

จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มโอเลอิน โดยใช้อะซิโตนหรือ  
น้ำมันไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2565  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Kinetics of transesterification of palm olein oil using acetone or biodiesel as a co-  
solvent



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

Department of Chemical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2022

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม
โดย	โอเลอิน โดยใช้อะซิโตนหรือน้ำมันไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วม
สาขาวิชา	นายธีรภัทร หรุปานวงษ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	วิศวกรรมเคมี
	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ธร เจริญศุภนิมิตร

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ศิริพร ดำรงค์ศักดิ์กุล)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ธร เจริญศุภนิมิตร)	
.....	กรรมการ
(ดร.กริชชาติ ว่องไวลิขิต)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นริศรา อินทรจันทร์)	

ธีรภัทร หรูปานวงษ์ : จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มโอเลอิน โดยใช้อะซิโตนหรือน้ำมันไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วม. ( Kinetics of transesterification of palm olein oil using acetone or biodiesel as a co-solvent ) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.พงศธร เจริญศุภานมิตร

ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันพืชและเมทานอลเป็นปฏิกิริยาที่ใช้สำหรับผลิตน้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งเป็นหนึ่งในพลังงานทดแทนสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล แต่เนื่องจากน้ำมันพืชและเมทานอลละลายเข้าด้วยกันได้น้อย การใส่ตัวทำละลายร่วม (co-solvent) เพื่อให้สารตั้งต้นสามารถละลายกันได้ดีขึ้นจึงถูกนำมาศึกษา และจากงานวิจัยในอดีต ผลกระทบของการใช้ตัวทำละลายร่วมต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันจะถูกศึกษาจากปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลที่เกิดขึ้น แต่ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ การเกิดปฏิกิริยาของมอนอกลิเซอโรไรด์ ไตรกลีเซอโรไรด์ และไตรกลีเซอโรไรด์จะถูกศึกษาด้วย งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์เคมีของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มโอเลอิน เมื่อใช้อะซิโตนหรือน้ำมันไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วม การทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (batch reactor) ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 40 ถึง 60 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณตัวทำละลายร่วมตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 20 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 3:1 4:1 5:1 และ 6:1 โดยใช้โซเดียมเมทอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่น้ำหนักร้อยละ 1 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า มอนอกลิเซอโรไรด์มีความไวต่อการทำปฏิกิริยากับเมทานอลสูงที่สุดในบรรดาเหล่ากลีเซอโรไรด์ และการใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นและร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่เวลา 60 นาทีสูงขึ้น เนื่องจากอะซิโตนสามารถทำให้สารในระบบละลายเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ขณะที่การใช้น้ำมันไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นต่ำลงจากการเจือจางความเข้มข้นของสาร อย่างไรก็ตาม ตัวทำละลายร่วมแทบจะไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง และหากปริมาณตัวทำละลายร่วมต่ำกว่าร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันพืช การใช้ตัวทำละลายร่วมแทบจะไม่ส่งผลต่ออัตราการเกิดไบโอดีเซลเริ่มต้น อีกทั้งยังทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นระหว่างมอนอกลิเซอโรไรด์และเมทานอลต่ำลง

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี  
ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6270124021 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD: Transesterification, Co-solvent, Biodiesel

Teerapat Rupanwong : Kinetics of transesterification of palm olein oil using acetone or biodiesel as a co-solvent . Advisor: Asst. Prof. Dr. Pongtorn Charoensuppanimit

Transesterification of vegetable oil and methanol is used to produce biodiesel, which is one of the renewable energies for diesel engines. Co-solvent is added to increase the miscibility of oil and methanol since they are barely miscible. From the previous studies, the influences of co-solvents on transesterification were usually studied from biodiesel formation. However, the reactions of monoglycerides, diglycerides, and triglycerides were studied in this thesis as well. The purpose of this research is to study the chemical kinetics of transesterification of palm olein oil using acetone or biodiesel as co-solvents. The experiments are conducted in a batch reactor at a temperature range of 40 °C to 60 °C. The amounts of co-solvents are varied from 0% to 20% of oil mass. The methanol-to-oil molar ratios are 3:1, 4:1, 5:1, and 6:1 and sodium methoxide used as a catalyst is employed at 1 % of oil mass. The results showed that monoglycerides had the highest reactivity with methanol among the glycerides. And, using acetone as a co-solvent could increase the initial rates and biodiesel yields at 60 minutes because of the greater miscibility. But, using biodiesel as a co-solvent could decrease the initial rates because of the dilution effect. However, the co-solvents barely affected the reaction at a high temperature, and the co-solvent barely affected the biodiesel formation initial rate when the co-solvent amounts were below 10% of oil mass. In fact, the use of co-solvents below 10% of oil mass decreased the initial rate between monoglycerides and methanol.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Field of Study: Chemical Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2022

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ผมขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ธร เจริญศุภนิมิตร ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ที่คอยให้คำปรึกษา สนับสนุน และผลักดันจนผมสามารถทำวิทยานิพนธ์ได้อย่างสำเร็จลุล่วง

ผมขอขอบคุณศาสตราจารย์ ดร.ศิริพร ดำรงค์ศักดิ์กุล ประธานกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.กริชชาติ ว่องไวลิขิต และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นริศรา อินทรจันทร์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำอัน เป็นประโยชน์และทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ผมขอขอบคุณอาจารย์ ดร.เจ็ดศักดิ์ ไชยคุนา ที่คอยให้คำปรึกษา ความช่วยเหลือ และความรู้อันเป็น ประโยชน์ตลอดการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ผมขอขอบคุณบริษัท ปิยะศิริวานิช จำกัด ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ สारเมทานอลและโซเดียมเมทอกไซด์ และ เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีตลอดการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ผมขอขอบคุณพี่ศิวกร นามเชื่อนแพทย์ ที่คอยช่วยเหลือ ดูแล และอำนวยความสะดวกตลอดการทำ วิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ผมขอขอบคุณบิดา และมารดา ผู้เป็นกำลังใจคอยผลักดันและให้การเลี้ยงดูเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ ผมขอขอบคุณคนใกล้ชิด เพื่อนฝูง และพี่น้องร่วมห้องปฏิบัติการที่คอยเป็นกำลังใจ ร่วมทุกข์ร่วม สุข และให้การสนับสนุนที่ตีมาโดยตลอด

ธีรภัทร ทรูปานวงษ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ถ
บทที่ 1 บทนำ.....	22
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	22
1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย.....	23
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	24
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	24
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
2.1 คุณสมบัติของไบโอดีเซล.....	25
2.2 ตัวทำละลายร่วม.....	26
2.2.1 อะซิโตน.....	26
2.2.2 ไบโอดีเซล.....	27
2.3 ปฏิกริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันพืชและเมทานอล.....	27
2.4 บทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปฏิกริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกริยาแบบเบสเอกพันธ์ เมื่อไม่มีการใช้ตัวทำละลายร่วม.....	29

2.5	บทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสเอกพันธ์ เมื่อมีการใช้ตัวทำละลายร่วม .....	32
2.6	ข้อสรุปจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันพืช .....	34
2.6.1	จลนพลศาสตร์และพฤติกรรมของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันพืช .....	34
2.6.2	ตัวแปรที่สำคัญต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันพืช .....	35
2.6.2.1	ชนิดและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา .....	35
2.6.2.2	ความเร็วรอบในการปั่นกวน .....	35
2.6.2.3	อุณหภูมิ .....	35
2.6.2.4	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช .....	35
2.6.2.5	ชนิดและปริมาณตัวทำละลายร่วม .....	35
บทที่ 3	การทดลอง .....	37
3.1	สารตั้งต้นและสารเคมี .....	37
3.2	วิธีการทดลอง .....	37
3.3	การวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	38
3.3.1	วิธีแก๊สโครมาโทกราฟี .....	38
3.3.2	การไตเตรตปริมาณกลีเซอรอล .....	39
3.4	การคำนวณ .....	40
3.4.1	การคำนวณร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล (%yield) .....	40
3.4.2	การคำนวณความเข้มข้นของสารแต่ละชนิด .....	40
3.4.3	การคำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาของแต่ละขั้นตอน .....	42
3.4.4	การคำนวณความคลาดเคลื่อน .....	43
บทที่ 4	ผลการทดลองและอภิปราย .....	44
4.1	จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม .....	45
4.1.1	เมื่อไม่มีการใช้ตัวทำละลายร่วม .....	45



4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม เมื่อไม่มีตัวทำละลาย รวม .....	52
4.3 อิทธิพลของตัวแปรต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัว ทำละลายรวม .....	54
4.3.1 อิทธิพลของปริมาณตัวทำละลายรวม .....	54
4.3.3 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม .....	58
4.4 อิทธิพลของตัวแปรต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม เมื่อใช้ไปโอติเซลเป็นตัว ทำละลายรวม .....	61
4.4.3 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช .....	66
4.5 การเปรียบเทียบอิทธิพลของตัวแปรต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน .....	68
บทที่ 5 .....	73
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	73
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	73
ภาคผนวก.....	74
ภาคผนวก ก ค่าแฟกเตอร์ตอบสนอง .....	75
ภาคผนวก ข มวลโมเลกุลของไปโอติเซลและเหล้ากลีเซอรไรด์ของน้ำมันปาล์มโอเลอิน .....	80
ภาคผนวก ค ผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อไม่มีตัวทำละลายรวม .....	82
ภาคผนวก ง ผลของปริมาณตัวทำละลายรวมต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อใช้อะซิโตน เป็นตัวทำละลายรวม .....	85
ภาคผนวก จ ผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลาย รวม .....	90
ภาคผนวก ฉ ผลของอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อใช้อะซิโตน เป็นตัวทำละลายรวม .....	93
ภาคผนวก ช ผลของปริมาณตัวทำละลายรวมต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อใช้ไปโอติเซล เป็นตัวทำละลายรวม .....	97

ภาคผนวก ซ ผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลาย รวม .....	101
ภาคผนวก ณ ผลของอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายรวม .....	104
ภาคผนวก ญ การคำนวณความคลาดเคลื่อน .....	108
บรรณานุกรม .....	110
ประวัติผู้เขียน .....	112



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างไบโอดีเซลและน้ำมันดีเซล [1].....	25
ตารางที่ 2 กรดไขมันของน้ำมันพืชแต่ละชนิด [1].....	26
ตารางที่ 3 สารตั้งต้นและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง .....	37
ตารางที่ 4 ตัวอย่างการคำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาจากความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอรไรด์ .....	42
ตารางที่ 5 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล เมื่อไม่มีตัวทำละลายร่วม โดยใช้ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 .....	53
ตารางที่ 6 อิทธิพลของปริมาณอะซิโตนต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 .....	56
ตารางที่ 7 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมที่ ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 .....	58
ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบอิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อร้อยละผลได้ของไบโ อดีเซล เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ทำการ ทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส .....	60
ตารางที่ 9 อิทธิพลของปริมาณตัวทำละลายร่วมต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็น ตัวทำละลายร่วม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล ต่อน้ำมันปาล์ม 6:1.....	63
ตารางที่ 10 อิทธิพลของอุณหภูมิร่วมต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำ ละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อ น้ำมันปาล์ม 6:1 .....	65
ตารางที่ 11 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล เมื่อใช้ไบโ อดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส .....	66

ตารางที่ 12 การเปรียบเทียบอภิทธิพลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ที่เวลา 1 นาที ระหว่างมีและไม่มีตัวทำละลายร่วม เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 6:1 และในการทดลองที่มีการใช้ตัวทำละลายร่วม ปริมาณตัวทำละลายร่วมจะเท่ากับร้อยละ 10 โดยมวลน้ำมันปาล์ม ..... 68

ตารางที่ 13 การเปรียบเทียบอภิทธิพลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ ณ ช่วงท้ายปฏิกิริยา ระหว่างมีและไม่มีตัวทำละลายร่วม ทำการทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 และในการทดลองที่มีการใช้ตัวทำละลายร่วม ปริมาณตัวทำละลายร่วมจะเท่ากับร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ..... 69

ตารางที่ 14 การเปรียบเทียบอภิทธิพลของปริมาณตัวทำละลายร่วมต่อร้อยละผลได้ที่ของไปโอดีเซลที่เวลา 1 นาที ระหว่างการใช้อะซิโตนและไปโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1..... 70

ตารางที่ 15 การเปรียบเทียบอภิทธิพลของปริมาณตัวทำละลายร่วมต่อร้อยละผลได้ที่ของไปโอดีเซล ณ ช่วงท้ายปฏิกิริยา ระหว่างการใช้อะซิโตนและไปโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 ..... 70

ตารางที่ 16 การเปรียบเทียบอภิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อร้อยละผลได้ที่เวลา 1 นาที ระหว่างกาใช้อะซิโตนและไปโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวทำละลายร่วมร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ..... 71

ตารางที่ 17 การเปรียบเทียบอภิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อร้อยละผลได้ที่ของไปโอดีเซล ณ ช่วงท้ายปฏิกิริยา ระหว่างกรณีใช้อะซิโตนและไปโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวทำละลายร่วมร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ..... 72

ตารางที่ 18 พื้นที่จุดยอดและปริมาณของไปโอดีเซลแต่ละชนิดที่อยู่ในสารไปโอดีเซลมาตรฐาน และค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของไปโอดีเซลแต่ละชนิด ..... 75

ตารางที่ 19 ตัวอย่างการคำนวณปริมาณไปโอดีเซล โดยมวลของสารมาตรฐานเท่ากับ 0.503 กรัม และใช้ตัวอย่างไปโอดีเซล 1.0140 กรัม ..... 77

ตารางที่ 20 ปริมาณและพื้นที่จุดยอดของสารแต่ละชนิดเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี ..... 78

ตารางที่ 21 ปริมาณของกรดไขมันแต่ละชนิดในน้ำมันปาล์มที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ..... 80

ตารางที่ 22 มวลโมเลกุลเฉลี่ยของกรดไขมัน ไบโอดีเซล และเหล้ากลีเซอรไรด์ของน้ำมันปาล์มที่ใช้เป็นสารตั้งต้น.....	81
ตารางที่ 23 แสดงผลของอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส ที่มีต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และความเข้มข้นของเหล้ากลีเซอรไรด์ที่เวลาต่างๆ เมื่อไม่มีตัวทำละลายร่วม โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 .....	82
ตารางที่ 24 แสดงผลของอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนที่เวลาต่างๆ เมื่อไม่มีตัวทำละลายร่วม โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1.....	82
ตารางที่ 25 แสดงผลของอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส ที่มีต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และความเข้มข้นของเหล้ากลีเซอรไรด์ที่เวลาต่างๆ เมื่อไม่มีตัวทำละลายร่วม โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 .....	83
ตารางที่ 26 แสดงผลของอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนที่เวลาต่างๆ เมื่อไม่มีตัวทำละลายร่วม โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1.....	83
ตารางที่ 27 แสดงผลของอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส ที่มีต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และความเข้มข้นของเหล้ากลีเซอรไรด์ที่เวลาต่างๆ เมื่อไม่มีตัวทำละลายร่วม โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 .....	84
ตารางที่ 28 แสดงผลของอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนที่เวลาต่างๆ เมื่อไม่มีตัวทำละลายร่วม โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1.....	84
ตารางที่ 29 แสดงผลของปริมาณตัวทำละลายร่วมที่ร้อยละ 0 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ที่มีต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และความเข้มข้นของเหล้ากลีเซอรไรด์ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วม โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1.....	85
ตารางที่ 30 แสดงผลของปริมาณตัวทำละลายร่วมที่ร้อยละ 0 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วม โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 .....	85













รวมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม และทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส .....	106
ตารางที่ 72 แสดงผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 5:1 ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายรวมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม และทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส .....	106
ตารางที่ 73 แสดงผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 ที่มีต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอรไรด์ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายรวมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม และทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส .....	107
ตารางที่ 74 แสดงผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายรวมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม และทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส .....	107
ตารางที่ 75 การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ปริมาณไบโอดีเซล .....	108
ตารางที่ 76 การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ไตรกลีเซอรไรด์ .....	108
ตารางที่ 77 การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ปริมาณมอนอกลิเซอรไรด์และไดกลีเซอรไรด์ .....	109
ตารางที่ 78 ตัวอย่างการคำนวณความคลาดเคลื่อนของร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล เมื่อไม่มีตัวทำละลายรวม โดยการทดลองทำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 .....	109

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1 โครงสร้างโมเลกุลของอะซิโตน .....	27
รูปที่ 2 โครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบเอสเทอร์ (หมู่อะคิลสีแดงและหมู่แอลคอกซิลสีน้ำเงิน) ....	27
รูปที่ 3 ปฏิกริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันพืชและเมทานอลในแต่ละขั้นตอน.....	28
รูปที่ 4 ปฏิกริยาข้างเคียงของปฏิกริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน .....	28
รูปที่ 5 กลไกการเกิดปฏิกริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของตัวเร่งปฏิกริยาแบบเอกพันธ์จำพวกเบส....	28
รูปที่ 6 การติดตั้งอุปกรณ์ทำการทดลอง .....	38
รูปที่ 7 โครมาโตแกรมของสารตัวอย่างที่วิเคราะห์ด้วยวิธี EN14103 (รูป ก) และวิธี EN14105 (รูป ข) .....	39
รูปที่ 8 การเก็บตัวอย่างในแต่ละขั้นตอน .....	41
รูปที่ 9 ภูมิภาคของสารผสมในปฏิกริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน ไม่มีการใช้ตัวทำละลายร่วม (ก) ภูมิภาคน้ำมันพืช (ข) ภูมิภาคของสารผสมในช่วงต้นปฏิกริยา (ค) ภูมิภาคของสารผสมในช่วงกลางและท้ายปฏิกริยา ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 .....	45
รูปที่ 10 ความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดที่เวลาต่างๆ เมื่อไม่มีตัวทำละลายร่วม (ก) สารผลิตภัณฑ์ (ข) สารตั้งต้นและสารมัธยันตร์ ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 .....	46
รูปที่ 11 อัตราการเกิดปฏิกริยาในแต่ละขั้นตอนในช่วง 3 นาทีแรก เมื่อไม่มีตัวทำละลายร่วม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1....	47
รูปที่ 12 ภูมิภาคของสารผสมในปฏิกริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม (ก) ภูมิภาคน้ำมันพืช (ข) ภูมิภาคในช่วงต้นปฏิกริยา (ค) ภูมิภาคในช่วงกลางและท้ายปฏิกริยา ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1.....	48

รูปที่ 13 ภูมิภาคของสารผสมระหว่างไปโอดีเซล กลีเซอรอล เมทานอล ตัวเร่งปฏิกิริยา และอะซิโตนที่ ปริมาณร้อยละ (ก) 0 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม (ข) 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม (ค) 20 โดยมวลของ น้ำมันปาล์ม..... 49

รูปที่ 14 ความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณ ร้อยละ 10 โดยมวลน้ำมันปาล์ม (ก) สารผลิตภัณฑ์ (ข) สารตั้งต้นและสารมัธยันตร์ ทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1..... 50

รูปที่ 15 อัตราการเกิดปฏิกิริยาในแต่ละขั้นตอนในช่วง 3 นาทีแรก เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลาย ร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลน้ำมันปาล์ม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ใช้ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1..... 51

รูปที่ 16 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อไม่มีตัวทำละลายร่วม โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 ..... 52

รูปที่ 17 อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นของแต่ละขั้นตอนที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อไม่มีตัวทำละลายร่วม โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 ..... 53

รูปที่ 18 อิทธิพลของปริมาณอะซิโตนต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน ทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1..... 55

รูปที่ 19 อิทธิพลของปริมาณอะซิโตนต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นในแต่ละขั้นตอน ทำการทดลอง ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 ..... 56

รูปที่ 20 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำ ละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อ น้ำมันปาล์ม 6:1 ..... 57

รูปที่ 21 อิทธิพลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นในแต่ละขั้นตอน เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัว ทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล ต่อน้ำมันปาล์ม 6:1..... 58

รูปที่ 22 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อ ใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ..... 59

รูปที่ 23 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาในแต่ละขั้นตอน เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส .....	60
รูปที่ 24 ปฏิกิริยาควบนั่นกับตัวเองของอะซิโตน [20] .....	61
รูปที่ 25 อิทธิพลของปริมาณตัวทำละลายร่วมต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 .....	62
รูปที่ 26 อิทธิพลของปริมาณตัวทำละลายร่วมต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นในแต่ละขั้นตอน เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 .....	63
รูปที่ 27 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 .....	64
รูปที่ 28 อิทธิพลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นในแต่ละขั้นตอน เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 .....	65
รูปที่ 29 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส .....	66
รูปที่ 30 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นในแต่ละขั้นตอน เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส .....	67
รูปที่ 31 โครมาโตแกรมของสารไบโอดีเซลมาตรฐาน .....	76
รูปที่ 32 โครมาโตแกรมของตัวอย่างที่เวลา 2 นาที (รูปบน) และ 10 นาที (รูปล่าง) .....	78
รูปที่ 33 โมเลกุลของกรดไขมัน ไบโอดีเซล ไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และมอนอกลิเซอไรด์ .	81

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

แพตตีแอซิดเมทิลเอสเทอร์ (Fatty acid methyl ester; FAME) หรือไบโอดีเซล เป็นเชื้อเพลิงพลังงานทดแทนสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลที่ผลิตได้จากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และปล่อยก๊าซพิษ เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ น้อยกว่าเชื้อเพลิงดีเซลจากปิโตรเลียม [1] ในปัจจุบันมีการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชหลายชนิด เช่น ปาล์ม มะพร้าว ถั่วเหลือง ข้าวโพด สับปะรด หรือ น้ำมันที่เหลือจากการทำอาหาร โดยน้ำมันพืชต่างชนิดกันจะทำให้ไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีคุณสมบัติต่างกัน เช่น จุดเดือด จุดหลอมเหลว เลขซีเทน และความสามารถในการหล่อลื่น ในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้น้ำมันปาล์มโอเลอินมีจำนวนมาก และราคาไม่สูงเมื่อเทียบกับน้ำมันพืชชนิดอื่น ดังนั้นน้ำมันปาล์มโอเลอินจึงเป็นน้ำมันที่นิยมใช้ในการผลิตไบโอดีเซลในภูมิภาคนี้ และถูกเลือกเพื่อศึกษาในงานวิจัยนี้

โดยปกติแล้ว ไบโอดีเซลจะผลิตจากปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน (transesterification) ระหว่างน้ำมันพืชและเมทานอล ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่อเนื่อง 3 ขั้นตอน [2] โดยขั้นแรกน้ำมันพืชหรือสารไตรกลีเซอไรด์ (triglycerides) จะทำปฏิกิริยากับเมทานอลได้สารไดกลีเซอไรด์ (diglycerides) และไบโอดีเซล จากนั้นขั้นที่สองสารไดกลีเซอไรด์จะทำปฏิกิริยากับเมทานอลได้สารมอนอกลิเซอไรด์ (monoglycerides) และไบโอดีเซล และขั้นสุดท้ายสารมอนอกลิเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับเมทานอล ได้กลีเซอรอลและไบโอดีเซล ดังที่แสดงในสมการที่ (1.1) ถึง (1.3) หรือกล่าวโดยรวมคือสารไตรกลีเซอไรด์ 1 โมล จะทำปฏิกิริยากับเมทานอล 3 โมล ได้ไบโอดีเซล 3 โมล และกลีเซอรอล 1 โมล



การผลิตไบโอดีเซลโดยทั่วไปจะใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชที่ 6 ต่อ 1 ซึ่งสูงกว่าสัดส่วนที่ต้องการตามปริมาณสารสัมพันธ์ (stoichiometric) ที่ 3 ต่อ 1 เพื่อให้สารไตรกลีเซอไรด์ถูกใช้จนหมด โดยปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างน้ำมันพืชและเมทานอลสามารถเกิดขึ้นได้ในทั้งสภาวะที่มีและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา หากไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา การเกิดปฏิกิริยาต้องใช้อุณหภูมิและความดันสูงทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน ดังนั้นการผลิตไบโอดีเซลจึงนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ศึกษาในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันพืชมีทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (homogeneous catalyst) และตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous catalyst) อย่างไรก็ตาม ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาและร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลสูงกว่า นอกจากนี้ ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์จำพวกเบสก่อให้เกิดอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สูงกว่า อุณหภูมิที่ใช้ในปฏิกิริยาค่ากว่า และกักร้อนอุปกรณ์น้อยกว่าเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์จำพวกกรด [1] ดังนั้นในอุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซลจึงนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (homogeneous catalyst) จำพวกเบสของแอล

คาไลน์ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมเมทอกไซด์ โพแทสเซียมเมทอกไซด์ เป็นต้น โดยงานวิจัยนี้จะเลือกใช้โซเดียมเมทอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณร้อยละ 1 โดยมวลของน้ำมันพืช เนื่องจากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล [3]

นอกจากนี้ ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันพืชและเมทานอลเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างของเหลวสองวัฏภาค ได้แก่ วัฏภาคน้ำมันพืช (oil phase) และวัฏภาคเมทานอล (methanol phase) เนื่องจากน้ำมันพืชละลายในเมทานอลได้น้อย และเป็นช่วงที่ปฏิกิริยาเกิดช้าจากอัตราการถ่ายโอนมวลระหว่างวัฏภาคที่ต่ำ [2] โดยน้ำมันพืชต้องแพร่จากวัฏภาคน้ำมันไปยังวัฏภาคเมทานอลแล้วจึงเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาละลายอยู่ในวัฏภาคของเมทานอลเป็นหลัก [4] จากนั้นเมื่อไบโอดีเซลเกิดขึ้นในปริมาณหนึ่ง ปฏิกิริยาจะเกิดเร็วขึ้นเนื่องจากไบโอดีเซลสามารถประพฤติตัวเป็นตัวทำละลายร่วม ทำให้น้ำมันพืชและเมทานอลละลายกันได้ดีขึ้น

โดยทั่วไป ไบโอดีเซลจะถูกผลิตที่อุณหภูมิไม่เกินจุดเดือดของเมทานอลหรือ 60 ถึง 65 องศาเซลเซียส และมีการปั่นกวตลตลอดเวลา เพื่อให้ได้อัตราการถ่ายโอนมวลและอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงที่สุดในขณะที่เมทานอลยังคงเป็นของเหลว จากปัญหาการถ่ายโอนมวลต่ำระหว่างน้ำมันพืชและเมทานอลส่งผลให้เริ่มมีการศึกษาการใช้ตัวทำละลายร่วม (co-solvent) จากงานวิจัยของ Y. Maeda และคณะ (2011) [5] แสดงให้เห็นว่า การใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมทำให้สารไตรกลีเซอไรด์และเมทานอลละลายเข้าด้วยกันได้ดีขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิด (reaction rate) และร้อยละผลได้ (% yield) ของไบโอดีเซลสูงขึ้น และจากงานวิจัยของ S.N. Csernica และ J.T. Hsu (2012) [4] แสดงให้เห็นว่า การเติมไบโอดีเซลในวัฏภาคของเมทานอลทำให้ไตรกลีเซอไรด์ละลายในเมทานอลได้สูงขึ้น จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่า การใช้ตัวทำละลายร่วมทำให้วัฏภาคน้ำมันและเมทานอลละลายเข้าด้วยกันได้ดีขึ้น และอาจช่วยให้การผลิตไบโอดีเซลเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำลง ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยฉบับนี้จึงศึกษาการใช้ตัวทำละลายร่วมในการผลิตไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่ำ ได้แก่ 40 และ 50 องศาเซลเซียส เพิ่มเติมจากการผลิตไบโอดีเซลที่อุณหภูมิกปกติที่ 60 องศาเซลเซียส

ตัวทำละลายร่วมที่ถูกศึกษาในอดีตมีหลายชนิด เช่น เตตระไฮโดรฟูราน ไดเอทิลอีเทอร์ เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้จะศึกษาการใช้อะซิโตนหรือไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วม ซึ่งสารทั้งสองส่งผลต่อการผลิตไบโอดีเซลตามงานวิจัยที่ผ่านมา [4, 5] และมีความสะดวกในการใช้ในระดับอุตสาหกรรม โดยอะซิโตนนั้นมีจุดเดือดใกล้เคียงกับเมทานอล ทำให้อะซิโตนถูกระเหยมาพร้อมกับเมทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาในขั้นตอนของการกู้คืนเมทานอล (methanol recovery) ในทางเดียวกัน การใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมทำให้ไม่ต้องมีการแยกตัวทำละลายร่วมออกจากผลิตภัณฑ์

อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยในอดีต อิทธิพลของการใช้ตัวทำละลายร่วมตัวทำละลายร่วมต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันมักจะถูกศึกษาจากปริมาณไบโอดีเซลที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงอิทธิพลของตัวทำละลายร่วมต่อปฏิกิริยาโดยรวมเท่านั้น แต่ไม่สามารถวิเคราะห์ถึงผลกระทบของตัวทำละลายร่วมต่อปฏิกิริยาในแต่ละขั้นตอนดังสมการที่ (1.1) ถึง (1.3) ได้ ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงเกิดขึ้นมาเพื่อศึกษาผลกระทบของตัวทำละลายร่วมต่อจลนพลศาสตร์เคมี (chemical kinetics) ของปฏิกิริยาในแต่ละขั้นตอนเพิ่มเติมจากงานวิจัยที่ผ่านมา

## 1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาผลกระทบจากการใช้ตัวทำละลายร่วม ได้แก่ อะซิโตนหรือไบโอดีเซล ต่อจลนพลศาสตร์เคมี (chemical kinetics) ในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มโอเลอิน



### 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำตัวทำละลายร่วมไปใช้ในการผลิตไบโอดีเซลในระดับอุตสาหกรรมได้

### 1.4 ขอบเขตงานวิจัย

- ทำการศึกษามลของตัวทำละลายร่วม อะซิโตน และ ไบโอดีเซล
- ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส
- ทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศ
- ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยมวลของน้ำมันพืช
- อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเท่ากับ 1:3 1:4 1:5 และ 1:6
- ปริมาณของตัวทำละลายร่วมร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยมวลของน้ำมันพืช



## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 คุณสมบัติของไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงพลังงานทดแทนสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล มีข้อดีหลายประการ เช่น ผลิตได้จากน้ำมันพืชซึ่งเป็นพลังงานหมุนเวียน ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ปล่อยก๊าซพิษน้อยกว่าเชื้อเพลิงดีเซล เป็นต้น การใช้ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ร้อยละ 46.7 ลดการปล่อยฝุ่นละอองได้ร้อยละ 66.7 และลดไฮโดรคาร์บอนที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ร้อยละ 45.2 เมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล [1]

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างไบโอดีเซลและน้ำมันดีเซล [1]

คุณสมบัติ	ไบโอดีเซล	น้ำมันดีเซล
มาตรฐาน	ASTM D6751	ASTM D975
ค่าความร้อน, บีทียูต่อแกลลอน	ประมาณ 118,170	ประมาณ 129,050
ความหนืดจลศาสตร์, ที่ 40 องศาเซลเซียส	4.0-6.0	1.3-4.1
ความหนาแน่น, กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	880	850
ปริมาณน้ำและตะกอน, ร้อยละโดยปริมาตร	0.05 เป็นอย่างมาก	0.05 เป็นอย่างมาก
ปริมาณคาร์บอน, ร้อยละโดยมวล	77	87
ปริมาณไฮโดรเจน, ร้อยละโดยมวล	12	12
ปริมาณออกซิเจน, ร้อยละโดยมวล	11	0
ปริมาณซัลเฟอร์, ร้อยละโดยมวล	0.0-0.0024	0.05
จุดเดือด, องศาเซลเซียส	315-350	180-340
จุดวาบไฟ, องศาเซลเซียส	100-170	60-80
จุดเกิดหมอก, องศาเซลเซียส	-3 ถึง 12	-15 ถึง 5
จุดเริ่มไหล, องศาเซลเซียส	-15 ถึง 10	-35 ถึง -15
เลขซีเทน	48-65	40-55
ความหล่อลื่น SLBOCLE, กรัม	มากกว่า 7,000	2,000 – 5,000
ความหล่อลื่น HFRR, ไมโครเมตร	น้อยกว่า 300	300 – 600

ไบโอดีเซลสามารถผลิตได้จากน้ำมันพืชหลายชนิด เช่น ปาล์ม ข้าวโพด เรปซีด มะพร้าว เป็นต้น โดยน้ำมันพืชที่เหมาะสมสำหรับใช้ผลิตไบโอดีเซลจะแตกต่างกันในแต่ละภูมิภาค ในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้น้ำมันปาล์มโอเลอินมีจำนวนมาก และราคาไม่สูงเมื่อเทียบกับน้ำมันพืชชนิดอื่น ดังนั้นน้ำมันปาล์มโอเลอินจึงเป็นที่นิยมสำหรับการผลิตไบโอดีเซลในภูมิภาคนี้ ซึ่งไบโอดีเซลที่ผลิตจากพืชต่างชนิดกันจะมีคุณสมบัติต่างกัน เนื่องจากน้ำมันจากพืชแต่ละชนิดมีกรดไขมันเป็นองค์ประกอบที่ต่างกัน ดังตารางที่ 2 ยิ่งน้ำมันพืชมีกรดไขมันอิ่มตัวสูง ไบโอดีเซลที่ผลิตได้จะมีเลขซีเทน จุดเกิดหมอก และเสถียรภาพสูง (stability) ในปัจจุบันไบโอดีเซลนิยมผลิตจากปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างน้ำมันพืชและแอลกอฮอล์ โดยแอลกอฮอล์ที่นิยมใช้คือเมทานอลเนื่องจากมีราคาถูก [1]

ตารางที่ 2 กรดไขมันของน้ำมันพืชแต่ละชนิด [1]

น้ำมันหรือไขมัน	ร้อยละน้ำหนักของกรดไขมัน								
	12:0	14:0	16:0	18:0	18:1	18:2	18:3	20:0	22:1
คาโนลา	-	-	4-5	1-2	55-63	20-31	9-10	-	1-2
มะพร้าว	44-51	13-18.5	7.5-10.5	1-3	5-8.2	1-2.6	-	-	-
ข้าวโพด	-	-	7-13	2.5-3	30.5-43	39-52	1	-	-
เมล็ดฝ้าย	-	0.8-1.5	22-24	2.6-5	19	50-52.5	-	-	-
มะกอก	-	1.3	7-18.3	1.4-3.3	55.5	4-19	-	-	-
ปาล์มโอเลอิน	0.5	1	31.5	3	49	14	0.3	0.4	-
เรพซีด	-	1.5	1-4.7	1-3.5	13-38	9.5-22	1-10	-	40-64
งา	-	-	7.2-9.2	5.8-7.7	35-46	35-48	-	-	-
ถั่วเหลือง	-	-	2.3-11	2.4-6	22-30.8	49-53	2-10.5	-	-
เมล็ดทานตะวัน	-	-	3.5-6.5	1.3-5.6	14-43	44-68.7	-	-	-
ไขมันสัตว์	-	3-6	25-37	14-29	26-50	1-2.5	-	-	-

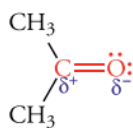
## 2.2 ตัวทำละลายร่วม

เนื่องจากน้ำมันพืชและเมทานอลละลายเข้าด้วยกันได้น้อย การเพิ่มการละลายระหว่างน้ำมันพืชและเมทานอลจะทำให้ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันเกิดได้ดีขึ้น และสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเพิ่มอุณหภูมิ การเพิ่มความเร็วในการปั่นกววน ซึ่งทั้งสองวิธีนี้เป็นวิธีที่สิ้นเปลืองพลังงาน อย่างไรก็ตาม ยังมีอีกวิธีที่ใช้ในการเพิ่มการละลายระหว่างน้ำมันพืชและเมทานอล คือการใช้ตัวทำละลายร่วม มีงานวิจัยในอดีตหลายชิ้นที่ศึกษาการใช้ตัวทำละลายร่วมในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เช่น D.G.B. Boocock และคณะ (1996) [6] ได้ศึกษาการใช้เตตระไฮโดรฟูรานเป็นตัวทำละลายร่วมระหว่างน้ำมันถั่วเหลืองและเมทานอล ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า การใช้เตตระไฮโดรฟูรานเป็นตัวทำละลายร่วมทำให้น้ำมันพืชและเมทานอลละลายเข้าด้วยกันเป็นเนื้อเดียว และส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น

ตัวทำละลายร่วมที่ถูกศึกษาในงานวิจัยฉบับนี้ถูกเลือกบนพื้นฐานของความสะดวกในการใช้ในระดับอุตสาหกรรม โดยความสะดวกของการใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมคือ อะซิโตนนั้นมีจุดเดือดอยู่ที่ 56 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าจุดเดือดของเมทานอลที่ 65 องศาเซลเซียส ทำให้เมื่อระเหยเมทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ อะซิโตนถูกระเหยมาพร้อมกับเมทานอล และข้อดีของการใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมคือ ไม่มีความจำเป็นต้องแยกตัวทำละลายร่วมออกจากผลิตภัณฑ์ เนื่องจากไบโอดีเซลเองก็เป็นผลิตภัณฑ์อยู่แล้ว

### 2.2.1 อะซิโตน

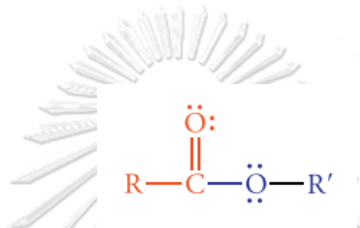
อะซิโตนเป็นสารประกอบประเภทคีโตน (ketone) มีสูตรโมเลกุลคือ  $\text{CH}_3\text{-CO-CH}_3$  ดังรูปที่ 1 โมเลกุลของอะซิโตนมีทั้งส่วนที่ไม่มีขั้วและมีขั้วจึงทำให้อะซิโตนสามารถละลายได้ทั้งในน้ำมันพืชและเมทานอล โดยส่วนที่ไม่มีขั้วคือส่วนที่เป็นหมู่อัลคิล (alkyl group) และส่วนที่มีขั้วคือส่วนที่เป็นหมู่อคาร์บอนิล (carbonyl group)



รูปที่ 1 โครงสร้างโมเลกุลของอะซิโตน

### 2.2.2 ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นสารประกอบประเภทเอสเทอร์ (ester) ซึ่งเกิดจากการสร้างพันธะระหว่างหมู่เอซิล (acyl group, R-CO-) และหมู่แอลคอกซี (alkoxy group, -OR') ดังรูปที่ 2 โดยน้ำมันพืชที่ต่างชนิดกัน จะส่งผลให้หมู่เอซิลต่างกัน ขณะที่แอลคอกซีที่ต่างชนิดกันจะทำให้หมู่แอลคอกซีในโมเลกุลของไบโอดีเซลต่างกัน โมเลกุลของไบโอดีเซลมีทั้งส่วนที่ไม่มีขั้วและมีขั้ว โดยส่วนที่ไม่มีขั้วคือส่วนที่เป็นหมู่เอซิล และส่วนที่มีขั้วคือส่วนที่เป็นหมู่เอสเทอร์ (-COO-)



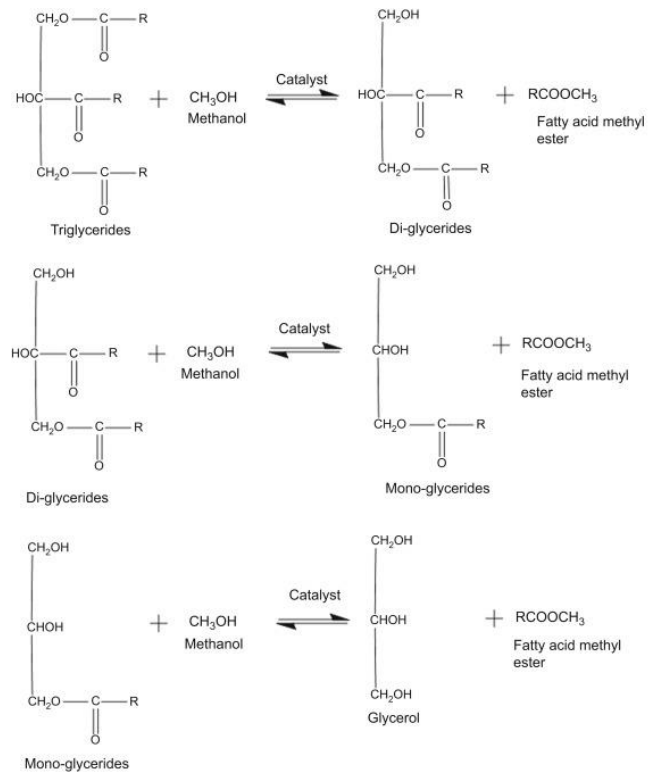
รูปที่ 2 โครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบเอสเทอร์ (หมู่เอซิลสีแดงและหมู่แอลคอกซีสีน้ำเงิน)

### 2.3 ปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชันระหว่างน้ำมันพืชและเมทานอล

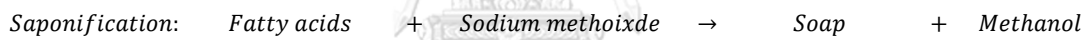
ปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชันระหว่างน้ำมันพืชและเมทานอลเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่อเนื่อง 3 ขั้นตอน และเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน [7] โดยขั้นแรกน้ำมันพืชหรือสารไตรกลีเซอไรด์จะทำปฏิกิริยากับเมทานอลได้สารไตรกลีเซอไรด์และไบโอดีเซล จากนั้นขั้นที่สองสารไตรกลีเซอไรด์จะทำปฏิกิริยากับเมทานอลได้สารมอนอกลิเซอไรด์และไบโอดีเซล และขั้นสุดท้ายสารมอนอกลิเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับเมทานอลได้กลีเซอรอลและไบโอดีเซล โดยปฏิกิริยาถูกแสดงดังรูปที่ 3 หรือกล่าวโดยรวมคือสารไตรกลีเซอไรด์ 1 โมล จะทำปฏิกิริยากับเมทานอล 3 โมล ได้ไบโอดีเซล 3 โมล และกลีเซอรอล 1 โมล

โดยทั่วไป ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์จำพวกเบสจะเป็นที่นิยมใช้ในการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สูง อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาค่า และกักร้อนน้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบจำพวกกรด อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์จำพวกเบส น้ำมันพืชที่ใช้ควรมีกรดไขมันต่ำกว่าร้อยละ 0.5 โดยมวล และในระบบการทำปฏิกิริยาควรปราศจากน้ำ [7] เพื่อป้องกันการสูญเสียตัวเร่งปฏิกิริยาจากการทำปฏิกิริยากับกรดไขมัน และป้องกันการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์ที่แสดงดังรูปที่ 4

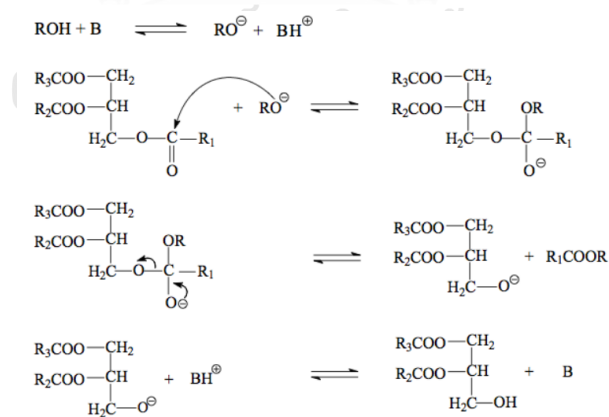
กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชันเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์จำพวกเบสถูกแสดงดังรูปที่ 5 ในขั้นตอนแรกตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกเบส (B) จะรับโปรตอนจากเมทานอล ทำให้เมทานอลอยู่ในรูปเมทอกไซด์ไอออน (RO) จากนั้นเมทอกไซด์ไอออนจะไปทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอนิลของไตรกลีเซอไรด์กลายเป็นสารมัธยันตร์เตตระฮีดรัลไอออน (tetrahedral intermediate ion) และเปลี่ยนรูปเป็นไตรกลีเซอไรด์ไอออนและไบโอดีเซล ขั้นตอนสุดท้าย ไตรกลีเซอไรด์ไอออนจะรับโปรตอนจากตัวเร่งปฏิกิริยาในตอนแรกกลายเป็นไตรกลีเซอไรด์และตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วจึงเริ่มวัฏจักรเช่นนี้ต่อไปจนกระทั่งมอนอกลิเซอไรด์กลายเป็นกลีเซอรอล



รูปที่ 3 ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันพืชและเมทานอลในแต่ละขั้นตอน



รูปที่ 4 ปฏิกิริยาข้างเคียงของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน



รูปที่ 5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์จำพวกเบส

## 2.4 บทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสเอกพันธ์ เมื่อไม่มีการใช้ตัวทำละลายร่วม

B. Freedman และคณะ (1984) [7] ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช และอิทธิพลของปริมาณกรดไขมันอิสระต่อร้อยละการเกิดไบโอดีเซล ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ใช้โซเดียมเมทอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ร้อยละ 0.5 โดยมวล การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชทำให้ร้อยละการเกิดสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชสูงกว่า 6 ต่อ 1 ไม่ทำให้อัตราการเกิดของไบโอดีเซลสูงขึ้น และในน้ำมันพืชที่มีกรดไขมันสูงจะส่งผลให้ร้อยละการเกิดของไบโอดีเซลต่ำ นอกจากนี้ B. Freedman และคณะยังพบว่า ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันพืชเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน

B. Freedman และคณะ (1986) [2] ศึกษาอิทธิพลของชนิดแอลกอฮอล์และอิทธิพลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาต่อจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลือง โดยแอลกอฮอล์ที่ใช้มี 2 ชนิด ได้แก่ เมทานอลและ 1-บิวทานอล ที่อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันพืช 6 ต่อ 1 โซเดียมบิวทอกไซด์หรือโซเดียมเมทอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณร้อยละ 0.5 และ 1 โดยมวล ตามลำดับ ทำการทดลองในขวดรูปชมพู่และปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก ควบคุมอุณหภูมิด้วยอ่างน้ำที่อุณหภูมิ 20 ถึง 60 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ในทุกสภาวะการทดลอง ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันพืชมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรกต่ำ จากนั้นจึงสูงขึ้น และต่ำลงอีกครั้งเมื่อปฏิกิริยาใกล้เสร็จสมบูรณ์ ซึ่งมีแนวโน้มแบบซิกมอยด์ (sigmoidal curve) และจากการนำผลการทดลองไปสร้างแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์พบว่า ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่อเนื่อง 3 ขั้นตอน และผันกลับได้ทั้ง 3 ขั้นตอน อย่างไรก็ตาม ในผลการจำลองจลนพลศาสตร์ที่มีการใช้เมทานอล จะมีปฏิกิริยาทางลัด (shunt reaction) หรือปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์ 1 โมลและเมทานอล 3 โมล เกิดขึ้น โดยสาเหตุที่ปฏิกิริยาทางลัดปรากฏขึ้นเมื่อมีการใช้เมทานอลแต่ไม่ปรากฏเมื่อใช้ 1-บิวทานอลเป็นแอลกอฮอล์มีสาเหตุ 2 ข้อ ได้แก่ 1) ขนาดโมเลกุลของเมทานอลเล็กกว่าขนาดโมเลกุลของ 1-บิวทานอลทำให้เมทานอลทั้ง 3 โมเลกุล สามารถทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ได้พร้อมกัน 2) แอนไอออนของเมทานอลมีความเป็นขั้วสูงกว่าบิวทานอลทำให้การชนระหว่างแอนไอออนของเมทานอลและหมู่คาร์บอนิลของไตรกลีเซอไรด์เกิดขึ้นได้ง่ายกว่าแอนไอออนของบิวทานอล นอกจากนี้ B. Freedman และคณะยังได้ศึกษาอิทธิพลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมบิวทอกไซด์และกรดซัลฟิวริกต่อจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลือง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันพืช 30 ต่อ 1 การใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาก่อให้เกิดค่าคงที่อัตราสูงกว่าการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในทั้งปฏิกิริยาไปข้างหน้าและปฏิกิริยาย้อนกลับ ถึงแม้อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกเบสจะต่ำกว่า ซึ่งบ่งชี้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกเบสทำให้ปฏิกิริยาเกิดง่ายกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกกรด โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 60 และ 77 องศาเซลเซียส เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกเบสและจำพวกกรด ตามลำดับ

H. Nouredini และ D. Zhu (1997) [8] ศึกษาอิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ส (Reynolds number) และอิทธิพลของอุณหภูมิต่อจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันถั่วเหลือง ใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 6 ต่อ 1 ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณร้อยละ 0.2 โดยมวล ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนเป็นเวลา 90 นาที ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า เมื่อระบบมีเลขเรย์โนลด์สเท่ากับ 3,100 ปฏิกิริยาจะเกิดช้าในช่วงแรก จากการที่อัตราการถ่ายโอนมวลระหว่างวัฏภาคน้ำมันพืชและเม

ทานอลต่ำ จากนั้นไบโอดีเซลที่เกิดขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น เนื่องจากไบโอดีเซลทำให้น้ำมันพืชและเมทานอลละลายเข้าด้วยกันได้ดีขึ้น และสุดท้ายปฏิกิริยาจะเกิดซ้ำอีกครั้งจากการที่ปฏิกิริยาใกล้ถึงจุดสมดุลเคมี โดยทั้งการเพิ่มอุณหภูมิและการเพิ่มเลขเรย์โนลด์ส์สามารถลดหรือกำจัดช่วงที่ปฏิกิริยาเกิดช้าในช่วงแรกได้ อย่างไรก็ตาม เลขเรย์โนลด์ส์จะไม่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้งในช่วงกลางและช่วงท้าย แต่อุณหภูมิจะเป็นตัวแปรหลักที่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงนี้ ซึ่งบ่งชี้ว่าช่วงกลางและช่วงท้ายเป็นช่วงที่ปฏิกิริยาถูกควบคุมด้วยอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี (kinetically controlled region) และจากการนำผลการทดลองไปสร้างแบบจำลองจลนพลศาสตร์แสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาทางลัดเป็นสิ่งที่ไม่จำเป็นต้องเกิดขึ้น เนื่องจากค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาทางลัดมีค่าใกล้เคียงศูนย์

D. Darnoko และ M. Cheryan (2000) [9] ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและอิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มและเมทานอล ที่อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 6 ต่อ 1 ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยมวล ปฏิกิริยาสามารถเกิดได้อย่างรวดเร็วในช่วงแรกโดยไบโอดีเซลสามารถเกิดได้ร้อยละ 73 ภายใน 4 นาที และสามารถถึงจุดสมดุลได้ภายในเวลา 60 นาที โดยหากเพิ่มอุณหภูมิเป็น 65 องศาเซลเซียส จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นเป็นไบโอดีเซลจะเกิดขึ้นร้อยละ 82 ภายในเวลา 4 นาที แต่หากปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงเป็นร้อยละ 0.5 โดยมวล ช่วงที่ปฏิกิริยาถูกควบคุมโดยอัตราการถ่ายโอนมวลจะปรากฏขึ้นในกราฟการเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้ผลการศึกษายังพบว่า ไบโอดีเซลและกลีเซอรอลไม่ได้เกิดขึ้นพร้อมกันเสมอ ซึ่งบ่งชี้ว่าปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่เกิดแบบเป็นขั้นตอน และจากการนำผลการทดลองไปสร้างแบบจำลองจลนพลศาสตร์แสดงให้เห็นว่า ค่าคงที่อัตราของมอนอกลิเซอไรด์มีค่าสูงที่สุด และค่าคงที่อัตราของไตรกลีเซอไรด์เป็นไตรกลีเซอไรด์ต่ำที่สุด ซึ่งบ่งชี้ว่า มอนอกลิเซอไรด์เกิดปฏิกิริยาได้ง่ายที่สุด ขณะที่ไตรกลีเซอไรด์เกิดปฏิกิริยาได้ยากที่สุด

L. Theerayut และคณะ (2004) [10] ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มและเมทานอล ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 6 ต่อ 1 ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณร้อยละ 1 โดยมวลน้ำมันพืช ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เลขเรย์โนลด์ส์ประมาณ 2,000 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาไม่มีช่วงที่ถูกควบคุมด้วยอัตราการถ่ายโอนมวล และสามารถถึงจุดสมดุลได้ภายใน 10 นาที และจากการนำผลการทดลองไปสร้างแบบจำลองจลนพลศาสตร์พบว่า ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาต่อเนื่อง 3 ขั้นตอน และสามารถผันกลับได้ ยกเว้นปฏิกิริยาขั้นตอนไตรกลีเซอไรด์เป็นไตรกลีเซอไรด์ที่ปฏิกิริยาแทบจะผันกลับไม่ได้

U.A Rashid และคณะ (2009) [3] ศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน อุณหภูมิ และความเร็วในการปั่นกวนต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดฝ้าย ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนเป็นเวลา 120 นาที ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ในบรรดาตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกไฮดรอกไซด์และเมทอกไซด์ของโซเดียมและโพแทสเซียม โซเดียมเมทอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดร้อยละผลได้สูงที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบในตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีไอออนบวกชนิดเดียวกัน ตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกไฮดรอกไซด์จะก่อให้เกิดร้อยละผลได้ต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกเมทอกไซด์ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกไฮดรอกไซด์ก่อให้เกิดน้ำเมื่อผสมกับเมทานอลและน้ำที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับไตรกลีเซอไรด์ หากทำการเพิ่มปริมาณโซเดียมเมทอกไซด์ตั้งแต้อ้อยละ 0.25 ถึงร้อยละ 0.75 โดยมวล ร้อยละผลได้จะ

สูงขึ้น แต่หากสูงขึ้นกว่านี้ ร้อยละผลได้จะต่ำลง เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณมากเกินไปจะทำให้การเกิดสบู่สูงขึ้น และสารในระบบจะมีความหนืดสูงขึ้น ส่งผลให้การถ่ายโอนมวลแย่ง และ การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล ต่อน้ำมันพืชจาก 3 ต่อ 1 เป็น 6 ต่อ 1 ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลสูงขึ้น เนื่องจากปริมาณของเมทานอลที่สูงขึ้นทำให้สารในระบบละลายเข้าด้วยกันได้ดีขึ้น แต่หากอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชสูงกว่า 6 ต่อ 1 ร้อยละผลได้จะต่ำลงจากการที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นถูกเจือจาง นอกจากนี้ทั้งการเพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่ 25 ถึง 65 องศาเซลเซียส และการเพิ่มความเร็วในการปั่นกววนตั้งแต่ 180 ถึง 600 รอบต่อนาที ทำให้ร้อยละผลได้สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม หากความเร็วในการปั่นกววนเพิ่มเป็น 720 รอบต่อนาที ร้อยละผลได้จะต่ำลงเล็กน้อย เนื่องจากความเร็วในการปั่นกววนที่สูงเกินไปจะส่งผลให้อุณหภูมิของสารตั้งต้นติดอยู่ที่ผนังของเครื่องปฏิกรณ์และไม่ไปเกิดปฏิกิริยาได้

S.N. Csernica และ J.T. Hsu (2012) [4] ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช ต่อการละลายของตัวเร่งปฏิกิริยาในแต่ละวัฏภาคของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลือง ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณร้อยละ 1 โดยมวลของน้ำมันพืช ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาจะละลายอยู่ในวัฏภาคของเมทานอลเป็นหลัก โดยที่อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันพืช 6 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ละลายอยู่ในวัฏภาคของเมทานอลจะคิดเป็น 29.67 เท่าของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในวัฏภาคของน้ำมันพืช หากทำการเพิ่มปริมาณของเมทานอลจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ละลายอยู่ในวัฏภาคของเมทานอลสูงขึ้น

C. Esonye และคณะ (2019) [11] ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและผลกระทบของความเร็วในการปั่นกววน ต่อจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันของเมล็ด *Dyacrodes edulis* และเมทานอลที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 6:1 ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.1 โดยมวลของน้ำมันพืช ความเร็วในการปั่นกววน 140 รอบต่อนาที อุณหภูมิตั้งแต่ 55 ถึง 65 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาไม่มีช่วงที่ถูกควบคุมโดยอัตราการถ่ายโอนมวลในช่วงแรก และอุณหภูมิที่สูงขึ้นสามารถเพิ่มร้อยละการแปลงผันได้เล็กน้อย โดยปฏิกิริยาสามารถถึงจุดสมดุลได้ภายในเวลา 40 นาที และค่าคงที่อัตราของไตรกลีเซอไรด์จะต่ำที่สุด ขณะที่ค่าคงที่อัตราของงมมอนอกลิเซอไรด์จะสูงที่สุด นอกจากนี้ C. Esonye และคณะยังได้ศึกษาผลของความเร็วในการปั่นกววนตั้งแต่ 200 ถึง 800 รอบต่อนาทีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1.5 โดยมวลของน้ำมันพืช ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ความเร็วในการปั่นกววนที่สูงขึ้นทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรกสูงขึ้นแต่ความเร็วรอบในการปั่นกววนไม่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาในช่วงท้าย เนื่องจากเป็นช่วงที่ปฏิกิริยาถูกควบคุมด้วยปฏิกิริยาเคมี

Thao Pham Thi Phuong และคณะ (2022) [12] ได้ศึกษาปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันแคนโนลา ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณร้อยละ 1 โดยมวลของกลีเซอรอล อัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อไบโอดีเซล 1 ต่อ 3 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ไม่มีปฏิกิริยาย้อนกลับเกิดขึ้น



## 2.5 บทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสเอกพันธ์ เมื่อมีการใช้ตัวทำละลายร่วม

D.G.B. Boocock และคณะ (1996) [6] ศึกษาอิทธิพลของชนิดแอลกอฮอล์ และการใช้เตตระไฮโดรฟู-รานเป็นตัวทำละลายร่วมต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลือง โดยแอลกอฮอล์ที่ใช้มี 2 ชนิด ได้แก่ เมทานอล ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และบิวทานอล ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 6 ต่อ 1 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า เมทานอลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำกว่าบิวทานอล เนื่องจากบิวทานอลและน้ำมันพืชสามารถละลายเข้าด้วยกันเป็นเนื้อเดียว ขณะที่เมทานอลและน้ำมันพืชละลายเข้าด้วยกันได้น้อย ซึ่งหากเติมเตตระไฮโดรฟูรานที่อัตราส่วน 1.25 เท่าโดยปริมาตรของเมทานอลจะทำให้น้ำมันพืชและเมทานอลละลายเป็นเนื้อเดียวกัน และอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นเทียบเท่าการใช้บิวทานอลในปฏิกิริยา

ราตรี พันธูชา (2008) [13] ศึกษาอิทธิพลของชนิดตัวทำละลายร่วมต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่เกิดจากน้ำมันปาล์มและเมทานอล อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 6 ต่อ 1 ใช้เตตระไฮโดรฟูรานและเฮกเซนเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณ 0 และ 1.25 เท่าของปริมาตรเมทานอล และใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณร้อยละ 1 โดยมวลของน้ำมันพืช ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ตัวทำละลายร่วมที่ใช้ควรเป็นสารที่ภายในโมเลกุลควรมีสวนทั้งมีและไม่มีขั้ว เพื่อทำให้น้ำมันพืชและเมทานอลสามารถละลายเข้าด้วยกันได้ดีขึ้น โดยการใช้เฮกเซนทำให้อัตราผลได้ของไบโอดีเซลต่ำกว่าการไม่ใช้ตัวทำละลายร่วม ขณะที่การใช้เตตระไฮโดรฟูรานเป็นตัวทำละลายร่วมทำให้อัตราผลได้ของไบโอดีเซลสูงขึ้น

สมประสงค์ จันทโรธรณ์ (2010) [14] ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ ชนิดตัวทำละลายร่วม และความเร็วในการปั่นกวน ต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มโอเลอินและเมทานอล ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 6 ต่อ 1 ใช้โซเดียมเมทอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณร้อยละ 1 โดยมวลของน้ำมันพืช ใช้เตตระไฮโดรฟูราน ไดเอทิลอีเทอร์ เฮกเซน ไโซโคลเฮกเซน บิวทานอล หรือบิวทานอลดัดย้อมเป็นตัวทำละลายร่วมในปริมาณที่ทำให้ให้น้ำมันพืชและเมทานอลสามารถละลายเข้าด้วยกันเป็นวัฏภาคเดียว ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 35 และ 65 องศาเซลเซียส ในขวดรูปชมพู่ที่ควบคุมอุณหภูมิด้วยอ่างน้ำ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันเกิดที่อุณหภูมิสูงได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ และยังกลีเซอรอลเกิดเยอะขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาจะละลายอยู่ในวัฏภาคของกลีเซอรอลสูงขึ้น ซึ่งการใช้ตัวทำละลายร่วมทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น ร้อยละผลได้สูงขึ้น และตัวเร่งปฏิกิริยาละลายในวัฏภาคของไบโอดีเซลได้เยอะขึ้น โดยการใช้บิวทานอลและบิวทานอลดัดย้อมเป็นตัวทำละลายร่วมทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาของน้ำมันและกลีเซอรอลกลายเป็นวัฏภาคเดียวกัน นอกจากนี้การใช้ตัวทำละลายร่วมยังทำให้ความเร็วรอบในการปั่นกวนไม่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากน้ำมันพืชและเมทานอลสามารถละลายอยู่ในวัฏภาคเดียวกัน ซึ่งต่างจากปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวทำละลายร่วม ที่ความเร็วในการปั่นกวนจะส่งผลต่อปฏิกิริยาเป็นอย่างมาก

Y. Maeda และคณะ (2011) [5] ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันแคโนลาและเมทานอล โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการทดลองในขวดรูปชมพู่ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันพืชและเมทานอลเป็นปฏิกิริยาที่ย้อนกลับไม่ได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 20 ถึง 60 องศาเซลเซียส เนื่องจากไบโอดีเซลผสมกับกลีเซอรอลขณะที่ทั้งมีหรือไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และในทั้งปฏิกิริยาที่เป็นเนื้อเดียวและไม่เป็นเนื้อเดียว ไม่พบว่ามอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์เกิดขึ้น ดังนั้นการที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงเวลาที่ยาวนานไม่ได้เป็นผลจากปฏิกิริยาเข้าใกล้สมดุล

เคมี แต่เป็นเพราะกลีเซอรอลที่เกิดขึ้นดึงเมทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยาแยกออกจากวัฏภาคที่เกิดปฏิกิริยานอกจากนี้ Y. Maeda และคณะยังได้ศึกษาอิทธิพลของชนิดตัวทำละลายร่วมต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ในบรรดาตัวทำละลายร่วม ได้แก่ อะซิโตน เตตระไฮโดรฟูราน ไอโซโพรพานอล อะซิโตนไนไตรล์ ไดเอทิลอีเทอร์ การใช้อะซิโตนหรือไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลายร่วมก่อให้เกิดอัตราการเกิดปฏิกิริยาและร้อยละผลได้สูงสุด

L.T. Thanh และคณะ (2013) [15] ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช ปริมาณตัวทำละลายร่วม ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิ ต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันพืชใช้แล้วและเมทานอล ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วม ทำการทดลองในขวดรูปชมพู่ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ทั้งการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชตั้งแต่ 3 ต่อ 1 ถึง 4.5 ต่อ 1 การเพิ่มปริมาณตัวทำละลายร่วมตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึงร้อยละ 25 โดยมวล และการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งแต่ร้อยละ 0.1 ถึงร้อยละ 1.0 โดยมวล ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลสูงขึ้น ยกเว้นการเพิ่มอุณหภูมิที่ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลไม่มีความแตกต่างตั้งแต่ 25 ถึง 50 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม หากเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเป็น 5 ต่อ 1 ปริมาณตัวทำละลายร่วมเป็นร้อยละ 30 โดยมวล และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นร้อยละ 1.25 ต่อมวล จะไม่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณอะซิโตน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นเสมอ ยกเว้นการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลที่ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง เนื่องจากปริมาณเมทานอลที่สูงขึ้นจะทำให้ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง

P.D. Luu และคณะ (2014) [16] ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ ปริมาณตัวทำละลายร่วม และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันสบู่ดำและเมทานอลที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 6 ต่อ 1 ใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วม และใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มอุณหภูมิจาก 30 เป็น 40 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลจะสูงขึ้น แต่หากอุณหภูมิสูงกว่านี้ ร้อยละผลได้จะเปลี่ยนแปลงไม่มาก และการเพิ่มปริมาณอะซิโตนจะเพิ่มร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล แต่หากอะซิโตนมีปริมาณมากกว่าร้อยละ 30 โดยมวล ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลจะต่ำลง จากการเจาะจงสารตั้งต้น นอกจากนี้ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลสูงสุดที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยมวล เนื่องจากหากปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาสูงกว่านี้จะส่งผลให้สารในระบบมีความหนืดที่สูงขึ้นและการถ่ายเทมวลแย่งลง

J.M. Encinar และคณะ (2016) [17] ศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช อุณหภูมิ ปริมาณตัวทำละลายร่วม ต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของระหว่างน้ำมันเรพซิดและเมทานอล ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชที่ 6 ต่อ 1 ถึง 12 ต่อ 1 ใช้ไดเอทิลอีเทอร์เป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณตั้งแต่ 0.5 ถึง 2 เท่าโดยโมลเมทานอล และใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึงร้อยละ 1 โดยมวล ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนเป็นเวลา 120 นาที ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 20 ถึง 40 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันไม่สามารถเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำหากไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลจะสูงสุดที่อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเรพซิด 9 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.7 โดยมวล และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยตั้งแต่อุณหภูมิ 20 ถึง 27 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลจะเพิ่มขึ้น และเริ่มลดลงตั้งแต่ 35 องศา

เซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงเกินไปจะทำให้ไดเอทิลอีเทอร์ระเหย อีกทั้งยังทำให้สบู่เกิดได้ดีขึ้น นอกจากนี้การเติมไดเอทิลอีเทอร์เป็นตัวทำละลายร่วมยังทำให้ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลสูงขึ้นและสูงสุดที่ไดเอทิลอีเทอร์มีปริมาณ 1 เท่าโดยโมลเมทานอล

Hanh Ngoc Thi Le และคณะ (2018) [18] ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณไบโอดีเซลต่อการละลายระหว่างไตรโอเลอิน (triolein) และเมทานอล อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อไตรโอเลอิน 6:1 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ไตรโอเลอินและเมทานอลจะละลายเป็นเนื้อเดียวกันเมื่อเมทิลโอเลียมมีปริมาณมากกว่าร้อยละ 30 โดยมวลของไตรโอเลอิน นอกจากนี้ Hanh Ngoc Thi Le และคณะยังศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชต่อร้อยละผลได้และอัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันเมล็ดยาง ไซ้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ  $33.6 \pm 0.3$  โดยมวลของน้ำมันพืช ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่ 30 ถึง 60 องศาเซลเซียส ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น แต่พบไม่ส่งผลต่อร้อยละสุดท้ายของไบโอดีเซล และการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจากร้อยละ 0.5 เป็นร้อยละ 1.0 โดยมวลของน้ำมันพืช สามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาและร้อยละสุดท้ายของไบโอดีเซลจากร้อยละ 86 เป็นร้อยละ 98 ถึง 99 โดยมวล อย่างไรก็ตาม การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจากร้อยละ 1 เป็นร้อยละ 1.5 ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อร้อยละผลได้สุดท้ายของไบโอดีเซล นอกจากนี้การลดอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันจาก 6 ต่อ 1 เป็น 4.5 ต่อ 1 จะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น แต่หากลดจากอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันจาก 4.5 ต่อ 1 เป็น 3 ต่อ 1 อัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่มีการเปลี่ยนแปลง

## 2.6 ข้อสรุปจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันพืช

### 2.6.1 จลนพลศาสตร์และพฤติกรรมของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันพืช

ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันพืชและเมทานอลเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน เกิดขึ้นต่อเนื่อง 3 ขั้นตอน และต้องมีตัวเร่งปฏิกิริยาถึงจะสามารถเกิดในช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียส จากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตมีทั้งกล่าวว่าปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้และผันกลับไม่ได้ในช่วงอุณหภูมิ 20 ถึง 60 องศาเซลเซียส ในงานวิจัยที่กล่าวว่าปฏิกิริยาผันกลับได้มักจะอิงจากผลแบบจำลองจลนพลศาสตร์ที่มีค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาย้อนกลับเกิดขึ้น ขณะที่งานวิจัยที่กล่าวว่าปฏิกิริยาผันกลับไม่ได้จะเกิดจากการนำไบโอดีเซลและกลีเซอรอลผสมกัน แล้วไม่พบว่ามิมอนอกลิเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ หรือไตรกลีเซอไรด์เกิดขึ้น โดยปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันจะเกิดขึ้นในวิภาคของเมทานอลเป็นหลัก เนื่องจากจากการที่ตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่ละลายอยู่ในวิภาคของเมทานอล ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงแรก เพราะน้ำมันพืชและเมทานอลละลายเข้าด้วยกันได้น้อย โดยไบโอดีเซลที่เกิดขึ้นจะทำให้ น้ำมันพืชและเมทานอลละลายเข้าด้วยกันได้ดีขึ้นและอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะสูงขึ้น จากนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะช้าลงอีกครั้งในช่วงท้ายของปฏิกิริยา โดยแต่ละงานวิจัยให้เหตุผลเกี่ยวกับการช้าลงของปฏิกิริยาในช่วงท้ายที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งเหตุผลเป็น 2 ข้อหลัก ได้แก่ 1) ปฏิกิริยาเข้าใกล้จุดสมดุลเคมี และ 2) กลีเซอรอลที่เกิดดึงเมทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากการทำปฏิกิริยา

## 2.6.2 ตัวแปรที่สำคัญต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันพืช

### 2.6.2.1 ชนิดและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกเบสส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดง่ายกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกกรด โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกเบสเอทิลเอทิลที่นิยมใช้มีหลายชนิด ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมเมทอกไซด์ และโพแทสเซียมเมทอกไซด์ อย่างไรก็ตาม การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกไฮดรอกไซด์มีข้อเสียคือการเกิดน้ำในระบบและส่งผลให้เกิดสบู่ได้ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาพวกเมทอกไซด์จะไม่มีปัญหาดังกล่าว ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลต่อร้อยละผลได้สุดท้ายของไบโอดีเซลเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตาม ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ไม่ควรจะมีปริมาณสูงเกินไป ไม่เช่นนั้นจะส่งผลให้สารในระบบมีความหนืดสูงขึ้นและเกิดสบู่ได้ง่ายขึ้น โดยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมอยู่ในช่วงตั้งแต่ร้อยละ 0.7 ไปจนถึงร้อยละ 1 โดยมวลของน้ำมันพืช

### 2.6.2.2 ความเร็วรอบในการปั่นกววน

ความเร็วรอบในการปั่นกววนสามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรกได้ เนื่องจากความเร็วรอบในการปั่นกววนที่สูงขึ้นจะเพิ่มอัตราการถ่ายโอนมวลระหว่างวัฏภาคของน้ำมันพืชและเมทานอล โดยความเร็วรอบในการปั่นกววนที่เหมาะสมจะสามารถกำจัดช่วงที่ปฏิกิริยาถูกควบคุมด้วยอัตราการถ่ายโอนมวลระหว่างวัฏภาคได้ อย่างไรก็ตาม อิทธิพลของความเร็วรอบในการปั่นกววนต่อร้อยละผลได้สุดท้ายของไบโอดีเซลยังไม่เป็นที่แน่ชัด เนื่องจากมีงานวิจัยที่ทั้งพบและไม่พบว่าความเร็วรอบส่งผลต่อร้อยละผลได้สุดท้ายของไบโอดีเซล

### 2.6.2.3 อุณหภูมิ

อุณหภูมิใช้ในการศึกษาปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันมีตั้งแต่อุณหภูมิ 20 ถึง 60 องศาเซลเซียส โดยการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นและเพิ่มร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลได้ แต่ก็มีบางงานวิจัยที่พบว่าอุณหภูมิไม่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิที่สูงขึ้นอาจส่งผลเสียต่อการเกิดปฏิกิริยาได้จากการทำให้ตัวทำละลายรวมและเมทานอลระเหยเยอะขึ้น และสบู่เกิดได้ง่ายขึ้น

### 2.6.2.4 อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช

อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชที่ใช้ในการศึกษาปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันมีตั้งแต่ 3 ต่อ 1 ถึง 15 ต่อ 1 อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชจะส่งผลต่อทั้งอัตราการเกิดปฏิกิริยาและร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลตั้งแต่ช่วง 3 ต่อ 1 ถึง 6 ต่อ 1 มีแนวโน้มทั้งทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นและอัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง แต่ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลจะสูงขึ้นตามอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเสมอ ในส่วนของการทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นเกิดจากการที่เมื่อเมทานอลเยอะขึ้น จะทำให้น้ำมันพืชละลายเข้ากับเมทานอลได้ดีขึ้น และในส่วนของการทำงานให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงเกิดจากการที่ตัวเร่งปฏิกิริยามีความเข้มข้นต่ำลง อย่างไรก็ตาม การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชสูงกว่า 12 ต่อ 1 จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงจากการเจือจางสารในระบบ

### 2.6.2.5 ชนิดและปริมาณตัวทำละลายรวม

ตัวทำละลายรวมที่เหมาะสมจะทำให้น้ำมันพืชและเมทานอลละลายเข้าด้วยกันได้มากขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น และร้อยละผลได้สุดท้ายของไบโอดีเซลสูงขึ้น โดยสามารถทำให้ร้อยละผลได้สุดท้ายของไบโอดีเซลสูงขึ้น

ดีเซลที่อุณหภูมิสูงและที่อุณหภูมิต่ำไม่มีความแตกต่างกัน ด้วยเหตุนี้ การใช้ตัวทำละลายร่วมจึงส่งผลให้อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลลดลงได้ อย่างไรก็ตาม ตัวทำละลายร่วมไม่ควรถูกใช้ในปริมาณที่สูงจนเกินไป ไม่เช่นนั้นความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะถูกเจือจางและยังผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง

จากข้อสรุปของตัวแปรที่สำคัญต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันพืชแสดงให้เห็นว่า การใช้ตัวทำละลายร่วมมีโอกาที่จะทำให้อุณหภูมิและอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชที่ใช้ในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันลดลงได้ ซึ่งนำไปสู่ขอบเขตของงานวิจัยที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 1.4 ในการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช และอิทธิพลของปริมาณตัวทำละลายร่วมต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน อย่างไรก็ตาม อิทธิพลของความเร็วรอบในการปั่นกวนจะไม่ถูกศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพราะจากงานวิจัยในอดีต อิทธิพลของความเร็วในการปั่นกวนต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันนั้นค่อนข้างชัดเจน โดย การเพิ่มความเร็วในการปั่นกวนจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น จนกระทั่งถึงความเร็วในการปั่นกวนค่าหนึ่ง ที่ การเพิ่มความเร็วในการปั่นกวนมากกว่านี้จะไม่เพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาอีกแล้ว ยกเว้นกรณีที่สารในระบบละลายกัน จนเป็นวิฤภาคเดียวที่ความเร็วรอบในการปั่นกวนจะไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยาดังเช่นในวิทยานิพนธ์ของสมประสงค์ จันทร์โรธรณ์ (2010) [14]

นอกจากนี้ สิ่งที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไม่เหมือนกับงานวิจัยในอดีตคือ งานวิจัยในอดีตจะศึกษาอิทธิพลของตัวทำละลายร่วมต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันด้วยปริมาณไบโอดีเซล ทำให้ศึกษาได้เพียงอิทธิพลของตัวทำละลายร่วมต่อปฏิกิริยาโดยรวมเท่านั้น แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษาอิทธิพลของตัวทำละลายร่วมด้วยปริมาณของเหล่านีโอดีเซลและปริมาณกลีเซอรอล ซึ่งปริมาณของกลีเซอรอลนั้นส่งผลต่อการละลายของสารในปฏิกิริยาเป็นอย่างมาก จากการศึกษาในข้างต้นนี้จะนำไปสู่การอธิบายอิทธิพลตัวทำละลายร่วมต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันในแต่ละขั้นตอนได้

### บทที่ 3

#### การทดลอง

#### 3.1 สารตั้งต้นและสารเคมี

น้ำมันปาล์มโอเลอินที่ใช้ในการทดลองเป็นเกรดสำหรับใช้ทำอาหาร สารเคมีที่ใช้ในการทดลองมีทั้งเกรดสำหรับการวิเคราะห์ (analytical) และเกรดอุตสาหกรรมดังที่แสดงในตารางที่ 3 และน้ำที่ใช้ในงานวิจัยทั้งหมดคือน้ำดีไอออไนซ์ (deionized water)

ตารางที่ 3 สารตั้งต้นและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สาร	ใช้สำหรับ	เกรด/ความบริสุทธิ์
น้ำมันปาล์มโอเลอิน	เป็นสารตั้งต้น	สำหรับทำอาหาร
เมทานอล	เป็นสารตั้งต้น	อุตสาหกรรม
โซเดียมเมทอกไซด์	เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	อุตสาหกรรม
ไบโอดีเซล	เป็นตัวทำละลายร่วม	อุตสาหกรรม
อะซิโตน	เป็นตัวทำละลายร่วม	อุตสาหกรรม
กรดอะซิติก	หยุดปฏิกิริยา	สำหรับการวิเคราะห์
โซเดียมซัลเฟตแอนไฮดรัส	กำจัดน้ำออกจากตัวอย่าง	สำหรับการวิเคราะห์
เฮปแทน	เป็นตัวทำละลายสำหรับการวิเคราะห์	สำหรับการวิเคราะห์
เมทิลเดคาโนเอต	เป็นสารมาตรฐาน (internal standard; IS)	สำหรับการวิเคราะห์
ไพรีนีน	เป็นสารเคมีสำหรับการวิเคราะห์	สำหรับการวิเคราะห์
MSTFA	เป็นสารเคมีสำหรับการวิเคราะห์	สำหรับการวิเคราะห์

#### 3.2 วิธีการทดลอง

ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันถูกทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบแก้วขนาด 2 ลิตร ควบคุมอุณหภูมิโดยเทอร์โมคัปเปิล (thermos couple) และควบคุมอุณหภูมิด้วยตู้ควบคุมอุณหภูมิ (temperature control panel) ปั่นกวนสารโดยแท่งแม่เหล็ก (magnetic stirrer) มีชุดอุปกรณ์สำหรับการควบแน่น (condenser) ที่ใช้น้ำหล่อเย็นจากเครื่องอ่างน้ำ (water bath) เพื่อควบแน่นเมทานอลและอะซิโตนที่ระเหยระหว่างการเกิดปฏิกิริยา และให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์โดยเครื่องทำความร้อนแบบสายพาน (belt heater) โดยในแต่ละการทดลองจะใช้น้ำมันพีช 400 กรัม และโซเดียมเมทอกไซด์ (sodium methoxide) 4 กรัม ในลำดับแรก ใส่น้ำมันพีชลงในเครื่องปฏิกรณ์ จากนั้นจึงเปิดเครื่องปั่นกวนและเครื่องทำความร้อน เมื่อถึงอุณหภูมิที่ต้องการ จึงเติมเมทานอลที่ผสมกับโซเดียมเมทอกไซด์ และตัวทำละลายร่วมในปริมาณที่ต้องการ เก็บตัวอย่างตามเวลาที่ต้องการ ตัวอย่างละ 5 มิลลิลิตร หยุดปฏิกิริยาโดยหยดกรดอะซิติกเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวล ปริมาณ 6 มิลลิลิตร จากนั้นจึงแยกตัวอย่างชั้นน้ำมันและชั้นน้ำ และนำชั้นน้ำมันไปล้างด้วยน้ำดีไอออไนซ์ 3 ครั้ง หรือจนกว่าค่าพีเอชของน้ำดีไอออไนซ์จะไม่เปลี่ยน แล้วจึงนำตัวอย่างชั้น

น้ำมันไปกรองผ่านโซเดียมซัลเฟตแอนไฮดรัสเพื่อกำจัดน้ำ และนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีเพื่อหาปริมาณไบโอดีเซล ไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และมอนอกลิเซอไรด์ในผลิตภัณฑ์ ส่วนตัวอย่างชั้นน้ำจะถูกนำไปเตรตเพื่อวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอล



รูปที่ 6 การติดตั้งอุปกรณ์ทำการทดลอง

### 3.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะวิเคราะห์หาปริมาณสาร 2 วิธี ได้แก่ วิธีแก๊สโครมาโทกราฟีเพื่อหาปริมาณไบโอดีเซลและเหล่ากลีเซอไรด์ และวิธีเตรตเพื่อวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอล

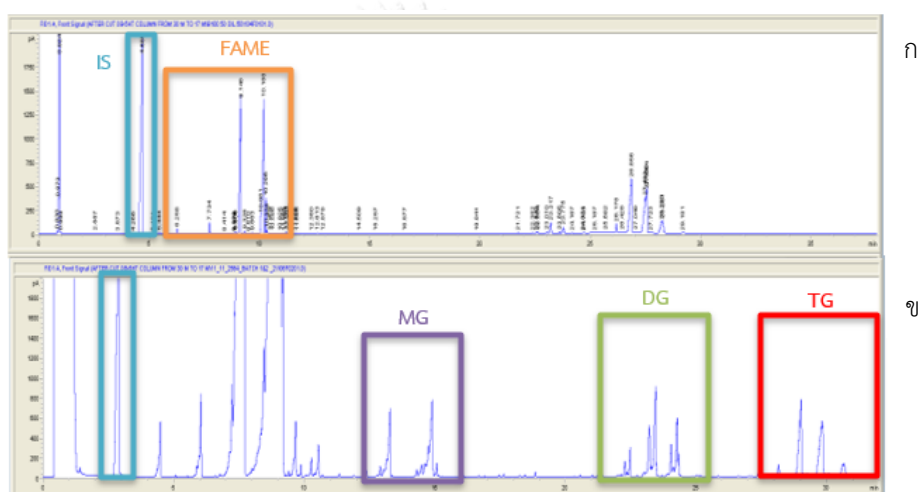
#### 3.3.1 วิธีแก๊สโครมาโทกราฟี

การวิเคราะห์หาปริมาณไบโอดีเซลและเหล่ากลีเซอไรด์ในตัวอย่างที่ได้จากการทดลองจะทำโดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี 2 ครั้ง เพื่อวิเคราะห์ปริมาณไบโอดีเซลด้วยวิธี EN14103 และเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณเหล่ากลีเซอไรด์ด้วยวิธี EN14105 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีที่ใช้ในการวิเคราะห์คือรุ่น Agilent 7890A ประกอบไปด้วยแคปิลารีคอลัมน์ชนิด DB-5HT เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.32 มิลลิเมตร ความยาว 30 เมตร และความหนาของชั้นฟิล์ม 0.10 ไมโครเมตร โดยตัวอย่างของโครมาโตแกรม (chromatogram) ที่ได้จากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีถูกแสดงดังรูปที่ 7

การคำนวณหาปริมาณของสารแต่ละชนิดจะใช้วิธีแฟกเตอร์ตอบสนอง (response factor) ดังสมการที่ 3.1 ซึ่งการคำนวณหาค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของสารแต่ละชนิดจะแสดงในภาคผนวก ก

$$\text{ร้อยละโดยมวลของสารในตัวอย่าง} = \frac{A_i \times m_{IS}}{R.F._i \times A_{IS} \times m} \times 100 \quad (3.1)$$

โดย $A_i$	คือ	พื้นที่จุดยอดของสารที่ต้องการ
$A_{IS}$	คือ	พื้นที่จุดยอดของสารมาตรฐาน
$M_{IS}$	คือ	มวลของสารมาตรฐาน
$m$	คือ	มวลของตัวอย่างที่ต้องการจะวิเคราะห์
$R.F._i$	คือ	ค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของสารที่ต้องการ



รูปที่ 7 โครมาโตแกรมของสารตัวอย่างที่วิเคราะห์ด้วยวิธี EN14103 (รูป ก) และวิธี EN14105 (รูป ข)

### 3.3.2 การไตเตรตปริมาณกลีเซอรอล

การไตเตรตเพื่อหาปริมาณกลีเซอรอลจะทำตามวิธีมาตรฐาน BS 5711 part3: 1979 โดยหลักการของวิธีมาตรฐานดังกล่าวคือ การเปลี่ยนกลีเซอรอลเป็นกรดฟอร์มิกโดยทำปฏิกิริยากับโซเดียมเพอร์ไอโอดेट จากนั้นจึงไตเตรตกรดฟอร์มิกด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยปริมาณกลีเซอรอลที่ได้จากการไตเตรตจะถูกคำนวณดังสมการที่ 3.2

$$\text{ร้อยละโดยมวลของกลีเซอรอล} = \frac{(V_{\text{sample}} - V_{\text{blank}})}{m_{\text{sample}}} \times \frac{MW_{\text{glycerol}} - C_{\text{NaOH}}}{1,000} \times 100 \quad (3.2)$$

โดย $V_{\text{sample}}$	คือ	ปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไตเตรต (มิลลิลิตร)
$V_{\text{blank}}$	คือ	ปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไตเตรต เมื่อไม่มีสารตัวอย่าง (มิลลิลิตร)
$m_{\text{sample}}$	คือ	มวลของสารตัวอย่าง (กรัม)
$MW_{\text{glycerol}}$	คือ	มวลโมเลกุลของกลีเซอรอล
$C_{\text{NaOH}}$	คือ	ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)



### ตัวอย่างการคำนวณร้อยละโดยมวลของกลีเซอรอลในสารตัวอย่าง

ปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไตเตรตเท่ากับ 10.9 มิลลิลิตร

ปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไตเตรตโดยไม่ใส่สารตัวอย่างเท่ากับ 2.2 มิลลิลิตร

มวลสารตัวอย่างเท่ากับ 3.01 กรัม

มวลโมเลกุลของกลีเซอรอลเท่ากับ 92.1 กรัมต่อโมล

ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.111 โมลต่อลิตร

หากนำค่าทั้งหมดแทนในสมการที่ 3.5 จะได้ว่าร้อยละโดยมวลของกลีเซอรอลในสารตัวอย่างจะเท่ากับ

5.71

### 3.4 การคำนวณ

#### 3.4.1 การคำนวณร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล (%yield)

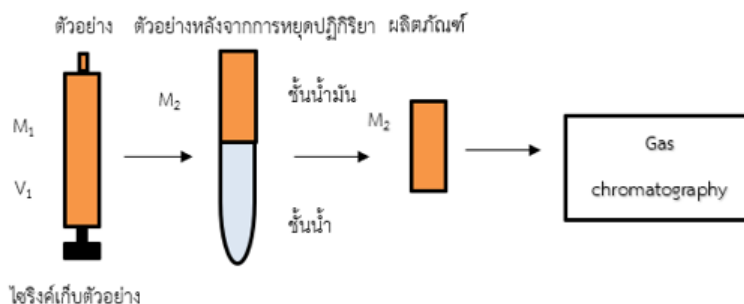
ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลคือ มวลของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ต่อมวลของน้ำมันพืชเริ่มต้น ซึ่งมวลของไบโอดีเซลที่ผลิตได้จะเท่ากับมวลของไบโอดีเซลในเครื่องปฏิกรณ์หักด้วยมวลของไบโอดีเซลที่ใช้เป็นตัวทำละลายร่วมตอนเริ่มต้นดังที่แสดงในสมการที่ 3.3

$$\text{ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล} = \frac{\text{มวลของไบโอดีเซลในเครื่องปฏิกรณ์} - \text{มวลของไบโอดีเซลเริ่มต้น}}{\text{มวลของน้ำมันปาล์มโอเลอินเริ่มต้น}} \quad (3.3)$$

#### 3.4.2 การคำนวณความเข้มข้นของสารแต่ละชนิด

ความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดในหน่วยโมลต่อลิตรถูกหาเพื่อนำไปใช้ในการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยการคำนวณถูกตั้งสมมติฐานว่า ความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดในไซริงค์เก็บตัวอย่าง (sample syringe) จะเท่ากับความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดในเครื่องปฏิกรณ์ โดยข้อมูลที่ถูกรับบันทึกของตัวอย่างแต่ละตัวจะประกอบไปด้วยมวลของตัวอย่าง ( $M_1$ ) ปริมาตรของตัวอย่าง ( $V_1$ ) และมวลของชั้นน้ำมัน ( $M_2$ )

จากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 3.3 จะทำให้ทราบปริมาณของไบโอดีเซล เหล่ากลีเซอไรด์ในผลิตภัณฑ์ ซึ่งปริมาณของสารแต่ละชนิดในผลิตภัณฑ์จะเท่ากับปริมาณสารแต่ละชนิดในตัวอย่าง การคำนวณความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดในไซริงค์เก็บตัวอย่างสามารถทำได้ดังสมการที่ 3.4



รูปที่ 8 การเก็บตัวอย่างในแต่ละขั้นตอน

$$\text{ความเข้มข้นของสารชนิด } i \text{ ในไซริงค์เก็บตัวอย่าง (โมลต่อลิตร)} = \frac{\text{มวลของสารชนิด } i \text{ ในไซริงค์เก็บตัวอย่าง}}{\text{มวลโมเลกุลของสาร } i \times \text{ปริมาตรของตัวอย่าง}} \quad (3.4)$$

ตัวอย่างการคำนวณความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดในไซริงค์เก็บตัวอย่าง

มวลของตัวอย่าง ( $M_1$ )	เท่ากับ	4.19	กรัม
ปริมาตรของตัวอย่าง ( $V_1$ )	เท่ากับ	4.7	มิลลิลิตร
มวลของชั้นน้ำมัน ( $M_2$ )	เท่ากับ	3.36	กรัม
ร้อยละโดยมวลของไบโอดีเซลในผลิตภัณฑ์	เท่ากับร้อยละ	94.3	โดยมวล

$$\begin{aligned} \text{ความเข้มข้นของไบโอดีเซลในไซริงค์} &= \frac{\text{มวลของไบโอดีเซลในตัวอย่าง}}{\text{มวลโมเลกุลของไบโอดีเซล} \times \text{ปริมาตรของตัวอย่าง}} \\ &= \frac{\text{มวลของไบโอดีเซลในชั้นน้ำมัน}}{\text{มวลโมเลกุลของไบโอดีเซล} \times \text{ปริมาตรของตัวอย่าง}} \\ &= \frac{\text{ร้อยละโดยมวลของไบโอดีเซลในผลิตภัณฑ์} \times \text{มวลของชั้นน้ำมัน}}{\text{มวลโมเลกุลของไบโอดีเซล} \times \text{ปริมาตรของตัวอย่าง}} \end{aligned}$$

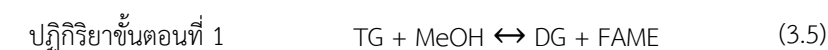
ร้อยละโดยมวลของไบโอดีเซลในผลิตภัณฑ์จะได้อาจจากการนำตัวอย่างชั้นน้ำมัน หรือ  $M_2$  ที่แสดงดังรูปที่ 8 ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี และคำนวณด้วยสมการที่ 3.1

$$\text{ความเข้มข้นของไบโอดีเซลในไซริงค์} = \frac{\frac{94.3}{100} \times 3.36 \text{ (กรัม)}}{286.6 \text{ (กรัมต่อโมล)} \times 4.7 \times 10^{-3} \text{ (ลิตร)}}$$

$$\text{ความเข้มข้นของไบโอดีเซลในไซริงค์} = 2.35 \text{ โมลต่อลิตร}$$

### 3.4.3 การคำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาของแต่ละขั้นตอน

จากความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดที่คำนวณได้ในหัวข้อที่ 3.4.2 สามารถนำไปสู่การคำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาของแต่ละขั้นตอนได้ โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 1 คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์และเมทานอล อัตราการเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2 คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไดกลีเซอไรด์และเมทานอล และอัตราการเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 3 คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างมอนอกลิเซอไรด์และเมทานอล ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้ง 3 ขั้นตอนสามารถคำนวณได้ตั้งสมการที่ (3.5) ถึง (3.13)



$$r_{\text{TG}} = \frac{dC_{\text{TG}}}{dt} = -r_1 \quad (3.8) \quad \left| \quad r_1 = -\frac{dC_{\text{TG}}}{dt} \quad (3.11)$$

$$r_{\text{DG}} = \frac{dC_{\text{DG}}}{dt} = r_1 - r_2 \quad (3.9) \quad \left| \quad r_2 = -\frac{dC_{\text{DG}}}{dt} - \frac{dC_{\text{DG}}}{dt} \quad (3.12)$$

$$r_{\text{MG}} = \frac{dC_{\text{MG}}}{dt} = r_2 - r_3 \quad (3.10) \quad \left| \quad r_3 = -\frac{dC_{\text{MG}}}{dt} - \frac{dC_{\text{DG}}}{dt} - \frac{dC_{\text{MG}}}{dt} \quad (3.13)$$

โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาช่วงแรก (initial rate) ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกำหนดที่ช่วงเวลา 1 นาทีแรก เนื่องจากเป็นช่วงที่ผลการศึกษานั้นชัดเจน

#### ตัวอย่างการคำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอน

ความเข้มข้นของสารตัวอย่างที่เวลา 0 และ 1 นาทีถูกแสดงในตารางที่ 4 และสามารถนำไปหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนได้ด้วยสมการที่ 3.11 ถึงสมการที่ 3.13

**ตารางที่ 4** ตัวอย่างการคำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาจากความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารแต่ละชนิด (โมลต่อลิตร)		
	ไตรกลีเซอไรด์	ไดกลีเซอไรด์	มอนอกลิเซอไรด์
0	0.835	0.000	0.000
1	0.108	0.116	0.079

$$r_1 = -\frac{dC_{\text{TG}}}{dt} = -\frac{0.835-0.108}{1-0} = 0.727 \text{ โมลต่อลิตรต่อนาที}$$

$$r_2 = -\frac{dC_{TG}}{dt} - \frac{dC_{DG}}{dt} = 0.727 - \frac{0.116-0}{1-0} = 0.611 \text{ โมลต่อลิตรต่อนาที}$$

$$r_3 = -\frac{dC_{TG}}{dt} - \frac{dC_{DG}}{dt} - \frac{dC_{MG}}{dt} = 0.611 - \frac{0.079-0}{1-0} = 0.532 \text{ โมลต่อลิตรต่อนาที}$$

#### 3.4.4 การคำนวณความคลาดเคลื่อน

ความคลาดเคลื่อน (errors) ที่จะใช้แสดงในการอภิปรายผลการทดลองจะแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ค่าความคลาดเคลื่อนจะแบ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนเชิงลบ (negative error) และค่าความคลาดเคลื่อนเชิงบวก (positive error) โดยการหาค่าความคลาดเคลื่อนถูกแสดงดังสมการที่ 3.13 ถึง 3.15

$$\text{ค่าเฉลี่ยของข้อมูล} = \frac{\text{ผลรวมของข้อมูลทุกค่า}}{\text{จำนวนข้อมูล}} \quad (3.13)$$

$$\text{ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงลบ} = \text{ค่าเฉลี่ยของข้อมูล} - \text{ค่าที่ต่ำที่สุดในข้อมูลทั้งหมด} \quad (3.14)$$

$$\text{ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงบวก} = \text{ค่าที่สูงที่สุดในข้อมูลทั้งหมด} - \text{ค่าเฉลี่ยของข้อมูล} \quad (3.15)$$

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปราย

งานวิจัยนี้ศึกษาปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม เมื่อใช้อะซิโตนหรือไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วม ใช้โซเดียมเมทอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณร้อยละ 1 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวทำละลายร่วมต่อจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน การทดลองในงานวิจัยนี้จะทำที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มโอเลอินตั้งแต่ 3:1 ถึง 6:1 ปริมาณตัวทำละลายร่วมตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึงร้อยละ 20 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ตัวอย่างที่เก็บได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ปริมาณไบโอดีเซล ไตรกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ และมอนอกลิเซอไรด์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟี ผลการทดลองได้ถูกอภิปรายตามลำดับดังนี้

- 4.1 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม
  - 4.1.1 เมื่อไม่มีการใช้ตัวทำละลายร่วม
  - 4.1.2 เมื่อมีการใช้ตัวทำละลายร่วม
- 4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม เมื่อไม่มีตัวทำละลายร่วม
- 4.3 อิทธิพลของตัวแปรต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วม
  - 4.3.1 อิทธิพลของปริมาณตัวทำละลายร่วม
  - 4.3.2 อิทธิพลของอุณหภูมิ
  - 4.3.3 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืช
- 4.4 อิทธิพลของตัวแปรต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วม
  - 4.4.1 อิทธิพลของปริมาณตัวทำละลายร่วม
  - 4.4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิ
  - 4.4.3 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืช
- 4.5 การเปรียบเทียบปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน

#### 4.1 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม

การทดลองชุดแรกเป็นการทดลองเพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม การทดลองทำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 6:1 โดยจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันจะถูกศึกษาใน 2 ประเด็น ได้แก่ วัฏภาคของสารผสมระหว่างการเกิดปฏิกิริยา (reaction mixture phase) เพื่อให้ให้เห็นภาพการละลายของสารระหว่างการเกิดปฏิกิริยา และปฏิกิริยาเคมี (chemical reaction) เพื่อให้เข้าใจปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น

##### 4.1.1 เมื่อไม่มีการใช้ตัวทำละลายร่วม

ในหัวข้อแรกจะเป็นการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม เมื่อไม่มีตัวทำละลายร่วม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 โดยรูปที่ 9 แสดงสารผสมในเครื่องปฏิกรณ์ระหว่างเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มและเมทานอล ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า วัฏภาคน้ำมันปาล์มเป็นสีเหลืองและใส แต่หากเติมเมทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยาลงในน้ำมันพืช จากสารผสมสีเหลืองใสดังรูปที่ 9(ก) จะกลายเป็นสารผสมสีเหลืองขุ่นที่แสดงดังรูปที่ 9(ข) โดยมีสาเหตุจากการที่น้ำมันพืชและเมทานอลละลายเข้าด้วยกันได้น้อย



(ก)

(ข)

(ค)

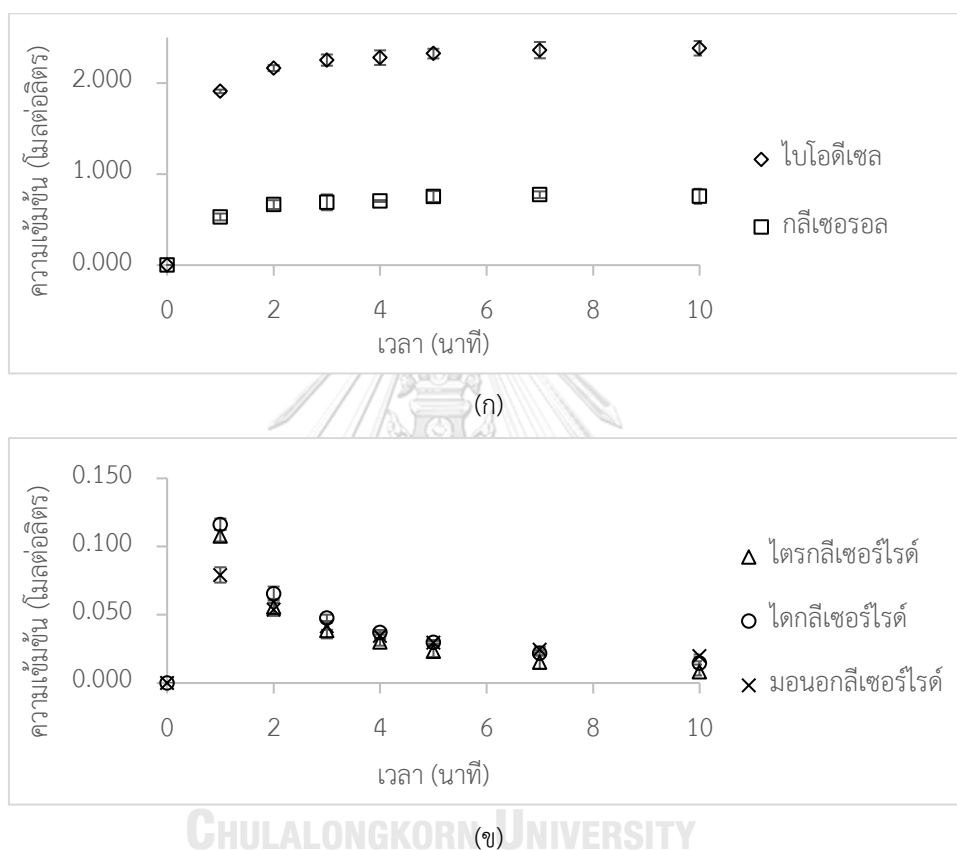
**รูปที่ 9** วัฏภาคของสารผสมในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน ไม่มีการใช้ตัวทำละลายร่วม (ก) วัฏภาคน้ำมันพืช (ข) วัฏภาคของสารผสมในช่วงต้นปฏิกิริยา (ค) วัฏภาคของสารผสมในช่วงกลางและท้ายปฏิกิริยา ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

การแยกวัฏภาคของน้ำมันพืชและเมทานอลจะส่งผลให้ปฏิกิริยาในช่วงแรกเกิดช้ากว่าที่ควรจะเป็น เนื่องจากอัตราการถ่ายโอนมวลระหว่างวัฏภาคที่ต่ำ โดยปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันจะเกิดขึ้นในวัฏภาคของเมทานอล เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาละลายอยู่ในวัฏภาคของเมทานอลเป็นหลัก

ในงานวิจัยของ S.N. Csernica และ J.T. Hsu (2012) [4] ได้ศึกษาถึงปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ละลายอยู่ในวัฏภาคเมทานอลเทียบกับวัฏภาคของน้ำมันพืช ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล

ต่อน้ำมันพืช 6:1 ตัวเร่งปฏิกิริยาจะละลายอยู่ในวัฏภาคเมทานอลคิดเป็นปริมาณ 29.67 เท่าของปริมาณที่ละลายอยู่ในวัฏภาคน้ำมันพืช

และเมื่อเวลาผ่านไป วัฏภาคของสารผสมจะใสขึ้นจนเปลี่ยนจากรูป 9(ข) เป็นรูป 9(ค) เนื่องจากไบโอดีเซลที่เกิดขึ้นนั้นจะทำให้น้ำมันพืชและเมทานอลละลายเข้าด้วยกันได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม ไบโอดีเซลไม่สามารถทำให้วัฏภาคของสารผสมนั้นละลายกันจนเป็นเนื้อเดียว เนื่องจากไบโอดีเซลละลายกับกลีเซอรอลได้น้อยมาก

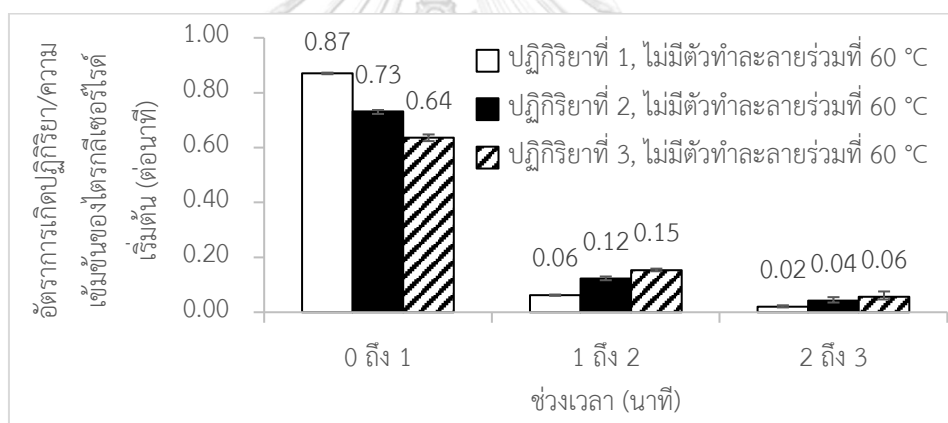


รูปที่ 10 ความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดที่เวลาต่างๆ เมื่อไม่มีตัวทำละลายร่วม (ก) สารผลิตภัณฑ์ (ข) สารตั้งต้นและสารมัธยันตร์ ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

รูปที่ 10 แสดงความเข้มข้นของสารที่เวลาต่างๆ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นไบโอดีเซลและกลีเซอรอลสูงขึ้นตามเวลา เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน และความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์ลดลงตามเวลา เนื่องจากเป็นสารตั้งต้น ขณะที่ความเข้มข้นของไดกลีเซอไรด์และมอนอกลิเซอไรด์จะมีค่าสูงที่สุดเวลา 1 นาที จากนั้นจึงลดลงเรื่อยๆ พฤติกรรมนี้เป็นการกล่าวโดยนัยว่า ไตกลีเซอไรด์และมอนอกลิเซอไรด์เป็นสารมัธยันตร์ (intermediate) ที่เกิดขึ้นและถูกใช้ไประหว่างการทำปฏิกิริยา ซึ่งบ่งชี้ว่า ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาต่อเนื่อง 3 ขั้นตอนตามสมการที่ 4.1 ถึง 4.3

ปฏิกิริยาโดยรวม	$\text{Triglycerides} + 3\text{MeOH} \leftrightarrow \text{FAME} + \text{Glycerol}$	(4.1)
ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 1	$\text{Triglycerides} + \text{MeOH} \leftrightarrow \text{Diglycerides} + \text{FAME}$	(4.2)
ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2	$\text{Diglycerides} + \text{MeOH} \leftrightarrow \text{Monoglycerides} + \text{FAME}$	(4.3)
ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 3	$\text{Monoglycerides} + \text{MeOH} \leftrightarrow \text{Glycerol} + \text{FAME}$	(4.4)

นอกจากนี้ การเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับยังได้ถูกศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยการผสมไบโอดีเซลและกลีเซอรอล เพื่อดูการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของขั้นตอนที่ 3 และผสมไบโอดีเซล ไตรกลีเซอไรด์ และมอนอกลิเซอไรด์ เพื่อดูการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของขั้นตอนที่ 1 และ 2 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ไม่มีปฏิกิริยาย้อนกลับเกิดขึ้นในปฏิกิริยาทุกขั้นตอน ทั้งการทดลองที่มีและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา โดยผลการศึกษาที่สอดคล้องกับงานวิจัยในอดีตที่พบว่า ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ิฟิเคชันไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ที่อุณหภูมิต่ำเช่นเดียวกัน [5, 12]



รูปที่ 11 อัตราการเกิดปฏิกิริยาในแต่ละขั้นตอนในช่วง 3 นาทีแรก เมื่อไม่มีตัวทำละลายร่วม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

รูปที่ 11 แสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาของแต่ละขั้นตอน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ในช่วง 1 นาทีแรก ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 1 จะเกิดเร็วที่สุด เป็นเพราะว่าไตรกลีเซอไรด์มีความเข้มข้นสูงที่สุดในเหล้ากลีเซอไรด์ ทำให้ไตรกลีเซอไรด์มีโอกาสเกิดปฏิกิริยากับเมทานอลสูงที่สุด แต่หลังจากช่วง 1 นาทีแรก ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 3 จะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงที่สุด จากนั้นจึงเป็นปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2 และปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 1 ตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ว่ามอนอกลิเซอไรด์มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา (reactivity) สูงที่สุด จากนั้นจึงเป็นไตรกลีเซอไรด์และไตรกลีเซอไรด์ ตามลำดับ

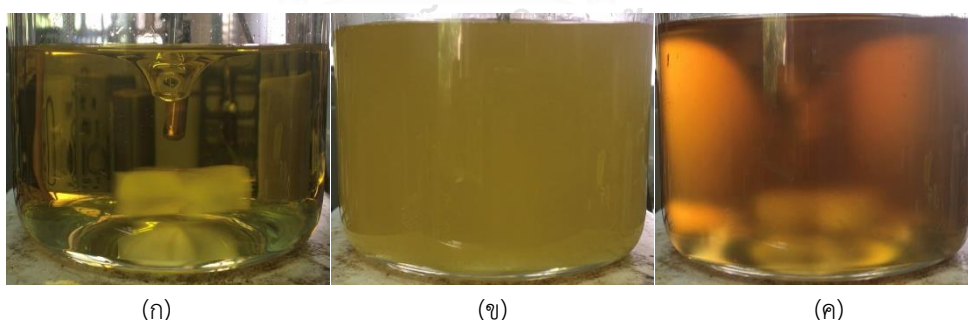


ในงานวิจัยของ B. Likozar และ J. Levec (2014) [19] ได้ระบุสาเหตุที่มอนอกลิเซอไรด์สามารถเกิดปฏิกิริยากับเมทานอลได้ดีที่สุดในหมู่กลีเซอไรด์ไว้ว่า เนื่องจากมอนอกลิเซอไรด์มีขนาดโมเลกุลเล็กที่สุด จึงทำให้อุปสรรคในการเกิดปฏิกิริยา (steric hindrance) ต่ำที่สุด และส่งผลให้มอนอกลิเซอไรด์มีโอกาสเกิดปฏิกิริยาสูงที่สุดในบรรดาเหล่ากลีเซอไรด์ ในทำนองเดียวกัน ไตรกลีเซอไรด์มีขนาดโมเลกุลที่เล็กกว่าไตรกลีเซอไรด์ ทำให้ไตรกลีเซอไรด์เกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าไตรกลีเซอไรด์

โดยสรุป ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม เมื่อไม่มีตัวทำละลายร่วม เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่าง 2 ภูมิภาค โดยในช่วงแรกจะเป็นการแยกภูมิภาคระหว่างน้ำมันพืชและเมทานอล และหลังจากนั้นจะเป็นการแยกภูมิภาคระหว่างไบโอดีเซลและกลีเซอรอล โดยปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่อเนื่อง 3 ขั้นตอนและผันกลับไม่ได้ที่อุณหภูมิต่ำ และมอนอกลิเซอไรด์จะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยากับเมทานอลสูงที่สุด จากนั้นจึงเป็นไตรกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ตามลำดับ

#### 4.1.2 เมื่อมีการใช้ตัวทำละลายร่วม

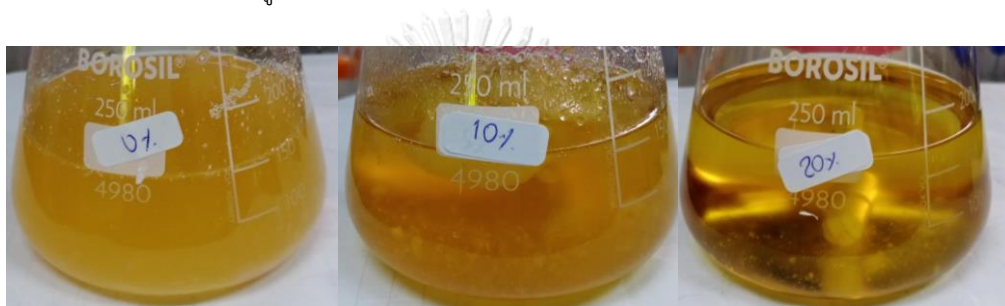
ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาผลกระทบของการใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมต่อจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม ภาพภูมิภาคของสารผสมระหว่างเกิดปฏิกิริยาจะถูกแสดงดังรูปที่ 12 โดยปริมาณอะซิโตนที่ใช้เท่ากับร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมนั้นไม่สามารถทำให้ภูมิภาคของสารผสมในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันละลายจนเป็นเนื้อเดียวกันได้ โดยภูมิภาคของสารผสมนั้นเป็นแบบวิวิธพันธุ์ ตลอดทั้งช่วงของการเกิดปฏิกิริยาดังที่แสดงในรูปที่ 12(ข) และ 12(ค)



**รูปที่ 12** ภูมิภาคของสารผสมในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม (ก) ภูมิภาคน้ำมันพืช (ข) ภูมิภาคในช่วงต้นปฏิกิริยา (ค) ภูมิภาคในช่วงกลางและท้ายปฏิกิริยา ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

รูปที่ 12(ก) แสดงผลของวัฏภาคน้ำมันพืช และเมื่อทำการเติมตัวทำละลายร่วม เมทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยาลงในน้ำมันพืช ภาพของสารผสมจะกลายเป็นดังรูปที่ 12(ข) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สารผสมมีความขุ่นที่ไม่แตกต่างกับเมื่อไม่มีตัวทำละลายร่วม ซึ่งจากรูปดังกล่าวบ่งชี้ว่า การใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมไม่สามารถทำให้น้ำมันพืชและเมทานอลละลายกันจนเป็นเนื้อเดียว

และเมื่อการเกิดปฏิกิริยาดำเนินต่อไป วัฏภาคของสารผสมจะใสขึ้นจนเปลี่ยนจากรูป 12(ข) เป็นรูป 12(ค) แต่จะไม่ละลายกันจนเป็นเนื้อเดียว ซึ่งบ่งชี้ว่า การใช้อะซิโตนไม่สามารถทำให้ไบโอดีเซลและกลีเซอรอลละลายกันจนเป็นเนื้อเดียวเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม การเพิ่มปริมาณอะซิโตนจะทำให้การละลายวัฏภาคระหว่างไบโอดีเซลและกลีเซอรอลดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 13



(ก)

(ข)

(ค)

**รูปที่ 13** วัฏภาคของสารผสมระหว่างไบโอดีเซล กลีเซอรอล เมทานอล ตัวเร่งปฏิกิริยา และอะซิโตนที่ปริมาณร้อยละ (ก) 0 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม (ข) 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม (ค) 20 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม

ความเข้มข้นของสารที่เวลาต่างๆ เมื่อมีการใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมถูกแสดงดังรูปที่ 14 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารชนิดต่างๆนั้นเหมือนกับเมื่อไม่มีการใช้ตัวทำละลายร่วม ซึ่งบ่งชี้ว่า ตัวทำละลายร่วมไม่ส่งผลต่อขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน อีกทั้ง การเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับเมื่อมีการใช้ตัวทำละลายร่วมยังได้ถูกศึกษาเช่นเดียวกัน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ไม่มีปฏิกิริยาย้อนกลับเกิดขึ้นในปฏิกิริยาทุกขั้นตอนเช่นเดียวกันกับเมื่อไม่มีการใช้ตัวทำละลายร่วม

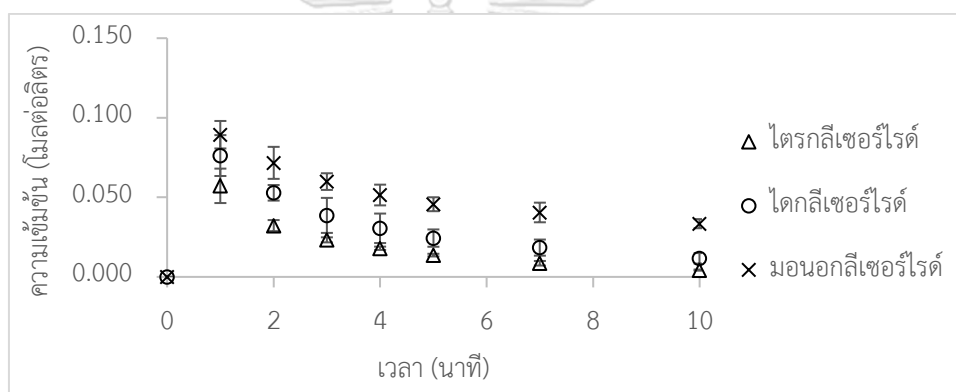
อัตราการเกิดปฏิกิริยาของแต่ละขั้นตอน ถูกแสดงดังรูปที่ 15 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า มอนอกลิเซอโรลไธด์ยังมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยากับเมทานอลได้สูงที่สุด จากนั้นจึงเป็นไดกลีเซอโรลไธด์และไตรกลีเซอโรลไธด์ตามลำดับเช่นเดียวกันกับเมื่อไม่มีตัวทำละลายร่วม ซึ่งบ่งชี้ว่า การใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมนั้นไม่ส่งผลต่อลำดับของความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา

โดยสรุป การใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมไม่ทำให้น้ำมันพืชและเมทานอลละลายกันจนเป็นเนื้อเดียว แต่ทำให้ไบโอดีเซลและกลีเซอรอลละลายเข้ากันได้ดีขึ้น และปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันยังเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

ต่อเนื่อง 3 ขั้นตอน ผันกลับไม่ได้ และมอนอกลิเซอไรด์ยังมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด จากนั้นจึงเป็นไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ตามลำดับ



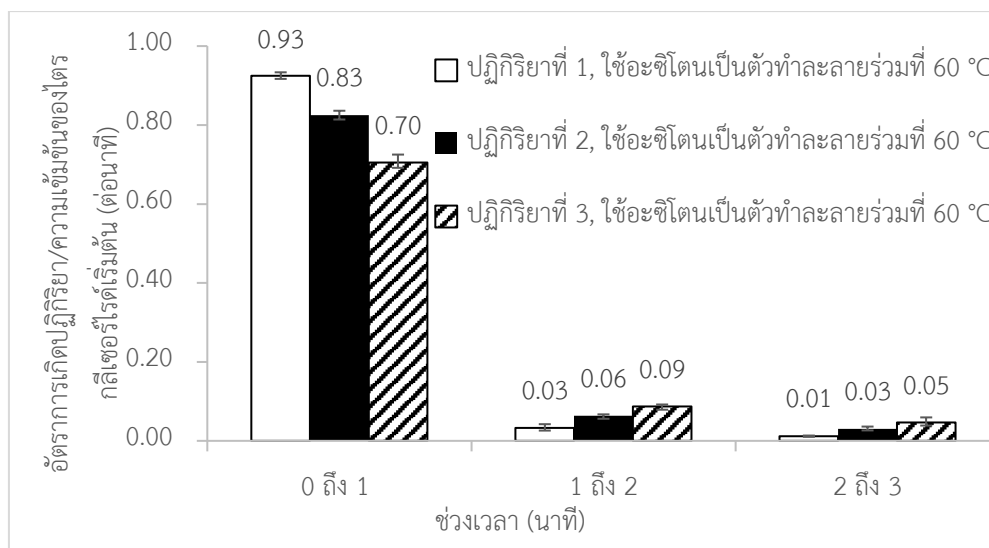
(ก)



(ข)

**รูปที่ 14** ความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลน้ำมันปาล์ม (ก) สารผลิตภัณฑ์ (ข) สารตั้งต้นและสารมัธยันตร์ ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

ในลำดับถัดไปจะเป็นการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มเมื่อไม่มีและมีตัวทำละลายร่วม ซึ่งจากภาพการเกิดปฏิกิริยาดังที่แสดงในรูปที่ 9 และรูปที่ 12 แสดงให้เห็นว่า ภูมิภาคของปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มจะแบ่งเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงเริ่มต้นที่เป็นการแยกภูมิภาคระหว่างน้ำมันปาล์มและเมทานอล ซึ่งเป็นช่วงที่สำคัญต่อการเกิดไปโอดีเซลที่จะทำให้ น้ำมันปาล์มและเมทานอลละลายเข้าด้วยกันได้ดีขึ้น และช่วงท้ายที่เป็นการแยกภูมิภาคระหว่างไปโอดีเซลและกลีเซอรอล ซึ่งเป็นช่วงที่สำคัญต่อร้อยละผลได้ของไปโอดีเซลในช่วงท้าย



**รูปที่ 15** อัตราการเกิดปฏิกิริยาในแต่ละขั้นตอนในช่วง 3 นาทีแรก เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายรวมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลน้ำมันปาล์ม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อ น้ำมันปาล์ม 6:1

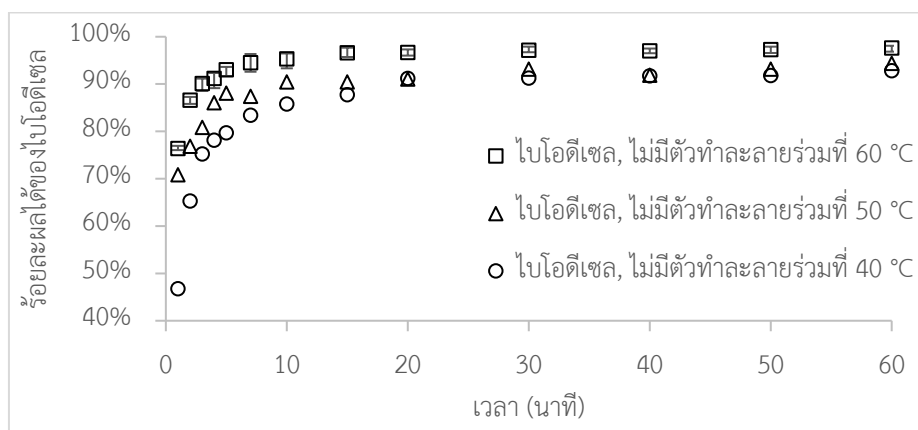
ดังนั้นอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ จะถูกอภิปรายโดยการใช้ข้อมูลที่เวลา 2 จุด ได้แก่ ที่เวลา 1 นาที ซึ่งแสดงถึงอิทธิพลของตัวแปรต่อช่วงเริ่มต้นการเกิดปฏิกิริยา และที่เวลา 60 นาที ซึ่งแสดงถึงอิทธิพลของตัวแปรต่อช่วงท้ายการเกิดปฏิกิริยา

โดยข้อมูลที่ใช้ในการอภิปรายอิทธิพลของตัวแปรต่อช่วงเริ่มต้นการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่ ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่เวลา 1 นาที ซึ่งแสดงถึงอิทธิพลของตัวแปรต่ออัตราการเกิดไบโอดีเซลเริ่มต้น และอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอน ซึ่งแสดงอิทธิพลของตัวแปรต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของไตรกลีเซอไรด์ ไคลีสเอร์ไรด์ และมอนอกลีสเอร์ไรด์เริ่มต้น โดยผลของร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่เวลา 1 นาที และอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนควรจะต้องสอดคล้องและไปในทิศทางเดียวกัน นอกจากนี้ข้อมูลที่ใช้ในการอภิปรายอิทธิพลของตัวแปรต่อช่วงท้ายการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่ ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่เวลา 60 นาที ซึ่งแสดงถึงอิทธิพลของตัวแปรต่อการเกิดปฏิกิริยาโดยรวม

ถึงอย่างไรก็ตามการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ในสภาวะที่มีและไม่มีตัวทำละลายรวมนั้น อุณหภูมิเป็นตัวแปรสำคัญต่อความชัดเจนของการเปรียบเทียบ ดังนั้นอิทธิพลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ิฟิเคชัน เมื่อไม่มีตัวทำละลายรวมจะถูกศึกษาเป็นอันดับแรกในหัวข้อ 4.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ิฟิเคชัน ซึ่งจะนำไปสู่การเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเปรียบเทียบปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ิฟิเคชันระหว่างกรณีที่มีและไม่มีตัวทำละลายรวม โดยผลการเปรียบเทียบนั้นจะถูกแสดงอย่างละเอียดในหัวข้อที่

#### 4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม เมื่อไม่มีตัวทำละลายร่วม

การทดลองชุดนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อไม่มีตัวทำละลายร่วม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อ น้ำมันปาล์ม 6:1



รูปที่ 16 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อไม่มีตัวทำละลายร่วม โดยใช้อัตราส่วน โดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

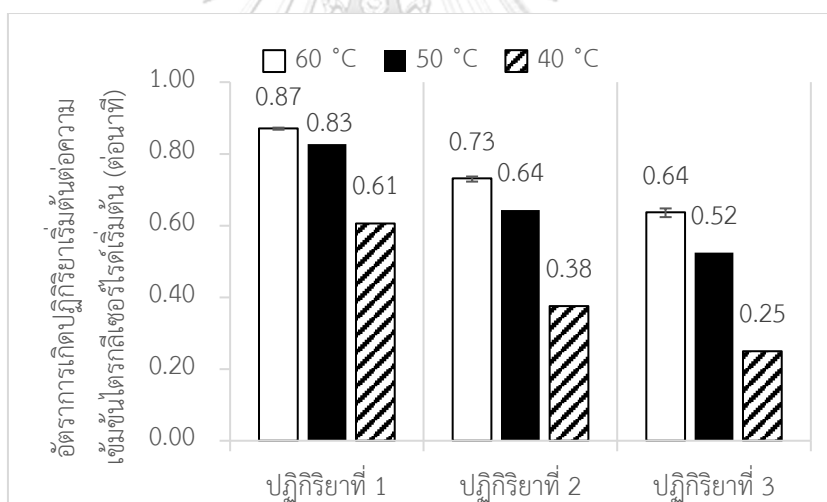
อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อไม่มีตัวทำละลายร่วม ถูกแสดงดังรูปที่ 16 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า กราฟการเกิดไบโอดีเซลนั้นไม่เป็นรูปตัวเอสในทุกช่วงอุณหภูมิ หรือไม่มีเวลาหน่วง (lag time) ผลการศึกษาดังกล่าวยังบ่งชี้ว่า ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มสามารถเกิดได้อย่างรวดเร็ว ตั้งแต่ช่วงนาทีแรก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ H. Nouredini และ D. Zhu (1997) [8] และจากรูปที่ 16 ยังแสดงให้เห็นว่า ที่เวลาต่างๆ ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่อุณหภูมิสูงจะมากกว่าร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่ำอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งบ่งชี้ว่า อุณหภูมิมีความสำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของ น้ำมันปาล์มเป็นอย่างมาก

อิทธิพลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาจะถูกศึกษาจากร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่เวลา 1 นาที และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ณ ช่วงท้ายปฏิกิริยา ซึ่งแสดงในตารางที่ 5 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่เวลา 1 นาที และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ณ ช่วงท้ายปฏิกิริยาสูงขึ้น ผลการศึกษาดังกล่าวยังบ่งชี้ว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นทั้งช่วงต้นและช่วงท้ายของการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ H. Nouredini และ D. Zhu (1997) [8] เพราะอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้เมทานอลและน้ำมันพืชสามารถละลายกันได้ดีขึ้น อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มโอกาสที่โมเลกุลของสารตั้งต้นจะชนกันได้ง่ายขึ้นตามทฤษฎีของกฎอัตรา (rate law)

ตารางที่ 5 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล เมื่อไม่มีตัวทำละลายร่วม โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ที่เวลา 1 นาที	ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ณ ช่วงท้ายปฏิกิริยา
40	47.1	93.5
50	71.3	95.1
60	76.9 (-0.3, +0.6)	98.3 (-0.5, +0.7)

นอกจากนี้ อิทธิพลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของแต่ละขั้นตอนในช่วงแรกยังได้ถูกศึกษาและแสดงดังรูปที่ 17 เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และมอนอกลิเซอไรด์ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นของปฏิกิริยาทั้ง 3 ขั้นตอนสูงขึ้น ผลการศึกษาดังกล่าวบ่งชี้ว่า ทั้งไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และมอนอกลิเซอไรด์จะเกิดปฏิกิริยากับเมทานอลได้ดีที่อุณหภูมิสูง ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของกฎอัตรา



รูปที่ 17 อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นของแต่ละขั้นตอนที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อไม่มีตัวทำละลายร่วม โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

โดยสรุป เมื่อไม่มีตัวทำละลายร่วม อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้งช่วงแรกและช่วงท้ายสูงขึ้น แท้ที่จริงแล้ว การทดลองในหัวข้อนี้มีจุดประสงค์เพื่อเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่มีและไม่มีตัวทำละลายร่วม ซึ่งถูกแสดงโดยละเอียดในหัวข้อ 4.5 โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเปรียบเทียบคือ 40 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิดังกล่าวนั้นสูงกว่าอุณหภูมิห้องเล็กน้อย ทำให้การละลายระหว่างเมทานอลและน้ำมันปาล์มต่ำ แล้วส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดช้า และจะทำให้ผลกระทบของการใส่ตัวทำละลาย

ร่วมเห็นได้อย่างชัดเจนที่อุณหภูมินี้ และในหัวข้อถัดไปจะเป็นการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ิฟิเคชัน เมื่อมีการใช้ตัวทำละลายร่วม

#### 4.3 อิทธิพลของตัวแปรต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ิฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วม

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ิฟิเคชัน เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วม ตัวแปรที่นักศึกษาจะประกอบไปด้วยปริมาณตัวทำละลายร่วม อุณหภูมิ และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม โดยอิทธิพลของปริมาณตัวทำละลายร่วมจะถูกศึกษาเป็นอันดับแรก

##### 4.3.1 อิทธิพลของปริมาณตัวทำละลายร่วม

ในการทดลองชุดนี้จะศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวทำละลายร่วมต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ิฟิเคชัน เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึงร้อยละ 20 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 6:1 การทดลองจะดำเนินการที่อุณหภูมิค่าหรือที่ 40 องศาเซลเซียส

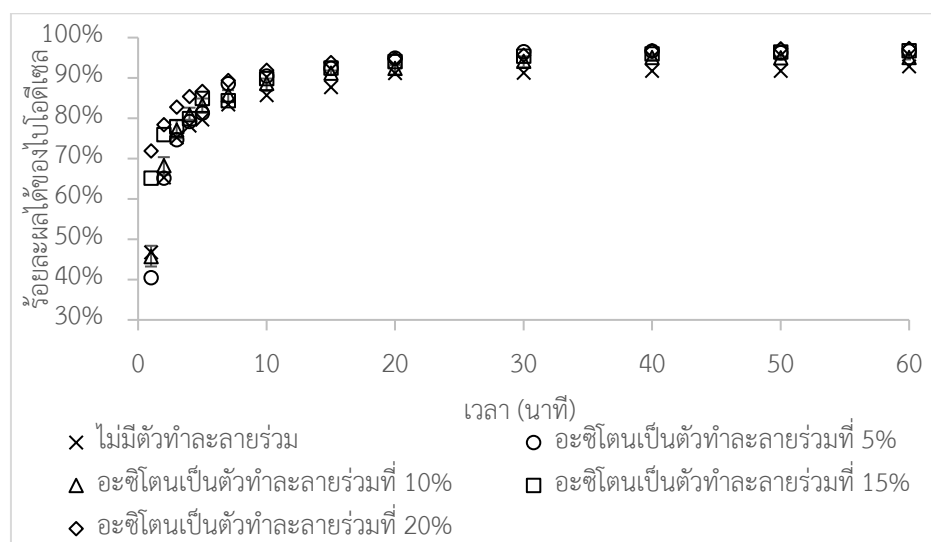
อิทธิพลของปริมาณอะซิโตนต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ิฟิเคชัน ถูกแสดงดังรูปที่ 18 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ที่อะซิโตนปริมาณต่างๆ ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลมีความแตกต่างกันที่เวลา 1 นาที แต่หลังจากนั้น ความแตกต่างของร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลจะน้อยลง ซึ่งสาเหตุมาจากการที่ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ิฟิเคชันสามารถเกิดได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ช่วงเวลาที่ปฏิกิริยาถูกผลกระทบจากการละลายของสารค่อนข้างสั้น และส่งผลให้อะซิโตนส่งผลกระทบต่ออย่างชัดเจนที่เวลา 1 นาทีเพียงเท่านั้น

อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองในรูปที่ 18 ยังเพียงพอที่จะใช้ในการศึกษาอิทธิพลของอะซิโตนต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งอิทธิพลของปริมาณอะซิโตนต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาจะถูกศึกษาจากร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่เวลา 1 นาทีและร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ณ ช่วงท้ายปฏิกิริยาจะถูกแสดงดังตารางที่ 6 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมสามารถเพิ่มร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่เวลา 1 นาทีและร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ณ ช่วงท้ายปฏิกิริยา ผลการศึกษาดังกล่าวบ่งชี้ว่า การใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมสามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากอะซิโตนทำให้สารในปฏิกิริยาละลายเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น แล้วส่งผลให้เหล้ากลีเซอร์ไรด์และเมทานอลเกิดปฏิกิริยากันได้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ L.T. Thanh และคณะ (2013) [15]

อย่างไรก็ตาม จากตารางที่ 6 ยังแสดงให้เห็นว่า ในช่วงที่อะซิโตนมีปริมาณน้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่เวลา 1 นาทีจะไม่มีความแตกต่างกัน ผลการศึกษาดังกล่าวบ่งชี้ว่า เมื่อปริมาณอะซิโตนน้อยกว่าร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม อะซิโตนไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น ซึ่งสาเหตุนี้จะถูกอภิปรายจากผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาในแต่ละขั้นตอนที่แสดงดังรูปที่ 19

อิทธิพลของปริมาณอะซิโตนร่วมต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นในแต่ละขั้นตอนถูกแสดงดังรูปที่ 19 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มปริมาณอะซิโตนจากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม อะซิโตน

จะไม่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นของขั้นตอนที่ 1 ผลการศึกษาดังกล่าวบ่งชี้ว่า ที่ปริมาณอะซิโตนน้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม อะซิโตนไม่สามารถเพิ่มการละลายของน้ำมันปาล์มและเมทานอลจนส่งผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรก



รูปที่ 18 อิทธิพลของปริมาณอะซิโตนต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

แต่การเพิ่มปริมาณอะซิโตนจากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 10 โดยมวลน้ำมันปาล์ม จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นของขั้นตอนที่ 2 และ 3 จะต่ำลง เนื่องจากทั้งไตรกลีเซอไรด์และมอนอกลิเซอไรด์ไม่จำเป็นต้องใช้ตัวทำละลายร่วมในการละลายกับเมทานอล โดยในการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม ชั้นแรก ไตรกลีเซอไรด์จะแพร่เข้าสู่ภูมิภาคของเมทานอล จากนั้นจึงเกิดปฏิกิริยากับเมทานอลกลายเป็นไตรกลีเซอไรด์และไปโอดีเซล ซึ่งไตรกลีเซอไรด์จะอยู่ในภูมิภาคของเมทานอลตั้งแต่เมื่อถูกสังเคราะห์ขึ้นมา ดังนั้นไตรกลีเซอไรด์จึงมีโอกาสเป็นอย่างมากที่จะเกิดปฏิกิริยากับเมทานอลต่อ แทนที่จะแพร่กลับมาสู่ชั้นน้ำมัน [6] ทำให้ไตรกลีเซอไรด์ไม่จำเป็นต้องพึ่งพาตัวทำละลายร่วมในการละลายกับเมทานอล มีหน้าซ้ำ การใช้ตัวทำละลายร่วมยังเป็นการเจือจางความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์และเมทานอล และเป็นทำนองเดียวกันกับมอนอกลิเซอไรด์

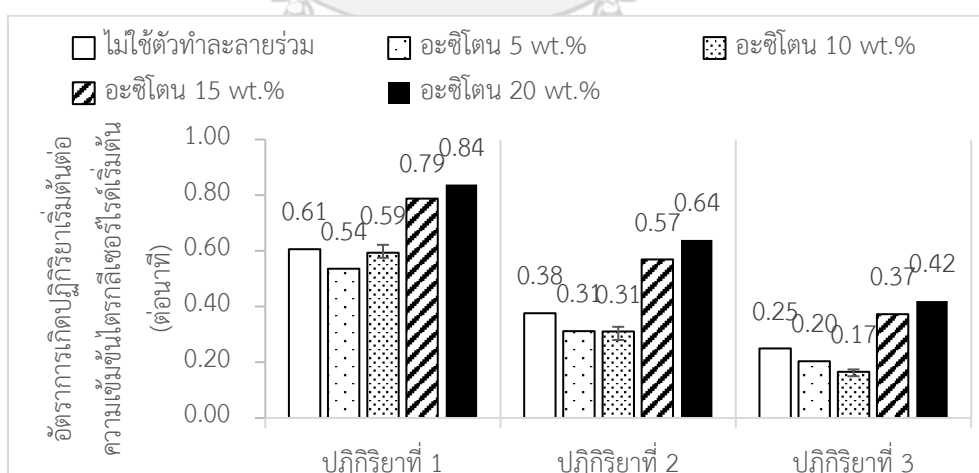
อย่างไรก็ตาม หากอะซิโตนมีปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 15 โดยมวลของน้ำมันปาล์มเป็นต้นไป อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นจะสูงขึ้นทั้ง 3 ขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 19 เนื่องจากอะซิโตนทำให้ไตรกลีเซอไรด์และเมทานอลละลายเข้ากันได้ดีขึ้นแล้วส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นของขั้นตอนที่ 1 สูงขึ้น แล้วทำให้ไตรกลีเซอไรด์มีปริมาณสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากไตรกลีเซอไรด์เป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 1 และไตรกลีเซอไรด์เป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2 จึงยังส่งผลให้ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2 เกิดเร็วขึ้นเช่นกัน และเป็นในทำนองเดียวกันกับการเพิ่มขึ้นของอัตราการเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 3



ตารางที่ 6 อิทธิพลของปริมาณอะซิโตนต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

ปริมาณตัวทำละลายรวม (ร้อยละโดยมวลของน้ำมันปาล์ม)	ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ที่เวลา 1 นาที	ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ณ ช่วงท้ายปฏิกิริยา
0	47.1	93.5
5	40.8	97.3
10	46.0 (-2.7, +2.5)	95.8 (-0.5, +0.6)
15	65.7	97.5
20	72.4	98.0

โดยสรุป เมื่ออะซิโตนมีปริมาณต่ำกว่าร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นกับเมทานอลของไตรกลีเซอไรด์และมอนอกลิเซอไรด์จะต่ำลง เนื่องจากหากอะซิโตนมีปริมาณต่ำ อะซิโตนไม่สามารถทำให้น้ำมันปาล์มและเมทานอลละลายเข้าด้วยกันได้ดีขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังเป็นการเจือจางความเข้มข้นของสาร อย่างไรก็ตาม หากอะซิโตนมีปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 15 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม อะซิโตนจะมีปริมาณเพียงพอที่จะทำให้สารในระบบละลายเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น แล้วทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ L.T. Thanh และคณะ (2013) [15] ที่พบว่า อะซิโตนต้องมีปริมาณสูงกว่าร้อยละ 20 โดยมวลของน้ำมัน ถึงจะทำให้สารผสมในปฏิกิริยาละลายเป็นเนื้อเดียวกัน และในหัวข้อถัดไปจะเป็นการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ

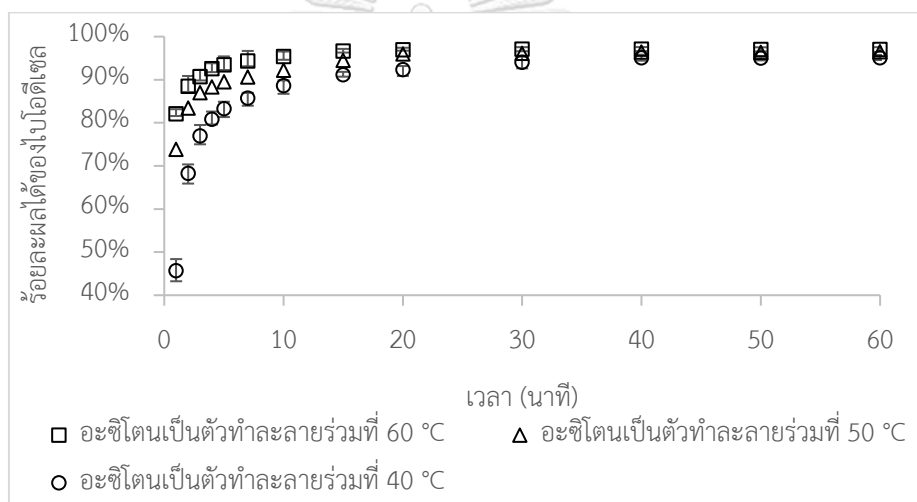


รูปที่ 19 อิทธิพลของปริมาณอะซิโตนต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นในแต่ละขั้นตอน ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

#### 4.3.2 อิทธิพลของอุณหภูมิ

ในการทดลองชุดนี้จะศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม การทดลองดำเนินการที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืช 6:1

อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมถูกแสดงดังรูปที่ 20 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ที่เวลาต่างๆ ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่อุณหภูมิสูงจะมากกว่าร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่ำอย่างเห็นได้ชัด ยกเว้นร้อยละผลได้ในช่วงท้ายปฏิกิริยาที่แทบไม่มีความแตกต่างเชิงสถิติ ผลการศึกษาดังกล่าวบ่งชี้ว่า เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วม อุณหภูมิสำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นเป็นอย่างมาก แต่แทบไม่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงท้าย ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ L.T. Thanh และคณะ (2013) [15]



รูปที่ 20 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

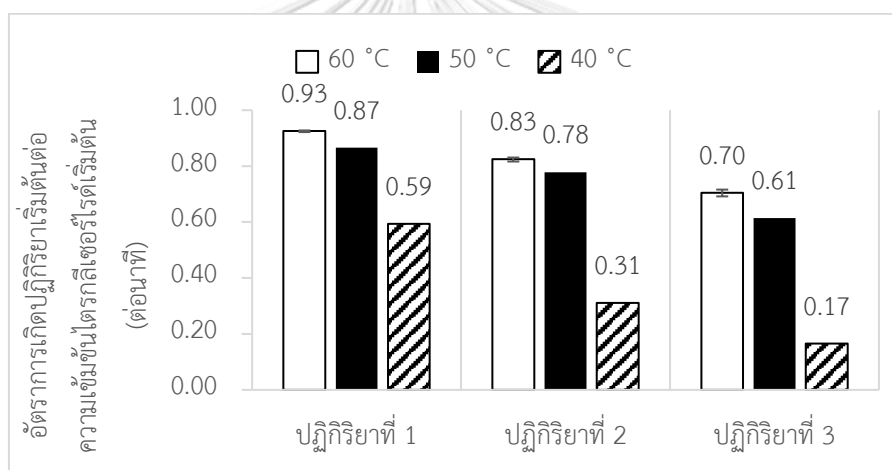
อิทธิพลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ที่เวลา 1 นาทีถูกแสดงดังตารางที่ 7 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่เวลา 1 นาทีสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สูงขึ้นตามอุณหภูมิในทั้ง 3 ขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 21 ผลการศึกษาดังกล่าวบ่งชี้ว่า การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นระหว่างเหล้ากลีเซอรอลและเมทานอลสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้น้ำมันพืชและเมทานอลละลายเข้ากันได้ดีขึ้น อีกทั้งยังเพิ่มโอกาสที่โมเลกุลของสารตั้งต้นจะชนกัน ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ L.T. Thanh และคณะ (2013) [15]

โดยสรุป เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วม การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรกสูงขึ้น แต่อุณหภูมิแทบไม่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาในช่วงท้าย

ตารางที่ 7 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ที่เวลา 1 นาที	ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ณ ช่วงท้ายปฏิกิริยา
40	46.0 (-2.5, +2.7)	95.8 (-0.5, +0.6)
50	74.4	97.3
60	82.7 (-0.6, +1.0)	97.7 (-0.6, +0.5)

จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณอะซิโตนและอุณหภูมิแสดงให้เห็นว่า อะซิโตนมีศักยภาพในการเพิ่มร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลในช่วงท้ายปฏิกิริยา ซึ่งอาจนำไปสู่การลดปริมาณของเมทานอลที่ใช้ได้ ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจึงเป็นการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล



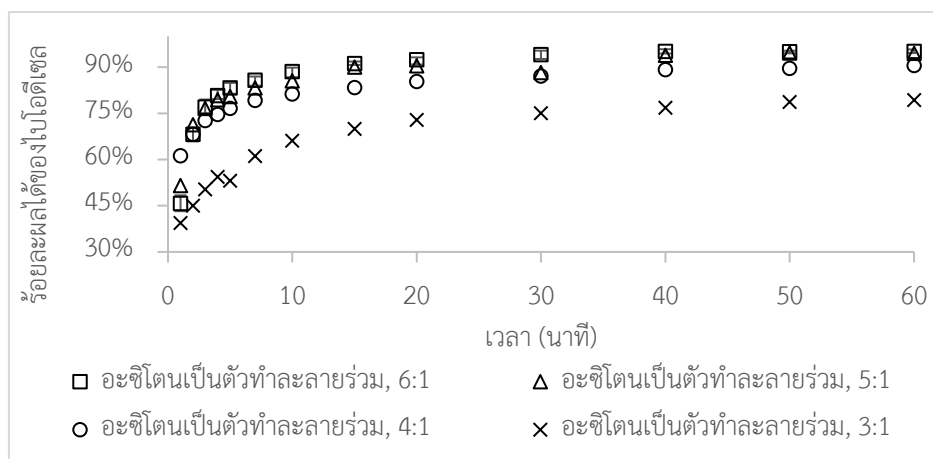
รูปที่ 21 อิทธิพลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นในแต่ละขั้นตอน เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

#### 4.3.3 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม

ในการทดลองชุดนี้จะศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วม ตั้งแต่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 3:1 ถึง 6:1 ที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม การทดลองจะดำเนินการที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันถูกแสดงดังรูปที่ 22 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลตั้งแต่ 4:1 ถึง 6:1 ร้อยละผลได้ที่เวลาต่างๆ จะไม่ค่อยแตกต่างกันมากนัก แต่หากลดอัตราส่วนโดยโมลเป็น 3:1 ร้อยละผลได้ที่เวลาต่างๆจะต่ำลงอย่างชัดเจน ผล

การศึกษาดังกล่าวบ่งชี้ว่า การใช้เมทานอลในปริมาณมากกว่าที่ต้องการตามปริมาณสารสัมพันธ์เป็นสิ่งสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เนื่องจากกลีเซอรอลที่เกิดขึ้นสามารถดึงเมทานอลออกจากการทำปฏิกิริยา [5] และทำให้เมทานอลสำหรับการทำปฏิกิริยาน้อยลง ซึ่งหากเมทานอลถูกใช้ในปริมาณที่พอดีตามปริมาณสารสัมพันธ์ จะทำให้เมทานอลมีปริมาณไม่เพียงพอ



รูปที่ 22 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมีมวลของน้ำมันปาล์ม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

นอกจากนี้ อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อร้อยละผลได้ของไปโอดีเซลที่เวลา 1 นาทีถูกแสดงดังตารางที่ 11 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การลดอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลลงจาก 6:1 เป็น 4:1 ร้อยละผลได้ของไปโอดีเซลที่เวลา 1 นาทีมีแนวโน้มสูงขึ้น แต่หากลดอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลเป็นที่ 3:1 ร้อยละผลได้ของไปโอดีเซลที่เวลา 1 นาทีจะต่ำลง ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้ง 3 ขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 23 ผลการศึกษาบ่งชี้ว่า การลดอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นสูงขึ้น ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ L.T. Thanh และคณะ (2013) [15] โดยทาง L.T. Thanh และคณะได้ให้เหตุผลไว้ว่า การลดปริมาณเมทานอลที่ใช้จะทำให้ปริมาตรของสารในระบบลดลง แล้วความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาจะสูงขึ้น จึงส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น

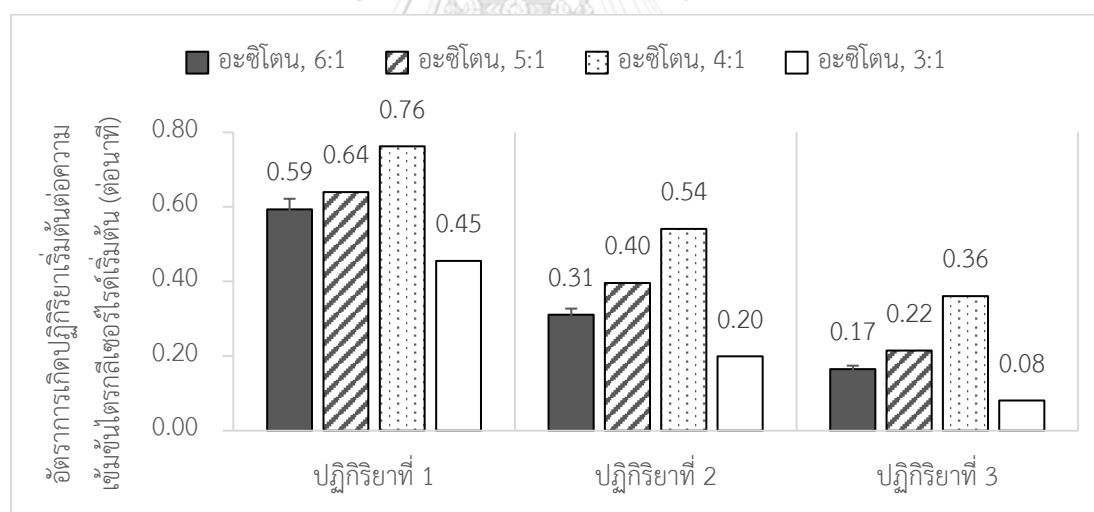
สาเหตุที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นลดต่ำลง เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลเท่ากับ 3:1 นั้นเป็นผลมาจากการที่อะซิโตนสามารถเกิดปฏิกิริยาควบแน่นกับตัวเอง (self-condensation) ในสถานะที่เป็นเบส ซึ่งการลดอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลที่ใช้จะเพิ่มความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาสูงขึ้น และส่งผลให้ความเป็นเบสของสารในระบบสูงขึ้นเช่นกัน โดยเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาถูกแสดงดังรูปที่ 24 และจากรูปดังกล่าวจะเห็นว่า หากอะซิ

โตนควบแน่นจนกลายเป็นสารเมซิทิลออกไซด์ (mesityl oxide) จะสามารถเกิดเป็นกรดอะซิติกและไอโซบิวทีนได้ แล้วกรดอะซิติกที่เกิดขึ้นนั้นจะทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยา และส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบมีปริมาณน้อยลง

**ตารางที่ 8** การเปรียบเทียบอิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล ต่อน้ำมันปาล์ม	ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล เป็นเวลา 1 นาที	ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ณ ช่วงท้ายปฏิกิริยา
3:1	39.8	80.0
4:1	61.7	91.2
5:1	52.0	95.2
6:1	46.0 (-2.5, +2.7)	95.8 (-0.5, +0.6)

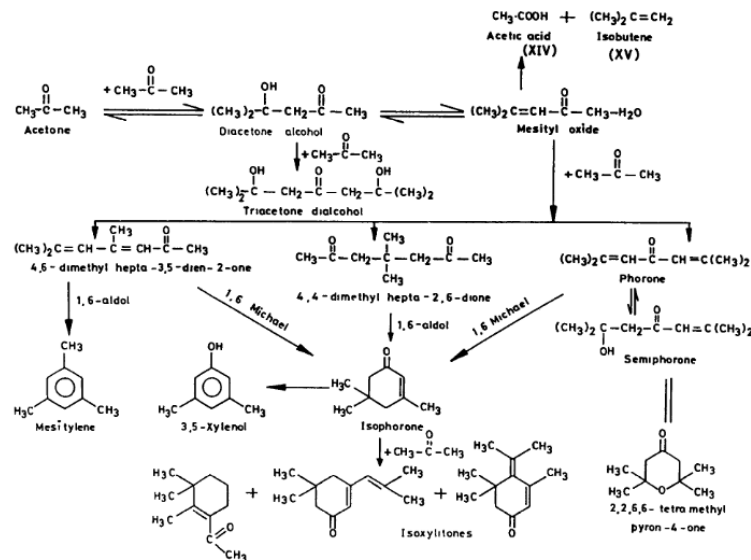
อย่างไรก็ตาม ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ณ ช่วงท้ายปฏิกิริยาจะน้อยลงตามการลดอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลดังแสดงในตารางที่ 8 เนื่องจากการลดปริมาณเมทานอลจะทำให้เมทานอลในการเกิดปฏิกิริยาน้อยลง และส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาในช่วงท้ายแยกลง



**รูปที่ 23** อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาในแต่ละขั้นตอน เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

โดยสรุป เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วม การลดอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นสูงขึ้น จากการที่ตัวเร่งปฏิกิริยามีความเข้มข้นสูงขึ้น ซึ่งที่ความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยาสูงจะส่งผลให้อะซิโตนเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง แต่การลดอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลจะทำให้ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลในช่วงท้ายต่ำลง

นอกจากการใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วม ไบโอดีเซลยังเป็นตัวทำละลายร่วมที่ถูกศึกษาในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เนื่องจากไบโอดีเซลสามารถทำให้น้ำมันพืชและเมทานอลละลายเข้าด้วยกันได้ดีขึ้น อีกทั้งไบโอดีเซลยังไม่ต้องถูกแยกออกจากผลิตภัณฑ์หลังจากการเกิดปฏิกิริยา ทำให้การใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมในระดับอุตสาหกรรมทำได้สะดวก



รูปที่ 24 ปฏิกิริยาควบแน่นกับตัวเองของอะซิโตน [20]

#### 4.4 อิทธิพลของตัวแปรต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วม

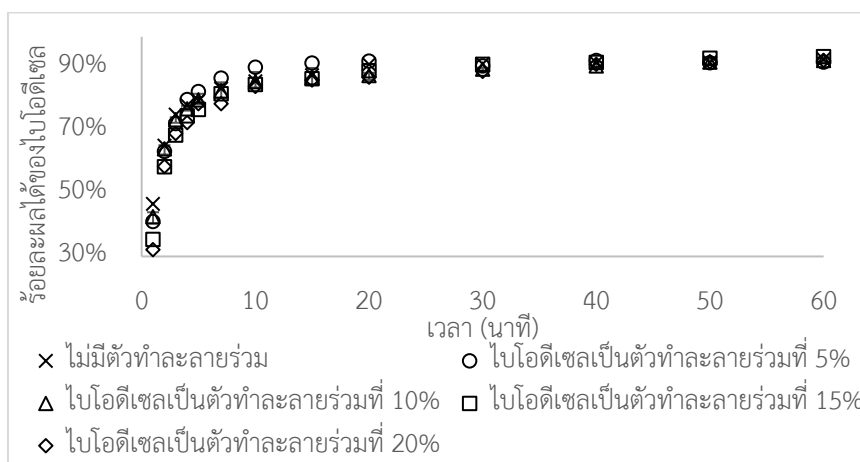
ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อใช้ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มเป็นตัวทำละลายร่วม ตัวแปรที่ศึกษาจะประกอบไปด้วยปริมาณตัวทำละลายร่วม อุณหภูมิ และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม โดยอิทธิพลของปริมาณตัวทำละลายร่วมจะถูกศึกษาเป็นอันดับแรก

##### 4.4.1 อิทธิพลของปริมาณตัวทำละลายร่วม

ในการทดลองชุดนี้จะศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวทำละลายร่วมต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึงร้อยละ 20 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม การทดลองจะดำเนินการที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืช 6:1

อิทธิพลของปริมาณตัวทำละลายร่วมต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมถูกแสดงดังรูปที่ 25 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ที่ปริมาณไบโอดีเซลต่างๆ ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลมี

ความแตกต่างกันที่เวลา 1 นาที แต่หลังจากนั้นความแตกต่างของร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลจะน้อยลง ซึ่งสาเหตุมาจากการที่ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันสามารถเกิดได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ช่วงเวลาที่ปฏิกิริยาถูกผลกระทบจากการละลายของสารค่อนข้างสั้น และส่งผลให้ปริมาณตัวทำละลายร่วมส่งผลกระทบต่ออย่างชัดเจนที่เวลา 1 นาทีเพียงเท่านั้น



**รูปที่ 25** อิทธิพลของปริมาณตัวทำละลายร่วมต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

นอกจากนี้ จากรูปที่ 25 ยังแสดงให้เห็นว่า ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่เวลา 60 นาที ไม่มีความแตกต่างเชิงสถิติ (โปรดดูตารางที่ 9 เพื่อประกอบความชัดเจน) ผลการศึกษาดังกล่าวบ่งชี้ว่า การใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมไม่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาในช่วงท้าย

อิทธิพลของปริมาณตัวทำละลายร่วมต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่เวลา 1 นาทีถูกแสดงดังตารางที่ 9 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มปริมาณไบโอดีเซลในฐานะตัวทำละลายร่วมทำให้ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่เวลา 1 นาทีต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในรูปที่ 26 ที่การเพิ่มปริมาณไบโอดีเซลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นต่ำลงทั้ง 3 ขั้นตอน ผลการศึกษาดังกล่าวบ่งชี้ว่า การใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมทำให้ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันในช่วงแรกเกิดช้าลง ซึ่งขัดแย้งกับงานวิจัยของ S.N. Csernica และ J.T. Hsu (2012) [4] ที่พบว่า การเติมไบโอดีเซลในวัฏภาคของเมทานอลจะทำให้ไตรกลีเซอไรด์ละลายในวัฏภาคของเมทานอลด้วยอัตราการถ่ายโอนมวลที่สูงขึ้น ดังนั้นการเติมไบโอดีเซลในฐานะตัวทำละลายร่วมควรจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรกสูงขึ้น

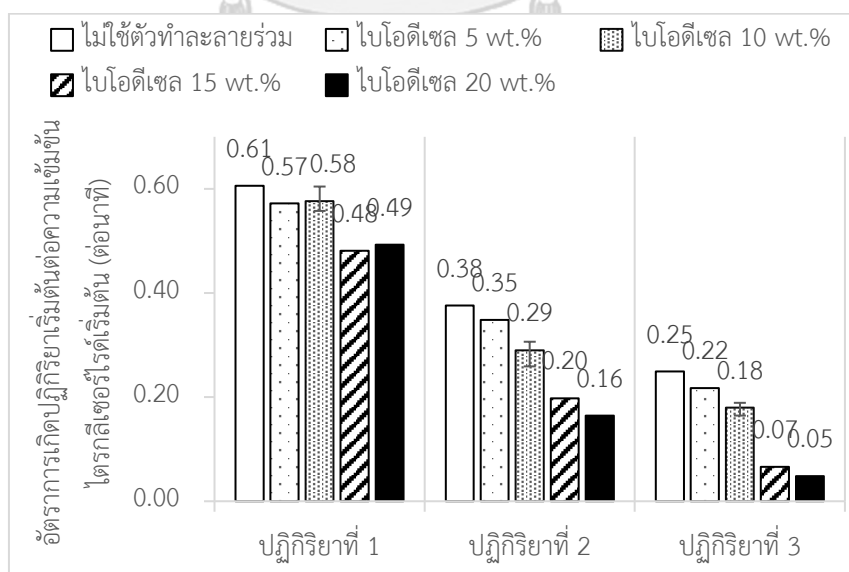
อย่างไรก็ตาม ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มเป็นปฏิกิริยาที่สามารถเกิดได้อย่างรวดเร็ว โดยระหว่างทำการทดลอง กลีเซอรอลที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากพอที่จะแยกวัฏภาคตั้งแต่ภายในหนึ่งนาทีแรก ซึ่งเมทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถละลายในกลีเซอรอลได้ดีกว่าละลายในไบโอดีเซล หรือกล่าวได้ว่า เมื่อมีกลีเซอรอล

เกิดขึ้น ไบโอดีเซลไม่สามารถทำให้หน้าที่เป็นตัวทำละลายร่วมที่ดีในการทำให้ไตรกลีเซอไรด์และเมทานอลละลายเข้าด้วยกันได้ดีขึ้น อีกทั้งยังเจือจางความเข้มข้นของสารตั้งต้น แล้วส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดช้าลง

**ตารางที่ 9** อิทธิพลของปริมาณตัวทำละลายร่วมต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

ปริมาณตัวทำละลายร่วม (ร้อยละโดยมวลของ น้ำมันปาล์ม)	ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ที่เวลา 1 นาที	ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ณ ช่วงท้ายปฏิกิริยา
0	47.1	93.5
5	41.4	92.6
10	42.6 (-2.1, +1.5)	93.1 (-0.5, +0.8)
15	35.7	94.3
20	32.4	93.1

นอกจากนี้ จากร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ณ ช่วงท้ายปฏิกิริยาที่แสดงในตารางที่ 9 ยังแสดงให้เห็นว่า ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ณ ช่วงท้ายปฏิกิริยาไม่มีความแตกต่างเชิงสถิติที่ปริมาณตัวทำละลายร่วมต่างๆ ผลการศึกษาดังกล่าวบ่งชี้ว่า การใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมไม่ช่วยให้ปฏิกิริยาในช่วงท้ายเกิดได้ดีขึ้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาในช่วงท้ายจะขึ้นอยู่กับการละลายระหว่างภูมิภาคของน้ำมันและกลีเซอรอล และการใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมไม่สามารถเพิ่มการละลายของภูมิภาคดังกล่าวได้



**รูปที่ 26** อิทธิพลของปริมาณตัวทำละลายร่วมต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นในแต่ละขั้นตอน เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1



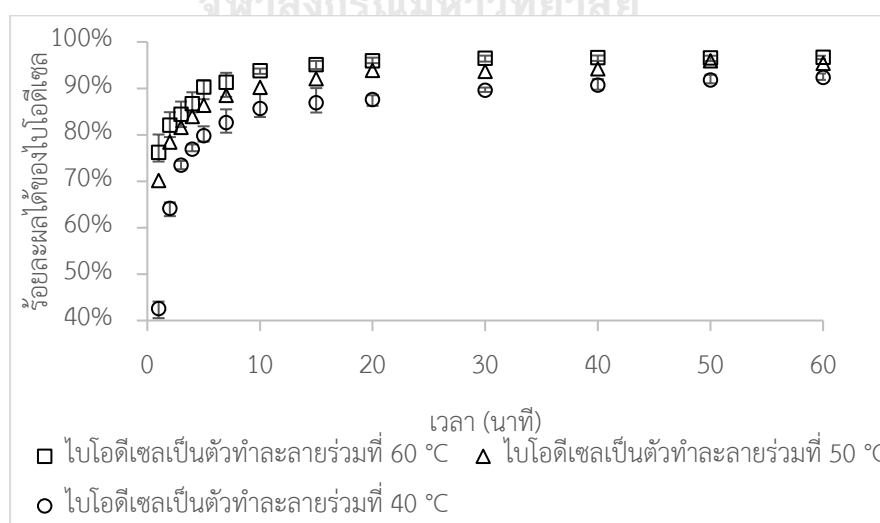
โดยสรุป ที่สภาวะอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 6:1 การใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมไม่ทำให้สารในปฏิกิริยาละลายเข้าด้วยกันได้ดีขึ้น อีกทั้งยังเป็นการเจือจางความเข้มข้นของสารในปฏิกิริยา ซึ่งส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นต่ำลง ทั้งนี้สภาวะดังกล่าวอาจจะยังไม่เหมาะสมในการใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วม จึงส่งผลให้มีการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ เมื่อมีการใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมในหัวข้อถัดไป

#### 4.4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิ

ในการทดลองชุดนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวล การทดลองดำเนินการที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืช 6:1

อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมถูกแสดงดังรูปที่ 27 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ที่เวลาต่างๆ ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่อุณหภูมิสูงจะมากกว่าร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่ำอย่างเห็นได้ชัด ผลการศึกษาดังกล่าวบ่งชี้ว่า เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วม อุณหภูมิเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นอย่างมาก

อิทธิพลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ที่เวลา 1 นาทีและร้อยละผลได้ที่ ณ ช่วงทำปฏิกิริยาถูกแสดงดังตารางที่ 10 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ร้อยละผลได้ที่เวลา 1 นาทีและที่ร้อยละผลได้ที่ ณ ช่วงทำปฏิกิริยาสูงขึ้น ซึ่งบ่งชี้ว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hanh Ngoc Thi Le และคณะ (2018) [18]

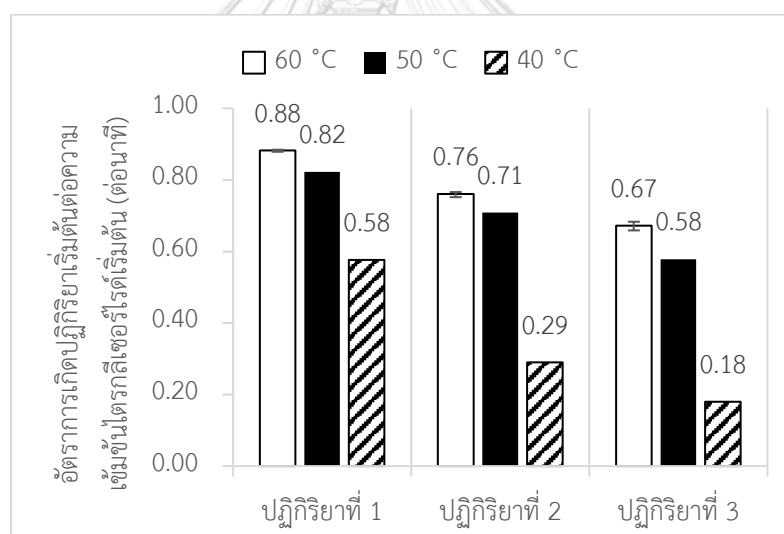


รูปที่ 27 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

ตารางที่ 10 อิทธิพลของอุณหภูมิร่วมต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

ปริมาณตัวทำละลายร่วม (ร้อยละโดยมวล)	ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ที่เวลา 1 นาที	ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ณ ช่วงท้ายปฏิกิริยา
40	42.9 (-2.1, +1.5)	93.1 (-0.5, +0.8)
50	70.7	96.1
60	76.8 (-2.0, +3.8)	97.4 (-0.4, +0.3)

นอกจากนี้ การเพิ่มอุณหภูมิยังทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้ง 3 ขั้นตอนสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 27 ซึ่งบ่งชี้ว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเมทานอลและเหล้ากลีเซอรอล เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้น้ำมันพืชละลายในเมทานอลได้ดีขึ้น อีกทั้งยังเพิ่มโอกาสที่โมเลกุลของสารตั้งต้นจะชนกัน

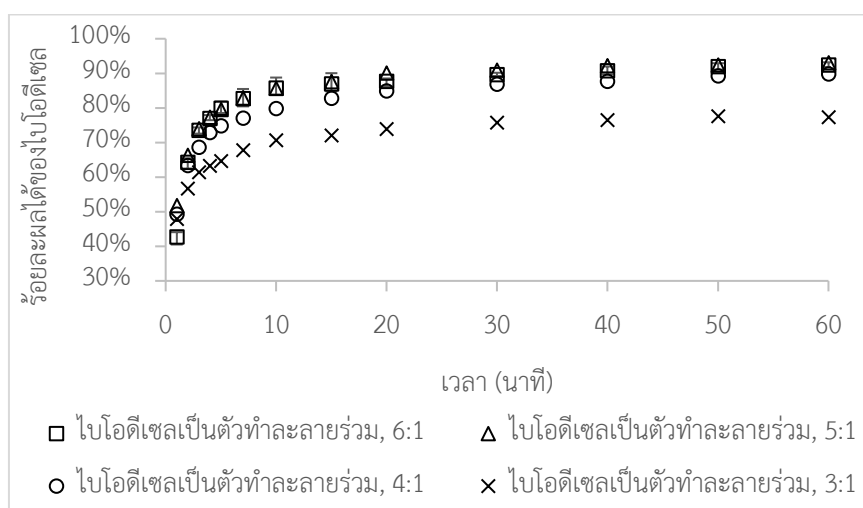


รูปที่ 28 อิทธิพลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นในแต่ละขั้นตอน เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

โดยสรุป เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวล อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น

#### 4.4.3 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช

ในการทดลองชุดนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ิฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืชตั้งแต่ 3:1 ถึง 6:1 เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวล การทดลองจะดำเนินการที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



รูปที่ 29 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ิฟิเคชัน เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ิฟิเคชัน เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมถูกแสดงดังรูปที่ 29 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ในช่วงที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 4:1 ถึง 6:1 ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่เวลาต่างๆจะแตกต่างกันน้อยมาก แต่หากอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 3:1 ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่เวลาต่างๆจะต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด ผลการศึกษาดังกล่าวบ่งชี้ว่า การใช้เมทานอลในปริมาณมากกว่าที่ต้องการตามปริมาณสารสัมพันธ์เป็นสิ่งสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ิฟิเคชัน ถึงแม้จะมีการใช้ไบโอดีเซล เป็นตัวทำละลายร่วม

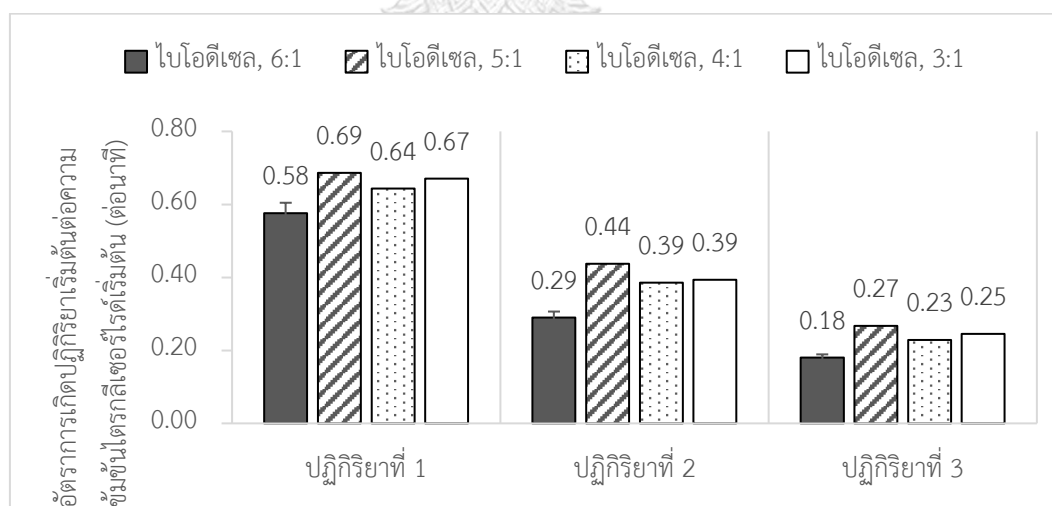
ตารางที่ 11 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม	ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่เวลา 1 นาที	ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ณ ช่วงท้ายปฏิกิริยา
3:1	48.1	77.8
4:1	49.7	90.3
5:1	52.2	93.7
6:1	42.9 (-2.1, +1.5)	93.1 (-0.5, +0.8)

อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่เวลา 1 นาที่ถูกแสดงดังตารางที่ 11 จากตารางแสดงให้เห็นว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล 6:1 ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่เวลา 1 นาทีจะต่ำกว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล 5:1 และที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล 3:1 ถึง 5:1 ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่เวลา 1 นาทีไม่มีความแตกต่างในเชิงสถิติ และร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่เวลา 1 นาทีนั้นสอดคล้องกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นแต่ละขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 30 ซึ่งผลการทดลองบ่งชี้ว่า การลดอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชจะเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเมทานอลและเหล้ากลีเซอรอล เนื่องจากผลการลดอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความเข้มข้นสูงขึ้น

ผลการทดลองนั้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hanh Ngoc Thi Le และคณะ (2018) [18] ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล 6:1 ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลในช่วงแรกจะต่ำกว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล 4.5:1 และที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล 4.5:1 และ 3:1 ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลในช่วงแรกแทบจะไม่มีมีความแตกต่างกัน

อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อร้อยละผลได้ ณ ช่วงท้ายปฏิกิริยาถูกแสดงดังตารางที่ 11 จากตารางแสดงให้เห็นว่า การลดอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลจะส่งผลให้ร้อยละผลได้ ณ ช่วงท้ายปฏิกิริยาลดลง ผลการศึกษาดังกล่าวบ่งชี้ว่า การลดอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาในช่วงท้ายแยลง เนื่องจากเมทานอลซึ่งเป็นสารตั้งต้นมีปริมาณที่ต่ำลง



**รูปที่ 30** อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นในแต่ละขั้นตอน เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40

องศาเซลเซียส

โดยสรุป เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วม การลดอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นสูงขึ้นจากการที่ตัวเร่งปฏิกิริยามีความเข้มข้นสูงขึ้น แต่การลดอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลจะทำให้ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลในช่วงท้ายต่ำลง

#### 4.5 การเปรียบเทียบอิทธิพลของตัวแปรต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน

การศึกษาในหัวข้อนี้จะเป็นการเปรียบเทียบอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้ทำการศึกษาในหัวข้อตั้งแต่ 4.2 ถึง 4.4 เพื่อเป็นการสรุปภาพรวมผลกระทบของตัวทำละลายร่วมต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มและเมทานอล

การเปรียบเทียบอิทธิพลของอุณหภูมิจะถูกศึกษาเป็นอันดับแรก โดยการทดลองทำที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล 6:1 และปริมาณตัวทำละลายร่วมร้อยละ 10 โดยมวล การเปรียบเทียบอิทธิพลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่เวลา 1 นาที และ 60 นาที ถูกแสดงดังตารางที่ 12 และ 13 ตามลำดับ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มอุณหภูมิทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นทั้งกรณีที่มีและไม่มีตัวทำละลายร่วม ผลการศึกษาดังกล่าวบ่งชี้ว่า การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นทั้งกรณีที่มีและไม่มีตัวทำละลายร่วม ยกเว้นกรณีเมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วม ที่ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ณ ช่วงท้ายปฏิกิริยาไม่มีความแตกต่างกันที่แต่ละอุณหภูมิ

**ตารางที่ 12** การเปรียบเทียบอิทธิพลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ที่เวลา 1 นาที ระหว่างมีและไม่มีตัวทำละลายร่วมเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 6:1 และในการทดลองที่มีการใช้ตัวทำละลายร่วม ปริมาณตัวทำละลายร่วมจะเท่ากับร้อยละ 10 โดยมวลน้ำมันปาล์ม

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่เวลา 1 นาที		
	ไม่ใส่ตัว ทำละลายร่วม	ใช้อะซิโตน เป็นตัวทำละลายร่วม	ใช้ไบโอดีเซล เป็นตัวทำละลายร่วม
40	47.1	46.0 (-2.5, +2.7)	42.9 (-2.1, +1.5)
50	71.3	74.4	70.7
60	76.9 (-0.3, +0.6)	82.7 (-0.6, +1.0)	76.8 (-2.0, +3.8)

นอกจากนี้ การเปรียบเทียบอิทธิพลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ณ ช่วงท้ายปฏิกิริยาถูกแสดงดังตารางที่ 13 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิ 40 และ 50 องศาเซลเซียส การมีอะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นเมื่อเทียบกับที่ 60 องศาเซลเซียส หรือกล่าวเป็นนัยได้ว่า การใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมมีศักยภาพที่จะลดอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลได้

อย่างไรก็ตาม ข้อสังเกตหนึ่งที่สำคัญคือ ที่ 60 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลจะไม่แตกต่างกันระหว่างกรณีที่มีและไม่มีตัวทำละลายร่วม ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เหล่ากลีเซอรไรด์และเมทานอลละลายกันได้ดีอยู่แล้วที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนทำให้การใช้ตัวทำละลายร่วมไม่ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยา และเป็นผลให้การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ เมื่อมีตัวทำละลายร่วมในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำที่อุณหภูมิต่ำหรือที่ 40 องศาเซลเซียส

ในส่วนต่อมาจะเป็นการเปรียบเทียบอิทธิพลของปริมาณตัวทำละลายร่วม ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

**ตารางที่ 13** การเปรียบเทียบอิทธิพลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ ณ ช่วงท้ายของปฏิกิริยา ระหว่างมีและไม่มีตัวทำละลายร่วม ทำการทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 และในการทดลองที่มีการใช้ตัวทำละลายร่วม ปริมาณตัวทำละลายร่วมจะเท่ากับร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ร้อยละผลได้สุดท้ายของไบโอดีเซล ณ ช่วงท้ายของปฏิกิริยา		
	ไม่ใส่ตัว ทำละลายร่วม	ใช้อะซิโตน เป็นตัวทำละลายร่วม	ใช้ไบโอดีเซล เป็นตัวทำละลายร่วม
40	93.5	95.8 (-0.5, +0.6)	93.1 (-0.5, +0.8)
50	95.1	97.3	96.1
60	98.3 (-0.5, +0.7)	97.7 (-0.6, +0.5)	97.4 (-0.4, +0.3)

การเปรียบเทียบอิทธิพลของปริมาณตัวทำละลายร่วมต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่เวลา 1 นาที ถูกแสดงดังตารางที่ 14 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ในช่วงที่ปริมาณตัวทำละลายร่วมต่ำกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่เวลา 1 นาทีจะไม่แตกต่างกัน ผลการศึกษาดังกล่าวบ่งชี้ว่า ตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณต่ำกว่าร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ไม่เพียงพอต่อการส่งผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น

โดยตัวทำละลายร่วมจะเริ่มส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นตั้งแต่ปริมาณร้อยละ 15 โดยมวลของน้ำมันปาล์มเป็นต้นไป ในกรณีที่ใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมจะทำให้ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่เวลา 1 นาทีสูงขึ้น แต่ในกรณีที่ใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วม จะทำให้ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่เวลา 1 นาทีต่ำลง ผลการศึกษาดังกล่าวบ่งชี้ว่า การใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นสูงขึ้น ขณะที่การใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นต่ำลง

นอกจากนี้ การเปรียบเทียบอิทธิพลของปริมาณตัวทำละลายร่วมต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ณ ช่วงท้ายของปฏิกิริยาถูกแสดงดังตารางที่ 18 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมสามารถเพิ่ม

ร้อยละผลได้ ณ ช่วงท้ายปฏิกิริยา ขณะที่การใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมไม่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ ณ ช่วงท้ายปฏิกิริยา ผลการศึกษาดังกล่าวบ่งชี้ว่า การใช้เอซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมสามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้

**ตารางที่ 14** การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของปริมาณตัวทำละลายร่วมต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่เวลา 1 นาที ระหว่างการใช้เอซิโตนและไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

ปริมาณตัวทำ ละลายร่วม (ร้อยละโดยมวล ของน้ำมันปาล์ม)	ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่เวลา 1 นาที	
	เอซิโตนเป็นตัว ทำละลายร่วม	ไบโอดีเซลเป็นตัว ทำละลายร่วม
0	47.1	
5	40.8	41.4
10	46.0 (-2.7, +2.5)	42.9 (-2.1, +1.5)
15	65.7	35.7
20	72.4	32.4

**ตารางที่ 15** การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของปริมาณตัวทำละลายร่วมต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ณ ช่วงท้ายปฏิกิริยา ระหว่างการใช้เอซิโตนและไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

ปริมาณตัวทำ ละลายร่วม (ร้อยละโดยมวล ของน้ำมันปาล์ม)	ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ณ ช่วงท้ายปฏิกิริยา	
	เอซิโตนเป็นตัว ทำละลายร่วม	ไบโอดีเซลเป็นตัว ทำละลายร่วม
0	93.5	
5	97.3	92.6
10	95.8 (-0.5, +0.6)	92.4 (-0.5, +0.8)
15	97.5	94.3
20	98.0	93.1

โดยสรุปจากตารางที่ 14 และตารางที่ 15 การใช้เอซิโตนและไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมให้ผลที่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง การใช้เอซิโตนสามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาตลอดช่วงเวลา 60 นาที แต่การใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นต่ำลง โดยสาเหตุที่การใช้เอซิโตนสามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาตลอดช่วงเวลา 60 นาที เป็นเพราะเอซิโตนสามารถเพิ่มการละลายของสารในระบบทั้งการละลาย

ระหว่างน้ำมันพืชกับเมทานอล และการละลายระหว่างไบโอดีเซลและกลีเซอรอล ซึ่งการละลายของสารทั้งหมดในระบบจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น ขณะที่การใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมไม่ทำให้สารผสมในระบบละลายเข้ากันได้ดีขึ้น อีกทั้งยังเป็นการเจือจางความเข้มข้นของสารในระบบ ดังนั้นการใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมจึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันแย่ง

ในส่วนสุดท้ายจะเป็นการเปรียบเทียบอรรถิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวทำละลายร่วมร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม

**ตารางที่ 16** การเปรียบเทียบอรรถิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อร้อยละผลได้ที่เวลา 1 นาที ระหว่างกาใช้อะซิโตนและไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวทำละลายร่วมร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม

อัตราส่วนโดยโมล ของเมทานอลต่อ น้ำมัน	ร้อยละผลได้ที่ของไบโอดีเซล ที่เวลา 1 นาที	
	อะซิโตนเป็นตัว ทำละลายร่วม	ไบโอดีเซลเป็นตัว ทำละลายร่วม
3:1	39.8	48.1
4:1	61.7	49.7
5:1	52.0	52.2
6:1	46.0 (-2.5, +2.7)	42.9 (-2.1, +1.5)

การเปรียบเทียบอรรถิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อร้อยละผลได้ที่ของไบโอดีเซลที่เวลา 1 นาที ถูกแสดงดังตารางที่ 16 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชต่ำกว่า 6:1 ร้อยละผลได้ที่ของไบโอดีเซลที่เวลา 1 นาทีจะสูงขึ้นเหมือนกันทั้งกรณีที่ใช้อะซิโตนและไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วม ผลการศึกษาดังกล่าวบ่งชี้ว่า การลดปริมาณเมทานอลจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นสูงขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วม ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล 3:1 ร้อยละผลได้ที่ของไบโอดีเซลที่เวลา 1 นาทีจะต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด จากการที่อะซิโตนเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง

การเปรียบเทียบอรรถิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อร้อยละผลได้ที่ของไบโอดีเซล ณ ช่วงทำปฏิกิริยาถูกแสดงดังตารางที่ 17 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การลดอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลจะทำให้ร้อยละผลได้ที่ของไบโอดีเซล ณ ช่วงทำปฏิกิริยาต่ำลงทั้งในกรณีที่ใช้อะซิโตนหรือไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วม อย่างไรก็ตาม ข้อสังเกตหนึ่งที่สำคัญคือ กรณีที่ใช้อะซิโตน ร้อยละผลได้ที่ ณ ช่วงทำปฏิกิริยาจะสูงกว่ากรณีที่ใช้ไบโอดีเซลที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลเท่ากัน ซึ่งผลการศึกษาอรรถิพลอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลนั้นสอดคล้องกับ



อิทธิพลของอุณหภูมิและอิทธิพลของปริมาณตัวทำละลายร่วม ที่การใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมมีแนวโน้มทำให้ ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ณ ช่วงท้ายปฏิกิริยาสูงกว่าการใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วม

**ตารางที่ 17** การเปรียบเทียบอิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ณ ช่วงท้ายปฏิกิริยา ระหว่างกรณีใช้อะซิโตนและไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วม ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวทำละลายร่วมร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม

อัตราส่วนโดยโมล ของเมทานอลต่อ น้ำมัน	ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล ณ ช่วงท้ายปฏิกิริยา	
	อะซิโตนเป็นตัว ทำละลายร่วม	ไบโอดีเซลเป็นตัว ทำละลายร่วม
3:1	80.0	77.8
4:1	91.2	90.3
5:1	95.2	93.7
6:1	95.8 (-0.5, +0.6)	93.1 (-0.5, +0.8)

จากการเปรียบเทียบการใช้อะซิโตนและไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มเป็นตัวทำละลายร่วมแสดงให้เห็นว่า อะซิโตนมีแนวโน้มเป็นตัวทำละลายร่วมที่ดีกว่าไบโอดีเซล ซึ่งความแตกต่างของผลระหว่างการใช้อะซิโตนและไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมมีสาเหตุมาจากคุณสมบัติการละลายที่แตกต่างกัน โดยอะซิโตนนั้นสามารถละลายได้ บางส่วนในกลีเซอรอล [21] ขณะที่ไบโอดีเซลแทบไม่ละลายกับกลีเซอรอล [22] ซึ่งการละลายเข้ากับกลีเซอรอลมีความสำคัญในการทำให้อัตราเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อกลีเซอรอลถูกสังเคราะห์ขึ้นมา เมทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกดึงไปในวัฏภาคของกลีเซอรอล และส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดช้าลง [5] ซึ่งจากการที่อะซิโตนสามารถละลายกับกลีเซอรอลได้บางส่วน จะทำให้เมทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยาละลายในวัฏภาคที่เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น และส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น

จากผลการศึกษาดังกล่าวนำไปสู่ข้อสรุปได้ว่า การเลือกใช้ตัวทำละลายร่วมในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันควรจะเลือกตัวทำละลายร่วมที่สามารถละลายได้ทั้งในน้ำมันพืช เมทานอล ไบโอดีเซล และกลีเซอรอล เพื่อที่ตัวทำละลายร่วมจะทำให้สารในระบบกลายเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น และส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น

## บทที่ 5

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มโอเลอิน โดยใช้อะซิโตนหรือไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มเป็นตัวทำละลายร่วม สามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

1. ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่อเนื่อง 3 ขั้นตอน และผันกลับไม่ได้ทั้ง 3 ขั้นตอน ในช่วงอุณหภูมิ 40 ถึง 60 องศาเซลเซียส ทั้งกรณีที่มีและไม่มีตัวทำละลายร่วม
2. มอนอกลิเซอไรด์มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยากับเมทานอลสูงสุด จากนั้นจึงเป็นไดกลิเซอไรด์และไตรกลิเซอไรด์ โดยหากตัวทำละลายร่วมมีปริมาณต่ำจนไม่สามารถเพิ่มการละลายของสารในระบบอย่างมีประสิทธิภาพ ตัวทำละลายร่วมจะทำให้มอนอกลิเซอไรด์และไดกลิเซอไรด์มีอัตราการเกิดปฏิกิริยากับเมทานอลต่ำลง
3. ตัวทำละลายร่วมแทบจะไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันที่อุณหภูมิสูง
4. ตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณต่ำจะไม่ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยรวมสูงขึ้น นอกจากนี้การใช้ตัวทำละลายร่วมในปริมาณต่ำยังทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างมอนอกลิเซอไรด์และเมทานอลต่ำลง
5. การใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาดีขึ้น จากการทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาละลายเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น อย่างไรก็ตาม หากตัวเร่งปฏิกิริยามีความเข้มข้นสูงจะทำให้อะซิโตนเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงกับตัวเองได้
6. การใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นต่ำลง เนื่องจากไบโอดีเซลไม่สามารถทำให้สารในระบบละลายเข้าด้วยกันได้ดีขึ้น อีกทั้งยังเจือจางความเข้มข้นของสารในปฏิกิริยา
7. การเลือกใช้ตัวทำละลายร่วมในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันควรจะต้องเลือกสารที่สามารถละลายได้ทั้งกับน้ำมันพืช เมทานอล ไบโอดีเซล และกลีเซอรอล เพื่อที่จะทำให้สารในระบบละลายเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงให้เห็นว่า อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมที่สามารถทำให้ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันเกิดได้เร็วขึ้น อีกทั้งยังสามารถลดอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาโดยที่ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลที่เวลา 60 นาทีเท่าเดิมได้ อย่างไรก็ตาม ควรจะมีการศึกษาการแยกอะซิโตนออกจากผลิตภัณฑ์เพิ่มเติม เพื่อศึกษาความคุ้มค่าของการใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วม ควบคู่กับการสังเกตปฏิกิริยาข้างเคียงของอะซิโตนที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการแยกอะซิโตนออกจากผลิตภัณฑ์

ภาคผนวก



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ภาคผนวก ก

## ค่าแฟกเตอร์ตอบสนอง

เมื่อสารตัวอย่างถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ผลการวิเคราะห์จากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี จะทำให้ได้เวลาและพื้นที่จุดยอดของสารแต่ละชนิด โดยสารที่ต่างชนิดกันจะมีเวลาของจุดยอด (retention time) ที่ต่างกัน

ค่าแฟกเตอร์ตอบสนองเป็นค่าคงที่ที่ใช้สำหรับการหาปริมาณของสารแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง และมีนิยามดังสมการ ก.1

$$\text{ค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของสาร } i = \frac{\text{พื้นที่จุดยอดของสาร } i}{\text{มวลของสาร } i} \bigg/ \frac{\text{พื้นที่จุดยอดของสารมาตรฐาน}}{\text{มวลของสารมาตรฐาน}} \quad (\text{ก.1})$$

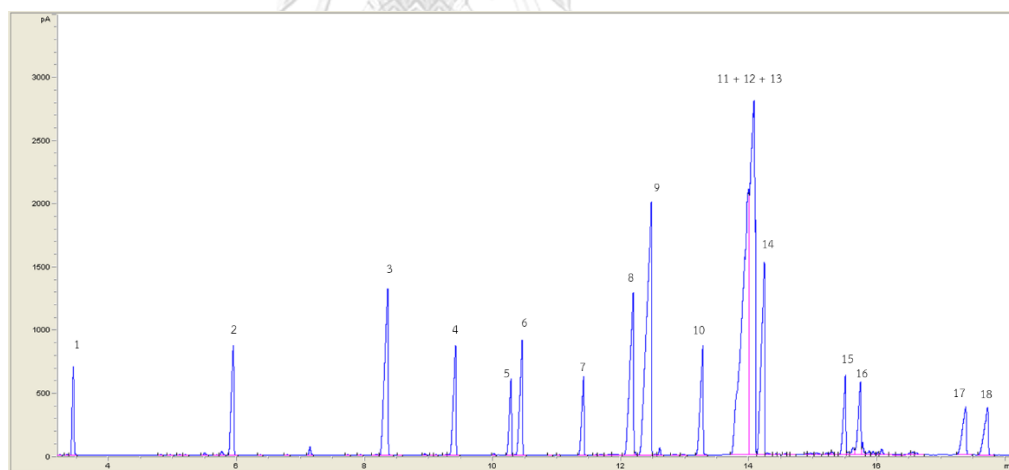
## ก-1 การคำนวณค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของไบโอดีเซล

ค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของไบโอดีเซลแต่ละชนิดจะหาจากการวิเคราะห์สารไบโอดีเซลมาตรฐาน ซึ่งข้อมูลที่แนบมากับสารไบโอดีเซลมาตรฐานจะมีการระบุทั้งชนิดและปริมาณของไบโอดีเซลแต่ละชนิด ผลการวิเคราะห์สารไบโอดีเซลด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีถูกแสดงดังตารางที่ 18 และรูปที่ 31 โดยมวลและพื้นที่จุดยอดของสารแต่ละชนิดจะถูกแทนลงในสมการ ก.1 เพื่อทำการหาค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของสารชนิดนั้น และใช้เมทิลเดคาโรเอตเป็นสารมาตรฐาน

ตารางที่ 18 พื้นที่จุดยอดและปริมาณของไบโอดีเซลแต่ละชนิดที่อยู่ในสารไบโอดีเซลมาตรฐาน และค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของไบโอดีเซลแต่ละชนิด

No.	Component i	Area of component	Mass of component (wt.%)	Response factor
1	Methyl octanoate (C8:0)	1,295.37	1.90	0.95
2	Methyl decanoate (C10:0; internal standard)	2,298.77	3.21	1.00
3	Methyl laurate (C12:0)	4,836.88	6.37	1.06
4	Methyl tridecanoate (C13:0)	2,458.82	3.18	1.08
5	Methyl myristoleate (C14:1)	1,404.93	1.88	1.04
6	Methyl myristate (C14:0)	2,538.44	3.21	1.10
7	Methyl pentadecanoate (C15:0)	1,517.63	1.90	1.12

No.	Component i	Area of component	Mass of component (wt.%)	Response factor
8	Methyl palmitoleate (C16:1)	5,042.08	6.41	1.10
9	Methyl palmitate (16:0)	10,491.81	12.9	1.14
10	Methyl heptadecanoate (17:0)	2,547.11	3.08	1.15
11	Methyl linolenate (C18:3)	30,457.72	6.34	1.03
12	Methyl linoleate (18:2)		13.0	
13	Methyl oleate (18:1)		22.1	
14	Methyl stearate (18:0)	5,346.42	6.44	1.16
15	Methyl cis-11 eicosenoate (20:1)	1,610.71	1.91	1.18
16	Methyl arachidate (20:0)	1,658.64	1.88	1.23
17	Methyl erucate (22:1)	1,568.84	1.89	1.16
18	Methyl behenate (22:0)	1,604.48	1.89	1.19



รูปที่ 31 โครมาโตแกรมของสารไบโอดีเซลมาตรฐาน

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีไม่สามารถแยกจุดยอดไบโอดีเซลของกรดไขมันไลโนเลนิก ไลโนเลอิก และโอเลอิกออกจากกันได้ดังที่แสดงในรูปที่ 31 ดังนั้นการหาค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของไบโอดีเซลจากกรดไขมันทั้งสามชนิดจะเกิดจากการรวมพื้นที่จุดยอดของไบโอดีเซลของกรดไขมันของทั้งสามชนิด โดยตัวอย่างการคำนวณปริมาณไบโอดีเซลจะถูกแสดงดังตารางที่ 19

ตารางที่ 19 ตัวอย่างการคำนวณปริมาณไบโอดีเซล โดยมวลของสารมาตรฐานเท่ากับ 0.503 กรัม และใช้ตัวอย่างไบโอดีเซล 1.0140 กรัม

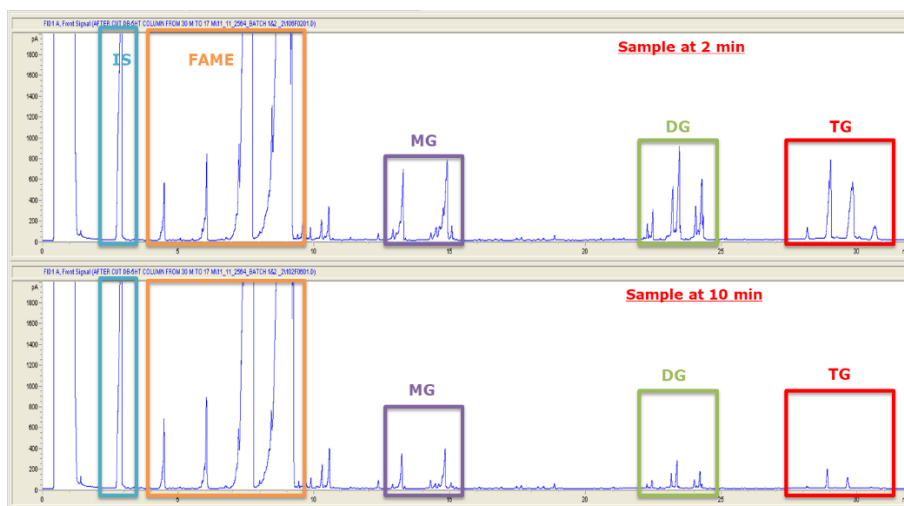
Component i	Area of component	Response factor	Mass of component (g)	Concentration of component (wt.%)
Methyl octanoate (C8:0)	71.22	0.95	0.001	0.1
Methyl decanoate (C10:0; internal standard)	33,822.60	1.00	-	-
Methyl laurate (C12:0)	313.54	1.06	0.004	0.4
Methyl myristate (C14:0)	871.6	1.10	0.012	1.2
Methyl pentadecanoate (C15:0)	40.75	1.12	0.001	0.1
Methyl palmitate (16:0)	32,229.70	1.14	0.420	41.4
Methyl heptadecanoate (17:0)	80.14	1.15	0.001	0.1
Methyl linolenate (C18:3)	35,427.50	1.03	0.511	50.4
Methyl linoleate (18:2)				
Methyl oleate (18:1)				
Methyl stearate (18:0)	3,153.85	1.16	0.040	4.0
Methyl cis-11 eicosenoate (20:1)	235.02	1.18	0.003	0.3
Methyl arachidate (20:0)	285.72	1.23	0.003	0.3
Methyl behenate (22:0)	79.94	1.19	0.001	0.1
Sum FAME content			0.998	98.4

#### ก-2 การคำนวณค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของเหล่ากลีเซอไรด์

ค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของมอนอกลิเซอไรด์และไดกลีเซอไรด์และมอนอกลิเซอไรด์จะอ้างอิงจากผลการวิเคราะห์ปริมาณมอนอกลิเซอไรด์และไดกลีเซอไรด์ภายในตัวอย่างไบโอดีเซลโดยทางอุตสาหกรรมตามวิธี EN14105 ซึ่งทางอุตสาหกรรมให้ผลการวิเคราะห์ว่า ในตัวอย่างไบโอดีเซลมีปริมาณมอนอกลิเซอไรด์ร้อยละ 0.64 โดยมวล และปริมาณไดกลีเซอไรด์เท่ากับร้อยละ 0.17 โดยมวล

เวลาของจุดยอดของมอนอกลิเซอไรด์และไดกลีเซอไรด์จะถูกหาจากการวิเคราะห์ GML และ GMS เกรดอุตสาหกรรม ซึ่งภายใน GML จะประกอบไปด้วยมอนอกลิเซอไรด์และไดกลีเซอไรด์ของกรดลอริก และ GMS จะประกอบด้วยมอนอกลิเซอไรด์และไดกลีเซอไรด์ของกรดปาล์มติกและกรดสเตียริก ดังนั้นช่วงเวลาของตั้งแต่จุดยอดมอนอกลิเซอไรด์ของกรดลอริกไปจนถึงมอนอกลิเซอไรด์ของกรดสเตียริกจะเป็นช่วงเวลาของมอนอก

ลิเซอร์ไรต์ และช่วงเวลาตั้งแต่จุดยอดโดกลีเซอร์ไรต์ของกรดลอริกไปจนถึงโดกลีเซอร์ไรต์ของกรดสเตียริกจะเป็นช่วงเวลาของโดกลีเซอร์ไรต์



รูปที่ 32 โครมาโตแกรมของตัวอย่างที่เวลา 2 นาที (รูปบน) และ 10 นาที (รูปล่าง)

โดยจากรูปที่ 32 แสดงให้เห็นว่า พื้นที่จุดยอดของเหล่าลิเซอร์ไรต์ที่ใช้นั้นลดลงตามเวลา ซึ่งบ่งชี้ว่าช่วงเวลาของมอนอกลิเซอร์ไรต์และโดกลีเซอร์ไรต์ที่ใช้เป็นช่วงที่ถูกต้อง

การหาค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของโดกลีเซอร์ไรต์และมอนอกลิเซอร์ไรต์สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ตัวอย่างไบโอดีเซลที่ได้จากอุตสาหกรรมด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ซึ่งพื้นที่จุดยอดของสารแต่ละชนิดถูกแสดงในตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ปริมาณและพื้นที่จุดยอดของสารแต่ละชนิดเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี

ชนิดของสาร	EN14105		
	มวลที่ของตัวอย่างที่ชั่ง (กรัม)	มวลของสาร แต่ละชนิด	พื้นที่จุดยอด
มอนอกลิเซอร์ไรต์	0.0449	0.0003 (0.64%)	2,976.11
โดกลีเซอร์ไรต์		0.0001 (0.17%)	692.73
เมทิลเดคาโนเอต		0.0032	34,166.54

การหาค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของมอนอกลิเซอร์ไรต์

$$\text{ค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของมอนอกลิเซอร์ไรต์} = \frac{2,976.11}{0.0449 \times \frac{0.64}{100}} \div \frac{34,166.54}{0.0032} = 0.97$$

การหาค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของไดกลีเซอไรด์

$$\text{ค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของไดกลีเซอไรด์} = \frac{692.73}{0.0449 \times \frac{0.17}{100}} \div \frac{34,166.54}{0.0032} = 0.85$$

การหาค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของไตรกลีเซอไรด์

ในส่วนของการหาค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของไตรกลีเซอไรด์ สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์น้ำมันปาล์มโอเลอินด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี โดยตั้งสมมติฐานให้น้ำมันปาล์มโอเลอินประกอบไปด้วยไตรกลีเซอไรด์ทั้งหมด เนื่องจากน้ำมันพืชตามธรรมชาติมีไตรกลีเซอไรด์ในปริมาณสูง ตั้งแต่ร้อยละ 95 ถึงร้อยละ 97 โดยมวล [23] ซึ่งจากการวิเคราะห์สารผสมระหว่างน้ำมันปาล์ม 0.1173 กรัมและเมทิลเดคาโนเอต 0.0470 กรัม ทำให้ได้พื้นที่จุดยอดของไตรกลีเซอไรด์เท่ากับ 35,833.96 และพื้นที่จุดยอดของเมทิลเดคาโนเอต 17,146.67 จากนั้นจึงนำค่าทั้ง 4 ค่านี้ไปแทนในสมการ ก.1 เพื่อหาค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของไตรกลีเซอไรด์

$$\text{ค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของไตรกลีเซอไรด์} = R.F._{TG} = \frac{35,833.96}{0.1173} \div \frac{17,146.67}{0.0470} = 0.84$$



ภาคผนวก ข

มวลโมเลกุลของไปโอดีเซลและเฮลาคีเซอไรต์ของน้ำมันปาล์มโอเลอิน

จากการที่น้ำมันปาล์มโอเลอินประกอบด้วยโมเลกุลของกรดไขมันหลายชนิด ดังนั้นจึงควรมีการหามวลโมเลกุลเฉลี่ยของกรดไขมัน เพื่อเป็นตัวแทนของกรดไขมันทั้งหมดในน้ำมันปาล์มโอเลอินที่ใช้เป็นสารตั้งต้น และทำให้ง่ายต่อการนำไปศึกษา การหาค่ามวลโมเลกุลเฉลี่ยของกรดไขมันทำได้โดยการนำมวลโมเลกุลของกรดไขมันแต่ละชนิดมาเฉลี่ยกันโดยการถ่วงน้ำหนัก ซึ่งการหาปริมาณกรดไขมันแต่ละชนิดในน้ำมันปาล์มโอเลอินสามารถทำได้โดยนำน้ำมันปาล์มโอเลอินไปทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน จากนั้นจึงวิเคราะห์ปริมาณไปโอดีเซลของกรดไขมันแต่ละชนิด โดยปริมาณกรดไขมันแต่ละชนิดของน้ำมันปาล์มโอเลอินถูกแสดงดังตารางที่ 21

ตารางที่ 21 ปริมาณของกรดไขมันแต่ละชนิดในน้ำมันปาล์มที่ใช้เป็นสารตั้งต้น

ชนิดของกรดไขมัน	ร้อยละโดยมวลของกรดไขมันแต่ละชนิด	มวลโมเลกุล
Lauric (12:0)	0.7	200.3
Myristic (14:0)	1.0	228.4
Palmitoleic (16:1)	0.2	254.4
Palmitic (16:0)	34.6	256.4
Linolenic (18:3)		278.5
Linoleic (18:2)	59.4	280.5
Oleic (18:1)		282.5
Stearic (18:0)	3.7	284.5
Eicosenoic (20:1)	0.2	310.5
Eicosanoic (20:0)	0.3	312.5
Docosanoic (22:0)	0.1	340.5
<b>มวลโมเลกุลเฉลี่ยของกรดไขมัน</b>		<b>272.6</b>

การคำนวณมวลโมเลกุลของไปโอดีเซล ไตรกลีเซอไรต์ ไดกลีเซอไรต์ และมอนอกลิเซอไรต์จากมวลโมเลกุลเฉลี่ยของกรดไขมันจะคำนวณจากความแตกต่างของโมเลกุลระหว่างสารที่ต้องการและกรดไขมัน ยกตัวอย่างเช่น เมื่อโมเลกุลของไปโอดีเซลและกรดไขมันมีหมู่แอลคิลเหมือนกัน (R-) โมเลกุลของไปโอดีเซลจะมีอะตอมของคาร์บอนและอะตอมของไฮโดรเจนมากกว่าโมเลกุลของกรดไขมันอยู่ที่ 1 และ 2 อะตอมตามลำดับ หรือคิดเป็นมวลโมเลกุลเท่ากับ 14 กรัมต่อโมล ดังนั้นมวลโมเลกุลของไปโอดีเซลจะเท่ากับมวลโมเลกุลของกรดไขมันบวกด้วย 14 เป็นต้น จากที่กล่าวมาในข้างต้นทำให้การหามวลโมเลกุลของไปโอดีเซล ไตรกลีเซอไรต์ ไดกลีเซอไรต์ และมอนอกลิเซอไรต์สามารถคำนวณได้ด้วยสมการ ข.1 ถึง ข.4 และผลการคำนวณถูกแสดงในตารางที่ 21



**รูปที่ 33** โมเลกุลของกรดไขมัน ไบโอดีเซล ไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และมอนอกลิเซอไรด์

$$\text{มวลโมเลกุลเฉลี่ยของไบโอดีเซล} = \text{มวลโมเลกุลเฉลี่ยของกรดไขมัน} + 14 \quad (ข.1)$$

$$\text{มวลโมเลกุลเฉลี่ยของไตรกลีเซอไรด์} = 3 \times \text{มวลโมเลกุลเฉลี่ยของกรดไขมัน} + 38 \quad (ข.2)$$

$$\text{มวลโมเลกุลเฉลี่ยของไดกลีเซอไรด์} = 2 \times \text{มวลโมเลกุลเฉลี่ยของกรดไขมัน} + 56 \quad (ข.3)$$

$$\text{มวลโมเลกุลเฉลี่ยของมอนอกลิเซอไรด์} = \text{มวลโมเลกุลเฉลี่ยของกรดไขมัน} + 74 \quad (ข.4)$$

**ตารางที่ 22** มวลโมเลกุลเฉลี่ยของกรดไขมัน ไบโอดีเซล และเหล่ากลีเซอไรด์ของน้ำมันปาล์มที่ใช้เป็นสารตั้งต้น

ชนิดของโมเลกุล	มวลโมเลกุลเฉลี่ย
กรดไขมัน	272.6
ไบโอดีเซล	286.6
ไตรกลีเซอไรด์	855.8
ไดกลีเซอไรด์	601.2
มอนอกลิเซอไรด์	346.6

ภาคผนวก ค

ผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อไม่มีตัวทำละลายร่วม

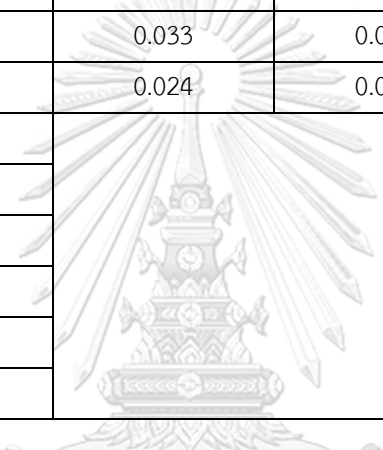
ตารางที่ 23 แสดงผลของอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส ที่มีต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอรไรด์ที่เวลาต่างๆ เมื่อไม่มีตัวทำละลายร่วม โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

เวลา (นาท)	ร้อยละผลได้ ของไบโอดีเซล	ความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอรไรด์ (โมลต่อลิตร)		
		ไตรกลีเซอรไรด์	ไดกลีเซอรไรด์	มอนอกลิเซอรไรด์
0	0	0.835	0	0
1	42.9	0.329	0.193	0.106
2	64.7	0.176	0.140	0.089
3	74.0	0.152	0.107	0.074
4	77.5	0.094	0.087	0.063
5	80.5	0.080	0.072	0.054
7	83.3	0.061	0.057	0.044
10	86.3	0.046	0.045	0.034
15	87.5			
20	88.2			
30	90.2			
40	91.3			
50	92.6			
60	93.1			

ตารางที่ 24 แสดงผลของอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนที่เวลาต่างๆ เมื่อไม่มีตัวทำละลายร่วม โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

ช่วงเวลา (นาท)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นไตรกลีเซอรไรด์เริ่มต้น		
	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 1	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 3
0 ถึง 1	0.606	0.376	0.249
1 ถึง 2	0.184	0.247	0.267
2 ถึง 3	0.028	0.068	0.086
3 ถึง 4	0.070	0.093	0.107
4 ถึง 5	0.017	0.035	0.046
5 ถึง 7	0.011	0.020	0.026
7 ถึง 10	0.006	0.011	0.014

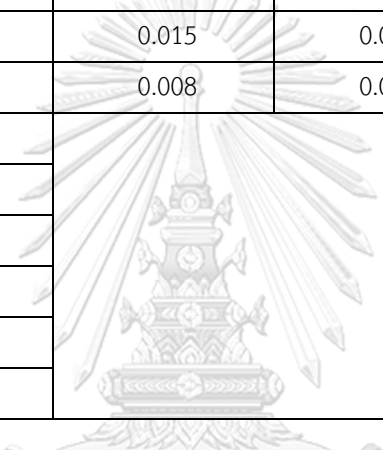
ตารางที่ 25 แสดงผลของอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส ที่มีต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และความเข้มข้นของ เหล่ากลีเซอรไรด์ที่เวลาต่างๆ เมื่อไม่มีตัวทำละลายร่วม โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

เวลา (นาท)	ร้อยละผลได้ ของไบโอดีเซล	ความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอรไรด์ (โมลต่อลิตร)		
		ไตรกลีเซอรไรด์	ไดกลีเซอรไรด์	มอนอกลิเซอรไรด์
0	0	0.835	0	0
1	71.3	0.144	0.154	0.099
2	77.4	0.093	0.090	0.071
3	81.4	0.067	0.068	0.057
4	86.6	0.044	0.045	0.037
5	88.6	0.037	0.039	0.032
7	88.0	0.033	0.034	0.031
10	91.0	0.024	0.025	0.024
15	91.1			
20	91.6			
30	93.9			
40	92.6			
50	93.8			
60	95.1			

ตารางที่ 26 แสดงผลของอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนที่ เวลาต่างๆ เมื่อไม่มีตัวทำละลายร่วม โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

ช่วงเวลา (นาท)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นไตรกลีเซอรไรด์เริ่มต้น		
	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 1	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 3
0 ถึง 1	0.827	0.643	0.525
1 ถึง 2	0.061	0.137	0.171
2 ถึง 3	0.032	0.058	0.075
3 ถึง 4	0.028	0.055	0.079
4 ถึง 5	0.008	0.015	0.021
5 ถึง 7	0.003	0.005	0.006
7 ถึง 10	0.004	0.007	0.010

ตารางที่ 27 แสดงผลของอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส ที่มีต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และความเข้มข้นของ เหล่ากลีเซอไรด์ที่เวลาต่างๆ เมื่อไม่มีตัวทำละลายร่วม โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

เวลา (นาที)	ร้อยละผลได้ ของไบโอดีเซล	ความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ (โมลต่อลิตร)		
		ไตรกลีเซอไรด์	ไดกลีเซอไรด์	มอนอกลิเซอไรด์
0	0	0.835	0	0
1	76.9	0.108	0.116	0.079
2	87.2	0.056	0.066	0.054
3	90.7	0.039	0.048	0.042
4	91.8	0.030	0.037	0.035
5	93.7	0.023	0.030	0.030
7	95.2	0.015	0.022	0.025
10	96.0	0.008	0.015	0.020
15	97.3			
20	97.3			
30	97.9			
40	97.7			
50	98.0			
60	98.3			

ตารางที่ 28 แสดงผลของอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนที่ เวลาต่างๆ เมื่อไม่มีตัวทำละลายร่วม โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

ช่วงเวลา (นาที)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น		
	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 1	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 3
0 ถึง 1	0.871	0.732	0.637
1 ถึง 2	0.062	0.123	0.153
2 ถึง 3	0.021	0.042	0.057
3 ถึง 4	0.010	0.023	0.031
4 ถึง 5	0.008	0.017	0.023
5 ถึง 7	0.005	0.009	0.013
7 ถึง 10	0.003	0.006	0.008

ภาคผนวก ง

ผลของปริมาณตัวทำละลายร่วมต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วม

ตารางที่ 29 แสดงผลของปริมาณตัวทำละลายร่วมที่ร้อยละ 0 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ที่มีต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และความเข้มข้นของเหล้ากลีเซอรไรด์ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วม โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

เวลา (นาท)	ร้อยละผลได้ ของไบโอดีเซล	ความเข้มข้นของเหล้ากลีเซอรไรด์ (โมลต่อลิตร)		
		ไตรกลีเซอรไรด์	ไดกลีเซอรไรด์	มอนอกลิเซอรไรด์
0	0	0.835	0	0
1	42.9	0.329	0.193	0.106
2	64.7	0.176	0.140	0.089
3	74.0	0.152	0.107	0.074
4	77.5	0.094	0.087	0.063
5	80.5	0.080	0.072	0.054
7	83.3	0.061	0.057	0.044
10	86.3	0.046	0.045	0.034
15	87.5			
20	88.2			
30	90.2			
40	91.3			
50	92.6			
60	93.1			

ตารางที่ 30 แสดงผลของปริมาณตัวทำละลายร่วมที่ร้อยละ 0 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วม โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

ช่วงเวลา (นาท)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นไตรกลีเซอรไรด์เริ่มต้น		
	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 1	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 3
0 ถึง 1	0.606	0.376	0.249
1 ถึง 2	0.184	0.247	0.267
2 ถึง 3	0.028	0.068	0.086
3 ถึง 4	0.070	0.093	0.107
4 ถึง 5	0.017	0.035	0.046
5 ถึง 7	0.011	0.020	0.026
7 ถึง 10	0.006	0.011	0.014

ตารางที่ 31 แสดงผลของปริมาณตัวทำละลายรวมที่ร้อยละ 5 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ที่มีต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายรวม โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

เวลา (นาท)	ร้อยละผลได้ ของไบโอดีเซล	ความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ (โมลต่อลิตร)		
		ไตรกลีเซอไรด์	ไดกลีเซอไรด์	มอนอกลิเซอไรด์
0	0.0	0.794	0.000	0.000
1	40.8	0.368	0.178	0.086
2	65.7	0.187	0.114	0.086
3	75.2	0.111	0.074	0.065
4	79.8	0.085	0.059	0.055
5	81.9	0.065	0.049	0.047
7	89.1	0.049	0.037	0.037
10	91.1	0.034	0.027	0.028
15	93.1			
20	95.6			
30	97.2			
40	97.4			
50	97.0			
60	97.3			

ตารางที่ 32 แสดงผลของปริมาณตัวทำละลายรวมที่ร้อยละ 5 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายรวม โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

ช่วงเวลา (นาท)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น		
	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 1	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 3
0 ถึง 1	0.536	0.312	0.203
1 ถึง 2	0.228	0.309	0.310
2 ถึง 3	0.095	0.145	0.171
3 ถึง 4	0.033	0.053	0.066
4 ถึง 5	0.025	0.038	0.047
5 ถึง 7	0.010	0.018	0.024
7 ถึง 10	0.006	0.011	0.015

ตารางที่ 33 แสดงผลของปริมาณตัวทำละลายรวมที่ร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ที่มีต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายรวม โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

เวลา (นาท)	ร้อยละผลได้ ของไบโอดีเซล	ความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ (โมลต่อลิตร)		
		ไตรกลีเซอไรด์	ไดกลีเซอไรด์	มอนอกลิเซอไรด์
0	0.0	0.765	0.000	0.000
1	46.0	0.311	0.216	0.111
2	68.8	0.136	0.132	0.118
3	77.5	0.089	0.096	0.101
4	81.4	0.068	0.076	0.087
5	83.9	0.056	0.065	0.077
7	86.4	0.042	0.051	0.064
10	89.2	0.030	0.039	0.052
15	91.8			
20	93.1			
30	94.8			
40	95.8			
50	95.7			
60	95.8			

ตารางที่ 34 แสดงผลของปริมาณตัวทำละลายรวมที่ร้อยละ 10 โดยมวลของของน้ำมันปาล์ม ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายรวม โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

ช่วงเวลา (นาท)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น		
	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 1	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 3
0 ถึง 1	0.594	0.311	0.165
1 ถึง 2	0.229	0.340	0.331
2 ถึง 3	0.061	0.107	0.130
3 ถึง 4	0.027	0.054	0.072
4 ถึง 5	0.016	0.031	0.044
5 ถึง 7	0.009	0.019	0.027
7 ถึง 10	0.005	0.010	0.016



ตารางที่ 35 แสดงผลของปริมาณตัวทำละลายรวมที่ร้อยละ 15 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ที่มีต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายรวม โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

เวลา (นาท)	ร้อยละผลได้ ของไบโอดีเซล	ความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ (โมลต่อลิตร)		
		ไตรกลีเซอไรด์	ไดกลีเซอไรด์	มอนอกลิเซอไรด์
0	0.0	0.733	0.000	0.000
1	65.7	0.156	0.160	0.144
2	76.5	0.091	0.110	0.124
3	78.5	0.067	0.087	0.108
4	80.5	0.054	0.074	0.098
5	85.5	0.046	0.064	0.090
7	84.9	0.035	0.051	0.077
10	90.5	0.024	0.040	0.066
15	93.1			
20	94.7			
30	96.1			
40	96.7			
50	97.1			
60	97.5			

ตารางที่ 36 แสดงผลของปริมาณตัวทำละลายรวมที่ร้อยละ 15 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายรวม โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

ช่วงเวลา (นาท)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น		
	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 1	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 3
0 ถึง 1	0.788	0.570	0.373
1 ถึง 2	0.089	0.157	0.186
2 ถึง 3	0.033	0.064	0.084
3 ถึง 4	0.018	0.036	0.050
4 ถึง 5	0.010	0.023	0.034
5 ถึง 7	0.008	0.017	0.026
7 ถึง 10	0.005	0.010	0.015

ตารางที่ 37 แสดงผลของปริมาณตัวทำละลายรวมที่ร้อยละ 20 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ที่มีต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายรวม โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

เวลา (นาท)	ร้อยละผลได้ ของไบโอดีเซล	ความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ (โมลต่อลิตร)		
		ไตรกลีเซอไรด์	ไดกลีเซอไรด์	มอนอกลิเซอไรด์
0	0.0	0.706	0.000	0.000
1	72.4	0.114	0.140	0.155
2	79.0	0.073	0.100	0.133
3	83.4	0.055	0.078	0.116
4	86.0	0.040	0.067	0.106
5	87.3	0.035	0.058	0.098
7	90.0	0.027	0.046	0.085
10	92.6	0.018	0.034	0.071
15	94.5			
20	95.4			
30	96.3			
40	97.4			
50	97.9			
60	98.0			

ตารางที่ 38 แสดงผลของปริมาณตัวทำละลายรวมที่ร้อยละ 20 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายรวม โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

ช่วงเวลา (นาท)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น		
	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 1	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 3
0 ถึง 1	0.838	0.640	0.420
1 ถึง 2	0.059	0.115	0.146
2 ถึง 3	0.026	0.057	0.081
3 ถึง 4	0.021	0.036	0.051
4 ถึง 5	0.007	0.020	0.031
5 ถึง 7	0.006	0.015	0.023
7 ถึง 10	0.004	0.009	0.016

ภาคผนวก จ

ผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วม

ตารางที่ 39 แสดงผลของอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส ที่มีต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

เวลา (นาท)	ร้อยละผลได้ ของไบโอดีเซล	ความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ (โมลต่อลิตร)		
		ไตรกลีเซอไรด์	ไดกลีเซอไรด์	มอนอกลิเซอไรด์
0	0.0	0.765	0.000	0.000
1	46.0	0.311	0.216	0.111
2	68.8	0.136	0.132	0.118
3	77.5	0.089	0.096	0.101
4	81.4	0.068	0.076	0.087
5	83.9	0.056	0.065	0.077
7	86.4	0.042	0.051	0.064
10	89.2	0.030	0.039	0.052
15	91.8			
20	93.1			
30	94.8			
40	95.8			
50	95.7			
60	95.8			

ตารางที่ 40 แสดงผลของอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

ช่วงเวลา (นาท)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น		
	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 1	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 3
0 ถึง 1	0.594	0.311	0.165
1 ถึง 2	0.229	0.340	0.331
2 ถึง 3	0.061	0.107	0.130
3 ถึง 4	0.027	0.054	0.072
4 ถึง 5	0.016	0.031	0.044
5 ถึง 7	0.009	0.019	0.027
7 ถึง 10	0.005	0.010	0.016

ตารางที่ 41 แสดงผลของอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส ที่มีต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และความเข้มข้นของ เหล่ากลีเซอรไรด์ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายรวมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

เวลา (นาท)	ร้อยละผลได้ ของไบโอดีเซล	ความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอรไรด์ (โมลต่อลิตร)		
		ไตรกลีเซอรไรด์	ไดกลีเซอรไรด์	มอนอกลิเซอรไรด์
0	0	0.765	0	0
1	70.7	0.103	0.067	0.116
2	79.1	0.057	0.041	0.088
3	82.2	0.041	0.032	0.076
4	84.6	0.033	0.027	0.065
5	87.0	0.026	0.021	0.058
7	89.2	0.021	0.018	0.052
10	90.8	0.013	0.013	0.043
15	92.8			
20	94.6			
30	94.4			
40	94.9			
50	96.7			
60	96.1			

ตารางที่ 42 แสดงผลของอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนที่ เวลาต่างๆ เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายรวมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม โดยใช้อัตราส่วนโดย โมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

ช่วงเวลา (นาท)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นไตรกลีเซอรไรด์เริ่มต้น		
	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 1	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 3
0 ถึง 1	0.866	0.778	0.614
1 ถึง 2	0.060	0.094	0.133
2 ถึง 3	0.020	0.032	0.049
3 ถึง 4	0.011	0.018	0.034
4 ถึง 5	0.009	0.017	0.027
5 ถึง 7	0.003	0.005	0.009
7 ถึง 10	0.003	0.005	0.009

ตารางที่ 43 แสดงผลของอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส ที่มีต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

เวลา (นาท)	ร้อยละผลได้ ของไบโอดีเซล	ความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ (โมลต่อลิตร)		
		ไตรกลีเซอไรด์	ไดกลีเซอไรด์	มอนอกลิเซอไรด์
0	0	0.765	0	0
1	74.4	0.057	0.076	0.089
2	84.0	0.032	0.053	0.072
3	87.6	0.023	0.039	0.060
4	88.9	0.018	0.031	0.051
5	90.1	0.014	0.024	0.046
7	91.2	0.009	0.018	0.040
10	92.9	0.004	0.012	0.033
15	95.2			
20	96.7			
30	96.8			
40	97.2			
50	99.1			
60	98.3			

ตารางที่ 44 แสดงผลของอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

ช่วงเวลา (นาท)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น		
	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 1	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 3
0 ถึง 1	0.925	0.825	0.705
1 ถึง 2	0.033	0.063	0.087
2 ถึง 3	0.012	0.030	0.046
3 ถึง 4	0.007	0.018	0.029
4 ถึง 5	0.006	0.014	0.021
5 ถึง 7	0.003	0.007	0.011
7 ถึง 10	0.002	0.005	0.008

ภาคผนวก ฉ

ผลของอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วม ตารางที่ 45 แสดงผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 3:1 ที่มีต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม และทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

เวลา (นาท)	ร้อยละผลได้ ของไบโอดีเซล	ความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ (โมลต่อลิตร)		
		ไตรกลีเซอไรด์	ไดกลีเซอไรด์	มอนอกลิเซอไรด์
0	0	0.844	0.000	0.000
1	39.8	0.439	0.237	0.100
2	45.3	0.383	0.231	0.108
3	50.7	0.312	0.215	0.119
4	54.8	0.280	0.205	0.126
5	53.6	0.298	0.193	0.117
7	61.6	0.211	0.172	0.133
10	66.6	0.167	0.151	0.129
15	70.4			
20	73.3			
30	75.5			
40	77.4			
50	79.3			
60	80.0			

ตารางที่ 46 แสดงผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 3:1 ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม และทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ช่วงเวลา (นาท)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น		
	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 1	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 3
0 ถึง 1	0.455	0.199	0.081
1 ถึง 2	0.082	0.074	0.064
2 ถึง 3	0.091	0.102	0.089
3 ถึง 4	0.050	0.050	0.041
4 ถึง 5	-0.023	-0.007	0.004
5 ถึง 7	0.054	0.064	0.055
7 ถึง 10	0.015	0.025	0.027

ตารางที่ 47 แสดงผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 4:1 ที่มีต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม และทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

เวลา (นาท)	ร้อยละผลได้ ของไบโอดีเซล	ความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ (โมลต่อลิตร)		
		ไตรกลีเซอไรด์	ไดกลีเซอไรด์	มอนอกลิเซอไรด์
0	0.0	0.816	0.000	0.000
1	61.7	0.209	0.166	0.147
2	68.7	0.154	0.140	0.143
3	73.2	0.130	0.123	0.128
4	75.2	0.110	0.113	0.124
5	77.1	0.099	0.104	0.116
7	79.8	0.086	0.094	0.112
10	81.9	0.069	0.082	0.099
15	83.9			
20	86.0			
30	87.7			
40	89.8			
50	90.3			
60	91.2			

ตารางที่ 48 แสดงผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 4:1 ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม และทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ช่วงเวลา (นาท)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น		
	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 1	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 3
0 ถึง 1	0.762	0.541	0.361
1 ถึง 2	0.067	0.098	0.103
2 ถึง 3	0.021	0.051	0.069
3 ถึง 4	0.024	0.037	0.041
4 ถึง 5	0.016	0.025	0.035
5 ถึง 7	0.006	0.014	0.016
7 ถึง 10	0.005	0.011	0.017

ตารางที่ 49 แสดงผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 5:1 ที่มีต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม และทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

เวลา (นาท)	ร้อยละผลได้ ของไบโอดีเซล	ความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ (โมลต่อลิตร)		
		ไตรกลีเซอไรด์	ไดกลีเซอไรด์	มอนอกลิเซอไรด์
0	0.0	0.787	0.000	0.000
1	52.0	0.284	0.192	0.142
2	71.9	0.128	0.116	0.124
3	77.2	0.094	0.094	0.112
4	80.0	0.078	0.081	0.102
5	81.1	0.069	0.074	0.098
7	83.9	0.056	0.062	0.090
10	86.2	0.042	0.060	0.092
15	90.7			
20	91.0			
30	88.8			
40	94.5			
50	95.3			
60	95.2			

ตารางที่ 50 แสดงผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 5:1 ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม และทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ช่วงเวลา (นาท)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น		
	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 1	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 3
0 ถึง 1	0.639	0.396	0.215
1 ถึง 2	0.198	0.294	0.317
2 ถึง 3	0.043	0.070	0.086
3 ถึง 4	0.020	0.037	0.049
4 ถึง 5	0.012	0.021	0.026
5 ถึง 7	0.008	0.017	0.021
7 ถึง 10	0.006	0.006	0.006



ตารางที่ 51 แสดงผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 ที่มีต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม และทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

เวลา (นาท)	ร้อยละผลได้ ของไบโอดีเซล	ความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ (โมลต่อลิตร)		
		ไตรกลีเซอไรด์	ไดกลีเซอไรด์	มอนอกลิเซอไรด์
0	0.0	0.765	0.000	0.000
1	46.0	0.311	0.216	0.111
2	68.8	0.136	0.132	0.118
3	77.5	0.089	0.096	0.101
4	81.4	0.068	0.076	0.087
5	83.9	0.056	0.065	0.077
7	86.4	0.042	0.051	0.064
10	89.2	0.030	0.039	0.052
15	91.8			
20	93.1			
30	94.8			
40	95.8			
50	95.7			
60	95.8			

ตารางที่ 52 แสดงผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม และทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ช่วงเวลา (นาท)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น		
	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 1	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 3
0 ถึง 1	0.594	0.311	0.165
1 ถึง 2	0.229	0.340	0.331
2 ถึง 3	0.061	0.107	0.130
3 ถึง 4	0.027	0.054	0.072
4 ถึง 5	0.016	0.031	0.044
5 ถึง 7	0.009	0.019	0.027
7 ถึง 10	0.005	0.010	0.016

ภาคผนวก ข

ผลของปริมาณตัวทำละลายร่วมต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วม ตารางที่ 53 แสดงผลของปริมาณตัวทำละลายร่วมที่ร้อยละ 5 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ที่มีต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และความเข้มข้นของเหล้ากลีเซอรไรด์ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วม โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

เวลา (นาท)	ร้อยละผลได้ ของไบโอดีเซล	ความเข้มข้นของเหล้ากลีเซอรไรด์ (โมลต่อลิตร)		
		ไตรกลีเซอรไรด์	ไดกลีเซอรไรด์	มอนอกลิเซอรไรด์
0	0.0	0.801	0.000	0.000
1	41.4	0.343	0.179	0.105
2	63.9	0.219	0.133	0.090
3	72.8	0.148	0.103	0.072
4	80.5	0.104	0.086	0.063
5	83.1	0.089	0.073	0.074
7	87.4	0.077	0.060	0.047
10	90.8	0.045	0.047	0.035
15	92.3			
20	92.9			
30	91.3			
40	93.1			
50	92.4			
60	92.6			

ตารางที่ 54 แสดงผลของปริมาณตัวทำละลายร่วมที่ร้อยละ 5 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วม โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

ช่วงเวลา (นาท)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นไตรกลีเซอรไรด์เริ่มต้น		
	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 1	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 3
0 ถึง 1	0.572	0.348	0.217
1 ถึง 2	0.155	0.213	0.231
2 ถึง 3	0.088	0.126	0.148
3 ถึง 4	0.056	0.078	0.089
4 ถึง 5	0.019	0.034	0.020
5 ถึง 7	0.007	0.016	0.033
7 ถึง 10	0.013	0.019	0.024

ตารางที่ 55 แสดงผลของปริมาณตัวทำละลายรวมที่ร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ที่มีต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายรวม โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

เวลา (นาท)	ร้อยละผลได้ ของไบโอดีเซล	ความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ (โมลต่อลิตร)		
		ไตรกลีเซอไรด์	ไดกลีเซอไรด์	มอนอกลิเซอไรด์
0	0.0	0.770	0.000	0.000
1	42.9	0.327	0.202	0.091
2	64.7	0.174	0.134	0.087
3	74.0	0.123	0.102	0.074
4	77.5	0.094	0.082	0.063
5	80.5	0.085	0.071	0.055
7	83.3	0.066	0.058	0.045
10	86.3	0.050	0.044	0.034
15	87.5			
20	88.2			
30	90.2			
40	91.3			
50	92.6			
60	93.1			

ตารางที่ 56 แสดงผลของปริมาณตัวทำละลายรวมที่ร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายรวม โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

ช่วงเวลา (นาท)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น		
	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 1	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 3
0 ถึง 1	0.576	0.290	0.180
1 ถึง 2	0.199	0.303	0.313
2 ถึง 3	0.065	0.107	0.117
3 ถึง 4	0.038	0.067	0.080
4 ถึง 5	0.012	0.027	0.037
5 ถึง 7	0.012	0.023	0.027
7 ถึง 10	0.007	0.010	0.017

ตารางที่ 57 แสดงผลของปริมาณตัวทำละลายรวมที่ร้อยละ 15 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ที่มีต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายรวม โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

เวลา (นาท)	ร้อยละผลได้ ของไบโอดีเซล	ความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ (โมลต่อลิตร)		
		ไตรกลีเซอไรด์	ไดกลีเซอไรด์	มอนอกลิเซอไรด์
0	0.0	0.745	0.000	0.000
1	35.7	0.387	0.256	0.099
2	58.9	0.208	0.187	0.121
3	69.1	0.135	0.142	0.108
4	75.2	0.110	0.112	0.092
5	77.3	0.090	0.096	0.080
7	82.4	0.072	0.078	0.068
10	85.3	0.053	0.060	0.054
15	87.2			
20	89.8			
30	91.8			
40	92.5			
50	93.8			
60	94.3			

ตารางที่ 58 แสดงผลของปริมาณตัวทำละลายรวมที่ร้อยละ 15 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายรวม โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

ช่วงเวลา (นาท)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น		
	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 1	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 3
0 ถึง 1	0.481	0.198	0.066
1 ถึง 2	0.239	0.273	0.243
2 ถึง 3	0.098	0.158	0.177
3 ถึง 4	0.035	0.074	0.095
4 ถึง 5	0.027	0.048	0.065
5 ถึง 7	0.012	0.024	0.033
7 ถึง 10	0.008	0.016	0.022

ตารางที่ 59 แสดงผลของปริมาณตัวทำละลายรวมที่ร้อยละ 20 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ที่มีต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายรวม โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

เวลา (นาท)	ร้อยละผลได้ ของไบโอดีเซล	ความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ (โมลต่อลิตร)		
		ไตรกลีเซอไรด์	ไดกลีเซอไรด์	มอนอกลิเซอไรด์
0	0.0	0.719	0.000	0.000
1	32.4	0.365	0.281	0.084
2	59.0	0.191	0.166	0.112
3	69.6	0.133	0.125	0.099
4	73.1	0.104	0.101	0.086
5	79.2	0.085	0.083	0.072
7	79.2	0.072	0.080	0.063
10	84.8	0.044	0.051	0.049
15	86.7			
20	87.7			
30	89.6			
40	91.7			
50	92.7			
60	93.1			

ตารางที่ 60 แสดงผลของปริมาณตัวทำละลายรวมที่ร้อยละ 20 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายรวม โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

ช่วงเวลา (นาท)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น		
	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 1	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 3
0 ถึง 1	0.493	0.164	0.048
1 ถึง 2	0.241	0.340	0.301
2 ถึง 3	0.082	0.139	0.158
3 ถึง 4	0.040	0.072	0.090
4 ถึง 5	0.026	0.052	0.071
5 ถึง 7	0.009	0.011	0.017
7 ถึง 10	0.013	0.027	0.033

ภาคผนวก ข

ผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วม

ตารางที่ 61 แสดงผลของอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส ที่มีต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอรไรด์ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

เวลา (นาท)	ร้อยละผลได้ ของไบโอดีเซล	ความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอรไรด์ (โมลต่อลิตร)		
		ไตรกลีเซอรไรด์	ไดกลีเซอรไรด์	มอนอกลิเซอรไรด์
0	0.0	0.770	0.000	0.000
1	42.9	0.327	0.202	0.091
2	64.7	0.174	0.134	0.087
3	74.0	0.123	0.102	0.074
4	77.5	0.094	0.082	0.063
5	80.5	0.085	0.071	0.055
7	83.3	0.066	0.058	0.045
10	86.3	0.050	0.044	0.034
15	87.5			
20	88.2			
30	90.2			
40	91.3			
50	92.6			
60	93.1			

ตารางที่ 62 แสดงผลของอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

ช่วงเวลา (นาท)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นไตรกลีเซอรไรด์เริ่มต้น		
	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 1	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 3
0 ถึง 1	0.576	0.290	0.180
1 ถึง 2	0.199	0.303	0.313
2 ถึง 3	0.065	0.107	0.117
3 ถึง 4	0.038	0.067	0.080
4 ถึง 5	0.012	0.027	0.037
5 ถึง 7	0.012	0.023	0.027
7 ถึง 10	0.007	0.010	0.017

ตารางที่ 63 แสดงผลของอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส ที่มีต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายรวมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

เวลา (นาท)	ร้อยละผลได้ ของไบโอดีเซล	ความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ (โมลต่อลิตร)		
		ไตรกลีเซอไรด์	ไดกลีเซอไรด์	มอนอกลิเซอไรด์
0	0.0	0.770	0.000	0.000
1	70.7	0.137	0.088	0.101
2	79.1	0.086	0.061	0.079
3	82.2	0.066	0.049	0.068
4	84.6	0.052	0.039	0.056
5	87.0	0.044	0.033	0.049
7	89.1	0.033	0.026	0.039
10	90.8	0.770	0.000	0.000
15	92.8			
20	94.6			
30	94.4			
40	94.9			
50	96.7			
60	96.1			

ตารางที่ 64 แสดงผลของอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายรวมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

ช่วงเวลา (นาท)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น		
	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 1	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 3
0 ถึง 1	0.822	0.709	0.578
1 ถึง 2	0.066	0.101	0.130
2 ถึง 3	0.026	0.042	0.055
3 ถึง 4	0.018	0.030	0.046
4 ถึง 5	0.011	0.019	0.028
5 ถึง 7	0.007	0.012	0.018
7 ถึง 10	0.004	0.007	0.010

ตารางที่ 65 แสดงผลของอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส ที่มีต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และความเข้มข้นของ เหล่ากลีเซอรไรด์ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายรวมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

เวลา (นาท)	ร้อยละผลได้ ของไบโอดีเซล	ความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอรไรด์(โมลต่อลิตร)		
		ไตรกลีเซอรไรด์	ไดกลีเซอรไรด์	มอนอกลิเซอรไรด์
0	0.0	0.774	0.000	0.000
1	76.8	0.091	0.094	0.069
2	82.7	0.059	0.062	0.048
3	85.0	0.045	0.049	0.039
4	87.4	0.037	0.040	0.032
5	90.9	0.032	0.035	0.029
7	92.0	0.025	0.027	0.023
10	94.6	0.018	0.020	0.019
15	95.9			
20	96.7			
30	97.2			
40	97.3			
50	97.3			
60	97.4			

ตารางที่ 66 แสดงผลของอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนที่ เวลาต่างๆ เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายรวมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม โดยใช้อัตราส่วนโดย โมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

ช่วงเวลา (นาท)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นไตรกลีเซอรไรด์เริ่มต้น		
	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 1	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 3
0 ถึง 1	0.882	0.761	0.672
1 ถึง 2	0.041	0.082	0.109
2 ถึง 3	0.019	0.037	0.048
3 ถึง 4	0.009	0.021	0.030
4 ถึง 5	0.006	0.013	0.017
5 ถึง 7	0.005	0.010	0.014
7 ถึง 10	0.003	0.006	0.008



ภาคผนวก ณ

ผลของอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ิฟิเคชัน เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วม ตารางที่ 67 แสดงผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 3:1 ที่มีต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และความเข้มข้นของเหล้ากลีเซอรไรด์ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม และทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

เวลา (นาท)	ร้อยละผลได้ ของไบโอดีเซล	ความเข้มข้นของเหล้ากลีเซอรไรด์ (โมลต่อลิตร)		
		ไตรกลีเซอรไรด์	ไดกลีเซอรไรด์	มอนอกลิเซอรไรด์
0	0.0	0.855	0.000	0.000
1	48.1	0.324	0.196	0.127
2	57.1	0.251	0.176	0.122
3	61.8	0.221	0.159	0.112
4	63.6	0.199	0.152	0.109
5	65.1	0.185	0.143	0.104
7	68.2	0.168	0.137	0.098
10	71.1	0.151	0.129	0.095
15	72.5			
20	74.3			
30	76.2			
40	77.0			
50	78.2			
60	77.7			

ตารางที่ 68 แสดงผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 3:1 ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม และทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ช่วงเวลา (นาท)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นไตรกลีเซอรไรด์เริ่มต้น		
	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 1	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 3
0 ถึง 1	0.622	0.393	0.245
1 ถึง 2	0.085	0.108	0.114
2 ถึง 3	0.035	0.055	0.067
3 ถึง 4	0.025	0.033	0.037
4 ถึง 5	0.017	0.027	0.032
5 ถึง 7	0.010	0.013	0.017
7 ถึง 10	0.006	0.009	0.011

ตารางที่ 69 แสดงผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 4:1 ที่มีต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายรวมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม และทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

เวลา (นาท)	ร้อยละผลได้ ของไบโอดีเซล	ความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ (โมลต่อลิตร)		
		ไตรกลีเซอไรด์	ไดกลีเซอไรด์	มอนอกลิเซอไรด์
0	0.0	0.824	0.000	0.000
1	49.7	0.315	0.192	0.130
2	63.7	0.199	0.146	0.121
3	69.1	0.157	0.124	0.110
4	73.3	0.133	0.110	0.097
5	75.3	0.123	0.100	0.094
7	77.5	0.103	0.088	0.084
10	80.3	0.086	0.075	0.074
15	83.4			
20	85.5			
30	87.4			
40	88.3			
50	89.8			
60	90.3			

ตารางที่ 70 แสดงผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 4:1 ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายรวมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม และทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ช่วงเวลา (นาท)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น		
	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 1	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 3
0 ถึง 1	0.618	0.385	0.228
1 ถึง 2	0.140	0.196	0.207
2 ถึง 3	0.051	0.078	0.091
3 ถึง 4	0.030	0.047	0.063
4 ถึง 5	0.012	0.024	0.028
5 ถึง 7	0.012	0.019	0.025
7 ถึง 10	0.007	0.012	0.016

ตารางที่ 71 แสดงผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 5:1 ที่มีต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายรวมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม และทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

เวลา (นาท)	ร้อยละผลได้ ของไบโอดีเซล	ความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ (โมลต่อลิตร)		
		ไตรกลีเซอไรด์	ไดกลีเซอไรด์	มอนอกลิเซอไรด์
0	0.0	0.799	0.000	0.000
1	52.2	0.266	0.184	0.137
2	66.8	0.166	0.131	0.115
3	74.5	0.121	0.101	0.098
4	77.8	0.102	0.086	0.085
5	80.1	0.089	0.074	0.077
7	83.4	0.069	0.061	0.065
10	86.2	0.056	0.050	0.059
15	88.2			
20	90.7			
30	91.4			
40	92.9			
50	93.1			
60	93.7			

ตารางที่ 72 แสดงผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 5:1 ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายรวมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม และทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ช่วงเวลา (นาท)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น		
	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 1	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 3
0 ถึง 1	0.668	0.438	0.267
1 ถึง 2	0.124	0.190	0.218
2 ถึง 3	0.057	0.095	0.116
3 ถึง 4	0.024	0.043	0.058
4 ถึง 5	0.016	0.031	0.041
5 ถึง 7	0.012	0.021	0.028
7 ถึง 10	0.006	0.010	0.013

ตารางที่ 73 แสดงผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 ที่มีต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล และความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายรวมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม และทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

เวลา (นาท)	ร้อยละผลได้ ของไบโอดีเซล	ความเข้มข้นของเหล่ากลีเซอไรด์ (โมลต่อลิตร)		
		ไตรกลีเซอไรด์	ไดกลีเซอไรด์	มอนอกลิเซอไรด์
0	0.0	0.770	0.000	0.000
1	42.9	0.327	0.202	0.091
2	64.7	0.174	0.134	0.087
3	74.0	0.123	0.102	0.074
4	77.5	0.094	0.082	0.063
5	80.5	0.085	0.071	0.055
7	83.3	0.066	0.058	0.045
10	86.3	0.050	0.044	0.034
15	87.5			
20	88.2			
30	90.2			
40	91.3			
50	92.6			
60	93.1			

ตารางที่ 74 แสดงผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายรวมที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยมวลของน้ำมันปาล์ม และทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ช่วงเวลา (นาท)	อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อความเข้มข้นไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น		
	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 1	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2	ปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 3
0 ถึง 1	0.576	0.290	0.180
1 ถึง 2	0.199	0.303	0.313
2 ถึง 3	0.065	0.107	0.117
3 ถึง 4	0.038	0.067	0.080
4 ถึง 5	0.012	0.027	0.037
5 ถึง 7	0.012	0.023	0.027
7 ถึง 10	0.007	0.010	0.017

ภาคผนวก ญ

การคำนวณความคลาดเคลื่อน

ความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ตัวอย่าง

ความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ตัวอย่างจะคำนวณจากการวิเคราะห์ตัวอย่างเดิมซ้ำกัน 5 ครั้ง โดยความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ตัวอย่างจะประกอบไปด้วยความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ปริมาณไปโอติเซล และความคลาดเคลื่อนจากการวัดปริมาณเหล็กไอเซอร์ไรต์ ซึ่งถูกแสดงตั้งแต่ตารางที่ 75 ถึงตารางที่ 77

ตารางที่ 75 การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ปริมาณไปโอติเซล

การวิเคราะห์ตัวอย่างครั้งที่	ร้อยละไปโอติเซล
1	98.9
2	98.0
3	97.1
4	98.9
5	98.0
ค่าเฉลี่ย	98.2
ค่าความคลาดเคลื่อน	-1.1, +0.7

ตารางที่ 76 การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ไตรกลีเซอไรต์

การวิเคราะห์ตัวอย่างครั้งที่	ร้อยละไตรกลีเซอไรต์
1	49.3
2	50.2
3	50.1
4	49.9
5	50.5
ค่าเฉลี่ย	50.0
ค่าความคลาดเคลื่อน	-0.7, +0.5

ตารางที่ 77 การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ปริมาณมอโนกลีเซอไรต์และไดกลีเซอไรต์

การวิเคราะห์ตัวอย่างครั้งที่	ร้อยละมอโนกลีเซอไรต์	ร้อยละไดกลีเซอไรต์
1	0.74	0.15
2	0.50	0.10
3	0.77	0.15
4	0.60	0.12
5	0.54	0.11
ค่าเฉลี่ย	0.63	0.13
ค่าความคลาดเคลื่อน	-0.13, +0.14	-0.02, +0.03

### ความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง

ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองจะคำนวณจากการทดลองที่สภาวะเดียวกัน 3 ครั้ง โดยตัวอย่างการคำนวณจะถูกแสดงดังตารางที่ 78

ตารางที่ 78 ตัวอย่างการคำนวณความคลาดเคลื่อนของร้อยละผลได้ของไปโอดีเซล เมื่อไม่มีตัวทำละลายร่วม โดยการทดลองทำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1

เวลา (นาที)	ร้อยละผลได้ไปโอดีเซล				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ความคลาดเคลื่อน
1	77.5	76.6	76.6	76.9	-0.3, +0.6
2	87.9	86.4	87.3	87.2	-0.8, +0.7
3	91.8	89.2	91.3	90.8	-1.6, +1.0
4	93.1	89.7	92.8	91.9	-2.2, +1.2
5	94.3	92.4	94.3	93.7	-1.3, +0.6
7	97.1	93.3	95.3	95.2	-1.9, +1.9
10	97.2	94.0	96.9	96.0	-2.0, +1.2
15	98.4	96.4	97.0	97.3	-0.9, +1.1
20	98.0	96.7	97.2	97.3	-0.6, +0.7
30	98.6	97.4	97.5	97.8	-0.4, +0.8
40	98.2	97.2	97.6	97.7	-0.5, +0.5
50	98.6	97.3	98.0	98.0	-0.7, +0.6
60	98.8	97.6	98.5	98.3	-0.7, +0.5

## บรรณานุกรม

1. Alleman, T.L., et al., *The Biodiesel Handbook (Second Edition)*. 2010.
2. Freedman, B., R.O. Butterfield, and E.H. Pryde, *Transesterification kinetics of soybean oil 1*. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1986. **63**(10): p. 1375-1380.
3. Rashid, U.A., Farooq; Knothe, Gerhard, *Evaluation of biodiesel obtained from cottonseed oil*. Fuel Processing Technology, 2009. **90**(9): p. 1157-1163.
4. Csernica, S.N. and J.T. Hsu, *The Phase Behavior Effect on the Kinetics of Transesterification Reactions for Biodiesel Production*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012. **51**(18): p. 6340-6349.
5. Maeda, Y., et al., *New technology for the production of biodiesel fuel*. Green Chem., 2011. **13**: p. 1124-1128.
6. Boocock, D.G.B., et al., *Fast one-phase oil-rich processes for the preparation of vegetable oil methyl esters*. Biomass and Bioenergy, 1996. **11**(1): p. 43-50.
7. Freedman, B., E.H. Pryde, and T.L. Mounts, *Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils*. Journal of the American Oil Chemists Society, 1984. **61**(10): p. 1638-1643.
8. Nouredini, H. and D. Zhu, *Kinetics of transesterification of soybean oil*. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1997. **74**(11): p. 1457-1463.
9. Darnoko, D. and M. Cheryan, *Kinetics of palm oil transesterification in a batch reactor*. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2000. **77**(12): p. 1263-1267.
10. Theerayut, L., et al., *A Second Order Kinetics of Palm Oil Transesterification*. 2004. **3**.
11. Esonye, C., O.D. Onukwuli, and A.U. Ofoefule, *Chemical kinetics of a two-step transesterification of dyacrodes edulis seed oil using acid-alkali catalyst*. Chemical Engineering Research and Design, 2019. **145**: p. 245-257.
12. Pham Thi Phuong, T., et al., *Transesterification using isopropanol as a co-solvent for the production of green biodiesel fuel*. International Journal of Energy Research, 2022. **46**(4): p. 4352-4361.
13. Puntoocha, R. and M. Wongsri, *Biodiesel production from palm oil with co-solvent*. 2008, Chulalongkorn university.
14. Tscheikuna, S.J.J., *Production of methyl esters from palm olein using cosolvents*. 2010, Chulalongkorn University.
15. Thanh, L.T., et al., *A new co-solvent method for the green production of biodiesel fuel – Optimization and practical application*. Fuel, 2013. **103**: p. 742-748.

16. Luu, P.D., et al., *Production of biodiesel from Vietnamese Jatropha curcas oil by a co-solvent method*. Bioresource Technology, 2014. **173**: p. 309-316.
17. Encinar, J.M., A. Pardal, and N. Sánchez, *An improvement to the transesterification process by the use of co-solvents to produce biodiesel*. Fuel, 2016. **166**: p. 51-58.
18. Le, H.N.T., et al., *Biodiesel Production from Rubber Seed Oil by Transesterification Using a Co-solvent of Fatty Acid Methyl Esters*. Chemical Engineering & Technology, 2018. **41**(5): p. 1013-1018.
19. Likozar, B. and J. Levec, *Effect of process conditions on equilibrium, reaction kinetics and mass transfer for triglyceride transesterification to biodiesel: Experimental and modeling based on fatty acid composition*. Fuel Processing Technology, 2014. **122**: p. 30-41.
20. Salvapati, G.S., K.V. Ramanamurty, and M. Janardanao, *Selective catalytic self-condensation of acetone*. Journal of Molecular Catalysis, 1989. **54**(1): p. 9-30.
21. Esteban, J., et al., *Liquid-Liquid Equilibria for the System Acetone + Solketal + Glycerol at (303.2, 313.2, and 323.2) K*. Journal of Chemical & Engineering Data, 2014. **59**(9): p. 2850-2855.
22. Esipovich, A.L., et al., *Liquid-liquid equilibrium in the systems FAMES + vegetable oil + methyl alcohol and FAMES + glycerol + methyl alcohol*. Fuel, 2018. **217**: p. 31-37.
23. Indelicato, S., et al., *Triacylglycerols in edible oils: Determination, characterization, quantitation, chemometric approach and evaluation of adulterations*. J Chromatogr A, 2017. **1515**: p. 1-16.



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ธีรภัทร หรุษานวงษ์
วัน เดือน ปี เกิด	19 กุมภาพันธ์ 2540
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลศูนย์ลำปาง
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขา วิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	122 ถ.ป่าไม้ ต.เวียงเหนือ อ.เมือง จ.ลำปาง 52000



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY