีเซอไรด์	0.86	0.00
โมโนแอสิตินไตรกลีเซอไรด์	6.41	0.00
ไดแอสิตินโมโนกลีเซอไรด์	6.66	0.43
เอทิลเอสเทอร์	28.49	6.89
ไตรแอสิติน	4.52	2.51
กรดไขมันอิสระ	18.94	15.08



**รูปที่ ง.3** ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ที่อุณหภูมิ 350 และ 380 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอซีเทตต่อน้ำมันสุบุดำ 50:1

**ตารางที่ ง.3** ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ที่อุณหภูมิ 350 และ 380 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอซีเทตต่อน้ำมันสุบุดำ 50:1

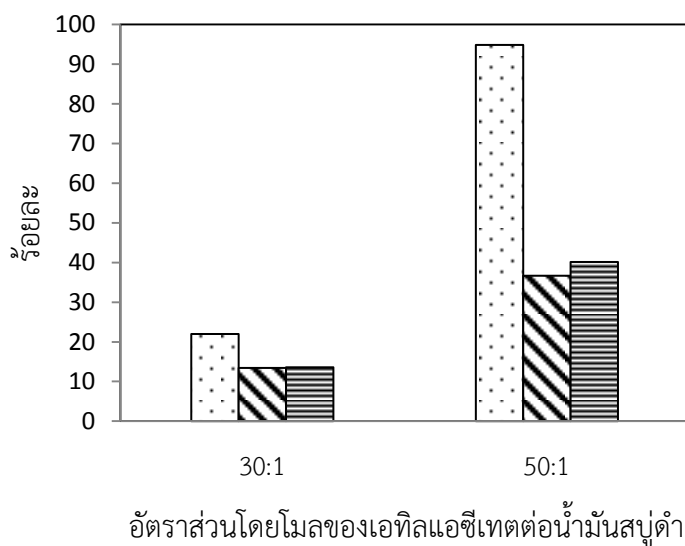
350 องศาเซลเซียส		380 องศาเซลเซียส	
เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์	เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์
3	49.06	1	98.83
10	94.41	8	100.00
20	97.91		



**รูปที่ ง.4** ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และร้อยละผลได้ของไอโซอามิลเซลที่อุณหภูมิ 350 และ 380 องศาเซลเซียส โดยเส้นทึบ (—) แสดงปริมาณร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และเส้นประ (---) แสดงปริมาณร้อยละผลได้ของไอโซอามิลเซล (เอทิลเอสเทอร์+ไตรแอซีดีน)

**ตารางที่ ง.4** ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และร้อยละผลได้ของไอโซอามิลเซลที่อุณหภูมิ 350 และ 380 องศาเซลเซียส

350 องศาเซลเซียส			380 องศาเซลเซียส		
เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์	ร้อยละผลได้ของไอโซอามิลเซล	เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์	ร้อยละผลได้ของไอโซอามิลเซล
3	13.79	14.03	1	35.96	41.64
10	36.58	39.16	8	11.75	15.71
20	48.86	61.31			



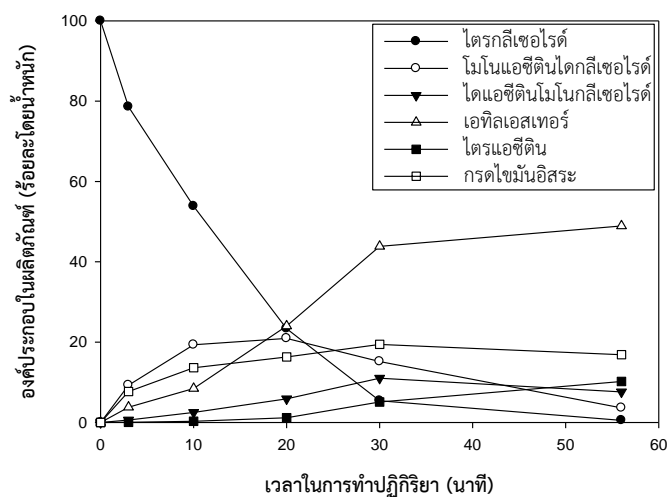
□ การเปลี่ยนแปลงไตรเอทิลเอมิเนอัม    ▨ ผลได้เอทิลเอสเทอร์    ▤ ผลได้ไปโอดีเซล

**รูปที่ ๕.๕** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรเอทิลเอมิเนอัม ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ ร้อยละผลได้ของไปโอดีเซล และอัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอซีเทตต่อน้ำมันสบู่ดำที่ 30:1 และ 50:1

**ตารางที่ ๕.๕** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรเอทิลเอมิเนอัม ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ ร้อยละผลได้ของไปโอดีเซล และอัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอซีเทตต่อน้ำมันสบู่ดำที่ 30:1 และ 50:1

	อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอซีเทตต่อน้ำมันสบู่ดำ	
	30:1	50:1
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรเอทิลเอมิเนอัม	21.98	94.88
ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์	13.46	36.68
ร้อยละผลได้ของไปโอดีเซล	13.61	40.11

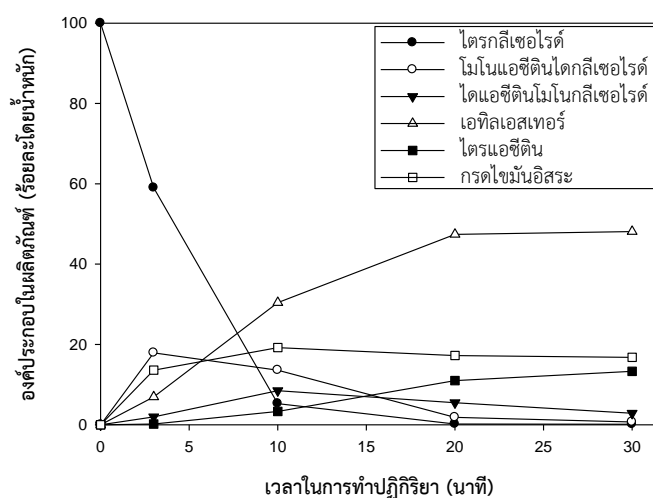
## 2. น้ำมันปาล์ม



รูปที่ ๖.6 ความสัมพันธ์ของปริมาณองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ และเวลาในการทำปฏิกิริยา 3-56 นาที ที่อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลเอซีเทตต่อน้ำมันปาล์ม 50:1

ตารางที่ ๖.6 ความสัมพันธ์ของปริมาณองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ และเวลาในการทำปฏิกิริยา 3-56 นาที ที่อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลเอซีเทตต่อน้ำมันปาล์ม 50:1

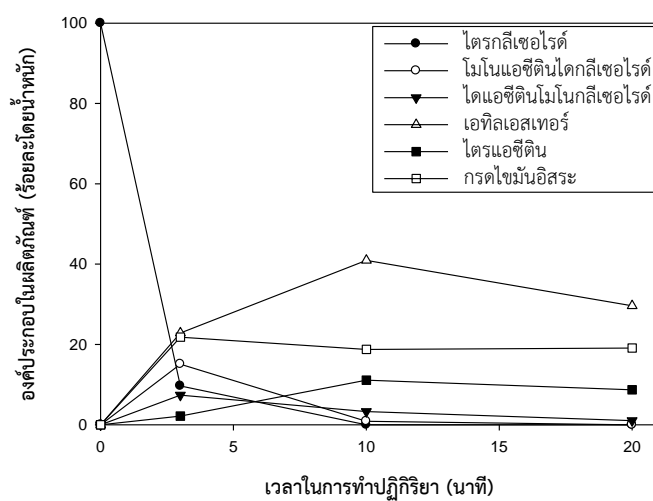
	เวลาในการทำปฏิกิริยา(นาที)				
	3	10	20	30	56
ไตรกลีเซอไรด์	78.59	53.83	23.36	5.40	0.52
โมนอแซซีตินไตรกลีเซอไรด์	9.27	19.35	20.92	15.18	3.61
ไดแซซีตินโมนอกลีเซอไรด์	0.60	2.49	5.89	11.03	7.61
เอทิลเอสเทอร์	3.79	8.45	23.99	43.85	48.92
ไตรแซซีติน	0.05	0.30	1.17	5.09	10.20
กรดไขมันอิสระ	7.68	13.63	16.30	19.43	16.86



รูปที่ ๗.๗ ความสัมพันธ์ของปริมาณองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ และเวลาในการทำปฏิกิริยา 3-30 นาที ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอซีเทตต่อน้ำมันปาล์ม 50:1

ตารางที่ ๗.๗ ความสัมพันธ์ของปริมาณองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ และเวลาในการทำปฏิกิริยา 3-30 นาที ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอซีเทตต่อน้ำมันปาล์ม 50:1

	เวลาในการทำปฏิกิริยา(นาที)			
	3	10	20	30
ไตรกลีเซอไรด์	59.00	5.26	0.19	0.13
โมนอแอซีดีนไตรกลีเซอไรด์	17.90	13.59	1.85	0.70
ไดแอซีดีนโมนอกลีเซอไรด์	1.95	8.50	5.49	2.88
เอทิลเอสเทอร์	6.93	30.41	47.40	48.11
ไตรแอซีดีน	0.19	3.30	10.99	13.31
กรดไขมันอิสระ	13.58	19.20	17.23	16.78

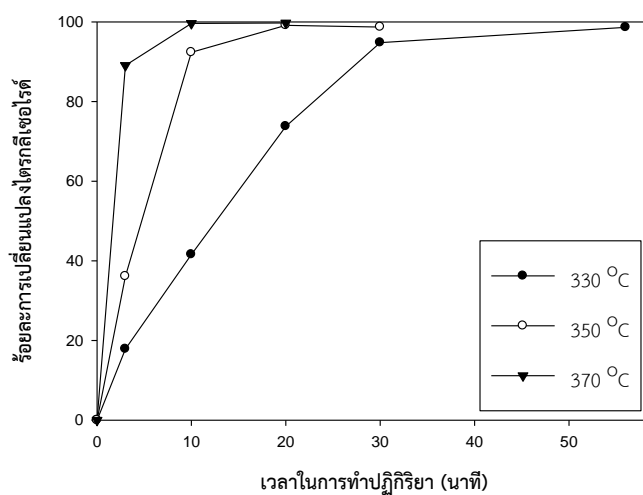


รูปที่ ๘.๘ ความสัมพันธ์ของปริมาณองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ และเวลาในการทำปฏิกิริยา 3-20 นาที ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสิตินต่อน้ำมันปาล์ม 50:1

ตารางที่ ๘.๘ ความสัมพันธ์ของปริมาณองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ และเวลาในการทำปฏิกิริยา 3-20 นาที ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสิตินต่อน้ำมันปาล์ม 50:1

	เวลาในการทำปฏิกิริยา(นาที)		
	3	10	20
ไตรกลีเซอไรด์	9.66	0.00	0.00
โมโนแอสิตินไตรกลีเซอไรด์	15.08	0.85	0.00
ไดแอสิตินโมโนกลีเซอไรด์	7.37	3.30	1.03
เอทิลเอสเทอร์	22.83	40.93	29.62
ไตรแอสิติน	2.15	11.11	8.72
กรดไขมันอิสระ	21.82	18.75	19.09

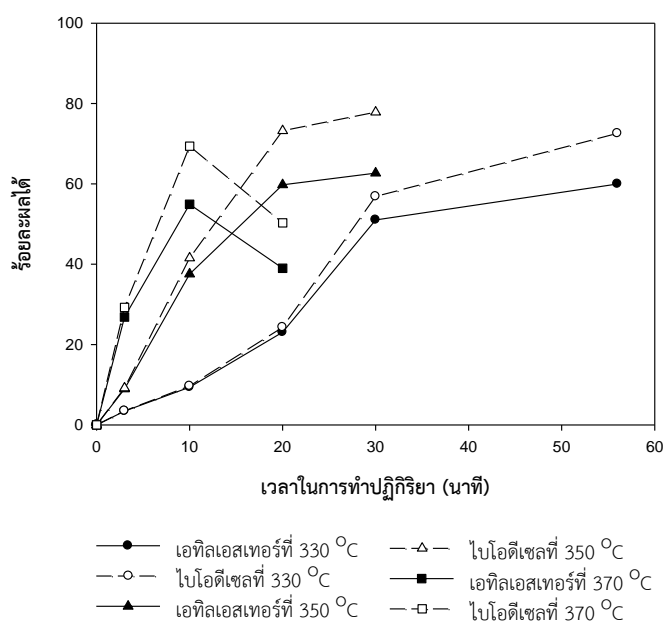




รูปที่ ๙.๙ ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ที่อุณหภูมิ 330 350 และ 370 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ๙.๙ ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ที่อุณหภูมิ 330 350 และ 370 องศาเซลเซียส

เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)		
	330	350	370
3	17.86	36.12	89.06
10	41.60	92.36	99.62
20	73.75	99.13	99.73
30	94.81	98.71	
56	98.64		



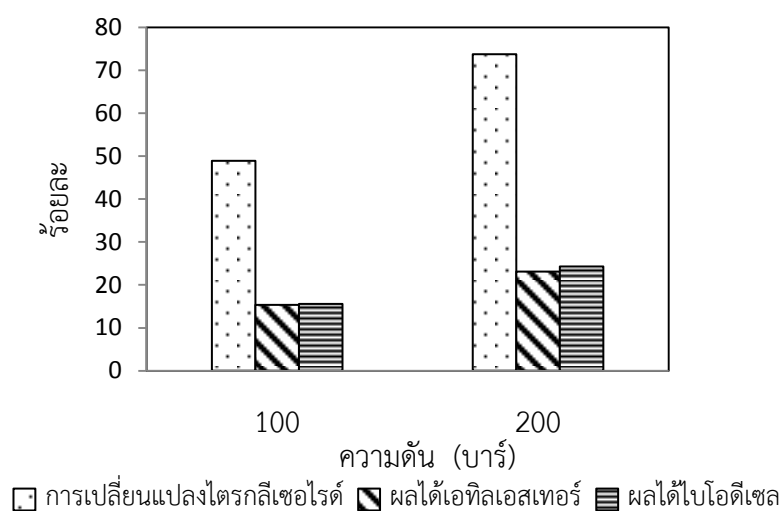
รูปที่ ง.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และร้อยละผลได้ของไอโซอัมิลเอสเทอร์ที่อุณหภูมิ 330 350 และ 370 องศาเซลเซียส โดยเส้นทึบ (—) แสดงปริมาณร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และเส้นประ (---) แสดงปริมาณร้อยละผลได้ของไอโซอัมิลเอสเทอร์ (เอทิลเอสเทอร์+ไตรแอสิติน)

ตารางที่ ง.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ที่อุณหภูมิ 330 350 และ 370 องศาเซลเซียส

เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)		
	330	350	370
3	3.44	8.96	26.85
10	9.37	37.55	54.91
20	23.09	59.78	38.99
30	51.01	62.68	
56	59.97		

ตารางที่ ง.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่อุณหภูมิ 330 350 และ 370 องศาเซลเซียส

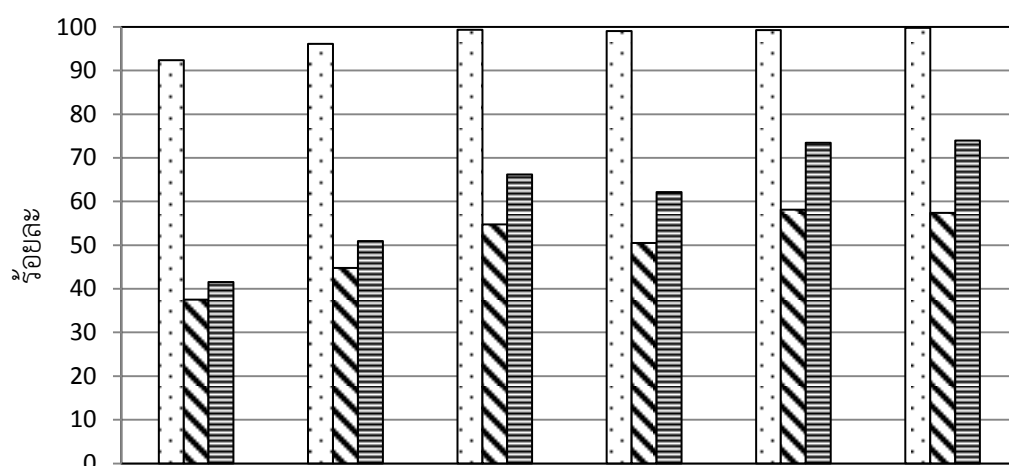
เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)		
	330	350	370
3	3.47	9.17	29.22
10	9.67	41.54	69.37
20	24.30	73.19	50.28
30	56.85	77.84	
56	72.56		



รูปที่ ง.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ที่ความดันในการทำปฏิกิริยา 100 และ 200 บาร์

ตารางที่ ง.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ที่ความดันในการทำปฏิกิริยา 100 และ 200 บาร์

	ความดัน (บาร์)	
	100	200
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์	48.88	73.75
ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์	15.35	23.09
ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล	15.57	24.30



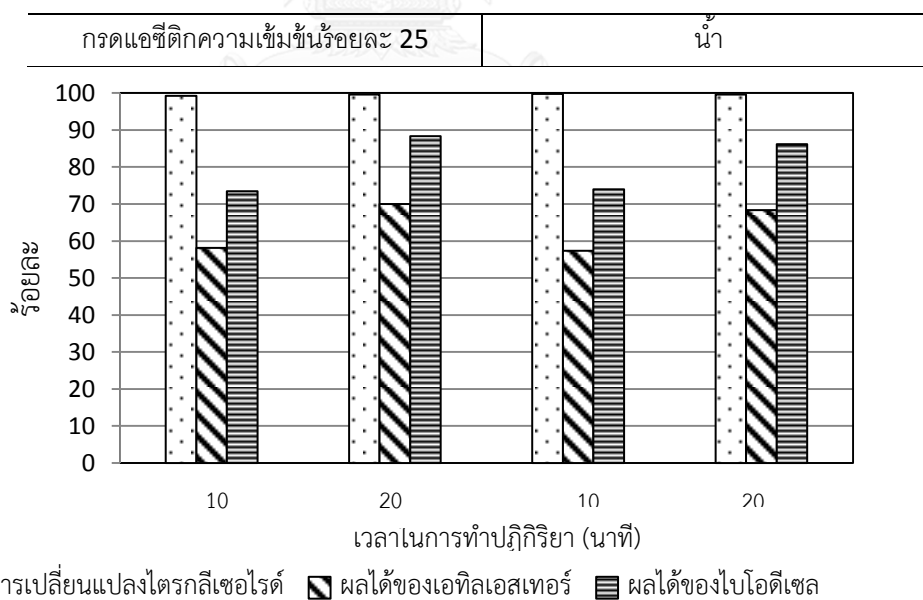
สารเติมแต่ง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	แอสติค	0	100	75	50	25	0
น้ำ	0	0	25	50	75	100	

□ การเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์    ▨ ผลได้ของเอทิลเอสเทอร์    ▨ ผลได้ของไบโอดีเซล

รูปที่ ง.12 ผลของสารเติมแต่งต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที

**ตารางที่ ง.13** ผลของสารเติมแต่งต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที

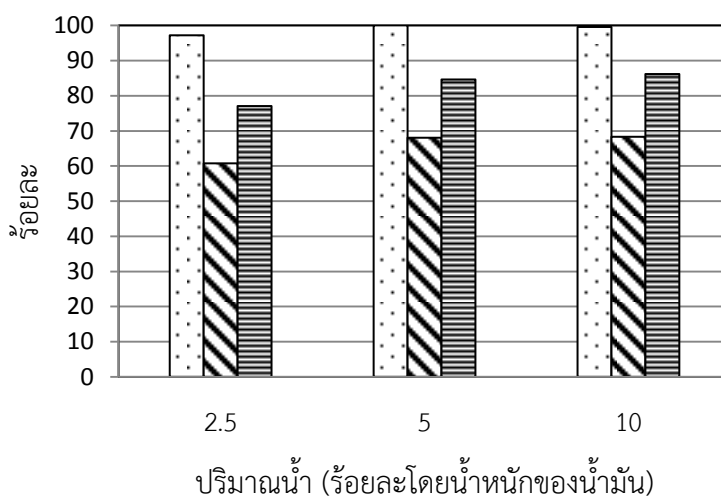
สารเติมแต่ง		ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ไตรกลีเซอไรด์	ร้อยละผลได้ของ เอทิลเอสเทอร์	ร้อยละผลได้ ของไบโอดีเซล
กรดแอสติติก	น้ำ			
0	0	92.36	37.55	41.54
100	0	96.10	44.80	50.96
75	25	99.32	54.72	66.19
50	50	99.06	50.49	62.17
25	75	99.26	58.13	73.46
0	100	99.78	57.36	73.98



**รูปที่ ง.13** ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลเมื่อใช้กรดแอสติกรวมกับน้ำที่ความเข้มข้นของกรดแอสติกร้อยละ 25 และการใช้น้ำเป็นสารเติมแต่งในการผลิตไบโอดีเซล

**ตารางที่ ง.14** ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลเมื่อใช้กรดแอสติกรวมกับน้ำที่ความเข้มข้นของกรดแอสติกร้อยละ 25 และการใช้น้ำเป็นสารเติมแต่งในการผลิตไบโอดีเซล

สารเติมแต่ง	เวลา (นาที)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์	ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์	ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล
กรดแอสติก	10	99.26	58.13	73.46
	20	99.59	70.04	88.32
น้ำ	10	99.78	57.36	73.98
	20	99.56	68.31	86.14



□ การเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์    ▨ ผลได้ของเอทิลเอสเทอร์    ■ ผลได้ของไบโอดีเซล

**รูปที่ ง.14** ปริมาณน้ำที่ใช้เป็นสารเติมแต่งในการผลิตไบโอดีเซลต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที

**ตารางที่ ง.15** ปริมาณน้ำที่ใช้เป็นสารเติมแต่งในการผลิตไบโอดีเซลต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์ และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที

	ปริมาณน้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมัน)		
	2.5	5	10
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์	97.18	100.00	99.56
ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์	60.75	68.05	68.31
ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล	77.06	84.61	86.14

**ตารางที่ ง.16** ผลการทดลองทั้งหมดของน้ำมันสบู่ดำต่อองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์

ภาวะในการทดลอง	TG	MADG	DAMG	FAEE	TA	FFA	รวม
50:1, 200 บาร์, 330°C, 1 นาที	70.11	10.79	0.93	5.23	0.00	13.08	100
50:1, 200 บาร์, 330°C, 4 นาที	26.53	19.67	4.33	17.21	1.67	14.93	84.3
50:1, 200 บาร์, 330°C, 8 นาที	4.39	11.97	8.10	31.47	2.94	15.67	75.5
30:1, 200 บาร์, 330°C, 8 นาที	52.97	16.96	1.89	9.14	0.10	14.91	95.6
50:1, 200 บาร์, 350°C, 3 นาที	48.02	17.64	2.17	13.00	0.23	13.33	98.5
50:1, 200 บาร์, 350°C, 10 นาที	4.78	11.58	7.40	31.33	2.21	17.78	74.6
50:1, 200 บาร์, 350°C, 20 นาที	1.69	1.51	4.13	39.62	10.10	15.18	72.2
50:1, 200 บาร์, 380°C, 1 นาที	0.93	6.41	6.67	28.46	4.49	18.93	65.9
50:1, 200 บาร์, 380°C, 8 นาที	0.00	0.35	0.43	7.73	2.61	15.08	24.9

หมายเหตุ : TG = ไตรกลีเซอไรด์, MADG = โมโนแอสิตินไดกลีเซอไรด์, DAMG = ไดแอสิตินโมโนกลีเซอไรด์, FAEE = เอทิลเอสเทอร์, TA = ไตรแอสิติน, และ FFA = กรดไขมันอิสระ

**ตารางที่ ง.17** ผลการทดลองทั้งหมดของน้ำมันสบู่ดำต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล

ภาวะในการทดลอง	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ไตรกลีเซอไรด์	ร้อยละผลได้ของ เอทิลเอสเทอร์	ร้อยละผลได้ ของไบโอดีเซล
50:1, 200 บาร์, 330°C, 1 นาที,	24.90	5.40	5.40
50:1, 200 บาร์, 330°C, 4 นาที	70.84	18.92	20.76
50:1, 200 บาร์, 330°C, 8 นาที	94.88	36.68	40.11
30:1, 200 บาร์, 330°C, 8 นาที	21.98	13.46	13.61
50:1, 200 บาร์, 350°C, 3 นาที	49.06	13.79	14.03
50:1, 200 บาร์, 350°C, 10 นาที	94.41	36.58	39.16
50:1, 200 บาร์, 350°C, 20 นาที	97.91	48.86	61.31
50:1, 200 บาร์, 380°C, 1 นาที	98.83	35.96	41.64
50:1, 200 บาร์, 380°C, 8 นาที	100.00	11.75	15.71



**ตารางที่ ง.18** ผลการทดลองทั้งหมดของน้ำมันปาล์มต่อองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์

ภาวะในการทดลอง	TG	MADG	DAMG	FAEE	TA	FFA	รวม
50:1, 200 บาร์, 330°C, 3 นาที	78.88	9.27	0.60	3.30	0.04	7.68	100
50:1, 200 บาร์, 330°C, 10 นาที	55.56	19.34	2.49	8.92	0.28	13.62	99.0
50:1, 200 บาร์, 330°C, 20 นาที	23.75	20.92	5.88	20.89	1.10	16.30	91.6
50:1, 100 บาร์, 330°C, 20 นาที	45.83	21.07	3.92	13.76	0.02	9.50	94.2
50:1, 200 บาร์, 330°C, 30 นาที	4.46	15.18	11.02	43.83	5.01	19.42	90.0
50:1, 200 บาร์, 330°C, 56 นาที	1.13	3.61	7.61	50.00	10.50	16.85	87.8
50:1, 200 บาร์, 350°C, 3 นาที	58.94	17.90	1.95	8.27	0.19	13.58	99.7
50:1, 200 บาร์, 350°C, 10 นาที	6.32	13.58	8.49	31.07	3.31	19.19	82.1
50:1, 200 บาร์, 350°C, 20 นาที	0.71	1.85	5.49	49.04	11.00	17.23	85.5
50:1, 200 บาร์, 350°C, 30 นาที	1.08	0.70	2.87	52.37	12.66	16.78	87.9
50:1, 200 บาร์, 370°C, 3 นาที	9.44	15.08	7.37	23.18	2.04	21.82	78.9
50:1, 200 บาร์, 370°C, 10 นาที	0.29	0.85	3.29	41.41	10.91	18.75	77.9
50:1, 200 บาร์, 370°C, 20 นาที	0.21	0.26	1.03	29.84	8.64	19.09	58.5

หมายเหตุ : TG = ไตรกลีเซอไรด์, MADG = โมโนแอสิตินไตรกลีเซอไรด์, DAMG = ไดแอสิตินโมโนกลีเซอไรด์, FAEE = เอทิลเอสเทอร์, TA = ไตรแอสิติน, และ FFA = กรดไขมันอิสระ

**ตารางที่ ง.19** ผลการทดลองทั้งหมดของน้ำมันปาล์มต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล

ภาวะในการทดลอง	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ไตรกลีเซอไรด์	ร้อยละผลได้ของ เอทิลเอสเทอร์	ร้อยละผลได้ ของไบโอดีเซล
50:1, 200 บาร์, 330°C, 3 นาที	17.86	3.44	3.47
50:1, 200 บาร์, 330°C, 10 นาที	41.60	9.37	9.67
50:1, 200 บาร์, 330°C, 20 นาที	73.75	23.09	24.30
50:1, 100 บาร์, 330°C, 20 นาที	48.88	15.35	15.57
50:1, 200 บาร์, 330°C, 30 นาที	94.81	51.01	56.85
50:1, 200 บาร์, 330°C, 56 นาที	98.64	59.97	72.56
50:1, 200 บาร์, 350°C, 3 นาที	36.12	8.96	9.17
50:1, 200 บาร์, 350°C, 10 นาที	92.36	37.55	41.54
50:1, 200 บาร์, 350°C, 20 นาที	99.13	59.77	73.19
50:1, 200 บาร์, 350°C, 30 นาที	98.71	62.68	77.84
50:1, 200 บาร์, 370°C, 3 นาที	89.06	26.85	29.22
50:1, 200 บาร์, 370°C, 10 นาที	99.62	54.91	69.37
50:1, 200 บาร์, 370°C, 20 นาที	99.73	38.99	50.28

**ตารางที่ ง.20** ผลการทดลองทั้งหมดของน้ำมันปาล์มที่มีการใส่สารเติมแต่งต่อองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ ที่ภาวะอัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอสเทตต่อน้ำมันพืช 50:1 ความดัน 200 บาร์ และ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส

กรดแอสติก (wt%)	น้ำ (wt%)	เวลา (นาที)	TG	MADG	DAMG	FAEE	TA	FFA	รวม
10.0	-	10	3.41	11.04	9.44	39.12	5.38	10.89	93.2
7.5	2.5	10	0.57	4.66	7.89	46.53	9.75	20.55	89.2
5.0	5.0	10	0.83	7.06	8.06	44.24	10.24	20.25	89.3
2.5	7.5	10	0.62	3.96	7.44	48.60	12.82	20.05	95.0
-	10.0	10	0.18	2.66	6.09	48.32	13.99	18.90	91.6
-	2.5	20	2.40	1.16	4.77	51.62	13.85	17.48	91.6
-	5.0	20	0.00	0.99	3.54	55.26	13.46	17.42	91.5
-	7.5	20	0.35	0.46	2.40	58.89	15.38	19.48	95.5
-	10.0	20	0.38	0.33	1.41	58.79	15.34	19.57	96.1

หมายเหตุ : TG = ไตรกลีเซอไรด์, MADG = โมโนแอสตินไตรกลีเซอไรด์, DAMG = ไดแอสตินโมโนกลีเซอไรด์, FAEE = เอทิลเอสเทอร์, TA = ไตรแอสติน, และ FFA = กรดไขมันอิสระ

**ตารางที่ ง.21** ผลการทดลองทั้งหมดของน้ำมันปาล์มที่ใส่สารเติมแต่งต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละผลได้ของเอทิลเอสเทอร์และร้อยละผลได้ของไปโอดีเซล ที่ภาวะอัตราส่วนโดยโมลของเอทิลแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันพืช 50:1 ความดัน 200 บาร์ และอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส

กรดแอสติก (wt%)	น้ำ (wt%)	เวลา (นาที)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง ไตรกลีเซอไรด์	ร้อยละผลได้ของ เอทิลเอสเทอร์	ร้อยละผลได้ ของไปโอดีเซล
10.0	-	10	96.10	44.80	50.96
7.5	2.5	10	99.32	54.72	66.19
5.0	5.0	10	99.06	50.49	62.17
2.5	7.5	10	99.26	58.13	73.46
-	10.0	10	99.78	57.36	73.98
-	2.5	20	97.18	60.75	77.06
-	5.0	20	100.0	68.05	84.61
-	7.5	20	99.59	70.04	88.32
-	10.0	20	99.56	68.31	86.14

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวนันทนา สุตรเชื้อวชาญ เกิดวันที่ 9 ตุลาคม 2533 ที่จังหวัดสระบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร และเข้าศึกษาต่อหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2556 และได้ร่วมเสนอผลงานประชุมทางวิชาการระดับนานาชาติในงาน Management and Innovation Technology International Conference (MITiCON 2014) ในวันที่ 18 ธันวาคม 2557 ชื่อผลงานที่นำเสนอ A GLYCEROL-FREE PROCESS TO PRODUCE BIODIESEL BY USING ETHYL ACETATE งาน 2015 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies (2015 AEDCEE) ในวันที่ 28-29 พฤษภาคม 2558 ชื่อผลงานที่นำเสนอ BIODIESEL PRODUCTION FROM REFINED PALM OIL USING SUPERCRITICAL ETHYL ACETATE IN MICROREACTOR โดยงานวิจัยกล่าวได้ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการของ Elsevier และงาน The 28th International Symposium on Chemical Engineering (ISChE 2015) ในวันที่ 4-6 ธันวาคม 2558 ชื่อผลงานที่นำเสนอ A GLYCEROL-FREE PROCESS FOR PRODUCING BIODIESEL BY SUPERCRITICAL ETHYL ACETATE IN MICROREACTOR

