

การผลิตแพตตีแอสิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มโอเลอินโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต



นายศุภกร ศิริมิตรตระกูล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Production of Fatty Acid Ethyl Esters from Palm Olein using
Sodium Phosphate Catalyst.

Mr. Supakorn Sirimittagoon



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 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การผลิตแพตตีแอสิดเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มโอเล
อินโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต

โดย

นายศุภกร ศิริมิตรตระกูล

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร. เจตศักดิ์ ไชยคุนา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เหมือนเดือน พิศาลพงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร. เจตศักดิ์ ไชยคุนา)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สิริ้ง ปรีชานนท์)

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

ศุภกร ศิริมิตรตระกูล : การผลิตฟอสเฟตที่แอซิดเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มโอเลอินโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต (Production of Fatty Acid Ethyl Esters from Palm Olein using Sodium Phosphate Catalyst.) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร. เจตศักดิ์ ไชยคุนา, 64 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างเอทานอลและน้ำมันปาล์มโอเลอินโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต โดยทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะชนิดถังกวนที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช 3:1 6:1 9:1 12:1 และ 18:1 อุณหภูมิ 150 175 200 225 และ 250 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 2 3 4 และ 5 โดยมวลของน้ำมันพืช ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโซเดียมฟอสเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และทำให้ค่าร้อยละผลได้ของ FAEE ที่สภาวะสมดุลเพิ่มขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และทำให้ค่าร้อยละผลได้ที่สภาวะสมดุลลดลง และการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5570565621 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: FATTY ACID ETHYL ESTER / HETEROGENEOUS CATALYST / SODIUM PHOSPHATE / TRANSESTERIFICATION

SUPAKORN SIRIMITTAGOON: Production of Fatty Acid Ethyl Esters from Palm Olein using Sodium Phosphate Catalyst.. ADVISOR: DR. JIRDSAK TSCHEIKUNA, Ph.D., 64 pp.

This research is a study on transesterification reaction of ethanol and palm olein using sodium phosphate as a heterogeneous catalyst. The experiments were conducted in a batch stirred tank reactor with an agitation speed of 100, 200, 400, 600 and 800 rpm, ethanol to oil molar ratios of 3:1, 6:1, 9:1, 12:1 and 18:1, Temperatures of 150 175 200 225 and 250 degree Celsius, amounts of catalyst of 1, 2, 3, 4 and 5%wt.. Experimental result demonstrated that sodium phosphate can be used effectively as a heterogeneous catalyst in transesterification reaction of ethanol and palm olein. Increase in ethanol to oil molar ratios resulted in an increase in rate of reaction and equilibrium yield. Increase in temperatures resulted in an increase in rate of reaction but decrease equilibrium yield. Increase in amounts of catalyst resulted in an increase in rate of reaction.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department: Chemical Engineering Student's Signature

Field of Study: Chemical Engineering Advisor's Signature

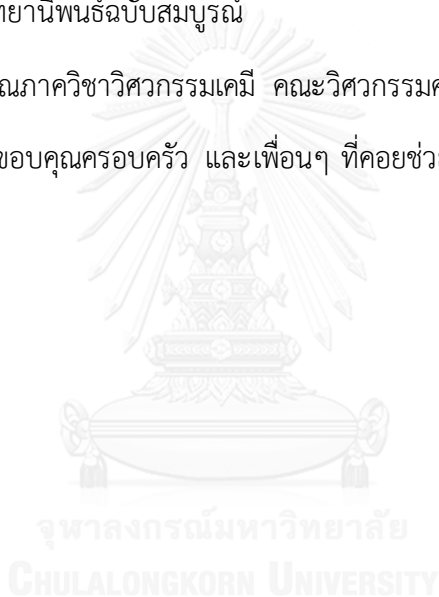
Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อ อาจารย์ ดร.เจตศักดิ์ ไชยคุณา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัยตลอดมา

ขอขอบพระคุณประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร. สิริรุ่ง ปรีชา นนท์ และ อาจารย์ ดร. นริศรา อินทรจันทร์ สำหรับการให้คำแนะนำ และตรวจสอบโครงร่าง วิทยานิพนธ์ ตลอดจนวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยอำนวยความสะดวก และให้กำลังใจในการวิจัย ตลอดมา



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ไบโอดีเซล	4
2.2 ปฏิกริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน	4
2.2.1 ตัวเร่งปฏิกริยาเอกพันธ์.....	6
2.2.2 การดำเนินการที่สภาวะยิ่งยวด.....	8
2.2.3 ตัวเร่งปฏิกริยาวิวิธพันธ์	9
2.2.4 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกริยาโซเดียมฟอสเฟต	13
2.2.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกริยาโซเดียมฟอสเฟตโดยเครื่องมือ วิเคราะห์ด้วยวิธี Thermal Gravimetric Analysis (TGA).....	13
2.2.4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกริยาโซเดียมฟอสเฟตโดยเครื่องมือ วิเคราะห์ด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD)	14

2.2.4.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตด้วยวิธี Brunaure-Emmett-Teller (BET) และการวัดค่าความเป็นเบสด้วยวิธี แอมเมตต์	17
2.3 ปฏิกิริยาข้างเคียงที่เกิดควบคู่กับปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน	18
2.3.1 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	18
2.3.2 ปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน	18
บทที่ 3 การทดลองและการวิเคราะห์	19
3.1 เครื่องปฏิกรณ์	19
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	20
3.3 วิธีการทดลอง	21
3.3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา	21
3.3.2 การทดลองในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มโอเลอินและเอ ทานอล	21
3.3.3 การเตรียมตัวอย่างผลิตภัณฑ์สำหรับแก๊สโครมาโตกราฟี	22
3.4 วิเคราะห์ตัวอย่างผลิตภัณฑ์	23
3.4.1 การวิเคราะห์ปริมาณ FAEE ในผลิตภัณฑ์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟี	23
3.5 การคำนวณที่ใช้ในงานวิจัย	24
3.5.1 การคำนวณหาפקเตอร์การตอบสนอง	24
3.5.2 การวิเคราะห์ปริมาณสบู่และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในผลิตภัณฑ์	26
3.5.3 การวิเคราะห์ความผิดพลาด	27
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	28
4.1 ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างเอทานอลและน้ำมันปาล์มโอเลอิน	28
4.2 ผลของความเร็วยวรอบในการปั่นกววน	32
4.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช	34

4.4 ผลของอุณหภูมิต่อการดำเนินการ.....	38
4.5 ผลกระทบของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา.....	41
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	44
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	44
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	45
รายการอ้างอิง.....	46
ภาคผนวก.....	50
ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดลอง.....	51
ภาคผนวก ข การคำนวณในการทดลอง.....	52
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างผลิตภัณฑ์.....	56
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	64

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 3-1 สภาวะสำหรับเครื่องปฏิกรณ์.....	22
ตาราง 3-2 สภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟที่ใช้ในการวิเคราะห์ FAEE.....	23
ตาราง 4-1 แสดงองค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันปาล์มโอเลอิน.....	30
ตาราง 4-2 แสดงผลค่าร้อยละผลได้และเวลาในการทำปฏิกิริยาภายใต้สภาวะที่เหมาะสม.....	43
ตาราง ก-1 ปริมาณสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยาในการทดลอง.....	48
ตาราง ข-1 แสดงแฟกเตอร์การตอบสนอง.....	49
ตาราง ข-2 แสดงระยะเวลาในคอลัมน์.....	50
ตาราง ข-3 แสดงผลการคำนวณปริมาณ FAEE ในผลิตภัณฑ์.....	51
ตาราง ข-4 ค่าความร้อนในการสร้างสารประกอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	52
ตาราง ค-1 ผลกระทบของความเร็วรอบต่อค่าร้อยละผลได้ของ FAEE ความเร็วรอบในการปั่นกววน 100 ถึง 800 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช 6:1 อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 โดยมวลของน้ำมันพืช.....	53
ตาราง ค-2 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชต่อค่าร้อยละผลได้ของ FAEE อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช 3:1 ถึง 18:1 ความเร็วรอบในการปั่นกววน 800 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 โดยมวลของน้ำมันพืช.....	54
ตาราง ค-3 ผลกระทบของอุณหภูมิในการดำเนินการต่อค่าร้อยละผลได้ของ FAEE อุณหภูมิ 150 ถึง 250 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการปั่นกววน 800 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช 12:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 โดยมวลของน้ำมันพืช.....	55
ตาราง ค-4 ผลกระทบของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าร้อยละผลได้ของ FAEE ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 ถึง 5 โดยมวลของน้ำมันพืช ความเร็วรอบในการปั่นกววน 800 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช 12:1 อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส.....	56
ตาราง ค-5 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและปริมาณสบู่ที่ละลายในผลิตภัณฑ์.....	57

หน้า

ตาราง ค-6 การทดลองซ้ำของการศึกษาผลกระทบความเร็วรอบในการปั่นกวนต่อค่าร้อยละผลได้ของ FAEE ความเร็วรอบในการปั่นกวน 800 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช 6:1 อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 โดยมวลของน้ำมันพืช.....	58
ตาราง ค-7 การทดลองซ้ำของการศึกษาผลกระทบอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช อุณหภูมิในการดำเนินการ และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าร้อยละผลได้ของ FAEE ความเร็วรอบในการปั่นกวน 800 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช 12:1 อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 โดยมวลของน้ำมันพืช.....	59
ตาราง ค-8 การตรวจสอบความผิดพลาดจากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์.....	60



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน.....	5
รูปที่ 2.2 แสดงปฏิกิริยาโดยรวมของการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน ระหว่างเอทานอล และน้ำมันพืช.....	5
รูปที่ 2.3 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบส.....	7
รูปที่ 2.4 ผลการวิเคราะห์ด้วย TGA ของโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านการอบไอน้ำ.....	13
รูปที่ 2.5 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ของโซเดียมฟอสเฟตไฮเดรต (Na ₃ PO ₄ ·12H ₂ O).....	14
รูปที่ 2.6 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ของโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านการอบไอน้ำ.....	15
รูปที่ 2.7 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ของโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านการเผา.....	16
รูปที่ 2.8 ผลการวิเคราะห์ด้วย BET ของโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านการเผา.....	17
รูปที่ 3.1 แสดงชุดอุปกรณ์สำหรับปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน.....	19
รูปที่ 4.1 แสดงการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ FAEE ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟี.....	29
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละผลได้และเวลาในการดำเนินการ ที่สภาวะความเร็วรอบ ในการปั่นกววน 800 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันปาล์มโอเลอิน 12:1 อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 โดยมวลของน้ำมันพืช.....	31
รูปที่ 4.3 ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช.....	31
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละผลได้ของ FAEE และเวลาในการดำเนินการ ที่ความเร็ว รอบในการปั่นกววน 100 ถึง 800 รอบต่อนาที.....	32
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละผลได้ของ FAEE และเวลาในการดำเนินการ ที่ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช 3:1 ถึง 18:1.....	34
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละผลได้ของ FAEE ที่สภาวะสมดุลและ อัตราส่วนโดยโมล ระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช 3:1 ถึง 18:1.....	35

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละผลได้ของ FAEE และเวลาในการดำเนินการ ที่อุณหภูมิ ในการดำเนินการ 150 ถึง 250 องศาเซลเซียส	38
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละผลได้ของ FAEE ที่สภาวะสมดุลและ อุณหภูมิในการ ดำเนินการ 150 ถึง 250 องศาเซลเซียส	39
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละผลได้ของ FAEE และเวลาในการดำเนินการ ที่ปริมาณ ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 ถึง 5 โดยมวลของน้ำมันพืช	41



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมา

ไบโอดีเซลคือเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีเพื่อทดแทนดีเซลที่ได้จากปิโตรเลียม โดยการทำให้ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างแอลกอฮอล์และน้ำมันพืชเป็นปฏิกิริยาหนึ่งที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล สารตั้งต้นไขมันที่ใช้กันอย่างแพร่หลายประกอบด้วย น้ำมันปาล์ม น้ำมันสบู่ดำ น้ำมันเมล็ดเรพ และน้ำมันถั่วเหลือง เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้สารตั้งต้นน้ำมันปาล์มโอเลอินเนื่องจากปาล์มเป็นชีวมวลที่มีมากในประเทศ โดยแอลกอฮอล์ที่ใช้ทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันจะเป็นแอลกอฮอล์โซ่ตรงที่มีคาร์บอนอะตอมตั้งแต่ 1 ถึง 8 อะตอม แต่แอลกอฮอล์ที่เหมาะสมที่สุดคือเมทานอลและเอทานอล [1] ซึ่งจะให้ผลิตภัณฑ์เป็นแฟตตี้แอซิดเมทิลเอสเทอร์ (Fatty Acid Methyl Ester, FAME) และแฟตตี้แอซิดเอทิลเอสเทอร์ (Fatty Acid Ethyl Ester, FAEE) ตามลำดับ

ไบโอดีเซลประเภท FAME และ FAEE มีความแตกต่างกันในด้านที่มาของเชื้อเพลิง FAME ที่ผลิตจากสารตั้งต้นเมทานอลเป็นไบโอดีเซลที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่การใช้เมทานอลซึ่งมีที่มาจากปิโตรเลียมทำให้ FAME เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีที่มาส่วนหนึ่งจากปิโตรเลียม แตกต่างจากไบโอดีเซลประเภท FAEE ที่ผลิตจากเอทานอลซึ่งมีที่มาจากชีวมวล ทำให้ FAEE เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีที่ทั้งหมดมาจากชีวมวลและทำให้กระบวนการผลิต FAEE เป็นกระบวนการที่มีความยั่งยืนมากกว่ากระบวนการผลิต FAME นอกจากนั้นการเลือกใช้สารตั้งต้นเอทานอลซึ่งเป็นสารที่มีความเป็นพิษต่ำกว่าเมทานอลทำให้กระบวนการผลิตไบโอดีเซลมีความปลอดภัยมากขึ้น [2] ในด้านคุณสมบัติเชื้อเพลิง FAEE จะมีคุณสมบัติการไหลที่อุณหภูมิต่ำกว่าที่ดีกว่า FAME [3, 4] และสุดท้ายงานวิจัยของ V. Makareviciene และคณะ [5] ได้ศึกษาการปลดปล่อยไอเสียจากการเผาไหม้ไบโอดีเซลและพบว่า FAEE จะมีการปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำกว่า FAME แต่การเผาไหม้ FAEE จะปลดปล่อยไอเสียประเภทไฮโดรคาร์บอนสูงกว่า FAME

ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ชนิดเบสเช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมเมทอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันอย่างแพร่หลาย [6] เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้สามารถให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงและใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่ำ แต่อย่างไรก็ตามการใช้งานตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้จำเป็นต้องล้างตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ การล้างผลิตภัณฑ์ก่อให้เกิดน้ำเสียที่มีฤทธิ์เป็นเบสปริมาณมากซึ่งเป็นภาระในการบำบัด

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์สามารถผลิตไบโอดีเซลอย่างเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ออกจากผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลสามารถทำได้ด้วยการกรองซึ่งไม่ก่อให้เกิดน้ำเสียที่มีฤทธิ์เป็นเบสเช่นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ สารประกอบของโลหะอัลคาไลด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ที่ถูกนำมาศึกษาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน ผลการศึกษาได้แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ในกลุ่มสารประกอบของโลหะอัลคาไลด์หลายชนิดมีความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน แต่อย่างไรก็ตามผลการศึกษาายังแสดงให้เห็นว่าสารประกอบของโลหะอัลคาไลด์บางชนิดประสบปัญหาการละลายในผลิตภัณฑ์ [7, 8] นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มสารประกอบของโลหะอัลคาไลด์มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ชนิดเบสทำให้ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันที่ใช้สารประกอบของโลหะอัลคาไลด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาสูงเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ชนิดเบส แต่อย่างไรก็ตามการใช้สารประกอบโลหะอัลคาไลด์ทำให้สามารถดำเนินการที่อุณหภูมิสูงเพื่อชดเชยความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ เช่นการศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมฟอสเฟตและโซเดียมซิลิเกตในการผลิต FAME ซึ่งการดำเนินการที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส สามารถลดเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาได้ถึง 4 เท่า เมื่อเทียบกับการดำเนินการที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส [9, 10]

โซเดียมฟอสเฟต (Na_3PO_4) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มสารประกอบของโลหะอัลคาไลด์ที่มีศักยภาพในการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันและในปัจจุบันยังไม่มีงานวิจัยที่นำตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตไปศึกษาในการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิต FAEE แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาการใช้โซเดียมฟอสเฟตในการผลิต FAME ได้แสดงให้เห็นว่าโซเดียมฟอสเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา และไม่ประสบปัญหาการละลายในผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้การศึกษาคือการใช้โซเดียมฟอสเฟตที่อุณหภูมิสูง (200 องศาเซลเซียส) ในการผลิต FAME ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้โซเดียมฟอสเฟตจะต้องการเวลาในการทำปฏิกิริยาต่ำ ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าร้อยละผลได้สูง โดยไม่ประสบปัญหาเพิ่มเติมจากการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ [11]

การศึกษาคือการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้แสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันประกอบด้วยอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช อุณหภูมิในการดำเนินการ ปัจจัยทั้งสองจะส่งผลกระทบต่อทั้งอัตราการเกิดปฏิกิริยาและสมดุลของปฏิกิริยา และปัจจัยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา [1]

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างน้ำมันเมล็ดปาล์มโอเลอินและเอทานอล เพื่อผลิต FAEE โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อย ไม่ประสบปัญหาการเกิดสบู่ และให้ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์สูง ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ ประกอบด้วยอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิในการดำเนินการจะถูกศึกษา เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิต FAEE

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตประกอบด้วย

- 1.3.1 สารตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง คือ เอทานอล และน้ำมันปาล์มโอเลอิน
- 1.3.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดโซเดียมฟอสเฟต (Na_3PO_4)
- 1.3.3 ความเร็วรอบที่ใช้การปั่นกวน 100 ถึง 800 รอบต่อนาที
- 1.3.4 สัดส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชเท่ากับ 3:1 ถึง 18:1
- 1.3.5 อุณหภูมิในการทดลองที่ 150 ถึง 250 องศาเซลเซียส
- 1.3.6 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 ถึง 5 โดยมวลของน้ำมันพืช

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้สภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างของน้ำมันปาล์มโอเลอินและเอทานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต และสามารถผลิต FAEE โดยกระบวนการมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง

บทที่ 2

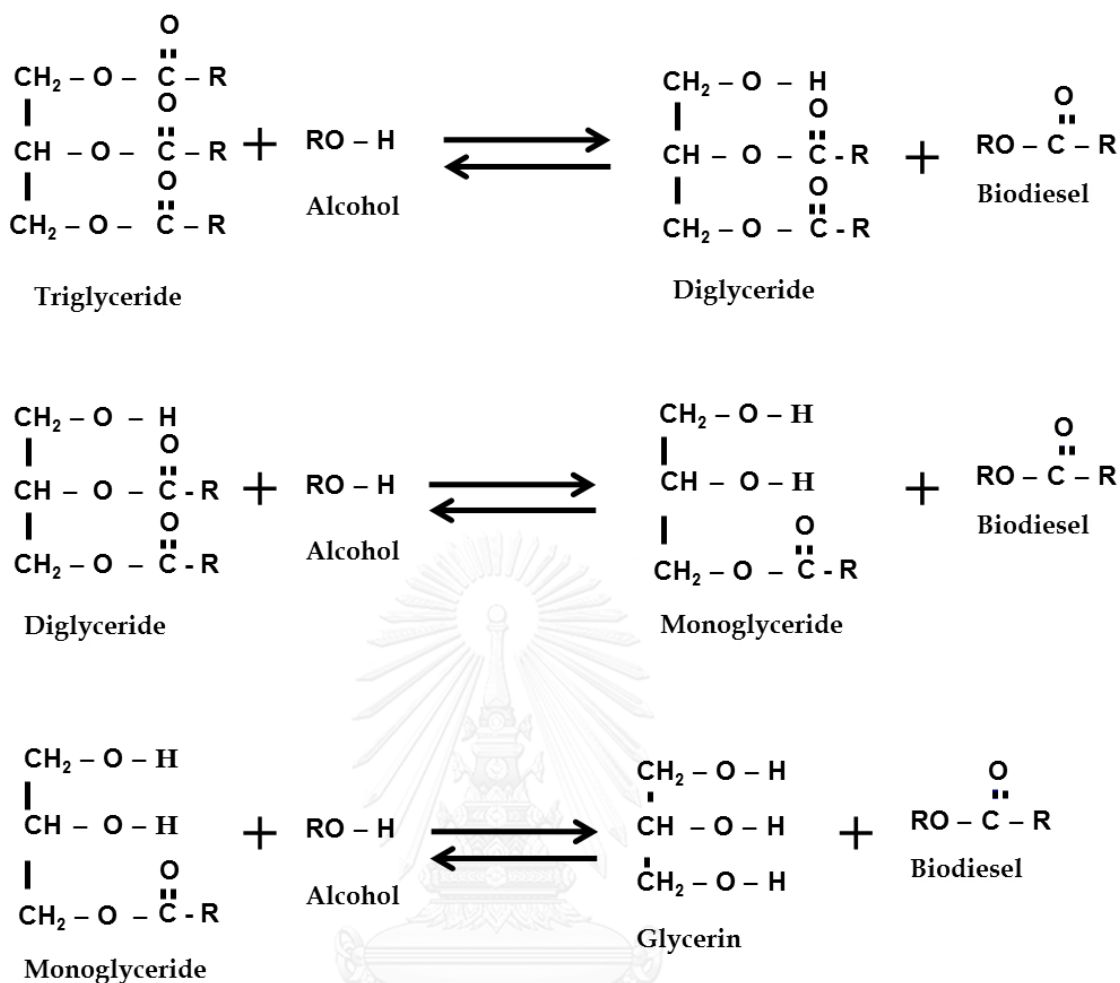
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นสารประกอบประเภทเอสเทอร์ของกรดไขมันและสามารถแบ่งประเภทได้เป็น แฟตตีแอซิดเอทิลเอสเทอร์ (FAME) และแฟตตีแอซิดเอทิลเอสเทอร์ (FAEE) มีจุดประสงค์เป็น เชื้อเพลิงชีวภาพที่มีจุดประสงค์เพื่อใช้ทดแทนดีเซลที่ได้จากปิโตรเลียม โดยไบโอดีเซลจะมีข้อ ได้เปรียบเหนือดีเซลที่ได้จากปิโตรเลียมประกอบด้วยการเป็นเชื้อเพลิงที่มีที่มาจากชีวมวลทำให้การ ใช้ไบโอดีเซลเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าดีเซลที่ได้จากปิโตรเลียม นอกจากนั้นการเผาไหม้ไบโอดีเซลจะปลดปล่อยไอเสียต่ำกว่าดีเซลที่ได้จากปิโตรเลียม การเผาไหม้ไบโอดีเซลสามารถลดการ ปลดปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรคาร์บอนลงร้อยละ 45 และ 65 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ ดีเซลที่ได้จากปิโตรเลียม แต่การปลดปล่อยไนตรัสออกไซด์ของไบโอดีเซลสูงกว่าการปลดปล่อยของ ดีเซลจากปิโตรเลียมประมาณร้อยละ 10 [12]

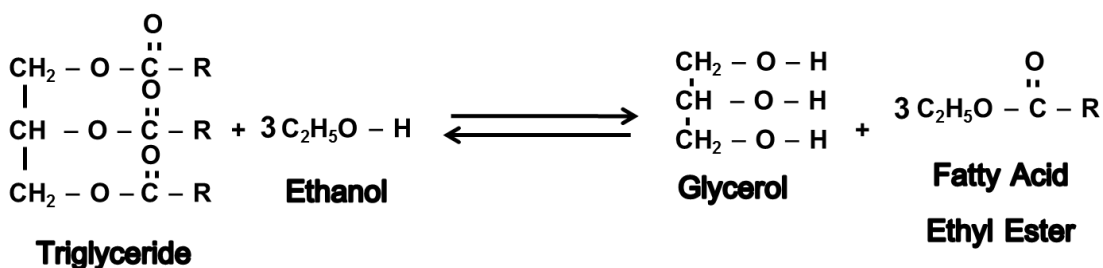
2.2 ปฏิกริยาทรานเอสเทอร์ริเคชัน

การทำปฏิกริยาทรานเอสเทอร์ริเคชันระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชเป็นวิธีหนึ่งในการ ผลิตไบโอดีเซล ปฏิกริยาประกอบด้วย 3 ขั้นตอนที่เกิดขึ้นตามลำดับ ในขั้นแรกไขมันทำปฏิกริยากับเอ ทานอลให้ผลิตภัณฑ์เป็นไดกลีเซอไรด์และ FAEE จากนั้นไดกลีเซอไรด์ทำปฏิกริยากับเอทานอลให้ ผลิตภัณฑ์เป็นโมโนกลีเซอไรด์และ FAEE และสุดท้ายโมโนกลีเซอไรด์ทำปฏิกริยากับเอทานอลให้ ผลิตภัณฑ์เป็นกลีเซอรอลและ FAEE โดยปฏิกริยาทั้งสามขั้นตอนเป็นปฏิกริยาที่สามารถผันกลับได้ [13, 14] ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน [13]

ในกรณีที่ใช้สารตั้งต้นเอทานอล ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันจะใช้สารตั้งต้นน้ำมันพืช 1 โมลและเอทานอล 3 โมล เพื่อให้ผลิตภัณฑ์กลีเซอรอล 1 โมล และ FAE 3 โมล ปฏิกิริยาโดยรวมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2

รูปที่ 2.2 แสดงปฏิกิริยาโดยรวมของการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน
ระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช [13]

2.2.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์

ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์สำหรับปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันสามารถแบ่งออกได้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเบสและตัวเร่งปฏิกิริยากรด

ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย การใช้งานตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์เบสส่วนใหญ่จะดำเนินการที่จุดเดือดของแอลกอฮอล์ภายใต้ความดันบรรยากาศ ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสที่ถูกนำมาศึกษาและใช้งานสำหรับปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมเมนท็อกไซด์ และโพแทสเซียมเมนท็อกไซด์

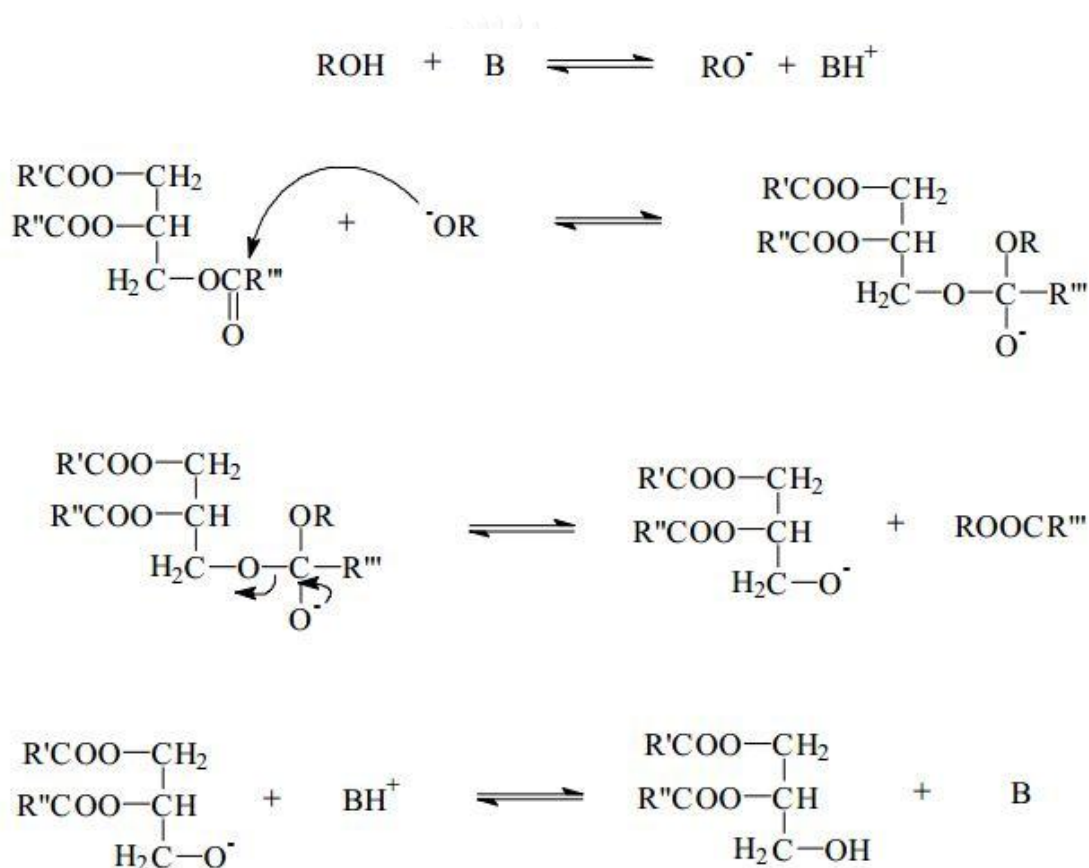
G. Anastopoulos และคณะ [15] ได้ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในการทำปฏิกิริยาเอทานอลิซิสของน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน การทดลองทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลและน้ำมันพืชเท่ากับ 6:1 ถึง 14:1 อุณหภูมิ 35 ถึง 90 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.25 ถึง 1.5 โดยมวลของน้ำมันพืช จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสม คืออัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชเท่ากับ 12:1 อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยมวลของน้ำมันพืช ซึ่งจะให้คาร์บอนิลได้ร้อยละ 90 ภายในระยะเวลาดำเนินการ 2.5 ชั่วโมง และพบว่าคุณสมบัติของ FAEE เช่น ความหนาแน่น ความหนืด และค่าความร้อนจะใกล้เคียงกับดีเซลที่ได้จากปิโตรเลียม

J.M. Encinar และคณะ [3] ได้ศึกษาการทำปฏิกิริยาเอทานอลิซิสของน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมเมนท็อกไซด์ และโพแทสเซียมเมนท็อกไซด์การทดลองทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชเท่ากับ 6:1 ถึง 15:1 อุณหภูมิ 35 ถึง 78 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยมวลของน้ำมันพืช เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที และทำปฏิกิริยาทั้งแบบขั้นตอนเดียวและแบบสองขั้นตอน จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณ FAEE สูงที่สุดในกลุ่ม ในด้านอุณหภูมิ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิจะเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา และเพิ่มความเข้มข้นของ FAEE ที่สภาวะสมดุล ทำให้อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 78 องศาเซลเซียส

K.T. Kucek และคณะ [16] ได้ศึกษาการทำปฏิกิริยาเอทานอลิซิสของน้ำมันถั่วเหลือง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ในทำการทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชเท่ากับ 6:1 ถึง 12:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.3 ถึง 1.0 โดยมวล หรือปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.42 ถึง 1.4 โดยมวล อุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส เวลาในการดำเนินการ 60 นาที จากการศึกษาสามารถ

สรุปได้ว่าอุณหภูมิในช่วงที่ศึกษาจะไม่มีผลต่อค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล และพบว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.3 โดยมวลของน้ำมันพืช อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลต่อ น้ำมันพืชเท่ากับ 12:1 จะให้ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลสูงสุด

กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเบสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 ในขั้นแรกแอลกอฮอล์จะแตกตัวเป็นอัลค็อกไซด์ไอออนและไฮโดรเจนไอออนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบส และไฮโดรเจนไอออนจะรวมกับเบส จากนั้นอัลค็อกไซด์ไอออนจะทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอนิลของไขมันให้ผลิตภัณฑ์เป็นสารตัวกลาง จากนั้นสารตัวกลางจะแตกตัวเป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันและไอออนลบของไดกลีเซอไรด์ สุดท้ายไอออนบวกของเบสจะถูกถ่ายให้กับไอออนลบของไดกลีเซอไรด์ ทำให้เบสพร้อมที่จะเร่งปฏิกิริยาอีกครั้งหนึ่ง [6]



รูปที่ 2.3 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบส [6]

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ชนิดเบสในผลิต FAEE ด้วยการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันจะประสบปัญหาการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงในการเกิดสบู่ งานวิจัยของ G. Mendow และคณะ [17] ได้ศึกษาการผลิต FAEE ด้วยปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมเมทอกไซด์ และผลการศึกษาได้แสดงให้เห็นว่าการใช้

โซเดียมไฮดรอกไซด์จะสูญเสียตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมด ในขณะที่การทำปฏิกิริยาโดยใช้โซเดียมเมนท็อกไซด์จะสูญเสียตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 25 โดยการสูญเสียตัวเร่งปฏิกิริยามีสาเหตุจากการเกิดปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน นอกจากนี้งานวิจัยของ J.M. Encinar [3] ได้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มากกว่าร้อยละ 1 โดยมวลของน้ำมันพืช จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ช้าลง เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ G. Anastopoulos [15] ที่แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากกว่าร้อยละ 1 โดยมวลของน้ำมันพืช จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ช้าลงเนื่องจากปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากเกินไปจะส่งผลให้ปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันเกิดได้ดีขึ้น

กรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยากรดที่ถูกนำมาศึกษาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน แต่อย่างไรก็ตามตัวเร่งปฏิกิริยากรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาเบส

งานวิจัยของ S.M.P. Meneghetti [18] ได้แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ชนิดเบสจะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างเมทานอลและน้ำมันเมล็ดถั่ว การทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมเมนท็อกไซด์จะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที เพื่อให้ได้ค่าร้อยละผลได้ร้อยละ 80 และ 90 ตามลำดับ และเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรคลอริกจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าร้อยละผลได้ร้อยละ 10 เมื่อทำปฏิกิริยาในสภาวะเดียวกัน นอกจากนี้งานวิจัยของ D.E. Lopez [19] ยังแสดงผลการศึกษาที่สอดคล้องกัน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟูริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผลิต FAME ด้วยปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันจะแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์จะใช้เวลาเพียง 1 นาที เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าร้อยละผลได้ร้อยละ 50 ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟูริกจะใช้เวลา 20 นาทีเพื่อให้ได้ค่าร้อยละผลได้ร้อยละ 50 เมื่อทำปฏิกิริยาในสภาวะเดียวกัน

2.2.2 การดำเนินการที่สภาวะยิ่งยวด

การดำเนินการที่สภาวะยิ่งยวดเป็นการดำเนินการที่อุณหภูมิและความดันสูง (200 ถึง 400 องศาเซลเซียส และ 3000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) และเป็นวิธีการที่สามารถทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาค่าและไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้การดำเนินการที่สภาวะยิ่งยวดจะสามารถใช้กับสารตั้งต้นที่มีน้ำและกรดไขมันอิสระเจือปน เนื่องจากไม่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสทำให้ไม่ประสบปัญหาปฏิกิริยาข้างเคียงในการเกิดสบู่

G. Madras และคณะ [20] ได้ศึกษาการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างน้ำมัน เมล็ดดอกทานตะวันและเอทานอล ผลการศึกษาได้แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาจะใช้เวลาเพียง 20 นาที โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช 40:1 และอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้ค่าร้อยละผลได้ร้อยละ 80 นอกจากนี้งานวิจัยของ K.T. Tan [21] ซึ่งได้แสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาศึกษาการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มและเอทานอล และได้แสดงให้เห็นว่าจะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 25 นาที เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าร้อยละผลได้ร้อยละ 70

2.2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยารีดิวซ์

ตัวเร่งปฏิกิริยารีดิวซ์ที่มีคุณสมบัติเบส เช่น เรซินแลกเปลี่ยนไอออน และสารประกอบของ โลหะอัลคาไลน์ได้ถูกนำมาศึกษาเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน ตัวเร่งปฏิกิริยารีดิวซ์สามารถนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยมีข้อได้เปรียบเหนือตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ การแยกตัวเร่งปฏิกิริยารีดิวซ์สามารถทำได้ด้วยการกรองซึ่งไม่ก่อให้เกิดน้ำเสียที่มีฤทธิ์เป็นเบสเช่นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ ทำให้การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยารีดิวซ์เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ นอกจากนี้การศึกษาได้แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยารีดิวซ์จำนวนหนึ่งสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้โดยไม่สูญเสียความไวในการทำปฏิกิริยา แต่อย่างไรก็ตามตัวเร่งปฏิกิริยารีดิวซ์จะมีความไวในการทำปฏิกิริยาที่ต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ทำให้ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์

การศึกษาได้แสดงให้เห็นว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดเบสมีความไวในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน แต่เรซินแลกเปลี่ยนไอออนประสบปัญหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำ ส่งผลให้การทำปฏิกิริยาใช้เวลานานและใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาสูง เช่นงานวิจัยของ N. Shibasaki-Kitakawa และคณะ [22] พบว่าจำเป็นต้องใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาสูงถึงร้อยละ 50 โดยมวลของน้ำมันพืช เพื่อให้ได้ค่าร้อยละการเกิดปฏิกิริยาร้อยละ 80 ภายในเวลาดำเนินการ 8 ชั่วโมง การศึกษาของ M. Kim และคณะ [23] ได้ข้อสรุปที่สอดคล้องกัน การศึกษาใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดเบส (Marathon MSA) ร้อยละ 36 โดยมวลของน้ำมันพืช และให้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าร้อยละผลได้ของ FAEE ร้อยละ 90 ภายในเวลาดำเนินการ 6 ชั่วโมง นอกจากนี้การทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนจะจำกัดอุณหภูมิในการดำเนินการ เนื่องจากโครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เป็นพลาสติกไม่สามารถทนอุณหภูมิสูงได้ ทำให้ไม่สามารถเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพื่อชดเชยความไวที่ต่ำของตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนได้

แคลเซียมออกไซด์ และโลหะออกไซด์ผสมเช่นแคลเซียมออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์และแลนทาอิมออกไซด์ และเซอร์โคเนียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ เป็นสารประกอบของโลหะอัลคาไลน์ที่ถูกนำมาศึกษาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน

การศึกษาการผลิต FAEE ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำปฏิกิริยาประกอบด้วยอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช อุณหภูมิในการดำเนินการและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา การศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชได้แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชจะเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา และจะเลื่อนสมดุลปฏิกิริยาไปทางผลิตภัณฑ์ FAEE มากขึ้น และเนื่องจากปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ทำให้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชที่ 3:1 ไม่เพียงพอที่จะทำให้น้ำมันพืชเกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ นอกจากนั้นการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชจะเลื่อนสมดุลของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันไปทางผลิตภัณฑ์ N. Krua และคณะ [7] ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชในช่วง 3:1 ถึง 24:1 และพบว่าอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชที่เหมาะสมเท่ากับ 21:1 ในขณะที่ J.M. Rubio-Caballero และคณะ [8] ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชในช่วง 15:1 ถึง 50:1 และพบว่าอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชที่เหมาะสมเท่ากับ 20:1 โดยอัตราส่วนที่สูงกว่า 20:1 จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง M. Krua และคณะ [24] ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชในช่วง 3:1 ถึง 18:1 และพบว่าอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชที่เหมาะสมเท่ากับ 12:1 และสุดท้าย X. Liu [25] และคณะศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชในช่วง 3:1 ถึง 15:1 และพบว่าอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชที่เหมาะสมเท่ากับ 15:1 การศึกษาทั้งหมด

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจะส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นการศึกษาพบว่าการผลิต FAEE ต้องการปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าการผลิต FAME งานวิจัยของ J.M. Rubio-Caballero และคณะ [8] พบว่าการผลิต FAME ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO-CaO ร้อยละ 1 โดยมวลของน้ำมันพืชเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะให้ค่าร้อยละผลได้ร้อยละ 99 ในขณะที่การผลิต FAEE ที่ใช้ ZnO-CaO ร้อยละ 1.5 โดยมวลของน้ำมันพืชเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะให้ค่าร้อยละผลได้เพียงร้อยละ 20 ในขณะที่งานวิจัยของ N. Kaur และคณะ [7] พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZrO₂-CaO ร้อยละ 5 โดยมวลในการผลิต FAME และการผลิต FAEE พบว่าการผลิต FAME จะใช้เวลาเพียง 100 นาที ในขณะที่การผลิต FAEE จะใช้เวลา 420 นาที

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสารประกอบของโลหะอัลคาไลน์ประสบปัญหาความว่องไวในการทำปฏิกิริยาต่ำเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ แต่อย่างไรก็ตามการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสารประกอบของโลหะอัลคาไลน์ทำให้การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงเป็นไปได้ เนื่องจากโครงสร้างของสารประกอบโลหะอัลคาไลน์สามารถทนอุณหภูมิสูงได้ ทำให้การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสารประกอบของโลหะอัลคาไลน์สามารถลดเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาลง โดยในปัจจุบันมีการศึกษาการผลิต FAME ที่กึ่งยิ่งยวดด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาสารประกอบของโลหะอัลคาไลน์ เช่นงานวิจัยของ J.Z. Yin และคณะ [9, 10] ซึ่งศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมฟอสเฟตและโซเดียมซลิเกต ในการผลิต FAME ในช่วงอุณหภูมิ 180 ถึง 260 องศาเซลเซียส ความดัน 6.46 เมกกะปาสคาล และพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้สามารถให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง โดยการทำปฏิกิริยาที่ 220 องศาเซลเซียส จะใช้เวลาเพียง 30 นาทีเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าร้อยละผลได้ที่สูงกว่าร้อยละ 95 ซึ่งสามารถลดเวลาในการทำปฏิกิริยาลงประมาณ 4 เท่าเปรียบเทียบกับการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำ โดย G. Guan ซึ่งศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมฟอสเฟตทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส จะใช้เวลา 120 นาที เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าร้อยละผลได้ที่สูงกว่าร้อยละ 95 [26] นอกจากนี้งานวิจัยของ L. Wan และคณะ [27] ได้ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมงกานีสคาร์บอเนต/ซิงค์ออกไซด์ ($MnCO_3/ZnO$) และผลการศึกษาได้แสดงให้เห็นว่าการทำปฏิกิริยาที่ 175 องศาเซลเซียส ความดัน 3.2 เมกกะปาสคาล จะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าร้อยละผลได้ร้อยละ 94.2

โซเดียมฟอสเฟตเป็นสารประกอบของโลหะอัลคาไลน์ชนิดหนึ่ง ที่ถูกนำมาศึกษาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน ผลการศึกษาได้แสดงให้เห็นว่าโซเดียมฟอสเฟตมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน S.T. Jiang และคณะ [28] ได้ศึกษาการใช้โซเดียมฟอสเฟตในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันในช่วงอุณหภูมิต่ำ ได้แสดงว่าภายใต้สภาวะที่เหมาะสม คืออุณหภูมิ 343 เคลวิน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลและน้ำมันพืชเท่ากับ 9:1 ความเร็วรอบในการปั่นกวน 600 รอบต่อนาที ปฏิกิริยาจะถึงสภาวะสมดุลในระยะเวลา 80 นาที และให้ค่าร้อยละผลได้ร้อยละ 98 นอกจากนี้ P.D. Filippis และคณะ [29] ซึ่งศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันเมล็ดเรพภายใต้สภาวะอัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันและตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 1:0.20 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันและเมทานอลเท่ากับ 1:6 จะใช้เวลา 120 นาที เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าร้อยละผลได้ร้อยละ 98 แต่อย่างไรก็ตามตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตจะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาต่ำกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากความเป็นเบสของหมู่ฟอสเฟตที่ต่ำกว่าหมู่ไฮดรอกไซด์ นอกจากนี้การศึกษาคือการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตที่อุณหภูมิสูง (200 องศา

เซลเซียส) ในการผลิต FAME โดยในงานวิจัยของ K. Thinnakorn และคณะ [11] พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านการเผามีความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างเมทานอลและน้ำมันปาล์มโอเลอิน เมื่อดำเนินการที่สภาวะที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลและน้ำมันพืชเท่ากับ 18:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยมวลของน้ำมันพืช จะใช้เวลาการทำปฏิกิริยาเพียง 30 นาทีเพื่อให้ไขมันพืชเกิดปฏิกิริยาโดยสมบูรณ์

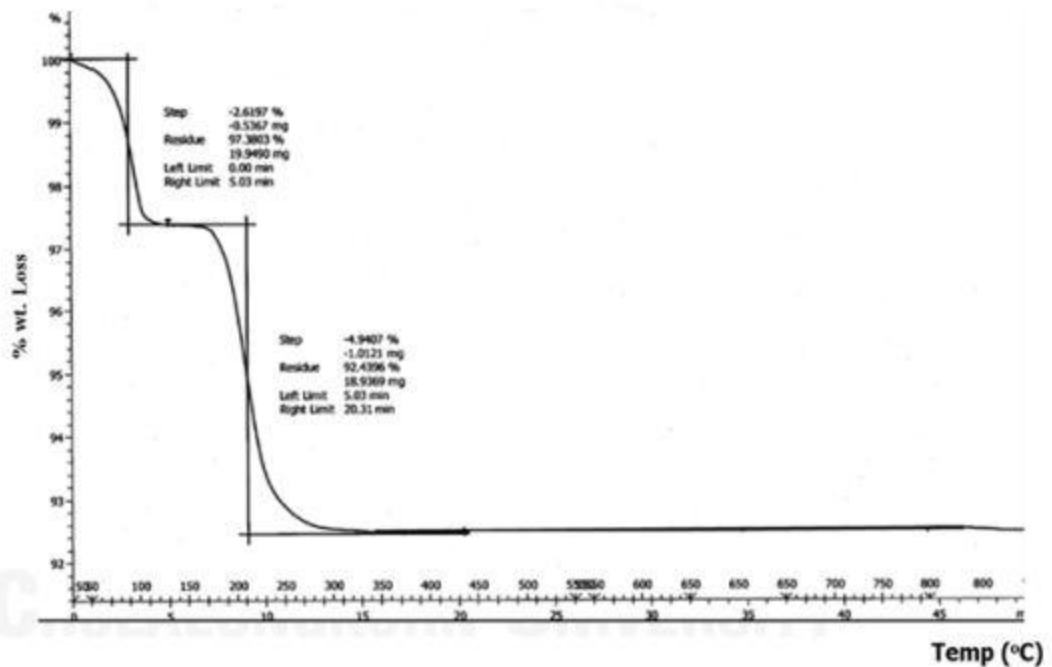
โครงสร้างผลึกของโซเดียมฟอสเฟตจะส่งผลต่อการละลายของตัวเร่งปฏิกิริยาในผลิตภัณฑ์ โดย S.T. Jiang และคณะ [28] พบว่าเมื่อใช้โซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านการอบแห้ง ($\text{Dried-Na}_3\text{PO}_4$) ทำปฏิกิริยาที่ 70 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3.3 โดยมวลของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมดจะละลายในผลิตภัณฑ์ ในขณะที่ K. Thinnakorn และคณะ [11] ได้ทดสอบการละลายของโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านการเผา ($\text{Calcined-Na}_3\text{PO}_4$) ในตัวทำละลายเมทานอลที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านการเผาจะละลายในผลิตภัณฑ์เพียงร้อยละ 0.14 โดยมวลของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมด นอกจากนี้โครงสร้างผลึกของโซเดียมฟอสเฟตจะส่งผลต่อความว่องไวในการทำปฏิกิริยา โดยงานวิจัยของ S.T. Jiang และคณะ [28] ได้เปรียบเทียบระหว่างโซเดียมฟอสเฟตเดคาไฮเดรต ($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) และโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านการอบแห้งโดยพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา โซเดียมฟอสเฟตเดคาไฮเดรตจะให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำ เนื่องจากน้ำที่อยู่ในโครงสร้างสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันได้ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ P.D. Filippis และคณะ [29] ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านการอบแห้งมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าโซเดียมฟอสเฟตเดคาไฮเดรต แต่อย่างไรก็ตามการอบแห้งไม่สามารถกำจัดน้ำที่อยู่ในโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ทั้งหมด โดย K. Thinnakorn [30] พบว่าจะต้องใช้อุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 500 องศาเซลเซียสในการเผาโซเดียมฟอสเฟต เพื่อกำจัดน้ำและสิ่งเจือปนทั้งหมดออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต

2.2.4 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต

2.2.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตโดยเครื่องมือวิเคราะห์ด้วยวิธี

Thermal Gravimetric Analysis (TGA)

ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านการอบแห้งที่ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ถูกวิเคราะห์ด้วย TGA ผลการวิเคราะห์ได้แสดงให้เห็นว่ามีการสูญเสียมวลในสองช่วงคือ 60 ถึง 150 องศาเซลเซียส และ 150 ถึง 450 องศาเซลเซียส และภายหลังจาก 450 องศาเซลเซียสไม่พบการสูญเสียมวลของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยน้ำหนักที่สูญเสีเท่ากับร้อยละ 7.55 ซึ่งเป็นการสูญเสียมวลคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำจากตัวเร่งปฏิกิริยา [30] ดังรูปที่ 2.4

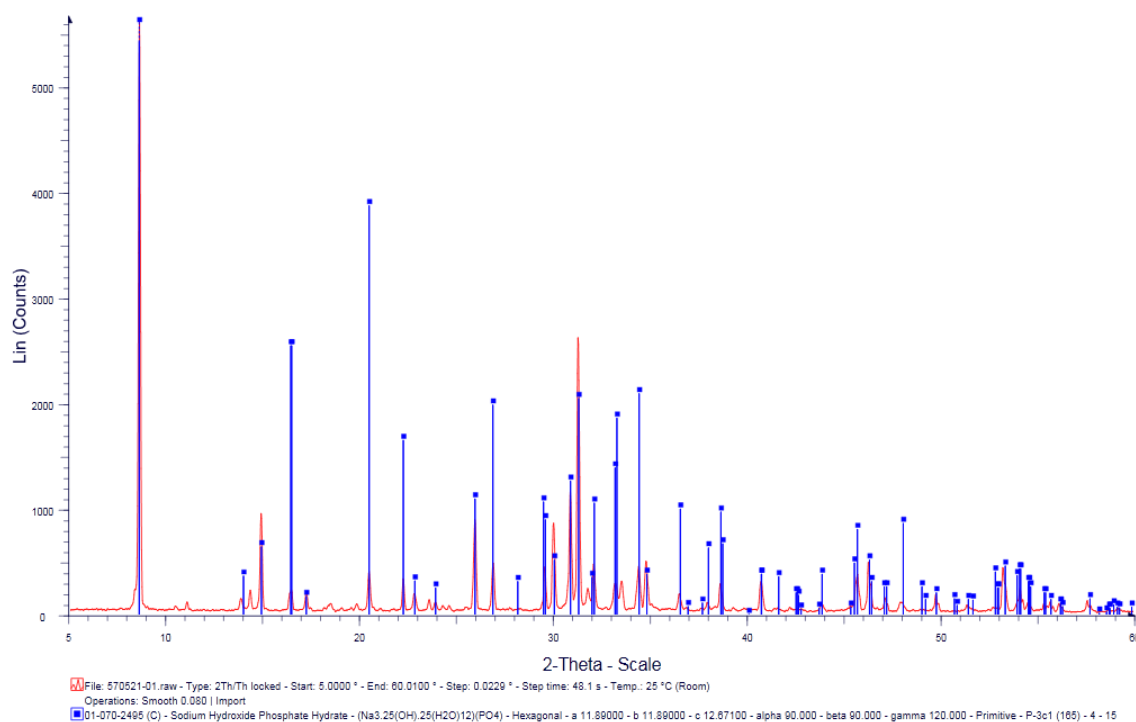


รูปที่ 2.4 ผลการวิเคราะห์ด้วย TGA ของโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านการอบไล่น้ำ [30]

2.2.4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตโดยเครื่องมือวิเคราะห์ด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD)

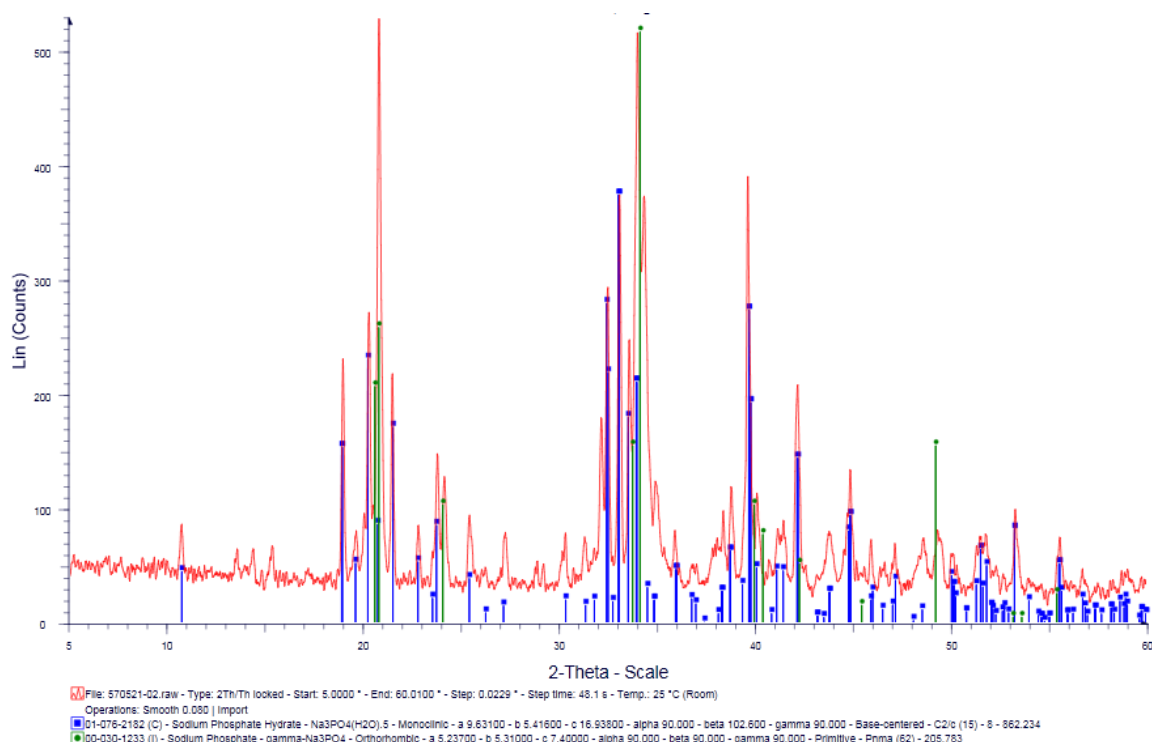
ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตเริ่มต้นจากโซเดียมฟอสเฟตโดดิกาไฮเดรต ($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งจะมีโมเลกุลน้ำเกาะอยู่โดยรอบโมเลกุลโซเดียมฟอสเฟต 12 โมเลกุล ผลจากการวิเคราะห์ด้วย XRD แสดงให้เห็นว่า โซเดียมฟอสเฟตโดดิกาไฮเดรตมีโครงสร้างเป็นเฮกซะโกนอล (Hexagonal) ดังรูปที่

2.5



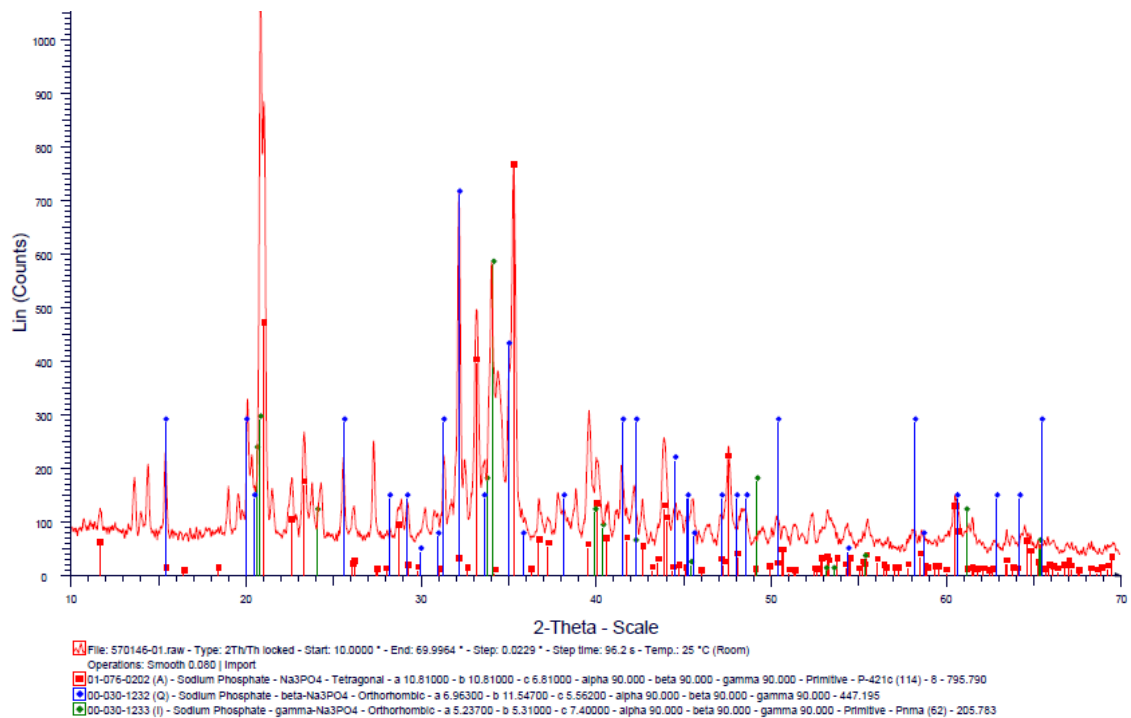
รูปที่ 2.5 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ของโซเดียมฟอสเฟตไฮเดรต ($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) (เส้นที่มีจุดยอดเป็นสีเหลี่ยมจตุรัสแสดงโครงสร้างผลึกของโซเดียมฟอสเฟตไฮเดรตแบบเฮกซะโกนอล) [30]

เมื่อนำโซเดียมฟอสเฟตไฮเดรต ($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) มาอบไล่ไอน้ำที่ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าโครงสร้างผลึกของโซเดียมฟอสเฟตไฮเดรตจะเปลี่ยนเป็นโซเดียมฟอสเฟตไฮเดรตที่มีน้ำ 5 โมเลกุลอยู่โดยรอบโมเลกุลโซเดียมฟอสเฟต ($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ที่มีลักษณะผลึกแบบโมนอคลินิก (Monoclinic) และมีโครงสร้างเกิดขึ้นใหม่คือโซเดียมฟอสเฟตแกมมา -ออร์โธรอมบิก (Orthorhombic) [30] ดังรูป 2.6



รูปที่ 2.6 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ของโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านการอบไอน้ำ (เส้นที่มีจุดยอดเป็นสี่เหลี่ยมจตุรัสแสดงโครงสร้างผลึกของโซเดียมฟอสเฟตไฮเดรตแบบโมนอกลิติก เส้นที่มีจุดยอดเป็นวงกลมแสดงโครงสร้างผลึกแบบแกมมา-ออร์โธโรมบิก) [30]

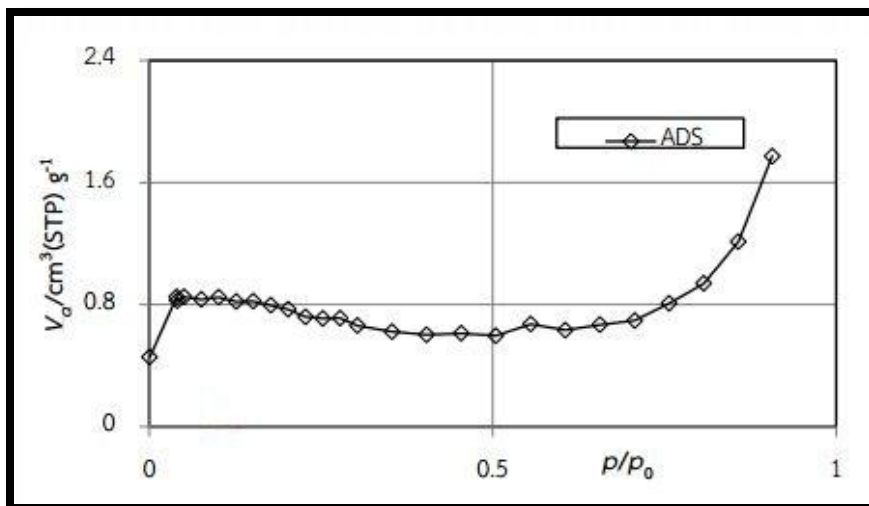
เมื่อนำโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำมาเผาในเตาเผาที่ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 ชั่วโมง พบว่าโครงสร้างผลึกของโซเดียมฟอสเฟตแบบโมนอกลิติกจะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) และโครงสร้างผลึกโซเดียมฟอสเฟตแบบเบตา-ออร์โธโรมบิก ส่วนโครงสร้างผลึกของโซเดียมฟอสเฟตแกมมา-ออร์โธโรมบิกยังไม่ถูกเปลี่ยนแปลง [30] ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ของโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านการเผา (เส้นที่มีจุดยอดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสแสดงโครงสร้างผลึกของโซเดียมฟอสเฟตไฮดรตแบบเตตระโกนอล เส้นที่มีจุดยอดเป็นสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดแสดงโครงสร้างผลึกแบบเบต้า-ออร์โธโรมบิก เส้นที่มีจุดยอดเป็นวงกลมแสดงโครงสร้างผลึกแบบแกมมา-ออร์โธโรมบิก) [30]

2.2.4.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตด้วยวิธี Brunauer-Emmett-Teller (BET) และการวัดค่าความเป็นเบสด้วยวิธีแฮมเมตต์

การวัดปริมาณพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตด้วยวิธี BET พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านการเผาแล้วจะมีพื้นที่ผิว 1.76 ตารางเมตรต่อกรัม และไม่มีรูพรุนภายในตัวเร่งปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 2.8 ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านการอบแห้งจะมีพื้นที่ผิวต่ำจนไม่สามารถวัดค่าได้ ส่วนความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านการอบแห้งและโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านการเผาจะมีความแรงของเบส (Base Strength) อยู่ในช่วง $15 < H_- < 18.4$ [30]



รูปที่ 2.8 ผลการวิเคราะห์ด้วย BET ของโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านการเผา [30]

2.3 ปฏิกริยาข้างเคียงที่เกิดควบคู่กับปฏิกริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน

ปฏิกริยาข้างเคียงจะเกิดขึ้นเมื่อสารตั้งต้นมีสิ่งเจือปน โดยปกติสิ่งเจือปนในสารตั้งต้นจะประกอบด้วยน้ำซึ่งเจือปนอยู่ในแอลกอฮอล์หรือไขมันที่มีคุณภาพต่ำเช่นน้ำมันพืชใช้แล้ว และกรดไขมันซึ่งมักจะเจือปนอยู่ในไขมันที่มีคุณภาพต่ำเช่นน้ำมันพืชใช้แล้ว ปฏิกริยาข้างเคียงที่เกิดขึ้นจะส่งผลต่อการสูญเสียตัวเร่งปฏิกริยา อัตราการเกิดปฏิกริยาและค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ต่ำลง

2.3.1 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิส

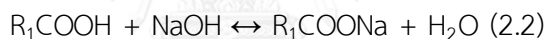
ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสเป็นปฏิกริยาระหว่างน้ำมันพืชและน้ำ ซึ่งจะสลายโมเลกุลของน้ำมันพืชออกเป็นกรดไขมันและกลีเซอรอล ตามสมการที่ 2.1



2.3.2 ปฏิกริยาสะปอนนิฟิเคชัน

ปฏิกริยาสะปอนนิฟิเคชันเป็นปฏิกริยาระหว่างกรดไขมันและตัวเร่งปฏิกริยากับเบส ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นสบู่และน้ำ ซึ่งสบู่ที่เกิดขึ้นจะเป็นการสูญเสียตัวเร่งปฏิกริยา ทำให้อัตราการเกิดปฏิกริยาลดลง ทำให้ค่าร้อยละผลได้ต่ำลง ปฏิกริยาสะปอนนิฟิเคชันสามารถแสดงได้ดังสมการที่

2.2



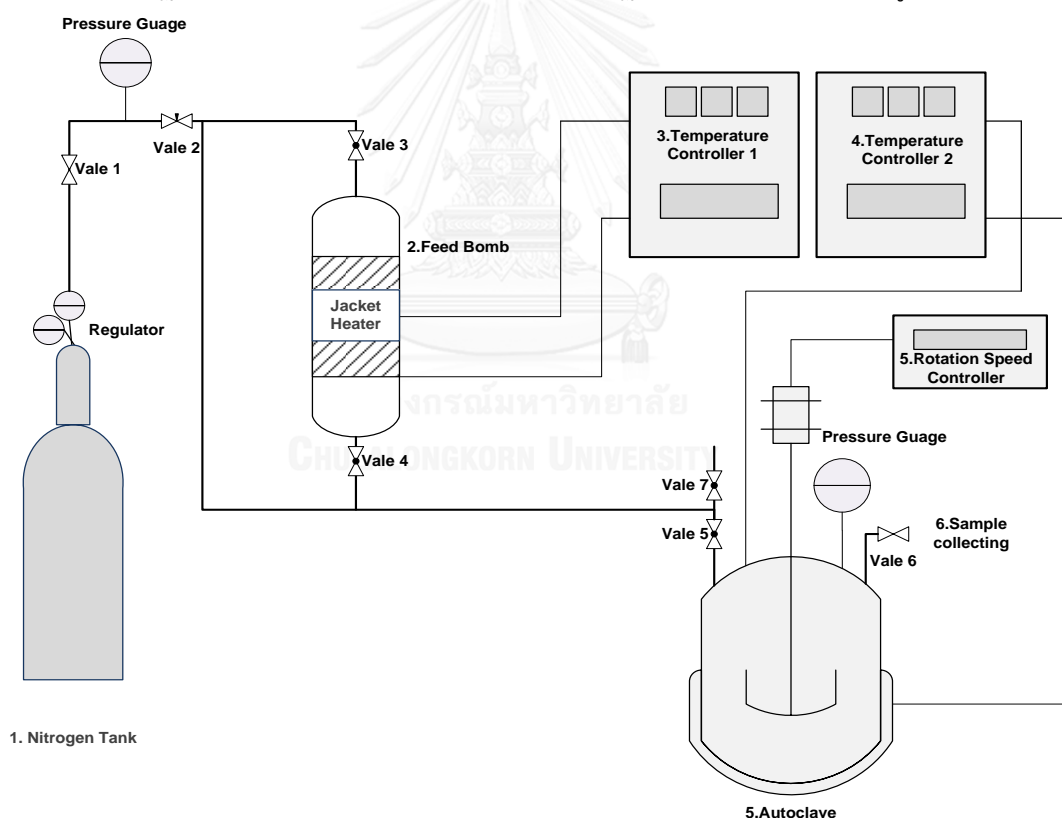
บทที่ 3

การทดลองและการวิเคราะห์

บทที่ 3 คือการอธิบายวิธีในการดำเนินการทดลองและการวิเคราะห์ตัวอย่างจากการทดลอง เนื้อหาในบทที่ 3 ประกอบด้วย เครื่องปฏิกรณ์ สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง วิธีการทดลอง วิธีการวิเคราะห์ผลและวิธีคำนวณที่ใช้ในงานวิจัย

3.1 เครื่องปฏิกรณ์

ชุดอุปกรณ์สำหรับการทำปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย เครื่องปฏิกรณ์แบบถัง กวขนาด 2 ลิตรที่มีใบพัดสำหรับปั่นกวน ถังเก็บสารตั้งต้นสำหรับบรรจุเอทานอล ฮีตเตอร์และชุดควบคุมอุณหภูมิสำหรับเครื่องปฏิกรณ์และถังเก็บสารตั้งต้น และแก๊สไนโตรเจนเพื่อปรับความดัน ภายในเครื่องปฏิกรณ์และถังเก็บสารตั้งต้น ระบบเครื่องปฏิกรณ์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงชุดอุปกรณ์สำหรับปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชั่น โดยประกอบด้วย ถังแก๊สไนโตรเจน ถังป้อนสาร เครื่องปฏิกรณ์แบบกะชนิดโลหะแอสแตนเลส ขนาด 2 ลิตร และชุดควบคุมอุณหภูมิ [30]

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. น้ำมันปาล์มโอเลอิน เกรดอาหารจากบริษัทโอลีน
2. เอทานอล เกรดเชื้อเพลิง (Ethanol; C_2H_5OH , 99.8%)
3. เมทานอล เกรดอุตสาหกรรม (Methanol; CH_3OH , 99.9%)
4. โซเดียมฟอสเฟต เกรดอุตสาหกรรม (Sodium phosphate; $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$)
5. 2-บิวทานอล เกรดวิเคราะห์ (2-Butanol; C_4H_9OH , 99.9%)
6. เมทิลเดคาโนเอท เกรดวิเคราะห์ (Methyl Decanoate; $C_9H_{19}CO_2CH_3$, 99.5%) จากบริษัท Sigma-Aldrich
7. สารมาตรฐานผสมของเมทิลเอสเทอร์ (RCO_2CH_3 , R= C10, C12, C14, C16, C18, C20, C22) จากบริษัท RESTEK ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 ใช้เป็นสารมาตรฐาน (Standard) ในการวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟี
8. กรดไฮโดรคลอริก เกรดวิเคราะห์ (Hydrochloric Acid; HCl 99.9%)
9. อะซีโตน เกรดอุตสาหกรรม (Acetone; C_3H_6O , 99.9%)
10. ฟีนอล์ฟทาลีน เกรดวิเคราะห์ (Phenolphthalein)
11. โบรโมฟีนอลบลู เกรดวิเคราะห์ (Bromophenol Blue)

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

- 1) นำโซเดียมฟอสเฟตไดไฮดรอกไซด์ (Na₃PO₄·12H₂O) มาอบไล่ไอน้ำโดยที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 2) นำโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านการอบเข้าเผาในเตาเผา โดยเริ่มต้นจากอุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) และใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และคงอุณหภูมิสุดท้ายที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
- 3) นำตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านการเผามาคัดแยกขนาดให้มีขนาดในช่วง 700 ถึง 1000 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าขนาดช่องว่างของตะกร้าใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา

3.3.2 การทดลองในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มโอเลอินและเอทานอล

- 1) นำตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตใส่ลงในตะกร้าแอสตนเลส
- 2) มัดตะกร้าตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยลวดแอสตนเลสกับภายในของเครื่องปฏิกรณ์
- 3) นำสารตั้งต้นน้ำมันปาล์มโอเลอินบรรจุในเครื่องปฏิกรณ์ และประกอบเครื่องปฏิกรณ์
- 4) ปลดปล่อยแก๊สไนโตรเจนเพื่อไล่ออกซิเจนที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 3 ครั้ง และปรับอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์ไปที่ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที และปลดปล่อยแก๊สไนโตรเจนที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 3 ครั้งเพื่อไล่ออกซิเจนออกจากเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นน้ำมันปาล์ม
- 5) บรรจุเอทานอลในถังป้อนสาร (Feed Bomb) ประกอบถังป้อนสารและต่อท่อเข้ากับเครื่องปฏิกรณ์ เพิ่มอุณหภูมิของถังป้อนสารและเครื่องปฏิกรณ์ให้เท่ากับอุณหภูมิดำเนินการ
- 6) เพิ่มความดันในถังป้อนสารเป็น 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและเปิดวาล์วหมายเลข 5 เพื่อปลดปล่อยเอทานอลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ (การเปิดวาล์วหมายเลข 5 ถือเป็นจุดเริ่มการทดลอง) ภายหลังจากที่ในเครื่องปฏิกรณ์มีความดันเท่ากับ 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ปิดวาล์วหมายเลข 5 เพื่อป้องกันสารในเครื่องปฏิกรณ์ไหลย้อนกลับ
- 7) เก็บตัวอย่างออกจากเครื่องปฏิกรณ์ตามเวลา 5 10 15 20 25 30 40 50 60 90 120 150 180 210 และ 240 นาทีโดยในแต่ละครั้งเก็บตัวอย่างออกจากเครื่องปฏิกรณ์ 2 หลอด หลอดแรกปริมาตร 5 มิลลิลิตร เพื่อไล่ออกสารที่ค้างอยู่ในท่อเก็บสาร หลอดที่สองปริมาตร 2 มิลลิลิตร

เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณ FAEE ตัวอย่างที่เก็บจากเครื่องปฏิกรณ์จะถูกจุ่มในน้ำเย็นทันที เพื่อหยุดปฏิกิริยา

ตาราง 3-1 สภาวะสำหรับเครื่องปฏิกรณ์

สภาวะ	สภาวะในการทดลอง
ตัวเร่งปฏิกิริยา	โซเดียมฟอสเฟต
สารตั้งต้น	ปาล์มโอเลอิน และเอทานอล
ความถี่รอบในการกวน	100 ถึง 800 รอบต่อนาที
สัดส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	3:1 ถึง 18:1
อุณหภูมิ	150 ถึง 250 องศาเซลเซียส
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	ร้อยละ 1 ถึง 5 โดยมวลของน้ำมันพืช
ความดันในเครื่องปฏิกรณ์	1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

3.3.3 การเตรียมตัวอย่างผลิตภัณฑ์สำหรับแก๊สโครมาโตกราฟี

- 1) เก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากเครื่องปฏิกรณ์ใส่หลอดทดลอง
- 2) ล้างตัวอย่างผลิตภัณฑ์ด้วยน้ำกลั่นเพื่อแยกเอทานอลและกลีเซอรอลที่เจือปนออก จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 4600 รอบ/นาที เพื่อแยกเฟสเอทิลเอสเทอร์ และเฟสน้ำออกจากกัน
- 3) ทำซ้ำ 2 ซ้ำ จนกระทั่งล้างผลิตภัณฑ์ครบ 3 รอบ
- 4) แยกน้ำที่เจือปนในตัวอย่งผลิตภัณฑ์ออกด้วยสูญญากาศ
- 5) นำตัวอย่างผลิตภัณฑ์ไปวิเคราะห์หาปริมาณเอทิลเอสเทอร์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

3.4 วิธีวิเคราะห์ตัวอย่างผลิตภัณฑ์

3.4.1 การวิเคราะห์ปริมาณ FAEE ในผลิตภัณฑ์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟี

- 1) เตรียมสารละลายของสารมาตรฐาน (Internal Standard) โดยชั่งเมทิลเดคาโนเอทละลายในบิวทานอลในอัตราส่วน 1:20 โดยน้ำหนัก
- 2) เตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์โดยชั่งตัวอย่างผลิตภัณฑ์ 0.1 กรัม ละลายในสารละลายสารมาตรฐานหนัก 0.5 กรัม ใส่ในขวดเตรียมสาร
- 3) เขย่าให้เป็นเนื้อเดียวกันและนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี GC Variance 3800 ใช้วิเคราะห์ FAEE โดยสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.1

ตาราง 3-2 สภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีที่ใช้ในการวิเคราะห์ FAEE

ตัวแปร	สภาวะ
คอลัมน์	อินโนแว็กซ์ (Innowax)
ตัวตรวจวัด	เฟลมไอออไนเซชัน (FID)
แก๊สพา (Carrier gas)	ฮีเลียม (Helium)
อัตราการไหลของแก๊สพา (Flow rate of carrier gas)	2 มิลลิลิตร/นาที
ความดันของแก๊สพา (Pressure of carrier gas)	10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
อุณหภูมิของตัวตรวจวัด (Detector Temp)	250 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิที่จุดฉีด (Injector Temperature)	230 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิของคอลัมน์เริ่มต้น (Initial Column Temperature)	80 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิของคอลัมน์สุดท้าย (Final Column Temperature)	230 องศาเซลเซียส
อัตราการให้ความร้อน (Heating rate)	20 องศาเซลเซียส/นาที

3.5 การคำนวณที่ใช้ในงานวิจัย

3.5.1 การคำนวณหาแฟกเตอร์การตอบสนอง

การหาแฟกเตอร์การตอบสนองของ FAEE (Response Factor) สามารถทำได้โดยเริ่มจากการผลิต FAME และ FAEE บริสุทธิ์จากน้ำมันปาล์มโอเลอินด้วยการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมเอทท็อกไซด์ร้อยละ 2 โดยมวลของน้ำมันพืช ที่สภาวะอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอล (เอทานอล) และน้ำมันพืชเท่ากับ 12:1 อุณหภูมิในการดำเนินการ 75 องศาเซลเซียส เวลาในการดำเนินการ 2 ชั่วโมง นำผลิตภัณฑ์ไปล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อแยกแอกอฮอลและกลีเซอรอลในผลิตภัณฑ์ออก และแยกน้ำด้วยสูญญากาศ สุดท้ายผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกนำไปทำปฏิกิริยาซ้ำจนครบ 3 ครั้ง โดยผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทำปฏิกิริยาซ้ำครบ 3 ครั้งและผ่านการแยกน้ำ แอลกอฮอล์และกลีเซอรอลออกจากผลิตภัณฑ์ จะถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์ FAEE และผลิตภัณฑ์ FAME บริสุทธิ์

เตรียมสาร FAEE และ FAME บริสุทธิ์สำหรับการวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟี ด้วยการละลายกับสารละลายมาตรฐานเช่นเดียวกับการเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟีตามปกติ ผลการวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟีของสารมาตรฐานผสมของเมทิลเอสเทอร์จะทำให้ได้ค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของ FAME ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.1 ถึง 3.5

$$\text{แฟกเตอร์ตอบสนองของเมทิลไมริสติก} = \frac{\text{พ.ท. ของเมทิลไมริสติก} \times \text{น.น. ของสารมาตรฐาน}}{\text{พ.ท. ของสารมาตรฐาน} \times \text{น.น. ของเมทิลไมริสติก}} \quad (3.1)$$

$$\text{แฟกเตอร์ตอบสนองของเมทิลปาล์มมิก} = \frac{\text{พ.ท. ของเมทิลปาล์มมิก} \times \text{น.น. ของสารมาตรฐาน}}{\text{พ.ท. ของสารมาตรฐาน} \times \text{น.น. ของเมทิลปาล์มมิก}} \quad (3.2)$$

$$\text{แฟกเตอร์ตอบสนองของเมทิลสเตริยเรต} = \frac{\text{พ.ท. ของเมทิลสเตริยเรต} \times \text{น.น. ของสารมาตรฐาน}}{\text{พ.ท. ของสารมาตรฐาน} \times \text{น.น. ของเมทิลเมทิลสเตริยเรต}} \quad (3.3)$$

$$\text{แฟกเตอร์ตอบสนองของเมทิลโอเลอิก} = \frac{\text{พ.ท. ของเมทิลโอเลอิก} \times \text{น.น. ของสารมาตรฐาน}}{\text{พ.ท. ของสารมาตรฐาน} \times \text{น.น. ของเมทิลเมทิลโอเลอิก}} \quad (3.4)$$

$$\text{แฟกเตอร์ตอบสนองของเมทิลไลโนเลอิก} = \frac{\text{พ.ท. ของเมทิลไลโนเลอิก} \times \text{น.น. ของสารมาตรฐาน}}{\text{พ.ท. ของสารมาตรฐาน} \times \text{น.น. เมทิลเมทิลไลโนเลอิก}} \quad (3.5)$$

การคำนวณผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ FAME บริสุทธิ์จะทำให้ได้อัตราส่วนโดยโมลของ FAME แต่ละชนิดที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ FAME บริสุทธิ์ ซึ่งจะเท่ากับอัตราส่วนโดยโมลของผลิตภัณฑ์ FAEE บริสุทธิ์ ซึ่งจะสามารถคำนวณอัตราส่วนโดยมวลของผลิตภัณฑ์ FAEE บริสุทธิ์ จากนั้นเมื่อวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ FAEE บริสุทธิ์จะทำให้ได้ค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของ FAEE ตามสมการที่ 3.6 ถึง 3.10

$$\text{แฟกเตอร์ตอบสนองของเอทิลไมริสติก} = \frac{\text{พ.ท. ของเอทิลไมริสติก} \times \text{น.น. ของสารมาตรฐาน}}{\text{พ.ท. ของสารมาตรฐาน} \times \text{น.น. ของเอทิลไมริสติก}} \quad (3.6)$$

$$\text{แฟกเตอร์ตอบสนองของเอทิลปาล์มมิก} = \frac{\text{พ.ท. ของเอทิลปาล์มมิก} \times \text{น.น. ของสารมาตรฐาน}}{\text{พ.ท. ของสารมาตรฐาน} \times \text{น.น. ของเอทิลปาล์มมิก}} \quad (3.7)$$

$$\text{แฟกเตอร์ตอบสนองของเอทิลสเตียเรต} = \frac{\text{พ.ท. ของเอทิลสเตียเรต} \times \text{น.น. ของสารมาตรฐาน}}{\text{พ.ท. ของสารมาตรฐาน} \times \text{น.น. เอทิลเมทิลสเตียเรต}} \quad (3.8)$$

$$\text{แฟกเตอร์ตอบสนองของเอทิลโอเลอิก} = \frac{\text{พ.ท. ของเอทิลโอเลอิก} \times \text{น.น. ของสารมาตรฐาน}}{\text{พ.ท. ของสารมาตรฐาน} \times \text{น.น. ของเอทิลเมทิลโอเลอิก}} \quad (3.9)$$

$$\text{แฟกเตอร์ตอบสนองของเอทิลไลโนเลอิก} = \frac{\text{พ.ท. ของเอทิลไลโนเลอิก} \times \text{น.น. ของสารมาตรฐาน}}{\text{พ.ท. ของสารมาตรฐาน} \times \text{น.น. เอทิลเมทิลไลโนเลอิก}} \quad (3.10)$$

การคำนวณหาปริมาณ FAEE จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีจะคำนวณเป็นค่าร้อยละผลได้ (% Yield) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.11

$$\text{ค่าร้อยละผลได้ของ FAEE} = \frac{\sum \text{ปริมาณของ FAEE}}{\text{ปริมาณผลิตภัณฑ์}} \times 100\% \quad (3.11)$$

โดย ปริมาณของ FAEE คือปริมาณของ FAEE ที่ผ่านการล้างด้วยน้ำกลั่น และแยกน้ำส่วนเกินด้วยสุญญากาศแล้ว

ปริมาณของผลิตภัณฑ์ คือปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการล้างด้วยน้ำกลั่น และแยกน้ำส่วนเกินด้วยสุญญากาศแล้ว

การคำนวณค่าร้อยละผลได้แบบร้อยละ (Percentage Yield) เป็นค่าร้อยละผลได้ที่ใช้ในการวิจัยการผลิต FAEE และ FAME อย่างแพร่หลาย เนื่องจากค่าร้อยละผลได้แบบร้อยละเป็นเกณฑ์ที่สอดคล้องกับมาตรฐานของการผลิตไบโอดีเซล ที่กำหนดปริมาณเอสเทอร์ขั้นต่ำในผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการล้างและแยกน้ำออกแล้ว [31]

ปริมาณของ FAEE แต่ละชนิดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.12 ถึง 3.16

$$\text{ปริมาณของเอทิลไมริสติก [กรัม]} = \frac{\text{พื้นที่ของเอทิลไมริสติก} \times \text{น้ำหนักของสารตัวอย่าง}}{\text{พื้นที่ของสารตัวอย่าง} \times \text{แฟกเตอร์ตอบสนอง}} \quad (3.12)$$

$$\text{ปริมาณของเอทิลปาล์มมิติก [กรัม]} = \frac{\text{พื้นที่ของเอทิลปาล์มมิติก} \times \text{น้ำหนักของสารตัวอย่าง}}{\text{พื้นที่ของสารตัวอย่าง} \times \text{แฟกเตอร์ตอบสนอง}} \quad (3.13)$$

$$\text{ปริมาณของเอทิลสเตริยริก [กรัม]} = \frac{\text{พื้นที่ของเอทิลสเตริยริก} \times \text{น้ำหนักของสารตัวอย่าง}}{\text{พื้นที่ของสารตัวอย่าง} \times \text{แฟกเตอร์ตอบสนอง}} \quad (3.14)$$

$$\text{ปริมาณของเอทิลโอเลอิก [กรัม]} = \frac{\text{พื้นที่ของเอทิลโอเลอิก} \times \text{น้ำหนักของสารตัวอย่าง}}{\text{พื้นที่ของสารตัวอย่าง} \times \text{แฟกเตอร์ตอบสนอง}} \quad (3.15)$$

$$\text{ปริมาณของเอทิลไลโนเลอิก [กรัม]} = \frac{\text{พื้นที่ของเอทิลไลโนเลอิก} \times \text{น้ำหนักของสารตัวอย่าง}}{\text{พื้นที่ของสารตัวอย่าง} \times \text{แฟกเตอร์ตอบสนอง}} \quad (3.16)$$

ปริมาณเอทิลเอสเทอร์หาได้จากผลรวมของปริมาณเอทิลไมริสติก เอทิลปาล์มมิติก เอทิลสเตริยริก เอทิลโอเลอิก และเอทิลไลโนเลอิก

3.5.2 การวิเคราะห์ปริมาณสบู่และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในผลิตภัณฑ์

- นำตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่ผ่านการชะ 5 กรัมละลายในสารละลายอะซีโตน 100 มิลลิลิตรที่มีน้ำอยู่ร้อยละ 2 โดยมวล
- เติมสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน 2 มิลลิลิตร
(สารละลายฟีนอล์ฟทาลีนร้อยละ 1 โดยมวลในไอโซโพรพานอล) ลงในตัวอย่างผลิตภัณฑ์
- ไทเทรตด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร จนสารละลายที่ได้เปลี่ยนจากสีชมพูเป็นไม่มีสี ปริมาณสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้จะบ่งบอกถึงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในผลิตภัณฑ์ (แทนปริมาณสารละลายกรดไฮโดรคลอริกนี้ด้วย A)
- เติมสารละลายโบรมีนฟีนอลบูล 1 มิลลิลิตร
(สารละลายโบรมีนฟีนอลบูลร้อยละ 0.4 โดยมวลในน้ำ) ลงในตัวอย่างผลิตภัณฑ์
- ไทเทรตด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกจนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีเหลือง ปริมาณสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้จะบ่งบอกถึงปริมาณสบู่ในผลิตภัณฑ์ (แทนปริมาณสารละลายกรดไฮโดรคลอริกนี้ด้วย B)

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถคำนวณได้จากปริมาณสารละลายกรดไฮโดรคลอริก A ตามสมการที่ 3.17

$$\frac{A \times C \times 163.94}{3000 \times W} = X \left[\frac{\text{กรัมของ Na}_3\text{PO}_4}{\text{กรัมของตัวอย่าง}} \right] \quad (3.17)$$

โดย A คือปริมาณสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (มิลลิลิตร)

C คือความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (โมลต่อลิตร)

W คือปริมาณตัวอย่างที่นำมาไทเทรต (กรัม)

X คือปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ละลายต่อ 1 กรัมของผลิตภัณฑ์

ปริมาณสบู่สามารถคำนวณได้จากปริมาณสารละลายกรดไฮโดรคลอริก B ตามสมการที่ 3.18

$$\frac{B \times C \times 304.4}{1000 \times W} = Y \left[\frac{\text{กรัมของสบู่}}{\text{กรัมของตัวอย่าง}} \right] \quad (3.18)$$

โดย B คือปริมาณสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (มิลลิลิตร)

C คือความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (โมลต่อลิตร)

W คือปริมาณตัวอย่างที่นำมาไทเทรต (กรัม)

Y คือปริมาณสบู่ต่อ 1 กรัมของผลิตภัณฑ์

3.5.3 การวิเคราะห์ความผิดพลาด

ความผิดพลาดในการทดลองสามารถแบ่งออกได้เป็นความผิดพลาดในการทดลองและความผิดพลาดจากวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ ความผิดพลาดจากการทดลองถูกระบุด้วยการทำการทดลองซ้ำในสถานะหนึ่ง 3 ครั้ง ค่าร้อยละผลได้ของ FAEE และค่าความผิดพลาดจากการทดลองถูกแสดงในผลการทดลองดังสมการที่ 3.19

$$\text{ค่าเฉลี่ย } \bar{X} = \frac{\sum X}{n} \quad (3.19)$$

ความผิดพลาดจากการวิเคราะห์จะถูกระบุด้วยการเก็บตัวอย่างหนึ่งออกจากเครื่องปฏิกรณ์ และแบ่งตัวอย่างออกเป็น 6 ส่วน แต่ละส่วนจะผ่านการล้างด้วยน้ำกลั่นและวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟี ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ตัวอย่างซ้ำได้แสดงให้เห็นว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวิเคราะห์ตัวอย่างเท่ากับ 0.75

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยเป็นการศึกษาการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างเอทานอลและน้ำมันปาล์มโอเลอินโดยศึกษาผลกระทบของปัจจัยความเร็วรอบในการปั่นกวน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช อุณหภูมิในการดำเนินการ และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อปฏิกิริยาผลการทดลองที่ได้จะถูกนำมาอภิปรายโดยแบ่งออกเป็นหัวข้อในการนำเสนอ ดังนี้

- 4.1 ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างเอทานอลและน้ำมันปาล์มโอเลอิน
- 4.2 ผลกระทบของความเร็วรอบในการปั่นกวน
- 4.3 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช
- 4.4 ผลกระทบของอุณหภูมิในการดำเนินการ
- 4.5 ผลกระทบความเร็วรอบในการปั่นกวนต่อการเกิดปฏิกิริยา

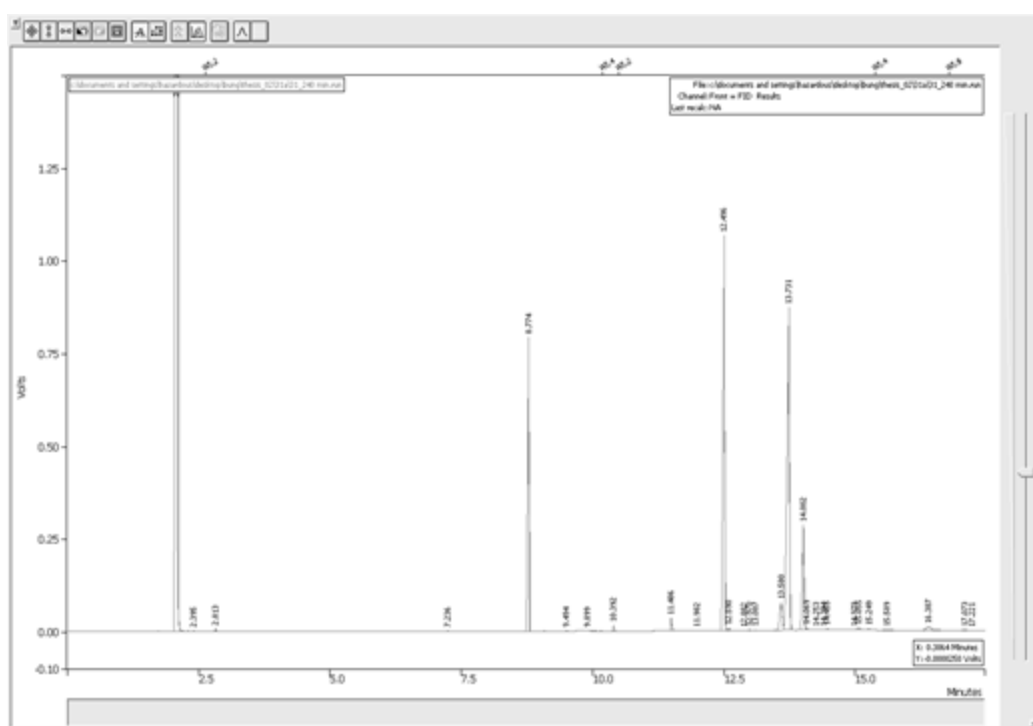
4.1 ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างเอทานอลและน้ำมันปาล์มโอเลอิน

งานวิจัยประกอบด้วยการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต ที่สภาวะความเร็วรอบในการปั่นกวน 100 ถึง 800 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช 3:1 ถึง 18:1 อุณหภูมิในการดำเนินการ 150 ถึง 250 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 1 ถึง 5 โดยมวลของน้ำมันพืช ที่ความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เพื่ออธิบายลักษณะของการเกิดปฏิกิริยาการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างเอทานอลและน้ำมันปาล์มโอเลอิน การทดลองที่สภาวะความเร็วรอบในการปั่นกวน 800 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันปาล์มโอเลอิน 12:1 อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 โดยมวลของน้ำมันพืช จะถูกนำมาอธิบายลักษณะการเกิดปฏิกิริยาในด้านความสามารถในการละลายของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ และผลการทดลองในรูปของค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ต่อเวลาในการดำเนินการ

การผลิต FAEE และการผลิต FAME มีความแตกต่างกันในด้านความสามารถในการละลายของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ สารตั้งต้นในการผลิต FAEE คือน้ำมันปาล์มโอเลอินและเอทานอลสามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิสูงกว่า 70 องศาเซลเซียส ในขณะที่สารตั้งต้นของการผลิต FAME คือเมทานอลและน้ำมันปาล์มโอเลอินไม่สามารถละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ นอกจากนั้นระหว่างการทำปฏิกิริยา การผลิต FAEE จะเป็นระบบที่มีของเหลว 1 เฟสที่ประกอบด้วย น้ำมันปาล์มโอเลอิน เอทานอล กลีเซอรอลและ FAEE แตกต่างจากการผลิต FAME ที่ให้ผลิตภัณฑ์เป็นของเหลว

2 เฟสคือเฟสที่มี FAME เป็นองค์ประกอบหลักและเฟสที่มีกลีเซอรอลเป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องจากกลีเซอรอลสามารถละลายในของผสมเอทานอลและ FAEE ได้ดีกว่าของผสมเมทานอลและ FAME [32, 33] ทำให้การผลิต FAEE เป็นระบบที่มีของเหลวเพียงเฟสเดียวตั้งแต่เริ่มต้นจนจบการทดลอง

การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์เชิงคุณภาพด้วยแก๊สโครมาโตกราฟีได้แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ประกอบด้วย Ethyl Laurate (C12:0), Ethyl Myristate (C14:0), Ethyl Palmitate (C16:0), Ethyl Stearate (C18:0), Ethyl Oleate (C18:1), Ethyl Linoleate (C18:2), Ethyl Linolenate (C18:3) และ Ethyl Arachidate (C20:0) ผลการวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟีแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ FAEE ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟี

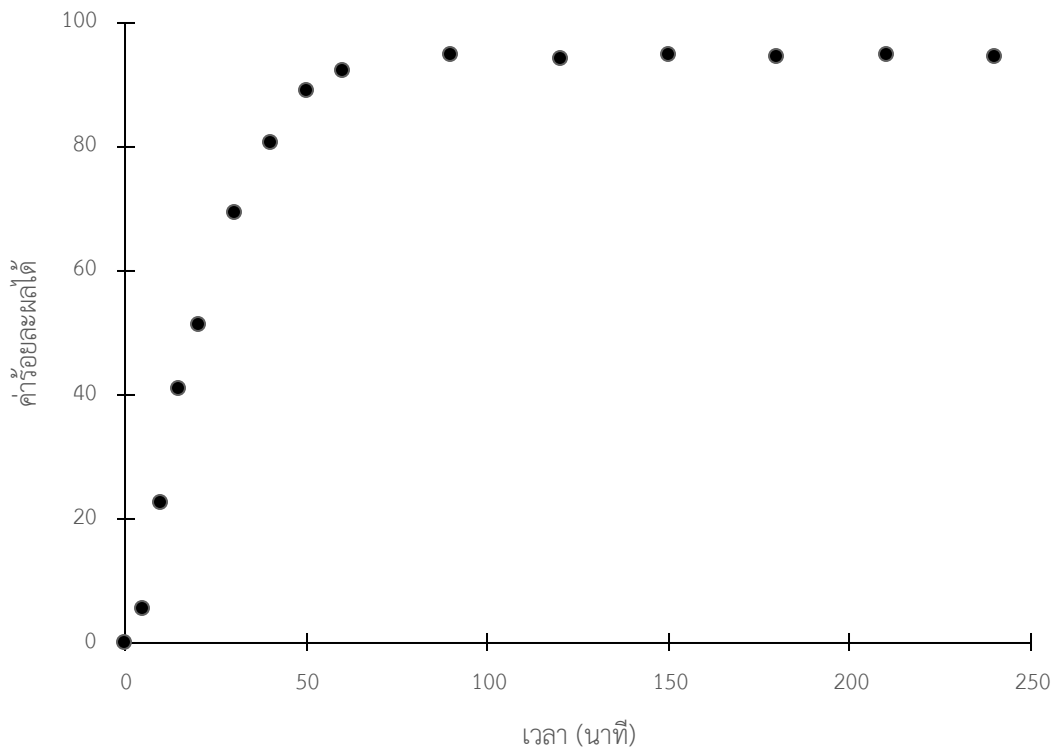
การวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันปาล์มโอเลอินสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนน้ำมันปาล์มโอเลอินให้เป็น FAME ด้วยการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันกับเมทานอลและนำ FAME ที่ได้มาวิเคราะห์ในเชิงปริมาณด้วยแก๊สโครมาโตกราฟี

การเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ FAEE ในเชิงปริมาณด้วยแก๊สโครมาโตกราฟีและผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันในน้ำมันปาล์มโอเลอินได้แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของ FAEE ในผลิตภัณฑ์สอดคล้องกับองค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันปาล์มโอเลอินดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตาราง 4-1 แสดงองค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันปาล์มโอเลอิน

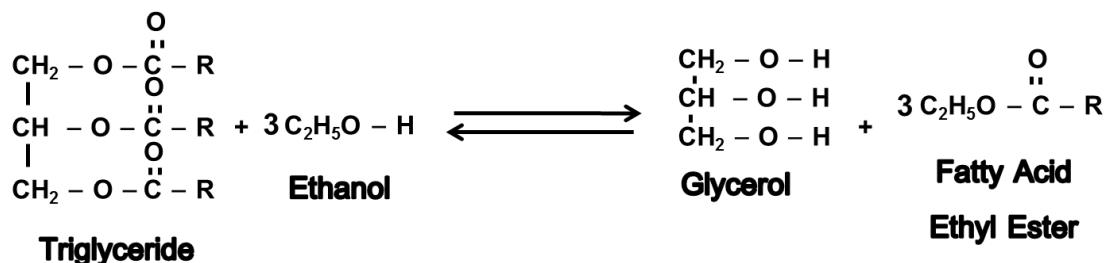
กรดไขมันในน้ำมันปาล์มโอเลอิน		FAEE ในผลิตภัณฑ์	
องค์ประกอบ	ร้อยละโดยมวล	องค์ประกอบ	ร้อยละโดยมวล
Lauric Acid (C12:0)	0.41	Ethyl Laurate (C12:0)	0.42
Myristic Acid (C14:0)	0.90	Ethyl Myristate (C14:0)	0.91
Palmitic Acid (C16:0)	37.13	Ethyl Palmitate (C16:0)	37.22
Stearic Acid (C18:0)	4.05	Ethyl Stearate (C18:0)	4.04
Oleic Acid (C18:1)	45.13	Ethyl Oleate (C18:1)	45.05
Linoleic Acid (C18:2)	11.53	Ethyl Linoleate (C18:2)	11.51
Linolenic Acid (C18:3)	0.23	Ethyl Linolenate (C18:3)	0.23
Arachidic Acid (C20:0)	0.34	Ethyl Arachidate (C20:0)	0.34

ผลการทดลองจะถูกรายงานในรูปค่าร้อยละผลได้ของ FAEE ต่อเวลาในการดำเนินการ ผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ FAEE จะเพิ่มขึ้นตามเวลาดำเนินการ แต่ในท้ายที่สุดค่าร้อยละผลได้จะเข้าสู่ค่าคงที่ที่ร้อยละ 95 ที่เวลาดำเนินการ 90 นาที และไม่เปลี่ยนแปลงในภายหลังเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไกลเซอโรไลซิสหรือปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบย้อนกลับ ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละผลได้และเวลาในการดำเนินการ ที่สภาวะความเร็วรอบในการปั่นกววน 800 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันปาล์มโอเลอิน 12:1 อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 โดยมวลของน้ำมันพืช

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างและผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการทดลองสอดคล้องกับรูปแบบปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันที่ H. He และ D. Kusdiana [13, 14] ได้เสนอรูปแบบการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างไขมันและเอทานอล ปฏิกิริยาจะใช้สารตั้งต้นน้ำมันพืชและเอทานอล และให้ผลิตภัณฑ์เป็นกลีเซอรอลและ FAEE ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.3

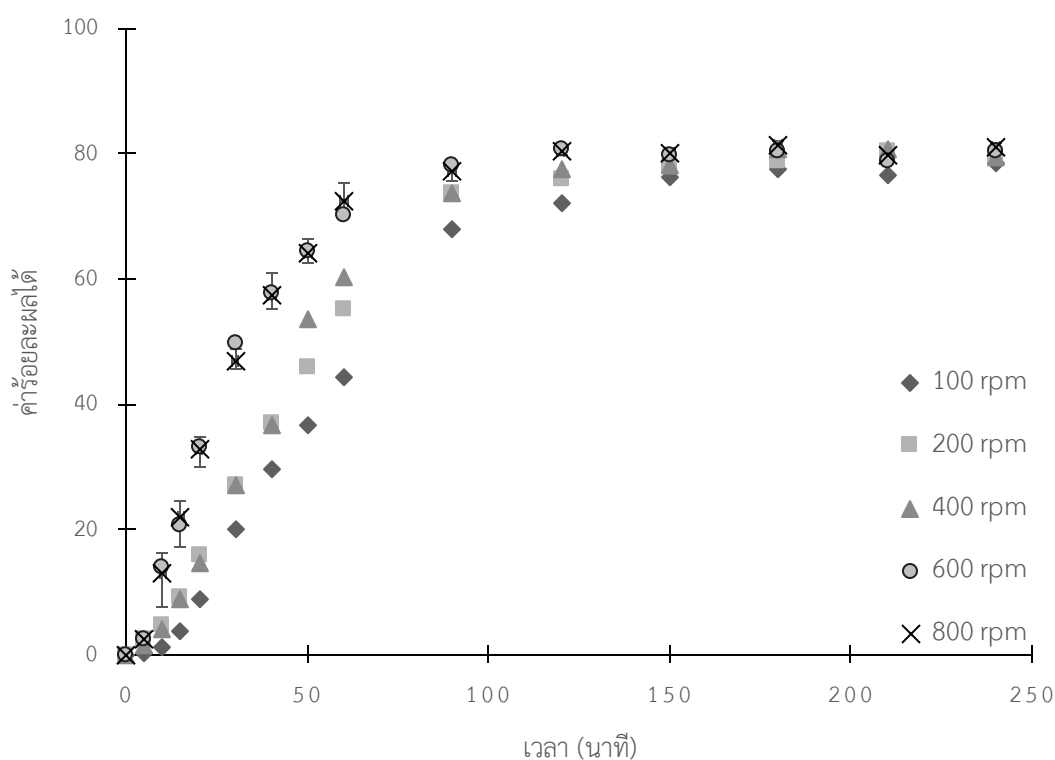


รูปที่ 4.3 ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช [13]

4.2 ผลของความเร็วยรอบในการปั่นกวน

การทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์สามารถก่อให้เกิดชนิดจำกัดการถ่ายเทมวล เนื่องจากสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารที่อยู่ต่างเฟส การลดอิทธิพลของชนิดจำกัดการถ่ายเทมวลเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อที่จะศึกษาผลของปัจจัยอื่นที่มีต่อปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากผลการวิเคราะห์โซเดียมฟอสเฟตที่ผ่านการเผาด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ BET ได้แสดงให้เห็นว่าโซเดียมฟอสเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีรูพรุน [30] ดังนั้นชนิดจำกัดการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นคือการถ่ายเทมวลระหว่างสารตั้งต้นและพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา การลดผลของชนิดจำกัดของการถ่ายเทมวลสามารถทำได้ผ่านการเพิ่มความเร็วยรอบในการปั่นกวนของเครื่องปฏิกรณ์

การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเร็วยรอบในช่วง 100 ถึง 800 รอบต่อนาที โดยคงอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชเท่ากับ 6:1 อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 โดยมวลของน้ำมันพืช ได้ผลการทดลองเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละผลได้ของ FAEE และเวลาในการดำเนินการดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละผลได้ของ FAEE และเวลาในการดำเนินการ ที่ความเร็วยรอบในการปั่นกวน 100 ถึง 800 รอบต่อนาที

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเร็วยรอบในการปั่นกวนในช่วง 100 ถึง 600 รอบต่อนาที จะส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้รวดเร็วขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเร็วยรอบในการปั่นกวนจะทำให้สารตั้งต้นสามารถเข้าถึงพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีขึ้นส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น แต่การเพิ่มความเร็วยรอบในการปั่นกวนที่สูงกว่า 600 รอบต่อนาทีจะไม่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาอีก เนื่องจากขีดจำกัดการถ่ายเทมวลจะไม่มีผลต่อปฏิกิริยา นอกจากนี้ผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเร็วยรอบในการปั่นกวนจะไม่ส่งผลต่อค่าร้อยละผลได้ของปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุล โดยการทดลองที่ทุกความเร็วยรอบในการปั่นกวนจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าร้อยละผลได้ที่สภาวะสมดุลเท่ากับร้อยละ 80

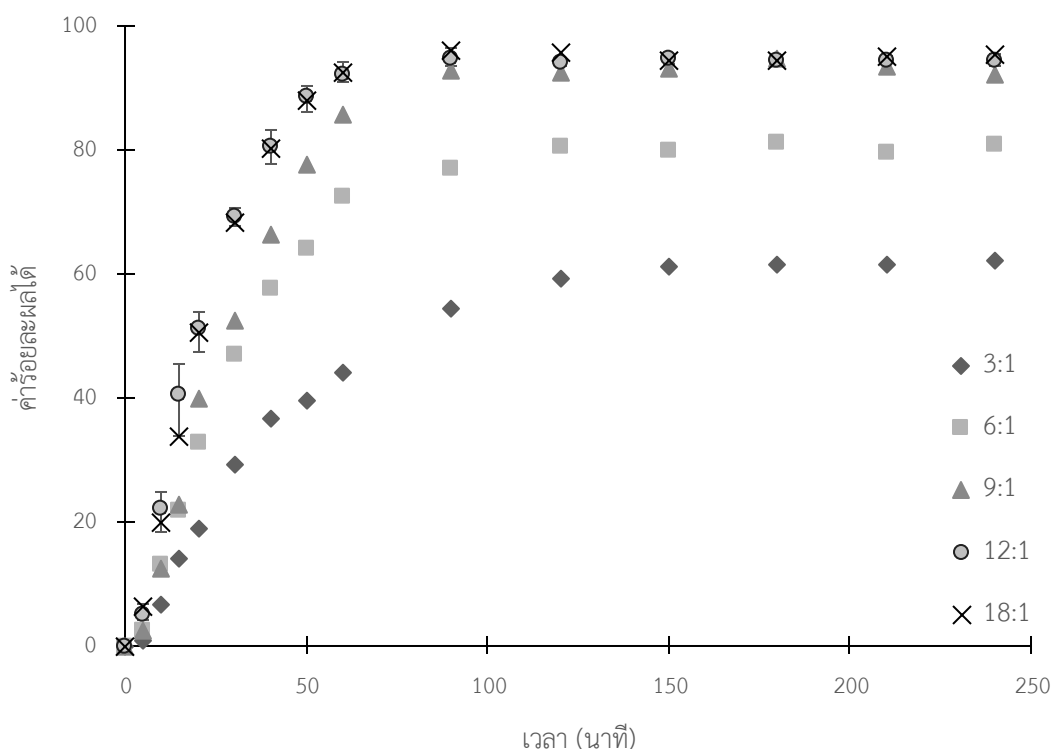
ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่นงานวิจัยของ K. Thinnakorn [30] ซึ่งศึกษาการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มโอเลอินและเมทานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟต และได้ศึกษาผลของความเร็วยรอบในการปั่นกวนในช่วง 100 ถึง 800 รอบต่อนาที ได้ให้ข้อสรุปว่าการเพิ่มขึ้นของความเร็วยรอบในการปั่นกวนในช่วง 100 ถึง 400 รอบต่อนาที จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้รวดเร็วขึ้น แต่ความเร็วยรอบในการปั่นกวนที่สูงกว่า 400 รอบต่อนาทีจะไม่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา และงานวิจัยของ M.T. Sanz และคณะ [34] ที่ศึกษาการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างกรดแลคติกและเมทานอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนได้ศึกษาผลของความเร็วยรอบในการปั่นกวนในช่วง 60 ถึง 700 รอบต่อนาที ได้ข้อสรุปการเพิ่มความเร็วยรอบในการปั่นกวนในช่วง 60 ถึง 500 รอบต่อนาที จะส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้รวดเร็วขึ้น และการเพิ่มความเร็วยรอบในการปั่นกวนที่สูงกว่า 500 รอบต่อนาทีจะไม่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา และสุดท้ายงานวิจัยของ H.Y. Zeng และคณะ [35] ซึ่งศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากสารตั้งต้นน้ำมันเมล็ดเรพและเมทานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียม-อะลูมิเนียม ไฮโดรแทคไซด์ และศึกษาผลของความเร็วยรอบในการปั่นกวนในช่วง 100 ถึง 500 รอบต่อนาที ได้ข้อสรุปว่าการเพิ่มความเร็วยรอบในการปั่นกวนในช่วง 100 ถึง 500 รอบต่อนาที จะส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้รวดเร็วขึ้น และการเพิ่มความเร็วยรอบในการปั่นกวนที่สูงกว่า 400 รอบต่อนาทีจะไม่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเร็วยรอบในการปั่นกวนที่สามารถลดผลของขีดจำกัดของการถ่ายเทมวลเท่ากับ 600 รอบต่อนาที สูงกว่าค่าที่ได้จากการทดลองของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เนื่องจากในการทดลองตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกบรรจุในตะกร้าทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่สามารถฟุ้งกระจายภายในสารตั้งต้นได้ แตกต่างจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะฟุ้งกระจายในสารตั้งต้น ดังนั้นการลดขีดจำกัดของการถ่ายเทมวลในการทดลองจำเป็นต้องใช้ความเร็วยรอบในการปั่นกวนที่สูงขึ้นเพื่อเพิ่มความเร็วยของของเหลวที่ไหลผ่านพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

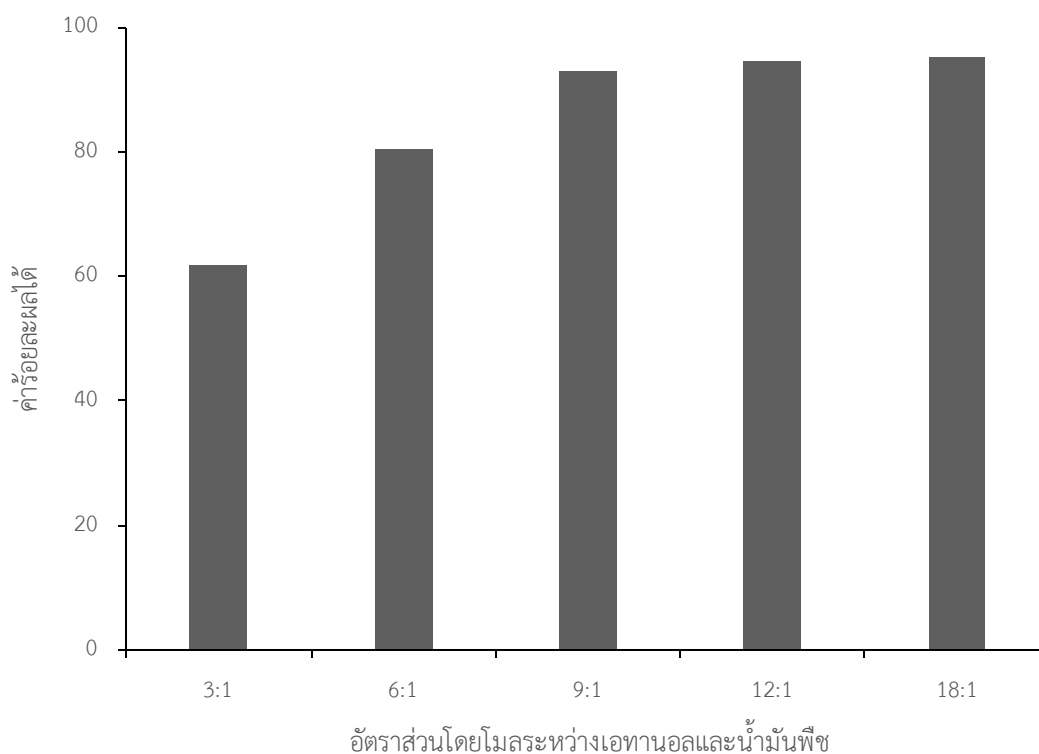
เนื่องจากอาจมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อการถ่ายเทมวลสาร และเพื่อป้องกันไม่ให้อัตราส่วนที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทมวลสาร ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ความเร็วรอบในการปั่นกวนที่ 800 รอบต่อนาที ในการทดลองสำหรับขั้นต่อไป

4.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช

อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและสมดุลของปฏิกิริยาของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน การศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชในช่วง 3:1 ถึง 18:1 โดยคงความเร็วรอบในการปั่นกวน 800 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 โดยมวลของน้ำมันพืช ได้ผลการทดลองเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละผลได้ของ FAEE และเวลาในการดำเนินการ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละผลได้ของ FAEE ที่สภาวะสมดุลและอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละผลได้ของ FAEE และเวลาในการดำเนินการที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช 3:1 ถึง 18:1



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละผลได้ของ FAEE ที่สภาวะสมดุลและอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช 3:1 ถึง 18:1

ผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชในช่วง 3:1 ถึง 12:1 ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้รวดเร็วขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชจะเป็นการเพิ่มปริมาณเอทานอลซึ่งเป็นสารตั้งต้นทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชที่สูงกว่า 12:1 จะส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชจะเพิ่มเทอมความเข้มข้นของเอทานอลในสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน (แสดงในสมการที่ 4.1) ทำให้ปฏิกิริยาไปข้างหน้ามีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

$$-r_{TG} = k_1 C_{TG}^a C_{Ethanol}^b - k_{-1} C_{Glycerol}^c C_{FAEE}^d \quad (4.1)$$

- โดย $-r_{TG}$ คืออัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช (อัตราวัดจากการลดลงของความเข้มข้นน้ำมันพืชต่อเวลา)
- k_1 คือค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า
- k_{-1} คือค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ
- C_{TG} คือความเข้มข้นของน้ำมันพืช (โมล/ลิตร)

- C_{Ethanol} คือความเข้มข้นของเอทานอล (โมล/ลิตร)
 C_{Glycerol} คือความเข้มข้นของกลีเซอรอล (โมล/ลิตร)
 C_{FAEE} คือความเข้มข้นของ FAEE (โมล/ลิตร)
 a คืออันดับการเกิดปฏิกิริยาของน้ำมันพืช
 b คืออันดับการเกิดปฏิกิริยาของเอทานอล
 c คืออันดับการเกิดปฏิกิริยาของกลีเซอรอล
 d คืออันดับการเกิดปฏิกิริยาของ FAEE

ผลการทดลองในรูปที่ 4.6 ได้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชจะส่งผลให้ค่าร้อยละผลได้ที่สภาวะสมดุลของ FAEE เพิ่มขึ้น ค่าร้อยละผลได้ที่สภาวะสมดุลเพิ่มจากร้อยละ 60 ในการทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช 3:1 เป็นร้อยละ 95 ในการทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช 12:1 เนื่องจากเอทานอลเป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาที่สามารถผันกลับได้ การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชจะเพิ่มเทอมความเข้มข้นของเอทานอลในสมการค่าคงที่สภาวะสมดุลของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช (แสดงในสมการที่ 4.2) และเลื่อนสมดุลของปฏิกิริยาไปยังด้านผลิตภัณฑ์ แต่การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชที่สูงกว่า 12:1 จะส่งผลต่อค่าร้อยละผลได้ที่สภาวะสมดุลเพียงเล็กน้อย

$$K_{\text{Equilibrium}} = \frac{C_{\text{Glycerol}}^c C_{\text{FAEE}}^d}{C_{\text{TG}}^a C_{\text{Ethanol}}^b} \quad (4.2)$$

- โดย C_{TG} คือความเข้มข้นของน้ำมันพืช (โมล/ลิตร)
 C_{Ethanol} คือความเข้มข้นของเอทานอล (โมล/ลิตร)
 C_{Glycerol} คือความเข้มข้นของกลีเซอรอล (โมล/ลิตร)
 C_{FAEE} คือความเข้มข้นของ FAEE (โมล/ลิตร)
 a คือค่าสัมประสิทธิ์ในปฏิกิริยาของน้ำมันพืช
 b คือค่าสัมประสิทธิ์ในปฏิกิริยาของเอทานอล
 c คือค่าสัมประสิทธิ์ในปฏิกิริยาของกลีเซอรอล
 d คือค่าสัมประสิทธิ์ในปฏิกิริยาของ FAEE

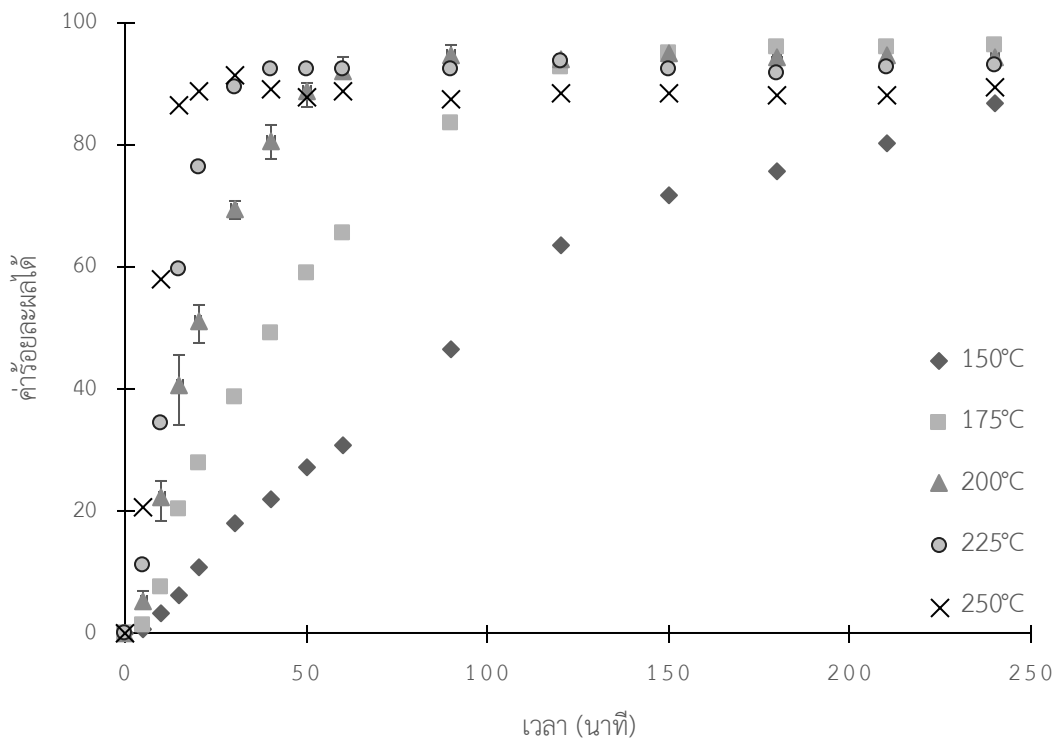
ผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ในด้านอัตราการเกิดปฏิกิริยา งานวิจัยของ K. Thinnakorn และคณะ [11] ได้ให้ข้อสรุปว่าการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชจะเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยการทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช 6:1 จะต้องใช้เวลา 4 ชั่วโมงเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าร้อยละผลได้ที่ร้อยละ 90 ในขณะที่

การทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช 18:1 จะใช้เวลา 90 นาที เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าร้อยละผลได้ร้อยละ 90 และการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชที่สูงกว่า 18:1 จะไม่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้งานวิจัยที่แสดงแนวโน้มในทางเดียวกันประกอบด้วย งานวิจัยของ M. Kaur และคณะ [24] ได้ให้ข้อสรุปว่าการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันสบู่ดำจะลดเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา การทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช 3:1 จะใช้เวลา 4 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาถึงจุดสมดุล ในขณะที่การทดลองที่อัตราส่วนโดยโมล 12:1 จะใช้เวลาเพียง 2 ชั่วโมงเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาถึงจุดสมดุล และการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชที่สูงกว่า 12:1 จะไม่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา และงานวิจัยของ N. Kaur และคณะ [7] ซึ่งการศึกษาได้ให้ข้อสรุปว่าการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลสามารถทำให้เร่งการเกิดปฏิกิริยาได้ โดยการทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช 3:1 จะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าร้อยละผลได้ร้อยละ 30 ภายในเวลาดำเนินการ 6 ชั่วโมง ในขณะที่การทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช 21:1 จะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าร้อยละผลได้ร้อยละ 99 ภายในเวลาดำเนินการ 7 ชั่วโมง และการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชที่สูงกว่า 21:1 จะไม่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา

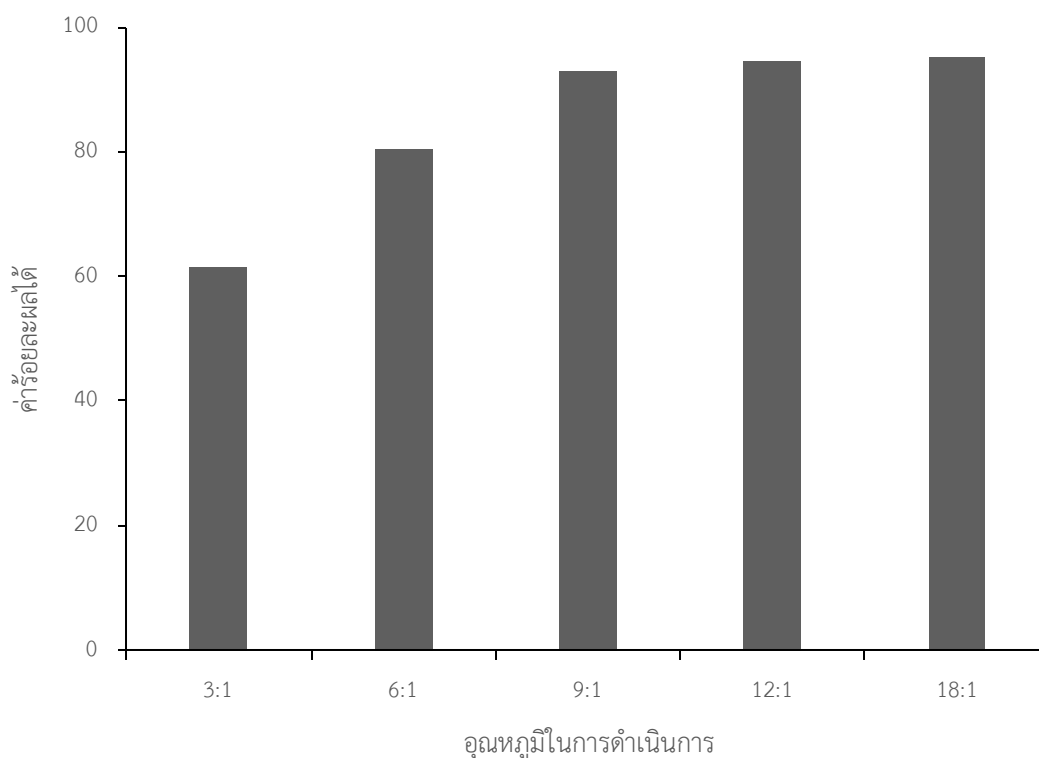
ในด้านค่าร้อยละผลได้ที่สภาวะสมดุล ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง S.T. Jiang และคณะ [28] ได้ให้ข้อสรุปว่าการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช จะเพิ่มค่าร้อยละผลได้ที่สภาวะสมดุล การทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช 6:1 จะให้ค่าร้อยละผลได้ที่สภาวะสมดุลร้อยละ 93 ในขณะที่การทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช 12:1 จะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าร้อยละผลได้ที่สภาวะสมดุลร้อยละ 98 เช่นเดียวกับงานวิจัยของ G. Anastopoulos และคณะ [15] ได้ผลการทดลองที่แสดงแนวโน้มที่สอดคล้องกัน โดยการทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช 6:1 จะให้ค่าร้อยละผลได้ที่สภาวะสมดุลร้อยละ 70 ในขณะที่การทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช 12:1 จะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าร้อยละผลได้ที่สภาวะสมดุลร้อยละ 85

4.4 ผลของอุณหภูมิในการดำเนินการ

อุณหภูมิในการดำเนินการเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและสมดุลของปฏิกิริยาของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน การทดลองเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิในช่วง 150 ถึง 250 องศาเซลเซียส โดยคงความเร็วรอบในการปั่นกวน 800 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช 12:1 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 โดยมวลของน้ำมันพืช ได้ผลการทดลองเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละผลได้ของ FAEE และเวลาในการดำเนินการดังแสดงในรูปที่ 4.7 และแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละผลได้ของ FAEE ที่สภาวะสมดุล และอุณหภูมิในการดำเนินการดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละผลได้ของ FAEE และเวลาในการดำเนินการ ที่อุณหภูมิในการดำเนินการ 150 ถึง 250 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละผลได้ของ FAEE ที่สภาวะสมดุลและ
อัตราส่วนการเติม 150 ถึง 250 องศาเซลเซียส

ผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอัตราส่วนการเติมในการดำเนินการจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาลดลง โดยการทดลองที่อัตราส่วนการเติม 200 องศาเซลเซียสจะใช้เวลา 90 นาที เพื่อดำเนินการถึงสภาวะสมดุล ในขณะที่การทดลองที่อัตราส่วนการเติม 250 องศาเซลเซียส จะใช้เวลาในการดำเนินการเพียง 20 นาที เพื่อดำเนินการถึงสภาวะสมดุล เนื่องจากอัตราส่วนการเติมจะสัมพันธ์กับค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาตามสมการอาร์เรเนียส ดังแสดงในสมการที่ 4.3 การเพิ่มอัตราส่วนการเติมในการดำเนินการจะส่งผลให้ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

$$k = Ae^{-E_a/RT} \quad (4.3)$$

ผลการทดลองในรูปที่ 4.8 ได้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอัตราส่วนการเติมในการดำเนินการจะส่งผลให้ค่าร้อยละผลได้ที่สภาวะสมดุลของ FAEE ลดลง โดยการทดลองที่ 200 องศาเซลเซียส จะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าร้อยละผลได้ร้อยละ 94.5 ที่สภาวะสมดุล ในขณะที่การทดลองที่อัตราส่วนการเติม 250 องศาเซลเซียสจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าร้อยละผลได้ร้อยละ 88 ที่สภาวะสมดุล การเปลี่ยนแปลงของสมดุลของปฏิกิริยาตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะสัมพันธ์กับค่าความร้อนในการเกิดปฏิกิริยา การเพิ่มอุณหภูมิของ

ปฏิกิริยาที่มีค่าความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาเป็นลบ (ปฏิกิริยาคายความร้อน) จะส่งผลให้สมดุลของปฏิกิริยาเลื่อนกลับมาทางสารตั้งต้น ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิของปฏิกิริยาที่มีค่าความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาเป็นบวก (ปฏิกิริยาดูดความร้อน) จะส่งผลให้สมดุลของปฏิกิริยาเลื่อนไปทางผลิตภัณฑ์

ค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาที่สภาวะมาตรฐานสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4.4

$$\Delta H_r(T_0) = \sum_i v_i \Delta H_{f_i}(T_0) \quad (4.4)$$

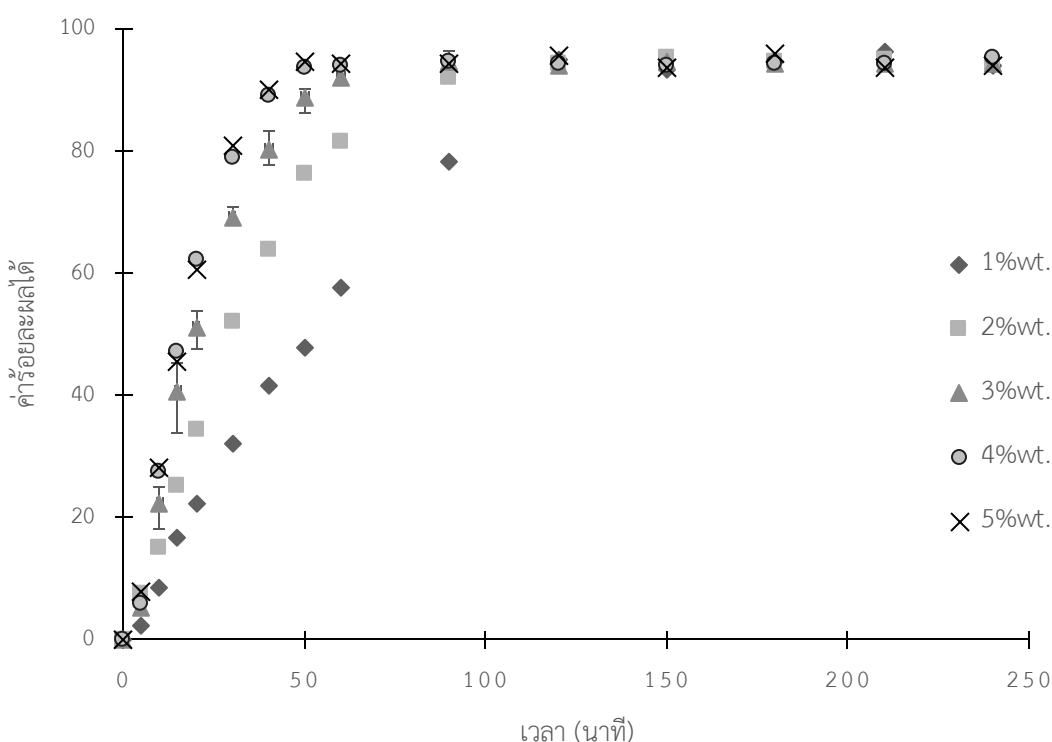
โดย v_i คือค่าสัมประสิทธิ์ในปฏิกิริยาของสารประกอบ i
 ΔH_{f_i} คือค่าเอนทาลปีในการสร้างสารประกอบ i (กิโลจูล/โมล)
 ΔH_r คือค่าเอนทาลปีในการเกิดปฏิกิริยา (กิโลจูล/โมล)

การคำนวณค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างเอทานอลและน้ำมันปาล์มโอเลอินที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ได้แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาจะคายความร้อน 23.3 กิโลจูล/โมลน้ำมันปาล์มโอเลอิน (การคำนวณค่าความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาแสดงในภาคผนวก ข.2) การเพิ่มอุณหภูมิในการดำเนินการปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน และเป็นปฏิกิริยาที่สามารถผันกลับได้จะส่งผลให้สมดุลของปฏิกิริยาเลื่อนกลับมาทางสารตั้งต้น ทำให้ค่าร้อยละผลได้ที่สภาวะสมดุลลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการดำเนินการ

การศึกษาการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับจุดเดือดของเอทานอล ภายใต้ความดันบรรยากาศแสดงแนวโน้มที่สอดคล้องกับผลการทดลอง เช่น X. Liu และคณะ [36] ที่ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์และสตรอนเทียมออกไซด์ในการผลิต FAME จากน้ำมันถั่วเหลืองได้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิที่สูงกว่า 65 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้ค่าร้อยละผลได้ที่สภาวะสมดุลลดลง แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยบางส่วนแสดงแนวโน้มที่แตกต่างจากผลการทดลอง งานวิจัยของ G. Anastopoulos และคณะ [15] ได้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการดำเนินการจาก 80 เป็น 90 องศาเซลเซียส จะส่งผลต่อค่าร้อยละผลได้ที่สภาวะสมดุลเพียงเล็กน้อย เช่นเดียวกับงานวิจัยของ M. Kaur และคณะ [24] ที่ได้ให้ข้อสรุปว่าความแตกต่างระหว่างค่าร้อยละผลได้ที่สภาวะสมดุล จากการทดลองที่อุณหภูมิในการดำเนินการ 65 และ 75 องศาเซลเซียส อยู่ต่ำกว่าความผิดพลาดจากการทดลอง

4.5 ผลกระทบของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นปัจจัยหนึ่งส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน การทดลองเพื่อศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในช่วงร้อยละ 1 ถึง 5 โดยมวลของน้ำมันพืช โดยคงความเร็วรอบในการปั่นกวน 800 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช 12:1 และอุณหภูมิในการดำเนินการ 200 องศาเซลเซียส ได้ผลการทดลองเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละผลได้ของ FAEE และเวลาในการดำเนินการดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละผลได้ของ FAEE และเวลาในการดำเนินการ ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 ถึง 5 โดยมวลของน้ำมันพืช

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในช่วงร้อยละ 1 ถึง 4 โดยมวลของน้ำมันพืชจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้รวดเร็วขึ้น แต่การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจะไม่ส่งผลต่อค่าร้อยละผลได้ที่สภาวะสมดุล การทำปฏิกิริยาที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 ถึง 5 โดยมวลของน้ำมันพืชจะให้ค่าร้อยละผลได้ที่สภาวะสมดุลเท่ากับร้อยละ 94.5 การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถลดเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาลงจาก 120 นาที ในการทำปฏิกิริยาที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยมวลของน้ำมันพืช และจะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 50 นาที ในการทดลองที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 4 โดยมวลของน้ำมันพืช แต่การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่สูงกว่าร้อยละ 4 โดยมวลของน้ำมันพืชจะไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยาและเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง งานวิจัยของ M. Kaur และคณะ [24] การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจากร้อยละ 1 เป็นร้อยละ 5 โดยมวลของน้ำมันพืช จะลดเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาโดยสมบูรณ์ลงจาก 7.5 ชั่วโมง เหลือ 2.5 ชั่วโมง และการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่สูงกว่าร้อยละ 5 จะไม่สามารถลดเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เช่นเดียวกับงานวิจัยของ N. Kaur และคณะ [7] การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจะเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา การทดลองที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยมวลของน้ำมันพืช จะให้ค่าร้อยละผลได้ที่สภาวะสมดุลร้อยละ 50 ที่เวลาในการดำเนินการ 6 ชั่วโมง ในขณะที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 จะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าร้อยละผลได้ที่สภาวะสมดุลร้อยละ 99 ที่เวลาในการดำเนินการ 6 ชั่วโมง และการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่สูงกว่าร้อยละ 5 จะไม่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา X. Liu และคณะ [25] ได้ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมเมทอกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ในการผลิต FAME ได้แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาถึงค่าหนึ่งปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจะไม่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาอีกต่อไป โดยพบว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมเมทอกไซด์ที่สูงกว่าร้อยละ 3 โดยมวลของน้ำมันพืช และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่สูงกว่า ร้อยละ 8 โดยมวลของน้ำมันพืช จะไม่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา

4.6 การเปรียบเทียบผลการทดลอง

ในปัจจุบันมีการศึกษาการผลิต FAEE โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์หลายชนิด โดยผลค่าร้อยละผลได้และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดแสดงได้ดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 แสดงผลค่าร้อยละผลได้และเวลาในการทำปฏิกิริยาภายใต้สภาวะที่เหมาะสม

ผู้วิจัย	ตัวเร่งปฏิกิริยา	สภาวะการทดลอง	ค่าร้อยละผลได้	เวลาในการทำปฏิกิริยา
M. Kaur [24]	Li-CaO	12:1/75°C/5%wt.	>99%	150 นาที
9N. Kaur [7]	CaO-ZrO ₂	21:1/75°C/5%wt.	>99%	420 นาที
J.M. Rubio-Caballero [8]	ZnO-CaO	20:1/75°C/3%wt.	>99%	180 นาที
งานวิจัยนี้	Na ₃ PO ₄	12:1/200°C/4%wt.	94.5%	50 นาที

การวิจัยการผลิต FAEE จะดำเนินการที่ความดันบรรยากาศ และใช้อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส โดยผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จะใช้เวลาตั้งแต่ 150 ถึง 420 นาที ในการทำปฏิกิริยาและให้ค่าร้อยละผลได้มากกว่าร้อยละ 99 ในขณะที่การผลิต FAEE โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตและดำเนินการที่ 200 องศาเซลเซียส สามารถลดเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาลงได้และปฏิกิริยาจะใช้เวลาเพียง 50 นาที แต่ในขณะเดียวกันจะให้ค่าร้อยละผลได้เพียงร้อยละ 94.5 เนื่องจากปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน การเพิ่มอุณหภูมิในการดำเนินการจะส่งผลให้สมดุลของปฏิกิริยาย้อนกลับมาทางสารตั้งต้นส่งผลให้ประสบปัญหาปริมาณเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ต่ำกว่ามาตรฐานที่ร้อยละ 96.5 [31]

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างเอทานอลและน้ำมันปาล์มโอเลอิน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างเอทานอลและน้ำมันปาล์มโอเลอิน สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ปฏิกิริยาได้โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาต่ำ
2. ภายใต้สภาวะความเร็วรอบในการปั่นกวน 800 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชเท่ากับ 12:1 อุณหภูมิในการดำเนินการ 200 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 4 โดยมวลของน้ำมันพืช ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสม ปฏิกิริยาจะใช้เวลาในการดำเนินการ 50 นาที และให้ค่าร้อยละผลได้ร้อยละ 94.5
3. เมื่อใช้ความเร็วรอบในการปั่นกวนที่สูงกว่า 600 รอบต่อนาที ความต้านทานของการถ่ายเทมวลจะไม่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา
4. การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นและเลื่อนสมดุลของปฏิกิริยาไปทางผลิตภัณฑ์ แต่การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชที่สูงกว่า 12:1 จะไม่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา
5. การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แต่จะส่งผลให้สมดุลของปฏิกิริยาเลื่อนมาทางสารตั้งต้น เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน
6. การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่สูงกว่าร้อยละ 4 โดยมวลของน้ำมันพืชจะไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา

5.2 ข้อเสนอแนะ

การผลิต FAEE จากสารตั้งต้นน้ำมันปาล์มและเอทานอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตที่อุณหภูมิสูงสามารถทำได้โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาค่ำ แต่อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ที่ได้ประสบปัญหาค่าร้อยละผลได้ของ FAEE ต่ำกว่ามาตรฐานที่จะนำไปใช้เป็นไบโอดีเซลเล็กน้อย มาตรฐานได้กำหนดปริมาณของเอสเทอร์ในไบโอดีเซลไว้ที่ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 96.5 โดยมีผล [31] การดำเนินการแบบสองขั้นตอนโดยขั้นแรกเป็นการดำเนินการที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว และในขั้นที่สองที่อุณหภูมิต่ำเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าร้อยละผลได้สูง เป็นแนวทางที่สามารถพัฒนาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันได้



รายการอ้างอิง

1. Brunschwig, C., W. Moussavou, and J. Blin, *Use of bioethanol for biodiesel production*. Progress in Energy and Combustion Science, 2012. **38**(2): p. 283-301.
2. Stamenković, O.S., A.V. Veličković, and V.B. Veljković, *The production of biodiesel from vegetable oils by ethanolysis: Current state and perspectives*. Fuel, 2011. **90**(11): p. 3141-3155.
3. Encinar, J.M., J.F. González, and A. Rodríguez-Reinares, *Ethanolysis of used frying oil. Biodiesel preparation and characterization*. Fuel Processing Technology, 2007. **88**(5): p. 513-522.
4. Encinar, J.M., Gonzalez, J.F., Rodriguez-Reinares, A., *Biodiesel from Used Frying Oil. Variables Affecting the Yields and Characteristics of the Biodiesel*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2005. **44**: p. 5491-5499.
5. Makareviciene, V. and P. Janulis, *Environmental effect of rapeseed oil ethyl ester*. Renewable Energy, 2003. **28**(15): p. 2395-2403.
6. Sercheli, U.S.R. and R.M. Vargas, *Transesterification of Vegetable Oils: a Review*. Journal of the Brazilian Chemical Society, 1998. **9**(1): p. 199-210.
7. Kaur, N. and A. Ali, *Kinetics and reusability of Zr/CaO as heterogeneous catalyst for the ethanolysis and methanolysis of Jatropha crucas oil*. Fuel Processing Technology, 2014. **119**: p. 173-184.
8. Rubio-Caballero, J.M., et al., *Calcium zincate derived heterogeneous catalyst for biodiesel production by ethanolysis*. Fuel, 2013. **105**: p. 518-522.
9. Yin, J.-Z., et al., *Biodiesel production from soybean oil transesterification in subcritical methanol with K₃PO₄ as a catalyst*. Fuel, 2012. **93**: p. 284-287.
10. Yin, J.-Z., et al., *Biodiesel Production from Subcritical Methanol Transesterification of Soybean Oil with Sodium Silicate*. Energy & Fuels, 2010. **24**(5): p. 3179-3182.

11. Thinnakorn, K. and J. Tscheikuna, *Biodiesel production via transesterification of palm olein using sodium phosphate as a heterogeneous catalyst*. Applied Catalysis A: General, 2014. **476**: p. 26-33.
12. *A Comprehensive analysis of biodiesel impacts on exhaust emissions*. 2002, U.S. Environmental Protection Agency: Washington D.C.
13. He, H., et al., *Transesterification Kinetics of Soybean Oil for Production of Biodiesel in Supercritical Methanol*. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2007. **84**(4): p. 399-404.
14. Kusdiana, D. and S. Saka, *Kinetics of transesterification in rapeseed oil to biodiesel fuel as treated in supercritical methanol*. Fuel, 2001. **80**: p. 693-698.
15. Anastopoulos, G., et al., *Transesterification of Vegetable Oils with Ethanol and Characterization of the Key Fuel Properties of Ethyl Esters*. Energies, 2009. **2**(2): p. 362-376.
16. Kucek, K.T., et al., *Ethanolysis of Refined Soybean Oil Assisted by Sodium and Potassium Hydroxides*. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2007. **84**(4): p. 385-392.
17. Mendow, G., N.S. Veizaga, and C.A. Querini, *Ethyl ester production by homogeneous alkaline transesterification: influence of the catalyst*. Bioresour Technol, 2011. **102**(11): p. 6385-91.
18. Meneghetti, S.M.P., et al., *Ethanolysis of Castor and Cottonseed Oil: A Systematic Study Using Classical Catalysts* Journal of the American Oil Chemists' Society, 2006. **83**(9): p. 819-822.
19. Granados, M.L., et al., *Biodiesel from sunflower oil by using activated calcium oxide*. Applied Catalysis B: Environmental, 2007. **73**(3-4): p. 317-326.
20. Madras, G., C. Kolluru, and R. Kumar, *Synthesis of biodiesel in supercritical fluids*. Fuel, 2004. **83**(14-15): p. 2029-2033.
21. Tan, K.T., et al., *Supercritical Alcohol Technology in Biodiesel Production: A Comparative Study between Methanol and Ethanol*. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2010. **33**(2): p. 156-163.
22. Shibasaki-Kitakawa, N., et al., *Biodiesel production using anionic ion-exchange resin as heterogeneous catalyst*. Bioresour Technol, 2007. **98**(2): p. 416-21.

23. Kim, M., et al., *Competitive transesterification of soybean oil with mixed methanol/ethanol over heterogeneous catalysts*. *Bioresour Technol*, 2010. **101**(12): p. 4409-14.
24. Kaur, M. and A. Ali, *Ethanolysis of waste cottonseed oil over lithium impregnated calcium oxide: Kinetics and reusability studies*. *Renewable Energy*, 2014. **63**: p. 272-279.
25. Liu, X., et al., *Transesterification of soybean oil to biodiesel using CaO as a solid base catalyst*. *Fuel*, 2008. **87**(2): p. 216-221.
26. Guan, G., K. Kusakabe, and S. Yamasaki, *Tri-potassium phosphate as a solid catalyst for biodiesel production from waste cooking oil*. *Fuel Processing Technology*, 2009. **90**(4): p. 520-524.
27. Wan, L., H. Liu, and D. Skala, *Biodiesel production from soybean oil in subcritical methanol using MnCO₃/ZnO as catalyst*. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2014. **152-153**: p. 352-359.
28. Jiang, S.T. and F.J. Zhang, Pan, L.P., *Sodium Phosphate as a Solid Catalyst for Biodiesel Production*. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2010. **27**(1): p. 137-144.
29. Filippis, P.D., Borgianni, C., Paolucci, M., *Rapeseed Oil Transesterification Catalyzed by Sodium Phosphates*. *Energy & Fuels*, 2005. **2005**(19): p. 2225-2228.
30. ทินกร, ก., *ทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มโอเลอินโดยใช้โซเดียมฟอสเฟตที่เคลือบฝังลงบนตัวรองรับอะลูมินา*, in *ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์*. 2014, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
31. Standardization, E.C.f., *Automotive fuels - Fatty acid methyl esters (FAME) for diesel engines - Requirements and test methods*. 2002.
32. Zhu, X.L.X.P.Y.W.S., *Liquid-Liquid Equilibrium for Systems of (Fatty Acid Ethyl Esters+Ethanol+Soybean Oil and Fatty Acid Ethyl Esters+Ethanol+Glycerol)*. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 2008. **53**: p. 359-362.
33. Alfonsina E. Andreatta, et al., *Phase Equilibria in Ternary Mixtures of Methyl Oleate, Glycerol, and Methanol*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2008. **47**: p. 5157-5164.

34. Sanz, M.T., et al., *Autocatalyzed and Ion-Exchange-Resin-Catalyzed Esterification Kinetics of Lactic Acid with Methanol*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2002. **41**: p. 512-517.
35. Zeng, H., et al., *Activation of Mg–Al hydrotalcite catalysts for transesterification of rape oil*. Fuel, 2008. **87**(13-14): p. 3071-3076.
36. Liu, X., et al., *Transesterification of soybean oil to biodiesel using SrO as a solid base catalyst*. Catalysis Communications, 2007. **8**(7): p. 1107-1111.





ภาคผนวก ก
ข้อมูลการทดลอง

ก.1 คุณสมบัติทางกายภาพของโซเดียมฟอสเฟต

มวลโมเลกุลของโซเดียมฟอสเฟตโดเดคาไฮเดรต ($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) (กรัม/โมล) = 380

มวลโมเลกุลของโซเดียมฟอสเฟต (Na_3PO_4) (กรัม/โมล) = 164

ความสามารถในการละลายในน้ำ (กรัม/100 มิลลิลิตร)

ที่ 0 องศาเซลเซียส = 1.5

ที่ 25 องศาเซลเซียส = 8.8

ความสามารถในการละลายในแอลกอฮอล์ (กรัม/100 มิลลิลิตร) = 0

ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) = 1.62

ก.2 ปริมาณสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยาในการทดลอง

ความหนาแน่นของน้ำมันปาล์มโอเลอิน (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) = 0.9

ความหนาแน่นของเอทานอล (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) = 0.789

ตาราง ก-1 ปริมาณสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยาในการทดลอง

อัตราส่วนโดยโมล เอทานอลและ น้ำมันพืช	น้ำมันพืช (กรัม)	เอทานอล (กรัม)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม)				
			1%wt.	2%wt.	3%wt.	4%wt.	5%wt.
3:1	759	123	7.59	15.18	22.77	30.36	37.94
6:1	657	213	6.57	13.13	19.70	26.27	32.83
9:1	579	281	5.79	11.58	17.37	23.16	28.94
12:1	519	336	5.19	10.38	15.57	20.76	25.94
18:1	427	415	4.27	8.53	12.80	17.07	21.33

ภาคผนวก ข
การคำนวณในการทดลอง

การคำนวณค่าร้อยละผลได้ของ FAEE

ค่าแฟกเตอร์การตอบสนองของ FAEE แสดงในตาราง ข.1 ระยะเวลาในคอลัมน์ของ FAEE แสดงในตาราง ข.2

ตาราง ข-1แสดงแฟกเตอร์การตอบสนอง

ลำดับที่	FAEE	แฟกเตอร์การตอบสนอง
1	Ethyl Decanoate (C10:0)	1.000
2	Ethyl Laurate (C12:0)	0.979
3	Ethyl Myristate (C14:0)	0.941
4	Ethyl Palmitate (C16:0)	1.069
5	Ethyl Stearate (C18:0)	1.123
6	Ethyl Oleate (C18:1)	1.107
7	Ethyl Linoleate (C18:2)	1.045
8	Ethyl Linolenate (C18:3)	0.985
9	Ethyl Arachidate (C20:0)	1.219

ตาราง ข-2 แสดงระยะเวลาในคอลัมน์

ลำดับที่	FAEE	ระยะเวลาในคอลัมน์ (นาที)
1	2-Butanol	2.075
2	Ethyl Decanoate (C10:0)	10.321
3	Ethyl Laurate (C12:0)	11.457
4	Ethyl Myristate (C14:0)	12.496
5	Ethyl Palmitate (C16:0)	12.594
6	Ethyl Stearate (C18:0)	13.516
7	Ethyl Oleate (C18:1)	13.677
8	Ethyl Linoleate (C18:2)	13.938
9	Ethyl Linolenate (C18:3)	14.362
10	Ethyl Arachidate (C20:0)	14.878

ตาราง ข-3 แสดงผลการคำนวณปริมาณ FAEE ในผลิตภัณฑ์

FAEE	พื้นที่ได้กราฟ	FAEE (กรัม)	FAEE (ร้อยละโดยมวล)
Ethyl Decanoate (C10:0)	1503145	0.0005	0.471
Ethyl Laurate (C12:0)	23370	0.0010	0.945
Ethyl Myristate (C14:0)	56725	0.0366	35.764
Ethyl Palmitate (C16:0)	2436731	0.0000	3.735
Ethyl Stearate (C18:0)	267368	0.0038	41.865
Ethyl Oleate (C18:1)	2954535	0.0428	11.171
Ethyl Linoleate (C18:2)	744087	0.0114	0.220
Ethyl Linolenate (C18:3)	13815	0.0002	0.329
Ethyl Arachidate (C20:0)	25566	0.0003	0.471

การคำนวณค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยา

ค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาที่สภาวะมาตรฐานสามารถแสดงได้ดังสมการที่ ข.1

$$\Delta H_r(T_0) = \sum_i u_i \Delta H_{f_i}(T_0) \quad (\text{ข.1})$$

โดย u_i คือค่าสัมประสิทธิ์ในปฏิกิริยาของสารประกอบ i

ΔH_{f_i} คือค่าเอนทาลปีในการสร้างสารประกอบ i (กิโลจูล/โมล)

ΔH_r คือค่าเอนทาลปีในการเกิดปฏิกิริยา (กิโลจูล/โมล)

ค่าความร้อนของการสร้างสารประกอบสามารถแสดงได้ดังตาราง ข-4

ตาราง ข-4 ค่าความร้อนในการสร้างสารประกอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

องค์ประกอบ	ค่าความร้อนในการสร้างสารประกอบ (กิโลจูล/โมล)
น้ำมันปาล์มโอเลอิน	-1897.6
เอทานอล	-277.0
กลีเซอรอล	-669.6
FAEE จากน้ำมันปาล์ม	-694.1

$$\Delta H_r(T_0) = (-1 \times 1897.6) + (-3 \times 277) + (1 \times 669.6) + (3 \times 694.1)$$

$$\Delta H_r(T_0) = -23.3 \text{ กิโลจูล/โมล}$$

จากการคำนวณแสดงว่าปฏิกิริยาจะคายความร้อน 23.3 กิโลจูล/โมลของน้ำมันพืช

ภาคผนวก ค
ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างผลิตภัณฑ์

ค.1 ผลการทดลอง

ตาราง ค-1 ผลกระทบของความเร็วรอบต่อค่าร้อยละผลได้ของ FAEE ความเร็วรอบในการปั่นกวน 100 ถึง 800 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช 6:1 อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 โดยมวลของน้ำมันพืช

ลำดับที่	เวลา (นาที)	ค่าร้อยละผลได้ FAEE (ร้อยละโดยมวล)				
		100 rpm	200 rpm	400 rpm	600 rpm	800 rpm
1	0	0	0	0	0	0
2	5	0.45	2.63	1.67	2.51	2.52
3	10	1.32	4.92	3.97	13.95	13.15
4	15	3.94	9.18	9.02	20.86	21.96
5	20	9.06	15.95	14.57	33.25	32.92
6	30	20.16	27.17	27.19	49.76	46.93
7	40	29.69	37.05	36.54	57.68	57.57
8	50	36.62	45.84	53.69	64.34	64.12
9	60	44.43	55.23	60.23	70.27	72.58
10	90	67.86	73.76	73.81	78.05	77.18
11	120	71.99	76.08	77.50	80.91	80.53
12	150	76.35	77.85	78.05	79.93	80.04
13	180	77.64	78.82	80.75	80.57	81.34
14	210	76.73	80.43	80.77	78.80	79.65
15	240	78.43	79.84	79.54	80.35	81.04

ตาราง ค-2 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชต่อค่าร้อยละผลได้ของ FAEE อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช 3:1 ถึง 18:1 ความเร็วรอบในการปั่นกวน 800 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 โดยมวลของน้ำมันพืช

ลำดับที่	เวลา (นาที)	ค่าร้อยละผลได้ FAEE (ร้อยละโดยมวล)				
		3:1	6:1	9:1	12:1	18:1
1	0	0	0	0	0	0
2	5	1.10	2.52	2.63	5.23	6.41
3	10	6.76	13.15	12.69	22.31	20.11
4	15	14.13	21.96	22.73	40.77	33.86
5	20	18.86	32.92	39.98	51.13	50.75
6	30	29.42	46.93	52.70	69.32	68.48
7	40	36.62	57.57	66.43	80.47	80.32
8	50	39.75	64.12	77.56	88.78	88.13
9	60	44.23	72.58	85.65	92.15	92.61
10	90	54.60	77.18	92.74	94.72	96.09
11	120	59.24	80.53	92.62	94.10	95.82
12	150	61.16	80.04	93.12	94.86	94.39
13	180	61.62	81.34	94.68	94.36	94.42
14	210	61.57	79.65	93.45	94.57	94.99
15	240	62.27	81.04	92.21	94.42	95.48

ตาราง ค-3 ผลกระทบของอุณหภูมิในการดำเนินการต่อค่าร้อยละผลได้ของ FAEE อุณหภูมิ 150 ถึง 250 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการปั่นกวน 800 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช 12:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 โดยมวลของน้ำมันพืช

ลำดับที่	เวลา (นาที)	ค่าร้อยละผลได้ FAEE				
		150°C	175°C	200°C	225°C	250°C
1	0	0	0	0	0	0
2	5	0.63	1.23	5.23	11.14	20.72
3	10	3.30	7.49	22.31	34.36	58.00
4	15	6.29	20.48	40.77	59.74	86.54
5	20	10.88	27.89	51.13	76.31	88.73
6	30	17.98	38.54	69.32	89.46	91.47
7	40	21.80	49.19	80.47	92.23	89.00
8	50	27.26	59.01	88.78	92.35	87.81
9	60	30.87	65.66	92.15	92.26	88.85
10	90	46.42	83.40	94.72	92.33	87.33
11	120	63.51	92.70	94.10	93.78	88.29
12	150	71.61	94.88	94.86	92.28	88.35
13	180	75.78	96.09	94.36	91.75	88.25
14	210	80.27	96.02	94.57	92.56	88.03
15	240	86.97	96.31	94.42	93.10	89.40

ตาราง ค-4 ผลกระทบของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าร้อยละผลได้ของ FAEE ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 ถึง 5 โดยมวลของน้ำมันพืช ความเร็วรอบในการปั่นกวน 800 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช 12:1 อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

ลำดับที่	เวลา (นาที)	ค่าร้อยละผลได้ FAEE				
		1%wt.	2%wt.	3%wt.	4%wt.	5%wt.
1	0	0	0	0	0	0
2	5	2.54	7.53	5.23	6.01	8.06
3	10	8.74	15.17	22.31	27.69	28.30
4	15	16.72	25.35	40.77	47.08	45.75
5	20	22.30	34.55	51.13	62.44	60.78
6	30	32.26	52.29	69.32	79.10	81.15
7	40	41.78	64.06	80.47	89.25	90.30
8	50	48.06	76.52	88.78	93.84	94.72
9	60	57.62	81.75	92.15	94.02	94.39
10	90	78.52	92.16	94.72	94.67	94.43
11	120	95.08	94.30	94.10	94.51	95.56
12	150	93.48	95.49	94.86	94.22	93.70
13	180	94.84	94.74	94.36	94.49	95.92
14	210	96.53	94.96	94.57	94.45	93.87
15	240	94.10	94.42	94.42	95.32	94.06

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและปริมาณสบู่ที่ละลายในผลิตภัณฑ์ที่สภาวะความเร็วรอบในการปั่น
 กวน 800 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอล 12:1 อุณหภูมิในการดำเนินการ 200
 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 โดยมวลของน้ำมันพืชแสดงในตาราง ค.5

ตาราง ค-5 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและปริมาณสบู่ที่ละลายในผลิตภัณฑ์

ลำดับที่	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ส่วนต่อล้านส่วน)	ปริมาณสบู่ (ส่วนต่อล้านส่วน)
1	0	12661
2	0	10695
3	0	10305
เฉลี่ย	0	11220



ค.2 ความผิดพลาดจากการทดลอง

ตาราง ค-6 การทดลองซ้ำของการศึกษาผลกระทบความเร็วรอบในการปั่นกวนต่อค่าร้อยละผลได้ของ FAEE ความเร็วรอบในการปั่นกวน 800 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช 6:1 อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 โดยมวลของน้ำมันพืช

ลำดับที่	เวลา (นาที)	ค่าร้อยละผลได้ FAEE			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	0	0	0	0	0
2	5	1.87	3.11	2.57	2.52
3	10	7.63	16.37	15.45	13.15
4	15	17.07	24.53	24.28	21.96
5	20	30.10	34.86	33.81	32.92
6	30	48.83	46.21	45.75	46.93
7	40	55.27	61.10	56.35	57.57
8	50	66.44	63.43	62.49	64.12
9	60	75.38	71.66	70.70	72.58
10	90	77.84	78.18	75.53	77.18
11	120	81.23	80.66	79.71	80.53
12	150	80.74	79.10	80.28	80.04
13	180	82.03	80.75	81.23	81.34
14	210	79.31	79.62	80.02	79.65
15	240	80.59	80.78	81.75	81.04

ตาราง ค-7 การทดลองซ้ำของการศึกษาผลกระทบอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช อุณหภูมิในการดำเนินการ และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าร้อยละผลได้ของ FAEE ความเร็วรอบในการปั่นกวน 800 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืช 12:1 อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 โดยมวลของน้ำมันพืช

ลำดับที่	เวลา (นาที)	ค่าร้อยละผลได้ FAEE			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	0	0	0	0	0
2	5	4.65	4.26	6.78	5.23
3	10	18.25	24.92	23.77	22.31
4	15	33.96	42.89	45.44	40.77
5	20	47.55	53.81	52.02	51.13
6	30	70.75	67.80	69.42	69.32
7	40	77.75	83.18	80.47	80.47
8	50	90.22	89.90	86.21	88.78
9	60	94.33	91.23	90.89	92.15
10	90	96.43	94.11	93.61	94.72
11	120	94.29	93.54	94.47	94.10
12	150	95.22	95.60	93.75	94.86
13	180	94.50	94.43	94.17	94.36
14	210	94.57	95.11	94.03	94.57
15	240	93.37	94.46	95.42	94.42

ค.3 ความผิดพลาดจากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์

ความผิดพลาดจากการวิเคราะห์จะถูกระบุด้วยการนำตัวอย่างผลิตภัณฑ์หนึ่งมาแบ่งออกเป็น 6 ส่วน แต่ละส่วนจะถูกนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นและวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แสดงในตาราง ค.8

ตาราง ค-8 การตรวจสอบความผิดพลาดจากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์

ลำดับ ที่	ค่าร้อยละผลได้ FAEE								ค่ารวม
	C12:0	C14:0	C16:0	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3	C20:0	
1	0.50	0.95	35.60	3.68	42.67	11.11	0.23	0.39	95.14
2	0.49	0.95	35.24	3.65	42.29	11.03	0.24	0.36	94.25
3	0.49	0.95	35.37	3.65	42.42	11.04	0.24	0.39	94.55
4	0.49	0.94	35.12	3.60	41.91	11.01	0.24	0.54	93.86
5	0.51	0.98	36.14	3.70	42.97	11.08	0.23	0.33	95.94
6	0.50	0.95	35.33	3.61	42.27	11.00	0.24	0.39	94.28
								SD	0.75

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายศุภกร ศิริมิตรตระกูล เกิดเมื่อวันที่ 19 เมษายน พ.ศ.2533 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557

