ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกและกรดสเตียริกกับเมทานอล

นางสาวนภัทร จตุรพรภัทร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556

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

NON-CATALYTIC ESTERIFICATION OF PALMITIC ACID AND STEARIC ACID WITH METHANOL

Miss Naphat Chaturapornphat

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering
Department of Chemical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกและกรดสเตียริกกับเมทานอล
โดย	นางสาวนภัทร จตุรพรภัทร
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.เจิดศักดิ์ ไชยคุนา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวราจารย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.เจิดศักดิ์ ไชยคุนา)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภินันท์ สุทธิธารธวัช)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.นริศรา อินทรจันทร์)

นภัทร จตุรพรภัทร : ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกและกรดสเตียริกกับเมทานอล (NON-CATALYTIC ESTERIFICATION OF PALMITIC ACID AND STEARIC ACID WITH METHANOL) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร. เจิดศักดิ์ ไชยคุนา, 81 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกและกรดสเตียริกกับเมทานอล โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ ความเร็วรอบในการกวนในช่วงระหว่าง 50 – 600 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเมทานอลระหว่าง 1:1 - 1:6 และอุณหภูมิอยู่ในช่วงระหว่าง 175 - 250 องศาเซลเซียส การทดลองทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะขนาด 2 ลิตร ที่ความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้ โดยปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้และไม่มีปฏิกิริยาข้างเคียงอื่นๆเกิดขึ้น อีกทั้งร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันขึ้นกับอัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเมทานอล และอุณหภูมิ แต่ไม่ขึ้นกับความเร็วรอบในการกวนโดยอัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเมทานอลที่มากกว่า 1:2 ปฏิกิริยาไม่ขึ้นกับปริมาณของเมทานอล และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยา การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกและกรดสเตียริกกับเมทานอลที่ช่วงแรกของปฏิกิริยาเข้ากันได้กับรูปแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่ผันกลับ ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกและกรดสเตียริกกับเมทานอล มีค่าเท่ากับ 40.54 กิโลจูลต่อโมลของกรดปาล์มิติก และ 45.43 กิโลจูลต่อโมลของกรดสเตียริก ตามลำดับ

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา 2556 .

5370673521 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : NON-CATALYTIC / ESTERIFICATION / PALMITIC ACID / STEARIC ACID

NAPHAT CHATURAPORNPHAT: NON-CATALYTIC ESTERIFICATION OF PALMITIC ACID AND STEARIC ACID WITH METHANOL. ADVISOR: JIRDSAK TSCHEIKUNA, Ph.D., 81 pp.

This research studies about non-catalytic esterification of palmitic acid and stearic acid with methanol. The effects of agitation speed of 50-600 rpm, molar ratio of fatty acid to methanol of 1:1-1:6 and reaction temperature of 175-250 degree Celsius were investigated in batch reactor operating at pressure of 1000 psi. The results show that non-catalytic system can be used in esterification reaction. Esterification reaction is reversible reaction that does not have a side reaction. The conversion of fatty acid depends on molar ratio of fatty acid to methanol and reaction temperature, whereas agitation speed does not affect the conversion of fatty acid. Molar ratio of fatty acid to methanol higher than 1:2 the reaction is not depends on amount of methanol. Higher reaction temperature rapidly increases a conversion of fatty acid at the beginning of the reaction. The different of fatty acid does not affect reaction in the condition of excess methanol. The kinetic study of non-catalytic esterification of palmitic acid and stearic acid with methanol during initial period is first order irreversible reaction model. The activation energy of non-catalytic esterification of palmitic acid and stearic acid with methanol are 40.54 kJ/mole of palmitic acid and 45.43 kJ/mole of stearic acid, respectively.

Department : Chemical Engineering Student's Signature .....

Field of Study : Chemical Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year : 2013 .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ต้องขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.เจิดศักดิ์ ไชยคุนา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับคำแนะนำและแนวความคิด ในการปฏิบัติงาน การแก้ปัญหา และพัฒนางานวิจัย อีกทั้งให้ความช่วยเหลือมาตลอด

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวราจารย์ ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภินันท์ สุทธิธารธวัช และ อาจารย์ ดร.นริศรา อินทรจันทร์ กรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งให้คำแนะนำ และความรู้ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอบคุณเพื่อน รุ่นพี่ สำหรับคำแนะนำ ความช่วยเหลือ และกำลังใจในการทำวิจัยด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดามารดาและสมาชิกในครอบครัวทุกคนที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจตลอดมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ญ

สารบัญรูป..... ฌ

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 บทนำ..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... 3

1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... 3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 4

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 5

2.1 ทฤษฎี..... 5

2.1.1 กรดไขมัน..... 5

2.1.2 สารประกอบอัลคิลเอสเทอร์..... 5

2.1.3 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน..... 6

2.1.4 จลนพลศาสตร์เคมี..... 8

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 10

2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 10

2.2.2 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 14

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย..... 15

3.1 สารเคมี..... 15

3.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง..... 15

3.2.1 ขั้นตอนการทำการทดลอง..... 16

3.2.2 สภาวะกรทดลอง..... 16

3.3 การวิเคราะห์สารตัวอย่าง..... 17

หน้า

3.4 ค่าความคลาดเคลื่อน..... 17
3.4.1 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์..... 17
3.4.2 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง..... 18
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง..... 20
4.1 ผลการวิเคราะห์สารตั้งต้น..... 21
4.2 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล..... 23
4.2.1 ผลปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล..... 23
4.2.2 ผลกระทบของความเร็วรอบในการกวนที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล..... 24
4.2.3 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของกรดปาล์มิติกต่อเมทานอลที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล..... 26
4.2.4 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล..... 28
4.2.5 จลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล..... 29
4.3 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดสเตียริกกับเมทานอล..... 32
4.3.1 ผลปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดสเตียริกกับเมทานอล..... 32
4.3.2 ผลกระทบของความเร็วรอบในการกวนที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดสเตียริกกับเมทานอล..... 34
4.3.3 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของกรดสเตียริกต่อเมทานอลที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดสเตียริกกับเมทานอล..... 35
4.3.4 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดสเตียริกกับเมทานอล..... 37
4.3.5 จลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดสเตียริกกับเมทานอล..... 38
4.4 ผลกระทบของกรดไขมันที่แตกต่างกันต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติก และกรดสเตียริกกับเมทานอล..... 41

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... 44
5.1 สรุปผลการทดลอง..... 44
5.2 ข้อเสนอแนะ..... 44
รายการอ้างอิง..... 45
ภาคผนวก..... 47
ภาคผนวก ก..... 48
ภาคผนวก ข..... 51
ภาคผนวก ค..... 55
ภาคผนวก ง..... 68
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 81

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 3.1	สารเคมีที่ใช้ในการดำเนินการทดลองและใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง....	15
ตารางที่ 3.2	ตารางค่าความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์.....	17
ตารางที่ 3.3	ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง.....	18
ตารางที่ 4.1	ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆของสารตั้งต้น.....	22
ตารางที่ 4.2	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดปาล์มิติกที่สภาวะสมดุลของการศึกษาผลกระทบของความเร็วรอบในการกวน.....	25
ตารางที่ 4.3	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดปาล์มิติกที่สภาวะสมดุลของการศึกษาผลกระทบอัตราส่วนโดยโมลกรดปาล์มิติกต่อเมทานอล.....	27
ตารางที่ 4.4	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดปาล์มิติกที่สภาวะสมดุลของการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ.....	28
ตารางที่ 4.5	ค่าคงที่ปฏิกิริยาของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่เวลาช่วงแรกของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ.....	31
ตารางที่ 4.6	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดสเตียริกที่สภาวะสมดุลของการศึกษาผลกระทบของความเร็วรอบในการกวน.....	34
ตารางที่ 4.7	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดสเตียริกที่สภาวะสมดุลของการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลกรดสเตียริกต่อเมทานอล.....	36
ตารางที่ 4.8	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดสเตียริกที่สภาวะสมดุลของการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ.....	37
ตารางที่ 4.9	ค่าคงที่ปฏิกิริยาของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดสเตียริกกับเมทานอลที่เวลาช่วงแรกของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ.....	40
ตารางที่ ก-1	สภาวะในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟฟี.....	48
ตารางที่ ก-2	ตำแหน่งเวลาของสารที่วิเคราะห์จากเครื่องแก๊สโครมาโตรกราฟ.....	50
ตารางที่ ก-3	ค่าแฟกเตอร์ตอบสนอง.....	50
ตารางที่ ก-4	องค์ประกอบของสารตั้งต้น.....	50
ตารางที่ ข-1	ผลการวิเคราะห์ค่าของกรดของสารตั้งต้น	51
ตารางที่ ข-2	ผลการวิเคราะห์ค่าสปอนนิฟิเคชันของสารตั้งต้น	53
ตารางที่ ข-3	ผลการวิเคราะห์มวลโมเลกุลของสารตั้งต้น	54

หน้า

ตารางที่ ค-1 ผลการทดลองศึกษาความเร็วรอบในการกวนปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 50 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:6 อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส..... 55

ตารางที่ ค-2 ผลการทดลองศึกษาความเร็วรอบในการกวนปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 100 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:6 อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส..... 56

ตารางที่ ค-3 ผลการทดลองศึกษาความเร็วรอบในการกวนปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 200 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:6 อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส..... 57

ตารางที่ ค-4 ผลการทดลองศึกษาความเร็วรอบในการกวนปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:6 อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส..... 58

ตารางที่ ค-5 ผลการทดลองศึกษาความเร็วรอบในการกวนปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:6 อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส..... 59

ตารางที่ ค-6 ผลการทดลองศึกษาอัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอลของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:1 อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส..... 60

ตารางที่ ค-7 ผลการทดลองศึกษาอัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอลของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:2 อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส..... 61

หน้า

ตารางที่ ค-8 ผลการทดลองศึกษาอัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอลของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:4 อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส..... 62

ตารางที่ ค-9 ผลการทดลองศึกษาอัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอลของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:6 อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส..... 63

ตารางที่ ค-10 ผลการทดลองศึกษาอุณหภูมิปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:4 อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส..... 64

ตารางที่ ค-11 ผลการทดลองศึกษาอุณหภูมิปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:4 อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส..... 65

ตารางที่ ค-12 ผลการทดลองศึกษาอุณหภูมิปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:4 อุณหภูมิ 225 องศาเซลเซียส..... 66

ตารางที่ ค-13 ผลการทดลองศึกษาอุณหภูมิปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:4 อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส..... 67

ตารางที่ ง-1 ผลการทดลองศึกษาความเร็วรอบในการกวนปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดสเตียริกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 50 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:6 อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส..... 68

หน้า

ตารางที่ ง-2 ผลการทดลองศึกษาความเร็วรอบในการกวนปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดสเตียริกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 100 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:6 อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส..... 69

ตารางที่ ง-3 ผลการทดลองศึกษาความเร็วรอบในการกวนปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดสเตียริกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 200 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:6 อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส..... 70

ตารางที่ ง-4 ผลการทดลองศึกษาความเร็วรอบในการกวนปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดสเตียริกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:6 อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส..... 71

ตารางที่ ง-5 ผลการทดลองศึกษาความเร็วรอบในการกวนปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดสเตียริกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:6 อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส..... 72

ตารางที่ ง-6 ผลการทดลองศึกษาอัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอลของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดสเตียริกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:1 อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส..... 73

ตารางที่ ง-7 ผลการทดลองศึกษาอัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอลของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดสเตียริกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:2 อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส..... 74

ตารางที่ ง-9 ผลการทดลองศึกษาอัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอลของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดสเตียริกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:6 อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส..... 75

หน้า

ตารางที่ ง-10 ผลการทดลองศึกษาอุณหภูมิปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดสเตียริกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:4 อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส..... 76

ตารางที่ ง-11 ผลการทดลองศึกษาอุณหภูมิปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดสเตียริกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:4 อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส..... 77

ตารางที่ ง-12 ผลการทดลองศึกษาอุณหภูมิปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดสเตียริกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:4 อุณหภูมิ 225 องศาเซลเซียส..... 78

ตารางที่ ง-13 ผลการทดลองศึกษาอุณหภูมิปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดสเตียริกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:4 อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส..... 79

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 3.1 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ..... 16
รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของกรดปาล์มิติกด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ... 21
รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของกรดสเตียริกด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ..... 22
รูปที่ 4.3 วิเคราะห์สารตัวอย่างของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟฟี..... 24
รูปที่ 4.4 วิเคราะห์สารตัวอย่างของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล ด้วยการไตเตรท..... 24
รูปที่ 4.5 ผลกระทบของความเร็วรอบในการกวนที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล..... 25
รูปที่ 4.6 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของกรดปาล์มิติกต่อเมทานอลที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล..... 26
รูปที่ 4.7 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล..... 28
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของ ln((CA0)/(CA)) กับเวลาเพื่อใช้ในการหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่เวลาช่วงแรกของปฏิกิริยา..... 30
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ตามสมการอาร์เรเนียส เพื่อใช้ในการหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่เวลาช่วงแรกของปฏิกิริยา..... 32
รูปที่ 4.10 วิเคราะห์สารตัวอย่างของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดสเตียริกกับเมทานอล ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟฟี..... 33
รูปที่ 4.11 วิเคราะห์สารตัวอย่างของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดสเตียริกกับเมทานอล ด้วยการไตเตรท..... 33
รูปที่ 4.12 ผลกระทบของความเร็วรอบในการกวนที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดสเตียริก กับเมทานอล..... 34
รูปที่ 4.13 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของกรดสเตียริกต่อเมทานอลที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดสเตียริกกับเมทานอล..... 35

หน้า

รูปที่ 4.14 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดสเตียริกกับเมทานอล..... 37
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของ ln((CA0)/(CA)) กับเวลาเพื่อใช้ในการหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดสเตียริกกับเมทานอลที่เวลาช่วงแรกของปฏิกิริยา..... 39
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของตามสมการอาร์เรเนียส เพื่อใช้ในการหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดสเตียริกกับเมทานอลที่เวลาช่วงแรกของปฏิกิริยา..... 41
รูปที่ 4.17 ผลกระทบของกรดไขมันที่แตกต่างกันต่อปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลต่างๆ..... 42
รูปที่ 4.18 ผลกระทบของกรดไขมันที่แตกต่างกันต่อปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ..... 42
รูปที่ ก-1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดปาล์มิติกด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ..... 49
รูปที่ ก-2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดปาล์มิติกด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ..... 49

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

สารประกอบอัลคิลเอสเทอร์ (Ester) ของกรดไขมัน (Fatty Acid) เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันหรือน้ำมัน กับแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ เกิดเป็นสารประกอบอัลคิลเอสเทอร์ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมได้หลากหลายประเภท เช่น เมทิลปาล์มิเตทซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตผงซักฟอก พลาสติไซเซอร์ และ อาหารสัตร์ เมทิลเสตียเรทใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตสารลดแรงตึงผิว เอทิลปาล์มมิเตท ไอโซโพรพิวปาล์มมิเตท และไอโซโพรพิวไมริสเตท เป็นสารประกอบอัลคิลเอสเทอร์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางค์ โดยปฏิกิริยาที่นิยมใช้ผลิตอัลคิลเอสเทอร์มี 2 ปฏิกิริยา คือปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน (Transesterification) และปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Esterification)

Warabi และคณะ [1] ทำการศึกษาปฏิกิริยาของไตรกลีเซอร์ไรด์และกรดไขมันกับแอลกอฮอล์แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งปฏิกิริยาที่ทำการศึกษาคือปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันและปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเกิดได้ช้ากว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันสำหรับการทดลองทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ทุกตัว เนื่องจากกรดไขมันละลายเข้ากับแอลกอฮอล์ได้มากกว่าไตรกลีเซอไรด์ และเมทานอลจะทำตัวเป็นกรด อีกทั้งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันมีขั้นตอนมากกว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน จึงทำให้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเกิดได้ง่ายกว่า อีกทั้งในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันส่วนใหญ่จะใช้ตัวเร่งเอกพันธุ์ชนิดเบส จะมีข้อจำกัดในการเลือกสารตั้งต้น คือน้ำมันพืชที่ใช้ไม่ควรมีปริมาณกรดไขมันอิสระปริมาณมาก เพราะจะเกิดสบู่เป็นปฏิกิริยาข้างเคียง ทำให้ร้อยละผลได้อัลคิลเอสเทอร์ลดลง ดังนั้นปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน จึงเป็นปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการใช้เป็นกระบวนการในการผลิตอัลคิลเอสเทอร์มากกว่าปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Esterification) เป็นปฏิกิริยาที่มีสารตั้งต้นเป็นกรดไขมันกับแอลกอฮอล์ มีผลิตภัณฑ์คือ อัลคิลเอสเทอร์ และน้ำ มีปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับ โดย Yujaroen และคณะ [2] ทำการศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดไขมันที่กลั่นได้จากน้ำมันปาล์มกับเมทานอล โดยทำการศึกษาผลกระทบของการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เมื่อทำการทดลองโดยใส่น้ำเข้าร่วมทำปฏิกิริยากับกรดไขมันปาล์มและเมทานอล ร้อยละ 0-30 โดยปริมาตร พบว่าการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสมากขึ้น เมื่อปริมาณน้ำมากขึ้น ที่ปริมาณน้ำร้อยละ

30 โดยปริมาตร พบว่าร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ลดลงจาก 95 ลดลงเป็น 40 เนื่องจากปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้นจึงสามารถแตกโมเลกุลใหญ่ของเมทิลเอสเทอร์ได้ทำให้เกิดเป็นกรดไขมัน และทำการทดลองโดยการเพิ่มปริมาณแอลกอฮอล์ให้มากเกินพอ พบว่าทำให้ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสลดลง ดังนั้นการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันจึงต้องใช้แอลกอฮอล์ให้มากเกินพอเพื่อให้ได้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันมากขึ้น

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันมีกระบวนการผลิตแบ่งเป็น 2 แบบ คือ กระบวนการแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งเป็น 3 ชนิด คือตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพันธ์ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์ และตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอนไซม์

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพันธ์ที่มีการใช้อย่างแพร่หลายคือ กรดซัลฟูริก Berrios และคณะ [3] ทำการศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระจากน้ำมันดอกทานตะวันกับเมทานอล โดยมีกรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วรอบมากกว่า 250 รอบต่อนาทีไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา เมื่ออัตราส่วนของกรดไขมันต่อเมทานอลและอุณหภูมิมากขึ้นค่าของกรดมีค่าลดลงอย่างมาก และค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น ถึงแม้ว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชับแบบใช้กรดซัลฟูริกจะเกิดได้ดี แต่แยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์เป็นไปได้ยาก และไม่สามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ใหม่ได้ จากการศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์พบว่าสามารถแก้ไขข้อเสียของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพันธ์ได้

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดของแข็ง และตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเรซิ่นแลกเปลี่ยนไอออน Jacobson และคณะ [4] ได้ศึกษาการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน และ ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยใช้น้ำมันที่ผ่านการประกอบอาหารแล้ว ทำปฏิกิริยากับเมทานอล โดยมีซิงค์สเตียเรตที่แช่ในซิลิกาเจลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากการทดลองพบว่า ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์คือ 98 และตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อีกหลายครั้ง โดยการกรองแยกออกจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ ล้างด้วยเฮกเซน จากนั้นจึงให้ความร้อนเป็นเวลา 1 คืน Ji-Yeon Park และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาโดยศึกษาผลกระทบของน้ำที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเอสเทอร์ริฟิเคชันที่มีผลต่อตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด คือ แอมเบอร์ลิสต์-15 และแอมเบอร์ลิสต์ บีดี20 โดยใช้น้ำมันที่มีปริมาณของกรดไขมันอิสระที่ต่างแตกต่าง 3 ชนิด ได้แก่ น้ำมันที่มีปริมาณร้อยละของกรดไขมันโดยน้ำหนัก 2.5 50 และ 99.8 อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาคือ 80 องศาเซลเซียส ความดัน 4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อัตราการกวนสาร 200 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเมทานอลคือ1:6 และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของน้ำมัน จากงานวิจัย 2 งานข้างต้นพบว่าการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์จะทำได้ง่ายขึ้น

และสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ใหม่ได้ แต่การดำเนินงานก่อให้เกิดของเสีย ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบที่ใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแก้ไขการการเกิดของเสียจากการนำกลับมาใช้ใหม่ได้

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบที่ใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้มีการศึกษาว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี และไม่เกิดของเสียจากการนำกลับมาใช้ใหม่ แต่ปฏิกิริยาเกิดได้ช้าและมีราคาแพง ซึ่งปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาที่เกิดได้เร็วกว่าจึงเป็นอีกทางเลือกที่ดีในการผลิตเมทิลเอสเทอร์

Somsai [6] ทำการศึกษาจลพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมันที่กลั่นจากน้ำมันปาล์มแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และเข้าสู่สมดุลของปฏิกิริยาที่เวลาประมาณ 120 นาที อีกทั้งปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นปฏิกิริยาที่ดำเนินการในสภาวะอุณหภูมิสูง ความดันสูง และอัตราการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ขึ้นกับความดัน อีกทั้งให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์สูง และเป็นกระบวนการที่มีไม่มีปัญหาของเสียจากการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ เพราะฉะนั้นจึงเป็นกระบวนการที่เหมาะสมในการผลิตเมทิลเอสเทอร์

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติก และกรด สเตียริก กับเมทานอล ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์เป็นเมทิลปาล์มมิเตท ใช้ในการผลิต ผงซักฟอก พลาสติไซเซอร์ และ อาหารสัตว์ และเมทิลเสตียเรตใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตสารลดแรงตึงผิว โดยทำการศึกษา ความเร็วรอบการกวน อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมัน ต่อแอลกอฮอล์ และอุณหภูมิ ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันของกรดปาล์มิติก และกรดสเตียริก

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดปาล์มิติกและกรดสเตียริกโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. กรดไขมันที่ทำการศึกษาคือ กรดปาล์มิติก และกรดสเตียริก ทำปฏิกิริยากับเมทานอล
2. ดำเนินปฏิกิริยาที่ความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
3. ศึกษาความเร็วรอบการกวนที่ใช้ทำปฏิกิริยา 50, 100, 200, 400 และ 600 รอบต่อนาที
4. อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกรดไขมันกับเมทานอล 1:1, 1:2, 1:4 และ1:6
5. อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา คือ ช่วง 175℃ 200℃ 225℃ และ250 ℃
6. เวลาในการทำการทดลอง 360 นาที

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในการศึกษาสำหรับงานวิจัยและพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 กรดไขมัน

กรดไขมัน เป็นสารในหมู่คาร์บอกซิล (R-COOH) พบในพืชและสัตว์ โดยมีส่วนหางเป็นโซ่ยาวที่อิ่มตัว และไม่อิ่มตัว กรดไขมันชนิดอิ่มตัวคือกรดไขมันที่ไม่มีพันธะคู่ เช่น กรดลอริก กรดปาล์มิติก และกรด สเตียริก สำหรับกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวคือกรดไขมันที่มีพันธะคู่อย่างน้อยหนึ่งตำแหน่ง เช่น กรดโอเลอิก กรดลิโนเลอิก และ กรดลิโนเลนิก

2.1.2 สารประกอบอัลคิลเอสเทอร์

อัลคิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน คือสารประกอบจำพวกเอสเทอร์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันพืชหรือกรดไขมันกับแอลกอฮอล์ มีสูตรโมเลกุลคือ RCOOR’ โดยที่ R คือหมู่อัลคิล (Alkyl) ของกรดไขมันหรือน้ำมันพืช น้ำมันสัตว์ และ R’ คือหมู่อัลคิล (Alkyl) ของแอลกอฮอล์ ตัวอย่างของอัลคิลเอสเทอร์คือ สารประกอบเมทิลเอสเทอร์ นอกจากจะมีการนำไปใช้ในการผลิตไบโอดีเซลแล้ว ยังใช้ในการผลิตของอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท เช่น เมทิลปาล์มิเตท ใช้ในการผลิตผงซักฟอก พลาสติไซเซอร์ อาหารสัตว์ และใช้ในการศึกษาด้านการแพทย์ เมทิลเสตียเรตใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตสารลดแรงตึงผิว และสบู่ สำหรับสารประกอบอัลคิลเอสเทอร์ที่นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางค์คือ ไอโซโพรพิวไมริสเตท เอทิลปาล์มิเตท และไอโซโพรพิวปาล์มิเตท ซึ่งสามารถผลิตได้จาก ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน และ เอสเทอร์ริฟิเคชัน

Warabi และคณะ [1] ทำการศึกษาปฏิกิริยาของไตรกลีเซอร์ไรด์และกรดไขมันกับแอลกอฮอล์แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งปฏิกิริยาที่ทำการศึกษาคือปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันและปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันใช้น้ำมันเมล็ดเรพเป็นสารตั้งต้น และในปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันใช้กรดไขมันของน้ำมันเมล็ดเรพเป็นสารตั้งต้น ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์หลายชนิดคือ เมทานอล เอทานอล 1-โพรพานอล 1-บิวทานอล และ1-ออกทานอล ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเกิดได้ช้ากว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันสำหรับการทดลองทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ทุกตัว เนื่องจากกรดไขมันละลายเข้ากับแอลกอฮอล์ได้มากกว่าไตรกลีเซอไรด์ และเมทานอลจะทำตัวเป็นกรด อีกทั้งปฏิกิริยา

ทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันมีขั้นตอนมากกว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน จึงทำให้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเกิดได้ง่ายกว่า

โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดปาล์มิติก และกรดสเตียริกกับเมทานอล ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์เป็นเมทิลปาล์มิเตท ใช้ในการผลิต ผงซักฟอก พลาสติไซเซอร์ อาหารสัตว์ และใช้ในการศึกษาด้านการแพทย์ เมทิลเสตียเรตใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตสารลดแรงตึงผิว และสบู่

2.1.3 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่าง กรดคาร์บอซิลิก และแอลกอฮอล์ โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกรด ให้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็น เอสเทอร์และน้ำ โดยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันนั้นมีปฏิกิริยาที่ผันกลับคือปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งมีกระบวนการผลิตแบ่งเป็น 2 แบบ คือ กระบวนการแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งเป็น 3 ชนิด คือตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพันธ์ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอนไซม์ และตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์ และตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอนไซม์

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพันธ์ที่มีการใช้อย่างแพร่หลายคือ กรดซัลฟูริก Berrios และคณะ [3]ทำการศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระจากน้ำมันดอกทานตะวันกับเมทานอล โดยมีกรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วรอบมากกว่า 250 รอบต่อนาทีไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา เมื่ออัตราส่วนของกรดไขมันต่อเมทานอลและอุณหภูมิมากขึ้นค่าของกรดมีค่าลดลงอย่างมาก และค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น ถึงแม้ว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบใช้กรดซัลฟูริกจะเกิดได้ดี แต่แยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์เป็นไปได้ยาก และไม่สามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ใหม่ได้ จากการศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์พบว่าสามารถแก้ไขข้อเสียของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพันธ์ได้

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดของแข็ง และตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเรซิ่นแลกเปลี่ยนไอออน Jacobson และคณะ [4] ได้ศึกษาการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยใช้น้ำมันที่ใช้แล้ว ทำปฏิกิริยากับเมทานอล ด้วยอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:18 โดยมีซิงค์สเตียเรต ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักที่แช่ในซิลิกาเจลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากการทดลองพบว่า ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์คือ 98 และตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อีกหลายครั้ง โดยการกรองแยกออกจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ ล้างด้วยเฮกเซน จากนั้นจึงให้ความร้อนเป็นเวลา 1 คืน Ji-Yeon Park และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาโดยศึกษาผลกระทบของน้ำที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเอสเทอร์ริฟิเคชันที่มีผลต่อ

ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด คือ แอมเบอร์ลิสต์-15 และ แอมเบอร์ลิสต์ บีดี20 โดยใช้น้ำมันที่มีปริมาณของกรดไขมันอิสระที่ต่างแตกต่าง 3 ชนิด ได้แก่ น้ำมันที่มีปริมาณร้อยละของกรดไขมันโดยน้ำหนัก 2.5 50 และ 99.8 อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาคือ 80 องศาเซลเซียส ความดัน 4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ความเร็วรอบในการกวน 200 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเมทานอลคือ 1:6 และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของน้ำมัน จากงานวิจัย 2 งานข้างต้น พบว่าการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์จะทำได้ง่ายขึ้น และสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ใหม่ได้ แต่การดำเนินงานก่อให้เกิดของเสีย ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบที่ใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแก้ไขการเกิดของเสียจากการนำกลับมาใช้ใหม่ได้

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบที่ใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้มีการศึกษาว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี และไม่เกิดของเสียจากการนำกลับมาใช้ใหม่ แต่ปฏิกิริยาเกิดได้ช้าและมีราคาแพง ซึ่งปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาที่เกิดได้เร็วกว่าจึงเป็นกระบวนการที่เหมาะสมในการผลิตเมทิลเอสเทอร์ ซึ่งปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันสามารถเขียนสมการเคมีได้ ดังสมการที่ 2.1

$$R\text{-}COOH + R'OH \underset{\text{Hydrolysis}}{\overset{\text{Esterification}}{\rightleftharpoons}} R\text{-}COO\text{-}R' + H_2O \qquad (2.1)$$

Yujaroen และคณะ [2] ทำการศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดไขมันที่กลั่นได้จากน้ำมันปาล์มกับเมทานอล โดยทำการศึกษาผลกระทบของการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ผลจากงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลมากขึ้นจาก 1:1-1:6 พบว่าร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์มีค่ามากขึ้นแต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเป็น 1:9-1:12 พบว่าร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์มีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณของน้ำจากเมทานอลมากขึ้น อีกทั้งเมื่อทำการทดลองโดยใส่น้ำเข้าร่วมทำปฏิกิริยากับกรดไขมันปาล์มและเมทานอล ร้อยละ 0-30 โดยปริมาตร พบว่าการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสมากขึ้น เมื่อปริมาณน้ำมากขึ้น ที่ปริมาณน้ำร้อยละ 30 โดยปริมาตร พบว่าร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ลดลงจาก 95 ลดลงเป็น 40 เนื่องจากปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้นจึงสามารถแตกโมเลกุลใหญ่ของเมทิลเอสเทอร์ได้ทำให้เกิดเป็นกรดไขมัน และทำการทดลองโดยการเพิ่มปริมาณแอลกอฮอล์ให้มากเกินพอ ในอัตราส่วนโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:6 พบว่าทำให้ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสลดลง

จากงานวิจัยของข้างต้นสรุปได้ว่า หากต้องการให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์มากขึ้น ต้องใช้ปริมาณแอลกอฮอล์ให้มากกว่าอัตราส่วนโดยโมลของกรดคาร์บอกซิลิกต่อแอลกอฮอล์ 1:1

2.1.4 จลพลศาสตร์เคมี [7]

จลนพลศาสตร์เคมีเป็นการศึกษาเกี่ยวกับอัตราเร็วปฏิกิริยาเคมี ซึ่งมีหน่วยเป็นความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่หายไปต่อเวลา หรือความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นต่อเวลา สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.2

$$r_i = \frac{dC_i}{dt} \tag{2.2}$$

2.1.4.1 จลพลศาตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

สมการเคมีของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน

$$\text{R-COOH + R'OH} \underset{\text{Hydrolysis}}{\overset{\text{Esterification}}{\rightleftharpoons}} \text{R-COO-R'+}H_2O$$

สามารถเขียนสมการทางจลนพลศาสตร์ได้ ดังสมการที่ 2.3

$$-r_A = \frac{dC_A}{dt} = k_1 C_A C_B - k_2 C_C C_D \tag{2.3}$$

โดยที่ C_A เป็นความเข้มข้นของกรดไขมัน

C_B เป็นความเข้มข้นของแอลกอฮอล์

C_C เป็นความเข้มข้นของเอทิลเอสเทอร์

C_D เป็นความเข้มข้นของน้ำ

k_1, k_2 เป็นค่าคงที่ปฏิกิริยา

จากปฏิกิริยาพบว่าสามารถเขียนรูปแบบจำลองทางจลพลศาสตร์ได้ 4 รูปแบบคือ

- ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่ผันกลับ (Irreversible First-Order Reaction)
- ปฏิกิริยาอันดับสองแบบไม่ผันกลับ (Irreversible Second-Order Reaction)
- ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบผันกลับได้ (Reversible First-Order Reaction)
- ปฏิกิริยาอันดับสองแบบผันกลับได้ (Reversible Second-Order Reaction)

2.1.4.2 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่ผันกลับ

<u>สมมุติฐาน</u>

- ทำการคำนวณจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาที่เวลาช่วงแรกของปฏิกิริยา
- สภาวะที่ใช้ในการคำนวณคือสภาวะที่ปฏิกิริยาไม่ขึ้นกับปริมาณแอลกอฮอล์

สมมุติฐานข้างต้นสามารถจัดรูปสมการที่ 2.3 ให้อยู่ในรูปใหม่ได้ ดังสมการที่ 2.4

$$-r_A = -\frac{dC_A}{dt} = k'_1 C_A \qquad (2.4)$$

$$-ln(\frac{[C_A])}{[C_{A0}]}) = k'_1 t \qquad (2.5)$$

ซึ่งสามารถหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาได้จากความชันของกราฟตามสมการที่ 2.5

2.1.4.2 ปฏิกิริยาอันดับสองแบบไม่ผันกลับ

<u>สมมุติฐาน</u>

- ทำการคำนวณจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาที่เวลาช่วงแรกของปฏิกิริยา
- สภาวะที่ใช้ในการคำนวณคือสภาวะที่ปฏิกิริยายังขึ้นกับปริมาณแอลกอฮอล์

สมมุติฐานข้างต้นสามารถจัดรูปสมการที่ 2.3 ให้อยู่ในรูปใหม่ได้ ดังสมการที่ 2.6

$$-r_A = \frac{dC_A}{dt} = k_1 C_A C_B \qquad (2.6)$$

$$\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} = k_1 t \qquad ; M=1 \qquad (2.7)$$

$$ln\frac{C_B C_{A0}}{C_{Bo} C_A} = ln\frac{C_B}{M C_A} = C_{A0}(M-1)kt = (C_{B0} - C_{A0})k_1 t \qquad ; M \neq 1 \qquad (2.8)$$

เมื่อ M = C_{B0}/C_{A0} ซึ่งสามารถหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาได้จากความชันของกราฟตามสมการที่ 2.8

2.1.4.3 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบผันกลับได้

<u>สมมุติฐาน</u>

- ทำการคำนวณจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาที่ช่วงเวลาที่ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลแล้ว
- สภาวะที่ใช้ในการคำนวณคือสภาวะที่ปฏิกิริยาไม่ขึ้นกับปริมาณแอลกอฮอล์

สมมุติฐานข้างต้นสามารถจัดรูปสมการที่ 2.3 ให้อยู่ในรูปใหม่ได้ ดังสมการที่ 2.9

$$-r_A = \frac{dC_A}{dt} = k'_1 C_A - k_2 C_C C_D \quad (2.9)$$

$$-ln\frac{C_A C_{Ae}}{C_{Ao} C_{Ae}} = \left(\frac{M+1}{M+X_{Ae}}\right) k'_1 t \quad (2.10)$$

เมื่อ M = C_{B0}/C_{A0} ซึ่งสามารถหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาได้จากความชันของกราฟตามสมการที่ 2.10

2.1.4.4 ปฏิกิริยาอันดับสองแบบผันกลับได้

<u>สมมุติฐาน</u>

- ทำการคำนวณจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาที่ช่วงเวลาที่ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลแล้ว
- สภาวะที่ใช้ในการคำนวณคือสภาวะที่ปฏิกิริยายังขึ้นกับปริมาณแอลกอฮอล์

สมการทางจลนพลศาสตร์จะเป็นไปตามสมการที่ 2.3

$$-r_A = \frac{dC_A}{dt} = k_1 C_A C_B - k_2 C_C C_D \quad (2.3)$$

$$ln\frac{X_{Ae} - (2X_{Ae}-1)X_A}{X_{Ae} - X_A} = 2k_1\left(\frac{1}{X_{Ae}} - 1\right) C_{A0} t \quad (2.11)$$

ซึ่งสามารถหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาได้จากความชันของกราฟตามสมการที่ 2.11

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันมีการศึกษาและพัฒนาเกี่ยวกับการผลิตอัลคิลเอสเทอร์ จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันอย่างต่อเนื่อง โดยเริ่มจากการใช้ตัวเร่งแบบเอกพันธุ์ ตัวเร่งแบบวิวิธพันธุ์ และแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kusdiana และ Saka [8] ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการ 2 ขั้นตอนคือ ไฮโดรไลซิส และเอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันที่อุณหภูมิ 270 300 และ 350 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียสค่าร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิชันได้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่าค่าร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิชัน และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยามากกว่าอีกด้วย แต่ที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส ค่าร้อยละผลได้ของทั้งสองปฏิกิริยามีค่าใกล้เคียงกัน

Minami และ Saka [9] ทำการศึกษาการการผลิตไบโอดีเซล ด้วยกระบวนการ 2 ขั้นตอนคือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และ ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 250-320 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้ค่าร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มมากขึ้น และปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น เนื่องจากกรดไขมันแตกตัวได้ จึงทำตัวเหมือนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดเข้าทำปฏิกิริยาโดยอัตโนมัติ

Ngamsa-ard [10] ศึกษาการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มที่มีปริมาณกรดไขมันสูง ด้วยวิธีสองขั้นตอนโดยใช้ของผสมของน้ำมันปาล์มโอเลอินและกรดไขมันเป็นสารตั้งต้นในอัตราส่วนร้อยละ 4.5 โดยน้ำหนักของกรดไขมันของน้ำมันปาล์มโอเลอีน ขั้นตอนแรกเป็นการทดลองแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนขั้นตอนที่สองเป็นการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้โซเดียมเมทิลเลทเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สภาวะที่ทำการทดลองคือ อุณหภูมิอยู่ในช่วงระหว่าง 60-250 องศาเซลเซียส ความดันอยู่ในช่วงระหว่าง 14.7 500 และ 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเท่ากับ 1:3 1:6 และ 1:9 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มสามารถเกิดขึ้นได้ดีที่ อุณหภูมิสูงกว่า 150 องศาเซลเซียส โดยสามารถลดปริมาณกรดไขมันได้น้อยกว่าร้อยละ 2

Petchmala และคณะ [11] ศึกษาการผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีสารตั้งต้นคือ กรดไขมันจากน้ำมันปาล์ม และเมทานอล สภาวะที่ทำการศึกษาคือ อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอลที่อยู่ในช่วงระหว่าง 1:1 –1:12 อุณหภูมิที่อยู่ในช่วงระหว่าง 250 - 300 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 10 - 80 นาที ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การที่มีน้ำมีปนอยู่กับกรดไขมันมีผลทำให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ลดลง จากการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์มากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้ความเป็นขั้วของเมทานอลลดลง ส่งผลให้พันธะของเมทานอลแตกตัว ทำให้กรดไขมันสามารถละลายในเมทานอลได้มากขึ้น อีกทั้งในการเปรียบเทียบระหว่างที่อุณหภูมิ 250 กับ 300 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยามากกว่าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเปรียบเทียบปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน และปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน พบว่าเอสเทอร์ริฟิเคชันสามารถเกิดได้ในสภาวะที่ต่ำกว่า คือที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:45 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 50 นาที กับที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเมทานอล 1:6 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ตามลำดับ และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับปฏิกิริยาที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพันธุ์พบว่าปฏิกิริยาที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาน้อยกว่า อีกทั้งไม่ต้องมีกระบวนการทำปฏิกิริยาให้เป็นกลางที่ทำให้เกิดของเสียอีกด้วย

Yujaroen และคณะ [2] ทำการศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดไขมันที่กลั่นได้จากน้ำมันปาล์มกับเมทานอล โดยทำการศึกษาผลกระทบของการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส สภาวะที่ทำการศึกษาคือที่ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 250-300 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอล 1:6 การทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 250 ไปจนถึง 300 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์มีเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 64 ไปเป็นร้อยละ 95 เมื่อทำการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเมทานอล ผลจากงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลมากขึ้นจาก 1:1-1:6 พบว่าร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์มีค่ามากขึ้นแต่เมื่อเพิ่มอัตาส่วนเป็น 1:9-1:12 พบว่าร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์มีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณของน้ำจากเมทานอลมากขึ้น อีกทั้งเมื่อทำการทดลองโดยใส่น้ำเข้าร่วมทำปฏิกิริยากับกรดไขมันปาล์มและเมทานอล ร้อยละ 0-30 โดยปริมาตร พบว่าการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะมากขึ้น เมื่อปริมาณน้ำมากขึ้น ที่ปริมาณน้ำร้อยละ 30 โดยปริมาตร พบว่าร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ลดลงจาก 95 ลดลงเป็น 40 เนื่องจากปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้นจึงสามารถแตกโมเลกุลใหญ่ของเมทิลเอสเทอร์ได้ทำให้เกิดเป็นกรดไขมัน และทำการทดลองโดยการเพิ่มปริมาณแอลกอฮอล์ให้มากเกินพอ ในอัตราส่วนโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:6 พบว่าทำให้ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสลดลง

Pinnarat และ Savage [12] ศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดโอเลอิกกับเอทานอล โดยสภาวะที่ทำการศึกษาคือ ที่อุณหภูมิในช่วงระหว่าง 150-320 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการทดลองคือ 530 นาที อัตราส่วนโดยโมลของกรดโอเลอิกต่อเอทานอล 1:1-1:35 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและอัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเมทานอลปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่จำเป็นต้องใช้ปริมาณแอลกอฮอล์ที่มากจนเกินไป ในการศึกษาผลกระทบของน้ำที่มีผลต่อปฏิกิริยาพบว่า เมื่อปริมาณน้ำที่ปนไปกับสารตั้งต้นมีปริมาณมากขึ้นทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงมีค่าลดลง

Berrios และคณะ [3]ทำการศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระจากน้ำมันดอกทานตะวันกับเมทานอล โดยมีกรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีสภาวะที่ทำการศึกษาคือความเร็วรอบในการกวน 200-600 รอบต่อนาที ที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเมทานอล 1:10-1:80 อุณหภูมิอยู่ในช่วงระหว่าง 30-60 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วรอบมากกว่า 250 รอบต่อนาทีไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา เมื่ออัตราส่วนของกรดไขมันต่อเมทานอลและอุณหภูมิมากขึ้นค่าของกรดมีค่าลดลง และค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันพบว่าเป็นรูปแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง โดยตั้งสมมุติฐานว่าแอลกอฮอล์มากเกินพอจึงถือว่าเป็นค่าคงที่ และได้ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ 44.559 กิโลจูลต่อโมล

Somsai [6] ทำการศึกษาจลพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมันปาล์มแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 60 - 300 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 500 และ 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกรดไขมันปาล์มต่อเมทานอลเท่ากับ 1:1 1:5 และ 1:10 เวลาที่ใช้ในการทดลอง 300 นาที การทดลดลองแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมันปาล์มแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่สามารถเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 60 องศาเซลเซียส การเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และเข้าสู่สมดุลของปฏิกิริยาที่เวลาประมาณ 120 นาที แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ขึ้นกับความดัน และการศึกษาจลพลศาสตร์พบว่าปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมันปาล์มแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าประมาณ 31.5 กิโลจูลต่อโมล

Alenezi และคณะ [13] ศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดไขมันอิสระกับเมทานอล โดยสภาวะที่ทำการทดลองคือช่วงอุณหภูมิระหว่าง 250-320 องศาเซลเซียส ความดัน 10 เมกะปาสคาล อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเมทานอลระหว่าง 1:0.7 - 1:7 ความเร็วรอบในการกวน 430 850 และ 1630 รอบต่อนาที ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของเมทานอลจาก 1:1 เป็น 1:1.6 ทำให้ค่าร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่ออัตราส่วนของกรดไขมันต่อเมทานอลเป็น 1:7 ค่าร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์มีค่าลดลง ในการศึกษาความเร็วรอบในการกวนพบว่าที่ความเร็วรอบมากกว่า 850 รอบต่อนาทีไม่มีผลต่อปฏิกิริยา เมื่ออุณหภูมิที่ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์จะเพิ่มมากขึ้น การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันที่ 250-320 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเมทานอล 1:7 ความเร็วรอบในการกวน 430 โดยศึกษารูปแบบของปฏิกิริยาอันดับสองแบบผันกลับได้ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันมีค่าเท่ากับ 72 กิโลจูลต่อโมล และพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสมีค่าเท่ากับ 23.2 กิโลจูลต่อโมล

กำแหงเดชพล [14] ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกและกรดเสตียริกกับเอทานอลแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 250-300 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมล 1:1-1:10 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่ออัตราส่วนโดยโมลมากขึ้นค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันมากขึ้น และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปฏิกิริยาเกิดได้ดี และเร็วขึ้น สำหรับการศึกษาแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์พบว่ารูปแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่ผันกลับมีความเหมาะสมกับปฏิกิริยา เมื่อเลือกศึกษาจลนพลศาสตร์เฉพาะช่วงแรกของปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเอทานอลที่มากเกินพอ

Cho และคณะ [15] ศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดไขมันที่กลั่นได้จากน้ำมันปาล์มกับเมทานอล สภาวะที่ทำการศึกษาคือที่ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 230-290 องศาเซลเซียส จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาคือ อุณหภูมิ 290 องศาเซลเซียส ความดัน 0.85 เมกะปาสคาล อัตราการป้อนเมทานอล 2.4 กรัมต่อนาที ภายในเวลา 180 นาที ทำให้ค่าของกรดลดลงจาก 191.4 ไปยัง 0.36 การศึกษาทางจลนพลศาสตร์โดยกำหนดให้ปฏิกิริยาทำการกำจัดน้ำออกจากปฏิกิริยา ทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าได้มากจึงตัดพจน์ของผลิตภัณฑ์ออกได้ อีกทั้งสภาวะที่ใช้ทำการทดลองคือที่ปริมาณของเมทานอลมากเกินพอ ค่าความเข้มข้นของเมทานอลจึงเป็นค่าคงที่รวมกับค่าคงที่ของปฏิกิริยาได้ ซึ่งเข้ากับแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่ผันกลับ และมีค่าพลังงานก่อกัมมันต์เท่ากับ 17.74 กิโลจูลต่อโมล

จากตัวอย่างของการศึกษาและพัฒนาการผลิตอัลคิลเอสเทอร์ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่างานวิจัยด้านปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน แบบไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นงานที่น่าสนใจในการศึกษาการผลิตอัลคิลเอสเทอร์

2.2.2 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันมีปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเป็นปฏิกิริยาผันกลับ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสทำให้ต้องมีการใช้แอลกอฮอล์ที่มากเกินพอเพื่อผลักสมดุลไปข้างหน้า
2. ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันมีการดำเนินการแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามาช่วยเร่งปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มี แบบตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์ และแบบวิวิธพันธุ์
3. ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันที่มีการดำเนินการแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้ในสภาวะที่อุณหภูมิและความดันสูง โดยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันที่มีการดำเนินการแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาให้ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ที่สูงในเวลาอันรวดเร็ว
4. อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อแอลกอฮอล์และอุณหภูมิมีผลกระทบต่อปฏิกิริยา
5. รูปแบบจำลองทางจลพลศาตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันนั้นสามารถจำลองได้จำได้ 4 รูปแบบ คือปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่ผันกลับ ปฏิกิริยาอันดับสองแบบไม่ผันกลับ ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบผันกลับได้ ปฏิกิริยาอันดับสองแบบผันกลับได้

บทที่ 3
วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

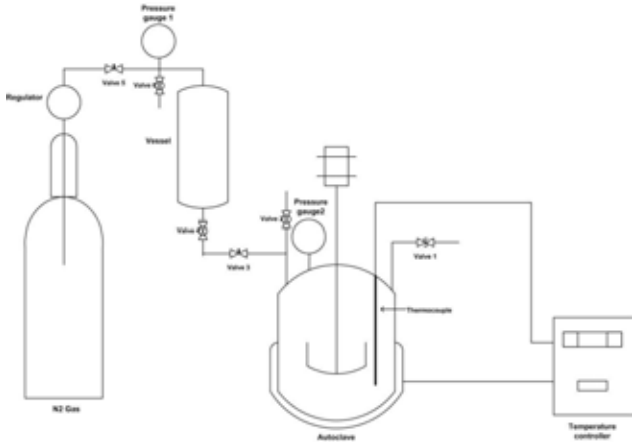
สารเคมีที่ใช้ในการดำเนินการทดลองและใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองมีดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการดำเนินการทดลองและใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

สารเคมี	เกรด/ความบริสุทธิ์
กรดปาล์มิติก	98%
กรดสเตียริก	98%
เมทานอล	98%
ไอโซโพรพานอล	industrial
ทูโลอีน	industrial
ฟีนอฟท์ทาลีน	Analytical reagent
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	Analytical reagent
เฮกเซน	Analytical reagent
เมทิลเดกคาร์โนเอต	Analytical reagent

3.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะขนาด 2 ลิตร ที่ทำจากแสตนเลส โดยระบบของการดำเนินการทดลองเป็นไปดังรูป 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ [14]

3.2.1 ขั้นตอนการทำการทดลอง

1 เตรียมกรดไขมัน และเมทานอล ในอัตราส่วนที่ต้องการ

2. บรรจุกรดไขมัน ที่เตรียมไว้ลงในเครื่องปฏิกรณ์ และบรรจุเมทานอลลงในถังบรรจุเมทานอล

3. ปรับความเร็วรอบในการกวนและปรับอุณหภูมิตามสภาวะที่ต้องการ

4. เติมเมทานอลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์

5. ปรับความดันในเครื่องปฏิกรณ์จนได้ความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

6. ทำการทดลองเป็นเวลา 360 นาที

7. เก็บตัวอย่างที่เวลา 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 180, 240, 300 และ360 นาที

3.2.2 สภาวะการทดลอง

1. ความดันคงที่ ณ ความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

2. ความเร็วรอบในการกวนที่ 50 100 200 400 และ 600 รอบต่อนาที

3. อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเมทานอลศึกษาที่อัตราส่วน 1:1 1:2 1:4 และ1:6

4. อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 175-250 องศาเซลเซียส

5. เวลาที่ใช้ในการดำเนินการทดลอง 360 นาที

3.3 การวิเคราะห์สารตัวอย่าง

1.การวิเคราะห์ความค่าความเข้มข้นของกรดไขมันที่เหลือในสารตัวอย่างโดยทำการวิเคราะห์ตามวิธีการ AOCS Cd-3D-63

2.วิเคราะห์หาองค์ประกอบของสารตัวอย่างในบางสภาวะด้วยเครื่อง แก๊สโครมาโตรกราฟ (GC)

3.4 ค่าความคลาดเคลื่อน

3.4.1 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์

ค่าเฉลี่ย ,$\bar{X} = \frac{\sum x}{n}$ (3.1)

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากค่าเฉลี่ย, $S.D. = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n}}$ (3.2)

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองที่สภาวะ ความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:6 อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส หาค่าความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์โดยการทำการวิเคราะห์ซ้ำ 3 ครั้ง ได้ผลดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์

เวลา (นาที)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน				ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
5	10.01	2..12	3.15	5.09	3.50	
10	0.12	5.25	8.87	1.74	5.29	
15	7.31	8.41	6.43	7.38	0.81	2.58
20	11.23	13.49	20.40	15.04	3.90	
25	21.21	12.50	18.48	17.40	3.64	
30	33.47	32.51	22.64	29.54	4.89	

ตารางที่ 3.2 ตารางค่าความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ (ต่อ)

เวลา (นาที)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน				ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
40	35.14	34.08	33.48	42.67	0.69	
50	42.85	41.09	44.07	41.62	1.22	
60	49.26	42.51	33.08	55.28	6.64	
90	46.81	58.60	60.42	67.03	6.03	
120	68.44	66.99	65.66	73.02	1.13	2.58
180	73.42	71.81	73.82	77.08	0.87	
240	76.29	76.74	78.22	81.08	0.82	
300	79.82	80.86	82.57	81.25	1.13	
360	80.39	81.29	82.08	82.67	0.69	

3.4.2 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง

ทำการทดลองที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบ400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:6 อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งได้ผลดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง

เวลา (นาที)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน				ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
5	46.35	5.83	3.15	18.44	19.76	
10	41.82	14.61	8.87	21.77	14.37	
15	17.31	23.40	6.43	15.71	7.02	5.16
20	24.66	28.56	20.40	24.54	3.33	
25	29.09	39.21	18.48	28.93	8.46	
30	28.42	36.65	22.64	29.24	5.75	

ตารางที่ 3.3 ตารางค่าความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ (ต่อ)

เวลา (นาที)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน				ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
40	41.08	45.227	33.48	39.95	4.88	
50	43.05	51.00	44.07	46.34	3.29	
60	51.05	56.93	33.08	47.02	10.14	
90	58.91	64.37	60.42	61.22	2.28	
120	66.99	64.83	65.66	65.83	0.89	5.16
180	74.05	74.08	73.82	73.98	0.12	
240	74.79	77.36	78.22	76.79	1.46	
300	81.02	81.08	82.57	81.55	0.72	
360	82.15	82.42	82.08	82.22	0.15	

บทที่ 4
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆที่มีต่อปฏิกิริยา ดังต่อไปนี้ ความเร็วรอบในการกวน อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเมทานอล และอุณหภูมิ ซึ่งผลการทดลองสามารถแบ่งได้เป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์สารตั้งต้น

4.2 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล

- 4.2.1 ผลการศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล
- 4.2.2 ผลกระทบของความเร็วรอบในการกวนที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล
- 4.2.3 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของกรดปาล์มิติกต่อเมทานอลที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล
- 4.2.4 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล
- 4.2.5 จลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล

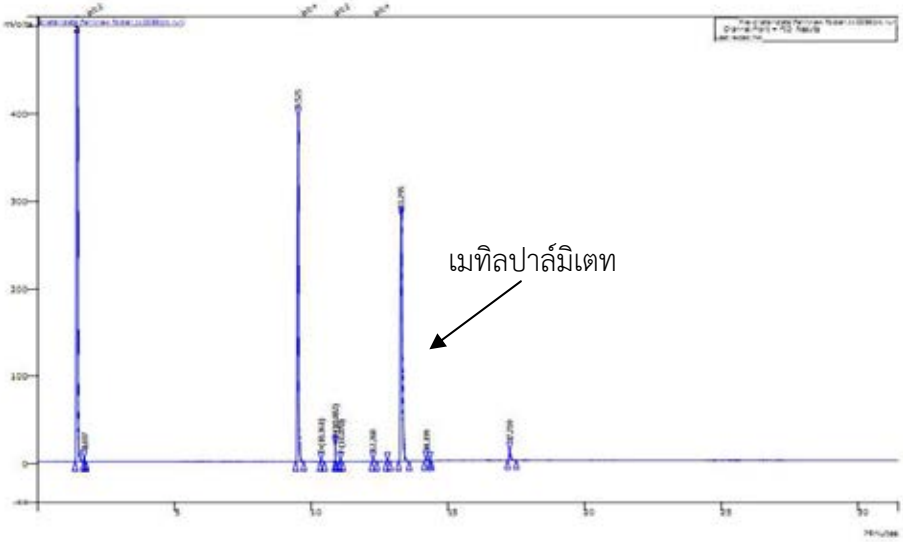
4.3 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดสเตียริกกับเมทานอล

- 4.3.1 ผลการศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดเสตียริกกับเมทานอล
- 4.3.2 ผลกระทบของความเร็วรอบในการกวนที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดกรดสเตียริกกับเมทานอล
- 4.3.3 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของกรดปาล์มิติกต่อเมทานอลที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดกรดสเตียริกกับเมทานอล
- 4.3.4 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดกรดสเตียริกกับเมทานอล
- 4.3.5 จลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดสเตียริกกับเมทานอล

4.4 ผลกระทบของการใช้กรดไขมันที่แตกต่างกันต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกและกรดสเตียริกกับเมทานอล

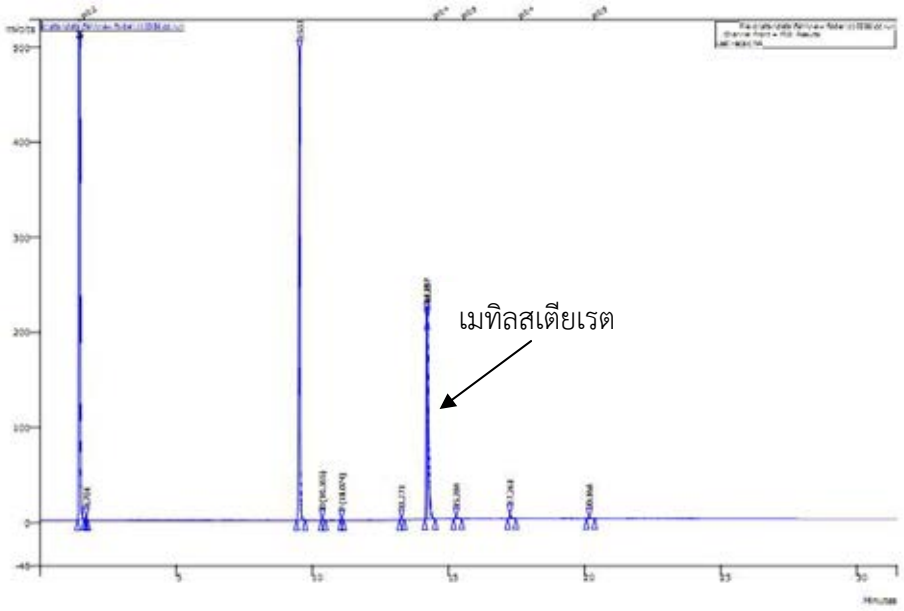
4.1 ผลการวิเคราะห์สารตั้งต้น

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของกรดปาล์มิติกและกรดสเตียริก ซึ่งประกอบไปด้วยการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของกรดปาล์มิติกและกรดสเตียริก โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ สำหรับการวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรดโดยวิธีมาตรฐาน AOCS Cd-3D-638 การวิเคราะห์หาค่าสปอนนิฟิเคชัน และค่ามวลโมเลกุลโดยวิธีมาตรฐาน AOCS Cd-3b-76 และการวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นซึ่งวิเคราะห์โดยพิคโนมิเตอร์ (pycnometer) ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของกรดปาล์มิติกด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าสารตัวอย่างมี เมทิลปาล์มิเตท ร้อยละ 98 และอีกร้อยละ 2 คือ เมทิลไมริสเตทและ เมทิลสเตียเรต ซึ่งบอกได้ว่าสารตั้งต้นมีองค์ประกอบของกรดปาล์มิติกอยู่ร้อยละ 98 และมีกรดไมริสติกและกรดสเตียริกปนอยู่ ร้อยละ 2



รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของกรดสเตียริกด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าสารตัวอย่างมี เมทิลสเตียเรต ร้อยละ 98 และอีกร้อยละ 2 คือ เมทิลปาล์มิเตทและ เมทิลโอลิเอต ซึ่งบอกได้ว่าสารตั้งต้นมีองค์ประกอบของกรดสเตียริกอยู่ร้อยละ 98 และมีกรดปาล์มิติกและกรดโอเลอิกปนอยู่ ร้อยละ 2

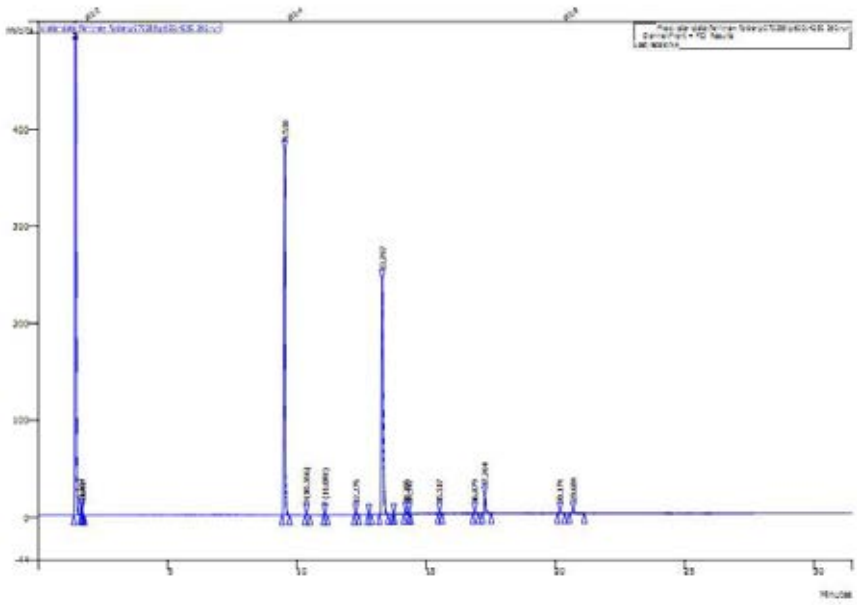
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆของสารตั้งต้น

ชื่อสารเคมี	ค่าของกรด (mg KOH/g)	ค่าสปอนนิฟิเคชัน (mg KOH/g)	ค่าความหนาแน่น (g/cm^3)	มวลโมเลกุล (g/mol)
กรดปาล์มิติก	260.51	220	0.80	257.12
กรดสเตียริก	234.0	192	0.79	294.78

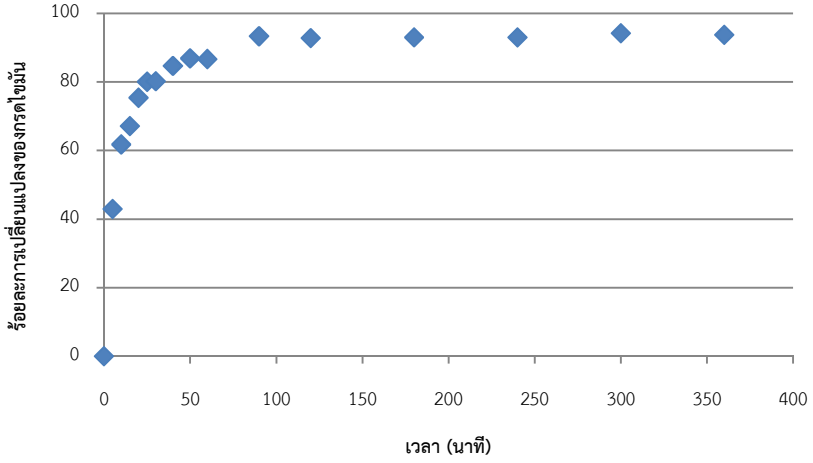
4.2 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล

4.2.1 ผลการศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล มีสารตั้งต้นคือกรดปาล์มิติก ทำปฏิกิริยากับเมทานอลได้ผลิตภัณฑ์คือ เมทิลปาล์มิเตท และน้ำ ผลการศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่อุณหภูมิ ประมาณ 70 องศาเซลเซียส พบว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้โดยให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงอยู่ที่ ร้อยละ 24 แต่เมื่อทำการศึกษาการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส พบว่าได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงมากกว่าร้อยละ 90 แสดงว่าเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานั้นสามารถเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง เมื่อนำสารตัวอย่างที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟพบสารเมทานอล เมทิลปาล์มิเตท (ซึ่งมีเอสเทอร์ที่ปนมาด้วยคือเมทิลไมริสเตทและ เมทิลสเตียเรต) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และนำสารตัวอย่างมาวิเคราะห์ ด้วยการไตเตรทตามวิธีมาตรฐาน AOCS Cd-3D-638 พบว่ามีกรดไขมันที่เหลือจากการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.4 อีกทั้งสารตัวอย่างที่นำวิเคราะห์ด้วยการไตเตรตแบบคาร์ล ฟิชเชอร์พบน้ำ ซึ่งผลการวิเคราะห์สารตัวอย่างแสดงให้เห็นว่าในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล ไม่มีปฏิกิริยาข้างเคียง ผลการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยการไตเตรทแสดงให้เห็นว่าค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของปฏิกิริยา และคงที่ในเวลาต่อมา ซึ่งเป็นลักษณะของปฏิกิริยาที่เข้าสู่สมดุล อีกทั้งค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปาล์มิติกที่เวลาสุดท้ายไม่ถึงร้อยละ 100 จึงกล่าวได้ว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดปาล์มิติก กับเมทานอลเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้



รูปที่ 4.3 วิเคราะห์สารตัวอย่างของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟฟี

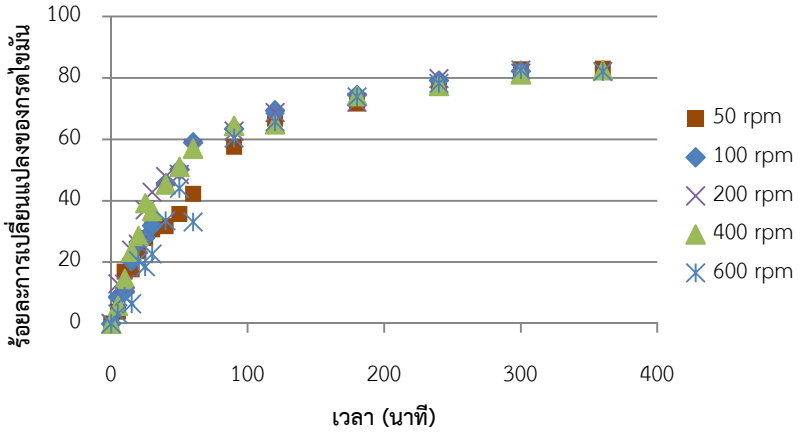


รูปที่ 4.4 วิเคราะห์สารตัวอย่างของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล ด้วยการไตเตรท

4.2.2 ผลกระทบของความเร็วรอบในการกวนที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล

การศึกษาผลกระทบของความเร็วรอบในการกวนที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล ซึ่งเป็นปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์คือสารในระบบเป็นวัฏภาคเดียวกัน ความเร็วรอบในการกวนจึงมีความสำคัญในการผสมสารในระบบให้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยการทำปฏิกิริยาใน

งานวิจัยได้มีการศึกษาความเร็วรอบที่ 50 100 200 400 และ 600 รอบต่อนาที ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงผลกระทบของความเร็วรอบในการกวนที่มีผลต่อปฏิกิริยาที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อัตราส่วนโดยโมลกรดปาล์มิติกต่อเมทานอล 1:6 อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.5 ผลกระทบของความเร็วรอบในการกวนที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล

ตารางที่ 4.2 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดปาล์มิติกที่สภาวะสมดุลของการศึกษาผลกระทบของความเร็วรอบในการกวน

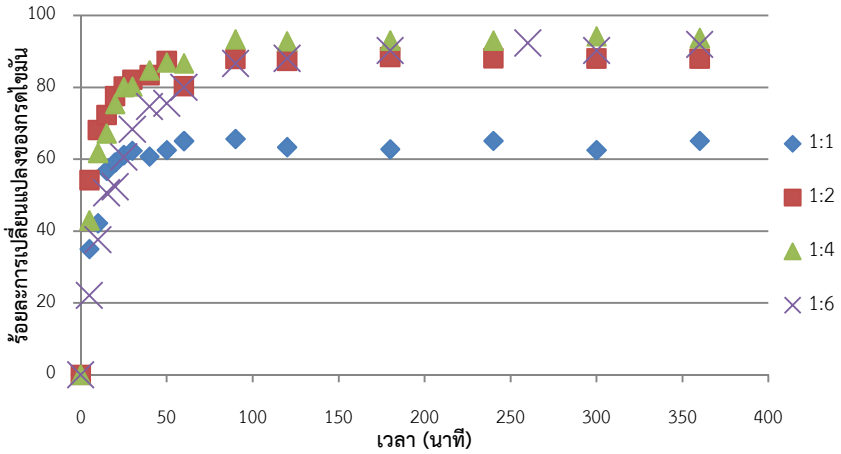
ความเร็วรอบในการกวน (รอบต่อนาที)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดปาล์มิติก
50	82.94
100	82.12
200	81.52
400	82.42
600	82.08

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและเข้าสู่สมดุลที่เวลาต่อมา และที่ค่าความเร็วรอบในการกวนที่ต่างกันให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันที่สภาวะสมดุลมีค่าใกล้เคียงกันมาก จึงสรุปว่าความเร็วรอบในการกวนไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล เนื่องจากสารในระบบผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี ในการทดลองของผลกระทบ

อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเมทานอลจึงเรื่องใช้ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาทีในการทดลองเพื่อให้สารในระบบเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีอย่างรวดเร็ว ตั้งแต่ช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยา

4.2.3 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของกรดปาล์มิติกต่อเมทานอลที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล

อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อแอลกอฮอล์ได้มีการศึกษาว่าเป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่ 1:1 ซึ่งเป็นอัตราส่วนโดยโมลตามมวลสารสัมพันธ์ และ 1:2 1:4 และ 1:6 ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณเมทานอลเพื่อที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าได้มากขึ้น ซึ่งผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่มีผลต่อปฏิกิริยาที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วในการกวน 400 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.6 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของกรดปาล์มิติกต่อเมทานอลที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล

ตารางที่ 4.3 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดปาล์มิติกที่สภาวะสมดุลของการศึกษาผลกระทบอัตราส่วนโดยโมลกรดปาล์มิติกต่อเมทานอล

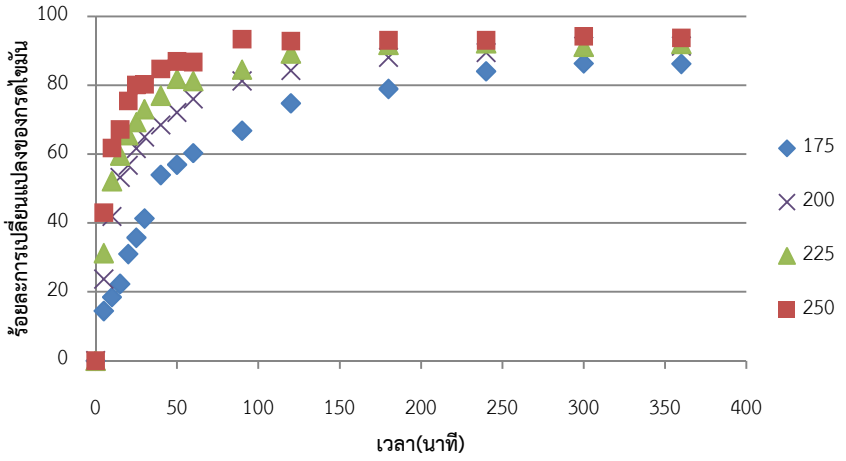
อัตราส่วนโดยโมล	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดปาล์มิติก
1:1	65.13
1:2	87.98
1:4	93.75
1:6	91.96

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาเกิดได้อย่างรวดเร็วในช่วงแรก และเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลาหนึ่ง เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของกรดปาล์มิติกกับเมทานอลมากขึ้นจะทำให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันเพิ่มมากขึ้น ที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล 1:1 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันสูงสุดอยู่ที่ ร้อยละ 65 อัตราส่วนโดยโมลของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล 1:2 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันสูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น ร้อยละ 88 เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของกรดปาล์มิติกกับเมทานอลเป็น 1:4 และ 1:6 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันสูงสุดสูงถึง ร้อยละ 92 อัตราส่วนโดยโมลของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล 1:1 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันยังคงขึ้นอยู่กับจำนวนโมลของเมทานอลอย่างเห็นได้ชัด ที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล 1 : 2 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันขึ้นอยู่กับจำนวนโมลของเมทานอลเพียงเล็กน้อย กรณีของอัตราส่วนโดยโมลของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล 1:4 และ 1:6 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันไม่ขึ้นกับจำนวนโมลของเมทานอล Yujaroen และคณะ [2] ทำการศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดไขมันที่กลั่นได้จากน้ำมันปาล์มกับเมทานอล ผลจากงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลมากขึ้นจาก 1:1-1:6 พบว่าร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์มีค่ามากขึ้นเมื่ออัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอลมากขึ้น

ในการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกศึกษาที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเมทานอลที่ 1:4 เนื่องจากเป็นสภาวะที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันไม่มีผลต่อปฏิกิริยา

4.2.4 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล

อุณหภูมิเป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาอยู่ที่ 175 200 225 และ 250 องศาเซลเซียส ซ่งผลการทดลองเป็น ดังรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.4 ซึ่งแสดงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อปฏิกิริยาที่ความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดปาล์มิติกต่อเมทานอล 1: 4



รูปที่ 4.7 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล

ตารางที่ 4.4 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดปาล์มิติกที่สภาวะสมดุลของการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ

อุณหภูมิ (องศาเซลซียส)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดปาล์มิติก
175	86.21
200	91.35
225	92.00
250	93.75

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันมากขึ้นอย่างมากในช่วงแรกของปฏิกิริยา โดยผลการทดลองที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดปาล์มิติกอยู่ที่ ร้อยละ 86 ในเวลา 300 นาที 200 องศาเซลเซียส ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดปาล์มิติกอยู่ที่ ร้อยละ 91 ในเวลา 180 นาที ที่อุณหภูมิ 225 และ 250 องศาเซลเซียส ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดปาล์มิติกอยู่ที่ ร้อยละ 92 ในเวลา 120 นาทีและ ร้อยละ 94 ในเวลา 90 นาที ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา อย่างมากในช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยา สังเกตได้จากความชันของกราฟ ที่แต่ละอุณหภูมิ ค่าของอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงมากขึ้นและเข้าสู่สมดุลได้เร็วขึ้น เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับ Yujaroen และคณะ [2] ทำการศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดไขมันที่กลั่นได้จากน้ำมันปาล์มกับเมทานอล การทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 250 ไปจนถึง 300 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์มีเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 64 ไปเป็นร้อยละ 95 และจากการศึกษาของ Minami และ Saka [9] ที่ทำการศึกษาการการผลิตไบโอดีเซล ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้ค่าร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มมากขึ้น และปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น เนื่องจากกรดไขมันแตกตัวจึงทำตัวเหมือนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดเข้าทำปฏิกิริยาโดยอัตโนมัติ Warabi และคณะ [1] ทำการศึกษาปฏิกิริยาของไตรกลีเซอร์ไรด์และกรดไขมันกับแอลกอฮอล์แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จากการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิสูงเมทานอลจะทำตัวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด

สารตั้งต้นของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันทั้งกรดไขมันและเมทานอลสามารถแตกตัว และทำตัวเหมือนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดได้ โดยมีค่าคงที่ของการแตกตัวของกรดไขมันอยู่ที่ประมาณ 4.7 [16] และค่าคงที่ของการแตกตัวของเมทานอลอยู่ที่ประมาณ 15.54 [17]

4.2.5 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล

เมื่อนำผลการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิของกรดปาล์มิติก มาทำการคำนวณทางจลนพลศาสตร์ โดยทำการคำนวณในช่วงต้นของการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอลจึงสามารถลดพจน์ของผลิตภัณฑ์ออกได้ และสำหรับการศึกษาจลนพลศาสตร์ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเมทานอลอยู่ที่ 1:4 ซึ่งเป็นสภาวะที่ปริมาณของเมทานอลไม่ขึ้นกับปฏิกิริยา เพราะฉะนั้นความเข้มข้นของเมทนอลจึงเป็นค่าคงที่รวมกับค่าคงที่ของปฏิกิริยา

สมการเคมีของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันสามารถเขียนได้ดังสมการด้านล่าง

$$A + B \rightleftharpoons C + D$$

$$\text{Fatty Acid} + \text{MeOH} \rightleftharpoons \text{Ester} + \text{Water}$$

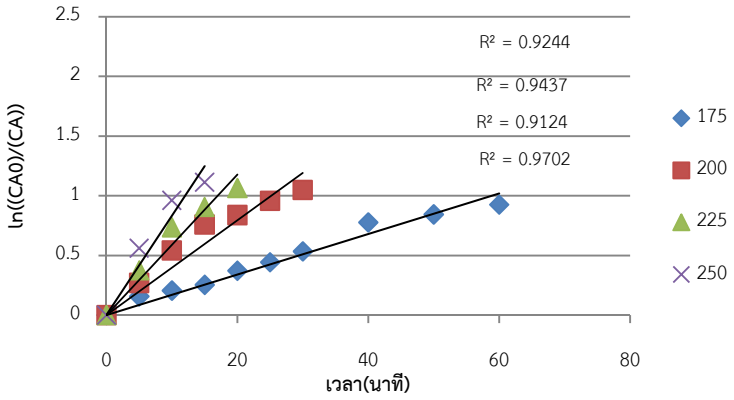
ซึ่งจากสมการเคมีสามารถนำมาเขียนสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ดังต่อไปนี้

$$-r_A = \frac{dC_A}{dt} = k_1 C_A C_B - k_2 C_C C_D$$

เมื่อนำสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยามาจัดรูปแบบใหม่ตามสมมุติฐานข้างต้นจะได้ดังสมการที่ 4.1 ซึ่งเป็นสมการในรูปแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่ผันกลับ และสามารถหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาได้จากความสัมพันธ์ตาม สมการที่ 4.2

$$-r_A = -\frac{dC_A}{dt} = k'_1 C_A \tag{4.1}$$

$$ln(\frac{[C_{Ao}])}{[C_A]}) = k'_1 t \tag{4.2}$$



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของ ln((CA0)/(CA)) กับเวลาเพื่อใช้ในการหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่เวลาช่วงแรกของปฏิกิริยา

ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่ปฏิกิริยาของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่เวลาช่วงแรกของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ

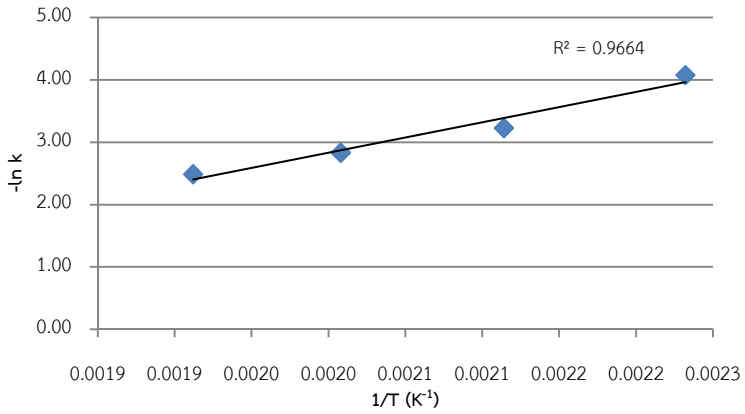
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่ปฏิกิริยา,k' (กรดปาล์มิติก)
175	0.0170
200	0.0397
225	0.0589
250	0.0832

สมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation)

$$k = Ae^{\frac{-E_a}{RT}} \tag{4.3}$$

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{RT} \tag{4.4}$$

ผลการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆให้ผลดังตารางที่ 4.5 และผลจากการศึกษาพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ค่าคงที่ของปฏิกิริยามีค่ามากขึ้น ซึ่งค่าคงที่ปฏิกิริยาสามารถนำมาหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ได้จากสมการอาร์เรเนียส ดังสมการที่ 4.3 โดยค่าพลังงานก่อกัมมันต์คือค่าพลังงานน้อยที่สุดซึ่งสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ ค่าพลังงานก่อกัมมันต์นั้นหาได้จากค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ตามสมการที่ 4.4 โดยผลจากการคำนวณค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดปาล์มิติกกับเมทานอลแสดงดังรูปที่ 4.9 เมื่อนำค่าความชันของกราฟไปคำนวณหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์จะได้ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกับเมทานอลที่เวลาช่วงแรกของปฏิกิริยามีค่า 40.54 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งค่าพลังงานก่อกัมมันต์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Berrios และคณะ [3] ซึ่งทำการศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระจากน้ำมันดอกทานตะวันกับเมทานอล โดยมีกรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันพบว่าเป็นรูปแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง โดยตั้งสมมุติฐานว่าแอลกอฮอล์มากเกินพอจึงถือว่าเป็นค่าคงที่ และได้ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ 44.559 กิโลจูลต่อโมล



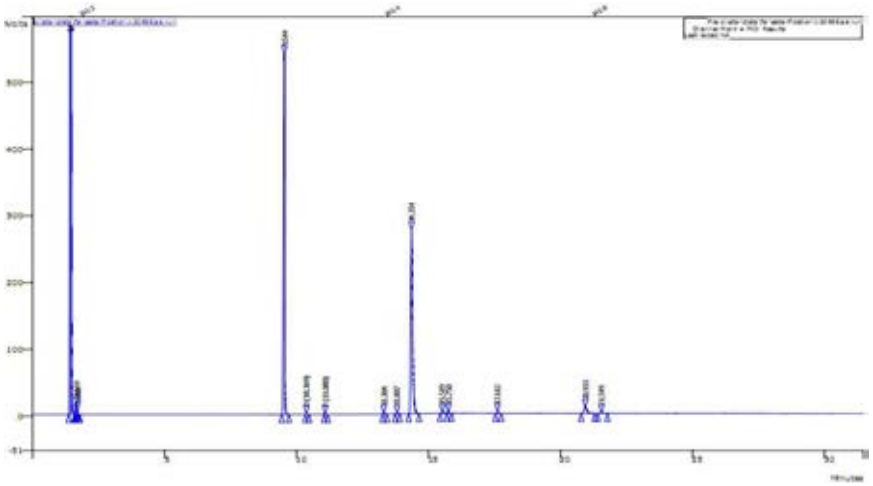
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ตามสมการอาร์เรเนียส เพื่อใช้ในการหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่เวลาช่วงแรกของปฏิกิริยา

4.3 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดสเตียริกกับเมทานอล

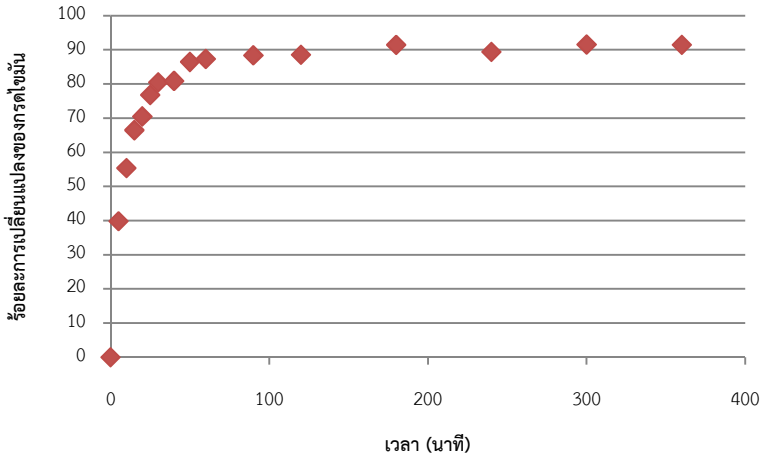
4.3.1 ผลการศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดสเตียริกกับเมทานอล

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดสเตียริกกับเมทานอล มีสารตั้งต้นคือกรดสเตียริก ทำปฏิกิริยากับเมทานอลได้ผลิตภัณฑ์คือ เมทิลสเตียเรต และน้ำ ผลการศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดสเตียริกกับเมทานอลที่อุณหภูมิ ประมาณ 70 องศาเซลเซียส พบว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้โดยให้ค่าร้อยละกาเปลี่ยนแปลงอยู่ที่ ร้อยละ 22 แต่เมื่อทำการศึกษาการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส พบว่าได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงมากกว่าร้อยละ 90 แสดงว่าเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานั้นสามารถเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง เมื่อนำสารตัวอย่างที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟพบสารเมทานอล เมทิลสเตียเรต (ซึ่งมีเอสเทอร์ที่ปนมาด้วย คือเมทิลปาล์มิเตทและเมทิลโอลิเอต) ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และนำสารตัวอย่างมาวิเคราะห์ ด้วยการไตเตรทตามวิธีมาตรฐาน AOCS Cd-3D-638 พบว่ามีกรดไขมันที่เหลือจากการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.11 อีกทั้งสารตัวอย่างที่นำวิเคราะห์ด้วยการไตเตรตแบบคาร์ล ฟิชเชอร์พบน้ำ ซึ่งผลการวิเคราะห์สารตัวอย่างแสดงให้เห็นว่าในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดสเตียริกกับเมทานอล ไม่มีปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้น ผลการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยการไตเตรทแสดงให้เห็นว่าค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของปฏิกิริยา และคงที่ในเวลาต่อมา ซึ่งเป็นลักษณะของปฏิกิริยาที่เข้าสู่สมดุล อีกทั้งค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันที่เวลาสุดท้ายไม่ถึง

ร้อยละ 100 จึงกล่าวได้ว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดสเตียริกกับเมทานอลเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้



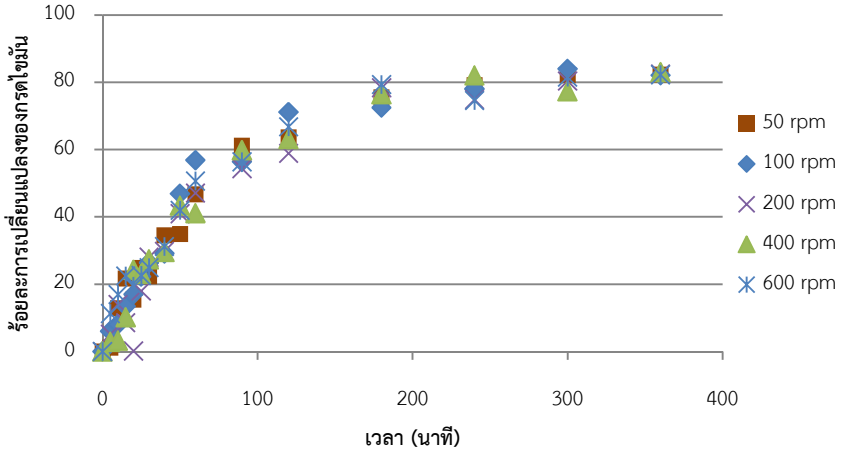
รูปที่ 4.10 วิเคราะห์สารตัวอย่างของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดสเตียริกกับเมทานอล ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟฟี



รูปที่ 4.11 วิเคราะห์สารตัวอย่างของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดสเตียริกกับเมทานอล ด้วยการไตเตรท

4.3.2 ผลกระทบของความเร็วรอบการกวนที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดสเตียริกกับเมทานอล

การศึกษาผลกระทบของความเร็วรอบในการกวนที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดกรดสเตียริกกับเมทานอล ซึ่งเป็นปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ คือสารในระบบเป็นวัฏภาคเดียวกัน ความเร็วรอบในการกวนจึงมีความสำคัญในการผสมสารในระบบให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยการทำปฏิกิริยาในงานวิจัยได้มีการศึกษาความเร็วรอบที่ 50 100 200 400 และ 600 รอบต่อนาที จากรูปที่ 4.12 และตารางที่ 4.6 แสดงผลกระทบของความเร็วรอบในการกวนที่มีผลต่อปฏิกิริยาที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อัตราส่วนโดยโมลกรดกรดสเตียริก ต่อเมทานอล 1:6 อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.12 ผลกระทบของความเร็วรอบในการกวนที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดสเตียริก กับเมทานอล

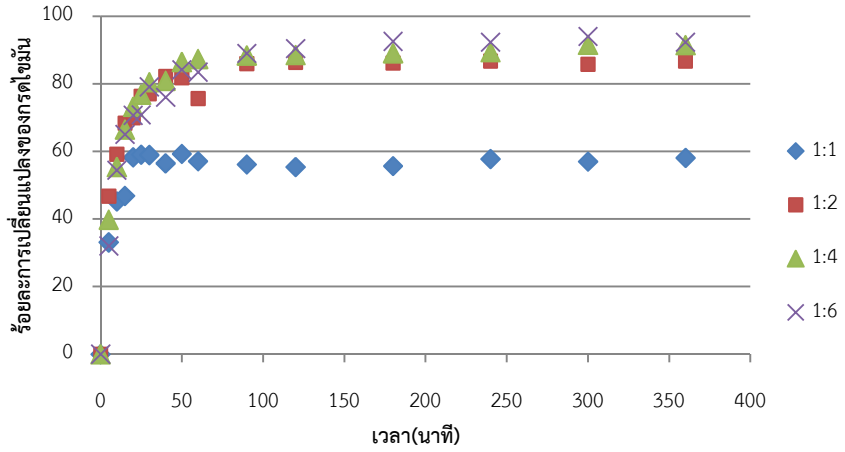
ตารางที่ 4.6 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดสเตียริกที่สภาวะสมดุลของการศึกษาผลกระทบของความเร็วรอบในการกวน

ความเร็วรอบในการกวน (รอบต่อนาที)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดสเตียริก
50	82.24
100	82.13
200	81.41
400	83.05
600	82.21

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและเข้าสู่สมดุลที่เวลาต่อมา ที่ค่าความเร็วรอบในการกวนที่ต่างกันให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันที่สภาวะสมดุลมีค่าใกล้เคียงกันมาก จึงสรุปว่าความเร็วรอบในการกวนไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของกรดสเตียริกกับเมทานอล เนื่องจากสารในระบบผสมเป็นนื้อเดียวกันได้ดี ในการทดลองของผลกระทบอัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเมทานอลจึงเรื่องใช้ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาทีในการทดลองเพื่อให้สารในระบบเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีอย่างรวดเร็ว ตั้งแต่ช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยา

4.3.3 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของกรดสเตียริกต่อเมทานอลที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดกรดสเตียริก กับเมทานอล

อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเมทานอลได้มีการศึกษาว่าเป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของกรดสเตียริก กับเมทานอลที่ 1:1 ซึ่งเป็นอัตราส่วนโดยโมลตามมวลสารสัมพันธ์ และ 1:2 1:4 และ1:6 ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณเมทานอลเพื่อที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าได้มากขึ้น ผลการศึกษาเป็นดังรูปที่ 4.13 และตารางที่ 4.7 ซึ่งแสดงผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของกรดกรดสเตียริกกับเมทานอลที่มีต่อปฏิกิริยา ที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วในการกวน 400 รอบต่อนาที และอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.13 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของกรดสเตียริกต่อเมทานอลที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดสเตียริกกับเมทานอล

ตารางที่ 4.7 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดสเตียริกที่สภาวะสมดุลของการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลกรดสเตียริกต่อเมทานอล

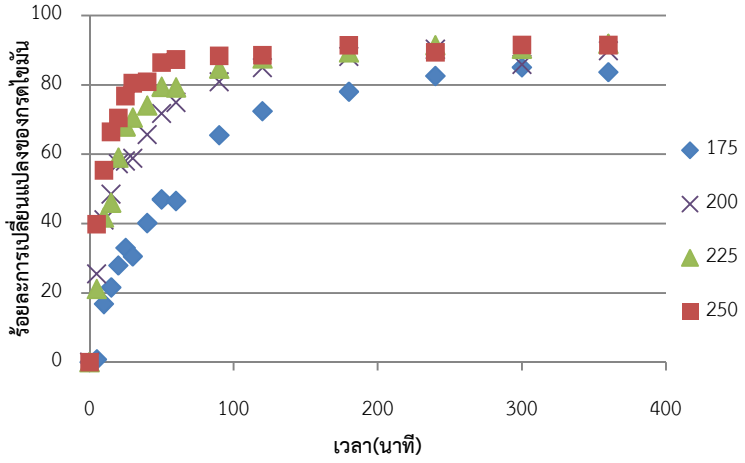
อัตราส่วนโดยโมล	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดกรดสเตียริก
1:1	58.08
1:2	86.75
1:4	91.46
1:6	92.34

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมล ของกรดสเตียริกกับเมทานอลมากขึ้นจะทำให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันมากขึ้น ที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดสเตียริกกับเมทานอล 1:1 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันสูงสุดอยู่ที่ ร้อยละ 58 อัตราส่วนโดยโมลของกรดสเตียริกกับเมทานอล 1:2 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันสูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น ร้อยละ 87 เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของกรดสเตียริกกับเมทานอลเป็น 1:4 และ 1:6 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันสูงสุดสูง ประมาณร้อยละ 92 ปฏิกิริยามีร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่และเริ่มเข้าสู่สมดุลในเวลาต่อมา อัตราส่วนโดยโมลของกรดสเตียริกกับเมทานอล 1:1 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันยังคงขึ้นอยู่กับจำนวนโมลของเมทานอลอย่างเห็นได้ชัด ที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดสเตียริกกับเมทานอล 1:2 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันขึ้นอยู่กับจำนวนโมลของเมทานอลเพียงเล็กน้อย กรณีของอัตราส่วนโดยโมลของกรดสเตียริกกับเมทานอล 1:4 และ 1:6 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันไม่ขึ้นกับจำนวนโมลของเมทานอล จึงสรุปได้ว่าอัตราส่วนโดยโมลของกรดสเตียริกต่อเมทานอลมากกว่า 1:2 ไม่มีผลต่อปฏิกิริยา Yujaroen และคณะ [2] ทำการศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดไขมันที่กลั่นได้จากน้ำมันปาล์มกับเมทานอล ผลจากงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลมากขึ้นจาก 1:1-1:6 พบว่าร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์มีค่ามากขึ้นเมื่ออัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอลมากขึ้น

ในการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกศึกษาที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเมทานอลที่ 1:4 เนื่องจากเป็นสภาวะที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันไม่มีผลต่อปฏิกิริยา

4.3.4 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดสเตียริกกับเมทานอล

อุณหภูมิเป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาอยู่ที่ 175 200 225 และ 250 องศาเซลเซียส ซึ่งได้ผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.14 และตารางที่ 4.8 ซึ่งแสดงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อปฏิกิริยาที่ความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดสเตียริกต่อเมทานอล 1:4



รูปที่ 4.14 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดสเตียริกกับเมทานอล

ตาราง 4.8 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดสเตียริกที่สภาวะสมดุลของการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดสเตียริก
175	83.68
200	89.85
225	91.91
250	91.46

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันมากขึ้น ที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดสเตียริกอยู่ที่ ร้อยละ 84 ในเวลา 300 นาที 200 องศาเซลเซียส ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดสเตียริกอยู่ที่ ร้อยละ 90 ในเวลา 180 นาที ที่อุณหภูมิ 225 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดสเตียริกอยู่ที่ร้อยละ 92 ในเวลา 120 นาที และ ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดสเตียริกอยู่ที่ ร้อยละ 91 ในเวลา 90 นาที ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงจะเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันนั้นเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน จึงทำให้เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น อีกทั้งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้นในช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยา สังเกตได้จากความชันของกราฟ ที่แต่ละอุณหภูมิ จึงสรุปได้ว่าค่าของอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงมากขึ้นและเข้าสู่สมดุลได้เร็วขึ้น ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับ Yujaroen และคณะ [2] ทำการศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดไขมันที่กลั่นได้จากน้ำมันปาล์มกับเมทานอล การทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 250 ไปจนถึง 300 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์มีเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 64 ไปเป็นร้อยละ 95 และจากการศึกษาของ Minami และSaka [9] ที่ทำการศึกษาการการผลิตไบโอดีเซล ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้ค่าร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มมากขึ้น และปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น เนื่องจากกรดไขมันแตกตัวจึงทำตัวเหมือนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดเข้าทำปฏิกิริยาโดยอัตโนมัติ Warabi และคณะ [1] ทำการศึกษาปฏิกิริยาของไตรกลีเซอร์ไรด์และกรดไขมันกับแอลกอฮอล์แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จากการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิสูงเมทานอลจะทำตัวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด

สารตั้งต้นของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันทั้งกรดไขมันและเมทานอลสามารถแตกตัวและทำตัวเหมือนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดได้ โดยมีค่าคงที่ของการแตกตัวของกรดไขมันอยู่ที่ประมาณ 4.7 [16] และค่าคงที่ของการแตกตัวของเมทานอลอยู่ที่ประมาณ 15.54 [17]

4.3.5 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดสเตียริกกับเมทานอล

เมื่อนำผลการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิของทั้งกรดสเตียริกมาทำการคำนวณทางจลนพลศาสตร์ โดยทำการคำนวณในช่วงต้นของการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดสเตียริกกับเมทานอล จึงสามารถลดพจน์ของผลิตภัณฑ์ออกได้ และสำหรับการศึกษาจลนพลศาสตร์ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเมทานอลอยู่ที่

1:4 ซึ่งเป็นสภาวะที่ปริมาณของเมทานอลไม่ขึ้นกับปฏิกิริยา เพราะฉะนั้นความเข้มข้นของเมทานอลจึงเป็นค่าคงที่รวมกับค่าคงที่ของปฏิกิริยาได้

สมการเคมีของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันสามารถเขียนได้ดังสมการด้านล่าง

$$A + B \rightleftharpoons C + D$$

$$\text{Fatty Acid} + \text{MeOH} \rightleftharpoons \text{Ester} + \text{Water}$$

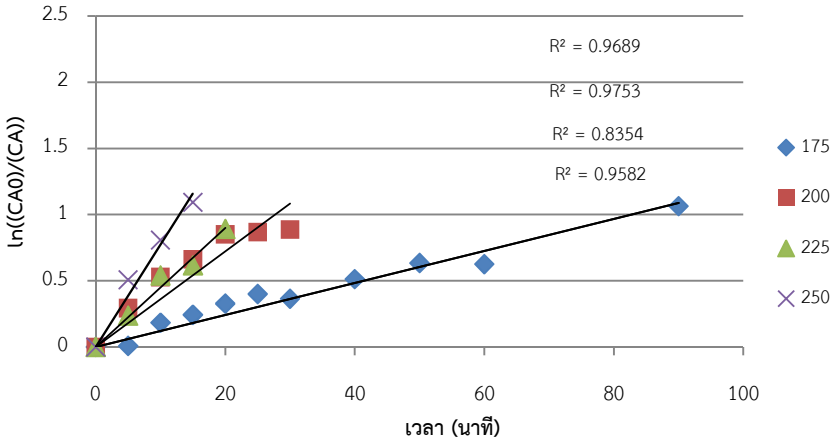
ซึ่งจากสมการทางเคมีสามารถนำมาเขียนสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ดังต่อไปนี้

$$-r_A = \frac{dC_A}{dt} = k_1 C_A C_B - k_2 C_C C_D$$

เมื่อนำสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยามาจัดรูปตามสมมุติฐานข้างต้นได้ดังสมการที่ 4.5 ซึ่งเป็นสมการในรูปแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่ผันกลับ และสามารถหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาได้จากความสัมพันธ์ตาม สมการที่ 4.6

$$-r_A = -\frac{dC_A}{dt} = k'_1 C_A \tag{4.5}$$

$$ln(\frac{[C_{Ao}])}{[C_A]}) = k'_1 t \tag{4.6}$$



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของ ln((CA0)/(CA)) กับเวลาเพื่อใช้ในการหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดสเตียริกกับเมทานอลที่เวลาช่วงแรกของปฏิกิริยา

ตารางที่ 4.9 ค่าคงที่ปฏิกิริยาของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดสเตียริกกับเมทานอลที่เวลาช่วงแรกของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ

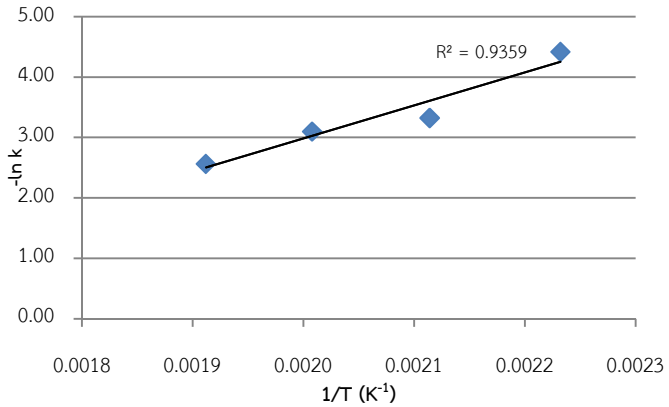
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่ปฏิกิริยา,k' (กรดสเตียริก)
175	0.0121
200	0.0361
225	0.0452
250	0.0771

สมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation)

$$k = Ae^{\frac{-E_a}{RT}} \tag{4.7}$$

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{RT} \tag{4.8}$$

จากผลการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆเป็นไปตามตารางที่ 4.9 และจากการศึกษาพบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ค่าคงที่ปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าคงที่ปฏิกิริยาสามารถนำมาหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ได้จากสมการอาร์เรเนียส ดังสมการที่ 4.7 โดยค่าพลังงานก่อกัมมันต์คือ ค่าพลังงานน้อยที่สุดซึ่งสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ ค่าพลังงานนั้นหาได้จากค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ตามสมการที่ 4.8 โดยผลจากการคำนวณหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดสเตียริกกับเมทานอลแสดงดังรูปที่ 4.16 เมื่อนำค่าความชันของกราฟไปคำนวณหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์จะได้ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดสเตียริกและเมทานอลที่เวลาช่วงแรกของปฏิกิริยามีค่าประมาณ 45.43 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งค่าพลังงานก่อกัมมันต์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Berrios และคณะ [3] ซึ่งทำการศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระจากน้ำมันดอกทานตะวันกับเมทานอลโดยมีกรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันพบว่าเป็นรูปแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง โดยตั้งสมมุติฐานว่าแอลกอฮอล์มากเกินพอจึงถือว่าเป็นค่าคงที่ และได้ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ 44.559 กิโลจูลต่อโมล



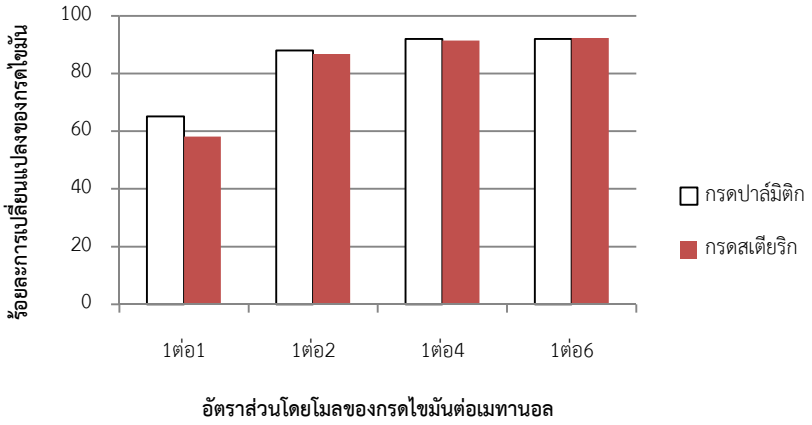
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของตามสมการอาร์เรเนียส เพื่อใช้ในการหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดสเตียริกกับเมทานอลที่เวลาช่วงแรกของปฏิกิริยา

4.4 ผลกระทบของกรดไขมันที่แตกต่างกันต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติก และกรดสเตียริกกับเมทานอล

การศึกษาผลกระทบของกรดไขมันที่แตกต่างกันต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติก และกรดสเตียริกกับเมทานอล ได้ทำการนำผลของการศึกษาผลกระทบต่างๆที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดปาล์มิติกและกรดสเตียริกกับเมทานอลแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งดำเนินปฏิกิริยาภายใต้สภาวะเดียวกันมาทำการเปรียบเทียบ

ผลกระทบของกรดไขมันที่แตกต่างกันที่มีต่อความเร็วรอบในการกวนจากผลการทดลองพบว่ากรดไขมันที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อความเร็วรอบในการกวน เนื่องจากปฏิกิริยาทั้งสองปฏิกิริยานั้นได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ต่างกัน อีกทั้งเวลาที่เข้าสู่สมดุลที่เวลาเดียวกัน

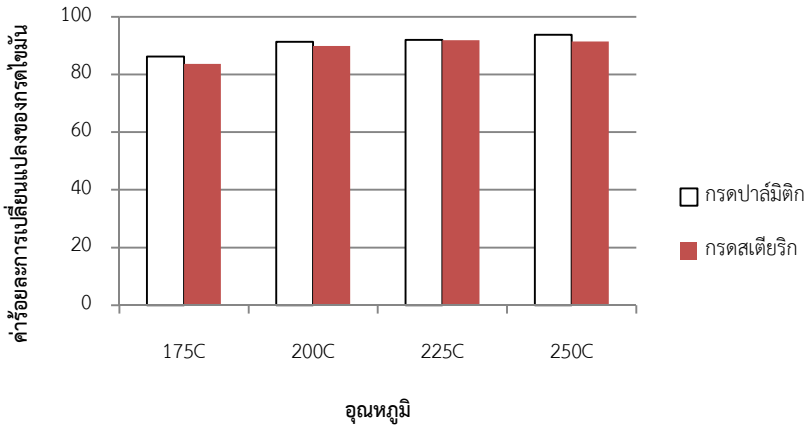
ผลกระทบของกรดไขมันที่แตกต่างกันต่อปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลต่างๆดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งสภาวะที่ทำการทดลองคือ ความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.17 ผลกระทบของกรดไขมันที่แตกต่างกันต่อปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลต่างๆ

ผลการทดลองในเรื่องของการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเมทานอลพบว่ากรดไขมันทั้งสองชนิดมีแนวโน้มที่เหมือนกันคือเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเมทานอลมากขึ้น ส่งผลให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงมากขึ้น และที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเมทานอลที่ 1:1 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เป็นไปตามหลักมวลสาร ของกรดไขมันทั้ง 2 ตัวให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน แต่ในกรณีของการเพิ่มปริมาณเมทานอลให้มากเกินพอนั้นให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันที่ต่างกันเล็กน้อย

ผลกระทบของกรดไขมันที่แตกต่างกันต่อปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆดังแสดงในรูปที่ 4.14 ซึ่งสภาวะที่ทำการทดลองคือ ความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1: 4



รูปที่ 4.18 ผลกระทบของกรดไขมันที่แตกต่างกันต่อปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ

ผลการทดลองในเรื่องของการศึกษาอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาพบว่ากรดไขมันทั้งสองชนิดมีแนวโน้มที่เหมือนกันคือเมื่ออุณหภูมิมากขึ้น ส่งผลให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงมากขึ้น และที่ทุกอุณหภูมิ ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดสเตียริกจะน้อยกว่ากรดปาล์มิติกเพียงเล็กน้อย

จากการนำผลการทดลองในหัวข้อผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อปฏิกิริยามาทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาในรูปแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่ผันกลับนั้นพบว่า ค่าคงที่ของปฏิกิริยาของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดปาล์มิติกและกรดสเตียริกกับเมทานอลมีแนวโน้มที่เหมือนกัน คือเมื่ออุณหภูมิมากขึ้น ส่งผลให้ค่าคงที่ของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.9

ค่าพลังงานก่อกัมมันต์เป็นตัวบ่งบอกความสามารถของการเกิดปฏิกิริยา โดยค่าพลังงานก่อกัมมันต์ที่สูงหมายถึงปฏิกิริยาจะสามารถดำเนินไปได้ยากกว่า จากผลการคำนวณค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันพบว่าค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของกรดปาล์มิติกกับเมทานอลมีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดสเตียริกกับเมทานอล โดยค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิริยาของกรดปาล์มิติกและเมทานอลที่เวลาช่วงแรกของปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 40.54 กิโลจูลต่อโมล และค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดสเตียริกและเมทานอลที่เวลาช่วงแรกของปฏิกิริยาเท่ากับ 45.43 กิโลจูลต่อโมล ทำให้สามารถสรุปได้ว่ากรดไขมันที่แตกต่างกันมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเล็กน้อย กำแหงเดชพล [15] ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกและกรดเสตียริกกับเอทานอลแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์แบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่ผันกลับมีความเหมาะสมกับปฏิกิริยา เมื่อเลือกศึกษาจลนพลศาสตร์เฉพาะช่วงแรกของปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเอทานอลที่มากเกินพอ

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. กรดไขมันที่แตกต่างกันมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเมทานอลที่ 1:1 และที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเมทานอลมากกว่า 1:2 การใช้กรดไขมันที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อปฏิกิริยา
2. ความเร็วรอบการกวนไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกและกรดเสตียริกกับเมทานอล
3. อัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันต่อเมทานอลที่ ตั้งแต่ 1:2 เป็นต้นไปไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา
4. อุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ปฏิกิริยา อีกทั้งทำให้ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้น
5. แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมล 1:4 ความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางเร็ว ความเร็วการกวน 400 รอบต่อนาที เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบไม่ผันกลับ
6. ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการเกิดปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอลมีค่าน้อยกว่าการเกิดปฏิกิริยาของกรดสเตียริกกับเมทานอลอยู่ที่ 40.54 กิโลจูลต่อโมลของกรดปาล์มิติก และ 45.43 กิโลจูลต่อโมลของกรดสเตียริก

5.2 ข้อเสนอแนะ

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันมีสารตั้งต้น 2 ตัว คือกรดไขมันและแอลกอฮอล์ ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการใช้กรดไขมันที่แตกต่างกันในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับเมทานอล จึงควรมีการทำการศึกษาการใช้แอลกอฮอล์ที่แตกต่างกันในการทำปฏิกิริยาด้วย เพื่อนำมาเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดกับปฏิกิริยา

รายการอ้างอิง

[1] Yuichiro, W., Dadan, K., and Shiro, S. Reactivity of triglycerides and fatty acids of rapeseed oil in supercritical alcohols.Bioresource 91 (2004) 283-287

[2] Yujaroen, D., et al. Esterification of palm fatty acid distillate (PFAD) in supercritical methanol: Effect of hydrolysis on reaction reactivity. Fuel 88 (2009): 2011–2016.

[3] Berrios, M., et al. A kinetic study of the esterification of free fatty acids (FFA) in sunflower oil.Fuel 86 (2007): 2383–2388.

[4] Gerpen, J.V. Biodiesel processing and production. Fuel processing Technology 86 (2005): 1097-1107

[5] Park, J.Y., et al. Esterification of free fatty acids using water-tolerable Amberlyst as a heterogeneous catalyst. Bioresouse Tecnology 101 (2010): s62-s65

[6] Somsai, S. Kinetics of non-catalytic esterification of fatty acids in palm oil. Chemical Engineering.Chemical Engineering Faculty of Engineering Chulalongkorn University, 2008.

[7] Octave, L. Chemical Reaction Engineering, 3rd ed. New York : John Wiley & Sons, 1999.

[8] Kusdiana, D., and Saka, S. Two step preparation for catalyst-free biodiesel fuel production: Hydrolysis and methyl esterification. Applied Biochemistry and Biotechnology 113-116 (2004): 781-791

[9] Minami, E., et al. Kinetics of hydrolysis and methyl esterification for biodiesel production in two-step supercritical methanol process. Fuel 85 (2006): 2479–2483.

[10] Ngamsa-ard, W. Production of methyl esters from palm oil with high content of free fatty acids.Chemical Engineering Faculty of Engineering Chulalongkorn University.2008.

[11] Akaraphol, P., et al. Production methyl ester from palm fatty acids in supercritical methanol. Chiang Mai J.Sci 35 (2008): 23-28

[12] Tanawan, P., and Phillip, E.S. Noncatalytic esterification of oleic acid in ethanol. J. of Supercritical Fluids 53 (2010): 53–59.

[13] Alenezi, R., et al. Esterification kinetics of free fatty acids with supercritical methanol for biodiesel production. Energy Conversion and Management 51 (2010): 1055–1059.

[14] ตติยา กำแหงเดชพล. จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดลอริกและกรดสเตียริกกับเอทานอลโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556.

[15] Cho, H.J. et al. A single step non-catalytic esterification of palm fatty acid distillate (PFAD) for biodiesel production. Fuel 93 (2012): 373-380.

[16] Pompéia, C. et al. Effect of fatty acids on leukocyte function. Brazilian Journal of Medical and Biological Research 33 (2000): 1255-1268.

[17] Ballinger, P., and Long, F.A. Acid Ionization Constants of Alcohols. II. Acidities of Some Substituted Methanols and Related Compounds. Journal of the American chemical society 82 (1960): 795-798.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

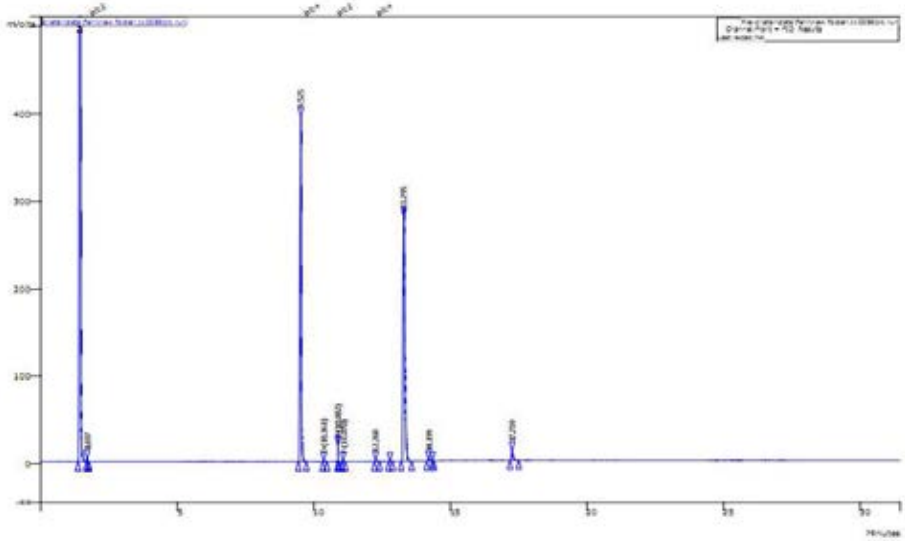
การวิเคราะห์องค์ประกอบของสารตั้งต้น

ก-1 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ

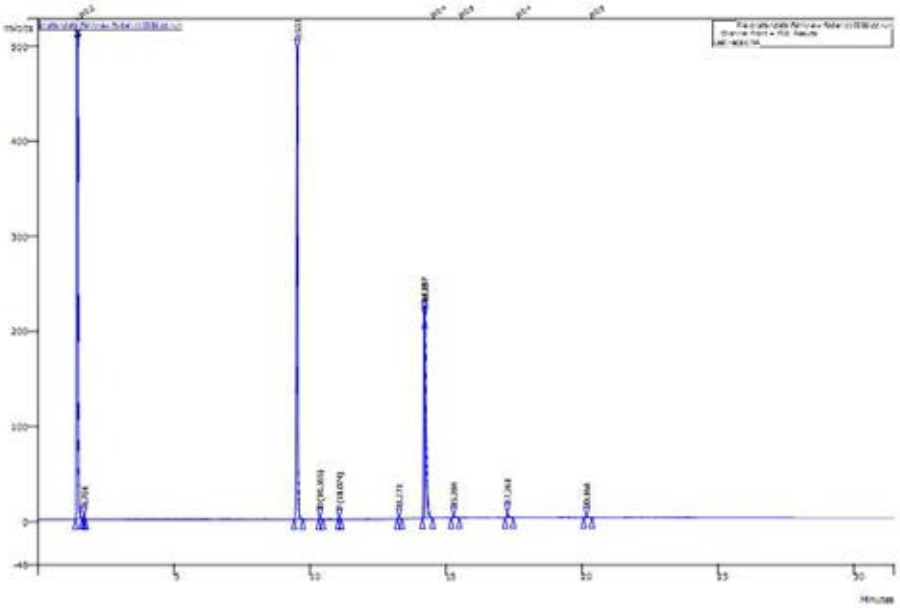
ปริมาณเมทิลเอสเทอร์จะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟฟี โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ varian รุ่น 3800 โดยใช้คอลัมน์ innowax โดยใช้ตัวตรวจวัดแบบเฟรมไอออนไนซ์ (FID) โดยสภาวะคอลัมน์ในการวิเคราะห์แก๊สโครมาโตกราฟฟีแสดงในตาราง ก-1

ตารางที่ ก-1 สภาวะในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟฟี

สภาวะในการวิเคราะห์	
อุณหภูมิเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)	50
ระยะเวลาคงที่อุณหภูมิเริ่มต้น (นาที)	0
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิถึง 80 องศาเซลเซียส (องศาเซลเซียส/นาที)	20
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	80
ระยะเวลาคงที่ (นาที)	5
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิถึง 230 องศาเซลเซียส (องศาเซลเซียส/นาที)	20
อุณหภูมิสุดท้าย (องศาเซลเซียส)	230
ระยะเวลาคงที่อุณหภูมิสุดท้าย (นาที)	17.50
อุณหภูมิหัวฉีดสาร (องศาเซลเซียส)	250
อุณหภูมิตัวตรวจวัด (องศาเซลเซียส)	250



รูปที่ ก-1 ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของกรดปาล์มิติกด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ



รูปที่ ก-2 ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของกรดสเตียริกด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ

ตารางที่ ก-2 ตำแหน่งเวลาของสารที่วิเคราะห์จากเครื่องแก๊สโครมาโตรกราฟ

ชนิดสาร	ตำแหน่งเวลา (นาที)
เฮกเซน	1.422
เมทิลเดกคาร์โนเอต	9.525
เมทิลปาล์มิเตท	13.295
เมทิลสเตียเรต	14.2

ก-2 การคำนวนค่าแฟกเตอร์ตอบสนอง (Respond Factor)

$$\text{แฟกเตอร์ตอบสนอง} = \frac{\text{พื้นที่ของสารตัวอย่าง} \times \text{น้ำหนักของสารมาตรฐาน}}{\text{พื้นที่ของสารมาตรฐาน} \times \text{น้ำหนักของสารตัวอย่าง}}$$

ตารางที่ ก--3 ค่าแฟกเตอร์ตอบสนอง

สารตัวอย่าง	ค่าแฟกเตอร์ตอบสนอง
เมทานอล	0.31
เมทิลปาล์มิเตท	1.01
เมทิลสเตียเรต	0.99

ก-3 การคำนวณปริมาณของสารตัวอย่าง

$$\text{ปริมาณของสารตัวอย่าง (กรัม)} = \frac{\text{พื้นที่ของสารตัวอย่าง} \times \text{น้ำหนักของสารมาตรฐาน}}{\text{พื้นที่ของสารมาตรฐาน} \times \text{แฟคเตอร์ตอบสนอง}}$$

ตารางที่ ก--4 องค์ประกอบของสารตั้งต้น

ชื่อสารเคมี	ร้อยละ องค์ประกอบ ของสารตั้งต้น
กรดปาล์มิติก	98%
กรดสเตียริก	98%

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์คุณสมบัติของสารตั้งต้น

ข-1 วิธีมาตรฐานในการหาค่าของกรด, AOCS Official Method Cd 3D-63

อุปกรณ์

1. ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. บิวเรต

สารเคมี

1. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.1M.
2. ตัวทำละลายผสมของไอโซโพรพิวแอลกอฮอล์และโทลูอีนในปริมาณที่เท่ากัน
3. สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน 1.0% ในเอทานอล

วิธีการวิเคราะห์

1. นำตัวทำละลายมาใส่สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน และนำมาไตเตรทด้วยสาระลายเบสจนเป็นสีชมพู
2. เตรียมสารตัวอย่างลงในขวดรูปชมพู่
3. เติมตัวทำละลายเพื่อให้สารตัวอย่างละลายเข้าด้วยกันก่อนไตเตรท
4. เติมสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน และทำการไตเตรทพร้อมกับเขย่าสารละลาย จนสารละลายกลายเป็นสีชมพูคงที่เป็นเวลา 30 วินาที

ตารางที่ ข-1 ผลการวิเคราะห์ค่าของกรดของสารตั้งต้น

ชื่อสารเคมี	ค่าของกรด (mg KOH/g)
กรดปาล์มิติก	260.51
กรดสเตียริก	234.0

ข-2 ค่าสปอนนิฟิเคชันตามวิธีมาตรฐาน AOCS Cd-3b-76

การทำการวิเคราะห์หาค่าสปอนนิฟิเคชัน โดยการทำปฏิกิริยาสปอนนิฟิเคชันอย่างสมบูรณ์และวิเคราะด้วยการไตเตรท

สารเคมีและอุปกรณ์

1. สารละลายมาตรฐานไฮโดรคลอริก 0.5 นอมัล
2. สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.5 นอมัล ในเอทานอล
3. ฟีนอฟทาลีน 1% ในเอทานอล
4. โทลูอีน
5. ขวดรูปชมพู่

วิธีการวิเคราะห์

1. ชั่งน้ำหนักสารตัวอย่างประมาณ 2 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่.

2. เติมโทลูอีน 25 มิลลิลิตร

3. เติมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในแอลกอฮอล์ 50 มิลลิลิตร.

4. ทำซ้ำใน ข้อ 2 และ 3 ในขวดรูปชมพู่อีก 1 ขวด โดยไม่ใส่สารตัวอย่าง เพื่อใช้เป็นค่าฐาน

5. นำขวดรูปชมพู่ ไปต่อเข้ากับชุดการกลั่น และให้ความร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

6. เติมฟีนอฟทาลีนประมาณ 1 มิลลิลิตร สารละลายจะเปลี่ยนจากสีชมพูเป็นไม่มีสี บันทึกปริมาตรที่ใช้ไปของสารละลายกรดไฮโดรคลอลิก

การคำนวณ

น้ำหนักของกรดไขมัน (กรัม) = W

ปริมาตรที่ใช้ไปของกรดไฮโดรคลอริกสำหรับขวดรูปชมพู่ที่ไม่มีสารตัวอย่าง (มิลลิลิตร) = B

ปริมาตรที่ใช้ไปของกรดไฮโดรคลอริกสำหรับขวดรูปชมพู่ที่มีสารตัวอย่าง (มิลลิลิตร)= S

ค่าความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก = N

$$\text{ค่าสปอนนิฟิเคชัน} = \frac{(B-S)*N}{W} * 56.1$$

ตารางที่ ข-2 ผลการวิเคราะห์หาค่าสปอนนิฟิเคชันของสารตั้งต้น

ชื่อสารเคมี	ค่าสปอนนิฟิเคชัน (mg KOH/g)
กรดปาล์มิติก	220
กรดสเตียริก	192

วิธีการคำนวณหามวลโมเลกุล

เมื่อนำกรดไขมันที่ใช้เป็นสารตั้งต้นมาวิเคราะห์โดยการไตเตรทเพื่อหาค่าของกรด และค่าสปอนนิฟิเคชัน สามารถนำมาหาค่ามวลโมเลกุลของสารได้

$$\text{มวลโมเลกุล} = \frac{[56108\text{-}12.67\ (\text{SV-AV})]}{\text{SV}}$$

เมื่อกำหนดให้

SV = ค่าสปอนนิฟิเคชันของกรดไขมัน

AV = ค่าความเป็นกรดของกรดไขมัน

ตารางที่ ข-3 ผลการวิเคราะห์มวลโมเลกุลของสารตั้งต้น

ชื่อสารเคมี	มวลโมเลกุล (g/mol)
กรดปาล์มิติก	257.12
กรดสเตียริก	294.78

ภาคผนวก ค.
ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของกรดไขมันของสารตัวอย่างจาก ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดปาล์มิติกกับเมทานอล

ค-1 ผลการศึกษาความเร็วรอบในการกวน

ตารางที่ ค-1 ผลการทดลองศึกษาความเร็วรอบในการกวนปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 50 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:6 อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดไขมัน (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน
0	2.34	0
5	2.25	3.94
10	1.94	16.96
15	1.93	17.62
20	1.79	23.61
25	1.69	27.82
30	1.62	30.69
40	1.60	31.73
50	1.51	35.71
60	1.35	42.20
90	0.99	57.58
120	0.78	66.71
180	0.66	71.62
240	0.53	77.54
300	0.40	82.74
360	0.40	82.94

ตารางที่ ค-2 ผลการทดลองศึกษาความเร็วรอบในการกวนปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 100 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:6 อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดไขมัน (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน
0	2.33	0
5	2.13	8.67
10	2.08	10.50
15	1.86	20.33
20	1.71	26.45
25	1.68	27.97
30	1.59	31.89
40	1.27	45.65
50	1.16	50.15
60	0.96	58.96
90	0.85	63.41
120	0.71	69.37
180	0.60	74.42
240	0.49	79.12
300	0.42	82.12
360	0.42	82.12

ตารางที่ ค-3 ผลการทดลองศึกษาความเร็วรอบในการกวนปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 200 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:6 อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดไขมัน (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน
0	2.31	0
5	2.01	12.98
10	2.02	12.83
15	1.76	23.89
20	1.72	25.76
25	1.46	37.01
30	1.32	42.74
40	1.21	47.87
50	1.19	48.55
60	0.99	57.01
90	0.86	62.67
120	0.72	68.73
180	0.65	72.05
240	0.47	79.73
300	0.43	81.21
360	0.43	81.52

ตารางที่ ค-4 ผลการทดลองศึกษาความเร็วรอบในการกวนปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:6 อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดไขมัน (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน
0	2.33	0
5	2.19	5.83
10	1.99	14.61
15	1.78	23.40
20	1.66	28.56
25	1.41	39.21
30	1.47	36.65
40	1.27	45.27
50	1.14	51.00
60	1.00	56.93
90	0.83	64.33
120	0.82	64.83
180	0.60	74.08
240	0.53	77.36
300	0.44	81.08
360	0.41	82.42

ตารางที่ ค-5 ผลการทดลองศึกษาความเร็วรอบในการกวนปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:6 อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดไขมัน (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน
0	2.18	0
5	2.12	3.15
10	1.99	8.87
15	2.04	6.43
20	1.74	20.40
25	1.78	18.48
30	1.69	22.64
40	1.45	33.48
50	1.22	44.07
60	1.46	33.08
90	0.86	60.42
120	0.75	65.66
180	0.57	73.82
240	0.48	78.22
300	0.38	82.57
360	0.39	82.08

ค-2 ผลการศึกษาอัตราส่วนโดยโมล

ตารางที่ ค-6 ผลการทดลองศึกษาอัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอลของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:1 อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดไขมัน (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน
0	2.51	0
5	1.63	35.03
10	1.45	42.20
15	1.08	56.82
20	1.02	59.12
25	0.97	61.18
30	0.94	62.36
40	0.98	60.78
50	0.94	62.55
60	0.87	65.10
90	0.86	65.66
120	0.92	63.39
180	0.93	62.79
240	0.87	65.14
300	0.94	62.57
360	0.87	65.13

ตารางที่ ค-7 ผลการทดลองศึกษาอัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอลของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:2 อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดไขมัน (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน
0	2.97	0
5	1.36	54.19
10	0.95	68.11
15	0.82	72.32
20	0.67	77.58
25	0.59	80.20
30	0.53	82.12
40	0.49	83.40
50	0.37	87.39
60	0.58	80.32
90	0.36	87.89
120	0.37	87.41
180	0.34	88.43
240	0.35	88.13
300	0.36	88.03
360	0.36	87.98

ตารางที่ ค-8 ผลการทดลองศึกษาอัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอลของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อ เมทานอล 1:4 อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดไขมัน (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน
0	2.80	0
5	1.60	42.97
10	1.07	61.77
15	0.92	67.16
20	0.69	75.41
25	0.56	80.09
30	0.55	80.24
40	0.43	84.71
50	0.37	86.91
60	0.37	86.71
90	0.19	93.37
120	0.20	92.82
180	0.19	93.04
240	0.20	93.04
300	0.16	94.22
360	0.17	93.76

ตารางที่ ค-9 ผลการทดลองศึกษาอัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอลของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:6 อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดไขมัน (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน
0	1.68	0
5	1.31	22.14
10	1.05	37.64
15	0.83	50.67
20	0.80	52.36
25	0.66	60.65
30	0.53	68.36
40	0.43	74.70
50	0.41	75.53
60	0.34	80.03
90	0.22	86.65
120	0.20	88.09
180	0.16	90.24
260	0.13	92.35
300	0.16	90.25
360	0.14	91.96

ค-3 ผลกระทบของอุณหภูมิ

ตารางที่ ค-10 ผลการทดลองศึกษาอุณหภูมิปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:4 อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดไขมัน (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน
0	2.74	0
5	2.34	14.46
10	2.23	18.49
15	2.13	22.32
20	1.89	31.00
25	1.76	35.74
30	1.61	41.31
40	1.26	53.96
50	1.18	56.94
60	1.09	60.31
90	0.91	66.83
120	0.69	74.77
180	0.58	78.94
240	0.44	84.06
300	0.37	86.32
360	0.38	86.21

ตารางที่ ค-11 ผลการทดลองศึกษาอุณหภูมิปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:4 อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดไขมัน (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน
0	2.66	0
5	2.03	23.70
10	1.54	41.87
15	1.24	53.24
20	1.15	56.77
25	1.02	61.61
30	0.93	64.82
40	0.75	71.75
50	0.74	72.11
60	0.64	75.98
90	0.50	81.23
120	0.42	84.24
180	0.32	88.07
240	0.28	89.47
300	0.23	91.28
360	0.23	91.35

ตารางที่ ค-12 ผลการทดลองศึกษาอุณหภูมิปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:4 อุณหภูมิ 225 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดไขมัน (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน
0	2.45	0
5	1.68	31.26
10	1.17	52.12
15	0.99	59.62
20	0.84	65.53
25	0.75	69.31
30	0.66	73.06
40	0.56	77.00
50	0.44	81.84
60	0.46	81.20
90	0.38	84.53
120	0.26	89.23
180	0.20	91.73
240	0.19	92.16
300	0.22	91.13
360	0.20	92.00

ตารางที่ ค-13 ผลการทดลองศึกษาอุณหภูมิปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดปาล์มิติกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:4 อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดไขมัน (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน
0	2.80	0
5	1.60	42.97
10	1.07	61.77
15	0.92	67.16
20	0.69	75.41
25	0.56	80.09
30	0.55	80.24
40	0.43	84.71
50	0.37	86.91
60	0.37	86.71
90	0.19	93.37
120	0.20	92.82
180	0.19	93.04
240	0.20	93.04
300	0.16	94.22
360	0.17	93.76

ภาคผนวก ง.
ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของกรดไขมันของสารตัวอย่างจาก ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกรดสเตียริกกับเมทานอล

ตารางที่ ง-1 ผลการทดลองศึกษาความเร็วรอบในการกวนปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดสเตียริกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 50 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:6 อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดไขมัน (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน
0	1.88	0
5	1.86	1.15
10	1.64	12.85
15	1.47	21.68
20	1.59	15.36
25	1.41	24.80
30	1.46	22.30
40	1.23	34.48
50	1.22	34.86
60	1.00	46.67
90	0.73	61.19
120	0.68	63.66
180	0.46	75.52
240	0.39	79.17
300	0.34	82.08
360	0.33	82.24

ตารางที่ ง-2 ผลการทดลองศึกษาความเร็วรอบในการกวนปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดสเตียริกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 100 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:6 อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดไขมัน (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน
0	1.80	0
5	1.69	6.03
10	1.65	8.10
15	1.56	13.44
20	1.49	17.00
25	1.40	22.26
30	1.32	26.40
40	1.27	29.17
50	0.96	46.91
60	0.78	56.88
90	0.78	56.39
120	0.52	71.18
180	0.49	72.49
240	0.39	78.07
300	0.29	84.01
360	0.32	82.13

ตารางที่ ง-3 ผลการทดลองศึกษาความเร็วรอบในการกวนปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดสเตียริกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 200 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:6 อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดไขมัน (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน
0	1.80	0
5	1.71	5.14
10	1.55	13.99
15	1.65	8.57
20	1.80	0.13
25	1.48	17.97
30	1.30	28.00
40	1.27	29.75
50	1.07	40.93
60	0.95	47.07
90	0.82	54.35
120	0.74	58.88
180	0.39	78.35
240	0.45	74.87
300	0.35	80.40
360	0.32	82.41

ตารางที่ ง-4 ผลการทดลองศึกษาความเร็วรอบในการกวนปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดสเตียริกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:6 อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดไขมัน (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน
0	1.89	0
5	1.84	2.90
10	1.83	3.28
15	1.70	10.20
20	1.43	24.26
25	1.45	23.14
30	1.37	27.41
40	1.33	29.57
50	1.07	43.35
60	1.11	41.13
90	0.76	59.86
120	0.70	63.16
180	0.44	76.48
240	0.34	82.10
300	0.43	77.38
360	0.32	83.05

ตารางที่ ง-5 ผลการทดลองศึกษาความเร็วรอบในการกวนปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดสเตียริกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 600 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:6 อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดไขมัน (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน
0	1.95	0
5	1.73	11.28
10	1.62	16.92
15	1.52	22.45
20	1.57	19.43
25	1.51	22.57
30	1.47	24.89
40	1.34	31.21
50	1.13	41.92
60	0.96	50.64
90	0.85	56.36
120	0.65	66.77
180	0.40	79.33
240	0.50	74.56
300	0.36	81.50
360	0.35	82.21

ง-2 ผลการศึกษาอัตราส่วนโดยโมล

ตารางที่ ง-6 ผลการทดลองศึกษาอัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอลของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดสเตียริกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:1 อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดไขมัน (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน
0	2.41	0
5	1.61	33.09
10	1.32	45.18
15	1.28	46.84
20	1.01	58.25
25	0.99	59.05
30	0.99	58.94
40	1.05	56.47
50	0.98	59.25
60	1.04	57.08
90	1.06	56.15
120	1.08	55.38
180	1.07	55.67
240	1.02	57.76
300	1.04	56.99
360	1.01	58.08

ตารางที่ ง-7 ผลการทดลองศึกษาอัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอลของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดสเตียริกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:2 อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดไขมัน (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน
0	2.20	0
5	1.17	46.78
10	0.90	59.20
15	0.69	68.38
20	0.66	69.94
25	0.52	76.37
30	0.50	77.02
40	0.39	82.26
50	0.40	81.81
60	0.53	75.68
90	0.31	86.00
120	0.30	86.34
180	0.30	86.20
240	0.29	86.76
300	0.31	85.82
360	0.29	86.75

ตารางที่ ง-8 ผลการทดลองศึกษาอัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอลของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดสเตียริกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อ เมทานอล 1:4 อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดไขมัน (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน
0	2.21	0
5	1.33	39.81
10	0.98	55.38
15	0.74	66.46
20	0.65	70.49
25	0.51	76.78
30	0.43	80.49
40	0.42	80.88
50	0.30	86.45
60	0.28	87.33
90	0.26	88.37
120	0.25	88.53
180	0.19	91.44
240	0.23	89.38
300	0.19	91.52
360	0.19	91.46

ตารางที่ ง-9 ผลการทดลองศึกษาอัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอลของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดสเตียริกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:6 อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดไขมัน (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน
0	1.93	0
5	1.31	32.03
10	0.88	54.44
15	0.67	65.06
20	0.57	70.67
25	0.56	70.85
30	0.40	79.13
40	0.46	76.02
50	0.30	84.21
60	0.32	83.46
90	0.21	89.01
120	0.19	90.41
180	0.14	92.58
240	0.15	92.36
300	0.11	94.05
360	0.15	92.34

ง-3 ผลกระทบของอุณหภูมิ

ตารางที่ ง-10 ผลการทดลองศึกษาอุณหภูมิปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดสเตียริกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:4 อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดไขมัน (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน
0	2.45	0
5	2.43	0.77
10	2.04	16.76
15	1.92	21.56
20	1.77	27.90
25	1.64	32.97
30	1.70	30.52
40	1.47	40.11
50	1.30	46.95
60	1.31	46.49
90	0.85	65.47
120	0.68	72.42
180	0.54	78.05
240	0.43	82.59
300	0.37	85.06
360	0.40	83.68

ตารางที่ ง-11 ผลการทดลองศึกษาอุณหภูมิปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดสเตียริกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:4 อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดไขมัน (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน
0	2.71	0
5	2.02	25.49
10	1.60	41.07
15	1.40	48.49
20	1.16	57.28
25	1.14	58.05
30	1.12	58.85
40	0.93	65.69
50	0.77	71.75
60	0.68	74.96
90	0.52	80.89
120	0.41	84.96
180	0.32	88.18
240	0.26	90.28
300	0.38	85.90
360	0.28	89.85

ตารางที่ ง-12 ผลการทดลองศึกษาอุณหภูมิปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดสเตียริกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:4 อุณหภูมิ 225 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดไขมัน (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน
0	2.32	0
5	1.83	21.13
10	1.35	41.78
15	1.25	46.02
20	0.95	59.05
25	0.74	68.03
30	0.68	70.60
40	0.60	74.08
50	0.48	79.50
60	0.48	79.31
90	0.35	84.70
120	0.29	87.69
180	0.25	89.41
240	0.20	91.49
300	0.22	90.47
360	0.19	91.91

ตารางที่ ง-13 ผลการทดลองศึกษาอุณหภูมิปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกรดสเตียริกกับเมทานอลที่สภาวะความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วรอบในการกวน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลกรดไขมันต่อเมทานอล 1:4 อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของกรดไขมัน (โมลต่อลิตร)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน
0	2.21	0
5	1.33	39.81
10	0.98	55.38
15	0.74	66.46
20	0.65	70.49
25	0.51	76.78
30	0.43	80.49
40	0.42	80.88
50	0.30	86.45
60	0.28	87.33
90	0.26	88.37
120	0.25	88.53
180	0.19	91.44
240	0.23	89.38
300	0.19	91.52
360	0.19	91.46

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว นภัทร จตุรพรภัทร เกิดเมื่อวันที่ 26 มกราคม พ.ศ. 2531 ที่จังหวัดหนองคาย มีพี่น้องรวม 2 คน เป็นบุตรสาวคนโตของครอบครัว ในปีการศึกษา 2552 สำเร็จการศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยมหิดล และในปี พ.ศ. 2553 ได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จนสำเร็จการศึกษา