

Chulalongkorn University

## Chula Digital Collections

---

Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)

---

2022

### การใช้ตัวทำละลายร่วมในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มโอเลอิน โดยมีโซเดียมฟอสเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ศรัณยู ถาวรพิทักษ์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์

Follow this and additional works at: <https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd>

 Part of the [Chemical Engineering Commons](#)

---

#### Recommended Citation

ถาวรพิทักษ์, ศรัณยู, "การใช้ตัวทำละลายร่วมในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มโอเลอิน โดยมีโซเดียมฟอสเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา" (2022). *Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)*. 6519.  
<https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/6519>

This Thesis is brought to you for free and open access by Chula Digital Collections. It has been accepted for inclusion in Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD) by an authorized administrator of Chula Digital Collections. For more information, please contact [ChulaDC@car.chula.ac.th](mailto:ChulaDC@car.chula.ac.th).

การใช้ตัวทำละลายร่วมในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน  
ของน้ำมันปาล์มโอเลอิน โดยมีโซเดียมฟอสเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2565  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

UTILIZATION OF CO-SOLVENT IN TRANSESTERIFICATION OF PALM OLEIN OIL USING  
SODIUM PHOSPHATE AS A CATALYST



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

การใช้ตัวทำละลายร่วมในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน  
ของน้ำมันปาล์มโอเลอิน โดยมีโซเดียมฟอสเฟตเป็นตัวเร่ง  
ปฏิกิริยา

โดย

นายศรัณยู ถาวรพัทธ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ธร เจริญสุขนิมิตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวรจารย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ธร เจริญสุขนิมิตร)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปารวี วาสน์อำนวย)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นริศรา อินทรจันทร์)

ศรัณยู ถาวรพัทธ์ : การใช้ตัวทำละลายร่วมในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมัน  
ปาล์มโอเลอิน โดยมีโซเดียมฟอสเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา. ( UTILIZATION OF CO-  
SOLVENT IN TRANSESTERIFICATION OF PALM OLEIN OIL USING SODIUM  
PHOSPHATE AS A CATALYST) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.พงศ์ธร เจริญศุภนิมิตร

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาถึงผลกระทบของตัวทำละลายร่วมในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มโอเลอินและเมทานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์เป็นโซเดียมฟอสเฟต ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะชนิดถังกวน ความเร็วรอบในการปั่นกวน 600 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 6:1 ถึง 30:1 ชนิดตัวทำละลายร่วมที่เลือกใช้คือ อะซิโตนและเตตระไฮโดรฟูแรน ปริมาณตัวทำละลายร่วมร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักน้ำมัน อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 90 140 190 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ตัวทำละลายร่วมไม่ส่งผลกระทบต่อค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา และยังส่งผลเสียในการเจือจางตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาที่สภาวะอุณหภูมิสูง (190 องศาเซลเซียส) นอกจากนี้ การทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันขอการทำปฏิกิริยาในสภาวะที่มีความเข้มข้นของเมทานอลในวัฏภาคที่ทำปฏิกิริยาสูงๆ การละลายเข้าด้วยกันที่มากเกินไปของเมทานอลและน้ำมันพืชจะส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดช้าลงแทน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี  
ปีการศึกษา 2565

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

# # 6270273921 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD: Biodiesel; Transesterification; Kinetic; Cosolvent

Sarunu Thawonphat : UTILIZATION OF CO-SOLVENT IN  
TRANSESTERIFICATION OF PALM OLEIN OIL USING SODIUM PHOSPHATE AS  
A CATALYST. Advisor: Asst. Prof. PONGTORN CHAROENSUPPANIMIT, Ph.D.

The focus of this study is to examine how the use of a cosolvent affects the transesterification of palm olein when sodium phosphate is used as a catalyst. The experiment was conducted in a batch reactor with an agitation speed of 600 rpm, a catalyst loading of 0.5% based on oil weight, and various methanol to oil ratios (6:1, 12:1, 18:1, 24:1, and 30:1) while using acetone and tetrahydrofuran as cosolvents at 10% to 20% of oil weight. The reaction was carried out at different temperatures, including 60°C, 90°C, 140°C, and 190°C. The results of the study revealed that the cosolvent had a adverse effect at high temperatures due to its dilution effect. At high temperatures, methanol and oil are more likely to dissolve into one another, making the mass transfer phenomenon between the two liquid phases less significant. The transesterification process was found to be more efficient with a high concentration of methanol in the reaction phase. An excessive solubility limit between oil and methanol was found to reduce the reaction rate.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Field of Study: Chemical Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2022

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ ถ้าไม่ได้รับการอนุเคราะห์ สนับสนุน และช่วยเหลือจากบุคคลต่างๆ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบิดาและมารดาที่สนับสนุนข้าพเจ้าในเรื่องต่างๆ ทั้งเวลา ความอดุสาหะ และทุนทรัพย์ต่างๆที่มอบให้ข้าพเจ้า

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.พงศ์ธร เจริญศุภนิมิตร ดร.เจตศักดิ์ ไชยคุนา และ ดร. กริชชาติ ว่องไวลิขิต ที่คอยให้คำปรึกษา ชี้แนะ และสอนสั่งตลอดมา ตลอดจนผลักดันงานวิจัยสำเร็จลุล่วง

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร.วงศ์ ปวรจารย์ ประธานกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ปารวี วาศน์อำนวย และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นริศรา อินทรจันทร์ ซึ่งได้ให้คำชี้แนะถึงหลักการทำงานวิจัยที่เหมาะสม และสละเวลามาเป็นคณะกรรมการสอบ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ พี่ศิวักร นามเชื่อนแพทย์ ที่คอยช่วยเหลือ ดูแล และอำนวยความสะดวกตลอดการทำงานจนลุล่วง

ข้าพเจ้าขอขอบคุณบริษัท ปิยะศิริวานิช จำกัด ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีตลอดการทำวิทยานิพนธ์ เมทานอล ตลอดจนค่าใช้จ่ายจิปาถะต่างๆ ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

และสุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณคนใกล้ชิด เพื่อนฝูง พี่ของข้าพเจ้า และเพื่อนร่วมห้องปฏิบัติการที่เกื้อหนุนกันและกันในการทำงานตลอดมา

## สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
บทที่ 1 .....	1
1.1 ความสำคัญและความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย .....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 น้ำมันไบโอดีเซล.....	4
2.2 ปฏิกริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน .....	4
2.2.1 การผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบเบสเอกพันธ์.....	5
2.2.2 การทำปฏิกริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกริยาวิวิธพันธ์ .....	6
2.2.2.1 กลไกการเกิดปฏิกริยาบนตัวเร่งวิวิธพันธ์ .....	6
2.2.2.2 การใช้ตัวเร่งปฏิกริยาแบบวิวิธพันธ์สำหรับปฏิกริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน <sup>[5]</sup> ..	9
2.2.2.3 ตัวเร่งปฏิกริยากรดวิวิธพันธ์.....	9
2.2.2.4 ตัวเร่งปฏิกริยาเบสวิวิธพันธ์ .....	10
2.2.3 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกริยาโซเดียมฟอสเฟต .....	12



2.2.3.1 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตโดยเครื่องมือวิเคราะห์ด้วยวิธี Thermal Gravimetric Analysis (TGA).....	13
2.2.3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction) .....	14
2.2.3.3 BET surface area and basic strength.....	17
2.2.4 ปฏิกิริยาข้างเคียงที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบส .....	17
2.3 การศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสวิวิธพันธ์ .....	18
2.3.1 ผลกระทบของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา .....	18
2.3.2 ผลกระทบของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา .....	20
2.3.3 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน .....	22
2.4. การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน .....	23
2.5 การใช้ตัวทำละลายร่วมในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ .....	25
2.6. การเลือกชนิดของตัวทำละลายร่วมที่ใช้ในการศึกษา .....	28
บทที่ 3 การทดลองและการวิเคราะห์ .....	30
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลองทดลองและวิเคราะห์ผล .....	30
3.2 วิธีการและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	31
3.2.1 เตาปฏิกรณ์.....	31
3.2.2 วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา .....	32
3.2.3 วิธีการทดลอง .....	32
3.2.4 วิธีการเก็บตัวอย่าง.....	33
3.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	34
3.4 การวิเคราะห์ปริมาณ FAME ด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี .....	34
3.4.1 รายละเอียดเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีและสถานะ.....	34

3.4.2 การเตรียมตัวอย่างในการตรวจ .....	35
3.5 การคำนวณที่ใช้ในงานวิจัย .....	35
3.6 การวิเคราะห์ความผิดพลาด .....	36
3.7 การไทเทรต .....	36
3.7.1 การไทเทรตหากรดไขมันในสารตั้งต้น .....	36
3.7.2 การไทเทรตหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกละลายจากตัวทำละลายร่วม .....	37
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย .....	38
4.1 ผลการทดลองเบื้องต้น .....	39
4.1.1 ผลกระทบของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ .....	39
4.1.2 ผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกะ .....	41
4.1.3 ผลกระทบของการเสื่อมของตัวเร่งปฏิกิริยาจากเก็บรักษา .....	42
4.1.4 สภาวะพื้นฐานในการทดลองต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ .....	43
4.2 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช .....	44
4.2.1 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช .....	44
4.2.2 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับน้ำมันพืชต่อจลนพลศาสตร์เคมีของ ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน .....	46
4.3 ผลกระทบของชนิดตัวทำละลายร่วม .....	49
4.3.1 ผลกระทบของชนิดตัวทำละลายร่วมต่อความสัมพันธ์ของร้อยละโดยน้ำหนักของ น้ำมันไบโอดีเซล .....	49
4.3.2 ผลกระทบของชนิดตัวทำละลายร่วมต่อจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิ เคชัน .....	50
4.4 ผลกระทบของปริมาณตัวทำละลายร่วม .....	53
4.4.1 ผลกระทบของปริมาณตัวทำละลายร่วมต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ .....	53
4.4.2 ผลกระทบของปริมาณตัวทำละลายร่วมต่อจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ ริฟิเคชัน .....	54

4.4.3 การศึกษาพฤติกรรมของวัฏภาคระหว่างเมทานอลและน้ำมันปาล์มโอเลอินที่สภาวะ อุณหภูมิสูง .....	55
4.5 ผลกระทบของอุณหภูมิ .....	58
4.5.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ในสภาวะที่มีและไม่มีตัวทำละลาย ร่วม .....	58
4.5.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อจลนพลศาสตร์และสมการของอาร์เรเนียสของปฏิกิริยาทราน เอสเทอร์ริฟิเคชันในสภาวะที่มีและไม่มีตัวทำละลายร่วม .....	62
4.5.3 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมของวัฏภาคเมทานอลและน้ำมันพืช .....	64
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง .....	66
บทที่ 6 ข้อเสนอแนะ .....	67
บรรณานุกรม .....	70
ภาคผนวก .....	74
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์ .....	74
ก-1 การวิเคราะห์โดยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี .....	74
ก-1.1 ตำแหน่งพีคและแฟคเตอร์ตอบสนอง .....	75
ก-1.2 มวลโมเลกุลมวลโมเลกุลเฉลี่ยของกรดไขมันในน้ำมันโอเลอินและมวลโมเลกุล เฉลี่ยของไตรกลีเซอไรด์ .....	79
ก-1.3 การคำนวณความเข้มข้นของเหล่าไตรกลีเซอไรด์ .....	80
ก-2 การวิเคราะห์โดยวิธีไทเทรต .....	81
ก-2.1 การไทเทรตหากรดไขมันอิสระในสารตั้งต้น .....	81
ก-2.2 การไทเทรตหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกละลายจากตัวทำละลายร่วม .....	82
ภาคผนวก ข ผลการทดลอง .....	83
ข-1 การศึกษาเบื้องต้นเพื่อเลือกสภาวะพื้นฐานและออกแบบการทดลอง .....	83
ข-2 การศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน .....	88
ข-3 การศึกษาผลกระทบของชนิดตัวทำละลายร่วม .....	91

ข-4 การศึกษาผลกระทบของปริมาณตัวทำละลายร่วม.....	94
ข-5 การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในสถานะที่ไม่มีตัวทำละลายร่วม.....	97
ข-6 การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในสถานะที่มีตัวทำละลายร่วม.....	100
ภาคผนวก ค การคำนวณความคลาดเคลื่อน.....	103
ค-1 ความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์.....	103
ค-2 ความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง.....	104
ประวัติผู้เขียน.....	116



## บทที่ 1

### 1.1 ความสำคัญและความเป็นมา

ไบโอดีเซลหรือฟรีแฟตตี้เอซิคเมทิลเอสเทอร์ (Free Fatty Acid Methyl Ester, FAME) เป็นเชื้อเพลิงทดแทนซึ่งผลิตจากสารตั้งต้นไขมันปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ โดยปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีสองประเภทคือปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบส ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วแต่ไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้กับสารตั้งต้นไขมันที่มีกรดไขมันสูงเพราะปัญหาการเกิดสบู่ และปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรด ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นที่มีกรดไขมันได้ดี แต่ข้อเสียคืออัตราการเกิดปฏิกิริยาค่ำ<sup>[1]</sup>

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารตั้งต้นไขมันที่ใช้ในการผลิต<sup>[2],[3]</sup> ซึ่งปัจจุบันประเทศไทยใช้น้ำมันปาล์มเป็นสารตั้งต้นและใช้กระบวนการผลิตแบบทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสเอกพันธ์เป็นหลัก เนื่องจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสเอกพันธ์สามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำและใช้ความดันบรรยากาศแต่อย่างไรก็ตามข้อเสียของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีตัวเร่งปฏิกิริยาเจือปน จึงต้องล้างตัวเร่งปฏิกิริยาหลังการผลิต ซึ่งการล้างผลิตภัณฑ์สามารถทำได้สองวิธีการ คือการใช้น้ำซึ่งจะก่อให้เกิดน้ำเสียเป็นจำนวนมาก และอีกวิธีคือการล้างแบบไม่ใช้น้ำ เช่นการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน ตัวดูดซับอินทรีย์ แต่การล้างแบบไม่ใช้น้ำก็เป็นการเพิ่มความซับซ้อนให้กับกระบวนการผลิตและยังมีปัญหาการกำจัดขยะปนเปื้อนหลังจากการล้าง เพราะในปัจจุบันวัสดุที่ใช้จับตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการล้างแบบไม่ใช้น้ำไม่สามารถนำมารีไซเคิลใหม่ได้<sup>[4]</sup>

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวีวิพันธ์จะสามารถลดปัญหาการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวีวิพันธ์สามารถแยกออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่ายเพราะเป็นของแข็ง ทำให้กระบวนการผลิตไบโอดีเซลเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวีวิพันธ์ยังมีความสามารถนำกลับมาใช้ใหม่เพราะตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวีวิพันธ์มีการละลายในผลิตภัณฑ์ต่ำจึงเจือปนเข้าไปในผลิตภัณฑ์น้อย โดยตัวเร่งปฏิกิริยาวีวิพันธ์ในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันมีหลายชนิด ยกตัวอย่างเช่น ตัวเร่งชนิดสารประกอบของโลหะแอลคาไลน์ ตัวเร่งชนิดสารประกอบโลหะแอลคาไลน์เอิร์ท ตัวเร่งชนิดเรซินแลกเปลี่ยนไอออน หรือตัวเร่งชนิดเบสแข็ง ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้มีสมบัติเฉพาะทางกายภาพและสมบัติทางเคมีแตกต่างกันไป ซึ่งสมบัติเหล่านี้จะส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาและลักษณะของเตาปฏิกรณ์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน<sup>[5]</sup>

หนึ่งในตัวเร่งปฏิกิริยาวีวิพันธ์ที่มีศักยภาพในการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันคือ โซเดียมฟอสเฟต ( $\text{Na}_3\text{PO}_4$ ) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในในหมวดหมู่แอลคาไลน์ที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาและทนต่อขี้ล้าง โดยในงานวิจัยของ กฤติยา ทินกร ได้ทดลองใช้โซเดียมฟอสเฟตบนตัวรองรับอะลูมินาทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มโอเลอินกับเมทานอล พบว่าที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน 18:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช สามารถเกิดผลิตภัณฑ์ได้มากกว่าร้อยละ 96 ภายในระยะเวลา 30 นาที และเมื่อทำการทดสอบความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ พบว่าเมื่อทำปฏิกิริยา 5 ครั้ง โซเดียมฟอสเฟตยังสามารถทำปฏิกิริยาได้ดี<sup>[6]</sup>

แต่ปัญหาหลักของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพันธ์ เพราะในกรณีของของปฏิกิริยาเอกพันธ์ เป็นการทำปฏิกิริยาของสารสองวัฏภาคเหลว-ของเหลว ต่างกับในกรณีของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ ซึ่งปฏิกิริยาเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่านั้น ดังนั้นต้องมีการแพร่ของสารตั้งต้นเข้าไปยังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยาสามวัฏภาคระหว่างของแข็ง-ของเหลว-ของเหลว ส่งผลให้ผลกระทบของปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลเข้ามาเกี่ยวข้องมากขึ้น

หนึ่งในวิธีลดค่าความต้านทานการถ่ายเทมวลคือการใช้ตัวทำละลายร่วม แต่อย่างไรก็ตาม การศึกษาผลกระทบของตัวทำละลายร่วมกับการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันในปัจจุบันเป็นการศึกษาที่อุณหภูมิต่ำ โดยได้มีการทดลองของ โดยได้มีการทดลองในปี 2016 ของ Vinich Promarak และคณะ<sup>[7]</sup> ได้ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันจากตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่สกัดจากเปลือกหอยที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ใช้น้ำมันพืชเป็นน้ำมันปาล์ม และใช้ตัวทำละลายร่วมชนิดต่างๆ ได้แก่ เตตระไฮโดรฟูแรน อะซิโตน 2-โพรพานอล 1-โพรพานอล เอทานอล และเอทิลไกลคอล โดยผสมที่ปริมาณตัวทำละลายร่วมกับร้อยละ 5 และ 10 โดยปริมาตรของเมทานอล ผลการทดลองพบว่า ตัวทำละลายร่วมทุกชนิด ช่วยให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น และในงานวิจัยของ Yogesh C. Sharma และคณะในปี 2018<sup>[8]</sup> ทำการทดลองโดยใช้น้ำมัน ตะคร้อทำปฏิกิริยากับเมทานอล โดยทำปฏิกิริยา 2 ขั้นตอน ในขั้นแรกจะเป็นการทำปฏิกิริยาโดยใช้กรดเพื่อทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน และค่อยทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันในขั้นตอนที่ 2 โดยการศึกษาผลกระทบของตัวทำละลายร่วมจะทำได้ในขั้นตอนที่สองเท่านั้น และใช้ตัวทำละลายร่วมเป็นนอมอลเฮกเซน ไดไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์อีเธอร์ อะซิโตน และโทลูอิน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนักน้ำมัน และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 1:17 โดยการใช้ตัวทำละลายร่วม สามารถทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น และตัวทำละลายร่วมที่ดีที่สุดในงานวิจัยนี้คือไดไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์อีเธอร์ ส่วนงานวิจัยของ Ana Paula Soares Dias และคณะในปี 2020<sup>[9]</sup> ก็พบว่าผลการทดลองโดยใช้ตัวทำละลายร่วมช่วยในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ จะช่วยให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดได้เร็วกว่าแบบไม่ใช้ตัวทำละลายร่วม

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าตัวทำละลายร่วมมีศักยภาพในการช่วยทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ที่อุณหภูมิต่ำ แต่อย่างไรก็ตามการศึกษผลกระทบของตัวทำละลายร่วมในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันที่อุณหภูมิสูงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ยังไม่ถูกศึกษาและอภิปรายผล ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจำเป็นต้องศึกษาความสามารถของตัวทำละลายร่วมเพิ่ม ดังนั้นวัตถุประสงค์ในงานวิจัยฉบับนี้คือ การศึกษาความสามารถของตัวทำละลายร่วมในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มโอเลอินและเมทานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์เป็นโซเดียมฟอสเฟต และชนิดตัวทำละลายร่วมที่เลือกใช้คือเตตระไฮโดรฟูแรนและอะซิโตน เนื่องจากเป็นสารที่สามารถช่วยให้วัฏภาคของน้ำมันปาล์มโอเลอินและวัฏภาคของเมทานอลสามารถละลายเข้าด้วยกันได้ง่ายขึ้น ไม่เกิดปฏิกิริยาข้างเคียง มีความเสถียร มีจุดเดือดที่เหมาะสม ไม่เป็นไอที่อุณหภูมิห้องสามารถแยกออกจากผลิตภัณฑ์ไปพร้อมกับเมทานอลได้ด้วยวิธีการระเหย และยังมีความเป็นพิษต่ำ

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาความสามารถของตัวทำละลายร่วม ในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มโอเลอินและเมทานอล โดยมีโซเดียมฟอสเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาความสามารถของตัวทำละลายร่วม ในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มโอเลอินและเมทานอล

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาคือโซเดียมฟอสเฟต
2. ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมัน
3. อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลและน้ำมันพืชเท่ากับ 6:1 ถึง 30:1
4. อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 ถึง 190 องศาเซลเซียส
5. ชนิดของตัวทำละลายร่วม อะซิโตนและเตตระไฮโดรฟิวแรน
6. ปริมาณตัวทำละลายร่วม ร้อยละ 0 ถึง 20 โดยมวลของน้ำมันพืช

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถอธิบายผลกระทบของตัวทำละลายร่วมในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน ของน้ำมันปาล์มโอเลอินและเมทานอล โดยมีโซเดียมฟอสเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 น้ำมันไบโอดีเซล

น้ำมันไบโอดีเซลหรือเฟตตีแอซิคเมทิลเอสเทอร์ (Fatty Acid Methyl Ester – FAME) เป็นเชื้อเพลิงทดแทนซึ่งเป็นสารประกอบเอสเทอร์ของกรดไขมัน โดยผลิตจากวัตถุดิบทางธรรมชาติ เช่น ปาล์ม น้ำมันเมล็ดเรพ น้ำมันถั่วเหลือง ไขมันสัตว์ สาหร่าย หรือน้ำมันใช้แล้วจากครัวเรือน<sup>[10]</sup> ทำปฏิกิริยากับเมทานอล โดยน้ำมันไบโอดีเซลสามารถเติมลงไปนํ้ามันดีเซลได้โดยตรงและไม่จำเป็นต้องดัดแปลงเครื่องยนต์ นอกจากนี้ น้ำมันไบโอดีเซลยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยช่วยลดอัตราการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ มอนอกไซด์ ฝุ่นผง และไฮโดรคาร์บอนที่ไม่ได้ถูกเผาไหม้ลงร้อยละ 78 47 67 และ 45 ตามลำดับ

### 2.2 ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน

ปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลสามารถแบ่งออกตามสารตั้งต้นได้สองกลุ่ม โดยกลุ่มที่หนึ่งคือปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันซึ่งเกิดกับไขมันจำพวกกลีเซอไรด์ กับกลุ่มที่สองคือปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันซึ่งจะเกิดกับกรดไขมันอิสระ โดยปริมาณของไตรกลีเซอไรด์กับกรดไขมันอิสระเป็นตัวแปรสำคัญในการเลือกวิธีการผลิตไบโอดีเซล โดยในแต่ละวิธีก็มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป เช่นตัวเร่งปฏิกิริยาเบสจะเกิดปฏิกิริยาไวกว่าตัวเร่งปฏิกิริยากรด แต่ข้อเสียคือเมื่อเจอกับกรดไขมันอิสระจะตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดการจับตัวเป็นสบู่ ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยากรดจะสามารถใช้ทั้งสารตั้งต้นที่เป็นไตรกลีเซอไรด์และกรดไขมันอิสระ<sup>[2]</sup> แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำ และในกรณีแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยาที่จุดวิกฤต โดยของไหลทั้งหมดจะเหลือเพียงวัฏภาคเดียวซึ่งเกิดปัญหาการถ่ายเทมวลต่ำและไม่จำเป็นต้องแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์<sup>[11]</sup> แต่ข้อเสียคือจำเป็นต้องใช้ความดันและอุณหภูมิสูงซึ่งส่งผลต่อต้นทุนและพลังงาน<sup>[12],[13]</sup>



แม้ว่าไบโอดีเซลสามารถผลิตได้หลายวิธีหรืออาจใช้กระบวนการผลิตหลายกระบวนการร่วมกัน แต่อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงและใช้กันอย่างแพร่หลาย<sup>[1]</sup> โดยปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบซับซ้อน หากสารตั้งต้นเป็นไตรกลีเซอไรด์แล้ว จะประกอบไปด้วยสามปฏิกิริยาย่อย ปฏิกิริยาย่อยที่หนึ่งคือไตรกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับเมทานอลเกิดเป็น FAME หนึ่งโมลกับไดกลีเซอไรด์หนึ่งโมล ปฏิกิริยาย่อยที่สองคือไดกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับเมทานอลเกิดเป็น FAME หนึ่งโมลกับโมโนกลีเซอไรด์หนึ่งโมล และปฏิกิริยาย่อยที่สามเป็นโมโนกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับเมทานอลหนึ่งโมลเกิดเป็น FAME หนึ่งโมลกับกลีเซอรอลหนึ่งโมล

### 2.2.1 การผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันแบบเบสเอกพันธ์

ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสเอกพันธ์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุด เนื่องจากสามารถเกิดปฏิกิริยาได้เร็วและปฏิกิริยาเกิดในความดันบรรยากาศ เพราะมีความเร็วในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยากรด 4000 เท่า<sup>[13]</sup> โดยตัวเร่งปฏิกิริยาเบสเอกพันธ์ที่นิยมใช้คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมเมทาโทกไซด์ และโพแทสเซียมเมทาโทกไซด์ ซึ่งในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน จะผสมเมทานอลเข้าไปเกินอัตราส่วนปริมาณสารสัมพันธ์ เพื่อให้ไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันพืชสามารถทำปฏิกิริยาโดยสมบูรณ์

Ivan J. Stojkovic<sup>[14]</sup> ได้อธิบายกระบวนการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์และการบำบัดของเสียโดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาในเตาปฏิกรณ์จะเข้าสู่ระบบแยกวัฏภาค โดยแยกออกเป็นสองสายโดยการแยกแบบแบ่งวัฏภาคระหว่างกลีเซอรอลและไบโอดีเซล โดยในสายของไบโอดีเซลจะถูกสะเทินด้วยกรด ก่อนเข้าสู่กระบวนการล้างโดยใช้น้ำ หรือการล้างแบบแห้งเพื่อกำจัดสารปนเปื้อน อาทิตัวเร่งปฏิกิริยา เมทานอล สบู่ และเพื่อให้ไบโอดีเซลที่ผลิตอยู่ในมาตรฐานอุตสาหกรรม จะเข้าสู่กระบวนการระเหยน้ำต่อเพื่อกำจัดน้ำส่วนเกิน ส่วนในกรณีของกลีเซอรอล หลังจากถูกแยกออกจากไบโอดีเซลในระบบแยกวัฏภาค กลีเซอรอลจะถูกทำให้เป็นกลางด้วยการสะเทินด้วยกรดชนิดต่างๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ที่นำมาใช้ และเข้าสู่กระบวนการแยกเมทานอลออกเพื่อขายกลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง

## 2.2.2 การทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์

### 2.2.2.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งวิวิธพันธ์

การเกิดปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ จะมีวัฏภาคของของแข็งเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นบริเวณตำแหน่งร่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่บนพื้นผิวของวัฏภาคของแข็งเท่านั้น ดังนั้นกระบวนการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์โดยทั่วไปที่ประกอบไปด้วย 2 วัฏภาคระหว่างของแข็งกับของไหล จะประกอบไปด้วยขั้นตอน 7 ขั้นตอน<sup>[15]</sup> ซึ่งเกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ทางเคมีกับปรากฏการณ์การถ่ายเทมวล ดังนี้

1. การแพร่ของสารตั้งต้นจากของไหลที่อยู่ห่างออกไปภายนอกตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านเข้าไปชั้นฟิล์มเข้าไปที่ผิวนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา
2. ในกรณีที่ตัวเร่งปฏิกิริยามีลักษณะเป็นรูพรุน จะเกิดการแพร่ของสารตั้งต้นจากผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปในรูพรุน
3. เกิดการดูดซับของตัวเร่งปฏิกิริยาบนพื้นผิวของวัฏภาคของแข็ง
4. การเกิดปฏิกิริยาขึ้นที่ตำแหน่งร่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาบนพื้นผิวของวัฏภาคของแข็ง
5. การคายผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นบนตำแหน่งร่องไวของปฏิกิริยา
6. การแพร่ของผลิตภัณฑ์ภายในรูพรุน ออกมายังพื้นผิวนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา
7. การแพร่ของผลิตภัณฑ์ที่พื้นผิวนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านชั้นฟิล์มกลับออกไปที่ของไหลที่อยู่ห่างออกไปภายนอกตัวเร่งปฏิกิริยา

ในขั้นตอน 1 2 6 และ 7 เป็นขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์การถ่ายเทมวล และในขั้นตอนที่ 3 4 และ 5 เป็นขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยในขั้นตอนที่ 1 และ 7 เป็นปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลภายนอก (external mass transfer) และในขั้นตอนที่ 2 กับ 6 เป็นปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลภายในเม็ดของตัวเร่งปฏิกิริยา (internal mass transfer) หากในขั้นตอนทั้ง 4 เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว กลไกที่ควบคุมการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นกลไกทางเคมี เนื่องจากความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่สัมผัสบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ใกล้เคียงกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นในของไหล ดังนั้นปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลจะไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการเกิดปฏิกิริยา

ในขั้นตอนที่ 1 เกิดขึ้นจาก สารสารตั้งต้นที่อยู่ห่างออกไปภายนอกตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเข้มข้นสูงกว่าบริเวณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้สารตั้งต้นแพร่เข้าไปสู่พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า ซึ่งสามารถยกตัวอย่างด้วยโมเดลฟิล์ม โดยสมมุติว่าบริเวณผิวสัมผัสของสารเสมือนเกิดฟิล์มบางขึ้น และความต้านทานการถ่ายเทมวลทั้งหมดเกิดขึ้นในชั้นฟิล์มที่มีความหนาของชั้นฟิล์มเท่ากับ  $\delta$  ซึ่งความหนาขึ้นอยู่กับสภาพการไหลต่างๆ ส่วนในขั้นตอนที่ 7 เกิดในทิศทางกลับกันกับในขั้นตอนที่ 1 แต่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยา โดยผลิตภัณฑ์ที่อยู่บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเข้มข้นสูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่อยู่ภายนอกตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์สามารถแพร่ผ่านชั้นฟิล์มที่มีความหนาเท่ากับ  $\delta$  กลับออกไปยังภายนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยอัตราการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นในกระบวนการทั้งสองเมื่อประยุกต์อินทิเกรตร่วมกับกฎของฟิค (Fick's law) สามารถเขียนในรูปสมการฟิล์มหนึ่งโดยสมมุติให้สาร A เป็นสารที่สนใจได้ที่แสดงในสมการที่ 2.1

$$W_{Az} = \frac{D_{AB}}{\delta} (C_{Ab} - C_{As}) \quad (2.1)$$

โดย  $W_{Az}$  คือฟลักซ์ของสาร A ที่ไหลผ่านชั้นฟิล์มบาง ค่า  $D_{AB}$  คือ ค่าคงที่ของการแพร่ของสาร A ในสาร B ค่า  $C_{Ab}$  คือความเข้มข้นของสาร A ในของไหลที่อยู่ห่างออกไปภายนอกตัวเร่งปฏิกิริยา และ  $C_{As}$  คือความเข้มข้นของสาร A ที่อยู่บริเวณพื้นผิวภายนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อค่า  $D_{AB}$  แสดงในสมการที่ 2.2 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของการแพร่ในระบบทวิภาคของวัฏภาคของของเหลว และสำหรับในกรณีสารผสมมากกว่า 2 ชนิด ค่าคงที่ของการแพร่ของสารจะเกี่ยวข้องกับชนิดของสารผสม ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการพัฒนาสูตรเอมพิริกับของระบบสองสาร<sup>[16]</sup>

$$D_{AB}(T_2) = D_{AB}(T_1) \frac{\mu_1}{\mu_2} \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

สำหรับปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลภายในในขั้นตอนที่ 2 และ 6 เป็นปรากฏการณ์การแพร่ของสารระหว่างผิวของตัวเร่งปฏิกิริยากับรูพรุนภายในของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสารตั้งจะแพร่จากผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปทำปฏิกิริยาบนตำแหน่งว่องไวบนพื้นผิวภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา และผลิตภัณฑ์จะแพร่ออกจากตำแหน่งว่องไวภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา ออกไปยังพื้นผิวนอกของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา เพราะฉะนั้นการแพร่ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้ จะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคที่แพร่ภายในรูพรุนกับขนาดของรูพรุน ถ้าขนาดโมเลกุลของสารมีขนาดใหญ่ใกล้เคียงกับขนาดของรูพรุน การแพร่ภายในรูพรุนจะเกิดขึ้นได้ยากเพราะโมเลกุลของสารที่แพร่จะเกิดการชนกับผนังภายในรูพรุนทำให้อัตราการแพร่เกิดขึ้นได้ช้าลง และหากตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดใหญ่ โอกาสที่ตำแหน่งว่องไวที่อยู่ลึกลงไปจะเจอกับสารตั้งต้นจะมีโอกาสน้อยลง เนื่องจากการแพร่ของสารตั้งต้นเกิดขึ้นได้ยากขึ้น เพราะระยะทางที่สารต้องแพร่เข้าไปมีระยะทางมากขึ้น ดังนั้นขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาจึงส่งผลโดยตรงต่อการถ่ายเทมวลภายใน แต่ทั้งนี้ เนื่องจากในขั้นตอนที่ 2 และ 6 เกิดขึ้นภายในรูพรุน ดังนั้นความเร็วของของไหลที่อยู่ภายนอกตัวเร่งปฏิกิริยาจึงไม่ส่งผลต่อการแพร่ภายในรูพรุน

ซึ่งความสำคัญของการถ่ายเทมวลภายใน คือการเกิดความแตกต่างของความเข้มข้น (concentration gradient) ภายในเม็ดตัวเร่งปฏิกิริยา หากปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลภายในเม็ดตัวเร่งปฏิกิริยามีความต้านทานการถ่ายเทมวลสูง จะส่งผลให้ตำแหน่งว่องไว (active site) ต่างๆบนพื้นผิวของตัวเร่งจะสัมผัสกับสารตั้งต้นที่มีความเข้มข้นที่ต่างกัน แต่หากความต้านทานการถ่ายเทมวลต่ำ ตำแหน่งว่องไวภายในเม็ดตัวเร่งปฏิกิริยาจะสัมผัสกับสารตั้งต้นที่มีความเข้มข้นใกล้เคียงหรือเท่ากับความเข้มข้นของสารตั้งต้นบริเวณผิวนอกตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ หากการวัดค่าทางจลนพลศาสตร์ไม่ได้คำนึงผลของการถ่ายเทมวลภายใน จะส่งผลให้การวัดค่าพลังงานกระตุ้นมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง<sup>[17]</sup>

### 2.2.2.2 การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์สำหรับปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน<sup>[5]</sup>

ตัวเร่งปฏิกิริยาในวิวิธพันธ์มีข้อได้เปรียบตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ในด้านการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์จึงมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ และตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์มีความสามารถนำกลับมาใช้ใหม่เพราะไม่ละลายระหว่างการทำปฏิกิริยา

ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ที่นิยมใช้ในการผลิตไบโอดีเซลคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารประกอบโลหะแอลคาไลน์ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารประกอบโลหะแอลคาไลน์เอิร์ท ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสเอมไซด์ และตัวเร่งปฏิกิริยาจากวัสดุขยะ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้ จะมีสมบัติเฉพาะตัวแตกต่างกันไป เช่น สมบัติในเชิงกายภาพในด้านปริมาณพื้นที่ผิวต่อน้ำหนัก ลักษณะของรูพรุน รูปร่างและขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยา ลักษณะสัณฐานของพื้นผิวและคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ หรือสมบัติในเชิงเคมีเช่น สมบัติความเป็นกรดหรือเบส ไฮโดรโฟบิกหรือไฮโดรฟิลิก ความทนต่อการชะละลาย ความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่และเสถียรภาพทางความร้อน ซึ่งสมบัติเหล่านี้ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาและลักษณะของเตาปฏิกรณ์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน

### 2.2.2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยากรดวิวิธพันธ์

ตัวเร่งปฏิกิริยากรดวิวิธพันธ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถใช้งานได้ดีในน้ำมันพืชที่มีกรดไขมันและน้ำเจือปนสูง เนื่องจากสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ทั้งปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันและปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน ซึ่งลักษณะทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยากรดจะเป็นการที่ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถให้โปรตอนหรือรับคู่อิเล็กตรอนของสารอื่น โดยตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยากรดวิวิธพันธ์ คือ ซีโอไลต์ กรดกลุ่มซันโฟนิค โลหะออกไซด์ผสม กรดเฮเทอโรโพลีและพอลิออกโซเมทัลเลต เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม ตัวเร่งปฏิกิริยากรดไม่เป็นที่นิยมเพราะอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำและมีปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้น

#### 2.2.2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสวិวิพันธ์

ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสวิวิพันธ์มีการใช้งานแพร่หลายกว่าตัวเร่งปฏิกิริยากรดวิวิพันธ์ เนื่องจากมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาที่สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยากรด ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเบสสามารถทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำ ใช้เวลาน้อย และใช้ความดันต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยากรด โดยชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้คือ สารประกอบโลหะแอลคาไลน์ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารประกอบโลหะแอลคาไลน์เอิร์ท ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสเอมไซด์ นอกจากนี้ วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจะส่งผลอย่างมากต่อความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากส่งผลต่อลักษณะสัณฐานของพื้นผิวและลักษณะบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา<sup>[18]</sup>

ในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สมบัติเป็นเบส กลไกการทำปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเมื่อเมทานอลทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาและสร้างเป็นหมู่เมทอกไซด์ก่อนที่จะทำปฏิกิริยาต่อไปเป็น FAME ดังนั้นคุณสมบัติที่จำเป็นสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาในตระกูลนี้ คือค่าความเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สูง ซึ่งจะส่งผลให้การสร้างหมู่เมทอกไซด์กับเมทานอลทำได้ง่ายและสามารถทำปฏิกิริยาได้เร็ว โดยตัวเร่งปฏิกิริยาตระกูลนี้ได้รับความนิยมสูงสุดคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาในตระกูลแอลคาไลน์เอิร์ท เนื่องจากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูง และค่อนข้างทนต่อการชะล้าง

ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Sung Jin Yoo<sup>[19]</sup> เปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยา 5 ชนิด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาเซอร์โคเนียมออกไซด์ ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมออกไซด์ ตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์ออกไซด์ ซึ่งอยู่ในกลุ่มตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ของโลหะทรานซิชัน และตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ กับตัวเร่งปฏิกิริยาสตรอนเชียมออกไซด์ ซึ่งอยู่ในกลุ่มตัวเร่งปฏิกิริยาแอลคาไลน์เอิร์ท ผลการทดลองพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มแอลคาไลน์เอิร์ท สามารถทำปฏิกิริยาได้ไวกว่ามาก โดยตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์และตัวเร่งปฏิกิริยาสตรอนเชียมออกไซด์ สามารถทำปฏิกิริยาได้ร้อยละผลได้ของ FAME สูงกว่าร้อยละ 95 ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสภายในระยะเวลา 10 นาที เมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์ออกไซด์ จะทำปฏิกิริยาได้ร้อยละผลได้ของ FAME ต่ำกว่า 60 ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมออกไซด์ จะทำปฏิกิริยาได้ร้อยละผลได้ของ FAME ต่ำกว่าร้อยละ 20 และตัวเร่งปฏิกิริยาเซอร์โคเนียมออกไซด์ จะทำปฏิกิริยาได้ร้อยละผลได้ของ FAME ต่ำกว่าร้อยละ 10 ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาในตระกูลแอลคาไลน์เอิร์ทสามารถทำปฏิกิริยาได้ไวกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาในตระกูลตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ของโลหะทรานซิชันมาก

และเมื่อทดสอบคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์และสตรอนเชียมออกไซด์ มีความเป็นเบสสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาในตระกูลโลหะทรานซิชัน แต่อย่างไรก็ตาม สตรอนเชียมมีปัญหาเรื่องการชะล้าง เนื่องจากไม่ทนต่อการละลายของแอลกอฮอล์ ดังนั้น แคลเซียมออกไซด์จึงเป็นตัวที่เหมาะสมและได้รับความนิยมสูงสุดที่สุดในตอนนี้

แต่อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยของ Kristaps Malins<sup>[20]</sup> ได้ทำการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาในตระกูลเกลือที่มีคุณสมบัติเป็นเบส ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมฟอสเฟต ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต และตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต ผลการทดลองพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนตถูกชะล้างไปมากกว่าร้อยละ 80 โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมฟอสเฟตถูกชะล้างไปมากกว่าร้อยละ 60 โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ถูกชะล้างเข้าไปในสารที่ทำปฏิกิริยาทั้งหมด มีแค่ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตและตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนตที่มีการชะล้างต่ำมาก ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตและตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนตจึงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีศักยภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวีวพันธ์ และเมื่อเทียบความว่องไวในการทำปฏิกิริยา พบว่าโซเดียมฟอสเฟตสามารถทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ได้ร้อยละของ FAME สูงกว่าร้อยละ 60 ภายในระยะเวลา 30 นาที ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต ต้องใช้เวลามากกว่า 120 นาที เพื่อให้ได้ร้อยละของ FAME สูงกว่าร้อยละ 60 ดังนั้น ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตจึงมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยามากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต นอกจากนี้ ในการทดลองของ K. Thinnakorn<sup>[6]</sup> พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตมีความเป็นเบสสูงกว่าแคลเซียมออกไซด์ โดยมีค่าความเป็นเบสเทียบเท่ากับตัวเร่งปฏิกิริยาสตรอนเชียมออกไซด์

และเมื่อดูผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต ในงานวิจัยของ S. T. Jiang<sup>[21]</sup> ได้ทำการเทียบผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตในการทำปฏิกิริยา โดยพบว่าโซเดียมฟอสเฟตสามารถทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ได้ร้อยละของไบโอดีเซลถึง 94.9 ในระยะเวลาแค่ 20 นาที ซึ่งมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นๆ ส่วนในการทดลองของ K. Thinnakorn พบว่าโซเดียมฟอสเฟตสามารถทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 18:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนักน้ำมัน อุณหภูมิที่ทำการทดลอง 210 องศาเซลเซียส ได้ร้อยละของ FAME สูงกว่าร้อยละ 96 ภายในระยะเวลา 30 นาที และยังพบว่าสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ 5 รอบ โดยไม่จำเป็นต้องผ่านการกระตุ้นใหม่<sup>[6]</sup> ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต ถือว่าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีศักยภาพในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันตัวหนึ่ง

### 2.2.3 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต

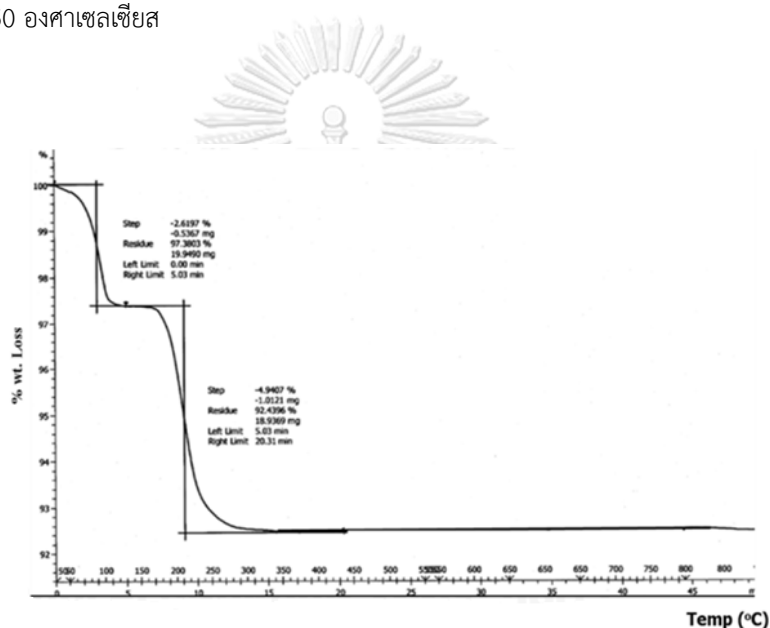
ในงานวิจัยของ P. D Filipe<sup>[22]</sup> ได้ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตในรูป  $\text{Na}_3\text{PO}_4$   $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$  มาทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันที่ โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ไปทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง พบว่าร้อยละของ FAME เท่ากับ 82.4 65.3 และ 7.0 ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  มีความว่องไวกว่าโซเดียมฟอสเฟตในรูป  $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$  และในการศึกษาของ Jiang และคณะ<sup>[21]</sup> ได้ทดลองทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตในรูป  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  และ  $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองสามารถทำปฏิกิริยาจนถึงสมดุลของปฏิกิริยาภายใน 2 ชั่วโมงได้เหมือนกัน แต่ร้อยละผลได้ของ FAME ต่างกัน ซึ่งเท่ากับ 99.7 และ 71.3 ตามลำดับ โดยคาดว่าเกิดจากปฏิกิริยาปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันเพราะการรบกวนของน้ำ

K. Thinnakorn<sup>[6]</sup> ได้ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต โดยได้นำตัวเร่งปฏิกิริยาในรูป  $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  ผ่านการทำวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ Thermal Gravimetric Analysis (TGA) เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำแคลไซด์ จากนั้นทำการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตก่อนและหลังการทำแคลไซด์ ด้วยวิธีวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาจากวิธีเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน วิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจากวิธี Brunaurx10-Emmett-Teller (BET) และวัดค่าความเป็นเบสด้วยวิธีแอมเมตต์ โดยได้ผลการศึกษาดังนี้



### 2.2.3.1 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตโดยเครื่องมือวิเคราะห์ด้วยวิธี Thermal Gravimetric Analysis (TGA)

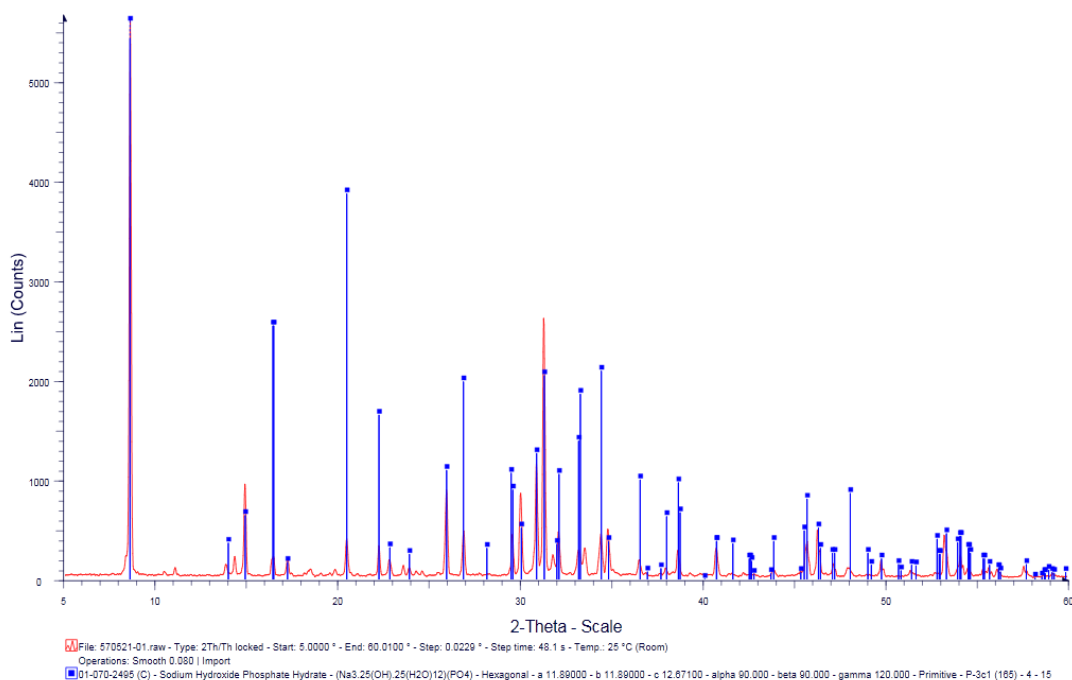
เมื่อนำ  $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  ที่ผ่านการอบแห้งที่ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง มาทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ TGA พบว่า โซเดียมฟอสเฟตเกิดการสูญเสียน้ำหนักสองช่วง โดยในช่วงแรกเกิดขึ้นที่ 60-150 องศาเซลเซียส และช่วงที่สองเกิดขึ้นที่ 150-450 องศาเซลเซียส และหลังจากอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตไม่เปลี่ยนแปลง โดยน้ำหนักที่สูญเสียไปทั้งหมดคิดเป็นร้อยละ 7.55 ซึ่งเป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ในตัวเร่งปฏิกิริยา จากผลของ TGA ทำให้ทราบได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาควรทำการแคลไซด์อุณหภูมิขั้นต่ำ 450 องศาเซลเซียส



รูปที่ 1 ผลการวิเคราะห์ด้วย TGA ของโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านการอบไล่น้ำ<sup>[6]</sup>

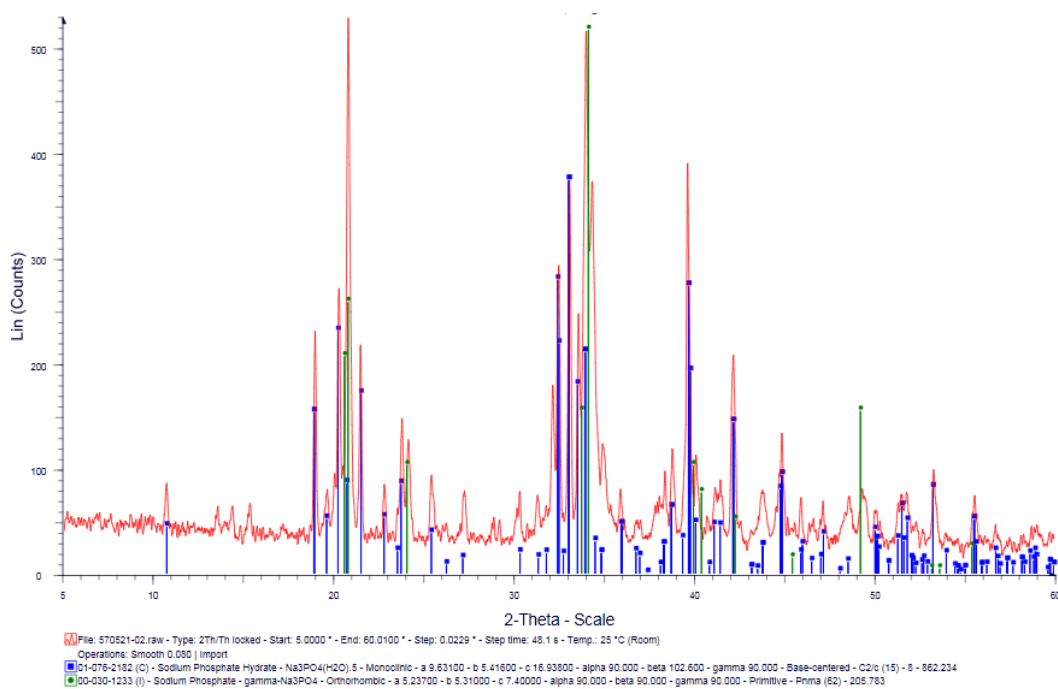
### 2.2.3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction)

การวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตก่อนและหลังการทำแคลไซด์ ทำโดยใช้วิธี X - Ray Diffraction ของโซเดียมโดดีคาไฮเดรต ( $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างเป็นแบบเฮกซะโกนอล



รูปที่ 2 ผลวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์  
ของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมโดดีคาไฮเดรต (■) เฮกซะโกนอล<sup>[6]</sup>

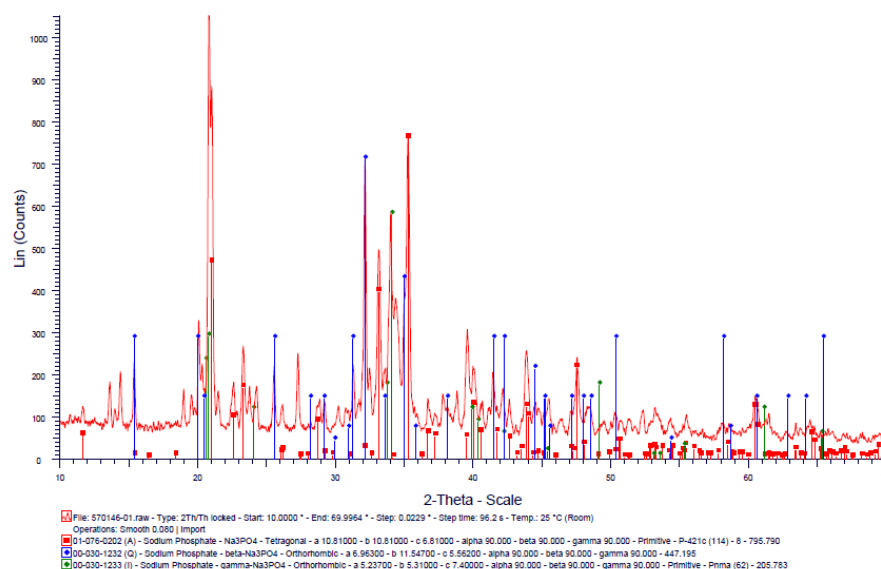
ผลวิเคราะห์ XRD ของ  $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  ที่ผ่านการอบแห้งที่ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าโครงสร้างของโซเดียมฟอสเฟตจะเปลี่ยนไปเป็นผลึกแบบโมโนคลินิก และมีโครงสร้างเกิดขึ้นใหม่คือโซเดียมฟอสเฟตแกมมา-ออร์โธโรมบิก



รูปที่ 3 ผลวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา

โซเดียมโดดีคาไฮเดรตที่ผ่านการอบน้ำ (■) โมโนคลินิก (●) แกมมา-ออร์โธโรมบิก<sup>[6]</sup>

โดยผลวิเคราะห์ XRD ของโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านการแคลไซด์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง โครงสร้างของผลึกแบบโมโนคลินิกจะเปลี่ยนไปเป็นผลึกแบบเตตระโกนอลกับโครงสร้างผลึกแบบเบตาออร์โธโรมบิก ส่วนโครงสร้างโซเดียมฟอสเฟตแกมมา-ออร์โธโรมบิกจะไม่เปลี่ยนแปลง

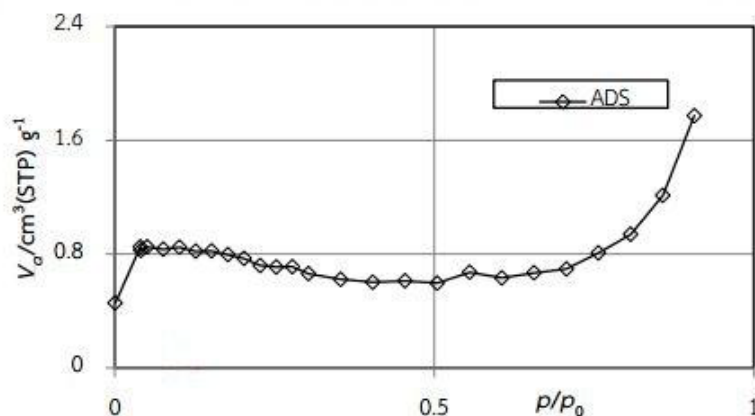


รูปที่ 4 ผลวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านการแคลไซด์ (■) เตตระโกนอล (◆)เบตาออร์โธโรมบิก (●) แกมมา-ออร์โธโรมบิก<sup>[6]</sup>



### 2.2.3.3 BET surface area and basic strength

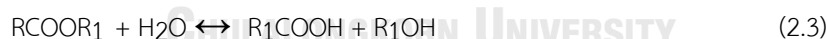
ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตหลังทำแคลไซด์และโซเดียมฟอสเฟตหลังอบแห้ง พบว่าโซเดียมฟอสเฟตหลังผ่านการทำแคลไซด์มีพื้นที่ผิว 1.76 ตารางเมตรต่อกรัม และไม่มีรูพรุนภายในตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตหลังอบแห้ง พบว่ามีพื้นที่ผิวดำจนไม่สามารถวัดค่าได้ ส่วนความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนและหลังการทำแคลไซด์ให้ค่าความเป็นเบสอยู่ในช่วง  $15 < H_- < 18.4$



รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์ด้วย BET ของโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านการแคลไซด์<sup>[6]</sup>

### 2.2.4 ปฏิกิริยาข้างเคียงที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบส

ปฏิกิริยาข้างเคียงของการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส จะเกิดขึ้นเมื่อในสารตั้งต้นมีน้ำหรือกรดไขมันเจือปน โดยน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระหว่างน้ำกับน้ำมันพืช ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดไขมันอิสระตามสมการที่ 2.3



ส่วนกรดไขมันจะทำปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันอิสระกับตัวเร่งปฏิกิริยาเบส โดยมีผลิตภัณฑ์เป็นสบู่ ดังที่แสดงในสมการที่ 2.4



## 2.3 การศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสวិวิพันธ์

สภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน จะส่งอิทธิพลต่อ ลักษณะ พฤติกรรม ร้อยละสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ และอัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรต่างๆสามารถสรุปรวมได้ดังนี้

### 2.3.1 ผลกระทบของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

ผลกระทบของอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาเป็นปัจจัยหลักในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน ซึ่งการเปลี่ยนสภาวะของอุณหภูมิจะส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันอย่างสิ้นเชิง เนื่องจากเป็นการเปลี่ยนค่าการละลายตัวของเมทานอลและน้ำมันพืช ร้อยละสุดท้ายของผลิตภัณฑ์จากสมดุลของเทอร์โมไดนามิกส์ และอัตราการเกิดปฏิกิริยาเชิงเคมีจากกฎของอาร์เรเนียส นอกจากนี้ยังสามารถเปลี่ยนขั้นกำหนดอัตราซึ่งเป็นขั้นของการเกิดปฏิกิริยาในขั้นที่ช้าที่สุด ซึ่งควบคุมพฤติกรรมของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน

S. T. Jiang<sup>[21]</sup> ได้ทดลองเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็น 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโซเดียมฟอสเฟต ใช้สารตั้งต้นเป็นน้ำมันเมล็ดเรพและเมทานอล อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 ความเร็วในการปั่นกววนเท่ากับ 400 รอบต่อนาที ร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันน้ำมันพืชเท่ากับ 3 ผลการทดลองหลังจากปล่อยให้ทำปฏิกิริยาไปเป็นเวลา 60 นาที พบว่าปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลที่ร้อยละผลได้ของ FAME เท่ากับ 97.9 97.1 และ 93.4 ที่อุณหภูมิ 80 70 และ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการทดลองไม่เป็นไปตามทฤษฎีของเทอร์โมไดนามิกส์ โดย S. T. Jiang ได้อธิบายไว้ว่าปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะสมดุลของปฏิกิริยาควรที่จะเลื่อนไปทางฝั่งสารตั้งต้นมาก ดังนั้น S. T. Jiang ยังไม่สามารถระบุได้ว่าเหตุผลของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในงานวิจัยฉบับนี้ได้

ในการศึกษาปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยารววิพันธ์มีข้อเสียในการทำปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ช้า โดยหนึ่งในวิธีที่สามารถช่วยให้ปฏิกิริยาสามารถเกิดได้เร็วขึ้น คือการเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาจะช่วยให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเชิงเคมีเกิดได้เร็วขึ้นตามกฎของอาร์เรเนียส และนอกจากนี้การเพิ่มของอุณหภูมิสามารถทำให้วัฏภาคของน้ำมันพืชและเมทานอลละลายเข้าด้วยกันได้มากขึ้น<sup>[23]</sup> นอกจากนี้หากเพิ่มอุณหภูมิและความดันขึ้นไปสูงกว่าจุดวิกฤติของเมทานอล จะส่งผลให้เมทานอลเปลี่ยนพฤติกรรมเป็นแก๊ส และไม่มีผลกระทบของปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลข้ามวัฏภาคอีกต่อไป

นอกจากการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันในตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต ได้มีการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อการทำปฏิกิริยาในตัวเร่งปฏิกิริยารววิพันธ์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นแคลเซียมออกไซด์ในงานวิจัยของ Ivana Lukic' และคณะ<sup>[23]</sup> โดยพบว่าลักษณะการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันที่อุณหภูมิต่ำกว่า 84 องศาเซลเซียส ช่วงต้นของการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ช้าโดยเป็นกราฟแบบซิกมอยด์เนื่องจากอัตราการถ่ายเทมวลต่ำ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นมาเป็น 96 องศาเซลเซียส ลักษณะกราฟแบบซิกมอยด์จะหายไป เนื่องจากค่าการละลายจะเพิ่มเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งจะทำให้วัฏภาคของเมทานอลและวัฏภาคของ

น้ำมันพืชละลายเข้าด้วยกันได้ง่ายขึ้น โดยการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 96 องศาเซลเซียส ซึ่งคาดว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีจะกลายเป็นขั้นตอนที่ควบคุมการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรกแทน

ในการงานวิจัยของ K. Thinnakorn<sup>[6]</sup> ได้ทำการทดลองโดยศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันที่อุณหภูมิสูง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตในรูปแบบผงและแบบฝังบนตัวรองรับอะลูมินา โดยในการศึกษาตัวเร่งในรูปแบบผงได้ทดลองที่อุณหภูมิ 150 170 190 210 230 และ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วในการปั่นกววน 600 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมเลตทานอลต่อน้ำมัน 18:1 ผลการพบว่ายิ่งอุณหภูมิสูงปฏิกิริยาจะสามารถเกิดขึ้นได้ไวขึ้น โดยที่อุณหภูมิเท่ากับ 210 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาเข้าสู่จุดสมดุลภายใน 30 นาที และที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลภายใน 20 นาที แต่อย่างไรก็ตามลักษณะของกลีเซอรอลที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงมีลักษณะดำคล้ำ โดยร้อยละผลได้ FAME ที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 20 นาที ที่อุณหภูมิ 150 170 190 210 230 และ 250 เท่ากับ 17.58 38.11 56.56 71.16 80.11 และ 94.22 ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงกว่า 210 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้คุณภาพของกลีเซอรอลต่ำลง เนื่องจากการเกิดการสลายตัวจากอุณหภูมิสูง

ส่วนในการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปแบบฝังบนตัวรองรับอะลูมินาได้ทดลองที่อุณหภูมิ 190 210 230 และ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วในการปั่นกววน 1000 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมเลตทานอลต่อน้ำมัน 18:1 ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูง ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ก็จะสูงตาม แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงเกิน 210 องศาเซลเซียส พบว่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และการทดลองที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะต่ำกว่าการทดลองที่ 210 องศาเซลเซียสอย่างเห็นได้ชัด และอัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปแบบฝังบนอะลูมินาช้ากว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตในรูปแบบผง โดยร้อยละผลได้ของ FAME ที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 20 นาที ที่อุณหภูมิ 190 210 230 และ 250 องศาเซลเซียส เท่ากับ 28.67 71.36 73.08 และ 77.34 ตามลำดับ โดยในงานวิจัยของ S. T. Jiang ได้อธิบายไว้ว่าปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นได้อธิบายพฤติกรรมของการเกิดปฏิกิริยาว่าการเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้ร้อยละของการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้มากขึ้น ไม่ได้เกิดจากการเลื่อนสมดุลการเกิดปฏิกิริยา แต่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลให้เมทานอลกับน้ำมันละลายเข้าด้วยกันได้มากขึ้นทำให้ร้อยละผลได้ FAME สูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ

ดังนั้นข้อสรุปทั้งหมดจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจึงสามารถสรุปได้ว่า การเพิ่มของอุณหภูมิจะช่วยทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันเกิดขึ้นได้เร็วขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอัตราการถ่ายเทมวลและอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นช่วยให้วัฏภาคเมทานอลกับวัฏภาคของเมทานอลและน้ำมันสามารถละลายเข้าด้วยกันได้มากขึ้น โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิริทพันธ์เป็นโซเดียมฟอสเฟตและไม่ส่งผลให้กลีเซอรอลสลายตัว เท่ากับ 190 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงร้อยละ 1 โดยน้ำหนักน้ำมันพืชเท่านั้น

### 2.3.2 ผลกระทบของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลการทดลองการเปลี่ยนปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในงานวิจัยของ K. Thinnakorn<sup>[6]</sup> ตั้งแต่ร้อยละ 0.5 ถึง 4 โดยน้ำหนักน้ำมัน อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 6:1 พบว่าที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับร้อยละ 0.5 ต่อน้ำมันน้ำมันพืช ร้อยละผลได้ของ FAME ต่ำกว่าร้อยละ 10 เมื่อเวลาผ่านไปมากกว่า 240 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับร้อยละ 2.0 ต่อน้ำมันน้ำมันพืช ร้อยละผลได้ของ FAME สูงกว่าร้อยละ 80 เมื่อเวลาผ่านไปมากกว่า 210 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับร้อยละ 4.0 ต่อน้ำมันน้ำมันพืช ร้อยละผลได้ของ FAME สูงกว่าร้อยละ 90 เมื่อเวลาผ่านไป 120 นาที ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งคาดว่าเกิดจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ตำแหน่งว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับร้อยละ 4.0 ต่อน้ำมันน้ำมันพืชเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุด

ในงานวิจัยของ P.D. Filippis<sup>[22]</sup> ได้ศึกษาผลของการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างน้ำมันเมล็ดเรพกับเมทานอล ที่อุณหภูมิเท่ากับจุดเดือดของเมทานอล และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่า 6:1 ใช้วิธีปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก ขนาดเตาปฏิกรณ์เท่ากับ 250 มิลลิลิตร อัตราส่วนโดยโมลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันเท่ากับ 0.04 0.06 และ 0.2 โดยพบว่าการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต จะช่วยให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดได้เร็วที่สุด คืออัตราส่วนโดยโมลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 0.2

ในงานวิจัยของ S. T. Jiang<sup>[21]</sup> ได้ศึกษาผลกระทบของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตต่อการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ระหว่างน้ำมันเมล็ดเรพและเมทานอล โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 6:1 ความเร็วในการปั่นกวนเท่ากับ 400 รอบต่อนาที และร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันน้ำมันพืชเท่ากับ 2 3 และ 4 ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าลักษณะการเกิดปฏิกิริยาของการทดลองทั้งสามคล้ายกัน โดยลักษณะการเกิดปฏิกิริยาสามารถแบ่งเป็นสามช่วง ในช่วงแรกร้อยละผลได้ของ FAME จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายใน 20 นาที ในช่วงที่สองร้อยละผลได้ของ FAME จะเกิดช้ากว่าช่วงแรก โดยจะกินระยะเวลาประมาณ 60 นาที และช่วงสุดท้าย หลัง 80 นาที ปฏิกิริยาจะเกือบเข้าสู่จุดสมดุล ทำให้ร้อยละผลได้ของ FAME จะเกิดขึ้นได้ช้ามากๆ ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรกและช่วงที่สอง จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ในช่วงสุดท้ายพบว่าความแตกต่างของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยร้อยละผลได้ของ FAME ในนาทีที่ 80 เท่ากับ 94.7 95.2 และ 97.5 ตามลำดับ

ในงานวิจัยของ Vlada B. Veljkovic และคณะ ในปี 2009<sup>[24]</sup> ได้ทดลองการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างน้ำมันทานตะวันกับเมทานอล โดยตัวเร่งปฏิกิริยามีวิธีพ่นเป็นแคลเซียมออกไซด์ โดยทำปฏิกิริยาที่ 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันโดยโมลเท่ากับ 6:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ต่อน้ำมันร้อยละ 1-10 โดยน้ำหนักน้ำมัน ปริมาตรเตาปฏิกรณ์เท่ากับ 250 มิลลิลิตร ความเร็วในการปั่นกวน 400 รอบต่อนาที พบว่าการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสามารถเกิดได้เร็วขึ้น แต่เมื่อเพิ่มไปมากกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะประมาณคงเดิม และนอกจากนี้ ในงานวิจัยนี้ได้



อธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่ลักษณะการเกิดปฏิกิริยาแบบซิกมอยด์ หรือการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรกเกิดได้ช้า และค่อยๆเกิดเร็วขึ้นเมื่อมีผลิตภัณฑ์เกิดขึ้น ซึ่งคาดว่าเกิดจากปรากฏการณ์การถ่ายเทมวล โดยผลของการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยลดปรากฏการณ์การเกิดปฏิกิริยาแบบซิกมอยด์นี้

ในงานวิจัยของ Vinich Promarak (2016)<sup>[7]</sup> ได้ศึกษาการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันจากตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่สกัดจากเปลือกหอย โดยได้ศึกษาผลของการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 6:1 ร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 1-7 โดยน้ำหนักน้ำมัน ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจะเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา แต่ไม่ช่วยเปลี่ยนสมมูลการเกิดปฏิกิริยา และการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไปมากกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนักน้ำมัน พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะไม่สามารถเกิดได้เร็วขึ้น โดยคาดว่าเป็นเพราะผลกระทบของปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลเป็นตัวควบคุม

ในการศึกษาถึงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในสถานะอุณหภูมิสูง K. Thinnakorn<sup>[6]</sup> ได้ศึกษาผลกระทบของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตในรูปแบบผงและแบบฝังบนตัวรองรับอะลูมินา และแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง โดยในการทดลองในตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปแบบผงและไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส อัตราการปั่นกววน 600 รอบต่อนาที อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 18:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตเท่ากับร้อยละ 0.0-1.0 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มสูงขึ้นตาม และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดเท่ากับร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช ส่วนในการทดลองที่ไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาเลย ร้อยละผลได้ของ FAME เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้ การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจะไม่ส่งผลใดๆต่อร้อยละผลได้ของ FAME ที่จุดสมดุล และในการทดลองในตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปแบบฝังบนตัวรองรับอะลูมินา ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส อัตราการปั่นกววน 1000 รอบต่อนาที อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 18:1 ร้อยละโดยน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 0.0-2.0 ผลการทดลองพบว่าคล้ายกับการทดลองในรูปแบบผง โดยการเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้น แต่การทดลองในชุดนี้เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นไปมากกว่าร้อยละ 0.5 อัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงท้ายเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ข้อสรุปจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถสรุปได้ว่า การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันเกิดขึ้นได้ไวขึ้น เพราะเป็นการเพิ่มพื้นที่ของตำแหน่งว่างในการเกิดปฏิกิริยาและเป็นช่วยลดปัญหาการถ่ายเทมวล<sup>[24]</sup> และลักษณะของกราฟแบบซิกมอยด์จะลดลง นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ช่วยเพิ่มร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่จุดสมดุล โดยสำหรับการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง ไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่สูง หรือเท่ากับร้อยละ 1 ก็เพียงพอในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน

### 2.3.3 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน

S. T. Jiang และคณะ<sup>[21]</sup> ได้ทดลองทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต โดยเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 9:1 และ 12:1 สารตั้งต้นเป็นน้ำมันเมล็ดเรพและเมทานอล ความเร็วในการป้อนเท่ากับ 400 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับร้อยละ 3 ต่อน้ำมัน น้ำมัน ผลการทดลองหลังจากปล่อยให้ทำปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุล พบว่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 6:1 และ 12:1 เท่ากับร้อยละ 94.9 และ 99.3 ตามลำดับ โดยได้อธิบายไว้ว่าเกิดจากการเลื่อนของสมดุลของปฏิกิริยาผันกลับได้ไปทางฝั่งผลิตภัณฑ์เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของเมทานอล

K. Thinnakorn<sup>[6]</sup> ได้ทำการทดลองโดยศึกษาผลของการเปลี่ยนอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มโดยทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันที่อุณหภูมิสูง ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตในรูปแบบผงและแบบฝังบนตัวรองรับอะลูมินา โดยในการศึกษาตัวเร่งในรูปแบบผงได้ทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 3:1 6:1 12:1 18:1 24:1 และ 30:1 อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ความเร็วในการป้อน 600 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมัน ผลการทดลองพบว่าที่อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันพีชที่ 3:1 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่จุดสมดุลเท่ากับ 60 แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเมทานอลไปเป็น 6:1 ถึง 30:1 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 98.3 แต่อย่างไรก็ตาม อัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันจะเกิดขึ้นไวขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 ถึง 18:1 เท่านั้น หากเพิ่มอัตราส่วนของเมทานอลไปเป็น 24:1 และ 30:1 จะพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยได้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นไว้ว่า ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ ดังนั้นการเพิ่มปริมาณเมทานอลเข้าไปจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นไปทางฝั่งผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้น แต่การเพิ่มปริมาณเมทานอลเข้าไปจนมากเกินไปจะไม่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากการทำปฏิกิริยาสามัญภาค ดังนั้นตัวแปรที่สำคัญคือปรากฏการณ์การแพร่ข้ามวัฏภาคของวัฏภาคของไหลในระบบ

ข้อสรุปที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลการเพิ่มของอัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมัน คืออัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของเมทานอลจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ไวขึ้น และทำให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่จุดสมดุลเกิดได้มากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มปริมาณสารตั้งต้นเข้าไปในการเกิดปฏิกิริยาแบบผันกลับได้

## 2.4. การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน

ในงานวิจัยของ Vinich Promarak ในปี 2016<sup>[7]</sup> ในปี 2016 ได้ทำการศึกษาถึงจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 12:1 โดยสมการทางจลนพลศาสตร์ดังนี้

$$r_a = \frac{-d[TG]}{dt} = k'[TG][MeOH]^3$$

โดย  $r_a$  คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน

$[TG]$  คือ ความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งสามารถคำนวณจากร้อยละโดยน้ำหนักของแพตตีเอซิดเมทิลเอสเทอร์

$[MeOH]$  คือ ความเข้มข้นของเมทานอลในหน่วยโมลต่อลิตร โดยสมมุติฐานว่าเป็นค่าคงที่เนื่องจากใช้เมทานอลในการทำปฏิกิริยาเกินปริมาณสารสัมพันธ์

$k'$  คือ ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา

เนื่องจาก  $[MeOH]$  และ  $k'$  เป็นค่าคงที่ จึงสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$r_a = \frac{-d[TG]}{dt} = k[TG]$$

$$-\ln[TG]_t = kt$$

และเนื่องจาก  $[TG]$  คำนวณจากร้อยละโดยน้ำหนักของแพตตีเอซิดเมทิลเอสเทอร์ จึงสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$[TG]_t = 1 - X_{ME}, X_{ME} = \frac{\%FAME}{100}$$

$$-\ln[1 - X_{ME}] = kt$$

ดังนั้นสมการเกิดปฏิกิริยาสามารถสร้างได้จากการสร้างกราฟระหว่าง  $\ln[1 - X_{ME}]$  และเวลา

โดยผลการทดลองพบว่าสามารถใช้โมเดลแบบเสมือนปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ในการอธิบายการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันได้ โดยและพบว่าลำดับการผสมตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ใส่ไว้ในเมทานอลจะทำให้ค่าคงที่อัตราสูงกว่านำแคลเซียมออกไซด์ใส่ไว้ในน้ำมันพืช นอกจากนี้การใช้ตัวทำละลายร่วมยังช่วยเพิ่มค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาให้สูงขึ้น

ในงานวิจัยของ Tarik M. Labib ในปี 2013<sup>[25]</sup> ได้ศึกษาถึงจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันสบู่ดำที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นแคลเซียมออกไซด์ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 9:1 และ 12:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช และได้ตั้งสมมุติฐานการเกิดปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์โดยใช้สมการดังนี้

$$-r_a = \frac{-dC_A}{dt} = kC_A$$

$$-\int_{C_{A0}}^{C_A} dC_A / C_{A0} = k \int_0^t dt$$

$$\ln \left[ \frac{C_A}{C_{A0}} \right] = kt$$

โดย  $r_a$  คืออัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน

$C_A$  คือ ความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งสามารถคำนวณจากร้อยละโดยน้ำหนักของแพตตีเอซิดเมทิลเอสเทอร์

$k$  คือค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา

ผลการทดลองพบว่า โมเดลจลนศาสตร์สามารถอธิบายได้เป็นอย่างดี โดยพบว่าค่า  $r^2$  มีค่ามากกว่า 0.90 ขึ้นไปในทุกการทดลอง และการเพิ่มอุณหภูมิ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช จะเพิ่มค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน

## 2.5 การใช้ตัวทำละลายร่วมในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์

Vlada B. Veljkovic และคณะ (2012)<sup>[26]</sup> ได้ทดลองการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างน้ำมันทานตะวันกับเมทานอล ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์เป็นแคลเซียมออกไซด์ โดยทำปฏิกิริยาที่ 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันโดยโมลเท่ากับ 6:1 ใช้ตัวทำละลายร่วมเป็นเตตระไฮโดรฟูแรนในสัดส่วนต่อน้ำมันน้ำมันพืชเท่ากับ 0 20 30 50 และ 100 ตามลำดับ สัดส่วนโดยน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ต่อน้ำมันร้อยละ 5

ผลการทดลองพบว่าวิฤภาคของของเหลวทั้งหมดเหลือเพียงวิฤภาคเดียวที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และเมื่อเติมเตตระไฮโดรฟูแรนเข้าไปร้อยละ 20 โดยน้ำหนักน้ำมัน ไม่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเตตระไฮโดรฟูแรนเข้าไปเกินร้อยละ 20 ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันเกิดขึ้นได้ช้าลง โดยคาดว่าตัวทำละลายร่วมเจือจางสารตั้งต้นทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ช้าลง แต่อย่างไรก็ตาม Vlada B. Veljkovic ได้สังเกตเห็นว่าการผสมเตตระไฮโดรฟูแรนเข้าไปร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนักน้ำมัน จะส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ไวกว่าการไม่ผสมตัวทำละลายร่วมเลยในช่วงต้นของการเกิดปฏิกิริยา แต่หลังจากนั้น ในการทดลองที่ผสมเตตระไฮโดรฟูแรนเข้าไปร้อยละ 20 โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะใกล้เคียงกับการไม่ผสม และในการทดลองที่ผสมเตตระไฮโดรฟูแรนเข้าไปร้อยละ 30 โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดช้ากว่าและร้อยละผลได้ของ FAME น้อยกว่าการทดลองที่ไม่ผสมเตตระไฮโดรฟูแรน โดยคาดว่าเป็นเพราะตัวทำละลายร่วม ไปเจือจางตัวเร่งปฏิกิริยา

ดังนั้นจึงได้ศึกษาเพิ่มเติม โดยเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาตรคงเดิม และสัดส่วนน้ำหนักตัวทำละลายร่วมต่อน้ำมันน้ำมันพืชเท่ากับร้อยละ 20 ผลการทดลองพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น แต่โดยรวมแล้ว ยังช้ากว่าแบบไม่ใช้ตัวทำละลายร่วม จึงได้ตั้งสมมุติฐานว่าชนิดตัวทำละลายร่วมไม่เหมาะสม และคาดว่าจะไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยา เลยทดลองเปลี่ยนชนิดตัวทำละลายร่วม โดยเทียบผลของตัวทำละลายร่วม เตตระไฮโดรฟูแรน ไดเอทิลอีเทอร์ ไดออกเซน เมทิลเอเทอร์คีโตน ไตรเอทานอลเอมีน นอมอลเฮกเซน และเอทิลอะซีเตท และสัดส่วนตัวทำละลายร่วมต่อน้ำมันน้ำมันพืชที่ร้อยละ 20 โดยผลของการผสมของเตตระไฮโดรฟูแรน ไดออกเซน เมทิลเอเทอร์คีโตน และ ไดเอทิลอีเทอร์ พบว่าวิฤภาคของของเหลวทั้งหมดเหลือเพียงวิฤภาคเดียว แต่นอมอลเฮกเซนและเอทิลอะซีเตทวิฤภาคของของเหลวมีสองวิฤภาคดังเดิม

ผลการทดลองพบว่าเมื่อผ่านไป 4 ชั่วโมง ร้อยละผลได้ของ FAME เมื่อผสมกับตัวทำละลายต่างๆ เท่ากับ เตตระไฮโดรฟูแรน – 98.1 ไดเอทิลอีเทอร์ – 88.3, ไดออกเซน – 94.8, เมทิลเอเทอร์คีโตน – 14.7 ไตรเอทานอลเอมีน – 97.9 นอมอลเฮกเซน – 98.8 เอทิลอะซีเตท – 97.1 และไม่ผสมตัวทำละลายเลยเท่ากับ 98.0 ดังนั้นจึงมีเพียง นอมอลเฮกเซนและเตตระไฮโดรฟูแรนเท่านั้นที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น แต่ดีขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่วนไตรเอทานอลเอมีนกับเอทิลอะซีเตทไม่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเมื่อเทียบกับการทดลองที่ไม่ผสมตัวทำละลาย และไดเอทิลอีเทอร์ ไดออกเซน เมทิลเอเทอร์คีโตน ส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดช้าลงแทน โดยในงานวิจัยฉบับนี้ ยังไม่สามารถอธิบายสาเหตุที่แน่ชัดว่าทำไมตัวทำละลายร่วมที่ใช้ได้ไม่ดีในการทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ กลับส่งให้การทำ

ปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์เกิดช้าลง แต่อย่างไรก็ตาม ได้ตั้งสมมุติฐานทิ้งไว้ว่าเกิดจากการตัวทำละลายร่วมที่มีเข้าไปขัดขวางการทำปฏิกิริยาบนตำแหน่งว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยากับตัวทำละลายร่วมไปเจือจางสารตั้งต้น

Martin Hajek (2020)<sup>[27]</sup> ได้ศึกษาผลของตัวทำละลายร่วมชนิดต่างๆ ต่อผลิตภัณฑ์ในวัฏภาคของเอสเทอร์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยได้ทดลองการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันเมล็ดเรพกับเมทานอล และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์เป็น Mg-Al ปริมาณน้ำมันพืช 30 กรัม ปริมาณตัวทำละลายร่วม 12 มิลลิลิตร ปริมาณเมทานอล 32 มิลลิลิตร และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 กรัม ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ความเร็วในการกวนเท่ากับ 300 รอบต่อนาที ทำปฏิกิริยานาน 6 ชั่วโมง และค่อยแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกด้วยวิธีการกรอง จากนั้นแยกเมทานอลออกด้วยวิธีการกลั่นที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความดัน 3 กิโลปาสกาล และค่อยแยกวัฏภาคของกลีเซอรอลและไบโอดีเซลออกจากกัน โดยทิ้งไว้ในกรวยแยก 24 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าร้อยละโดยน้ำหนักของเอสเทอร์ในวัฏภาคเอสเทอร์เท่ากับ 42 สำหรับตัวทำละลายร่วม เตตระไฮโดรฟูแรน 39.5 สำหรับตัวทำละลายร่วม เอทิลอะซิเตตกับ ไดเอทิลอีเทอร์ และ 29.6 สำหรับตัวทำละลายร่วมเฮกเซนกับอะซิโตน เมื่อเทียบกับไม่ใช้ตัวทำละลายร่วม ร้อยละโดยน้ำหนักของเอสเทอร์ในวัฏภาคเอสเทอร์เท่ากับ 72 ซึ่ง Martin Hajek คาดว่าสาเหตุที่เกิดปฏิกิริยาได้น้อยลง เนื่องจากตัวทำละลายร่วมเจือจางสารตั้งต้น กับการที่ตัวทำละลายร่วมสร้างพันธะกับตำแหน่งว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน

Vinich Promarak และคณะ (2016)<sup>[7]</sup> ได้ศึกษาการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันจากตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่สกัดจากเปลือกหอย กับผลของการใช้ตัวทำละลายเป็นเตตระไฮโดรฟูแรน อะซิโตน 2-โพรพานอล 1-โพรพานอล เอทานอลและเอทิลไกลคอล โดยในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการใช้ตัวทำละลายร่วม ใช้อัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 12:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์เป็นแคลเซียมออกไซด์ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช ปริมาณตัวทำละลายร่วมร้อยละ 5 และ 10 โดยปริมาตรของเมทานอล ผลการทดลองเมื่อเวลาทำปฏิกิริยาผ่านไป 90 นาที ร้อยละผลได้ของ FAME เกิดขึ้นร้อยละ 63.93 เมื่อไม่ใช้ตัวทำละลายร่วม และเมื่อใช้ตัวทำละลายร่วมเป็น เตตระไฮโดรฟูแรน อะซิโตน 2-โพรพานอล 1-โพรพานอล เอทานอล และเอทิลไกลคอล ร้อยละ 5 โดยปริมาตรของเมทานอล พบว่าร้อยละผลได้ของ FAME เท่ากับ 93.53 70.17 81.63 93.46 94.44 62.50 และ 83.33 และเมื่อใช้ตัวทำละลายร่วมร้อยละ 10 โดยร้อยละผลได้ของ FAME เท่ากับ 95.03 90.23 88.44 94.44 75.47 และ 80.60 ตามลำดับ

เมื่อเรียงลำดับความสามารถของทำละลายร่วมในการช่วยทำให้ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันจะสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ เตตระไฮโดรฟูแรน > 1-โพรพานอล > 2-โพรพานอล > อะซิโตน > เอทานอล > เอทิลไกลคอล โดยผลการทดลองที่ใช้ เตตระไฮโดรฟูแรน เป็นตัวทำละลายร่วมร้อยละ 10 พบว่าค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ  $4.09 \times 10^{-2}$  นาที<sup>-1</sup> ซึ่งมากกว่าไม่ใช้ตัวทำละลายร่วมมากกว่า 2 เท่า ( $1.84 \times 10^{-2}$  นาที<sup>-1</sup>) และลดค่าพลังงานก่อกัมมันต์กับเพิ่มค่าแฟกเตอร์ความถี่ จาก 67.60 กิโลจูลต่อโมล และ  $9.87 \times 10^8$  นาที<sup>-1</sup> เป็น 57.79 กิโลจูลต่อโมล และ  $1.17 \times 10^{-7}$  นาที<sup>-1</sup>

ต่อมา Zoran B. Todorovic และคณะ (2019)<sup>[28]</sup> ได้ทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างน้ำมันทานตะวันกับเมทานอล โดยตัวเร่งปฏิกิริยารวบรวมเป็นแคลเซียมออกไซด์ และใช้ FAME เป็นตัวทำละลายร่วม ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิจุดเดือดของเมทานอลและความดันบรรยากาศ โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology, RSM) ร่วมกับวิธีเซ็นทรัลคอมโพสิต (Central composite design, CCD) ผลการทดลองพบว่าการผสมไบโอดีเซลเข้าไปช่วยทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงต้นเกิดขึ้นได้ดี และสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 7.1:1 ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.74 โมลต่อลิตร โดยร้อยละของเอสเทอร์จากโมเดลเทียบกับผลการทดลองจริงเท่ากับ 99.8 ต่อ 98.9 ตามลำดับ

Ana Paula Soares Dias และคณะ<sup>[9]</sup> ได้ทำการศึกษาการใช้ตัวทำละลายร่วมในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยารวบรวมเป็นสารประกอบแคลเซียม และใช้สารตั้งต้นเป็นน้ำมัน ถั่วเหลืองกับไขมันวัว ชนิดตัวทำละลายร่วมที่ใช้เป็น เอทานอล ไอโซโพรพานอล 1-โพรพานอล ไอโซบิวทานอล อะซิโตน เฮกเซน เมทิลไซโคลเฮกเซนและเตตระไฮโดรฟูราน อัตราส่วนโดยปริมาตรของเมทานอลต่อปริมาตรตัวทำละลายร่วมเท่ากับ 2.8 ผลการทดลองตัวทำละลายร่วม พบว่าเฮกเซนและเมทิลไซโคลเฮกเซนไม่เหมาะสมในการเป็นตัวทำละลายร่วมเนื่องจากไม่ละลายในเมทานอลจึงส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดช้าลงแทน และตัวทำละลายร่วมในตระกูลแอลกอฮอล์ ส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดช้าลง ซึ่งคาดว่าตัวทำละลายร่วมเกิดการดูดซับบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา และเกิดปฏิกิริยาแข่งขันกับเมทานอล ทำให้ตำแหน่งว่างในการทำปฏิกิริยาลดลง ส่วนเตตระไฮโดรฟูรานและอะซิโตนจะไม่ละลายในกลีเซอรอล ซึ่งจะช่วยให้ผลผลิตไปทางผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้น เลยเป็นตัวทำละลายร่วมที่ส่งผลดีในการทำปฏิกิริยา โดยผลการทดลองเมื่อใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 2.5 ชั่วโมง เป็นดังนี้ ในการทดลองที่ไม่ใช้ตัวทำละลายร่วม ได้ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลเท่ากับ 74.5 ในการทดลองที่ใช้ตัวทำละลายร่วมเป็นเมทิลไซโคลเฮกเซน ไอโซบิวทานอล ไอโซโพรพานอล 1-โพรพานอล เอทานอล เฮกเซน อะซิโตน และเตตระไฮโดรฟูราน โดยได้ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลเท่ากับ 58.5 59.9 62.8 65.1 66.1 67.5 76.0 และ 85.3 ตามลำดับ

Yogesh C. Sharma และคณะ<sup>[8]</sup> ได้ทำการศึกษาผลกระทบของตัวทำละลายร่วม ในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสรตรอนเทียมแลนทานัมผสมโลหะออกไซด์ และน้ำมันจากตระคร้อ ใช้ตัวทำละลายร่วมเป็น ไดไอโซโพรพิลอีเทอร์ อะซิโตน เฮกเซน และโทลูอีน ผลการทดลองการเปลี่ยนชนิดตัวทำละลายร่วม โดยทำปฏิกิริยาที่ 65 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 17:1 พบว่าตัวทำละลายร่วมที่ดีที่สุดคือ ไดไอโซโพรพิลอีเทอร์ โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของตัวทำละลายร่วมต่อเมทานอลที่อัตราส่วน 1:1 สามารถทำปฏิกิริยาได้ร้อยละของไบโอดีเซลสูงกว่า 95 เมื่อเทียบกับการทดลองที่ไม่ผสมตัวทำละลายร่วม จะได้ร้อยละของไบโอดีเซลต่ำกว่า 90

และพบว่าสภาวะที่ดีที่สุดในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวทำละลายร่วม คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 14:1 ความเร็วในการปั่นกวนกับ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 40 นาที และใช้อัตราส่วนโดยโมลของไดไอโซโพรพิลอีเทอร์ต่อเมทานอลที่อัตราส่วน 1:1 โดยพบว่าปฏิกิริยาเกิดไบโอดีเซลได้ร้อยละ 96.37

ข้อสรุปที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ตัวทำละลายร่วมในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน คือตัวทำละลายร่วมที่ศักยภาพในการช่วยให้ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันสามารถเกิดได้เร็วขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม มีงานวิจัยบางงานพบว่าตัวทำละลายร่วมส่งผลให้ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันเกิดช้าลง นอกเหนือไปจากนี้ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวทำละลายร่วมโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเบสเอกพันธ์เกือบทั้งหมด เป็นการศึกษาผลกระทบของตัวทำละลายร่วมที่อุณหภูมิต่ำเท่านั้น ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษา ถึงผลกระทบของตัวทำละลายร่วมในสภาวะอุณหภูมิสูง โดยศึกษาเข้าไปถึงผลกระทบของตัวทำละลายร่วม ต่อ พฤติกรรมของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน

## 2.6. การเลือกชนิดของตัวทำละลายร่วมที่ใช้ในการศึกษา

เนื่องจากในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันพืชและเมทานอล จะเป็นการทำปฏิกิริยา สามัญภาคระหว่างภูมิภาคของเมทานอล ภูมิภาคของน้ำมันพืช และภูมิภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งวัตถุประสงค์หลัก ของการใช้ตัวทำละลายร่วมคือการลดผลกระทบของปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลข้ามภูมิภาค แต่อย่างไรก็ตาม ตัว ทำละลายร่วมจำเป็นต้องมีคุณสมบัติอื่นๆ เพื่อความเหมาะสม โดยคุณสมบัติของตัวทำละลายร่วมที่เลือกในงานวิจัย ฉบับนี้เป็นคือ

1. สามารถลดผลกระทบของปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลข้ามภูมิภาค
2. มีความเสถียร และเป็นสารเฉื่อยที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้น ตัวเร่งปฏิกิริยา และผลิตภัณฑ์
3. มีจุดเดือดใกล้เคียงกับเมทานอล เพื่อให้สามารถแยกออกจากผลิตภัณฑ์ ไปพร้อมกับเมทานอล ส่วนเกินเมื่อการทำปฏิกิริยาเสร็จสิ้นได้ง่ายด้วยวิธีการระเหย
4. ราคาถูกและสามารถหาซื้อได้ง่ายในท้องตลาด
5. ไม่เป็นพิษ และไม่กัดกร่อน

ในข้อแรกคือคุณสมบัติหลักของตัวทำละลายร่วม โดยตัวทำละลายร่วมต้องช่วยลดผลกระทบของ ปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลข้ามภูมิภาคในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มโอเลอินและเมทานอล ซึ่งต้องเป็นสารที่สามารถทำให้ภูมิภาคทั้งสองสามารถละลายเข้าด้วยกันได้ง่ายขึ้น โดยสารที่คาดว่าจะส่งผลเช่นนั้น คือสารที่สามารถละลายได้ทั้งในภูมิภาคของน้ำมันปาล์มโอเลอินและภูมิภาคของเมทานอล หรือเป็นสารที่มีขั้วกับไม่มี ขั้วอยู่ในโมเลกุลเดียวกันหรือที่เรียกว่าสารแอมฟิฟิลิก ซึ่งสารที่มีคุณสมบัติดังที่กล่าวมามีด้วยกันหลายชนิด เช่น เต ตระไฮโดรฟูแรน ไดออกเซน เมทิลเอเทอร์ซีโตน ไดเอทิลอีเทอร์ เอทิลอะซีเตท อะซีโตน 1-โพรพานอล 2-โพรพา นอล เอทานอล ไอโซบิวทานอล หรือแม้แต่เมทิลเอสเทอร์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันเอง ฯลฯ



แต่อย่างไรก็ตาม สารในตระกูลของแอลกอฮอล์ เช่น เอทานอล โพรพานอล หรือบิวทานอล สามารถทำปฏิกิริยาข้างเคียงกับน้ำมันพืชและเกิดเป็นสารประกอบเอสเทอร์ชนิดใหม่ ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์การทำปฏิกิริยาทำได้ยากเพราะมีปฏิกิริยาข้างเคียงมาแข่งขัน นอกจากนี้จะลดร้อยละผลได้สุดท้ายของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากสารตั้งต้นถูกใช้ไปในปฏิกิริยาข้างเคียง เพราะฉะนั้นสารในตระกูลของแอลกอฮอล์ทั้งหมดจึงไม่ควรถูกนำมาใช้เป็นตัวทำละลายร่วม

และเมื่อการทำปฏิกิริยาเสร็จสิ้น ตัวทำละลายร่วมจำเป็นต้องแยกออกจากผลิตภัณฑ์เพื่อให้เมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน โดยในกระบวนการแยกผลิตภัณฑ์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ ส่วนมากจำเป็นต้องใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันสูงกว่าค่าปริมาณสารสัมพันธ์มาก ส่งผลให้ต้องมีกระบวนการแยกเมทานอลกลับเข้ามาทำปฏิกิริยาใหม่ นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์มีการละลายเข้าไปในสารที่ทำปฏิกิริยาน้อยมาก ทำให้กระบวนการแยกสารสามารถทำได้ง่ายเพราะไม่จำเป็นต้องออกแบบกระบวนการให้ต้องรับรองการตกผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นตัวทำละลายร่วมที่ใช้ในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน ควรเป็นสารที่มีจุดเดือดใกล้เคียงกับเมทานอลเพื่อให้สามารถป้อนเข้ากระบวนการแยกสาร และนำกลับไปใช้ใหม่พร้อมกับเมทานอล โดยใช้กระบวนการแยกสารอย่างง่ายด้วยวิธีการระเหย

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาเมทิลเอสเทอร์ในการใช้เป็นตัวทำละลายร่วม การใช้เมทิลเอสเทอร์จะทำให้ไม่จำเป็นต้องแยกตัวทำละลายร่วมออกจากผลิตภัณฑ์เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ได้มาตรฐาน เพราะเมทิลเอสเทอร์ที่ใส่เข้าไปเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน แต่อย่างไรก็ตาม การที่เมทิลเอสเทอร์ที่ใช้เป็นตัวทำละลายร่วมไม่สามารถแยกออกจากผลิตภัณฑ์ จะส่งผลกระทบในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของงานวิจัยฉบับนี้ เพราะใช้การวิเคราะห์ถึงร้อยละโดยน้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์เป็นหลัก ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์มีความซับซ้อนขึ้น เพราะจำเป็นต้องบ่งชี้ว่าเมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ เกิดจากเป็นเมทิลเอสเทอร์ที่ใส่ลงไปเพื่อเป็นตัวทำละลายร่วมหรือเป็นเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันคาดว่าเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ การใส่ผลิตภัณฑ์เข้าไปในตอนต้นของการทำปฏิกิริยา อาจทำให้ปฏิกิริยาย้อนกลับส่งผลมากขึ้นและลดร้อยละผลได้สุดท้ายของผลิตภัณฑ์ เพราะฉะนั้นเมทิลเอสเทอร์จึงไม่เหมาะสมในการใช้เป็นตัวทำละลายร่วม

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติที่เหมาะสมทั้งหมด พบว่าสารที่ดีที่สุดในการใช้เป็นตัวทำละลายร่วมคือ เตตระไฮโดรฟิวแรนและอะซิโตน ซึ่งเป็นสารที่สามารถละลายได้ทั้งในวัฏภาคของน้ำมันปาล์มโอเลอินและวัฏภาคของเมทานอล ซึ่งคาดว่าจะช่วยให้วัฏภาคทั้งสองสามารถละลายเข้าด้วยกันได้มากขึ้น ไม่เกิดปฏิกิริยาข้างเคียง มีความเสถียร มีจุดเดือดที่เหมาะสม ไม่เป็นไอที่อุณหภูมิห้อง สามารถแยกไปพร้อมกับเมทานอลได้ด้วยการระเหย และมีความเป็นพิษต่ำ ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้จึงเลือกเตตระไฮโดรฟิวแรนและอะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมที่ใช้ในการทดลอง

### บทที่ 3 การทดลองและการวิเคราะห์

ในบทที่ 3 เป็นการอธิบายในรายละเอียดของการทดลองรวมถึงวิธีวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยรายละเอียดจะถูกแบ่งเป็นหัวข้อหลักดังนี้ สารเคมีที่ใช้ในการทดลองและวิเคราะห์ผล อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ขั้นตอนการทดลอง การวิเคราะห์ผลการทดลอง และการคำนวณที่ใช้ในงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลองทดลองและวิเคราะห์ผล

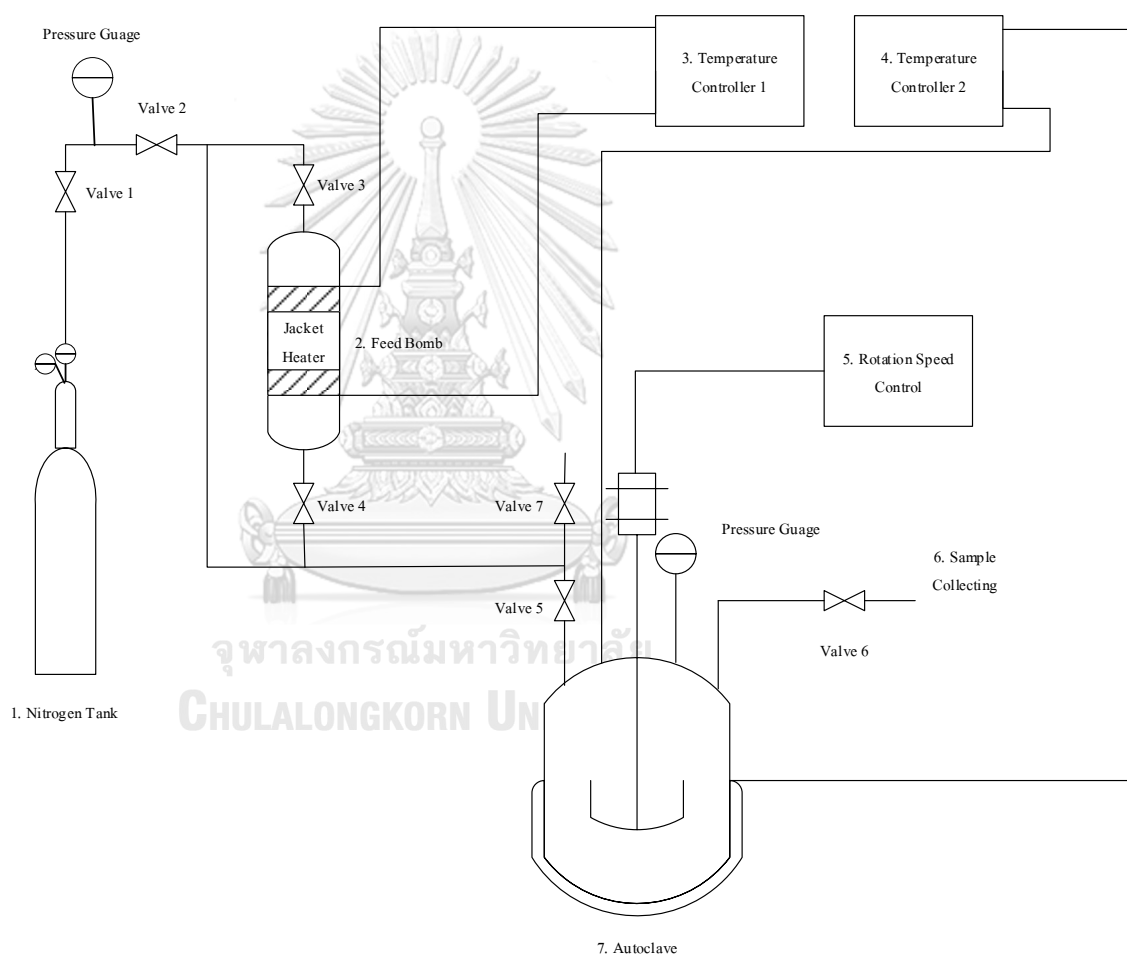
ตารางที่ 1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมี	การใช้งาน	ผู้ผลิต	เกรด/ความบริสุทธิ์
น้ำมันปาล์มโอเลอิน	สารตั้งต้น	โอลีน	เกรดอาหาร
เมทานอล	สารตั้งต้น	-	เกรดอุตสาหกรรม/ 99.9%
โซเดียมฟอสเฟต	ตัวเร่งปฏิกิริยา	-	เกรดอุตสาหกรรม
อะซิโตน	ตัวทำละลายร่วม	-	เกรดสารละลาย
เดตระไฮโดรฟูราน	ตัวทำละลายร่วม	-	เกรดวิเคราะห์
เฮปเทน	แก๊สโครมาโทกราฟี	-	เกรดวิเคราะห์
เมทิลดีแคโนเอท	แก๊สโครมาโทกราฟี	-	เกรดวิเคราะห์
สารมาตรฐานผสมของ เมทิลเอสเทอร์	แก๊สโครมาโทกราฟี	-	เกรดวิเคราะห์
ฟีนอล์ฟทาซีน	ไทเทรต	-	เกรดวิเคราะห์
ไฮโดรคลอริก	ไทเทรต	-	เกรดวิเคราะห์

### 3.2 วิธีการและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.2.1 เตาปฏิกรณ์

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเป็นเตาปฏิกรณ์แบบถังกวนขนาด 2 ลิตร ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม สามารถทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีและการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิและความดันสูง ใบกวนภายในเตาปฏิกรณ์เป็นชนิด Pitched blade turbine 6 ใบพัด จำนวน 1 ชุด โดยเตาปฏิกรณ์จะต่อกับชุดควบคุมอุณหภูมิกับอุปกรณ์ให้ความร้อนเพื่อควบคุมอุณหภูมิภายใน ส่วนความดันภายในเตาปฏิกรณ์จะถูกควบคุมด้วยแก๊สไนโตรเจนเพื่อให้ความดันมีความเสถียร และเตาปฏิกรณ์จะต่อกับถังเก็บสารตั้งต้นสำหรับบรรจุน้ำมันปาล์ม โดยในถังเก็บสารตั้งต้นจะติดตั้งอุปกรณ์ให้ความร้อนและชุดควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 6 เตาปฏิกรณ์สำหรับปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์รีฟิเคชั่น ถังเก็บสารตั้งต้น และอุปกรณ์ควบคุม

### 3.2.2 วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

นำตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตไดไฮดรอกไซด์ ( $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ) มาทำการอบไล่น้ำที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านการอบ ( $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) มาทำการแคลไซด์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 ชั่วโมง

### 3.2.3 วิธีการทดลอง

1. ชั่งน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา น้ำมันพืช และเมทานอลตามสภาวะที่ต้องการศึกษา
2. นำตัวเร่งปฏิกิริยาบรรจุลงในตะกร้าเหล็กไร้สนิม จากนั้นนำไปบรรจุภายในเตาปฏิกรณ์และมัดด้วยลวดเหล็กกล้าไร้สนิม
3. บรรจุเมทานอลเข้าไปในเตาปฏิกรณ์ และประกอบเตาปฏิกรณ์ จากนั้นค่อยๆให้ความร้อนกับเมทานอลด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิที่ต่อกับเตาปฏิกรณ์ จนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่ต้องการ
4. บรรจุน้ำมันพืชเข้าไปในถังเก็บสารตั้งต้น จากนั้นค่อยๆให้ความร้อนกับน้ำมันพืชด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิที่ต่อกับถังเก็บสาร จนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่ต้องการ
5. ปรับความดันภายในถังเก็บสารด้วยไนโตรเจนแก๊ส 800 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จากนั้นเปิดวาล์วหมายเลข 5 เพื่อปล่อยน้ำมันพืชเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ เมื่อเตาปฏิกรณ์มีความดันเท่ากับ 800 ปอนด์ต่อตารางนิ้วแล้ว ปิดวาล์วหมายเลข 5 แล้วเริ่มจับเวลา
6. เก็บตัวอย่างออกจากเตาปฏิกรณ์ด้วยวาล์วหมายเลข 6 ตามเวลา 5 10 15 20 25 30 40 50 60 90 120 180 240 นาที โดยเก็บตัวอย่าง 2 ครั้ง ครั้งแรก 5 มิลลิลิตร และครั้งที่ 3 มิลลิลิตร โดยในหลอดแรกเก็บทั้งเพื่อล้างสารที่ค้างภายในท่อเก็บสาร และหลอดที่สารเก็บเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผล
7. ปิดฝาตัวอย่างที่เก็บได้ในหลอดที่ 2 และนำไปจุ่มลงในน้ำเย็น เพื่อหยุดการเกิดปฏิกิริยา

ตารางที่ 2 สภาวะการทดลอง

สภาวะการทดลอง	
สารตั้งต้น	น้ำมันปาล์มโอเลอิน เมทานอล
ตัวเร่งปฏิกิริยา	โซเดียมฟอสเฟต
ตัวทำละลายร่วม	อะซิโตน เดตระไฮโดรฟูแรน
ปริมาตรรวมของสารในระบบ	800 มิลลิลิตร
ความเร็วรอบในการปั่นกวน	600 รอบต่อนาที
อุณหภูมิ	60-190 องศาเซลเซียส
สัดส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	6:1-30:1 โดยโมลของน้ำมันพืช
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	ร้อยละ 0-1 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช
อัตราส่วนตัวทำละลายร่วมต่อน้ำมันพืช	ร้อยละ 0-20 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช
ความดันในเครื่องปฏิกรณ์	800 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

### 3.2.4 วิธีการเก็บตัวอย่าง

1. เก็บตัวอย่างปริมาตร 5 มิลลิลิตรในชุดเก็บสาร
2. วัดปริมาตรสารที่เก็บได้ในชุดเก็บสาร ด้วยขวดวัดปริมาตร ขนาด 10 มิลลิลิตร และทำการบันทึกปริมาตรและน้ำหนักสารที่เก็บได้
3. ล้างด้วยกรดอะซิติกเจือจางกับน้ำ 1 หยด โดยใช้ความเข้มข้นของอะซิติกร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยน้ำหนักน้ำ
4. ล้างตัวอย่างด้วยน้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร 2 ครั้ง เพื่อกำจัดกลีเซอรอลและเมทานอลส่วนเกินที่เจือปนออก จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 4000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 วินาที จากนั้นแยกวัฏภาคน้ำทิ้ง
5. นำวัฏภาคน้ำมันที่เหลือจากการแยกน้ำ ผ่านโซเดียมซัลเฟตขนาด 2 กรัม เพื่อดูดซับน้ำที่เจือปนในผลิตภัณฑ์ออกที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
6. นำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ด้วยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี

### 3.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยฉบับนี้ จะวิเคราะห์ปริมาณของเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี โดยอธิบายรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 3.4 และการวิเคราะห์ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาถูกชะละลายกับปริมาณกรดไขมันในสารตั้งต้นด้วยวิธีการไทเทรต โดยได้ในอธิบายในหัวข้อ 3.7

### 3.4 การวิเคราะห์ปริมาณ FAME ด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี

#### 3.4.1 รายละเอียดเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีและสภาวะ

ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการล้างและการอบแห้ง จะถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟีโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีรุ่น Variance CP-3800 และคอลัมน์เป็น Polar Capillary (Carbowax) เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.32 มิลลิเมตร ความยาว 30 เมตร ใช้ตัวตรวจวัดแบบ FID (Flame Ionization Detector) และใช้แก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สพาสารเข้าสู่คอลัมน์ที่ความดัน 70 กิโลปาสคาล โดยรายละเอียดสำหรับการวิเคราะห์ FAME และไตรกลีเซอไรด์ การปรับอุณหภูมิคอลัมน์เป็นดังนี้

1. ตั้งอุณหภูมิคอลัมน์ที่ 60 องศาเป็นระยะเวลา 2 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อ นาทีจนถึง 200 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่ม 5 องศาเซลเซียสต่อ นาที จนถึง 370 องศาเซลเซียส และรักษาอุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 7 นาที
2. อุณหภูมิหัวฉีดและตัวตรวจวัด FID (Flame Ionization Detector) เท่ากับ 370 องศาเซลเซียส
3. ปริมาตรที่สารที่ฉีด 1 ไมโครลิตร
4. ความดันไฮโดรเจน 70 กิโลปาสคาล
5. ปริมาตรแก๊สแยกไหล 100 มิลลิลิตรต่อ นาที

### 3.4.2 การเตรียมตัวอย่างในการตรวจ

การวิเคราะห์หาปริมาณของ FAME และไตรกลีเซอไรด์ ทำโดยเตรียมสารละลายสต็อก โดยนำเฮกเซนปริมาณ 250 กรัม ผสมกับเมทิลดีแคโนเอทปริมาณ 12.5 กรัม และการวิเคราะห์สารตัวอย่าง ผสมสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ 100 มิลลิกรัม กับสารละลายสต็อก 1 กรัม

ส่วนการวิเคราะห์สารตั้งต้น องค์ประกอบของน้ำมันพืชจะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี เนื่องจากโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ เป็นสารที่ระเหยได้ยาก และมีความแม่นยำต่ำในการจำแนกชนิดของกรดไขมันโดยตรง อาทิ ไตรกลีเซอไรด์สามารถเกิดได้จาก กรดสเตียริกสองตัวกับกรดสเตียริกหนึ่งตัวหรือกรดสเตียริกสามตัว ซึ่งทำให้การวิเคราะห์รายละเอียดทำได้ยาก ดังนั้นจึงได้นำน้ำมันพืชไปทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันกับเมทานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมเมทิลเลต 2 ครั้ง เพื่อให้เปลี่ยนเป็น FAME ซึ่งสามารถวิเคราะห์และระเหยได้ง่ายขึ้น ส่วนปริมาณกรดไขมันในน้ำมันพืชจะใช้วิธีการไทเทรตดังที่แสดงในข้อ 3.7

### 3.5 การคำนวณที่ใช้ในงานวิจัย

การคำนวณหาร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซลใช้วิธีแฟกเตอร์ตอบสนอง (response factor) โดยการหาค่าของแฟกเตอร์ตอบสนอง ใช้การวิเคราะห์จากการวิเคราะห์สารไบโอดีเซลมาตรฐานซึ่งทราบส่วนผสมแน่นอนของเมทิลเอสเทอร์ชนิดต่างๆที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก. ส่วนการสมการการคำนวณหาร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซลแสดงในสมการที่ 3.1

$$\text{ร้อยละโดยน้ำหนักของสาร} = \left[ \frac{1}{R.F._i} \times \frac{A_i}{A_S} / \left( \frac{m}{m_S} \right) \right] \times 100 \quad (3.1)$$

โดยตัวแปรต่างๆเป็นดังนี้

ตัวแปร  $R.F._i$  คือ ค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของสารที่ต้องการวิเคราะห์

ตัวแปร  $A_i$  คือ พื้นที่ใต้จุดยอดของสารที่ต้องการวิเคราะห์

ตัวแปร  $A_S$  คือ พื้นที่ใต้จุดยอดของสารมาตรฐานที่ต้องการวิเคราะห์

ตัวแปร  $m$  คือ น้ำหนักของสารที่ผสมเข้าไปในการวิเคราะห์

ตัวแปร  $m_S$  คือ น้ำหนักของสารมาตรฐาน

### 3.6 การวิเคราะห์ความผิดพลาด

การคำนวณความคลาดเคลื่อนจากการทดลองจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือความผิดพลาดจากการทดลองกับความผิดพลาดจากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ โดยความผิดพลาดจากการทดลอง จะวิเคราะห์โดยเลือกสภาวะการทดลองมา 1 สภาวะการทดลอง และทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ส่วนความผิดพลาดจากการวิเคราะห์ ทำโดยวิเคราะห์ตัวอย่างเดิม 5 ครั้ง โดยผลการหาความคลาดเคลื่อนจะแสดงในภาคผนวก

### 3.7 การไทเทรต

#### 3.7.1 การไทเทรตหากรดไขมันในสารตั้งต้น

การไทเทรตหาปริมาณกรดไขมันใช้วิธีปรับแต่งจากวิธี AOCS Official Method Ca 5a-40 โดยลดปริมาณการผสมลง

1. นำเมทานอล 10 มิลลิลิตร และตัวอย่าง 5.6 กรัม ละลายในเมทานอล 10 มิลลิลิตร มาทำการไทเทรต
2. เติมฟีนอล์ฟทาไลน์ 0.2 มิลลิลิตร ลงในตัวอย่างทั้งสอง
3. ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร จนสารละลายที่ได้เปลี่ยนสี โดยปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณของกรดไขมันที่อยู่ในสารตัวอย่าง ดังที่แสดงในสมการ

$$\frac{B_1 \times M \times 25.6}{W} = \text{กรดไขมันติดิก \% โดยน้ำหนัก}$$

4. โดย  $B_1$  คือ ปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในหน่วยมิลลิลิตร  
 $C$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายไฮดรอกไซด์ในหน่วย โมลต่อลิตร  
 $W$  คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่นำมาไทเทรตในหน่วยกรัม



### 3.7.2 การไทเทรตหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกละลายจากตัวทำละลายร่วม

1. เตรียมตัวอย่างสองตัวอย่าง โดยตัวอย่างแรกเป็นตัวทำละลายร่วมเพียงอย่างเดียว และตัวอย่างที่สองเป็นตัวทำละลายร่วมผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต
2. นำตัวอย่างแรกมาทำการไทเทรต ส่วนตัวอย่างที่สองนำมากรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 5 เพื่อกรองเอาตัวเร่งปฏิกิริยาออก
3. เติมสารละลายโบรมไทมอลบลู 2 มิลลิลิตร ลงในตัวอย่างทั้งสอง
4. ไทเทรตด้วยสารละลายไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร จนสารละลายที่ได้เปลี่ยนสี โดยปริมาณของไฮโดรคลอริกจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เจือปนอยู่ในผลิตภัณฑ์ ดังที่แสดงในสมการ

$$\frac{(A_2 - A_{\text{blank}}) \times C \times 163.94}{3000 \times W} = \text{Na}_3\text{PO}_4 \text{ \%โดยน้ำหนัก}$$

โดย  $A_{\text{blank}}$  คือ ปริมาณสารละลายไฮโดรคลอริก ในหน่วยมิลลิลิตร ของการไทเทรตตัวอย่างแรก

$A_2$  คือ ปริมาณสารละลายไฮโดรคลอริก ในหน่วยมิลลิลิตร ของการไทเทรตตัวอย่างที่สอง

$C$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรคลอริกในหน่วย โมลต่อลิตร

$W$  คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่นำมาไทเทรตในหน่วยกรัม

#### บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงศักยภาพของตัวทำละลายร่วมในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสวิวรีพันธ์เป็นโซเดียมฟอสเฟต และมุ่งเน้นในการอธิบายพฤติกรรมของการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งตัวแปรที่ศึกษาคือ ระยะเวลาในการทำการทดลอง อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช ชนิดของตัวทำละลายร่วม ปริมาณตัวทำละลายร่วมที่ใช้ในการทดลอง และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา โดยการทดลองจะแบ่งเป็น 5 ขั้นตอนดังนี้

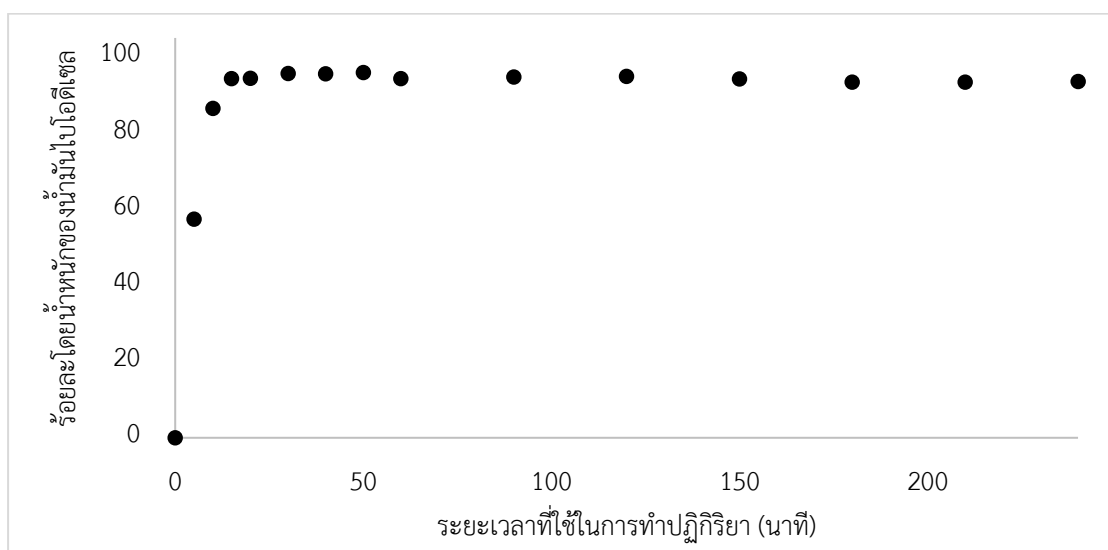
1. การศึกษาเบื้องต้นเพื่อเลือกสภาวะพื้นฐานและออกแบบการทดลอง
2. การศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช
3. การศึกษาผลกระทบของชนิดตัวทำละลายร่วม
4. การศึกษาผลกระทบของปริมาณตัวทำละลายร่วม
5. การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ



#### 4.1 ผลการทดลองเบื้องต้น

##### 4.1.1 ผลกระทบของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

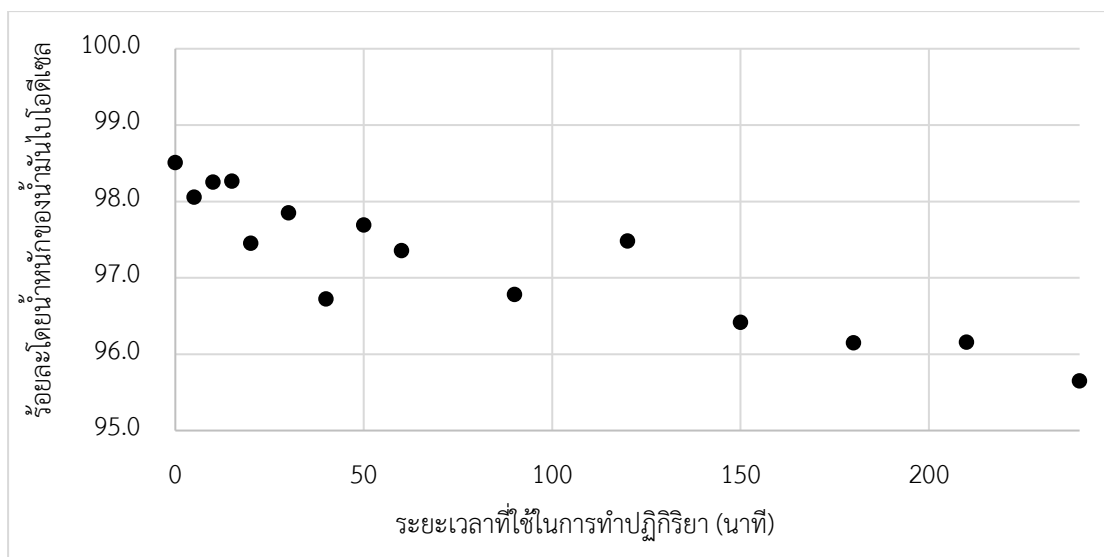
ในการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา ได้ทำการทดลองในสภาวะอุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 ต่อน้ำมันก๊าดน้ำมันพืช อัตราส่วนเมทานอลโดยโมลของเมทานอล ต่อน้ำมันพืช 18:1 ความเร็วในการปั่นกวน 600 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสวิวรีพันธ์เป็นโซเดียมฟอสเฟตในงานวิจัยที่ผ่านมา



**รูปที่ 7** ผลกระทบของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อความสัมพันธ์ของร้อยละได้น้ำมันไบโอดีเซล ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 18:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 210 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำมันก๊าดน้ำมันพืช

จากรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในช่วง 15 นาทีแรก ร้อยละได้น้ำมันไบโอดีเซลเท่ากับ 94.3 และจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนถึงนาทีที่ 50 โดยมีร้อยละได้น้ำมันไบโอดีเซลสูงสุดคือ 95.9 และค่อยๆลดลงหลังจากนาทีที่ 50 ไปจนถึงนาทีที่ 240 จนร้อยละสุดท้ายของน้ำมันไบโอดีเซลเหลือเพียง 93.6

พฤติกรรมการณ์การลดลงของร้อยละได้น้ำมันไบโอดีเซลจากการทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา วิวรีพันธ์เป็นพฤติกรรมที่พบเจอในงานวิจัยที่ผ่านมา เช่นในงานวิจัยของ Liang Wan ในปี 2014<sup>[29]</sup> ซึ่งพบว่าเมื่อทำการปฏิกิริยานานเกินไป ร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลจะลดลง โดยในงานวิจัยนี้ ได้ทำการทดลองเพื่อพิสูจน์ปฏิกิริยาไพโรไลซิสของน้ำมันไบโอดีเซลในสภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต



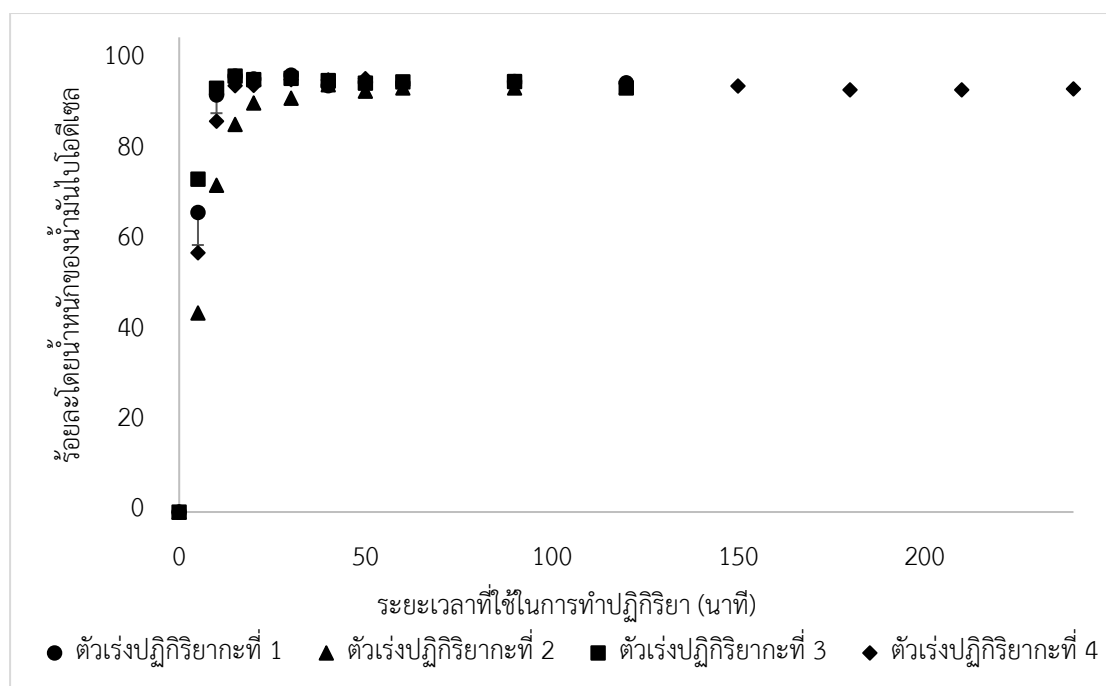
**รูปที่ 8** ผลกระทบของปฏิกิริยาข้างเคียงของน้ำมันไบโอดีเซล ต่อความสัมพันธ์ของร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซลและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 210 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนักน้ำมันไบโอดีเซล

รูปที่ 8 เป็นการทดลองพิสูจน์ปฏิกิริยาไฟโรไลซิสของน้ำมันไบโอดีเซลโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นการผสมน้ำมันไบโอดีเซลและโซเดียมฟอสเฟตภายในเตาปฏิกรณ์ และปล่อยให้ทำปฏิกิริยาเป็นระยะเวลา 240 นาทีเพื่อดูพฤติกรรมของการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟีพบว่าร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซลจะค่อยๆลดลง โดยส่วนหนึ่งแตกตัวไปเป็นกรดไขมันอิสระ และอีกส่วนแตกตัวเป็นสารที่ไม่สามารถระบุชนิดได้ แต่สามารถพิสูจน์ได้จากพื้นที่ใต้จุดยอดของสารที่ไม่สามารถระบุชนิดได้ (Ghost peak) ที่เพิ่มมากขึ้น

ดังนั้นในการทดลองทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จึงไม่ควรทำปฏิกิริยาในระยะเวลาที่นานเกินไป จนทำให้ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซลลดลงและไม่มีความจำเป็นในการทดลองเมื่อปฏิกิริยาเข้าสู่จุดสมดุลแล้ว ดังนั้นในการทดลองในขั้นตอนต่อไปจะลดระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาลงเหลือ 120 นาที

#### 4.1.2 ผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกะ

ในการทดลองเทียบผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกะ ทำการทดลองเพื่อออกแบบวิธีการทดลองให้เหมาะสมต่อพฤติกรรมของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยได้ทำการทดลองเทียบตัวเร่งปฏิกิริยา 3 กะ สองกะแรกทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง เพื่อดูความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง

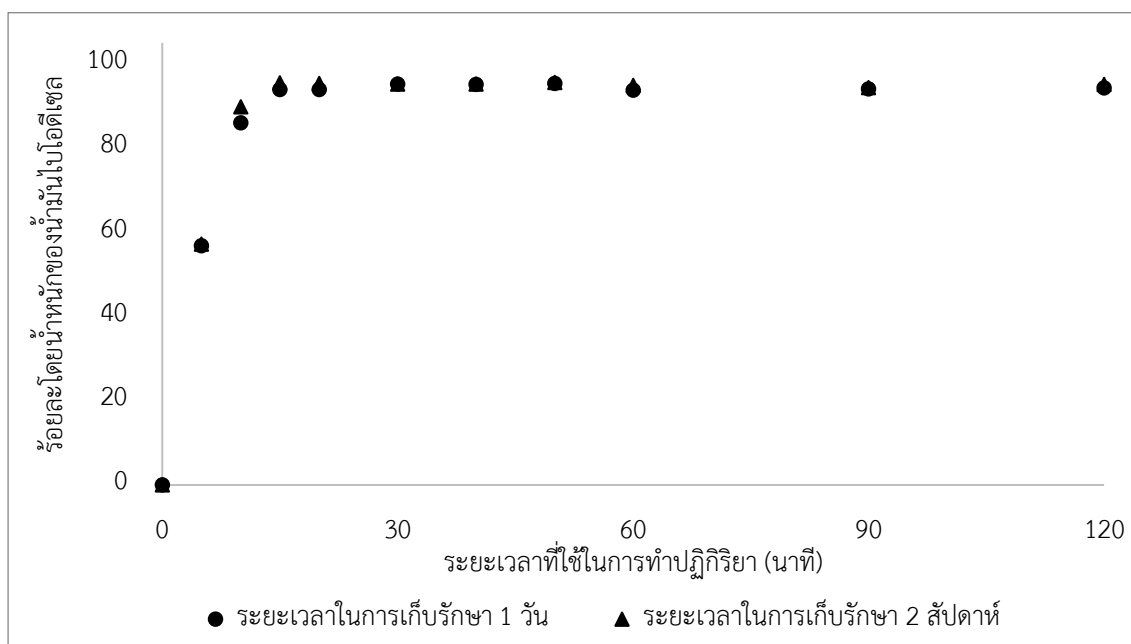


**รูปที่ 9** ผลกระทบของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกะ ต่อความสัมพันธ์ของร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซลและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 18:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 210 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนักน้ำมันไบโอดีเซล

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกะจะไม่ส่งผลต่อร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซลที่เวลาสุดท้าย แต่จะส่งอิทธิพลกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาอย่างชัดเจน ส่วนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหมือนกัน แต่ทำการทดลองคนละครั้ง เป็นการบอกถึงค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลองซึ่งเอามาใช้เทียบผลกระทบของตัวแปรว่าส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาหรือไม่ ซึ่งผลกระทบของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกะจะส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของการทดลองทั้งหมด ดังนั้นในการเทียบผลการทดลองจำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากกะเดียวกันมาทำการทดลอง เพราะฉะนั้นแล้วตัวเร่งปฏิกิริยาที่จะถูกใช้ในงานวิจัยนี้ จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมมาจากกะเดียวกันมาทำการทดลองทั้งหมด

#### 4.1.3 ผลกระทบของการเสื่อมของตัวเร่งปฏิกิริยาจากเก็บรักษา

เนื่องจากเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมดที่จะใช้ในการทดลองเตรียมในกะเดียว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเก็บรักษาตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเวลานาน ซึ่งต้องศึกษาผลกระทบของการเสื่อมของตัวเร่งปฏิกิริยาจากเก็บรักษา โดยเทียบผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านเก็บรักษามานาน 2 อาทิตย์ กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่งผ่านการเผาไม่เกิน 1 วัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อดูความเสถียรของตัวเร่งปฏิกิริยา

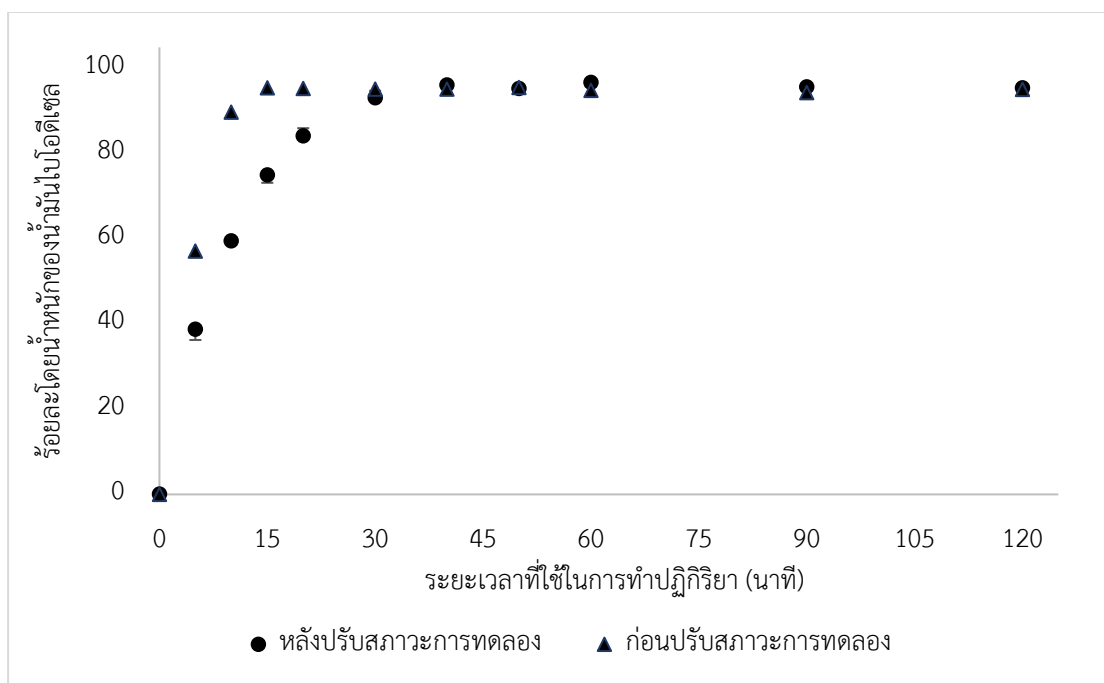


**รูปที่ 10** ผลกระทบของระยะเวลาในการเก็บรักษาตัวเร่งปฏิกิริยา ต่อความสัมพันธ์ของร้อยละได้น้ำมันของน้ำมันไบโอดีเซลและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 18:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 210 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช

ผลกระทบของระยะเวลาในการเก็บรักษาตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าไม่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นจึงสามารถมั่นใจได้ว่าการเปรียบเทียบผลการทดลองในแต่ละตัวแปร สามารถเปรียบเทียบกันได้โดยไม่มีอิทธิพลของระยะเวลาในการเก็บรักษาเข้ามาเกี่ยวข้องอย่างน้อยในระยะเวลา 2 อาทิตย์ ดังนั้นในการทดลองศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ จึงทำการทดลองในระยะเวลาที่แตกต่างกันไม่เกิน 2 อาทิตย์

#### 4.1.4 สถานะพื้นฐานในการทดลองต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

จากการทดลองที่ผ่านมาพบว่าปฏิกิริยาสามารถเสร็จสมบูรณ์ได้ภายในระยะเวลา 10 ถึง 15 นาที แต่อย่างไรก็ตามวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือการศึกษาศักยภาพของการใช้ตัวทำละลายร่วมในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน ซึ่งที่สถานะเดิมปฏิกิริยาเกิดไวจนทำให้จุดการทดลองระหว่างที่ปฏิกิริยายังไม่เกิดเสร็จสมบูรณ์มีไม่เพียงพอต่อการวิเคราะห์ผล และข้อจำกัดของอุปกรณ์ทำให้ไม่สามารถลดระยะเวลาในเก็บตัวอย่างในแต่ละจุดได้ จึงได้ทำการปรับลดอุณหภูมิและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาลง เพื่อให้สามารถเห็นผลกระทบของตัวแปรอื่นๆในการทดลอง



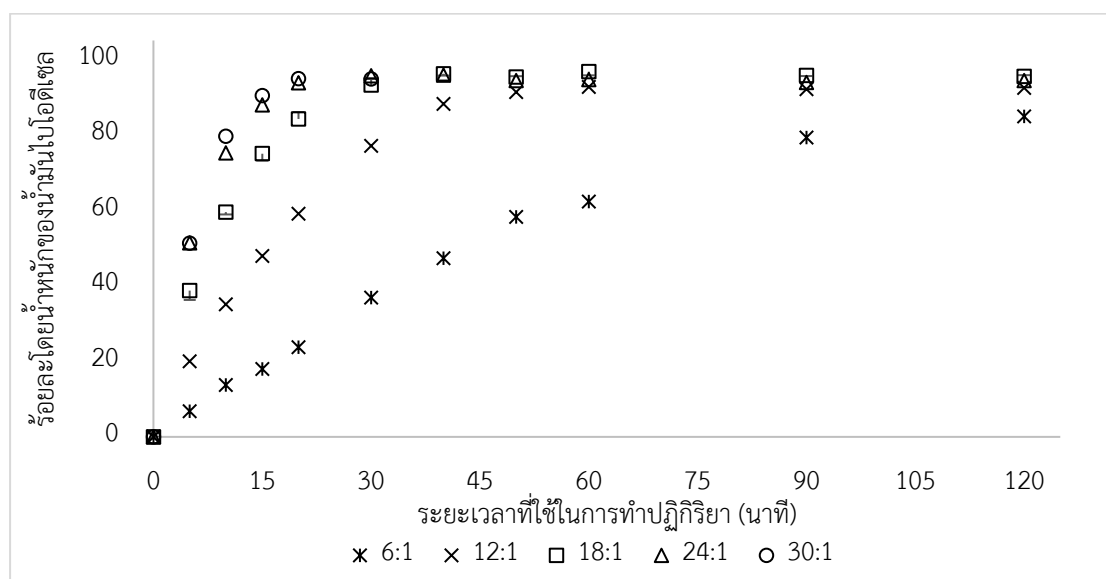
**รูปที่ 11** ผลกระทบของสภาวะการทดลอง ต่อความสัมพันธ์ของร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซลและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ก่อนปรับสภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 18:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 210 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช หลังปรับสภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 18:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 190 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช

จากการปรับลดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิ ส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดช้าลง ซึ่งจะทำให้จุดการทดลองมีมากเพียงพอต่อการวิเคราะห์ผล ดังนั้นจะใช้สภาวะหลังปรับในการศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆต่อ โดยหลังจากการปรับสภาวะ ต้องใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาไม่น้อยกว่า 30 นาที เพื่อให้ปฏิกิริยาถึงสถานะสมดุล

## 4.2 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช

### 4.2.1 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช

ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช ทำการศึกษาที่อัตราส่วน 6:1 ไปจนถึง 30:1 อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช และความเร็วในการปั่นกวนเท่ากับ 600 รอบต่อนาที



**รูปที่ 12** ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 6:1 12:1 18:1 24:1 และ 30:1 ต่อความสัมพันธ์ของร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซลและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 190 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช

การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช จะส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้นอย่างชัดเจนในอัตราส่วนที่ 6:1 ไปจนถึง 18:1 โดยสามารถดูได้จากอัตราในการเพิ่มขึ้นของร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซล และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาจนปฏิกิริยาเข้าสู่สภาวะสมดุล ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์ ไคกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ กับเมทานอล ซึ่งการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลจะส่งผลให้ความเข้มข้นของเมทานอลมีค่าสูงมากขึ้น จึงเป็นเหตุให้การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น



แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชไปมากกว่าอัตราส่วนที่ 18:1 ไปจนถึง 30:1 พบว่าการเกิดปฏิกิริยาไม่ได้เกิดเร็วขึ้น ซึ่งเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันทำปฏิกิริยาในวัฏภาคของเหลว ดังนั้นการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล ในทางหนึ่งจะเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของเมทานอล แต่ในขณะเดียวกันเมทานอลที่ใส่เข้าไปก็ไปเจือจางตัวเร่งปฏิกิริยา ไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ ซึ่งจะส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดช้าลงแทน

นอกจากนี้การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชจะส่งผลต่อร้อยละโดยน้ำหนักสุดท้ายของน้ำมันไบโอดีเซล เนื่องจากเมทานอลเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน ซึ่งปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ ดังนั้นการเพิ่มการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช จะช่วยผลักดันปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันของปฏิกิริยา ไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ ไปข้างหน้า ส่งผลให้เกิดเมทิลเอสเทอร์ได้มากขึ้นตามสมดุลปฏิกิริยา และส่งผลให้ความเข้มข้นของโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์มีค่าลดลง ทำให้ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซลมีค่าสูงขึ้นเมื่อปฏิกิริยาเข้าสู่จุดสมดุล



#### 4.2.2. ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับน้ำมันพืชต่อจลนพลศาสตร์เคมีของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน

การคำนวณหาค่าคงที่อัตราของค่าคงที่จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน ได้ทำการศึกษาโดยใช้จุดการทดลองทั้งหมด 4 จุด ต่อหนึ่งค่าคงที่ คือจุดการทดลองที่ 0 5 10 และ 15 นาที เนื่องจากการทดลองปฏิกิริยาสามารถเกิดได้อย่างรวดเร็ว และหลังจาก 15 นาทีเป็นต้นไป บางการทดลองเกิดกลีเซอรอลและส่งผลให้กลไกการเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงไป โดยสามารถสังเกตได้จากแนวโน้มของค่าความเคลื่อนไหว ซึ่งจะส่งผลให้การวัดค่าและการหาค่าคงที่อัตราที่มีความคลาดเคลื่อนไปจากที่ควรจะเป็น

วิธีการคำนวณหาค่าคงที่อัตรา จะใช้วิธีการสร้างกราฟเส้นตรงจากสมการอินทิเกรตของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์เท่านั้น เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาเดี่ยวจากสามปฏิกิริยา ไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ ที่สามารถเขียนสมการการเกิดปฏิกิริยาด้วยวิธีอินทิเกรตได้ โดยการคำนวณจะตั้งสมมุติฐานว่าการเปลี่ยนแปลงของเมทานอลระหว่างการทำปฏิกิริยามีการเปลี่ยนแปลงที่น้อย เนื่องจากการทดลองอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชถูกใช้ในปริมาณที่สูงกว่าอัตราส่วนปริมาณสารสัมพันธ์ที่ 3:1 มาก ดังนั้นความเข้มข้นของเมทานอลระหว่างการทำปฏิกิริยาจึงถูกอนุมานว่าเป็นค่าคงที่ โดยคำนวณได้จากอัตราส่วนของเมทานอลและน้ำมันพืชที่ใส่เข้าไปตอนเริ่มต้นทำการทดลอง ส่วนความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์ จะคำนวณจากปริมาตรของสารทั้งหมดที่เก็บได้ในแต่ละตัวอย่าง และจำนวนโมลของไตรกลีเซอไรด์ที่อยู่ในสารตัวอย่างซึ่งคำนวณจากแก๊สโครมาโทกราฟีและน้ำหนักน้ำมันที่เก็บได้ในแต่ละตัวอย่างดังที่แสดงในภาคผนวก ก.

การคำนวณและตัวแปรต่างๆแสดงดังนี้

$$r_1 = g_{cat}k_1[C_{TG}] \quad (1)$$

$$-\frac{d[C_{TG}]}{dt} = \{g_{cat}k_1\}[C_{TG}] \quad (2)$$

$$-\frac{1}{[C_{TG}]}d[C_{TG}] = \{g_{cat}k_1\}dt \quad (3)$$

$$-\ln\left[\frac{C_{TG}}{C_{TG0}}\right] = \{g_{cat}k_1\}t \quad (4)$$

$$-\ln[C_{TG}] = \{g_{cat}k_1\}t - \ln[C_{TG0}] \quad (5)$$

สร้างสมการเส้นตรง  $y=mx+c$  จากสมการที่ (5) โดย

แกน y คือ  $-\ln\frac{C_{TG}}{C_{TG0}}$ , แกน x คือ t และ  $y=mx+c$

ความชัน m คือ  $g_{cat}k_1$

และตัวแปรต่าง ๆ นิยามดังนี้

ตัวแปร  $r_1$  คืออัตราการเกิดปฏิกิริยาของไตรกลีเซอไรด์ในหน่วยโมลต่อลิตรต่อนาที

ตัวแปร  $g_{cat}$  คือน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใส่เข้าไปในเตาปฏิกรณ์

ตัวแปร  $k_1$  คือค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์

ตัวแปร  $g_{cat}$  คือน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในแต่ละการทดลอง

ตัวแปร  $C_{TG}$  คือความเข้มข้นที่เวลาใดๆของไตรกลีเซอไรด์ในหน่วยโมลต่อลิตร

ตัวแปร  $C_{MeOH}$  คือความเข้มข้นที่ของเมทานอลซึ่งถูกอนุมานว่าเป็นค่าคงที่ โดยเท่ากับค่าความเข้มข้นเริ่มต้นตอนเริ่มทำปฏิกิริยาในหน่วยโมลต่อลิตร

ตารางที่ 3 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช ต่อค่าคงที่อัตราในปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

อัตราส่วนโดยโมลของ เมทานอลต่อน้ำมันพืช	ค่าคงที่อัตรา $k_1$ [นาที่ <sup>-1</sup> • กรัมตัวเร่งปฏิกิริยา]	$r^2$
6:1	$1.0 \times 10^{-2}$	0.907
12:1	$3.8 \times 10^{-2}$	0.999
18:1	$8.0 \times 10^{-2}$	0.999
24:1	$1.5 \times 10^{-1}$	0.999
30:1	$2.1 \times 10^{-1}$	0.994

จากตารางที่ 3 พบว่าการอธิบายผลการเกิดปฏิกิริยาของไตรกลีเซอไรด์ สามารถอธิบายโดยใช้กฎอัตราของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 โดยไม่นำความเข้มข้นของเมทานอลมาทำการคำนวณก็สามารถอธิบายผลการทดลองได้ โดยสามารถดูได้จาก R2 ที่เข้าใกล้หนึ่ง ดังนั้นการทำปฏิกิริยาของไตรกลีเซอไรด์กับเมทานอล ตัวไตรกลีเซอไรด์จะสามารถอธิบายได้ด้วยการเกิดปฏิกิริยาแบบปฏิกิริยามูลฐานได้ แต่สำหรับเมทานอล งานวิจัยฉบับนี้ไม่สามารถอธิบายผลการทดลองได้อย่างชัดเจน โดยแสดงให้เห็นว่าผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชจะส่งอิทธิพลต่อค่าคงที่อัตรา ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันของเมทานอลมีพฤติกรรมการเกิดปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาเชิงซ้อน (Complex reaction) และไม่สามารถสรุปอยู่ในรูปปฏิกิริยามูลฐานได้ (Elementary reaction)<sup>[30]</sup>

จากการศึกษาส่วนมากที่ผ่านมาของจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันก็พบปรากฏการณ์เดียวกัน<sup>[25, 31]</sup> หรือไม่ได้รายงานผลกระทบ<sup>[7, 32, 33]</sup> คือผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชส่งผลกับค่าคงที่อัตรา ซึ่งยังไม่สามารถอธิบายเหตุผลและความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น ส่วนในงานวิจัยฉบับนี้ การวิจัยถึงผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชต่อกลไกการเกิดปฏิกิริยาเชิงเคมีของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันอยู่นอกเหนือวัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย ดังนั้นจึงขอละไว้แต่เพียงเท่านี้ และ ควรเป็น การศึกษาสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ดังนั้นในการศึกษาปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันในขั้นต่อไปจะใช้ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของไตรกลีเซอไรด์ โดยไม่คิดความเข้มข้นของเมทานอลในการอธิบายผลการทดลอง เนื่องจากสามารถใช้อธิบายพฤติกรรมการเกิดปฏิกิริยาของไตรกลีเซอไรด์ได้<sup>[7, 32, 33]</sup> และเมทานอลที่ใช้ในการทดลองใช้ในทดลอง ถูกใช้ในปริมาณที่สูงกว่าอัตราส่วนปริมาณสารสัมพันธ์ที่ 3:1 มาก ดังนั้นความเข้มข้นของเมทานอลระหว่างการทำปฏิกิริยาจึงถูกอนุมานว่าเป็นค่าคงที่ และทำให้สามารถอธิบายผลกระทบของตัวแปรต่างๆที่ส่งอิทธิพลต่อการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์ได้ โดยมีสมการเป็นดังนี้

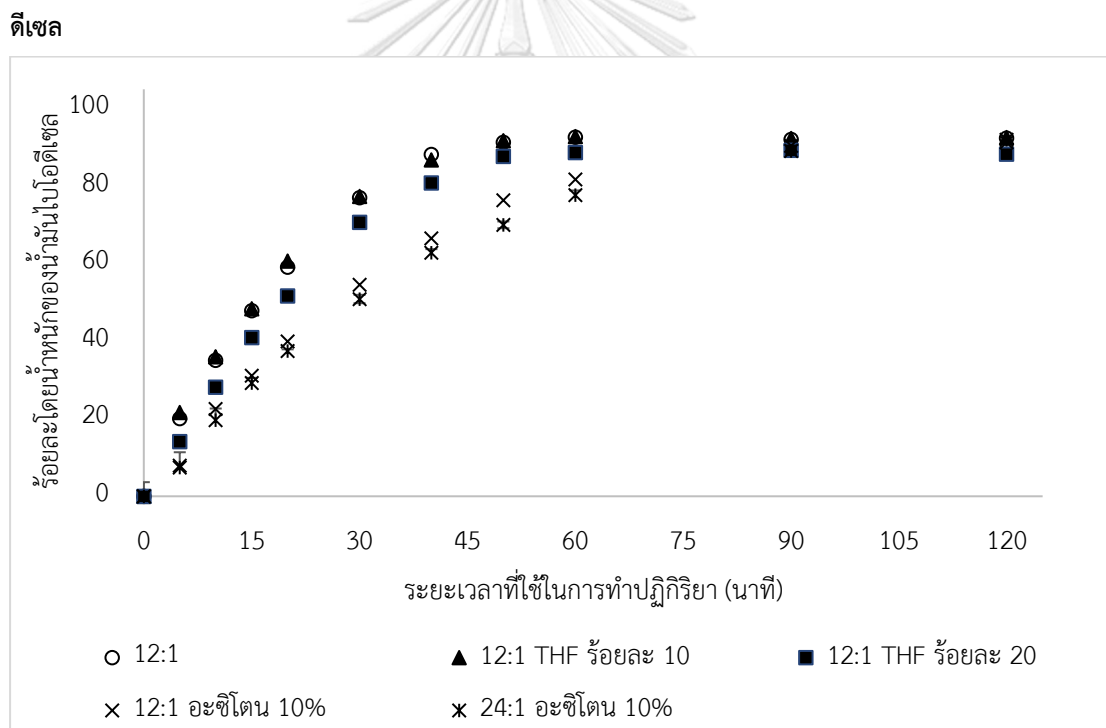
$$r_1 = g_{cat}k_1[C_{TG}] \quad (6)$$

$$-\ln[C_{TG}] = \{g_{cat}k_1\}t - \ln[C_{TG0}] \quad (7)$$

### 4.3 ผลกระทบของชนิดตัวทำละลายร่วม

ในการศึกษาถึงผลกระทบของชนิดตัวทำละลายร่วม ได้ทำการเทียบผลการศึกษาระหว่างอะซิโตนและเตตระไฮโดรฟูแรนเพื่อเลือกชนิดของตัวทำละลายร่วมที่เหมาะสมไปศึกษาต่อ ซึ่งจากการไทเทรตขั้นพื้นฐานในหัวข้อที่ 3 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตไม่ละลายในทั้งอะซิโตนและเตตระไฮโดรฟูแรน ซึ่งไม่พบความแตกต่างของปริมาณไฮโดรคลอริกที่ไทเทรต ดังนั้นการเทียบผลการศึกษาระหว่างอะซิโตนและเตตระไฮโดรฟูแรนเพื่อเลือกชนิดของตัวทำละลายร่วมที่เหมาะสมไปศึกษาต่อได้ทำการทดลองที่ร้อยละโดยน้ำหนักของตัวทำละลายร่วมต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 10 และ 20 ทำการศึกษาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 12:1 อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช และความเร็วในการปั่นกวนเท่ากับ 600 รอบต่อนาที

#### 4.3.1 ผลกระทบของชนิดตัวทำละลายร่วมต่อความสัมพันธ์ของร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซล



**รูปที่ 13** ผลกระทบของชนิดของตัวทำละลายร่วม ต่อความสัมพันธ์ของร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซลและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 190 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 12:1 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช

การใช้เตตระไฮโดรฟูแรนเป็นตัวทำละลายร่วม ทั้งร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักน้ำมัน แทบจะไม่ส่งอิทธิพลต่อร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่สภาวะการทดลองที่ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 12:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 190 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช อัตราความเร็วในการปั่นกววน 600 รอบต่อนาที ผลกระทบของปรากฏการณ์การถ่ายมวลข้ามวิภาคไม่ได้ส่งอิทธิพลต่อการทำปฏิกิริยา ดังนั้นเตตระไฮโดรฟูแรนที่ใส่เข้าไปจึงไม่ช่วยให้ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซลเกิดได้เร็วขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมจะส่งผลให้ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซลเกิดขึ้นช้าอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอะซิโตนลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาลง

#### 4.3.2 ผลกระทบของชนิดตัวทำละลายร่วมต่อค่าคงที่จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน

การศึกษาถึงผลกระทบของชนิดตัวทำละลายร่วม ต่อค่าคงที่จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้อธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น โดยสามารถดูได้จากการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่อัตรา ซึ่งหากการเปลี่ยนแปลงร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซลที่เกิดขึ้นเกิดจากปรากฏการณ์การเจือจางของสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยา ค่าคงที่อัตราซึ่งไม่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาควรที่จะมีค่าคงเดิม แต่ถ้าเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของกลไกการเกิดปฏิกิริยาเชิงเคมี ค่าคงที่อัตราควรที่จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป โดยผลการศึกษาที่ร้อยละโดยน้ำหนักของตัวทำละลายร่วมต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 10 และ 20 แสดงดังนี้

ตารางที่ 4 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช ต่อค่าคงที่อัตราปฏิกิริยาในอันดับต่างๆ

ชนิดตัวทำละลายร่วม	ปริมาณตัวทำละลายร่วม [ร้อยละโดยน้ำหนักน้ำมันพืช]	ค่าคงที่อัตรา $k_1$ [นาที่ <sup>-1</sup> · กรัมตัวเร่งปฏิกิริยา]	$r^2$
ไม่ใส่ตัวทำละลายร่วม	-	$3.8 \times 10^{-2}$	0.999
อะซิโตน	10	$2.1 \times 10^{-2}$	0.946
	20	$2.2 \times 10^{-2}$	0.939
เตตระไฮโดรฟูแรน	10	$4.0 \times 10^{-2}$	0.995
	20	$3.7 \times 10^{-2}$	0.970

ผลกระทบของอัตราของชนิดตัวทำละลายร่วมต่อค่าคงที่อัตรา จะเห็นได้ว่าการใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมทั้งร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช จะลดค่าคงที่อัตราลงอย่างเห็นได้ชัด ส่วนตัวทำละลายร่วมที่เป็นเตตระไฮโดรฟูแรนแทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่อัตราทั้งร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช ซึ่งในกรณีของเตตระไฮโดรฟูแรนที่ตัวทำละลายร่วมไม่ส่งผลต่อค่าคงที่อัตรา แสดงให้เห็นว่าตัวทำละลายร่วมที่ใส่เข้าไปเป็นสารเฉื่อย และไม่ส่งอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาเชิงเคมี ส่วนผลกระทบต่อกลไกการถ่ายเทมวลข้ามวิภาคที่เกิดขึ้น แสดงให้เห็นว่าเตตระไฮโดรฟูแรนไม่ได้เข้าช่วยเพิ่มอัตราการการถ่ายเทมวลข้ามวิภาค หรือเปลี่ยนแปลงกลไกการเกิดปฏิกิริยาใดๆเลย ดังนั้นที่สภาวะการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 12:1 ความเร็วในการปั่นกววนเท่ากับ 600 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 0.5

โดยน้ำหนักน้ำมันพืช ผลกระทบของกลไกการเทมวอลข้ามวิฏภาคอาจไม่ได้ส่งอิทธิพลต่อการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน

แต่ในกรณีของอะซิโตน ค่าคงที่อัตราลดลงอย่างเห็นได้ชัด และจากพฤติกรรมของการใช้เตตระไฮโดรฟูแรนเป็นตัวทำละลายร่วม ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าที่สภาวะที่ใช้ในการทดลอง ผลกระทบของกลไกการเทมวอลข้ามวิฏภาคไม่ได้ส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน ดังนั้นอะซิโตนที่ใส่เข้าไปอาจส่งอิทธิพลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเชิงเคมีบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการพิสูจน์ทำการเทียบระบบ 2 ระบบ โดยระบบแรกจะมีเพียงอะซิโตนเท่านั้นในเตาปฏิกรณ์ ส่วนระบบที่สอง จะทำการผสมอะซิโตนกับตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของอะซิโตน ซึ่งจะเป็นการทดสอบเพื่อดูว่าอะซิโตนสามารถเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและไปแย่งตำแหน่งว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาแทนปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันได้หรือไม่

การทดลองทำโดยใส่อะซิโตนเข้าไปในเตาปฏิกรณ์ โดยการทดลอง(ก) จะไม่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต ส่วนการทดลอง (ข) จะบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตเข้าไปในในตะกร้า และเมื่อจัดเตรียมเตาปฏิกรณ์และไล่อากาศเสร็จแล้ว การทดลองทั้ง 2 จะค่อยๆเพิ่มอุณหภูมิ จนกระทั่งอุณหภูมิถึง 190 องศาเซลเซียส และจะเริ่มปั่นกวนและจับเวลาในการทดลอง โดยได้เก็บที่ระยะเวลาต่างๆดังนี้ ก่อนเริ่มให้ความร้อน นานาที 0 5 10 15 20 30 40 50 60 90 และ 120 ตามลำดับ



**รูปที่ 14** ตัวอย่างที่เก็บได้จากการทำปฏิกิริยาของ (ก) อะซิโตนไม่ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา (ข) อะซิโตนผสมตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมัน ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ความเร็วในการปั่นกวน 600 รอบต่อนาที ที่เวลา ก่อนเริ่มให้ความร้อน นานาที 0 5 10 15 20 30 40 50 60 90 และ 120 ตามลำดับ

รูป (ก) แสดงให้เห็นว่าในระบบที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ ลักษณะเชิงกายภาพของอะซิโตนหลังจากการทำปฏิกิริยาเป็นระยะเวลา 120 นาทีไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลย แต่สำหรับรูป (ข) ลักษณะเชิงกายภาพของอะซิโตนเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี พบว่าร้อยละโดยน้ำหนักของอะซิโตนลดลงจากร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก เหลือเป็นร้อยละ 96 โดยน้ำหนัก ในเวลาที่ 120 ของการทดลอง (ข) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอะซิโตนสามารถทำปฏิกิริยาข้างเคียง โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตได้ ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาของอะซิโตนนี้ เกิดเฉพาะกับระบบที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเท่านั้น ดังนั้นปรากฏการณ์เชิงเคมีทั้งหมดที่เกิดขึ้นต้องเกิดที่บริเวณบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่านั้น เพราะฉะนั้นการใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วมในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันที่อุณหภูมิสูง ตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนหนึ่งต้องถูกใช้ไปในการทำปฏิกิริยาของอะซิโตน ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์จึงลดลง

ดังนั้นในการศึกษาผลกระทบของตัวทำละลายร่วมในขั้นตอนต่อไป จะใช้เตตระไฮโดรฟูแรนในการศึกษาต่อ โดยจะทำการศึกษาถึงผลกระทบของปริมาณเตตระไฮโดรฟูแรน เพื่ออธิบายผลว่าเตตระไฮโดรฟูแรนเข้าไปเปลี่ยนแปลงกลไกการเกิดปฏิกิริยาอย่างไร และที่สภาวะใดมีผลกระทบของปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลข้ามวัฏภาคเข้ามาเกี่ยวข้อง

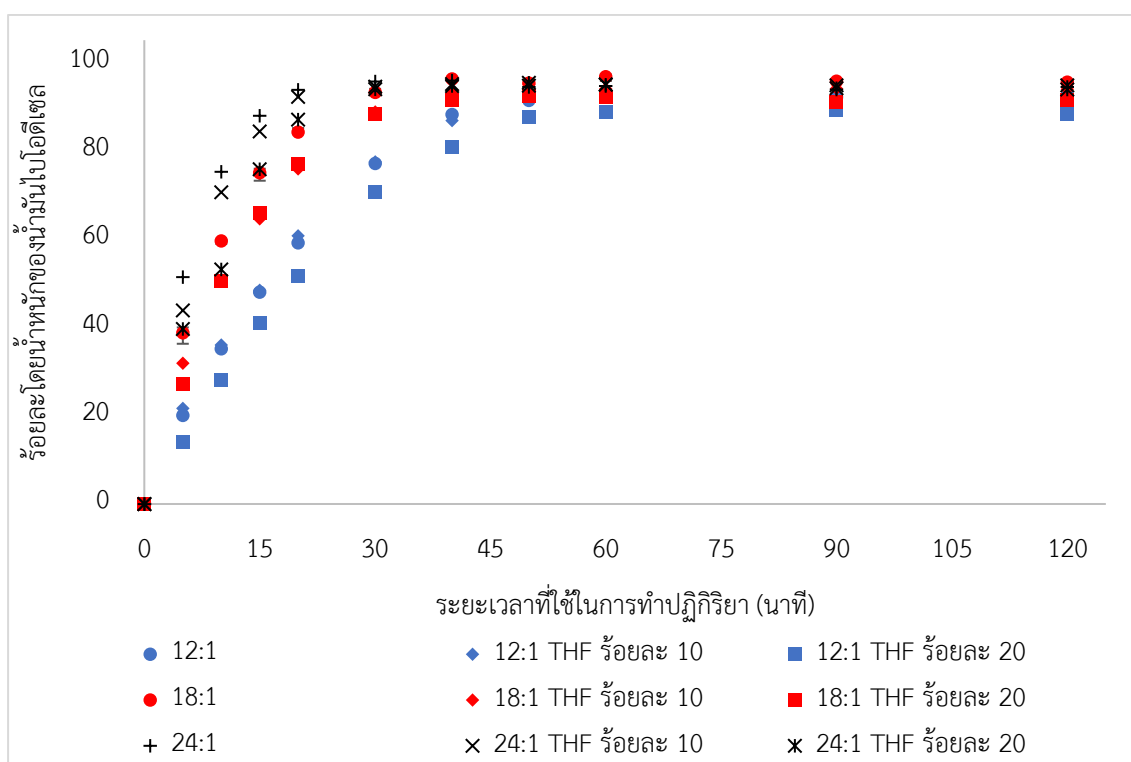




#### 4.4 ผลกระทบของปริมาณตัวทำละลายร่วม

##### 4.4.1 ผลกระทบของปริมาณตัวทำละลายร่วมต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

การศึกษาถึงผลกระทบปริมาณของปริมาณตัวทำละลายร่วม ได้ทำการทดลองแบบเมทริกซ์กับอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช โดยทดลองเพื่ออธิบายถึงผลกระทบของตัวทำละลายร่วมในสถานการณ์ทดลองต่างๆว่าส่งผลอย่างไรต่อการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน ทำการทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 12:1 18:1 และ 24:1 ปริมาณตัวทำละลายร่วมเท่ากับ ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช และทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช และความเร็วในการปั่นกวนเท่ากับ 600 รอบต่อนาที



**รูปที่ 15** ผลกระทบของปริมาณเตตระไฮโดรฟูแรนที่ร้อยละโดยน้ำหนักน้ำมันพืชเท่ากับ 10 และ 20 และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 12:1 18:1 และ 24:1 ต่อความสัมพันธ์ของร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซลและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 190 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมัน

ผลกระทบของเตตระไฮโดรฟูแรนเป็นตัวทำละลายร่วมในอัตราส่วนโดยน้ำหนักน้ำมันทั้งร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักน้ำมัน มีแนวโน้มที่จะลดร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลลง ในทุกอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชทั้ง 12:1 18:1 และ 24:1 โดยการลดลงของร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลต่อเวลาเกิดขึ้นจากปรากฏการณ์การเจือจาง เพราะตัวทำละลายร่วมที่ผสมเข้าไปเจือจางความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์และตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยามีความเข้มข้นที่ต่ำลง การชนกันของโมเลกุลจึงเกิดได้ยากขึ้น ซึ่งทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดได้ช้าลง ส่วนในกรณีของปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลข้ามวัฏภาค การเติมตัวทำละลายร่วมเข้าไปในระบบ ควรส่งอิทธิพลต่อผลกระทบของปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลข้ามวัฏภาคและเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลข้ามวัฏภาค นอกเสียจากว่าที่สภาวะที่ทำการทดลอง มีผลกระทบของปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลข้ามวัฏภาคเหลืออยู่น้อยหรือไม่มีอยู่เลย ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลข้ามวัฏภาคของเมทานอลกับน้ำมันพืชที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ทำให้เมทานอลและน้ำมันพืชสามารถละลายเข้าด้วยกันได้ดีมาก จนอาจจะกลายเป็นเนื้อเดียวกันหรือมีความแตกต่างกันของทั้ง 2 วัฏภาคที่น้อยมากๆ ดังนั้นอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชจึงไม่ส่งผลต่อการละลายของเมทานอลและน้ำมันพืชอีกต่อไป โดยจะทำการทดลองและพิสูจน์ในการทดลองต่อไป

#### 4.4.2 ผลกระทบของปริมาณตัวทำละลายร่วมต่อจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน

หากผลกระทบของการใช้เตตระไฮโดรฟูแรนเป็นตัวทำละลายร่วมส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้าลง เกิดขึ้นเพราะปรากฏการณ์การเจือจางของไตรกลีเซอไรด์และตัวเร่งปฏิกิริยา ผลกระทบของตัวทำละลายร่วมไม่ควรส่งอิทธิพลต่อค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์ เนื่องจากค่าคงที่อัตราเป็นตัวแปรที่ไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์และตัวเร่งปฏิกิริยา และหากเป็นในกรณีของผลกระทบของปริมาณตัวทำละลายร่วมส่งอิทธิพลต่อปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลข้ามวัฏภาค ค่าคงที่อัตราควรจะเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์ที่สร้างขึ้น เป็นค่าคงที่อัตราเสมือนของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ซึ่งรวมผลกระทบของปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลข้ามวัฏภาคเข้าไปในค่าคงที่ ดังนั้นหากผลกระทบของปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลข้ามวัฏภาคยังส่งอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยา การเปลี่ยนแปลงทั้งหมดที่เกิดขึ้นต่อปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลข้ามวัฏภาค ควรจะเปลี่ยนแปลงค่าคงที่อัตรา

**ตารางที่ 5** ผลกระทบของปริมาณตัวทำละลายร่วมที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชในอัตราส่วนที่ 12:1 18:1 และ 24:1 ต่อค่าคงที่อัตราปฏิกิริยาในอันดับต่างๆ

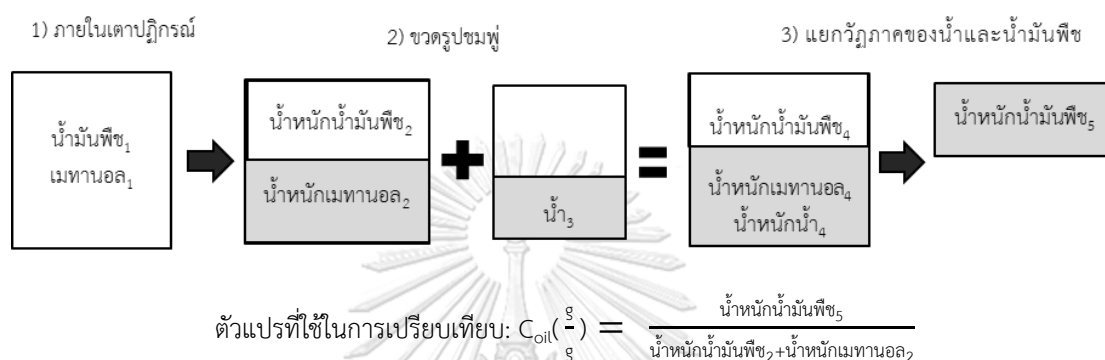
อัตราส่วนโดยโมล ของเมทานอลต่อ น้ำมันพืช	ปริมาณตัวทำละลายร่วม [ร้อยละโดยน้ำหนักของตัว ทำละลายร่วม]	ค่าคงที่อัตรา $k_1$ [นาที <sup>-1</sup> · กรัม ตัวเร่งปฏิกิริยา]	$r^2$
12	0	$3.8 \times 10^{-2}$	0.999
	10	$4.0 \times 10^{-2}$	0.995
	20	$3.7 \times 10^{-2}$	0.970
18	0	$7.9 \times 10^{-2}$	0.999
	10	$6.7 \times 10^{-2}$	0.999
	20	$7.9 \times 10^{-2}$	0.999
24	0	$1.4 \times 10^{-1}$	0.999
	10	$1.4 \times 10^{-1}$	0.995
	20	$1.2 \times 10^{-1}$	0.951

ผลกระทบของตัวทำละลายร่วมที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชทั้ง 12:1 18:1 และ 24:1 ไม่ส่งอิทธิพลต่อค่าคงที่อัตรา ดังนั้นอิทธิพลของตัวทำละลายร่วมต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ในการทำปฏิกิริยา เกิดขึ้นจากการปรากฏการณ์การเจือจางเพียงอย่างเดียว ส่วนผลกระทบของปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลข้ามวัฏภาค ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ส่งผลต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันน้อยมาก เนื่องจากผลกระทบของอุณหภูมิที่สูงจะส่งผลให้เมทานอลและน้ำมันพืชสามารถละลายเข้าด้วยกันได้ง่ายขึ้น จนอาจละลายกลายเป็นเนื้อเดียวกันหรือมีความแตกต่างกันที่น้อยมากๆ ดังนั้นผลกระทบของปรากฏการณ์ถ่ายเทมวลข้ามวัฏภาค จึงไม่ส่งอิทธิพลต่อการทำปฏิกิริยาอีกต่อไป โดยการพิสูจน์การละลายของเมทานอลและน้ำมันพืช จะทำการศึกษาในขั้นตอนต่อไป

#### 4.4.3 การศึกษาพฤติกรรมของวัฏภาคระหว่างเมทานอลและน้ำมันปาล์มโอเลอินที่สภาวะอุณหภูมิสูง

จากการที่ตัวทำละลายร่วมไม่ส่งผลต่อค่าคงที่อัตรา แสดงให้เห็นว่าที่สภาวะอุณหภูมิสูงน้ำมันพืชและเมทานอลสามารถละลายเข้าด้วยกันเป็นอย่างดี โดยการพิสูจน์ลักษณะของวัฏภาคในช่วงต้นของการทำปฏิกิริยา ทำการศึกษาโดยนำเมทานอลและน้ำมันพืชมาผสมกันภายในเตาปฏิกรณ์ด้วยอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 18:1 และใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นจะค่อยๆ ให้อุณหภูมิจนกระทั่งอุณหภูมิเท่ากับ 190 องศาเซลเซียส และทำการปั่นกวนที่ความเร็วต่ำ โดยไม่เกิน 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที เพื่อให้ไขมันพืชและเมทานอลสามารถผสมเข้าด้วยกันได้

การเปรียบเทียบจะเทียบระหว่างระบบที่มีการปั่นกววนที่ความเร็วรอบเท่ากับ 600 รอบต่อนาทีตลอดเวลา กับระบบที่ปล่อยทิ้งไว้โดยไม่มีการปั่นกววนเลยเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมงเพื่อให้เมทานอลและน้ำมันพืช สามารถแยกชั้นออกจากกัน จากนั้นจะค่อยๆเปิดวาล์วเพื่อเก็บสาร 100 กรัม 5 ครั้ง วิธีการเก็บสารจะเก็บในขวดรูป ชมพู่ ที่บรรจุน้ำหล่อเย็นเอาไว้ 50 กรัม เพื่อป้องกันการระเหยของเมทานอล โดยตัวแปรที่จะใช้เทียบ คืออัตราส่วนของน้ำมันพืชที่ออกมาหารด้วยน้ำหนักของสารทั้งหมดที่ออกมา โดยการเก็บสารจะเก็บได้จากจากท่อเก็บสารที่อยู่ บริเวณก้นถัง ซึ่งหากภายในเตาปฏิกรณ์มีสองวัฏภาค สารที่เก็บได้ควรจะเก็บได้เฉพาะวัฏภาคที่อยู่ด้านล่างเท่านั้น



รูปที่ 16 วิธีการเก็บตัวอย่างและวิธีที่ใช้ในการเปรียบเทียบระบบ

ตารางที่ 6 อัตราส่วนของน้ำมันพืชและเมทานอลที่เก็บได้ของระบบที่มีการปั่นกว 600 รอบต่อนาที กับระบบที่ไม่มีการปั่นกว ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 18:1

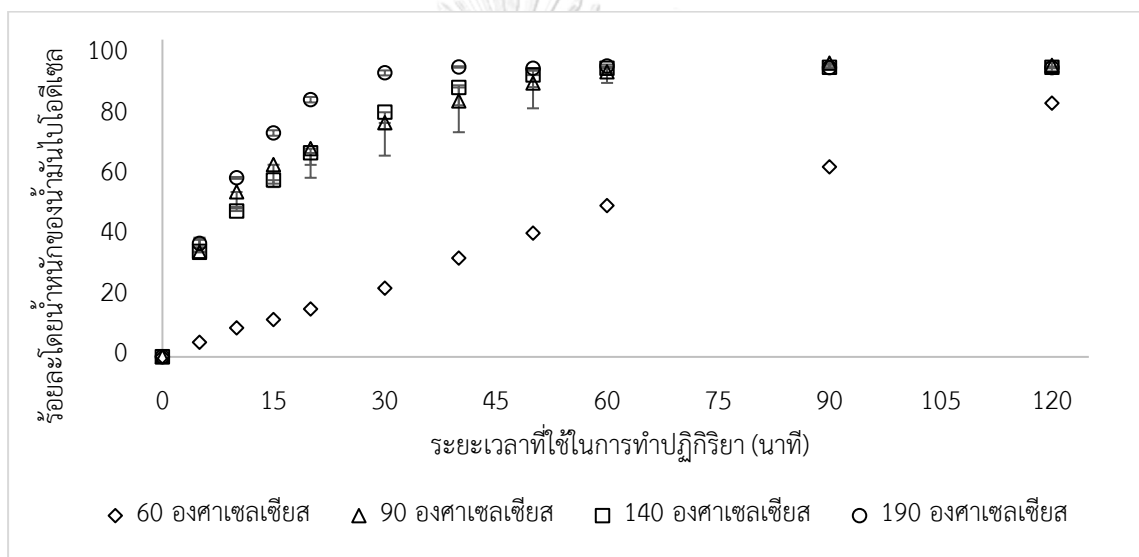
ครั้งของการเก็บตัวอย่าง	$C_{oil}(\frac{g}{g}) = \frac{\text{น้ำหนักน้ำมันพืช}_5}{\text{น้ำหนักน้ำมันพืช}_2 + \text{น้ำหนักเมทานอล}_2}$	
	ระบบที่มีการปั่นกว	ระบบที่ไม่มีการปั่นกว
1	63	62
2	64	64
3	64	64
4	66	67
5	66	67

ผลการทดลองเก็บสารทั้ง 5 ครั้ง พบว่าแทบไม่มีความแตกต่างกัน ของอัตราส่วนน้ำมันพืชระหว่างระบบที่มีการปั่นกวตลอดเวลา กับระบบที่ไม่มีการปั่นกว ซึ่งสำหรับเตาปฏิกรณ์เครื่องนี้ ท่อเก็บสารอยู่ที่บริเวณก้นถัง หากภายในเตาปฏิกรณ์ระบบแยกออกเป็น 2 ภูมิภาคที่ชัดเจน การเก็บสารในสภาวะที่ไม่มีการปั่นกวควรที่จะเก็บมาเพียงภูมิภาคของน้ำมันพืช ซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่าภูมิภาคของเมทานอล ดังนั้นระบบที่ไม่มีการปั่นกวควรมีอัตราส่วนของน้ำมันพืชต่อสารทั้งหมดที่ออกมาจากเตาปฏิกรณ์ที่สูงกว่าระบบที่มีการปั่นกวตลอดเวลาอย่างเห็นได้ชัด แต่อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าระบบที่มีการปั่นกวตลอดเวลา กับระบบที่ไม่มีการปั่นกว ภูมิภาคของสารที่อยู่บริเวณก้นถังไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำมันพืชและเมทานอลสามารถละลายเข้าด้วยกันเป็นอย่างดี จนอาจจะกลายเป็นเนื้อเดียวกัน หรือความแตกต่างกันของสารระหว่าง 2 ภูมิภาคแทบจะไม่มี ความแตกต่างกัน จึงทำให้ผลกระทบของปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลข้ามภูมิภาคไม่ส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาอีกต่อไป ดังนั้นการใส่ตัวทำละลายร่วมเข้าไปจึงไม่เปลี่ยนแปลงค่าคงที่อัตรา และมีแค่ปรากฏการณ์การเจือจางเท่านั้น ดังนั้นในการทดลองต่อไป จึงได้ทำการทดลองลดอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาลง เนื่องจากการละลายของน้ำมันพืชและเมทานอลจะลดลงเมื่อลดอุณหภูมิ

## 4.5 ผลกระทบของอุณหภูมิ

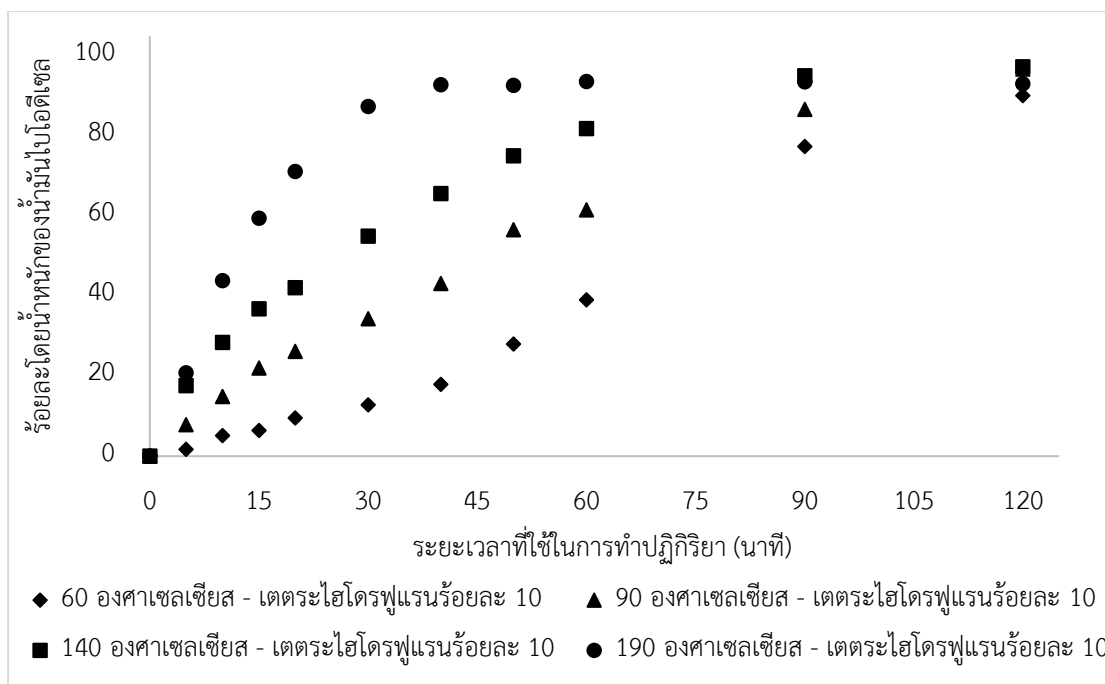
### 4.5.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ในสภาวะที่มีและไม่มีตัวทำละลายร่วม

เนื่องจากการละลายระหว่างวัฏภาคของของเหลว 2 วัฏภาค ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ การลดอุณหภูมิจะลดความสามารถในการละลายเข้าด้วยกันของเมทานอลและน้ำมันพืช โดยศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิจะทำการทดลองใช้อุณหภูมิที่ต่ำลง คือ 190 140 90 และ 60 องศาเซลเซียส ผสมตัวทำละลายร่วมเป็นเตตระไฮโดรฟรอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช ความเร็วในการปั่นกวนเท่ากับ 600 รอบต่อนาที และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 18:1 โดยจะเปรียบเทียบระหว่างระบบที่ไม่มีตัวทำละลายร่วมกับระบบที่มีตัวทำละลายร่วม ซึ่งผลกระทบของตัวทำละลายร่วมควรเห็นได้ชัดมากขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เนื่องจาก การละลายของเมทานอลและน้ำมันพืชลดลง



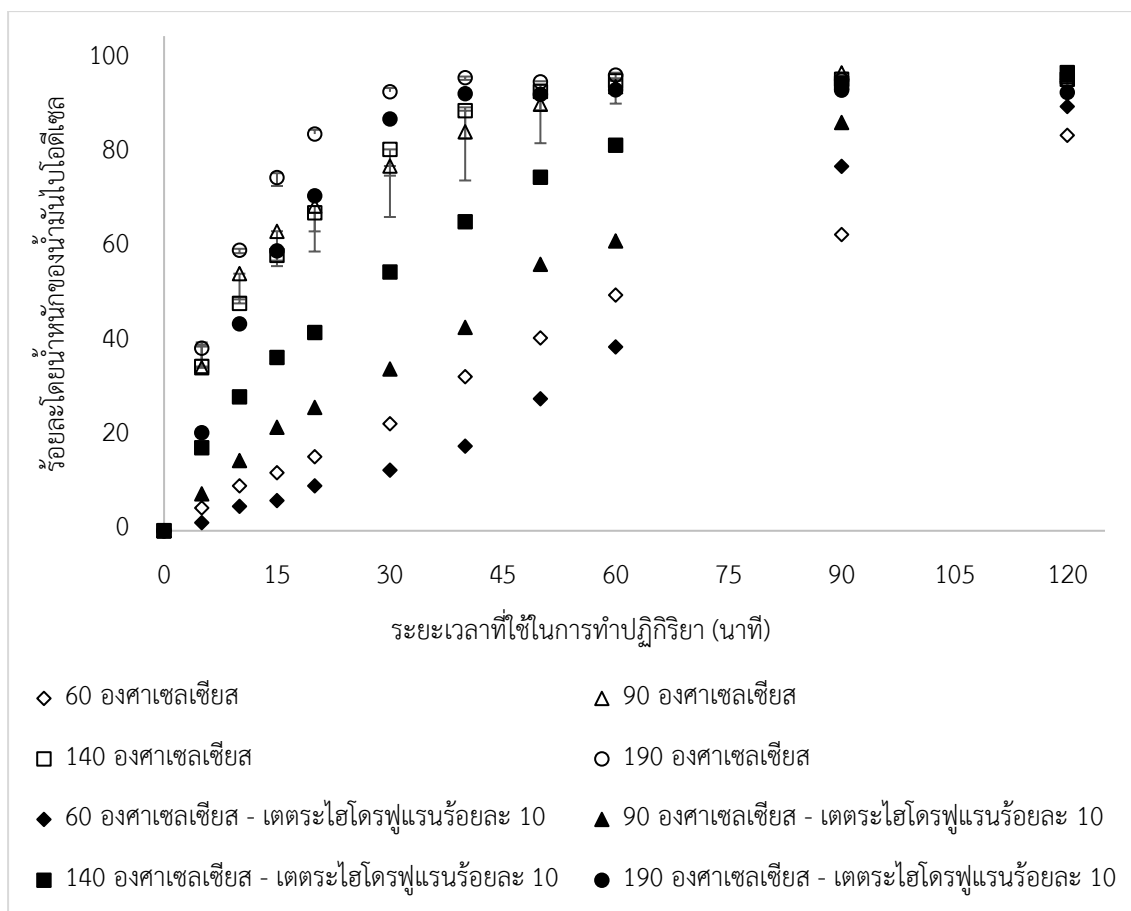
**รูปที่ 17** ผลกระทบของอุณหภูมิที่ 60 90 และ 190 องศาเซลเซียส ในระบบที่ไม่มีตัวทำละลายร่วม ต่อความสัมพันธ์ของร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไปโอดีเซลและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 190 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 18:1

ผลกระทบของอุณหภูมิในระบบที่ไม่มีตัวทำละลายร่วม ไม่สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน ตั้งแต่อุณหภูมิ 190 ไปจนถึง 90 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะอุณหภูมิ 90 และ 140 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ในช่วงของความไม่แน่นอนของการทดลอง (experimental uncertainty) แต่ผลของอุณหภูมิจะเห็นได้อย่างชัดเจนอย่างมากที่อุณหภูมิ 60 และ 90 องศาเซลเซียส โดยสาเหตุที่เป็นเช่นนี้เกิดขึ้นจากการเพิ่มอุณหภูมิจะช่วยให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสามารถเกิดได้เร็วขึ้นตามกฎของอาร์เรเนียส แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้วัฏภาคของเมทานอลและน้ำมันพืชสามารถละลายเข้าด้วยกันได้มากขึ้น ซึ่งการละลายเข้าด้วยกันที่มากขึ้นของน้ำมันพืชและเมทานอล จะส่งผลให้การทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์เป็นโซเดียมฟอสเฟตเกิดช้าลง ซึ่งเกิดขึ้นจากความเข้มข้นของเมทานอลในวัฏภาคที่ทำปฏิกิริยาหรือวัฏภาคที่มีส่วนผสมตัวเร่งปฏิกิริยา มีความเข้มข้นของเมทานอลต่ำลง โดยพฤติกรรมนี้จะอธิบายเพิ่มเติมในการทดลองต่อไป



**รูปที่ 18** ผลกระทบของอุณหภูมิที่ 60 90 และ 190 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่มีเตตระไฮโดรฟูแรนเป็น ทำละลายร่วมร้อยละ 10 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช ต่อความสัมพันธ์ของร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซลและ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 190 องศา เซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช เท่ากับ 18:1

ผลกระทบของอุณหภูมิในระบบที่มีตัวทำละลายร่วมสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน ตั้งแต่อุณหภูมิ 190 ถึง 60 องศาเซลเซียส เนื่องจากการใช้ตัวทำละลายร่วมจะลดผลกระทบของปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลข้ามวิภาค เนื่องจากน้ำมันพืชและเมทานอลสามารถละลายเข้าด้วยกันได้ง่ายขึ้น เพราะการเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้ปฏิกิริยาเชิง เคมีสามารถเกิดได้เร็วขึ้นจากกฎของอาร์เรเนียส โดยจะเห็นได้ว่าร้อยละโดยน้ำหนักของไบโอดีเซล จะเยอะสุดใน อุณหภูมิ 190 140 90 และ 60 องศาเซลเซียสตามลำดับ ส่วนผลกระทบของปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลข้ามวิภาค ถูกตัวทำละลายร่วมช่วยลดอิทธิพลไปแล้ว



**รูปที่ 19** การเปรียบเทียบผลกระทบบของอุณหภูมิที่ 60 90 140 และ 190 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่มีและไม่มีเติตระไฮโดรฟูแรนเป็นทำละลายร่วมร้อยละ 10 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช ต่อความสัมพันธ์ของร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซลและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 190 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 18:1

เมื่อเทียบร้อยละโดยน้ำหนักของไบโอดีเซลจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าในระบบที่ไม่มีตัวทำละลายร่วม ร้อยละโดยน้ำหนักของไบโอดีเซลจะสูงกว่าระบบที่มีตัวทำละลายร่วม โดยผลกระทบบของอุณหภูมิแสดงให้เห็นแตกต่างกันในสภาวะที่มีและไม่มีตัวทำละลายร่วม

ในระบบที่ไม่มีตัวทำละลายร่วม ผลกระทบบของอุณหภูมิจะแสดงผลต่อการทำปฏิกิริยา 2 ปรากฏการณ์ หนึ่งคือปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลข้ามวิภาค ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้การถ่ายเทมวลข้ามวิภาคเกิดได้ง่ายขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการละลายของน้ำมันพืชและเมทานอลจะเปลี่ยนไป โดยจะไปลดความเข้มข้นของเมทานอลในวิภาคที่ทำปฏิกิริยา เนื่องจากน้ำมันพืชและเมทานอลละลายเข้าด้วยกันได้ง่ายขึ้น และส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้ช้าลง อีกปรากฏการณ์คือการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาเชิงเคมีให้สูงขึ้นจากกฎของอาร์เรเนียส



ส่วนในระบบที่มีตัวทำละลายร่วม เนื่องจากมีตัวทำละลายร่วมอยู่ในระบบ จึงส่งผลให้การถ่ายเทมวลข้ามวัฏภาคเกิดได้ง่ายขึ้น ทำให้เห็นผลกระทบจากปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลข้ามวัฏภาคที่เกิดจากอุณหภูมิได้น้อยลง เลยสามารถสังเกตเห็นได้แต่ผลกระทบของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาเคมีจากกฎของอาร์เรเนียสได้เพียงอย่างเดียว

เมื่อพิจารณาผลกระทบของตัวทำละลายร่วม ที่อุณหภูมิต่างๆ ในอุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เมทานอลและน้ำมันพืชสามารถละลายเข้าด้วยกันได้เป็นอย่างดี ดังนั้นการเติมตัวทำละลายร่วมจึงไม่ส่งผลกระทบต่อค่าคงที่อัตรา และส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดช้าลงจากปรากฏการณ์การการเจือจางแทน ส่วนในอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 140 ถึง 60 องศาเซลเซียส การเติมตัวทำละลายร่วมจะส่งผลให้ความเข้มข้นของเมทานอลในวัฏภาคที่ทำปฏิกิริยามีความเข้มข้นลดลง และส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดช้าลง แต่อย่างไรก็ตาม ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส การเกิดปฏิกิริยามีลักษณะการเกิดปฏิกิริยาแบบซิกมอยด์หรือกราฟตัวเอสในช่วง 60 ถึง 90 นาที ซึ่งในกรณีนี้ ไม่ได้เกิดขึ้นจากการละลายของน้ำมันพืชและน้ำมันพืชและเมทานอลที่สูงขึ้น แต่อาจเกิดจากปัจจัยอื่น เช่นการเกิดกลีเซอรอลอาจลบน้ำมันพืชออกจากวัฏภาคของเมทานอลและทำให้เมทานอลมีความเข้มข้นที่สูงขึ้น ซึ่งการอธิบายและพิสูจน์พฤติกรรมของการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำตั้งแต่ 60 องศาเซลเซียส ลงมา อยู่นอกเหนือขอบเขตงานวิจัยนี้ เพราะพฤติกรรมของวัฏภาคและการเกิดปฏิกิริยา จะแตกต่างกันโดยสิ้นเชิงจากการละลายของเมทานอลและน้ำมันพืชที่เปลี่ยนไปจากผลกระทบของอุณหภูมิต่ำ

#### 4.5.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อจลนพลศาสตร์และสมการของอาร์เรเนียสของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันในสภาวะที่มีและไม่มีตัวทำละลายร่วม

การศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิต่อจลนพลศาสตร์ทำการศึกษาเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและตัวทำละลายร่วม โดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 190 140 90 และ 60 องศาเซลเซียส ทั้งไม่มีตัวทำละลายร่วม และมีตัวทำละลายร่วมร้อยละ 10 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช โดยทำการทดลองที่ความเร็วในการปั่นกว 600 รอบต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 18:1 โดยจะเทียบค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์ที่อุณหภูมิต่างๆ ของระบบที่มีและไม่มีตัวทำละลายร่วม โดยวิธีการคำนวณสมการของอาร์เรเนียสแสดงดังนี้

$$k_1 = Ae^{-\frac{Ea}{RT}} \quad (1)$$

$$\ln k_1 = \ln A - \frac{Ea}{RT} \quad (2)$$

$$-\ln k_1 = \frac{Ea}{RT} - \ln A$$

และตัวแปรต่าง ๆ นิยามดังนี้

ตัวแปร  $k_1$  คือค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์

ตัวแปร  $A$  คือค่าคงที่ของการตอบสนอง

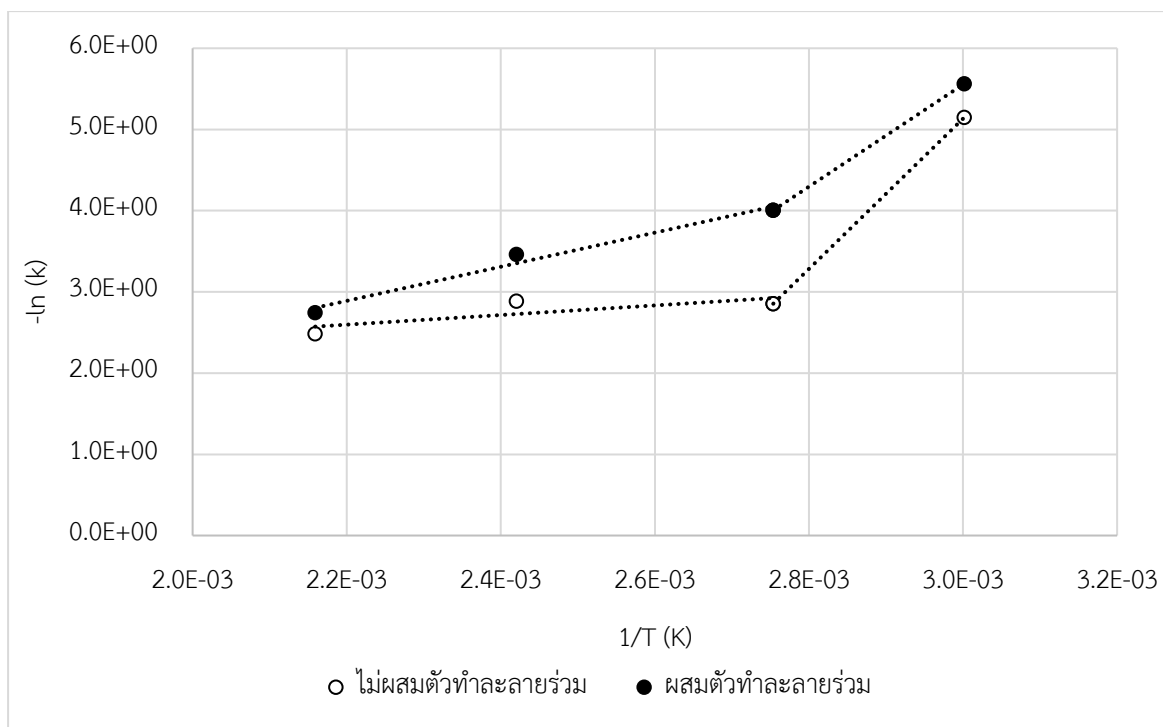
ตัวแปร  $Ea$  คือพลังงานก่อกัมมันต์

ตัวแปร  $R$  คือค่าคงที่ของแก๊ส

ตัวแปร  $T$  คืออุณหภูมิ

**ตารางที่ 7** ผลกระทบของอุณหภูมิตั้งแต่ 60 ถึง 190 องศาเซลเซียส ต่อค่าคงที่อัตราปฏิกิริยาในอันดับต่างๆ ในระบบที่ไม่มีและมีส่วนทำละลายร่วมที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชในอัตรา 18:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเร็วในการปั่นกว 600 รอบต่อนาที

อุณหภูมิ	ไม่ผสมตัวทำละลายร่วม		ตัวทำละลายร่วมร้อยละ 10 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช	
	$r^2$	ค่าคงที่อัตรา $k_1$	$r^2$	ค่าคงที่อัตรา $k_1$
60	0.953	$5.8 \times 10^{-3}$	0.969	$3.5 \times 10^{-3}$
90	0.986	$6.2 \times 10^{-2}$	0.990	$1.8 \times 10^{-2}$
140	0.971	$5.7 \times 10^{-2}$	0.964	$3.1 \times 10^{-2}$
190	0.999	$8.0 \times 10^{-2}$	0.996	$6.5 \times 10^{-2}$



**รูปที่ 20** การเปรียบเทียบผลกระทบของอุณหภูมิที่ 60 90 140 และ 190 องศาเซลเซียส ในสถานะที่มีและไม่มีตัวเตตระไฮโดรฟูแรนเป็นทำละลายร่วมร้อยละ 10 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช ต่อการกราฟสมการอาร์เรเนียสของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์ ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 190 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 18:1

ผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ผลกระทบของตัวทำละลายร่วมส่งผลต่อกราฟสมการอาร์เรเนียสอย่างชัดเจน โดยในระบบที่ไม่มีตัวทำละลายร่วม ค่าคงที่อัตราจะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยระหว่างอุณหภูมิ 190 และ 140 องศาเซลเซียส ส่วนระหว่างอุณหภูมิ 140 และ 90 องศาเซลเซียสแทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลง และระหว่างอุณหภูมิ 90 กับ 60 องศาเซลเซียส ค่าคงที่อัตราจะเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสาเหตุเกิดจากพฤติกรรมของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน ที่ชอบทำปฏิกิริยาในสถานะที่มีความเข้มข้นของเมทานอลในวัฏภาคที่เกิดปฏิกิริยาสูงๆ โดยการเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้เมทานอลและน้ำมันพืช สามารถละลายเข้าด้วยกันได้มากขึ้น ซึ่งการละลายเข้าด้วยกันของเมทานอลและน้ำมันพืชที่มากเกินไปจะส่งผลให้ความเข้มข้นของเมทานอลลดต่ำลง โดยส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเชิงเคมีลดลง แต่ในทางกลับกัน การเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้ปฏิกิริยาเชิงเคมีเกิดได้เร็วขึ้นตามกฎของอาร์เรเนียส เพราะฉะนั้นแล้ว ผลกระทบของการเพิ่มอุณหภูมิจะมีอิทธิพลทั้งเชิงบวกและเชิงลบ โดยจะสามารถสังเกตได้จากค่าคงที่อัตรา ในช่วง 190 ถึง 90 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิเนื่องจากการหักล้างกันของผลกระทบ

ส่วนในระบบที่มีตัวทำละลายร่วม ค่าคงที่อัตราเปลี่ยนอย่างชัดเจนตั้งแต่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ไปจนถึง 60 องศาเซลเซียส เนื่องจากตัวทำละลายร่วมเข้าไปลดผลกระทบของปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลข้ามวิภาค ซึ่งลดผลกระทบของปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลข้ามวิภาคที่เกิดจากผลกระทบของการเพิ่มอุณหภูมิ ดังนั้นจึงสามารถสังเกตเห็นได้แต่ผลกระทบของอุณหภูมิต่อค่าคงที่อัตรา ที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเชิงเคมีเพิ่มขึ้นจากกฎของอาร์เรเนียส และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบที่มีตัวทำละลายร่วมกับไม่มีตัวทำละลาย ระบบที่ไม่มีตัวทำละลายร่วม ค่าคงที่อัตราจะสูงกว่าอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากผลกระทบของตัวทำละลายร่วมเข้าไปลดความเข้มข้นของเมทานอลในวิภาคที่ทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน ดังนั้นระบบที่ไม่มีตัวทำละลายร่วมจึงมีค่าคงที่อัตราต่ำกว่าระบบที่มีตัวทำละลายร่วมอยู่ในระบบ นอกจากนี้ผลการทดลองยังพบว่า ค่าคงที่อัตราของระบบที่มีและไม่มีตัวทำละลายร่วม จะมีค่าเข้าใกล้กันมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งเป็นการสนับสนุนคำอธิบายว่าการเพิ่มอุณหภูมิจะช่วยเมทานอลและน้ำมันพืชละลายเข้าด้วยกันได้ง่ายขึ้น

#### 4.5.3 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมของวิภาคเมทานอลและน้ำมันพืช

ในการอธิบายถึงผลกระทบของตัวทำละลายร่วมในสถานะที่มีและไม่มีตัวทำละลายร่วม ได้อ้างพฤติกรรมของวิภาคเมทานอลและน้ำมันพืชว่าการเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้เมทานอลและน้ำมันพืชสามารถละลายเข้าด้วยกันได้ง่ายขึ้น และเป็นการลดความเข้มข้นของเมทานอลในวิภาคที่ทำปฏิกิริยา ดังนั้นการศึกษาในขั้นตอนนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการละลายของเมทานอลและน้ำมันพืชจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ โดยได้ทดลองด้วยวิธีเดียวกับศึกษาพฤติกรรมของวิภาคระหว่างเมทานอลและน้ำมันปาล์มโอเลอินที่สภาวะอุณหภูมิสูง ดังที่แสดงในรูปที่ 16 โดยการเก็บสารจะเก็บจากจากท่อเก็บสารที่อยู่บริเวณกันถึงเท่านั้น ซึ่งหากภายในเตาปฏิกรณ์มีสองวิภาค สารที่เก็บได้ควรจะเป็นเฉพาะวิภาคที่อยู่ด้านล่างเท่านั้น โดยการทดลองทำที่สภาวะอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 18:1 ไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิที่ 190 ถึง 60 องศาเซลเซียส และไม่ผสมตัวทำละลายร่วมในระบบ โดยสำหรับระบบที่มีการปั่น จะทำการปั่นจนที่ความเร็วรอบเท่ากับ 600 รอบต่อนาที

**ตารางที่ 8** อัตราส่วนของน้ำมันพืชและเมทานอลที่เก็บได้ของระบบที่มีการปั่นกวน 600 รอบต่อนาที กับระบบที่ไม่มีการปั่นกวน ที่อุณหภูมิ 190 ถึง 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 18:1

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	น้ำหนักน้ำมันพืช <sub>5</sub> น้ำหนักน้ำมันพืช <sub>7</sub> + น้ำหนักเมทานอล <sub>7</sub>	
	ระบบที่มีการปั่นกวน	ระบบที่ไม่มีการปั่นกวน
190	64	64
140	62	69
90	60	93
60	60	95

ในระบบที่มีการปั่นกวานที่ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำการทดลองที่ 190 องศาเซลเซียส พบว่าในอัตราส่วนของน้ำมันพืชต่อสารทั้งหมดที่เก็บได้เท่ากันทั้งในระบบที่มีหรือไม่มีการปั่นกวาน ซึ่งสำหรับระบบที่ไม่มีการปั่นกวาน ภูมิภาคของน้ำมันพืชควรที่จะจมอยู่ที่ก้นถัง เพราะน้ำมันพืชมีความเข้มข้นสูงกว่าเมทานอล ดังนั้นจึงควรมีอัตราส่วนของน้ำมันพืชต่อสารทั้งหมดที่เก็บได้ที่สูงกว่า ดังนั้นผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส น้ำมันพืชและเมทานอลละลายเข้าด้วยกันได้เป็นอย่างดีจนอาจเป็นภูมิภาคเดียว ทำให้ไม่มีความแตกต่างของอัตราส่วนของน้ำมันพืชต่อน้ำมันพืชและเมทานอลอีกต่อไป

ส่วนที่อุณหภูมิต่ำลงมาเป็น 140 90 และ 60 องศาเซลเซียส ระบบที่ไม่มีการปั่นกวานจะมีอัตราส่วนของน้ำมันพืชต่อสารทั้งหมดที่เก็บได้สูงกว่าระบบที่มีการปั่นกวาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในระบบที่ไม่มีการปั่นกวาน น้ำมันพืชและเมทานอลแตกออกเป็นสองภูมิภาค โดยในระบบที่ไม่มีการปั่นกวาน น้ำมันพืชจะตกลงมาที่ก้นถังเนื่องจากมีความเข้มข้นที่สูงกว่าเมทานอล โดยจะสามารถสังเกตเห็นได้ว่ายิ่งอุณหภูมิต่ำค่าที่ต่ำลง ความแตกต่างของอัตราส่วนน้ำมันพืชต่อสารทั้งหมดที่เก็บได้ในระบบที่มีการปั่นกวานกับระบบที่ไม่มีการปั่นกวานจะมีค่าที่สูงมากขึ้นตาม ดังนั้นผลกระทบของการอุณหภูมิที่สูงจะส่งผลให้เมทานอลและน้ำมันพืชสามารถละลายเข้าด้วยกันได้มากขึ้นจริง ซึ่งการละลายเข้าด้วยกันที่มากขึ้นของเมทานอลและน้ำมันพืชนี้ จะส่งผลให้ความเข้มข้นของเมทานอลในภูมิภาคของเมทานอลซึ่งเป็นภูมิภาคที่มีตัวเร่งปฏิกิริยามีความเข้มข้นของเมทานอลที่ต่ำลง และอัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์รีฟิเคชันต่ำลง

### บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาการใช้ตัวทำละลายร่วมในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มโอเลอินและเมทานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์เป็นโซเดียมฟอสเฟตสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. พฤติกรรมของการเกิดปฏิกิริยาของเมทานอลในสภาวะเมทานอลมากเกินไป ไม่สามารถสรุปอยู่ในรูปปฏิกิริยาพื้นฐานได้ และเป็นปฏิกิริยาเชิงซ้อนที่ต้องทำการศึกษาเพิ่มเติม
2. พฤติกรรมเกิดปฏิกิริยาของไตรกลีเซอไรด์โดยในสภาวะเมทานอลมากเกินไป สามารถเขียนอยู่ในรูปปฏิกิริยาอันดับหนึ่งได้อย่างแม่นยำ โดยเฉพาะที่อุณหภูมิเท่ากับ 190 องศาเซลเซียส
3. การใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายร่วม ส่งผลให้การทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันเกิดช้าลง โดยเกิดจากปฏิกิริยาข้างเคียง
4. การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิเท่ากับ 190 องศาเซลเซียส ผลกระทบของปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลข้ามวิภาคต่ำมากและสามารถละลายได้ และการใส่ตัวทำละลายร่วมเข้าไปในระบบไม่ส่งผลต่อการละลายระหว่างวิภาคอีกต่อไป และจะส่งผลเสียเป็นการเจือจางแทน
5. การละลายเข้าด้วยกันที่มากเกินไปของเมทานอลและน้ำมันพืช จะส่งผลให้การทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มโอเลอินเกิดช้าลง เนื่องจากการเป็นการลดลงของความเข้มข้นของเมทานอลในวิภาคที่เกิดปฏิกิริยา ดังนั้นการเติมตัวทำละลายร่วมเข้าไปในระบบจึงส่งผลให้ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันเกิดช้าลง
6. สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันในงานวิจัยฉบับนี้คือ 90 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 18:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อย 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช ความเร็วในการปั่นกววน 600 รอบต่อนาที โดยร้อยละโดยน้ำหนักของแพดดีเอซิดเมทิลเอสเทอร์มากกว่าร้อยละ 80 ที่เวลา 30 นาที

### บทที่ 6 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยฉบับนี้พบว่า การลดความเข้มข้นของเมทานอลในวัฏภาคของเมทานอลซึ่งเป็นวัฏภาคที่ห่อหุ้มตัวเร่งปฏิกิริยาและเป็นวัฏภาคที่เกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน จะมีอิทธิพลให้ปฏิกิริยาเกิดช้าลง โดยไม่สามารถอธิบายกลไกของการเกิดปฏิกิริยาได้อย่างชัดเจน ซึ่งต้องการศึกษาเพิ่มเติมสำหรับอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

ในการตั้งสมมุติฐานว่าความเข้มข้นของเมทานอลในวัฏภาคของวัฏภาคที่เกิดปฏิกิริยาส่งอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันได้อย่างไร สามารถตั้งสมมุติฐานได้ว่า เมทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต อาจทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นสารมัธยันต์บนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา และสารมัธยันต์ที่เกิดขึ้นจะไปทำปฏิกิริยากับน้ำมันพืชต่อ ซึ่งสารมัธยันต์นี้อาจเกิดขึ้นเป็นชั้นบางๆ เพียงไม่กี่โมเลกุลบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต หรือเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและสลายตัวไปในทันทีที่เกิดสารมัธยันต์

การพิสูจน์ว่าสารมัธยันต์เกิดขึ้นจริง ในกรณีที่ง่ายที่สุดและสามารถพิสูจน์ในเชิงรูปธรรมได้ คือการที่สารมัธยันต์เกิดเป็นชั้นบางๆ อย่างถาวรบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา หรือจะสลายไปก็ต่อเมื่อทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันแล้วเท่านั้น ซึ่งหากเป็นในกรณีนี้ สามารถพิสูจน์ได้ด้วยการทำการทดลอง โดยมีโครงสร้างของการทดลองเป็นดังนี้ นำโซเดียมฟอสเฟตไปทำปฏิกิริยากับเมทานอลก่อน ซึ่งอาจทดลองทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ ในสภาวะความดันสูง หลังจากนั้นโซเดียมฟอสเฟตที่ได้จากการทำปฏิกิริยากับเมทานอลมาอบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ เพื่อไล่เอาเมทานอลที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยากับโซเดียมฟอสเฟตออกให้เหลือเพียงเมทานอลที่ทำปฏิกิริยากับโซเดียมฟอสเฟตแล้วบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่านั้น หลังจากนั้นนำโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านการอบแห้งไปชุบด้วยน้ำมันพืช และนำไปทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ หากเกิดสารมัธยันต์ขึ้นจริง อาจเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันได้บ้างและต้องมีน้ำมันไบโอดีเซลเกิดขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี โดยจะสารต่างๆ ที่เกาะบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเฮปแทน

อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีความน่าจะเป็นสูงมากที่จะตรวจไม่เจอน้ำมันไบโอดีเซลในสารที่ชะออกมา เนื่องจากปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ ซึ่งปริมาณของเมทานอลที่ทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตอาจมีน้อยมาก จนแทบไม่เกิดปฏิกิริยาเลยเนื่องจากสมดุลการเกิดปฏิกิริยาทางเทอร์โมไดนามิกส์ นอกจากนี้ หากเกิดน้ำมันไบโอดีเซลขึ้นจริง ก็จะเกิดในปริมาณที่น้อยมากๆ ซึ่งจะส่งผลให้การวิเคราะห์ด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟีทำได้ยากและเป็นอันตรายต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ เนื่องจากการวิเคราะห์สารที่มีความเข้มข้นต่ำจะต้องใช้วิธีวิเคราะห์แบบ Splitless ซึ่งต้องให้สารเข้าไปในคอลัมน์ในปริมาณมหาศาล และอาจส่งผลให้สารที่ไม่สามารถระเหยได้ หรือสลายตัวก่อนการระเหยเข้าไปทำลายคอลัมน์ โลเนอร์ และหัวตรวจวัดไอออน

ในอีกกรณีหนึ่ง หากสารมัธยันต์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและสลายตัวไปในทันทีที่เกิด สารมัธยันต์ สามารถทำการศึกษาได้ในรูปแบบนามธรรมเท่านั้น คือการศึกษาทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทราน เอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยมุ่งเน้นไปที่กลไกของการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งการศึกษาในลักษณะนี้ จำเป็นต้องตัดข้อจำกัดต่างๆ ที่จะส่งอิทธิพลให้การเกิดปฏิกิริยามีความซับซ้อนและการวิเคราะห์ทำได้ยากออกไป โดยสามารถแบ่งโครงสร้างการ ทดลองได้ดังนี้

1. ลดจำนวนวัฏภาคในการทำปฏิกิริยา เนื่องจากการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ เป็นการทำให้ปฏิกิริยาสามวัฏภาค ซึ่งจะส่งผลให้การวิเคราะห์ผลทางจลนพลศาสตร์ทำได้ ยากขึ้น และสลับซับซ้อน ดังนั้นอาจไปศึกษาการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ขึ้นไป เพื่อลดจำนวนวัฏภาคให้เหลือเพียง 2 วัฏภาคคือของแข็งและของเหลว หรือทำการทดลองในสถานะที่อุณหภูมิต่ำ แต่ใช้ตัวทำละลายร่วมช่วยลดจำนวนวัฏภาคลงให้เหลือเพียง 2 วัฏภาค

2. มุ่งเน้นไปที่การศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาของเมทานอล ซึ่งในขั้นตอนนี้อาจเป็นที่ต้องอนุมานให้ ความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์เป็นค่าคงที่ ดังนั้นต้องให้ไตรกลีเซอไรด์เป็นสารที่ใส่เข้าไปมากเกินพอในการทำ ปฏิกิริยาแทน ซึ่งจะเป็นการใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชที่ต่ำมาก โดยผลการทดลองที่ได้คาดว่า จะสามารถสร้างเป็นสมการเส้นตรง เพื่อเป็นการอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาในรูปแบบโมเดลการเกิดปฏิกิริยาของ Eley ridel โดยอธิบายว่า สาร A หรือในที่นี้คือเมทานอล จะถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนสาร B หรือในที่นี้คือไตรกลีเซอไรด์ไม่จำเป็นต้องดูดซับบนพื้นผิวก็สามารถทำปฏิกิริยาได้ โดยการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นการทำ ปฏิกิริยาระหว่างเมทานอลที่ถูกดูดซับบนพื้นผิว กับสาร B ที่ไม่ได้ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

3. ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง จุดเด่นที่สำคัญที่สุดของการวิเคราะห์ผลด้วยสมการเส้นตรง คือสามารถ พิจารณาแนวโน้มของความผิดพลาดระหว่างโมเดลที่สร้างขึ้นกับจุดของการทดลอง โดยหลักการขั้นพื้นฐานในการ วิเคราะห์คือ หากความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีแนวโน้ม แสดงให้เห็นว่าโมเดลที่ใช้ในการอธิบายไม่เหมาะสม แต่หาก ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเป็นแบบสุ่ม และค่า  $r^2$  มีค่าที่สูง สามารถอนุมานได้ว่าโมเดลที่เอามาใช้อธิบาย เป็นโมเดลที่ เหมาะสมดีแล้ว



4. ทำการศึกษาที่สภาวะต่างๆ โดยมีตัวแปรหลักที่ควรศึกษาสองตัวแปร ตัวแปรแรกคือความเข้มข้นของเมทานอล ซึ่งจะเป็นการทำการการศึกษาเพื่อดูแบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาว่าสามารถใช้โมเดลของ Eley Rideal ในการอธิบายได้หรือไม่ และตัวแปรที่สองคืออุณหภูมิ โดยเป็นการศึกษาเพื่อดูการสร้างสมการอาร์เรเนียสของการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งหากสมการอาร์เรเนียสที่สร้างขึ้นมีพฤติกรรมที่แปรผันกับส่วนกลับของอุณหภูมิเป็นเส้นตรง จะทำให้อนุมานได้ว่ากลไกการเชิงเคมีเป็นกลไกที่ควบคุมการเกิดปฏิกิริยา และโมเดลที่สร้างขึ้น เป็นโมเดลที่อธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาเชิงเคมีที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต แต่หากสมการอาร์เรเนียสที่สร้างขึ้นไม่ได้มีลักษณะที่แปรผันกับส่วนกลับของอุณหภูมิเป็นเส้นตรง จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์และศึกษาเพิ่มเติมถึงกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น และอาจต้องปรับโครงสร้างของการศึกษาใหม่

5. ทดลองทำปฏิกิริยาที่สภาวะอื่นๆ แต่ยังคงอยู่ในสภาวะที่มีสองตัวแปร เพื่อแสดงให้เห็นว่าโมเดลที่พัฒนาขึ้นมาสามารถใช้อธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่สภาวะต่างๆ นอกเหนือจากสภาวะที่เอามาใช้สร้างโมเดลได้หรือไม่ รวมถึงพัฒนาโมเดลให้สามารถอธิบายในสภาวะที่ไม่สามารถอนุมานความเข้มข้นของสารตัวใดตัวหนึ่งเป็นค่าคงที่ได้



## บรรณานุกรม

1. Talha, N.S. and S. Sulaiman, *Overview of catalysts in biodiesel production*. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2016. 11(1): p. 439-448.
2. Lam, M.K., K.T. Lee, and A.R. Mohamed, *Homogeneous, heterogeneous and enzymatic catalysis for transesterification of high free fatty acid oil (waste cooking oil) to biodiesel: a review*. Biotechnology advances, 2010. 28(4): p. 500-518.
3. Singh, D., et al., *A review on feedstocks, production processes, and yield for different generations of biodiesel*. Fuel, 2020. 262: p. 116553.
4. Atadashi, I., *Purification of crude biodiesel using dry washing and membrane technologies*. Alexandria Engineering Journal, 2015. 54(4): p. 1265-1272.
5. Gupta, J., M. Agarwal, and A. Dalai, *An overview on the recent advancements of sustainable heterogeneous catalysts and prominent continuous reactor for biodiesel production*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2020.
6. ทินกร, ก., *ทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มโอเลอินโดยใช้โซเดียมฟอสเฟตที่เคลือบ ผังลงบนตัวรองรับอะลูมินา*. 2014.
7. Roschat, W., et al., *Economical and green biodiesel production process using river snail shells-derived heterogeneous catalyst and co-solvent method*. Bioresource technology, 2016. 209: p. 343-350.
8. Sahani, S., S. Banerjee, and Y.C. Sharma, *Study of co-solvent effect on production of biodiesel from Schleicheria Oleosa oil using a mixed metal oxide as a potential catalyst*. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2018. 86: p. 42-56.
9. Dias, A.P.S., et al., *Solvent assisted biodiesel production by co-processing beef tallow and soybean oil over calcium catalysts*. Waste and Biomass Valorization, 2020. 11(11): p. 6249-6259.
10. Barabás, I. and I.-A. Todoruț, *Biodiesel quality, standards and properties*. Biodiesel-quality, emissions and by-products, 2011: p. 3-28.

11. Bernal, J.M., et al., *Supercritical synthesis of biodiesel*. *Molecules*, 2012. 17(7): p. 8696-8719.
12. Akgün, N., A. Yaprakçı, and C. Candemir, *Esterification of olive acid oil in supercritical methanol*. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2010. 112(5): p. 593-599.
13. Fukuda, H., A. Kondo, and H. Noda, *Biodiesel fuel production by transesterification of oils*. *Journal of bioscience and bioengineering*, 2001. 92(5): p. 405-416.
14. Stojković, I.J., et al., *Purification technologies for crude biodiesel obtained by alkali-catalyzed transesterification*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014. 32: p. 1-15.
15. Klaewkla, R., M. Arend, and W.F. Hoelderich, *A review of mass transfer controlling the reaction rate in heterogeneous catalytic systems*. Vol. 5. 2011: INTECH Open Access Publisher London.
16. Medvedev, O., *Diffusion coefficients in multicomponent mixtures*. 2005.
17. H Scott, F., *Elements of chemical reaction engineering*. Fifth Edition ed. 2006: Prentice Hall Profesional.
18. Lee, A.F., et al., *Heterogeneous catalysis for sustainable biodiesel production via esterification and transesterification*. *Chemical Society Reviews*, 2014. 43(22): p. 7887-7916.
19. Yoo, S.J., et al., *Synthesis of biodiesel from rapeseed oil using supercritical methanol with metal oxide catalysts*. *Bioresource technology*, 2010. 101(22): p. 8686-8689.
20. Malins, K., *The potential of  $K_3PO_4$ ,  $K_2CO_3$ ,  $Na_3PO_4$  and  $Na_2CO_3$  as reusable alkaline catalysts for practical application in biodiesel production*. *Fuel Processing Technology*, 2018. 179: p. 302-312.
21. Jiang, S., F. Zhang, and L. Pan, *Sodium phosphate as a solid catalyst for biodiesel preparation*. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2010. 27(1): p. 137-144.
22. De Filippis, P., C. Borgianni, and M. Paolucci, *Rapeseed oil transesterification catalyzed by sodium phosphates*. *Energy & fuels*, 2005. 19(6): p. 2225-2228.

23. Lukić, I., et al., *Kinetics of sunflower and used vegetable oil methanolysis catalyzed by CaO· ZnO*. Fuel, 2013. 113: p. 367-378.
24. Veljković, V.B., et al., *Kinetics of sunflower oil methanolysis catalyzed by calcium oxide*. Fuel, 2009. 88(9): p. 1554-1562.
25. Labib, T.M., et al., *Kinetic study and techno-economic indicators for base catalyzed transesterification of Jatropha oil*. Egyptian Journal of Petroleum, 2013. 22(1): p. 9-16.
26. Todorović, Z.B., et al., *The effects of cosolvents on homogeneously and heterogeneously base-catalyzed methanolysis of sunflower oil*. Fuel, 2013. 107: p. 493-502.
27. Hájek, M., et al., *The use of cosolvents in heterogeneously and homogeneously catalysed methanolysis of oil*. Journal of Environmental Management, 2020. 262: p. 110295.
28. Todorović, Z.B., et al., *Optimization of CaO-catalyzed sunflower oil methanolysis with crude biodiesel as a cosolvent*. Fuel, 2019. 237: p. 903-910.
29. Wan, L., H. Liu, and D. Skala, *Biodiesel production from soybean oil in subcritical methanol using MnCO<sub>3</sub>/ZnO as catalyst*. Applied Catalysis B: Environmental, 2014. 152: p. 352-359.
30. İlgen, O. and A.N. Akin, *Determination of reaction orders for the transesterification of canola oil with methanol by using KOH/MgO as a heterogeneous catalyst*. Applied Catalysis B: Environmental, 2012. 126: p. 342-346.
31. Thinnakorn, K. and J. Tscheikuna, *Transesterification of palm olein using sodium phosphate impregnated on an alumina support*. Applied Catalysis A: General, 2014. 484: p. 122-133.
32. Saravanan, A., et al., *Process optimization and kinetic studies for the production of biodiesel from Artocarpus heterophyllus oil using modified mixed quail waste catalyst*. Fuel, 2022. 330: p. 125644.
33. Pavlović, S.M., et al., *A CaO/zeolite-based catalyst obtained from waste chicken eggshell and coal fly ash for biodiesel production*. Fuel, 2020. 267: p. 117171.

34. Boshu, J.A., A.O. Anaga, and I.U. Asuzu, *Chemical composition of the marc of a wild tropical plant Tacca involucrata (Schumacher and Thonn, 1827)*. Food and Nutrition Sciences, 2015. 6(01): p. 135.



## ภาคผนวก

### ภาคผนวก ก การวิเคราะห์

#### ก-1 การวิเคราะห์โดยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี

การวิเคราะห์โดยใช้วิธีแก๊สโครมาโทกราฟี เป็นวิธีวิเคราะห์หาองค์ประกอบของสาร โดยใช้ใช้ความแตกต่างระหว่างการดูดซับและคายซับที่แตกต่างกันของสารแต่ละชนิด แต่อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟีในงานวิจัยฉบับนี้ ใช้อุปกรณ์ตรวจวัดเป็น Flame ionisation detector ซึ่งจะตอบสนองต่อสารเคมีแตกต่างกัน ดังนั้นจึงใช้ค่าแฟกเตอร์ตอบสนองมาช่วยในการวิเคราะห์ เพื่อปรับให้การตอบสนองของสารแต่ละชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีนิยามดังนี้

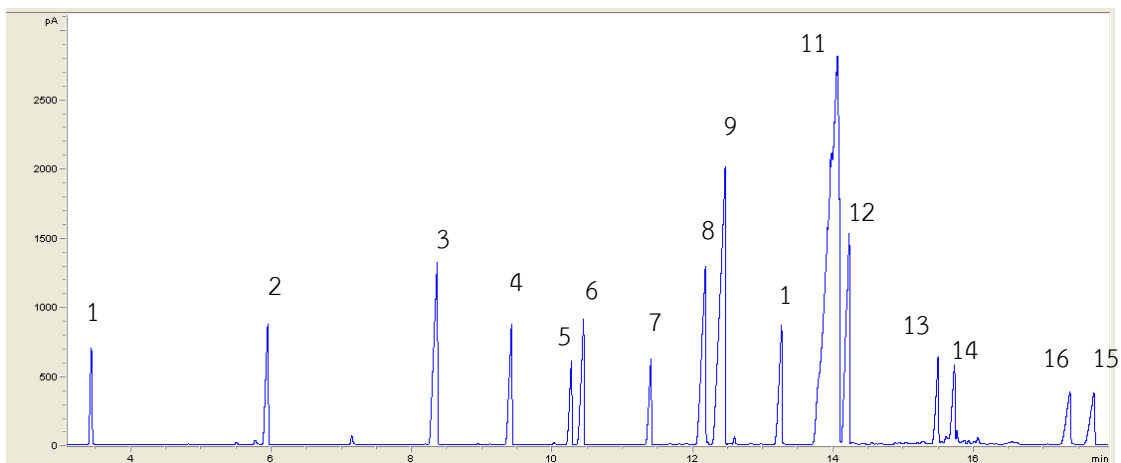
$$\text{ค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของสาร}_i = \frac{\frac{\text{พื้นที่จุดยอดของสาร}_i}{\text{มวลของสาร}_i}}{\frac{\text{พื้นที่จุดยอดของสารมาตรฐาน}}{\text{มวลของสารมาตรฐาน}}}$$

### ก-1.1 ตำแหน่งพิกและแฟคเตอร์ตอบสนอง

ตำแหน่งและพื้นที่จุดยอดของเมทิลเอสเทอร์หาจากการวิเคราะห์สารมาตรฐาน FAME ซึ่งเป็นสารผสมของเมทิลเอสเทอร์ความยาวคาบอนระหว่าง C8:0 ไปจนถึง C22:0 ซึ่งทางผู้ผลิตจะระบุอัตราส่วนและชนิดของสารทุกชนิดที่ผสมอยู่ในสารมาตรฐาน FAME ดังนั้นเมื่อนำสารมาตรฐาน FAME ไปวิเคราะห์วิธีแก๊สโครมาโทกราฟีจะสามารถคำนวณหาค่าแฟคเตอร์ตอบสนองของเมทิลเอสเทอร์ทุกชนิดได้ โดยรายละเอียดของค่าแฟคเตอร์ตอบสนองแสดงอยู่ในตารางที่ 9 และตำแหน่งของพิกแสดงอยู่ในรูปที่ 21

ตารางที่ 9 ค่าแฟคเตอร์ตอบสนองของเมทิลเอสเทอร์โดยมีเมทิลเดคาโนเอตเป็นสารมาตรฐาน

No	Component	Area	Mass of component (g)	Response factor
1	METHYL OCTANOATE (Methyl C8:0)	1301	1.9	0.96
2	METHYL DECANOATE (Methyl C10:0) (สารมาตรฐาน)	2299	3.21	1.00
3	METHYL LAURATE (Methyl C12:0)	4840	6.37	1.06
4	METHYL TRIDECANOATE (Methyl C13:0)	2459	3.18	1.08
5	MYRISTOLEIC ACID METHYL ester (Methyl C14:1)	1405	1.88	1.04
6	METHYL MYRISTATE (Methyl C14:0)	2538	3.21	1.10
7	METHYL PENTADECANOATE (Methyl C15:0)	1518	1.9	1.12
8	METHYL PALMITOLEATE (Methyl C16:1)	5072	6.41	1.10
9	METHYL PALMITATE (Methyl C16:0)	10510	12.9	1.14
10	METHYL HEPTADECANOATE (Methyl C17:0)	2547	3.08	1.15
11	METHYL LINOLENATE (Methyl C18:3)+ METHYL LINOLEATE (Methyl C18:2)+ CIS-9-OLEIC ACID METHYL ESTER+tran9 (C18:1)	30458	41.44	1.03
12	METHYL STEARATE (18:0)	5397	6.44	1.17
13	METHYL CIS-11 EICOSENOATE (Methyl C20:1)	1664	1.91	1.22
14	METHYL ARACHIDATE (Methyl C20:0)	1659	1.88	1.23
15	METHYL ERUCATE (Methyl C22:1)	1569	1.89	1.16
16	METHYL BEHENATE (Methyl C22:0)	1604	1.89	1.19



รูปที่ 21 ตำแหน่งของพีคเมทิลเอสเทอร์

จากโครมาโตแกรมของเมทิลเอสเทอร์แสดงให้เห็นว่า เมทิลไลโนเลเอท เมทิลไลโนเลเนท และเมทิลโอเลอิก รวมอยู่ในพีคเดียวกันคือพีคที่ 11 แต่อย่างไรก็ตามในงานวิจัยฉบับนี้เป็นการวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมของตัวทำละลายร่วมและตัวแปรต่างๆ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ในเชิงเปรียบเทียบผลการทดลอง ดังนั้นจึงไม่ส่งผลกระทบในอธิบายผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยตัวอย่างการคำนวณแสดงอยู่ในตารางที่ 10 และมีวิธีการคำนวณดังนี้

จากสมการคำนวณในบทที่ 3

$$\text{ร้อยละโดยน้ำหนักของสาร} = \left[ \frac{1}{R.F._i} \times \frac{A_i}{A_S} \div \left( \frac{m}{m_S} \right) \right] \times 100 \quad (3.1)$$

โดย ตัวแปร  $R.F._i$  คือ ค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของสารที่ต้องการวิเคราะห์  
 ตัวแปร  $A_i$  คือ พื้นที่ใต้จุดยอดของสารที่ต้องการวิเคราะห์  
 ตัวแปร  $A_S$  คือ พื้นที่ใต้จุดยอดของสารมาตรฐานที่ต้องการวิเคราะห์  
 ตัวแปร  $m$  คือ น้ำหนักของสารที่ผสมเข้าไปในการวิเคราะห์  
 ตัวแปร  $m_S$  คือ น้ำหนักของสารมาตรฐาน

ยกตัวอย่างการคำนวณของ METHYL PALMITATE (Methyl C16:0)

ตัวแปร  $R.F._i$  เท่ากับ 1.14

ตัวแปร  $A_i$  เท่ากับ 32230

ตัวแปร  $A_S$  เท่ากับ 33824

ตัวแปร  $m$  เท่ากับ 1.01 กรัม

ตัวแปร  $m_S$  เท่ากับ 0.50 กรัม



ดังนั้น ร้อยละโดยน้ำหนักของสาร METHYL PALMITATE (Methyl C16:0)

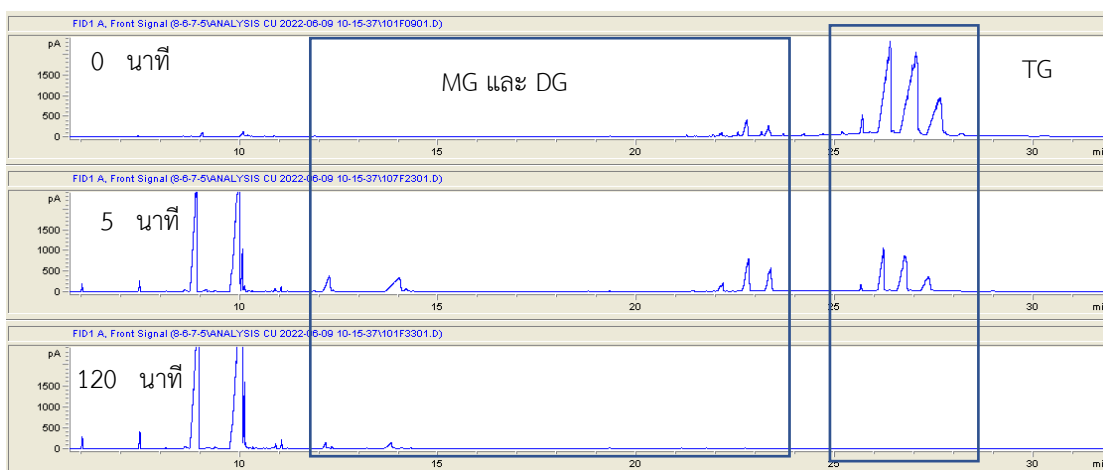
$$= \left[ \frac{1}{1.14} \times \frac{32230}{33824} \div \left( \frac{1.01}{0.52} \right) \right] \times 100 \quad (3.1)$$

$$= \text{ร้อยละ 41.4 โดยน้ำหนัก}$$

**ตารางที่ 10** ตัวอย่างการคำนวณหาร้อยละโดยน้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์

No	Component	R.F.	Area	Concentration of component (wt.%)
1	METHYL OCTANOATE (Methyl C8:0)	0.96	75	0.1
2	METHYL DECANOATE (Methyl C10:0) (สารมาตรฐาน)	1.00	33824	-
3	METHYL LAURATE (Methyl C12:0)	1.06	314	0.4
4	METHYL TRIDECANOATE (Methyl C13:0)	1.08	0	0.0
5	MYRISTOLEIC ACID METHYL ester (Methyl C14:1)	1.04	0	0.0
6	METHYL MYRISTATE (Methyl C14:0)	1.10	872	1.2
7	METHYL PENTADECANOATE (Methyl C15:0)	1.12	41	0.1
8	METHYL PALMITOLEATE (Methyl C16:1)	1.10	0	0.0
9	METHYL PALMITATE (Methyl C16:0)	1.14	32230	41.4
10	METHYL HEPTADECANOATE (Methyl C17:0)	1.15	80	0.1
11	METHYL LINOLENATE (Methyl C18:3)+ METHYL LINOLEATE (Methyl C18:2)+ CIS-9-OLEIC ACID METHYL ESTER+tran9 (C18:1)	1.03	35428	50.4
12	METHYL STEARATE (18:0)	1.17	3211	4.0
13	METHYL CIS-11 EICOSENOATE (Methyl C20:1)	1.22	268	0.3
14	METHYL ARACHIDATE (Methyl C20:0)	1.23	368	0.4
15	METHYL ERUCATE (Methyl C22:1)	1.16	26	0.0
16	METHYL BEHENATE (Methyl C22:0)	1.19	54	0.1
Sum of FAME wt%				98.5

ในการคำนวณหาความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์ในหน่วยโมลต่อลิตร จำเป็นต้องคำนวณหาร้อยละโดยน้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์มาก่อน โดยในการระบุพีคของไตรกลีเซอไรด์ ใช้การเทียบที่เวลาในการทำปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ ของน้ำมันปาล์มโอเลอิน โดยน้ำมันปาล์มโอเลอินเป็นสารประกอบที่ไตรกลีเซอไรด์เป็นส่วนมาก และรองลงมาคือไดกลีเซอไรด์ ซึ่งในการทำปฏิกิริยา เนื่องจากปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันมีไตรกลีเซอไรด์เป็นสารตั้งต้น เมื่อเทียบลักษณะของพีคที่เวลาต่างๆ พีคของไตรกลีเซอไรด์จะมีขนาดเล็กลง ส่วนในกรณีของไดกลีเซอไรด์และโมนอกลิเซอไรด์ พีคจะมีขนาดเพิ่มขึ้นในช่วงแรก และจะค่อยๆ ลดลงเมื่อไตรกลีเซอไรด์ที่เป็นสารตั้งต้นถูกใช้จนเหลือน้อย



รูปที่ 22 ตำแหน่งของพีคเหล่าไตรกลีเซอไรด์ ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ

ส่วนการหาค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของเหล่าไตรกลีเซอไรด์ งานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาเชิงเปรียบเทียบ ผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ดังนั้นสำหรับค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของไตรกลีเซอไรด์ ทำโดยวิเคราะห์น้ำมันปาล์มโอเลอิน และตั้งสมมุติฐานว่าสารทุกชนิดในน้ำมันปาล์มมีค่าแฟกเตอร์การตอบสนองที่เท่ากัน และเมื่อทำการรวมพื้นที่ใต้กราฟของพีคทุกพีค พบว่าพีคของเหล่าไตรกลีเซอไรด์ มีขนาดคิดเป็นเป็นร้อยละ 91 ของสารทั้งหมด ดังนั้นเมื่อตัวเลขไปแทนในสมการที่ซึ่งจะได้ค่าแฟกเตอร์ตอบสนองเท่ากับ 0.97 ดังที่ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของสารเหล่าไตรกลีเซอไรด์} &= \frac{\frac{\text{พื้นที่จุดยอดของสาร}_i}{\text{มวลของสาร}_i}}{\frac{\text{พื้นที่จุดยอดของสารมาตรฐาน}}{\text{มวลของสารมาตรฐาน}}} \\
 &= \frac{\frac{27237}{0.0972 \times 0.91}}{\frac{17753}{0.0559}} \\
 &= 0.97
 \end{aligned}$$

การคำนวณหาร้อยละโดยน้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์ ทำในลักษณะเดียวกับการหาร้อยละโดยน้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์ โดยมีวิธีคำนวณดังนี้

$$\text{ร้อยละโดยน้ำหนักของสาร} = \left[ \frac{1}{R.F._i} \times \frac{A_i}{A_S} \div \left( \frac{m}{m_S} \right) \right] \times 100 \quad (3.1)$$

โดย ตัวแปร R.F.<sub>i</sub> คือ ค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของสารที่ต้องการวิเคราะห์

ตัวแปร A<sub>i</sub> คือ พื้นที่ใต้จุดยอดของสารที่ต้องการวิเคราะห์

ตัวแปร A<sub>S</sub> คือ พื้นที่ใต้จุดยอดของสารมาตรฐานที่ต้องการวิเคราะห์

ตัวแปร m คือ น้ำหนักของสารที่ผสมเข้าไปในการวิเคราะห์

ตัวแปร m<sub>S</sub> คือ น้ำหนักของสารมาตรฐาน

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละโดยน้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์} &= \left[ \frac{1}{0.97} \times \frac{20625}{18332} \div \left( \frac{0.1126}{0.049} \right) \right] \times 100 \\ &= \text{ร้อยละ 50.8 โดยน้ำหนัก} \end{aligned}$$

### ก-1.2 มวลโมเลกุลมวลโมเลกุลเฉลี่ยของกรดไขมันในน้ำมันโอเลอินและมวลโมเลกุลเฉลี่ยของไตรกลีเซอไรด์

น้ำมันปาล์มโอเลอินเป็นสารซึ่งประกอบไปด้วยโมเลกุลของกรดไขมันหลายชนิด โดยในการหามวลโมเลกุลเฉลี่ยของกรดไขมันทำได้ด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์น้ำมันปาล์มโอเลอินด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟีโดยตรงไม่สามารถทำได้ เนื่องจากลักษณะทางโมเลกุลของเหล่าไตรกลีเซอไรด์มีความซับซ้อนสูง ทำให้ไม่สามารถแยกพีคของสารแต่ละชนิดให้ออกจากกันได้โดยสมบูรณ์ ยกตัวอย่าง เช่นไตรกลีเซอไรด์สามารถประกอบไปด้วยกรดปาล์มมิกทั้งสามโมเลกุล หรือประกอบไปด้วยกรดปาล์มมิกสองโมเลกุลและอีกโมเลกุลเป็นโอเลอิก ดังนั้นเพื่อทำให้สามารถหาปริมาณกรดไขมันแต่ละชนิดในน้ำมันโอเลอิน จึงจำเป็นต้องเอาน้ำมันปาล์มไปทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันก่อน เพื่อให้เปลี่ยนไปเป็นเมทิลเอสเทอร์ซึ่งมีความเสถียรมากขึ้นและสามารถแยกพีคของกรดไขมันแต่ละชนิดออกจากกันได้ โดยการหาค่ามวลโมเลกุลของกรดไขมันทำโดยเอามวลโมเลกุลของกรดไขมันแต่ละชนิดมาเฉลี่ยกันโดยถ่วงน้ำหนัก ส่วนการหามวลโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ คำนวณจากกรดไขมันเนื่องจากไตรกลีเซอไรด์หนึ่งโมเลกุลจะประกอบไปด้วยกรดไขมันโมเลกุลเกาะกับกลีเซอรอลหนึ่งโมกุล ดังนั้นมวลโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์จะมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 3 เท่าของมวลโมเลกุลของกรดไขมัน และบวกเข้าไปอีก 38 ซึ่งเกิดจากน้ำหนักของอะตอมคาร์บอนและไฮโดรเจนที่เพิ่มเข้ามา ลบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่หายไป ดังที่แสดงดังนี้

ตารางที่ 11 มวลโมเลกุลเฉลี่ยของกรดไขมัน

No	ชนิดของกรดไขมัน	ร้อยละโดยมวลของกรดไขมัน	มวลโมเลกุล
1	Lauric (C12:0)	0.5	200
2	Myristic (Methyl C14:0)	0.8	228
3	Palmitic (Methyl C16:0)	31.0	256
4	Llinolenic (Methyl C18:3)+ Linoleic (Methyl C18:2)+ Oleic (C18:1)	62.7	283
5	Stearic (18:0)	3.8	284
6	Eicosenoic (C20:1)	0.2	310
7	Eicosanoic (C20:0)	0.3	312
8	Erucate (C22:1)	0.4	337
มวลโมเลกุลเฉลี่ยของกรดไขมัน			273
มวลโมเลกุลเฉลี่ยของไตรกลีเซอไรด์			858

### ก-1.3 การคำนวณความเข้มข้นของเหล่าไตรกลีเซอไรด์

การคำนวณหาความเข้มข้นของเหล่าไตรกลีเซอไรด์ เป็นการคำนวณหาความเข้มข้นของเหล่าไตรกลีเซอไรด์ในหน่วยโมลต่อลิตร เพื่อใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน ซึ่งตั้งสมมุติฐานว่า ภายในเตาปฏิกรณ์มีการปั่นกวอย่างรุนแรง และตัวอย่างที่เก็บออกมาถือว่าเป็นตัวแทนของสารทั้งหมดในเตาปฏิกรณ์

การคำนวณจะใช้ปริมาตรของสารทั้งหมดที่เก็บได้ในแต่ละครั้ง น้ำหนักของวัฏภาคน้ำมันพืชที่เหลืออยู่หลังจากกำจัดวัฏภาคเมทานอล ร้อยละโดยน้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์ และมวลโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ โดยยกตัวอย่างการคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{ความเข้มข้นของเหล่าไตรกลีเซอไรด์} &= \frac{\text{น้ำหนักของวัฏภาคน้ำมันพืช} \times \text{ร้อยละโดยน้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์}}{\text{มวลโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์} \times \text{ปริมาตรของสารทั้งหมดที่เก็บ}} \\
 &= \frac{2.2 \times \frac{50.8}{100}}{858 \times \frac{4.5}{1000}} \\
 &= 0.29 \text{ โมลต่อลิตร}
 \end{aligned}$$

## ก-2 การวิเคราะห์โดยวิธีไทเทรต

### ก-2.1 การไทเทรตหากรดไขมันอิสระในสารตั้งต้น

จากวิธีการไทเทรตในหัวข้อ 3.7.1

$$\frac{(B_1) \times M \times 25.6}{W} = \text{กรดโอเลอิก \% โดยน้ำหนัก}$$

โดย  $B_1$  คือ ปริมาณสารละลายไฮโดรคลอริก ในหน่วยมิลลิลิตร

C คือ ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรคลอริกในหน่วย โมลต่อลิตร

W คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่นำมาไทเทรตในหน่วยกรัม

$$\frac{1.5 \times 0.0172 \times 28.2}{5.65} = \text{กรดโอเลอิก \% โดยน้ำหนัก}$$

$$\text{กรดโอเลอิก} = 0.12\% \text{ โดยน้ำหนัก}$$

จากคำนวณหาค่าความเป็นกรดสามารถคำนวณจากร้อยละโดยน้ำหนักของกรดปาล์มติกได้<sup>[34]</sup>  
 เนื่องจากค่าความเป็นกรดสามารถหาได้จากปริมาณของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ต้องใช้ในการทำสะเทินสาร  
 ตัวอย่าง

$$\begin{aligned} \text{ค่าความเป็นกรด (Acid Value)} &= \text{FFA\%} \times \frac{\text{มวลโมเลกุลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์}}{\text{มวลโมเลกุลของโอเลอิก}} \times \frac{1000}{100} \text{ (mg KOH/g.oil)} \\ &= 0.12 \times \frac{56}{282} \times \frac{1000}{100} \text{ (mg KOH/g.oil)} \\ &= 0.25 \text{ (mg KOH/g.oil)} \end{aligned}$$

### ก-2.2 การไทเทรตหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกละลายจากตัวทำละลายร่วม

จากวิธีการไทเทรตในหัวข้อ 3.7.2

$$\frac{(A_2 - A_{\text{blank}}) \times C \times 163.94}{30 \times W} = \text{Na}_3\text{PO}_4 \text{ \% โดยน้ำหนัก}$$

โดย  $A_{\text{blank}}$  คือ ปริมาณสารละลายไฮโดรคลอริก ในหน่วยมิลลิลิตร ของการไทเทรตตัวอย่างแรก

$A_2$  คือ ปริมาณสารละลายไฮโดรคลอริก ในหน่วยมิลลิลิตร ของการไทเทรตตัวอย่างที่สอง

$C$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรคลอริกในหน่วย โมลต่อลิตร

$W$  คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่นำมาไทเทรตในหน่วยกรัม

การคำนวณการละลายของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟสในเตตระไฮโดรฟูแรน

$$\frac{(0-0) \times 0.1 \times 163.94}{30 \times 5.08} = \text{Na}_3\text{PO}_4 \text{ \% โดยน้ำหนักในสารตัวอย่าง}$$

$$\text{Na}_3\text{PO}_4 = 0 \text{ \% โดยน้ำหนักในสารตัวอย่าง}$$

การคำนวณการละลายของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟสในอะซิโตน

$$\frac{(0-0) \times 0.1 \times 163.94}{3000 \times 5} = \text{Na}_3\text{PO}_4 \text{ \% โดยน้ำหนักในสารตัวอย่าง}$$

$$\text{Na}_3\text{PO}_4 = 0 \text{ \% โดยน้ำหนักในสารตัวอย่าง}$$

## ภาคผนวก ข ผลการทดลอง

## ข-1 การศึกษาเบื้องต้นเพื่อเลือกสภาวะพื้นฐานและออกแบบการทดลอง

ตารางที่ 12 ผลกระทบของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อความสัมพันธ์ของร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซล ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 18:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 210 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช

เวลา (นาทีก)	ร้อยละโดยน้ำหนักของ น้ำมันไบโอดีเซล
0	0
5	57.4
10	86.4
15	94.3
20	94.4
30	95.6
40	95.6
50	95.9
60	94.3
90	94.7
120	94.9
150	94.2
180	93.3
210	93.4
240	93.6

ตารางที่ 13 ผลกระทบของปฏิกิริยาข้างเคียงของน้ำมันไบโอดีเซล ต่อความสัมพันธ์ของร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซลและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 210 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนักน้ำมันไบโอดีเซล

เวลา (นาท)	ร้อยละโดยน้ำหนักของ น้ำมันไบโอดีเซล	ร้อยละโดยน้ำหนักของ กรดไขมันอิสระ โดยใช้ R.F. = 1.06 (R.F. ของกรดลอริก)
0	98.5	0.0
5	98.1	1.4
10	98.3	1.3
15	98.3	1.3
20	97.5	1.4
30	97.9	1.5
40	96.7	1.5
50	97.7	1.6
60	97.4	1.5
90	96.8	1.4
120	97.5	1.7
150	96.4	1.7
180	96.1	1.8
210	96.2	1.8
240	95.7	1.7



**ตารางที่ 14** ผลกระทบของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกะ ต่อความสัมพันธ์ของร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซลและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 18:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 210 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนักน้ำมันไบโอดีเซล

เวลา (นาทึ)	ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซล			
	ตัวเร่งปฏิกิริยากะที่ 1	ตัวเร่งปฏิกิริยากะที่ 2	ตัวเร่งปฏิกิริยากะที่ 3	ตัวเร่งปฏิกิริยากะที่ 4
0	0	0	0	0
5	66.3	44.0	73.6	57.4
10	92.3	72.3	93.8	86.4
15	96.4	85.8	96.4	94.3
20	95.8	90.5	95.6	94.4
30	96.7	91.5	95.9	95.6
40	94.3	94.5	95.5	95.6
50	95.0	93.1	94.9	95.9
60	94.9	93.8	95.2	94.3
90	95.2	93.8	95.2	94.7
120	94.9	94.0	93.8	94.9

**ตารางที่ 15** ผลกระทบของระยะเวลาในการเก็บรักษาตัวเร่งปฏิกิริยา ต่อความสัมพันธ์ของร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซลและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 18:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 210 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช

เวลา (นาทึ)	ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซล	
	ระยะเวลาในการเก็บรักษา 1 วัน	ระยะเวลาในการเก็บรักษา 2 สัปดาห์
0	0	0
5	56.8	57.1
10	86.0	89.8
15	93.8	95.5
20	93.9	95.3
30	95.2	95.2
40	95.1	95.2
50	95.3	95.5
60	93.8	94.9
90	94.0	94.3
120	94.2	95.1

**ตารางที่ 16** ผลกระทบของสภาวะการทดลอง ต่อความสัมพันธ์ของร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซลและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ก่อนปรับสภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 18:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 210 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช หลังปรับสภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 18:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 190 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช

เวลา (นาท)	ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซล	
	ก่อนปรับสภาวะ	หลังปรับสภาวะ
0	0	0.0
5	57.1	38.7
10	89.8	59.5
15	95.5	75.0
20	95.3	84.2
30	95.2	93.2
40	95.2	96.2
50	95.5	95.3
60	94.9	96.7
90	94.3	95.7
120	95.1	95.5

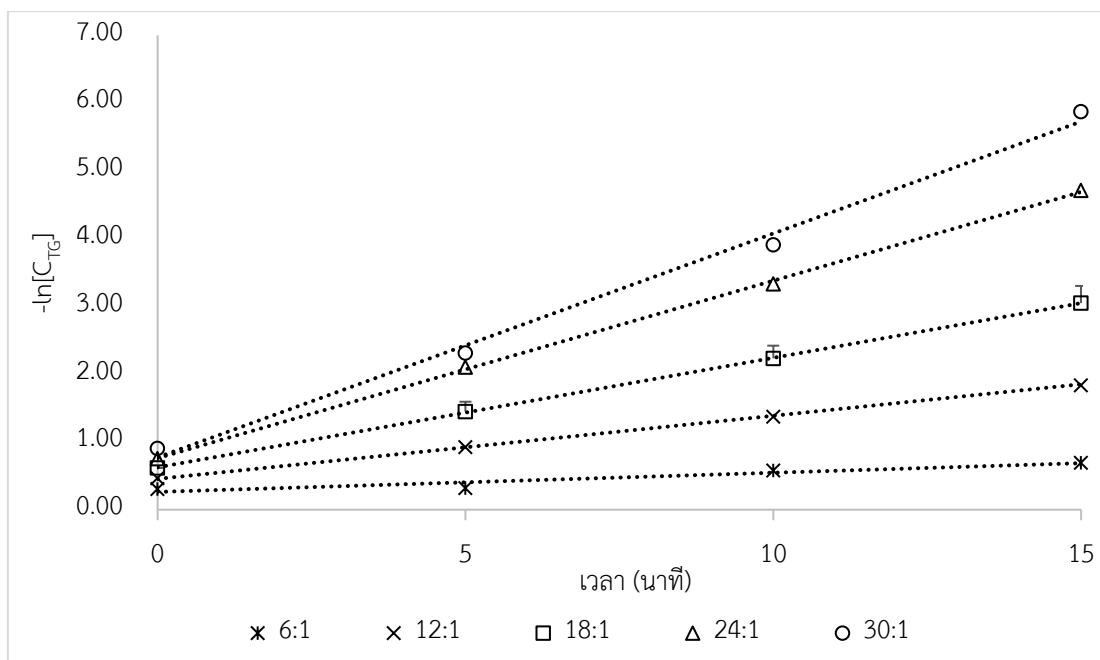
ข-2 การศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน

ตารางที่ 17 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชที่อัตราส่วน 6:1 12:1 18:1 24:1 และ 30:1 ต่อความสัมพันธ์ของร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซลและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 190 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช

เวลา (นาทีก)	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช (ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซล)				
	6:1	12:1	18:1	24:1	30:1
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	6.7	20.0	38.7	51.3	51.3
10	13.7	35.1	59.5	75.2	79.6
15	18.0	47.9	75.0	87.9	90.3
20	23.7	59.1	84.2	93.7	94.8
30	36.9	77.1	93.2	95.6	94.8
40	47.3	88.2	96.2	95.8	97.9
50	58.3	91.3	95.3	94.4	97.8
60	62.3	92.6	96.7	94.6	97.4
90	79.2	92.1	95.7	93.8	96.3
120	84.9	92.4	95.5	94.4	96.7

**ตารางที่ 18** ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชที่อัตราส่วน 6:1 12:1 18:1 24:1 และ 30:1 ต่อความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 190 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช

เวลา (นาท)	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช (โมลของไตรกลีเซอไรด์ต่อลิตร)				
	6:1	12:1	18:1	24:1	30:1
0	0.74	0.63	0.54	0.47	0.41
5	0.73	0.40	0.20	0.12	0.10
10	0.56	0.25	0.09	0.04	0.02
15	0.50	0.16	0.04	0.01	0.00
20	0.42	0.10	0.01	0.00	0.00
30	0.26	0.03	0.00	0.00	0.00
40	0.19	0.01	0.00	0.00	0.00
50	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00
60	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00
90	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
120	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00



**รูปที่ 23** ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 6:1 12:1 18:1 24:1 และ 30:1 ต่อความสัมพันธ์เชิงจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันในช่วงต้นของการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 190 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช

### ข-3 การศึกษาผลกระทบของชนิดตัวทำละลายร่วม

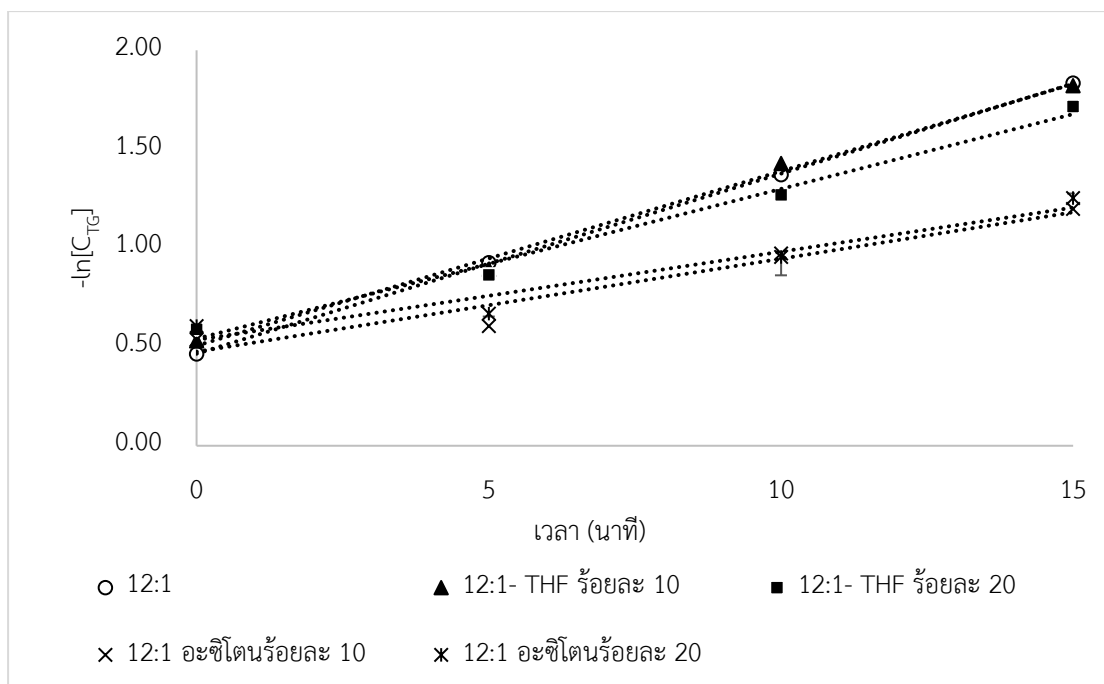
**ตารางที่ 19** ผลกระทบของชนิดของตัวทำละลายร่วม ต่อความสัมพันธ์ของร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซล และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 190 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 12:1 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช

เวลา (นาทีก)	ชนิดและปริมาณของตัวทำละลายร่วมที่ใช้ในการทดลอง (ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซล)				
	ไม่ผสมตัวทำละลายร่วม	THF ร้อยละ 10	THF ร้อยละ 20	อะซิโตนร้อยละ10	อะซิโตนร้อยละ 20
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	20.0	21.7	14.1	7.9	7.4
10	35.1	36.0	28.1	22.5	19.7
15	47.9	48.4	40.9	31.1	29.2
20	59.1	60.7	51.7	40.0	37.5
30	77.1	77.4	70.7	54.6	50.9
40	88.2	86.8	80.9	66.6	62.8
50	91.3	91.7	87.7	76.4	70.0
60	92.6	92.8	88.7	81.8	77.7
90	92.1	92.3	89.3	90.4	89.1
120	92.4	92.6	88.3	91.4	92.0

**ตารางที่ 20** ผลกระทบของชนิดของตัวทำละลายร่วม ต่อความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 190 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 12:1 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช

เวลา (นาทีก)	ชนิดและปริมาณของตัวทำละลายร่วมที่ใช้ในการทดลอง (โมลของไตรกลีเซอไรด์ต่อลิตร)				
	ไม่ผสมตัวทำละลายร่วม	THF ร้อยละ 10	THF ร้อยละ 20	อะซิโตนร้อยละ 10	อะซิโตนร้อยละ 20
0	0.63	0.59	0.56	0.58	0.55
5	0.40	0.41	0.42	0.55	0.51
10	0.25	0.24	0.28	0.38	0.39
15	0.16	0.16	0.18	0.30	0.29
20	0.10	0.10	0.12	0.23	0.22
30	0.03	0.03	0.04	0.13	0.14
40	0.01	0.01	0.01	0.07	0.09
50	0.00	0.00	0.00	0.03	0.05
60	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02
90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00





**รูปที่ 24** ผลกระทบของชนิดตัวทำละลายร่วม อะซิโตน และเตตระไฮโดฟูแรน ที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก น้ำมันพืช ต่อความสัมพันธ์เชิงจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันในช่วงต้นของการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 190 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช

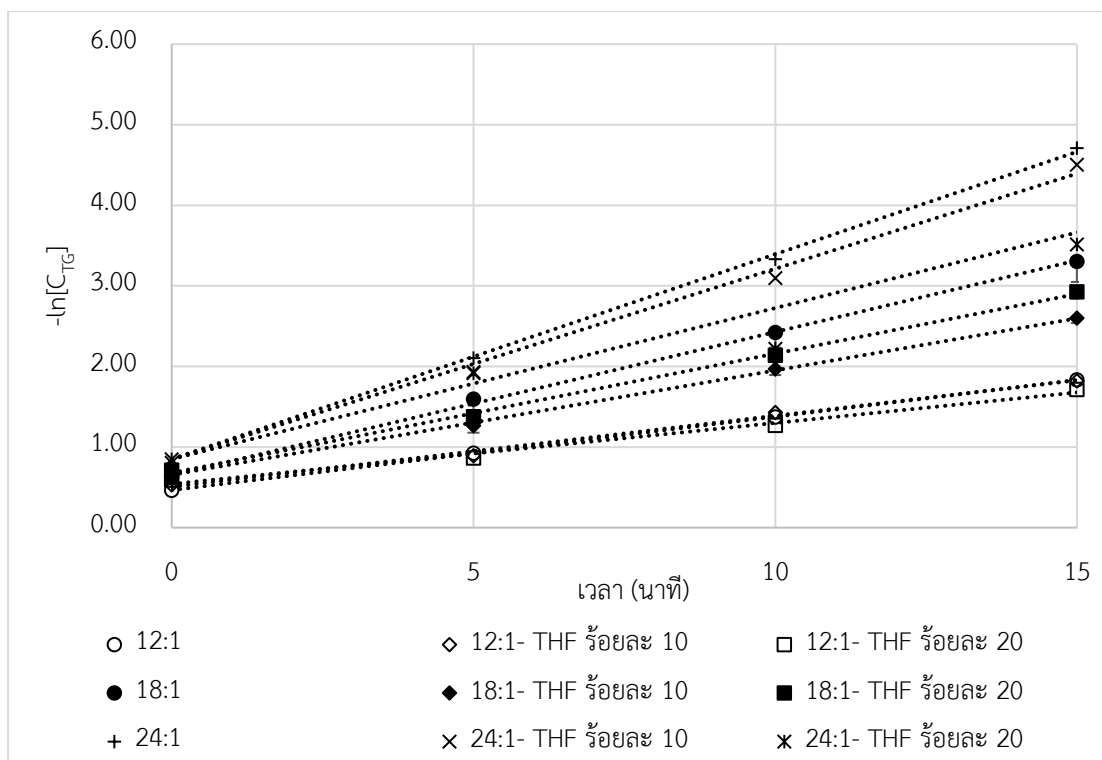
ข-4 การศึกษาผลกระทบของปริมาณตัวทำละลายร่วม

ตารางที่ 21 ผลกระทบของปริมาณเตตระไฮโดรฟูแรนที่ร้อยละโดยน้ำหนักน้ำมันพืชเท่ากับ 10 และ 20 และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 12:1 18:1 และ 24:1 ต่อความสัมพันธ์ของร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซลและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 190 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช

เวลา (นาที)	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชและปริมาณของตัวทำละลายร่วมที่ใช้ในการทดลอง (ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซล)								
	12:1			18:1			24:1		
	-	THF ร้อยละ 10	THF ร้อยละ 20	-	THF ร้อยละ 10	THF ร้อยละ 20	-	THF ร้อยละ 10	THF ร้อยละ 20
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	20.0	21.7	14.1	38.7	31.9	27.1	51.3	43.8	39.6
10	35.1	36.0	28.1	59.5	50.4	50.4	75.2	70.6	53.1
15	47.9	48.4	40.9	75.0	64.6	65.8	87.9	84.3	75.8
20	59.1	60.7	51.7	84.2	75.8	77.0	93.7	92.2	87.0
30	77.1	77.4	70.7	93.2	88.7	88.4	95.6	94.5	93.9
40	88.2	86.8	80.9	96.2	93.0	91.4	95.8	95.1	94.6
50	91.3	91.7	87.7	95.3	95.1	92.3	94.4	94.7	95.4
60	92.6	92.8	88.7	96.7	94.0	92.1	94.6	95.0	94.9
90	92.1	92.3	89.3	95.7	94.0	91.0	93.8	94.8	94.1
120	92.4	92.6	88.3	95.5	93.9	91.5	94.4	94.7	93.8

**ตารางที่ 22** ผลกระทบของปริมาณเตตระไฮโดรฟูแรนที่ร้อยละโดยน้ำหนักน้ำมันพืชเท่ากับ 10 และ 20 และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 12:1 18:1 และ 24:1 ต่อความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 190 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช

เวลา (นาทีก)	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชและปริมาณของตัวทำละลายรวมที่ใช้ในการทดลอง (โมลของไตรกลีเซอไรด์ต่อลิตร)								
	12:1			18:1			24:1		
	-	THF ร้อยละ 10	THF ร้อยละ 20	-	THF ร้อยละ 10	THF ร้อยละ 20	-	THF ร้อยละ 10	THF ร้อยละ 20
0	0.63	0.59	0.56	0.54	0.51	0.48	0.47	0.45	0.43
5	0.40	0.41	0.42	0.20	0.28	0.25	0.12	0.14	0.15
10	0.25	0.24	0.28	0.09	0.14	0.12	0.04	0.05	0.11
15	0.16	0.16	0.18	0.04	0.07	0.05	0.01	0.01	0.03
20	0.10	0.10	0.12	0.01	0.03	0.02	0.00	0.00	0.01
30	0.03	0.03	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
40	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



**รูปที่ 25** ผลกระทบของปริมาณเตตระไฮโดรฟูแรนที่ร้อยละโดยน้ำหนักน้ำมันพืชเท่ากับ 10 และ 20 และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 12:1 18:1 และ 24:1 ต่อความสัมพันธ์เชิงจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันในช่วงต้นของการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 190 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช

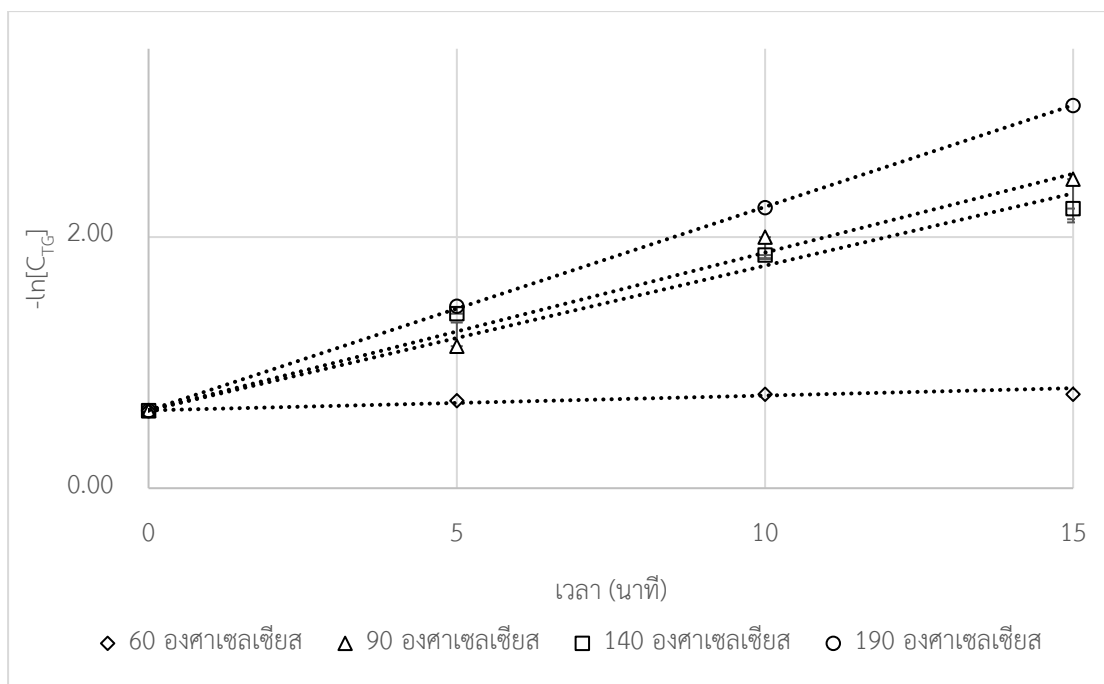
ข-5 การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในสถานะที่ไม่มีตัวทำละลายร่วม

ตารางที่ 23 ผลกระทบของอุณหภูมิที่ 60 90 และ 190 องศาเซลเซียส ในระบบที่ไม่มีตัวทำละลายร่วม ต่อความสัมพันธ์ของร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซลและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 190 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 18:1

เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซล)			
	60	90	140	190
0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	4.8	32.3	34.9	38.7
10	9.5	57.3	48.3	59.5
15	12.3	67.3	58.5	75.0
20	15.8	73.7	67.5	84.2
30	22.7	82.8	81.0	93.2
40	32.7	89.9	89.2	96.2
50	40.9	94.7	93.3	95.3
60	50.0	96.1	95.5	96.7
90	62.9	97.1	95.8	95.7
120	83.9	95.5	95.8	95.5

**ตารางที่ 24** ผลกระทบของอุณหภูมิที่ 60 90 และ 190 องศาเซลเซียส ในระบบที่ไม่มีตัวทำละลายร่วม ต่อความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 190 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 18:1

เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (โมลของไตรกลีเซอไรด์ต่อลิตร)			
	60	90	140	190
0	0.54	0.54	0.54	0.54
5	0.50	0.32	0.25	0.20
10	0.47	0.14	0.16	0.09
15	0.47	0.09	0.11	0.04
20	0.43	0.06	0.07	0.01
30	0.37	0.03	0.03	0.00
40	0.33	0.01	0.01	0.00
50	0.28	0.00	0.00	0.00
60	0.22	0.00	0.00	0.00
90	0.11	0.00	0.00	0.00
120	0.06	0.00	0.00	0.00



รูปที่ 26 ผลกระทบของอุณหภูมิที่ 60 90 และ 190 องศาเซลเซียส ในระบบที่ไม่มีตัวทำละลายร่วม ต่อความสัมพันธ์เชิงจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันในช่วงต้นของการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 190 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก น้ำมันพืช อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 18:1

ข-6 การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในสภาวะที่มีตัวทำละลายร่วม

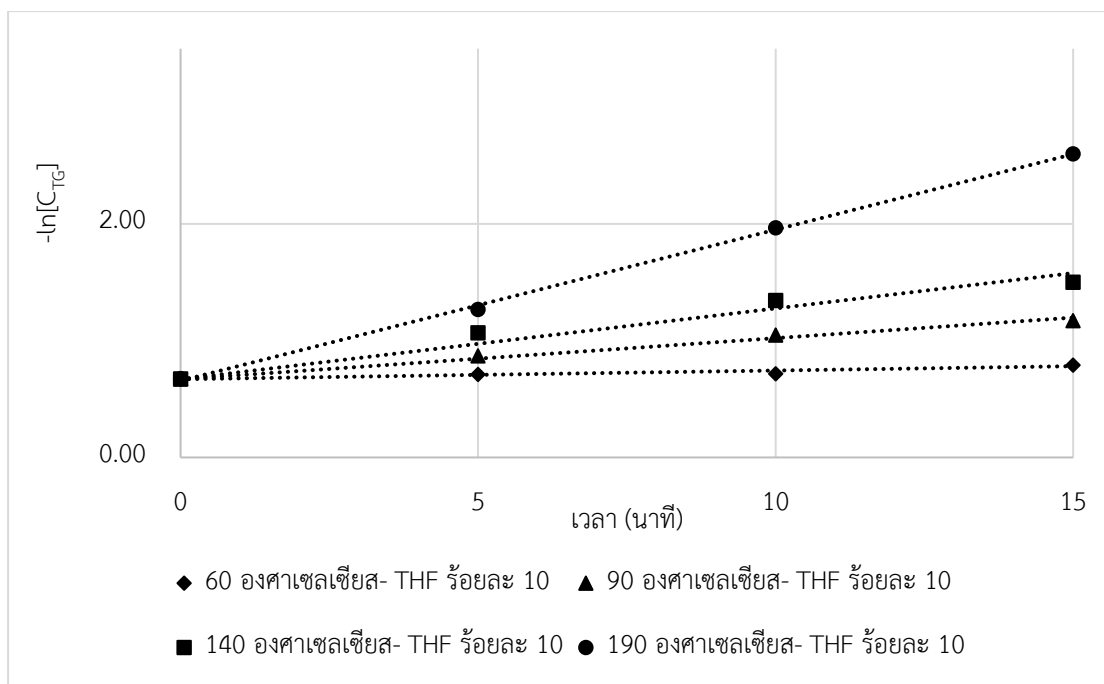
ตารางที่ 25 ผลกระทบของอุณหภูมิที่ 60 90 และ 190 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่มีตัวเตตระไฮโดรฟูแรนเป็นตัวทำละลายร่วมร้อยละ 10 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช ต่อความสัมพันธ์ของร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซลและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 190 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช เท่ากับ 18:1

เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซล)			
	60	90	140	190
0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	1.7	7.8	17.6	31.9
10	5.2	14.9	28.4	50.4
15	6.4	22.0	36.8	64.6
20	9.6	26.2	42.1	75.8
30	12.8	34.3	55.0	88.7
40	18.0	43.2	65.6	93.0
50	28.0	56.6	75.0	95.1
60	39.1	61.5	81.9	94.0
90	77.3	86.7	95.0	94.0
120	90.0	96.7	97.3	93.9



ตารางที่ 26 ผลกระทบของอุณหภูมิที่ 60 90 และ 190 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่มีตัวเตตระไฮโดรฟูแรนเป็นทำละลายร่วมร้อยละ 10 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช ต่อความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 190 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 18:1

เวลา (นาที่)	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (โมลของไตรกลีเซอไรด์ต่อลิตร)			
	60	90	140	190
0	0.51	0.51	0.51	0.51
5	0.49	0.42	0.34	0.28
10	0.49	0.35	0.26	0.14
15	0.45	0.31	0.22	0.07
20	0.45	0.30	0.18	0.03
30	0.40	0.25	0.13	0.01
40	0.42	0.18	0.08	0.00
50	0.36	0.15	0.05	0.00
60	0.28	0.10	0.03	0.00
90	0.05	0.03	0.00	0.00
120	0.01	0.00	0.00	0.00



**รูปที่ 27** ผลกระทบของอุณหภูมิที่ 60 90 และ 190 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่มีตัวเตตระไฮโดรฟูแรนเป็นทำละลายร่วมร้อยละ 10 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช ต่อความสัมพันธ์เชิงจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันในช่วงต้นของการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 190 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 18:1

### ภาคผนวก ค การคำนวณความคลาดเคลื่อน

ความคลาดเคลื่อนจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์และความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการทดลอง โดยในงานวิจัยฉบับนี้การวิเคราะห์ใช้วิธีแก๊สโครมาโทกราฟีในการวิเคราะห์ผลเป็นหลัก โดยความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์ตัวอย่างเดิมซ้ำ 5 ครั้ง และในแต่ละครั้งจะชั่งน้ำหนักสารใหม่ เพื่อหาความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่จะเกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี

ส่วนความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง จะแบ่งออกเป็นสองส่วน โดยจะแบ่งเป็นความคลาดเคลื่อนจากการทดลองของน้ำมันไบโอดีเซล กับความคลาดเคลื่อนจากการทดลองของความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์ซึ่งเป็นตัวแปรที่ได้มาจากการนำร้อยละโดยน้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์ในตัวอย่างที่เก็บได้และผ่านการล้างน้ำมันแล้ว มาทำการคำนวณกับปริมาตรของสารทั้งหมดที่เก็บได้ในแต่ละตัวอย่าง ซึ่งความคลาดเคลื่อนจากการทดลองนี้ จะทำการทดลองซ้ำสองครั้ง เพื่อดูความแตกต่างที่เกิดขึ้นตลอดทั้งการทดลอง

#### ค-1 ความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์

ตารางที่ 28 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ปริมาณไบโอดีเซล

การวิเคราะห์ตัวอย่างครั้งที่	ร้อยละโดยน้ำหนักของไบโอดีเซล
1	98.0
2	97.3
3	97.5
4	98.9
5	98.6
ค่าเฉลี่ย	98.1
$\pm 2$ S.D.	$\pm 1.4$

ตารางที่ 29 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ร้อยละโดยน้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์

การวิเคราะห์ตัวอย่างครั้งที่	ร้อยละโดยน้ำหนักของไตรกลีเซอไรด์
1	90
2	91
3	91
4	91
5	92
ค่าเฉลี่ย	91
$\pm 2$ S.D.	$\pm 1$

ค-2 ความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง

ตารางที่ 30 ผลการทดลองซ้ำของร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซลและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 18:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 210 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนักน้ำมันไบโอดีเซล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากะที่ 1

เวลา (นาที)	ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซล	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
0	0	0
5	59.1	66.3
10	88.2	92.3
15	94.8	96.4
20	94.4	95.8
30	95.8	96.7
40	94.0	94.3
50	95.0	95.0
60	94.8	94.9
90	94.9	95.2
120	93.9	94.9

**ตารางที่ 31** ผลการทดลองซ้ำของร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซลและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 18:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 210 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันไบโอดีเซล

เวลา (นาทีก)	ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซล	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
0	0.0	0.0
5	38.7	36.3
10	59.5	58.9
15	75.0	73.2
20	84.2	86.0
30	93.2	94.8
40	96.2	95.7
50	95.3	95.5
60	96.7	95.8
90	95.7	95.6
120	95.5	95.8

**ตารางที่ 32** ผลการทดลองซ้ำของความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 18:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 210 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันไบโอดีเซล

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์ (โมล/ลิตร)	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
0	0.54	0.54
5	0.20	0.23
10	0.09	0.11
15	0.04	0.05
20	0.01	0.01
30	0.00	0.00
40	0.00	0.00
50	0.00	0.00
60	0.00	0.00
90	0.00	0.00
120	0.00	0.00

**ตารางที่ 33** ผลการทดลองซ้ำของสัมพันธของร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซลและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 190 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 12:1 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช ปริมาณอะซิโตนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช

เวลา (นาทึ)	ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซล	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
0	0.0	0.0
5	7.4	11.1
10	19.7	23.6
15	29.2	32.2
20	37.5	38.9
30	50.9	51.3
40	62.8	61.7
50	70.0	71.0
60	77.7	76.9
90	89.1	90.3
120	92.0	92.9

**ตารางที่ 34** ผลการทดลองซ้ำของความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 190 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 12:1 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช ปริมาณอะซิโตนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์ (โมล/ลิตร)	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
0	0.55	0.55
5	0.51	0.52
10	0.39	0.42
15	0.29	0.28
20	0.22	0.21
30	0.14	0.15
40	0.09	0.09
50	0.05	0.06
60	0.02	0.03
90	0.00	0.00
120	0.00	0.00

**ตารางที่ 35** ผลการทดลองซ้ำของสัมพันธของร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซลและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ปริมาณเตตระไฮโดรฟูแรนที่ร้อยละโดยน้ำหนักน้ำมันพืชเท่ากับ 20 อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 18:1 ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 190 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช

เวลา (นาท)	ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซล	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
0	0.0	#DIV/0!
5	27.1	27.3
10	50.4	52.7
15	65.8	66.0
20	77.0	78.6
30	88.4	90.1
40	91.4	91.8
50	92.3	91.9
60	92.1	92.8
90	91.0	91.8
120	91.5	90.8



**ตารางที่ 36** ผลการทดลองซ้ำของความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ปริมาณเตตระไฮโดรฟูแรนที่ร้อยละโดยน้ำหนักน้ำมันพืชเท่ากับ 20 อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 18:1 ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 190 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์ (โมล/ลิตร)	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
0	0.48	0.49
5	0.25	0.28
10	0.12	0.11
15	0.05	0.06
20	0.02	0.02
30	0.00	0.00
40	0.00	0.00
50	0.00	0.00
60	0.00	0.00
90	0.00	0.00
120	0.00	0.00

**ตารางที่ 37** ผลการทดลองซ้ำของสัมพันธของร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซลและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ปริมาณเตตระไฮโดรฟูแรนที่ร้อยละโดยน้ำหนักน้ำมันพืชเท่ากับ 10 อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 18:1 ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 190 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช

เวลา (นาทีก)	ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซล	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
0	0.0	0
5	31.9	20.8
10	50.4	43.9
15	64.6	59.4
20	75.8	71.1
30	88.7	87.4
40	93.0	92.8
50	95.1	92.6
60	94.0	93.6
90	94.0	93.5
120	93.9	93.0

**ตารางที่ 38** ผลการทดลองซ้ำของความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ปริมาณเตตระไฮโดรฟูแรนที่ร้อยละโดยน้ำหนักน้ำมันพืชเท่ากับ 10 อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 18:1 ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 190 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์ (โมล/ลิตร)	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
0	0.51	0.51
5	0.28	0.31
10	0.14	0.15
15	0.07	0.08
20	0.03	0.04
30	0.01	0.00
40	0.00	0.00
50	0.00	0.00
60	0.00	0.00
90	0.00	0.00
120	0.00	0.00

**ตารางที่ 39** ผลการทดลองซ้ำของสัมพันธของร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซลและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 18:1 ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 140 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช

เวลา (นาทีก)	ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซล	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
0	0	0
5	34.9	39.5
10	48.3	49.6
15	58.5	57.3
20	67.5	63.6
30	81.0	75.4
40	89.2	83.3
50	93.3	89.3
60	95.5	93.9
90	95.8	96.7
120	95.8	96.1

**ตารางที่ 40** ผลการทดลองซ้ำของความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 18:1 ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 140 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช

เวลา (นาที่)	ความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์ (โมล/ลิตร)	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
0	0.54	0.55
5	0.25	0.24
10	0.16	0.16
15	0.11	0.12
20	0.07	0.09
30	0.03	0.04
40	0.01	0.02
50	0.00	0.01
60	0.00	0.00
90	0.00	0.00
120	0.00	0.00

**ตารางที่ 41** ผลการทดลองซ้ำของสัมพันธของร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซลและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 18:1 ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช

เวลา (นาท)	ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันไบโอดีเซล	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
0	0	0
5	32.3	36.8
10	57.3	51.8
15	67.3	59.9
20	73.7	64.1
30	82.8	72.0
40	89.9	79.5
50	94.7	86.4
60	96.1	92.5
90	97.1	97.2
120	95.5	97.3

**ตารางที่ 42** ผลการทดลองซ้ำของความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 18:1 ที่สภาวะความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันพืช

เวลา (นาที่)	ความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์ (โมล/ลิตร)	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
0	0.55	0.55
5	0.32	0.27
10	0.14	0.16
15	0.09	0.12
20	0.06	0.10
30	0.03	0.06
40	0.01	0.04
50	0.00	0.02
60	0.00	0.01
90	0.00	0.00
120	0.00	0.00

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล

ศรัณยู ถาวรพัทธ์

วัน เดือน ปี เกิด

25 มกราคม 2539

วุฒิการศึกษา

สำเร็จการศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สาขาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ที่อยู่ปัจจุบัน

689 นวมินทร์ 14 การเคหะคลองจั่น บางกะปิ กรุงเทพมหานคร 10240

ผลงานตีพิมพ์

The 32nd Thai Institute of Chemical Engineering and Applied  
Chemistry Conference



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY