

การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันถั่ว
เหลืองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์และแบเรียมบนแคลเซียมออกไซด์จาก
เปลือกไข่ไก่

BIODIESEL PRODUCTION BY TRANSESTERIFICATION OF
SOYBEAN OIL USING ZINC AND BARIUM DOPED ON CaO
FROM WASTE EGG-SHELL AS CATALYST



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BIODIESEL PRODUCTION BY TRANSESTERIFICATION OF
SOYBEAN OIL USING ZINC AND BARIUM DOPED ON CaO
FROM WASTE EGG-SHELL AS CATALYST



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, SCHOOL OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ใน **ACADEMIC YEAR 2022** อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลืองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์และแบเรียมบนแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่
Biodiesel production by transesterification of soybean oil using Zinc and Barium doped on CaO from waste egg-shell as catalyst

ชื่อนักศึกษา นายชัชพงษ์ พิณีจกิจ รหัสนักศึกษา 62050274
นายธนพัฒน์ ดำรงสุขกุล รหัสนักศึกษา 62050290




ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2565

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2565

คณะกรรมการ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.มนตรี ทองคำ ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ กรรมการ	
ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลืองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์และแบเรียมบนแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่	
ชื่อนักศึกษา	นายชัชพงษ์ พินิจกิจ	รหัสนักศึกษา 62050274
	นายธนพัฒน์ ดำรงสุสกุล	รหัสนักศึกษา 62050290
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)	
ภาควิชา	เคมี	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)	
ปีการศึกษา	2565	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล	

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการสังเคราะห์ไบโอดีเซลหรือเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันถั่วเหลืองและเมทานอลผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ซิงค์และแบเรียมบนตัวรองรับแคลเซียมออกไซด์ (Zn-Ba/CaO) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ โดยทำการสังเคราะห์ตัวรองรับแคลเซียมออกไซด์จากการนำเปลือกไข่ไปบดแล้วนำไปแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมาทำการดูดซับด้วยสารละลายซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต และแบเรียมคลอไรด์แล้วนำไปแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD พบว่าโครงสร้างของ Zn-Ba/CaO มีลักษณะคล้ายคลึงกับ CaO ซึ่งคาดว่า ZnO และ BaO อาจกระจายตัวได้ดีบนตัวรองรับ นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาตัวแปรสถานะที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ ผลการทดลองพบว่าการโหลดซิงค์และแบเรียมลงบนแคลเซียมออกไซด์จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันได้มากขึ้น โดยสถานะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วนโดยโมลซิงค์ต่อแบเรียมเป็น 7:0.3 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลือง 9:1 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส โดยได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงถึง 99.16 และจากการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO กลับมาใช้ซ้ำ พบว่าร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการใช้ซ้ำ เมทิลเอสเทอร์ส่วนใหญ่ที่สังเคราะห์ได้มีค่าความเป็นกรด เลขไอโอดีน และค่าความร้อน อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตามที่กฎหมายกำหนด

คำสำคัญ : ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ไบโอดีเซล แคลเซียมออกไซด์ เปลือกไข่ไก่ ซิงค์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Biodiesel production by transesterification of soybean oil using Zinc and Barium doped on CaO from waste egg-shell as catalyst	
Students	Mr. Chatchapong Pinijkij	Student ID 62050274
	Mr. Tanapat Dumrongsusakul	Student ID 62050290
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)	
Department	Chemistry	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2023	
Advisor	Dr.Amnat Permsubscul	

Abstract

This special project aims to study biodiesel or methyl ester synthesis from soybean oil. and methanol via transesterification using zinc and barium on a calcium oxide (Zn-Ba/CaO) support as the heterogeneous catalyst. The calcium oxide support was synthesized by crushing eggshells and calcining them at 900 °C. Then it was adsorbed with zinc nitrate hexahydrate solution. and barium chloride solution and calcine at 900 °C. The XRD crystal structure shows that the structure of Zn-Ba/CaO is similar to that of CaO, which is expected that ZnO and BaO may be well dispersed on the support. In addition, the condition variables affecting the percentage of methyl ester were also studied. The results showed that the loading of zinc and barium onto calcium oxide increased the efficiency of the catalytic transesterification. The optimum conditions for methyl ester synthesis were the catalyst with a mole ratio of zinc to barium of 7:0.3, catalyst content of 1 wt% Zn-Ba/CaO, mole ratio of methanol to soybean oil of 9:1 and the reaction time of 2 hours at 65 °C with the highest yield of methyl ester as 99.16%. The reusability of the Zn-Ba/CaO catalyst was found that the methyl ester yield slightly decreased when enhancing the number of reuse. Most of the methyl esters that can be synthesized have acidity, iodine number and calorific value were in the commercial standard requirements.

Keywords: Transesterification, Biodiesel, Calcium oxide, Egg shell, Zinc oxide, Barium Oxide

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยความกรุณาจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษา
ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล ที่ให้คำปรึกษาและตรวจทานแก้ไขโครงการฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.มนตรี ทองคำ และ ผศ.ดร.ชาวลย์ ศรีวงษ์ กรรมการสอบโครงการพิเศษที่ได้
ให้คำแนะนำ ข้อชี้แนะ และตรวจสอบข้อมูลต่าง ๆ ในโครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความถูกต้อง

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ให้ความรู้และคำแนะนำ

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในด้านอุปกรณ์และสารเคมี

ขอขอบพระคุณ ครอบครัวอันเป็นที่รักสำหรับกำลังใจและการสนับสนุนที่มีให้เสมอมา

ขอขอบพระคุณ รุ่นพี่ทุกคนที่กรุณาให้คำแนะนำ และคอยช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ เพื่อนๆ สาขาเคมีอุตสาหกรรม ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจอยู่เสมอๆ

ชัชพงษ์ พิณจกิจ
ธนพัฒน์ ดำรงสุขกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.5 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ไปโอติเซล	5
2.2 องค์ประกอบของไปโอติเซล	6
2.3 ถั่วเหลือง	7
2.4 ปฏิกริยาที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ไปโอติเซล	8
2.4.1 กระบวนการไฟโรไลซิส	8
2.4.2 การเจือจาง	9
2.4.3 การทำไมโครอิมัลชัน	9
2.4.4 ปฏิกริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน	9
2.4.4.1 การทำปฏิกริยาโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกริยา	10
.....2.4.4.2 การทำปฏิกริยาโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกริยา	11
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกริยา	12
2.5.1 น้ำหรือความชื้น	12
2.5.2 ตัวเร่งปฏิกริยา	12
2.5.3 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกริยา	13
2.5.4 อุณหภูมิ	13
2.5.5 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกริยา	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.5.6 สัดส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน	13
2.6 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	13
2.6.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous Catalyst)	13
2.6.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalyst)	14
2.6.3 แคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide)	15
2.6.4 เปลือกไข่ (Egg Shell)	15
2.6.5 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide)	16
2.6.6 แบเรียมออกไซด์ (Barium oxide)	17
2.7 สมบัติทางด้านเชื้อเพลิงที่สำคัญของไบโอดีเซล	17
2.7.1 ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส	17
2.7.2 ความหนืดจลน์ ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	18
2.7.3 จุดวาบไฟ	18
2.7.4 ปริมาณกำมะถัน	18
2.7.5 ปริมาณกากถ่าน	18
2.7.6 ค่าซีเทน	18
2.7.7 เถ้าซัลเฟต	18
2.7.8 น้ำ	19
2.7.9 สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด	19
2.7.10 การกัดกร่อนแผ่นทองแดง	19
2.7.11 เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศา เซลเซียส	19
2.7.12 ค่าความเป็นกรด	19
2.7.13 เลขไอโอดีน	19
2.7.14 กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์	19
2.7.15 ปริมาณเมทานอล	19
2.7.16 ปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ และกลีเซอริน อิสระ	20
2.8 สมบัติทางด้านเชื้อเพลิงที่สำคัญของไบโอดีเซล	22
2.8.1 ไบโอดีเซลช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.8.2 ไบโอดีเซลช่วยลดปริมาณไอเสียที่ปล่อยออกมาจากเครื่องยนต์	22
2.8.3 ไบโอดีเซลส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์น้อย	22
2.8.4 ไบโอดีเซลปรับปรุงการทำงานของเครื่องยนต์	23
2.8.5 ไบโอดีเซลใช้งานง่าย	23
2.9 ผลกระทบของไบโอดีเซลที่มีต่อเครื่องยนต์	23
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	29
3.1 สารเคมี	29
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	30
3.3 วิธีการทดลอง	31
3.3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์และแบเรียมบนแคลเซียมออกไซด์ที่เตรียม ได้จากเปลือกไข่ไก่ (Zn-Ba/CaO)	31
3.3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา	33
3.3.3 การสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์	35
3.3.4 การทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเมทิลเอสเทอร์	38
3.3.4.1 การวิเคราะห์ค่าความร้อน (Heating value) ตามมาตรฐาน ASTM D2015	39
3.3.4.2 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (Acid value)	39
3.3.4.3 การวิเคราะห์หาเลขไอโอดีน (Iodine value)	40
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	43
4.1 การศึกษาลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา	43
4.1.1 โครงสร้างและความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา	43
4.1.2 สัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา	44
4.1.3 องค์ประกอบของธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา	52
4.1.4 พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา	52
4.1.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เครื่องฟูเรียร์ ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์	53
4.2 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4.2.1 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของซิงค์ต่อแบเรียมที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์	54
4.2.2 ผลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์	58
4.2.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลืองที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์	60
4.2.4 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์	62
4.2.5 การศึกษาเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการนำกลับมาใช้ใหม่	63
4.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์ทางกายภาพและเคมีของเมทิลเอสเทอร์	64
4.3.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์	65
4.3.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีด้วยเครื่องฟูเรียทรานส์ฟอร์มนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์	66
4.3.3 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (Acid value) เลขไอโอดีน (Iodine value) ของเมทิลเอสเทอร์	71
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	73
5.1 สรุปผลการวิจัย	73
5.2 ข้อเสนอแนะ	74
เอกสารอ้างอิง	75
ภาคผนวก	80
ภาคผนวก ก	81
ภาคผนวก ข	84
ภาคผนวก ค	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล	6
2.2 คุณสมบัติและค่าความร้อนของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล	7
2.3 การเปรียบเทียบชนิดและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา	14
2.4 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกไข่	16
2.5 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ.2556	20
3.1 ปริมาณของ Zn(NO ₃) ₂ และ BaCl ₂ ที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่มี ร้อยละโดยโมลของ Zn : Ba ต่างๆ	32
3.2 ตัวแปรในการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของ Zn:Ba ของตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO จากเปลือกไข่ที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์	37
3.3 ตัวแปรในการศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์	37
3.4 ตัวแปรในการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่มีต่อร้อยละของ เมทิลเอสเทอร์	37
3.5 ตัวแปรในการศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์	38
3.6 ตัวแปรในการศึกษาผลของการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ที่มีต่อร้อยละของ เมทิลเอสเทอร์	38
4.1 แสดงปริมาณธาตุองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา	52
4.2 แสดงพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุนและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	52
4.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมล Zn:Ba ของตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่มีต่อร้อยละของ เมทิลเอสเทอร์	54
4.4 ผลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์	59
4.5 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลืองที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์	60
4.6 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์	62
4.7 ผลของจำนวนครั้งของการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์	63
4.8 แสดงหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันถั่วเหลืองก่อนเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันและ เมทิลเอสเทอร์ที่การดูดกลืนแสงที่เลขคลื่นต่างๆ	66
4.9 ค่าความเป็นกรด เลขไอโอดีน และค่าความร้อนของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จาก ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่อัตราส่วนเชิงค้ำต่อแบเรียมต่างๆ	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์	6
2.2 โครงสร้างของน้ำมันดีเซล	6
2.3 เมล็ดถั่วเหลือง	8
2.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของการไฟโกลิซิสของไตรกลีเซอไรด์	9
2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน	10
2.6 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรด	11
2.7 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบส	12
2.8 ปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน (Saponification) ของกรดไขมัน	12
2.9 กลไกการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา	14
2.10 เปลือกไข่ไก่	16
3.1 แสดงการตั้งอุปกรณ์สำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา	32
3.2 เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (XRD)	33
3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	34
3.4 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR)	34
3.5 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องหาพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิคบรูน่าวอร์ อมเมทท์ เทลเลอร์ (BET)	34
3.6 เครื่องเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (XRF)	35
3.7 แสดงการตั้งอุปกรณ์สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน	35
3.8 แสดงการแยกชั้นของเมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอลในกรวยแยก	36
3.9 เครื่องวิเคราะห์พลังงานความร้อน (Bomb Calorimeter)	39
4.1 รูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชันของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์เทียบกับตัวเร่ง ปฏิกิริยาซิงค์และแบเรียมบนแคลเซียมออกไซด์ที่อัตราส่วนโดยโมล Zn:Ba เป็น 10:0, 7:0.3, 5:0.5, 3:0.7 และ 0:1	44
4.2 SEM image ของตัวเร่งปฏิกิริยา (กำลังขยาย 10,000 เท่า)	45
4.3 ลักษณะการกระจายตัวของธาตุต่างๆ บนตัวเร่งปฏิกิริยา CaO จากเปลือกไข่ไก่ โดยวิเคราะห์จากเครื่อง SEM/EDX	46
4.4 ลักษณะการกระจายตัวของธาตุต่างๆ บนตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่อัตราส่วน Zn:Ba เท่ากับ 10:0 โดยวิเคราะห์จากเครื่อง SEM/EDX	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 ลักษณะการกระจายตัวของธาตุต่างๆ บนตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่อัตราส่วน Zn:Ba เท่ากับ 7:0.3 โดยวิเคราะห์จากเครื่อง SEM/EDX	48
4.6 ลักษณะการกระจายตัวของธาตุต่างๆ บนตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่อัตราส่วน Zn:Ba เท่ากับ 5:0.5 โดยวิเคราะห์จากเครื่อง SEM/EDX	49
4.7 ลักษณะการกระจายตัวของธาตุต่างๆ บนตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่อัตราส่วน Zn:Ba เท่ากับ 3:0.7 โดยวิเคราะห์จากเครื่อง SEM/EDX	50
4.8 ลักษณะการกระจายตัวของธาตุต่างๆ บนตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่อัตราส่วน Zn:Ba เท่ากับ 0:1 โดยวิเคราะห์จากเครื่อง SEM/EDX	51
4.9 FT-IR สเปกตรัมของ CaO จากเปลือกไข่ไก่ และ ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่มีอัตราส่วน โดยโมล Zn:Ba เท่ากับ 10:0, 7:0.3, 5:0.5, 3:0.7 และ 0:10	53
4.10 ผลของอัตราส่วนโดยโมล Zn:Ba ของตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่มีต่อร้อยละของ เมทิลเอสเทอร์	55
4.11 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO เมื่อ พิจารณาตำแหน่งวงเว้าของ CaO	56
4.12 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO เมื่อ พิจารณาตำแหน่งวงเว้าของ BaO	57
4.13 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO เมื่อ พิจารณาบริเวณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด	58
4.14 ผลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba(7:0.3)/CaO ที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ ...	59
4.15 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลืองที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อเร่งปฏิกิริยาด้วย Zn-Ba(7:0.3)/CaO	60
4.16 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อเร่งปฏิกิริยาด้วย Zn-Ba(7:0.3)/CaO	62
4.17 ผลของจำนวนครั้งในการนำตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO กลับมาใช้ใหม่ที่มีต่อร้อยละ เมทิลเอสเทอร์	64
4.18 FT-IR สเปกตรัมของน้ำมันถั่วเหลืองก่อนที่ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันและ เมทิลเอสเทอร์สังเคราะห์ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่อัตราส่วน Zn:Ba เป็น 0:1, 7:0.3 และ 10:0	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 1H-NMR สเปกตรัมของน้ำมันถั่วเหลืองจากเครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์	67
4.20 1H-NMR สเปกตรัมของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO อัตราส่วน Zn:Ba เท่ากับ 0:1 อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน เท่ากับ 9:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง	68
4.21 1H-NMR สเปกตรัมของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO อัตราส่วน Zn:Ba เท่ากับ 7:0.3 อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน เท่ากับ 9:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง	69
4.22 1H-NMR สเปกตรัมของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO อัตราส่วน Zn:Ba เท่ากับ 10:0 อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน เท่ากับ 9:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ

ในปัจจุบันการใช้เชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมนั้นมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นเนื่องมาจากพัฒนาการทางด้านเศรษฐกิจและจำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้น แต่ทว่าปริมาณของเชื้อเพลิงฟอสซิลสำรองนั้นมีปริมาณที่ลดลงอย่างต่อเนื่องและการใช้งานเชื้อเพลิงฟอสซิลนั้นยังก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เชื้อเพลิงชีวภาพจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ โดยที่ไบโอดีเซลหรือเมทิลเอสเทอร์นั้นมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งได้รับการยอมรับจากทั่วโลกให้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกที่จะมาทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล [1]

ไบโอดีเซลคือน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติคล้ายกับน้ำมันดีเซล เป็นสารประกอบเอสเทอร์ที่ได้จากการนำกรดไขมันมาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันกับแอลกอฮอล์ ซึ่งไบโอดีเซลมีจุดเด่นคือ มีองค์ประกอบของกำมะถันต่ำ สามารถเผาไหม้ได้สมบูรณ์จึงเกิดเขม่าควันน้อย เป็นเชื้อเพลิงที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ จึงเป็นเชื้อเพลิงที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไบโอดีเซลจึงมีศักยภาพในการแก้ปัญหาเศรษฐกิจและปัญหาสิ่งแวดล้อมได้ [2]

การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันพืช เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง หรือน้ำมันสบู่ดำนั้นจะใช้กระบวนการทางเคมีที่เรียกว่าทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบเอสเทอร์ หรือที่เรียกว่าไบโอดีเซล และมีผลพลอยได้เป็นกลีเซอรอล สามารถสังเคราะห์ได้โดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งชนิดเบส หรือตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดจะต้องการเวลาในการทำปฏิกิริยาที่นาน ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสจะใช้เวลาน้อยแต่จะมีข้อเสียคือเมื่อทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระในน้ำมันจะเกิดปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน (Saponification) ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่นั้นมักใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ชนิดเบส (Homogeneous basic catalysts) เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) หรือแอลคอกไซด์ (Alkoxides) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด แต่อย่างไรก็ตามการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสนั้น สามารถทำให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนได้ ซึ่งจำเป็นต้องมีขั้นตอนในการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาที่ยุ่งยาก นอกจากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสยังไม่เหมาะสมกับน้ำมันพืชที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid หรือ FFA) และน้ำในระดับที่สูงกว่า 0.5 และ 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ เพราะส่งผลให้เกิดการสร้างสบู่เป็นผลผลิตพลอยได้ ซึ่งแยกออกจากผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลได้ยากจะทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น และการเกิดเป็นกลีเซอรอลในปฏิกิริยา ส่งผลทำให้ได้ผลผลิตของไบโอดีเซลที่ได้ลดลงอีกด้วยและในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ชนิดกรด (Homogeneous acid catalysts) เช่น กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดสามารถเร่งปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระ และปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์ได้พร้อมๆกัน จึงประหยัดต้นทุนเพราะไม่ต้องมีการกำจัดกรดไขมันอิสระออกก่อน แต่พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะต่ำกว่าตัวเร่งไปใช้

ปฏิกิริยาชนิดเบส ดังนั้นจึงต้องใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันนานกว่า อีกทั้งยังมีปัญหาในการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ และสามารถเกิดการกัดกร่อนต่อผนังของเครื่องปฏิกรณ์ระบบท่อและวาล์วได้ [3,4]

เพื่อเป็นการแก้ปัญหาเหล่านี้ ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์จึงได้มีการพัฒนาขึ้นสำหรับการผลิตไบโอดีเซล ทั้งสามารถให้ผลผลิตไบโอดีเซลที่สูง สามารถแยกออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย ไม่เป็นพิษ ไม่เกิดการกัดกร่อน รวมทั้งสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกด้วย ในตลอดช่วงระยะเวลาที่ผ่านมาได้มีผู้วิจัยสนใจศึกษาและทำการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดกรดและเบสขึ้นอย่างหลากหลาย สำหรับเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เช่น ออกไซด์ของโลหะแอลคาไลน์เอิร์ธ ซึ่งมีความเป็นเบสสูง สามารถให้ผลผลิตไบโอดีเซลมากภายใต้สภาวะการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่รุนแรง หรือก็คือเกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำและความดันบรรยากาศ ซึ่งแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้รับความสนใจเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาที่ดี ต้นทุนต่ำ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถเตรียมได้จากวัสดุเหลือทิ้งจากธรรมชาติ เช่น เปลือกไข่ไก่ซึ่งมีแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, CaCO_3) เป็นองค์ประกอบหลัก สามารถนำเปลือกไข่มาเปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide, CaO) โดยการเผาที่อุณหภูมิ 600-900 องศาเซลเซียส นอกจากนี้จากการศึกษาในหลากหลายงานวิจัยพบว่าเกลือโลหะอื่นๆลงบนแคลเซียมออกไซด์เพื่อเป็นตัวเร่งในการสังเคราะห์ไบโอดีเซล เช่น Zn, Fe, Co, Ni, Cu เป็นต้น สามารถทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์มีศักยภาพที่สูงมากขึ้น [5,6]

เนื่องจากการศึกษาการใช้ CaO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน พบว่า CaO มักมีการดูดความชื้น และในขั้นตอนการฟื้นฟูตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อนำกลับไปใช้ใหม่ ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพลดลงจากเดิมมาก เนื่องจากมีความแข็งแรงเชิงกลที่ต่ำ ทำให้ในระหว่างการชะล้างตัวเร่งปฏิกิริยาถูกละลายกับน้ำไปบางส่วน สำหรับ ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความเสถียรและทนทานสูงในการชะล้าง จึงไม่เกิดการสูญเสียหรือละลายไปกับน้ำ และ ZnO สามารถเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกรดไขมันอิสระที่ปะปนในน้ำมันพืชให้เกิดไบโอดีเซลได้ [1,6,7]

ดังนั้นโครงการพิเศษนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยา CaO จากวัตถุดิบที่มีต้นทุนต่ำนั่นคือเปลือกไข่ไก่ และปรับปรุงคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาให้ดีขึ้นโดยการเจือด้วยซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และแบเรียมออกไซด์ (BaO) ลงไปด้วยวิธีการดูดซับ (adsorption) โดย BaO เป็นสารประกอบโลหะ alkaline-earth ที่มีความเป็นเบสสูง ซึ่งคาดว่าจะทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ที่ปรับปรุงด้วย ZnO ดีมากยิ่งขึ้นสำหรับใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลืองกับเมทานอลเพื่อให้ได้ไบโอดีเซลที่มีคุณภาพและร้อยละผลได้ (yield) สูง [8] นอกจากนี้การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์และแบเรียมบนแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ (Zn-Ba/CaO) แล้ว โครงการพิเศษนี้ยังได้ศึกษาผลของตัวแปรสถานะที่มีร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของ Zn ต่อ Ba ของตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลือง เวลาในการทำปฏิกิริยา และการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ จากนั้นนำไบโอดีเซลมาทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ได้แก่ ค่าความร้อน ค่าความเป็นกรด เลขไอโอดีน และโครงสร้างทางเคมีต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ หรือการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.) เพื่อสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยใช้ซิงค์และแบบเรียบมนแคลเซียมออกไซด์ที่เตรียมจากเปลือกไข่ไก่ (Zn-Ba/CaO) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

2.) เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จาก ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของ Zn ต่อ Ba ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลือง เวลาในการทำปฏิกิริยา และการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1) ศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่

1.1 ความเป็นผลึกและองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction Spectrometer, XRD)

1.2 สัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

1.3 พิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier-Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR)

1.4 พื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องหาพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิคบรูเนอร์ เอ็มเมทท์ เทลเลอร์ (Brunauer-Emmett-Teller (BET) Surface Area Analysis instrument)

1.5 ปริมาณของธาตุบนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (X-ray Fluorescence Spectrometer, XRF)

2) ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน รวมถึงหาสภาวะที่เหมาะสม โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่

2.1 อัตราส่วนโดยโมลของ Zn ต่อ Ba โดยศึกษาที่อัตราส่วน 10:0, 7:0.3, 5:0.5, 3:0.7 และ 0:1

2.2 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในปฏิกิริยา โดยศึกษาที่ร้อยละ 1, 2, 3, 4 และ 5 โดยน้ำหนัก

2.3 อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน โดยศึกษาที่อัตราส่วน 6:1, 9:1, 12:1 และ 15:1 เมื่อเทียบกับน้ำมันปาล์ม

2.4 เวลาของปฏิกิริยา โดยศึกษาที่ 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง

2.5 การนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ จำนวน 1, 2, 3 และ 4 รอบ

3.) ทดสอบสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของไบโอดีเซล ได้แก่ ค่าความร้อน ความเป็นกรด และเลขไอโอดีน

4.) ศึกษาถึงลักษณะทางเคมีของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้จากน้ำมันถั่วเหลือง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์

และแบบเรียบมนแคลเซียมออกไซด์ที่เตรียมได้จากเปลือกไข่ไก่ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด

สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier-Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR) และเครื่องฟู

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียทรานส์ฟอร์มนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier-Transform Nuclear Magnetic Resonance Spectrophotometer, $^1\text{H-NMR}$)

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.) ทราบถึงประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์และแบเรียมบนแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ ที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลืองและเมทานอล
- 2.) ทราบถึงอิทธิพลของตัวแปรสถานะที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของ Zn ต่อ Ba ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลือง เวลาในการทำปฏิกิริยา และการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่
- 3.) สามารถผลิตตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์และแบเรียมบนแคลเซียมออกไซด์ที่เตรียมจากเปลือกไข่ ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเปลือกไข่ที่ทิ้งแล้ว และยังสามารถช่วยลดปัญหาของเสียชีวภาพได้อีกด้วย

1.5 ขั้นตอนของการวิจัยและแผนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	เดือน								
	กย.	ตค.	พย.	ธค.	มค.	กพ.	มีค.	เมย.	พค.
1.ศึกษาข้อมูล ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง									
2. ออกแบบวิธีการทดลอง เตรียมอุปกรณ์และสารเคมี									
3.ทำการทดลองสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา									
4.ตรวจสอบลักษณะทางเคมีและกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา									
5.ทำการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ และทดสอบสมบัติของเมทิลเอสเทอร์									
6.วิเคราะห์ผลการทดลอง									
7.สรุป และรายงานผล									

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไบโอดีเซล [9,10]

ไบโอดีเซล หมายถึง น้ำมันที่สามารถใช้ทดแทนน้ำมันดีเซล ซึ่งได้จากการนำน้ำมันจากพืชหรือไขมันสัตว์ หรือแม้แต่น้ำมันที่ใช้แล้ว มาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งเป็นไบโอดีเซลแบบเมทิลเอสเทอร์ สมบัติทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลนั้นจะใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล ไบโอดีเซลนั้นเป็นเชื้อเพลิงที่สะอาด เนื่องจากการเผาไหม้ของไบโอดีเซลนั้นสมบูรณ์กว่าน้ำมันไบโอดีเซล รวมถึงการย่อยสลายสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ เป็นพลังงานทดแทนทางเลือกที่สามารถหมุนเวียนได้ และยังเป็นแนวทางในการพัฒนาความยั่งยืนของระบบพลังงานและการเกษตร โดยคุณสมบัติของไบโอดีเซลและน้ำมันดีเซลเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 2.1

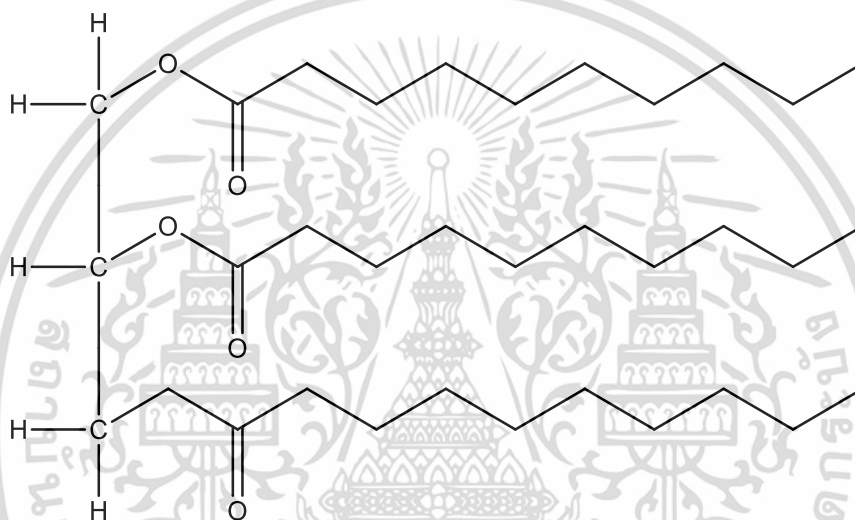
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล [10]

Fuel property	Diesel	Biodiesel
Fuel standard	ASTM D975	ASTM D6751
Lower heating value, Bru/gal	~129,050	~118,170
Kinematic viscosity, (40 °C)	1.3 to 4.1	4.0 to 6.0
Specific gravity kg/l, (60 °F)	0.85	0.88
Density, lb/gal (15°C)	7.079	7.328
Water and sediment, vol%	0.05 max	0.05 max
Carbon, wt%	87	77
Hydrogen, wt%	13	12
Sulfur, wt%	0.05 max	0.0 to 0.0024
Boiling point, °C	180 to 340	315 to 350
Flashpoint, °C	60 to 80	100 to 170
Cloud point, °C	-18 to 5	-3 to 12
Pour, point, °C	-35 to -15	-15 to 10
Cetane number	40 to 55	48 to 65
Lubricity SLBOCLE, grams	2,000 to 5,000	>7,000

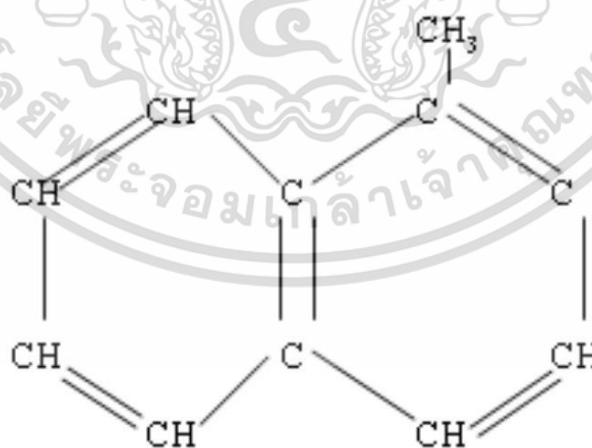
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 องค์ประกอบของไบโอดีเซล [11]

ไบโอดีเซลมีองค์ประกอบของกรดไขมันอิสระที่มีคุณสมบัติคล้ายน้ำมันดีเซล และไตรกลีเซอไรด์ น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์เป็นสารประกอบพวกไตรกลีเซอไรด์ มีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ส่วนน้ำมันดีเซลนั้นไม่มีธาตุออกซิเจนเป็นองค์ประกอบจึงทำให้มีคุณสมบัติแตกต่างกัน เช่น น้ำมันพืชจะมีความจำเพาะและความหนืดที่สูงกว่าน้ำมันดีเซล 10 เท่า และน้ำมันพืชยังระเหยเป็นไอได้ยากกว่าน้ำมันดีเซลมาก ทำให้จุดระเบิดได้ยาก การใช้น้ำมันพืชจึงไม่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงทดแทนน้ำมันดีเซลได้ จึงต้องนำน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์มาผ่านกระบวนการทางเคมีเพื่อสังเคราะห์เป็นไบโอดีเซล เพื่อให้โครงสร้างโมเลกุลมีขนาดที่เล็กลงกว่าน้ำมันพืช และมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์ [12]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของน้ำมันดีเซล [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันหรือไขมันโดยทั่วไปมีแหล่งกำเนิดจากพืช และสัตว์ ซึ่งไขมันและน้ำมันแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันตามชนิดของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ กรดไขมันในอาหารจะมี 3 กลุ่ม คือ กรดไขมันสายสั้น ประกอบด้วยคาร์บอน 4-10 อะตอม กรดไขมันสายกลาง ประกอบด้วยคาร์บอน 12-14 อะตอม และกรดไขมันสายยาว ประกอบด้วยคาร์บอนมากกว่า 16 อะตอมขึ้นไป ซึ่งจำนวนคาร์บอนหรือความยาวของสายกรดไขมันจะมีผลต่อคุณสมบัติของไขมันทั้งทางกายภาพและทางเคมี เช่น ถั่วเหลืองจะมีไขมันประมาณร้อยละ 17 เมล็ดทานตะวันมีไขมันร้อยละ 28 มะพร้าวมีไขมันร้อยละ 34 เป็นต้น โดยสามารถเปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำมันพืชชนิดต่างๆกับไบโอดีเซลได้ ตามตารางที่ 2.2 [14,15]

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติและค่าความร้อนของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล [15]

น้ำมัน	ค่าความร้อน (kJ/kg)	ความถ่วงจำเพาะ ที่ 21°C (g/mg)	ความหนืด (ที่ 20°C) (cSt)
ถั่วเหลือง	39,490	0.918	57.2
ทานตะวัน	37,540	0.918	60
มะพร้าว	39,470	0.915	51.9
ถั่วลิสง	39,550	0.914	67.1
ปาล์ม	39,720	0.898	88.6
เมล็ดในปาล์ม	39,000	0.904	66.3
เมล็ดสบู่ดำ	46,800	0.915	36.9 (ที่ 38°C)
น้ำมันดีเซล	-	0.845	3.8

2.3 ถั่วเหลือง [16]

ถั่วเหลือง (Soybean) เป็นพืชเศรษฐกิจที่เหมาะสมปลูกสลับกับการปลูกข้าว ถั่วเหลืองเป็นพืชล้มลุก ลำต้นเป็นสี่เหลี่ยม มีขนปกคลุมอยู่ทุกส่วนของลำต้น ใบติดกับลำต้นแบบสลับ มีใบย่อย 3 ใบ รูปร่างคล้ายรูปไข่ปลายแหลม มีขนที่ใบทั้งด้านบนและด้านล่าง มีดอกขนาดเล็กสีขาวอมม่วง ฝักแบนยาว มีเมล็ด 2-3 เมล็ด เป็นพืชที่ไม่ชอบน้ำขัง ดินที่มีลักษณะเป็นดินร่วนปนดินเหนียวไม่ควรเตรียมดินให้ละเอียดมากนัก ถั่วเหลืองนั้นเป็นพืชที่สร้างความอุดมสมบูรณ์ให้กับดิน สามารถตรึงไนโตรเจนได้ 0.50-2.16 มิลลิกรัมต่อต้นต่อวัน และเมื่อปลูกถั่วเหลืองในระบบปลูกพืชจะช่วยลดการระบาดของโรคพืชและแมลงศัตรูพืช ช่วยลดการสูญเสียผลผลิตของพืชที่ปลูกในระบบได้

ถั่วเหลืองที่ปลูกในประเทศไทยส่วนใหญ่จะมีการปลูกกันในมาก 18 จังหวัด ได้แก่ภาคเหนือ เช่น แยกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เชียงใหม่ กำแพงเพชร แพร่ เชียงราย ตาก สุโขทัย อุดรดิตต์ ลำปาง แม่ฮ่องสอน เพชรบูรณ์ นครสวรรค์ เป็นไม้กาวชนิดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้น ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เช่น ศรีสะเกษ นครราชสีมา ขอนแก่น เป็นต้น ภาคกลาง เช่น สระบุรี ลพบุรี ภาคตะวันออก เช่น ปราจีนบุรี และภาคตะวันตก เช่น กาญจนบุรี ผลผลิตต่อไร่ของถั่วเหลืองของไทยพบราว 150 กก.ต่อไร่ ถั่วเหลืองในไทยจะแบ่งปลูกได้เป็น 3 ฤดูคือ ต้นฤดูฝน ปลายฤดูฝน และฤดูแล้ง เพื่อให้ระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวถั่วเหลืองนั้นแก่ในช่วงที่ไม่มีฝนหรือมีฝนน้อย เพื่อให้ สะดวกต่อการเก็บเกี่ยว การนวดเมล็ด และการตากให้แห้ง ในปัจจุบันมีการปลูกถั่วเหลืองประมาณ 10 พันธุ์ คือ สจ.4 สจ.5 สุโขทัย1 สุโขทัย2 สุโขทัย3 นครสวรรค์1 เชียงใหม่60 เชียงใหม่2 เชียงใหม่3 เชียงใหม่4 โดยพันธุ์ที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือพันธุ์ สจ.4 สจ.5 และเชียงใหม่60



รูปที่ 2.3 เมล็ดถั่วเหลือง [16]

ถั่วเหลืองถูกนำมาผลิตเป็นน้ำมันพืชมากถึงประมาณร้อยละ 30 ของน้ำมันและน้ำมันที่ผลิตจากสัตว์ และพืชเขตร้อนทั้งหมด โดยในถั่วเหลืองนั้นประกอบไปด้วยไขมันอิ่มตัว ไขมันไม่อิ่มตัวทั้งพันธะเดี่ยวและพันธะคู่ มีกรดไขมันหลัก เช่น กรดลิโนเลอิกอัลฟา 7-1 % กรดลิโนเลอิก 51% กรดโอเลอิก 23% กรดสเตอริก 4% และกรดปาล์มมิติก 10% โดยสามารถนำถั่วเหลืองมาผลิตเป็นน้ำมันพืชได้โดยการทำให้เมล็ดแตก แล้วให้ความร้อน 60-88 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำไปผ่านลูกกลิ้งเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว แล้วจึงนำไปสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน น้ำมันถั่วเหลืองนั้นเป็นหนึ่งในน้ำมันที่นิยมนำมาสังเคราะห์ไบโอดีเซลผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันกับแอลกอฮอล์ โดยใช้เบสหรือกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

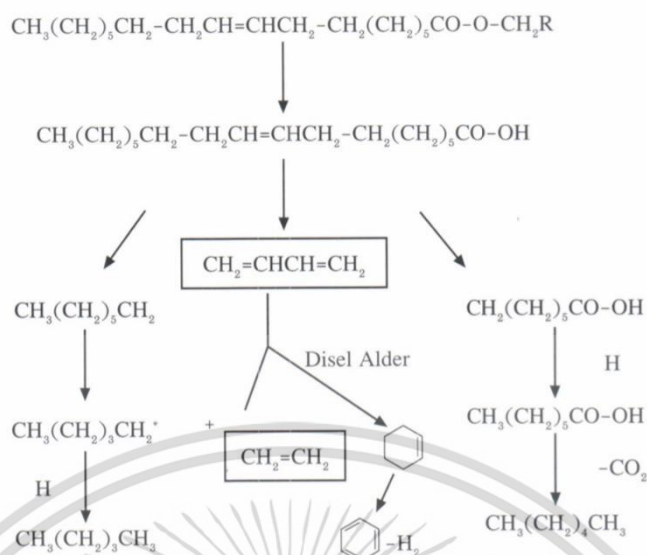
2.4 ปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ไบโอดีเซล [17,18]

น้ำมันพืชนั้นต้องลดความหนืดลงจึงจะสามารถใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลได้ โดยจะสามารถทำได้ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส การเจือจาง ไมโครอิมัลชัน และทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน เป็นต้น

2.4.1 กระบวนการไพโรไลซิส

ไพโรไลซิส เป็นการเปลี่ยนสารหนึ่งไปเป็นสารอื่น ๆ มากกว่าหนึ่งสาร โดยใช้เพียงความร้อนหรือใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย รวมถึงความร้อนที่เกิดขึ้นโดยไม่ใช้อากาศหรือออกซิเจน และการแตกพันธะทางเคมีเป็นโมเลกุลเล็กๆ การทำไพโรไลซิสของไขมันนั้นถูกค้นคว้ามากกว่า 100 ปี โดยเฉพาะส่วนของซีกโลกที่ขาดแคลนปิโตรเลียม ในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 1 มีการพยายามสังเคราะห์ปิโตรเลียมจากน้ำมันพืชด้วยการทำไพโรไลซิสเป็นครั้งแรก โดยการไพโรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์นั้นเป็นดังรูปที่ 2.4

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของการไฟโรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์ [18]

2.4.2 การเจือจาง

การเจือจาง เป็นการนำมาใช้โดยการนำน้ำมันพืชมาผสมกับน้ำมันดีเซล เนื่องจากน้ำมันพืชนั้นไม่สามารถใช้เติมเครื่องยนต์ได้โดยตรง จึงต้องนำมาผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนต่างๆ เช่น น้ำมันพืชร้อยละ 20 ผสมกับน้ำมันดีเซลร้อยละ 80 หรือน้ำมันพืชร้อยละ 50 ผสมกับน้ำมันดีเซลร้อยละ 50 เป็นต้น รถยนต์เครื่องดีเซลอาจใช้น้ำมันที่ใช้ทอดอาหารแล้วร้อยละ 95 ผสมกับน้ำมันดีเซลร้อยละ 5 เพื่อใช้งาน แต่การใช้งานในรูปแบบนี้อาจก่อให้เกิดปัญหาการเกิดโค้ก คราบเขม่า คาร์บอนสะสมในเครื่องยนต์ และเกิดเป็นเมือกขึ้นได้

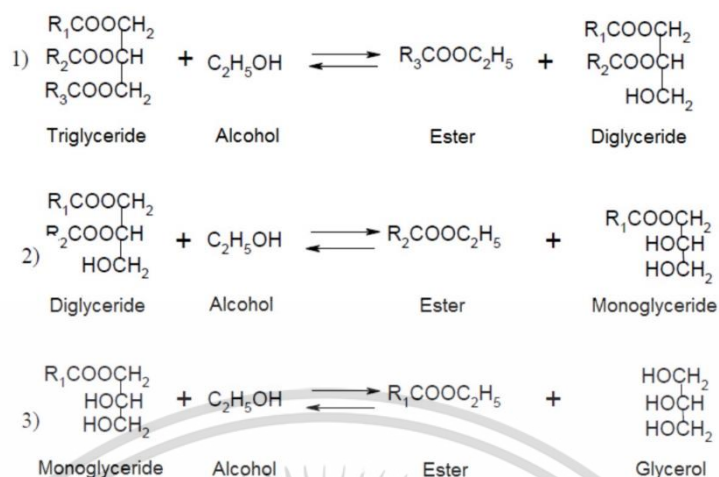
2.4.3 การทำไมโครอิมัลชัน

เพื่อแก้ปัญหาความหนืดที่สูงของน้ำมันพืชจึงได้มีการทำไมโครอิมัลชันกับตัวทำละลาย เช่น เมทานอล เอทานอล หรือบิวทานอล เป็นต้น การไมโครอิมัลชัน เป็นการกระจายอนุภาคของเหลวที่แขวนลอยในตัวกลางของเหลวอีกชนิดหนึ่งอย่างสมดุล โดยมีขนาดอนุภาคอยู่ที่ประมาณ 1-150 นาโนเมตร ซึ่งของเหลวทั้ง 2 ชนิดไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน และกระจายตัวอยู่ด้วยสารลดแรงตึงผิว

2.4.4 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน [19]

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์และแอลกอฮอล์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ การจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีนั้น สามารถทำได้โดยใช้แอลกอฮอล์ในปริมาณที่มากเกินไป เพื่อให้ทิศทางของปฏิกิริยามีทิศทางไปในทางผลิตภัณฑ์ ปฏิกิริยาทรานส์โดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจะมีกลไก 3 ขั้นตอน ขั้นแรกคือการถ่ายโอนมวล (เกิดซ้ำ) ขั้นที่สองการเปลี่ยนแปลงทางจลนพลศาสตร์ (เกิดซ้ำ) และขั้นสุดท้ายคือสมดุล (เกิดซ้ำ) ในขั้นแรกและสองนั้นสารตั้งต้นแยกชั้นกันอยู่จึงจำเป็นต้องมีการปั่นกววน และการเพิ่มอุณหภูมิยังทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เร็วขึ้นอีกด้วย ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ชั้นบนเป็นไบโอดีเซลที่มีสีเหลืองลักษณะใส และชั้นล่างเป็นกลีเซอรอลที่มีสีเหลืองเข้มจนถึงน้ำตาลเข้ม ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันทั้ง 3 ขั้นตอน แสดงดังรูปที่ 2.5



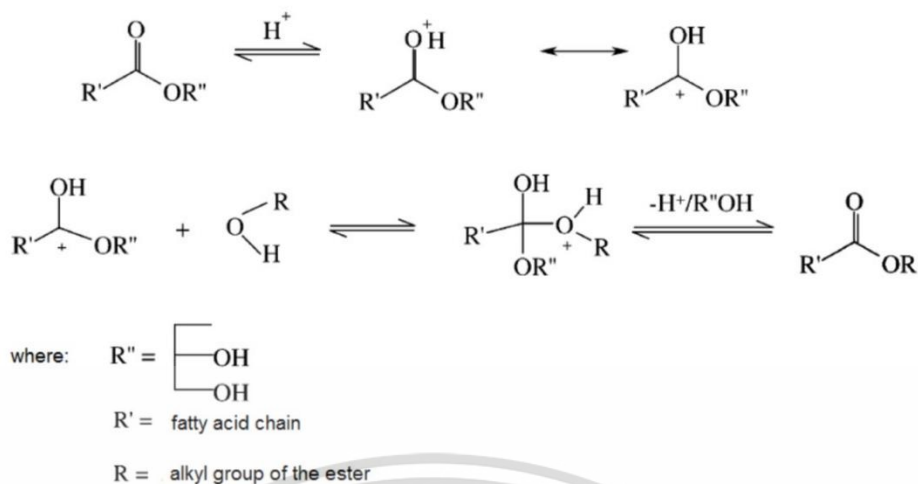
รูปที่ 2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน [19]

2.4.4.1 การทำปฏิกิริยาโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [19,20]

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันสามารถเร่งปฏิกิริยาได้ด้วยกรดบรอนสเตด (Bronsted) เช่น กรดซัลโฟนิก กรดซัลฟูริก เป็นต้น การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานี้ให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ค่อนข้างสูง แต่เกิดปฏิกิริยาช้ามาก โดยต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลามากกว่า 3 ชั่วโมง เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์

กลไกของปฏิกิริยาในการใช้กรดคือ การโปรโตเนทของคาร์บอนิลและออกซิเจน ซึ่งเป็นการเพิ่ม electrophilicity ของคาร์บอนอะตอมเพื่อให้เกิดการชนกันของนิวคลีโอไฟล์ โดยมีปัจจัยที่สำคัญคือ โครงสร้างของกรดคาร์บอกซิลิกกับแอลกอฮอล์ที่ทำให้เกิดการขัดขวางการเข้าทำปฏิกิริยา ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด โดยเอสเทอร์จะถูกโปรโตเนทที่ตำแหน่งคาร์บอนิลเกิดเป็นคาร์โบแคทไอออน จากนั้นแอลกอฮอล์เข้าทำปฏิกิริยาได้เป็นสารมัธยันตร์ทรงสี่หน้า และขั้นตอนสุดท้ายจะกำจัดกลีเซอรอลออก กลไกการเกิดปฏิกิริยาในตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดแสดงดังรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

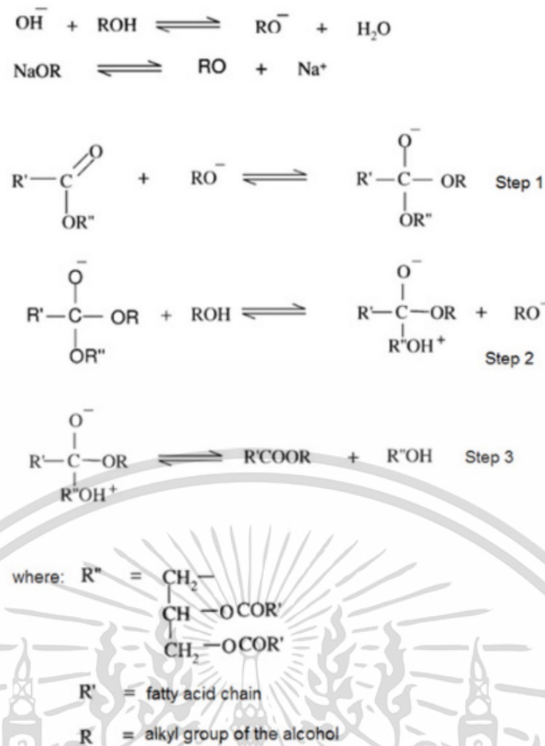


รูปที่ 2.6 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรด [19]

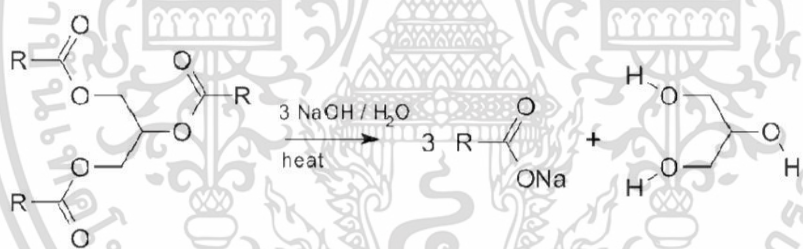
2.4.4.2 การทำปฏิกิริยาโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [19]

การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสเป็นระบบที่ได้รับความนิยมที่สุดเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาดีที่สุดให้ปริมาณผลผลิตไปเอตีเซลสูงและใช้เวลาน้อย ก่อนทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันควรเปลี่ยนจากรูปเบสไปเป็นในรูปของสารประกอบแอลคอกซี (Alkoxy) ก่อนแล้วแอลคอกไซด์ไอออนจะเข้าทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งคาร์บอนิลของเอสเทอร์เกิดเป็นสารมัธยันต์ทรงสี่หน้า (Tetrahedral intermediate) หลังจากนั้นหมู่แอลคอกไซด์ (Alkoxide) หมู่เดิมจะถูกโปรโตเนต (Protonated) และสุดท้ายจะถูกกำจัดออกได้เป็นเอสเทอร์ตัวใหม่ กลไกการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นไปตามรูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไขมันหรือน้ำมันกับแอลกอฮอล์ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเบส แอลกอฮอล์ที่ใช้ควรเป็นแอลกอฮอล์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก โดยเฉพาะเมทานอลซึ่งเป็นแอลกอฮอล์ที่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันได้ง่ายที่สุด ส่วนแอลกอฮอล์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่จะสามารถเกิดปฏิกิริยาได้กับน้ำมันแค่บางชนิดเท่านั้น และแอลกอฮอล์ที่ใช้นั้นต้องมีน้ำปนมาในปริมาณที่น้อยที่สุดหรือไม่มีเลย จึงจะทำให้ปฏิกิริยานั้นเกิดได้ดีและไม่เกิดข้อผิดพลาด น้ำมันที่ใช้หรือไขมันที่ใช้นั้นควรเป็นกลาง ถ้าไม่ตรงตามเงื่อนไขข้างต้นอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงเป็นปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน (Saponification) ทำให้เกิดสบู่ได้ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้อยู่ในรูปอิมัลชัน (Emulsion) ทำให้แยกเอสเทอร์ออกจากกลีเซอรอลได้ยาก โดยปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันแสดงตามรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบส [19]



รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน (Saponification) ของกรดไขมัน [19]

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา [21]

2.5.1 น้ำหรือความชื้น

การที่มีความชื้นในไขมันจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไขมันหรือน้ำมัน โดยน้ำจะเป็นสาเหตุให้เกิดสบู่ และสบู่ที่เกิดขึ้นจะปนกับเอสเทอร์และกลีเซอรินที่ได้ ทำให้สารละลายผสมทั้ง 2 มีความหนืดสูงขึ้น ส่งผลให้การแยกกลีเซอรินออกจากเอสเทอร์ทำได้ยากขึ้น วิธีป้องกันคือ แอลกอฮอล์ ไขมันหรือน้ำมันควรมีน้ำหรือความชื้นปนเปื้อนน้อยที่สุดหรือไม่มีเลย เพื่อให้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเกิดได้สมบูรณ์

2.5.2 ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีทั้งกรด และเบส แต่ตัวเร่งปฏิกิริยานิยมใช้คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส เนื่องจากเบสมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงและให้ผลดีที่อุณหภูมิต่ำกว่าการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในกรณีที่

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นเบส ควรใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สอดคล้องกับแอลกอฮอล์ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด พบว่ามีข้อเสียหลายประการ ได้แก่ ภาวะที่ใช้อาจต้องมีความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรด อัตราส่วนของแอลกอฮอล์ต่อไขมันที่ใช้อาจสูง อุณหภูมิสูงและใช้เวลานานในการทำปฏิกิริยา

2.5.3 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะมีค่าสูงในระยะแรกของปฏิกิริยาและจะลดลงเมื่อเวลามากขึ้น ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสมจึงจำเป็นในการผลิตไบโอดีเซล

2.5.4 อุณหภูมิ

ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันอุณหภูมิมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงทำให้แอลกอฮอล์ทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิที่ใช้สูงเกินจุดเดือดของแอลกอฮอล์จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง เนื่องจากมีการสูญเสียแอลกอฮอล์ในระหว่างที่ทำปฏิกิริยา ถ้าอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาต่ำลงจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง อย่างไรก็ตามการศึกษาถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันมีความสำคัญสุดอย่างยิ่ง

2.5.5 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา

ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้กล่าวคือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่ำและสูงเกินไป จะทำให้ได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ต่ำ ดังนั้นปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจะมีค่าคงที่ค่าหนึ่งเท่านั้น นอกจากนี้ถ้าปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าสูงเกินไปจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เกินมาไปทำให้ปฏิกิริยากับน้ำมันทำให้เกิดปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันหรือการเกิดสบู่

2.5.6 สัดส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน

สัดส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันมีผลต่อปริมาณของเอสเทอร์ที่เกิดขึ้น โดยตามทฤษฎีสัดส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อมันจะเท่ากับ 3:1 ในทางปฏิบัติจะต้องให้ปริมาณของแอลกอฮอล์มากกว่าตามทฤษฎีเพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

2.6 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา [22]

2.6.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous Catalyst)

คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นสถานะเดียวกับสารตั้งต้นที่ทำปฏิกิริยา ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเรียกว่าปฏิกิริยาเร่งเอกพันธ์ (Homogeneous Catalysis) ตัวอย่างเช่น การเตรียมไบโอดีเซล โดยเตรียมจากการนำน้ำมันพืชมาทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์และมีเบส เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันหรือที่เรียกว่าไบโอดีเซล จะเห็นได้ว่าในขณะที่เกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน สารตั้งต้นกับตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะของเหลวเช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalyst)

คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะแตกต่างกับสารตั้งต้นที่ทำปฏิกิริยา ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเรียกว่า ปฏิกิริยาเร่งวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous Catalysis) ส่วนใหญ่จะใช้ตัวเร่งเป็นสถานะของแข็ง และมีสารตั้งต้นเป็นของเหลวหรือแก๊ส ในการเกิดปฏิกิริยาสารตั้งต้นในระบบจะเคลื่อนที่มาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วได้สารผลิตภัณฑ์หลุดออกมาจากพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงดังรูปที่ 2.9 การใช้งานตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์นั้นเป็นที่นิยมอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี



รูปที่ 2.9 กลไกการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา [22]

ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์และวิวิธพันธุ์นั้น มีการประยุกต์ใช้งาน และข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน โดยสามารถเปรียบเทียบได้ ตามตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบชนิดและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา [22]

	ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์	ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์
ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเร่ง	ทุกอะตอม	เฉพาะบริเวณพื้นผิว
ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการ	ต่ำ	สูง
ความจำเพาะเจาะจงในการเลือกเกิดปฏิกิริยา	สูง	ต่ำ
การแพร่ในระบบ	ไม่ค่อยมีปัญหา	มีปัญหา ส่วนมากปรากฏเป็นปฏิกิริยาที่ควบคุมโดยการถ่ายโอนมวลสาร
อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	50-200 องศาเซลเซียส	โดยปกติจะมากกว่า 250 องศาเซลเซียส
การประยุกต์ใช้งานที่สงวนไว้สำหรับ	จำกัดการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น	กว้างขวางและแพร่หลายขึ้นด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบชนิดและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา (ต่อ)

	ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์	ตัวเร่งปฏิกิริยาวิธพันธ์
การเสื่อมสภาพ	เกิดเมื่อปฏิกิริยาผันกลับไม่ได้กับผลิตภัณฑ์หรือเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนใหม่ที่ไม่สามารถย้อนกลับมาอยู่ในรูปของปฏิกิริยาเร่งเอกพันธ์	เมื่ออะตอมของโลหะเกิดการเสื่อมสภาพจากกระบวนการ เช่น การเกิดโค้กบนพื้นผิว
กลไกการเกิดปฏิกิริยา	อธิบายได้ถึงระดับโมเลกุล โดยใช้ทฤษฎีรองรับกับผลการทดลอง เช่น กฎ 16-18 อิเล็กตรอน	ต้องใช้ข้อมูลการทดลองและการวิเคราะห์เพื่อประกอบแบบจำลองจลนพลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยา
เสถียรภาพทางความร้อน	ต่ำ	สูง
การแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากระบบและการนำกลับมาใช้ใหม่	ยาก	ง่าย
ราคา	สูง	ไม่สูงมาก

2.6.3 แคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide) [23]

แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide, CaO) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน เนื่องจากสามารถกำจัดออกจากสารผลิตภัณฑ์ได้ง่าย ราคาถูก อีกทั้งยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลายครั้ง ในส่วนของวิธีการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์นั้นมีกระบวนการผลิตที่ไม่ซับซ้อน โดยสารตั้งต้นต้องมีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต โดยแคลเซียมคาร์บอเนตจะสามารถเปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์โดยการนำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิมากกว่า 600 องศาเซลเซียส แสดงดังสมการที่ 2.1



2.6.4 เปลือกไข่ (Egg Shell) [24]

เปลือกไข่ เป็นหินปูนแข็งเรียบติดแน่นอยู่กับเยื่อหุ้มเปลือกชั้นนอก เปลือกไข่จะมีความหนาประมาณ 0.2-0.4 มิลลิเมตร สีของเปลือกไข่จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดและสายพันธุ์ของสัตว์ โดยทั่วไปไข่ไก่จะมีเปลือกสีเหลือง ไข่เป็ดมีเปลือกสีขาว และไข่นกส่วนใหญ่จะมีจุดบนเปลือกไข่ ภายในเปลือกไข่จะมีเยื่อเปลือกไข่ที่หุ้มไข่แดงและไข่ขาว โดยทั่วไปเปลือกไข่ของสัตว์ปีกจะมีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนต ประมาณร้อยละ 98.2 แมกนีเซียมคาร์บอเนต ประมาณร้อยละ 0.9 แคลเซียมฟอสเฟต ประมาณร้อยละ 0.9 ที่เหลือเป็นแร่ธาตุต่างๆ รวมทั้งโปรตีนและน้ำ โครงสร้างเหล่านี้จะต่างกันไปตามชนิดของสัตว์ปีก ส่วนเยื่อหุ้มภายในเปลือกไข่นั้นจะมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นโปรตีน ประมาณร้อยละ 69.2 ไชมัน ประมาณร้อยละ 1.5 คาร์โบไฮเดรต ประมาณร้อยละ 1.5 และไขมัน ประมาณร้อยละ 1.5 นอกจากนี้ยังมีโปรตีนและไขมันที่เคลือบอยู่รอบๆ เปลือกไข่ ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันการติดเชื้อแบคทีเรียและเชื้อราไม่ให้เข้าสู่ไข่ได้ง่ายๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อยละ 2.7 ส่วนที่เหลือเป็น ไกลโคโพรตีนและวิตามินอื่นๆ โดยองค์ประกอบทางเคมีของเปลือกไข่แสดงตามตารางที่ 2.4

แคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากเปลือกไข่นั้นมีคุณสมบัติกับแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการเผาหินปูนหรือที่รู้จักกันในชื่อปูนขาว (lime) ที่มีจำหน่ายทั่วไป สามารถนำไปใช้ได้ทั้งการปรับสภาพของดินและน้ำที่มีสภาพเป็นกรด ใช้ในการผลิตโซดาไฟและสารฟอกขาว เป็นส่วนผสมของปูนฉาบ นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารดูดความชื้น และตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลได้อีกด้วย



รูปที่ 2.10 เปลือกไข่ไก่ [24]

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกไข่ [24]

แร่ธาตุ	% (โดยน้ำหนัก)		
	เปลือกไข่ไก่	เปลือกไข่เป็ด	เปลือกไข่นกกระทา
CaCO ₃	99.0	96.5	97.3
S	0.1	1.2	0.4
Mg	0.5	0.1	1.0
P	0.2	0.5	1.1
K	-	0.0839	-

2.6.5 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) [25]

ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า คาลาไมล์ ซึ่งเป็นภาษาอียิปต์โบราณ เป็นธาตุธรรมชาติจากสินแร่ สมิธโซไนต์ (Smithsonite) มนุษย์ใช้ซิงค์ออกไซด์ในการรักษาโรคตั้งแต่ในยุคอียิปต์โบราณซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นสารประกอบที่เป็นผลึกไม่มีสี ไม่ละลายในน้ำแต่ละลายได้ในกรดและอัลคาไลน์ ซิงค์ออกไซด์จัดอยู่ในสารเคมีประเภททั่วไป มีลักษณะเป็นผงอนุภาคละเอียดสีขาว มีความหนาแน่น 5.7 กรัม/ตารางเซนติเมตร และเมื่อนำซิงค์ออกไซด์ไปอบจะกลายเป็นสีเหลืองแต่ไม่ละลายแต่จะละลายได้ก็ต่อเมื่อผ่านเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิที่สูงกว่า $1,800^{\circ}\text{C}$ ซิงค์ออกไซด์เป็นสารแอมโฟเทอริกที่ละลายในกรด เช่น กรดซิงค์อัลคาไลน์ และสารละลายในน้ำอย่างแอมโมเนีย เป็นต้น

ซิงค์ออกไซด์ เป็นสารที่ใช้ยับยั้งแบคทีเรีย (Anti-Bacteria) ไม่มีความเป็นพิษต่อร่างกาย ช่วยป้องกันและยับยั้งการแบ่งเซลล์ของแบคทีเรีย และสามารถป้องกันรังสี UV-A และ UV-B ระงับกลิ่นอันไม่พึงประสงค์ได้ โดยทั่วไปมักใช้ใน พลาสติก, ผลิตภัณฑ์ซิลิเกต, ยางสังเคราะห์, น้ำมันหล่อลื่น, สารเคลือบสี, ครีม, กาว, อาหาร, ถ่าน, สารดับไฟ และผลิตภัณฑ์อื่นๆ ด้วยสารกึ่งตัวนำที่มีความกว้างและพลังงานยึดเหนี่ยว Exciton ทำให้ซิงค์ออกไซด์มีความโปร่งแสงมากและมีคุณสมบัติเรืองแสงในอุณหภูมิปกติ มักใช้ในของเหลวในสาขาเคมีคอนดักเตอร์, จอแสดงผลคริสตัล, ฟิล์มบางของทรานซิสเตอร์, ไดโอดเปล่งแสง และผลิตภัณฑ์อื่นๆ นอกจากนี้ อนุภาคขนาดเล็กของ ซิงค์ออกไซด์ซึ่งอยู่ในรูปแบบนาโนเป็นตัวเริ่มทำหน้าที่หลักๆในฟิล์มที่เกี่ยวข้อง ซิงค์ออกไซด์ถูกนำมาใช้เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีในอุตสาหกรรมยาง เช่น ยางคลอโรพรีน (chloroprene rubber) และใช้ในการผลิตน้ำหอม, เครื่องสำอาง, ยา เป็นต้น และซิงค์ออกไซด์ยังถูกนำมาใช้ในการผลิตเม็ดสีและเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์เมทานอลในอุตสาหกรรมเคมีต่างๆ

2.6.6 แบเรียมออกไซด์ (Barium oxide) [26]

เป็นสารประกอบทางเคมีของสูตร BaO ที่เกิดจากการสลายตัวทางความร้อนของแบเรียมไนเตรต หรือโดยความร้อนของเกลือ เช่น แบเรียมคาร์บอเนต แบเรียมออกไซด์เป็นผลึกสีขาวหรือสีเหลือง ผลึกมีรูปทรงเรขาคณิตลูกบาศก์คล้ายกับโซเดียมคลอไรด์ น้ำหนักโมเลกุลคือ 153.326 g/mol ความหนาแน่น 5.72 g/mL และจุดหลอมเหลวและจุดเดือดคือ 1923°C และ 2000°C ตามลำดับ

สารประกอบทำปฏิกิริยากับน้ำในรูปแบเรียมไฮดรอกไซด์ ละลายได้ในแอลกอฮอล์ กรดและแอลเคน ไม่ละลายในอะซิโตนและแอมโมเนีย แบเรียมออกไซด์ถูกใช้เป็นสารทำให้แห้งสำหรับน้ำมันเบนซินและตัวทำละลาย และยังถูกใช้เป็นสารเคลือบสำหรับแคโทด เช่น หลอดแคโทดเรย์

ในปี 1884 มีการค้นพบว่าแบเรียมออกไซด์มีผลในการเพิ่มดัชนีการหักเหของแสงโดยไม่เพิ่มการกระจายตัวซึ่งเป็นสมบัติที่มีค่ายิ่งกว่าในการออกแบบเลนส์ถ่ายภาพที่รู้จักกันในชื่อเลนส์ anastigmatic แบเรียมออกไซด์ยังใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเอทอกซิเลชั่นในปฏิกิริยาของเอทิลีนออกไซด์และแอลกอฮอล์ซึ่งเกิดขึ้นระหว่าง 150 และ 200°C นอกจากนี้ยังเป็นแหล่งของออกซิเจนบริสุทธิ์ผ่านความผันผวนของความร้อน ออกซิไดซ์กับ BaO ได้อย่างง่ายดาย

2.7 สมบัติทางด้านเชื้อเพลิงที่สำคัญของไบโอดีเซล [27,28]

2.7.1 ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส

เป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบระบบหัวฉีดจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล ยิ่งมีค่ามากยิ่งให้พลังงานความร้อนมากขึ้นตามไปด้วย เป็นสมบัติเฉพาะของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมที่มีความสำคัญด้านการซื้อขาย บ่งบอกถึงปริมาณของพลังงานเชื้อเพลิง แสดงถึงความแตกต่างขององค์ประกอบที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ ดังนั้นความหนาแน่นของไบโอดีเซลมีความแตกต่างอันเนื่องมาจากชนิดของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันต่างๆในน้ำมันพืชหรือสัตว์ รวมทั้งเมทานอลที่เหลือจากกระบวนการผลิตเป็นสาเหตุให้ความหนาแน่นมีค่าต่ำไปโอ

ดีเซลส่วนใหญ่ที่ผลิตได้ในประเทศมีค่าความหนาแน่นอยู่ในเกณฑ์ข้อกำหนดกรมธุรกิจพลังงานคือ 860-900 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรมีค่ามากกว่าน้ำมันดีเซล

2.7.2 ความหนืดจลน์ ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ความหนืดเกี่ยวข้องกับการไหล กำหนดให้ต่ำสุดเป็นระดับเดียวกับน้ำมันดีเซล ส่วนการกำหนดความหนืดสูงสุดที่สามารถนำไปใช้งานได้นั้นมีความสำคัญที่ถูกจำกัดด้วยการออกแบบระบบหัวฉีดเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ในห้องเผาไหม้ เชื้อเพลิงที่มีความหนืดสูงก่อให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ซึ่งนำไปสู่การเกิดตกตะกอนและทำให้เกิดการซึมทะลุของละอองเชื้อเพลิงในกระบอกสูบไปโอดีเซลส่วนใหญ่ที่ผลิตได้ในประเทศมักมีความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส สูงกว่าที่กำหนด เป็นดัชนีแสดงการเสื่อมสภาพของไบโอดีเซลเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน

2.7.3 จุดวาบไฟ

เป็นค่าอุณหภูมิต่ำสุดเมื่อเปลวไฟผ่านเหนือไอของน้ำมัน แล้วทำให้น้ำมันติดไฟ เป็นข้อกำหนดเพื่อความปลอดภัยในการเก็บรักษาและการขนถ่าย ไบโอดีเซลส่วนใหญ่ที่ผลิตได้ในประเทศมีจุดวาบไฟ 142-176 องศาเซลเซียส ซึ่งผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดของกรมธุรกิจพลังงาน ส่วนใหญ่ไบโอดีเซลที่มีจุดวาบไฟต่ำกว่ามาตรฐานเนื่องมาจากขั้นตอนกระบวนการแยกเมทานอลที่เหลือจากปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันไม่สมบูรณ์ในกระบวนการผลิตเมทานอลซึ่งมีค่าจุดวาบไฟเพียง 12.2 องศาเซลเซียส ดังนั้นถ้าตกค้างผสมอยู่ไบโอดีเซลปริมาณมากจะทำให้มีผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์และมีสมบัติการการเผาไหม้ที่ไม่ดี

2.7.4 ปริมาณกำมะถัน

ไบโอดีเซล เป็นเชื้อเพลิงที่มีปริมาณกำมะถันต่ำ เนื่องจากน้ำมันพืชดิบที่ใช้ในการผลิตมักมีองค์ประกอบของกำมะถันต่ำกว่า 15 ส่วนในล้านส่วน องค์ประกอบกำมะถันในน้ำมันเมื่อถูกเผาไหม้จะเปลี่ยนเป็นแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งถูกปล่อยออกมาพร้อมไอเสียจากเครื่องยนต์

2.7.5 ปริมาณกากถ่าน

เป็นการวัดแนวโน้มการตกตะกอนคาร์บอนของเชื้อเพลิง และเป็นการประมาณการของแนวโน้มสำหรับกากของถ่านที่เกิดขึ้น กากถ่านมีผลต่อการอุดตันในหัวฉีดหรือที่ลูกสูบ ทำให้กำลังของเครื่องยนต์ลดลง เครื่องยนต์สกปรกและต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่องบ่อยครั้ง

2.7.6 ค่าซีเทน

ค่าที่ใช้วัดคุณภาพของไบโอดีเซลในด้านคุณสมบัติในการติดไฟคือ ค่าซีเทน (cetane number) ค่าซีเทนยิ่งสูงจะมีค่า Ignition delay สั้น ปริมาณเชื้อเพลิงที่สะสมในห้องเผาไหม้จะลดลงก่อนการลุกติดไฟ ดังนั้นไบโอดีเซลที่มีค่าซีเทนสูงจะทำให้การควบคุมการเผาไหม้ทำได้ดีขึ้นเป็นผลให้ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์เพิ่มสูงขึ้น

2.7.7 เถ้าซิลิเกต

เถ้าซิลิเกตเกิดจากการเผาไหม้ของสารปนเปื้อนในไบโอดีเซล เนื่องมาจากการตกค้างของสบู่ และตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณเถ้าซิลิเกตมีผลต่อการอุดตันในเครื่องยนต์นั้น ไม่นอญญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.8 น้ำ

ปริมาณน้ำในน้ำมันทำให้การเผาไหม้ไม่ดี นอกจากนั้นน้ำในไบโอดีเซลยังเป็นสาเหตุให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสระหว่างน้ำกับเอสเทอร์ เกิดเป็นกรดไขมันอิสระ ซึ่งส่งผลต่อการกัดกร่อนในเครื่องยนต์ และเป็นตัวเร่งให้เกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในถังเก็บน้ำมัน ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้หัวฉีดอุดตัน

2.7.9 สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด

สารปนเปื้อนในไบโอดีเซลส่วนใหญ่เป็นผลมาจากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันและปฏิกิริยาข้างเคียง ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัตถุดิบน้ำมันเริ่มต้น โดยทั่วไปสิ่งปนเปื้อนทั้งหมดจะถูกกำจัดออกจากไบโอดีเซลในขั้นตอนการล้างน้ำ มีผลด้านความเสถียรของไบโอดีเซลระหว่างเก็บรักษา

2.7.10 การกัดกร่อนแผ่นทองแดง

แสดงการกัดกร่อนของน้ำมีต่อโลหะที่ใช้เป็นชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ดีเซล เรือมาจากกรดหรือเบสที่เหลือจากกระบวนการผลิตและปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ ซึ่งมีผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์

2.7.11 เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส

เนื่องจากไบโอดีเซลได้จากน้ำมันพืชจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัวกับออกซิเจนในอากาศ ซึ่งมีผลต่อเสถียรภาพการเก็บ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อไบโอดีเซลมีปริมาณของไตรกลีเซอไรด์สูงจะทำให้มีเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันลดลงอย่างมาก

2.7.12 ค่าความเป็นกรด

เป็นค่าที่บ่งชี้ปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid) ที่เกิดจากการสลายตัวตามธรรมชาติของไขมัน จะเพิ่มขึ้นถ้าผ่านการผลิตที่ไม่เหมาะสมและเกิดการสลายตัวแบบออกซิเดชัน ค่าความเป็นกรดสูงกัดกร่อนในเครื่องยนต์ มีผลต่อการตกตะกอนของระบบน้ำมันเชื้อเพลิงและลดอายุการใช้งานของไส้กรองน้ำมันเชื้อเพลิง

2.7.13 เลขไอโอดีน

แสดงถึงพันธะคู่ในน้ำมัน ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของมันพืชที่ใช้วัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล ค่าไอโอดีนต่ำแสดงถึงการมีสัดส่วนกรดไขมันอิ่มตัวในโครงสร้างไบโอดีเซลสูง ทำให้ไม่มีแนวโน้มในการเกิดออกซิเดชัน นอกจากนี้ค่าไอโอดีนยังมีความสัมพันธ์กับจุดขุ่น ซึ่งแสดงถึงอุณหภูมิที่น้ำมันเริ่มเกิดไข หรือจับตัวเป็นก้อนแข็ง ไบโอดีเซลที่มีค่าไอโอดีนต่ำจะมีค่าจุดขุ่นสูง ซึ่งมีผลต่อการใช้งานสภาพอากาศเย็น

2.7.14 กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์

แสดงถึงพันธะคู่หรือความไม่อิ่มตัวของไบโอดีเซล ซึ่งมีแนวโน้มทำให้เกิดพอลิเมอร์ในเครื่องยนต์ ทำให้เกิดการอุดตัน และการเสื่อมสภาพของน้ำมันเครื่อง ปริมาณกรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซลขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันพืชหรือสัตว์ที่เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล

2.7.15 ปริมาณเมทานอล

เป็นสารตั้งต้นที่เหลือจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งจำเป็นต้องกำจัดออกให้หมดก่อนนำไบโอดีเซลออกจำหน่าย จึงต้องมีปริมาณต่ำในผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล เมทานอลมีค่าจุดวาบไฟต่ำ ถ้ายังมีเมทานอลปะปนอยู่ในไบโอดีเซล จะทำให้ไบโอดีเซลมีค่าจุดวาบไฟต่ำลงด้วย ซึ่งมีผลต่อความปลอดภัยในการเก็บรักษา

การขนส่ง และการนำมาใช้ในเครื่องยนต์ เมทานอลมีความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 5 จะมีผลกระทบต่อค่าซีเทน และความหล่อลื่นของน้ำมัน

2.7.16 ปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ และกลีเซอรินอิสระ

เป็นคุณสมบัติที่แสดงความสมบูรณ์ที่แสดงความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันในกระบวนการผลิต เพื่อเปลี่ยนน้ำมันพืชหรือสัตว์ในรูปของไตรกลีเซอไรด์ไปเป็นไบโอดีเซลและได้กลีเซอรินเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (By-product) ถ้าปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์จะแสดงในรูปของปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ที่สูงได้ และถ้าพบปริมาณกลีเซอรินสูงย่อมแสดงว่ากระบวนการกำจัดกลีเซอรินเกิดไม่สมบูรณ์ เมื่อค่าเหล่านี้สูงจนเกินไปจะเกิดการอุดตันของตัวไส้กรองน้ำมันเชื้อเพลิงและปัญหาอื่นๆ ในระบบการทำงานของเครื่องยนต์ได้ ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันนั้นแสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ.2556 [29]

รายการ	ข้อกำหนด	หน่วย	อัตราสูงต่ำ		วิธีทดสอบ ^{1/}
1	เมทิลเอสเทอร์	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)	ไม่ต่ำกว่า	96.5	EN 14103
2	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 °C	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	860 900	ASTM D1298
3	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 °C	เซนติสโตกส์ (cSt)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	3.5 5.0	ASTM D445
4	จุดวาบไฟ	องศาเซลเซียส	ไม่ต่ำกว่า	120	ASTM D93
5	กำมะถัน	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)	ไม่ต่ำกว่า	0.0010	ASTM D2622
6	กากถ่าน จากร้อยละ 10 ของ ส่วนที่เหลือจากการกลั่น	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.30	ASTM D4530
7	จำนวนซีเทน		ไม่ต่ำกว่า	51	ASTM D613
8	กรดไขมันอิสระ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.02	ASTM D874

ตารางที่ 2.5 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ.2556

(ต่อ)

รายการ	ข้อกำหนด	หน่วย	อัตราสูงต่ำ		
9	น้ำ	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	ไม่สูงกว่า	500	EN ISO 12937
10	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	ไม่สูงกว่า	24	EN 12662
11	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง		ไม่สูงกว่า	หมายเลข 1	ASTM D 130
12	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 °C	ชั่วโมง	ไม่ต่ำกว่า	10	EN 15751
13	ค่าความเป็นกรด	Mg KOH/g	ไม่สูงกว่า	0.50	ASTM D 664
14	ค่าไอโอดีน	g Iodine/100g	ไม่สูงกว่า	120	EN 14111
15	กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)	ไม่สูงกว่า	12.0	EN 14103
16	เมทานอล	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14110
17	โมนอกลิเซอไรด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.70	EN 14105
18	ไดกลีเซอไรด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
19	ไตรกลีเซอไรด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
20	กลีเซอรินอิสระ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.02	EN 14105
21	กลีเซอรินทั้งหมด	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.25	EN 14105
22	โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	ไม่สูงกว่า	5.0	EN 14538
	โลหะกลุ่ม 2 (โซเดียมและแมกนีเซียม)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	ไม่สูงกว่า	5.0	EN 14538

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ.2556 (ต่อ)

รายการ	ข้อกำหนด	หน่วย	อัตราสูงสุด		
23	ฟอสฟอรัส	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)	ไม่สูงกว่า	0.0010	EN 14107
24	จุดขุ่น	องศาเซลเซียส	รายงาน ^{2/}		
25	จุดจุดตันการไหล ที่อุณหภูมิต่ำ	องศาเซลเซียส	รายงาน ^{2/}		
26	สารเติมแต่ง (ถ้ามี)		ให้เป็นไปตามที่ได้รับเห็นชอบ จากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน		

หมายเหตุ 1/ วิธีทดสอบอาจใช้วิธีอื่นที่เทียบเท่าก็ได้ แต่ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนด

2/ ให้ผู้ค้าน้ำมันรายงานต่ออธิบดีเป็นไตรมาส ภายในวันที่ 15 ของเดือนถัดจากเดือนสุดท้ายของไตรมาสนั้น

2.8 ประโยชน์ของไบโอดีเซล [30]

2.8.1 ไบโอดีเซลช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

การใช้ไบโอดีเซลแทนน้ำมันดีเซลนั้นสามารถลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่สิ่งแวดล้อมได้เป็นอย่างมาก จากการวิจัยของ Argonne National Laboratory พบว่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของไบโอดีเซล B100 นั้นต่ำกว่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของน้ำมันดีเซลมากถึงร้อยละ 74 และจากการวิจัยของ California Air Resources Board (CARB) ได้มีการรายงานว่า การปลูกพืชที่ใช้ผลิตน้ำมันนั้น ช่วงเพาะปลูกพืชจะดูดกลืนคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศมาใช้ในการเจริญเติบโต และเมื่อพืชเติบโตแล้วนำไปเป็นไบโอดีเซล การเผาไหม้ไบโอดีเซลจะปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลับสู่สิ่งแวดล้อม แต่ความเข้มข้นสุทธิของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศนั้นจะไม่มี的增加ขึ้นอันเนื่องมาจากพืชที่ใช้ผลิตไบโอดีเซลที่เพาะปลูกไว้ได้นำคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้มาใช้ในการเจริญเติบโตต่อไป ทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์สู่สิ่งแวดล้อมเพียงเล็กน้อย

2.8.2 ไบโอดีเซลช่วยลดปริมาณไอเสียที่ปล่อยออกมาจากเครื่องยนต์

การพัฒนาไบโอดีเซลในปัจจุบันได้แสดงให้เห็นว่าสามารถลดปริมาณการเกิดไอเสียจากเครื่องยนต์อันเนื่องมาจากการที่ไบโอดีเซลนั้นมีปริมาณกำมะถันต่ำ การใช้ไบโอดีเซลยังสามารถลดการเกิดของไนโตรเจนออกไซด์ได้อีกด้วย ซึ่งการใช้งานไบโอดีเซลนั้นจะมีการนำมาผสมกับน้ำมันดีเซล โดยในทุกๆ 1% ของไบโอดีเซลที่ผสมลงไปจะช่วยลดการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ได้ 1% การผสมไบโอดีเซลในระดับร้อยละ 1-2 อีกด้วย

2.8.3 ไบโอดีเซลส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์น้อย

เอกสารนี้เป็นการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซลนั้นจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์อันเนื่องมาจากการเผาไหม้นี้ก่อให้เกิดไอเสียและสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เป็นพิษและอาจเป็นสารก่อมะเร็ง ซึ่งการเปลี่ยนจากการใช้

น้ำมันดีเซลเป็นไบโอดีเซลที่มีอัตราส่วนการผสมที่มาก (B50-B100) ช่วยลดการเกิดมลพิษจากเครื่องยนต์ได้เป็นอย่างมาก แต่ทั้งนี้การที่ร่างกายได้รับไอเสียที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ไบโอดีเซลในปริมาณมากก็สามารถเกิดอันตรายต่อร่างกายได้เช่นเดียวกัน

2.8.4 ไบโอดีเซลปรับปรุงการทำงานของเครื่องยนต์

ไบโอดีเซลนั้นแม้จะใช้งานโดยผสมในอัตราส่วนต่ำ ก็สามารถช่วยเพิ่มการหล่อลื่นของเชื้อเพลิงและเพิ่มค่าซีเทนของเชื้อเพลิงได้ โดยเครื่องยนต์นั้นอาศัยการหล่อลื่นเพื่อลดการเสียดสีของชิ้นส่วนต่างๆ การเพิ่มการหล่อลื่นจึงทำให้เครื่องยนต์ทำงานได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และในไบโอดีเซลนั้นมีปริมาณกำมะถันที่ต่ำทำให้เกิดการกัดกร่อนในตัวเครื่องยนต์น้อยกว่าน้ำมันดีเซล โดยสามารถเห็นผลของการหล่อลื่นได้ตั้งแต่อัตราส่วนการผสมไบโอดีเซลร้อยละ 1 เป็นต้นไป

2.8.5 ไบโอดีเซลใช้งานง่าย

ไบโอดีเซลนั้นสามารถใช้งานได้ง่ายโดยที่แทบจะไม่ต้องมีการปรับเปลี่ยนตัวเครื่องยนต์เลย โดยไบโอดีเซล B20หรือต่ำกว่านั้น ไม่จำเป็นต้องปรับเปลี่ยนเครื่องยนต์แต่อย่างไรก็สามารถใช้งานได้ทันที

2.9 ผลกระทบของไบโอดีเซลที่มีต่อเครื่องยนต์ [31]

เนื่องจากน้ำมันไบโอดีเซลตามมาตรฐานสากลนั้น มีคุณสมบัติเทียบเคียงได้กับน้ำมันดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปิโตรเลียม ดังนั้นผลกระทบต่อเครื่องยนต์ถือว่าไม่มีผลทางด้านลบ หรือในกรณีของเครื่องยนต์เก่าอาจมีความจำเป็นต้องเปลี่ยนซีลยางบางส่วนเท่านั้นเอง โดยทั่วไปการใช้น้ำมันไบโอดีเซลในต่างประเทศนั้นนิยมนำไปผสมเป็นสูตรต่าง ๆ ดังนี้

- B2 (ไบโอดีเซล 2 % : ดีเซล 98 %) มีจำหน่ายทั่วไปในมลรัฐมินนิโซตา ประเทศสหรัฐอเมริกา และจะบังคับใช้ทั้งมลรัฐในปี พ.ศ. 2548
- B5 (ไบโอดีเซล 5% : ดีเซล 95 %) มีจำหน่ายทั่วไปในประเทศฝรั่งเศส โดยกว่าครึ่งหนึ่งของน้ำมันดีเซลที่จำหน่ายเป็นน้ำมันสูตร B5
- B20 (ไบโอดีเซล 20% : ดีเซล 80%) เป็นน้ำมันผสมที่คณะกรรมการไบโอดีเซลแห่งชาติ และสำนักงานป้องกันสิ่งแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา แนะนำให้ใช้ตามกฎหมายยานยนต์เชื้อเพลิงทดแทนของประเทศ ปัจจุบันนิยมใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกา
- B40 (ไบโอดีเซล 40 % : ดีเซล 60%) เป็นสูตรที่ใช้ในรถยนต์ขนส่งมวลชนในประเทศฝรั่งเศส ทั้งนี้เพื่อผลในการลดมลพิษ
- B100 (ไบโอดีเซล 100 %) เป็นน้ำมันไบโอดีเซล 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ใช้ในประเทศเยอรมนีและออสเตรีย โดยได้รับการรับรองจากบริษัทผู้ผลิตรถยนต์รายใหญ่ของประเทศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

K. Masato และคณะ [32] ในปี ค.ศ. 2008 ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันระหว่างน้ำมันถั่วเหลืองกับเมทานอล โดยใช้ Calcium oxide (CaO) Calcium hydroxide (Ca(OH)₂) หรือ Calcium carbonate (CaCO₃) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง และอุณหภูมิ reflux ของเมทานอลพบว่าประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา CaO > Ca(OH)₂ >> CaCO₃ ซึ่งปริมาณของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้เมื่อใช้ CaO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสูงถึงร้อยละ 93 ขณะที่เมื่อใช้ Ca(OH)₂ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 3.5 ชั่วโมง ถึงจะได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เท่ากับเมื่อใช้ CaO สำหรับ CaCO₃ ไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันได้

L. Xuejun และคณะ [33] ในปี ค.ศ. 2008 ศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลืองเป็นไบโอดีเซล โดยใช้ CaO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 12:1 ปริมาณ CaO ร้อยละ 8 อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาที่ 65 องศาเซลเซียส และปริมาณน้ำมันในเมทานอลร้อยละ 2.03 จะให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์มากกว่า 95 ในเวลา 3 ชั่วโมง นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ยังมีอายุการใช้งานมากกว่า K₂CO₃/γ-Al₂O₃ และ KF/γ-Al₂O₃ โดย CaO ยังคงมีประสิทธิภาพดีหลังจากการใช้งานซ้ำๆ จำนวน 20 ครั้ง

B. K. Highina และคณะ [34] ในปี ค.ศ. 2011 ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะโดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันซ้ำ 4 ครั้ง ใช้เวลาทำปฏิกิริยา 25, 50, 75 และ 100 นาที ภายใต้สภาวะปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันที่แตกต่างกัน โดยใช้น้ำมันสบู่ดำ 9.115 กรัม อุณหภูมิ 37, 57 และ 67 °C ปริมาณของ ZnO 0.25, 0.5, 1.0 และ 1.5% อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันที่ 6:1, 8:1, 12:1 และ 24:1 ที่อัตราการปั่นกววนคงที่ พบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ ปริมาณของ ZnO 1% อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 18:1 อุณหภูมิ 67 °C ซึ่งได้ผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดคือ 98%

Z. Kesic และคณะ [35] ในปี ค.ศ. 2012 ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO-ZnO ด้วยวิธีทางเชิงกลสำหรับการผลิตไบโอดีเซล ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO-ZnO ถูกสังเคราะห์โดยการผสม CaO ที่ได้จากการเผา Ca(OH)₂ และ ZnO โดยใช้เครื่องบดแบบลูกบอล (ball milling) และเติมน้ำ หลังจากบดเสร็จจึงนำสารที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 700 °C และนำตัวเร่งที่ได้ไปทดสอบเอกลักษณ์โดยใช้เครื่อง X-ray diffraction (XRD), thermogravimetric analysis (TGA) และ Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยามาทำปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันเปลี่ยนน้ำมันดอกทานตะวันเป็นไบโอดีเซล โดยใช้สภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ อัตราส่วนของน้ำมันดอกทานตะวันต่อเมทานอลที่ 1:10 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2 %wt อัตราส่วนของ CaO:ZnO ที่ 1:2 อุณหภูมิ 60 °C ความดัน 1 บาร์ และเวลาในการทำปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง ซึ่งให้ผลผลิตไบโอดีเซลมากกว่า 90%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S.U. Emin และคณะ [36] ในปี ค.ศ. 2012 ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของน้ำมันเมล็ดทานตะวันกับเมทานอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอลูมิเนียมออกไซด์บนตัวรองรับแคลเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีโซลเจล พบว่าความถี่ในการปั่นกวนโซลเจลนั้นมีผลต่อปริมาณร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้ ซึ่งได้ร้อยละผลผลิตที่สูงสุดเท่ากับ 96.60 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ที่ความเร็วในการปั่นกวน 0.028 วินาที และได้ผลที่ดีที่สุด ที่ความเร็วในการปั่นกวน 0.012 วินาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก ซึ่งได้ร้อยละผลผลิตเท่ากับ 96.60 เช่นกัน

D. Kumar และคณะ [37] ในปี ค.ศ. 2013 ได้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์แคลเซียมออกไซด์ (Zn/CaO) ด้วยวิธี wet chemical ตามด้วยการแคลไซน์ที่ 950 °C โดยปรับเปลี่ยนร้อยละโดยน้ำหนักของซิงค์เป็น 0.25-7 wt% เพื่อใช้ในปฏิกิริยา Transesterification ของน้ำมันเมล็ดฝ้ายกับเมทานอล ผลการทดลองพบว่า ผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้ขึ้นกับอุณหภูมิแคลไซน์ ขนาดผลึกและความแรงของเบส Zn/CaO โดยสถานะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไบโอดีเซลคือปริมาณ Zn 1.5 wt% อุณหภูมิแคลไซน์ 550 °C อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 9:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5 wt% อุณหภูมิ 65 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที จากการศึกษาด้านจลนศาสตร์พบว่าปฏิกิริยา transesterification เมื่อเร่งปฏิกิริยาด้วย Zn/CaO จะเป็นไปตาม pseudo-first-order มีค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy) 43 kJ•mol⁻¹ และ rate constant 0.10 min⁻¹ นอกจากนั้นเมื่อนำ Zn/CaO กลับมาใช้ใหม่จำนวน 5 ครั้ง พบว่าประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญ

T. Witoon และคณะ [38] ในปี ค.ศ. 2014 ได้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้แคลเซียมออกไซด์บนตัวรองรับซิลิกาที่มีรูพรุนขนาดต่างๆเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของน้ำมันปาล์มกับเมทานอล พบว่าการเติมแคลเซียมออกไซด์ลงในรูพรุนนั้นช่วยเพิ่มความแรงในการเป็นเบสให้กับตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งได้ร้อยละผลผลิตสูงสุดที่การเติมแคลเซียมออกไซด์ขนาด 325 ไมโครเมตร ได้ร้อยละผลผลิตเท่ากับ 94.15 ซึ่งเมื่อนำไปทดสอบการใช้งานซ้ำ 5 ครั้งได้ร้อยละผลผลิตเฉลี่ยเท่ากับ 88.87

A.M. Idris [39] ในปี ค.ศ. 2016 ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน โดยการใช้แอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ว่ามีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาอย่างไร โดยทั่วไปจะพบเห็นการใช้แอลกอฮอล์เป็นเมทานอลกับเอทานอลในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน การใช้เมทานอลนั้นใช้งานกันอย่างกว้างขวางเนื่องมาจากการที่มีสายโมเลกุลสั้นและราคาต่ำ การรีไซเคิลของเมทานอลสามารถทำได้ง่ายกว่าเอทานอล และพบว่าการใช้อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันนั้น เมทานอลได้ผลดีที่สุดเท่ากับ 6:1 ส่วนเอทานอลเท่ากับ 9:1 การใช้แอลกอฮอล์ทำให้ความหนืด ความหนาแน่น และจุดวาบไฟของไบโอดีเซลมีค่าต่ำลง และยังพบว่าในปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็ง การใช้ตัวทำละลายร่วม เช่น เฮกเซน เอทานอล ไดมethylซัลฟอกไซด์ (DMSO) และเตตระไฮโดรฟูราน (Tetrahydrofuran) สามารถลดปัญหาการแพร่กระจาย ความเข้ากันได้ของน้ำมันกับแอลกอฮอล์ และช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C.R. Virginia และคณะ [40] ในปี ค.ศ. 2018 ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเหลือทิ้งจากการประกอบอาหาร ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เนื่องจากการที่น้ำมันเหลือทิ้งจำนวนมากก่อให้เกิดปัญหาต่างๆมากมาย จึงมีการนำมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ และใช้แอลกอฮอล์เป็นเมทานอล ใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาในช่วง 50-67.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงภายใต้การปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก โดยไบโอดีเซลที่ได้นำมาทดสอบค่าความหนาแน่นที่ 15 องศาเซลเซียส ได้ความหนาแน่นเท่ากับ 930 kg/m^3 ความหนืดจลนศาสตร์ที่ 40 องศาเซลเซียส เท่ากับ $38.46 \text{ mm}^2/\text{s}$ และค่าความเป็นกรดเท่ากับ 4.19 mg KOH/g

G. Baskar และคณะ [41] ในปี ค.ศ. 2018 ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานาโน ZnO ที่เจือด้วย Ni ซึ่งสังเคราะห์โดยวิธีการตกตะกอนร่วม ใช้สารละลายนิกเกิลอะซิเตต 0.1 M ผสมกับสารละลายซิงค์อะซิเตต 1 M ปั่นกวนอย่างต่อเนื่อง 30 นาที แล้วเติมสารละลายแอมโมเนีย 8% แล้วปั่นกวนต่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมงและเติม NaOH 0.4 M จะได้ตะกอนสีขาวและสีเขียวอ่อน จากนั้นกรองตะกอนแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำไปเผาที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างน้ำมันต่อเมทานอลเท่ากับ 1:8, ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา $11\% \text{ (w/w)}$, อุณหภูมิของปฏิกิริยา 55°C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที จะได้ผลผลิตไบโอดีเซล $95.20\% \text{ (w/w)}$ และตัวเร่งปฏิกิริยานาโน ZnO เจือด้วย Ni มีความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งหมด 3 รอบ ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยานาโน ZnO ที่เจือด้วย Ni จึงมีศักยภาพอย่างมากในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่งและมีความเสถียรสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

J. Nair และคณะ [42] ในปี ค.ศ. 2019 ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากสาหร่าย โดยใช้ $\text{K}_2\text{CO}_3/\text{ZnO}$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและตรวจสอบเอกลักษณ์ของไบโอดีเซล ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{K}_2\text{CO}_3/\text{ZnO}$ ถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีการทำให้เปียกชุ่ม (wet impregnation) แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 600°C จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{K}_2\text{CO}_3/\text{ZnO}$ ไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งมีสภาวะที่เหมาะสม คือ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 7% อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 80°C ความเร็วในการปั่นกวน 450 รอบต่อนาที จะได้ผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุด 77.2% จากนั้นนำไปวิเคราะห์เอกลักษณ์โดยใช้เครื่องมือ thermogravimetric and differential thermal analysis (TGA-DSC), Gas Chromatography analysis and Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy พบว่า แก๊สโครมาโทกราฟี (GC) แสดงผลว่ามีปริมาณกรดโอเลอิกสูงกว่า 90.8% และกรดไลโนเลนิก 0.1% ในไบโอดีเซล การวิเคราะห์การวัดการเปลี่ยนแปลงความจุความร้อนของสารตัวอย่างเทียบกับสารอ้างอิง (DSC) แสดงให้เห็น จุดเดือดของเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 269.5°C และการวิเคราะห์การวัดการเปลี่ยนแปลงมวลเมื่ออุณหภูมิหรือเวลาเปลี่ยนไป (TGA) พบว่า การสลายตัวของน้ำมันเริ่มต้นที่ 360°C และเกิดการสูญเสียน้ำหนักสูงสุดที่อุณหภูมิ 422.5°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D. Wicaksono และคณะ [43] ในปี ค.ศ. 2019 ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO/CaO จากเศษเปลือกไข่สำหรับการผลิตไบโอดีเซล โดย CaO เตรียมจากเปลือกไข่โดยนำเปลือกไข่ไปแช่ในน้ำ ล้างด้วยน้ำกลั่นประมาณ 15-20 นาทีเพื่อขจัดสิ่งสกปรกออก จากนั้นนำเปลือกไข่ไปอบให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำเปลือกไข่ที่แห้งแล้วมาบดและร่อนเพื่อให้ได้ขนาด 35 mesh ทำการเผาเปลือกไข่ 100 กรัม ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลาย Zn (NO₃)₂·4H₂O ผสมกับผง CaO ที่อัตราส่วนของ ZnO/CaO ต่างกันที่ 2, 4, 6 และ 8% แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 °C และทำการเผาที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO/CaO นำตัวเร่งปฏิกิริยาไปทำการวิเคราะห์เอกลักษณ์โดยใช้เครื่องมือ Scanning Electron Microscope (SEM) เพื่อศึกษาโครงสร้างและสัณฐานวิทยา Energy Dispersive X-Ray (EDX) เพื่อตรวจสอบปริมาณของ CaO และ ZnO/CaO และ Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) เพื่อศึกษาพันธะเคมีที่เกิดขึ้น จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO/CaO ไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว พบว่า ZnO 6% บน ZnO/CaO และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3% w/w สามารถให้ผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุด 97.80% จากการวิเคราะห์โดยใช้ SEM-EDX แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO/CaO 6% แสดงสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่หนาแน่นและมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า CaO จากเปลือกไข่

J. Jitjarnong และคณะ [44] ในปี ค.ศ. 2019 ได้ทำการเตรียม calcium oxide (CaO) จากเปลือกไข่ไก่ที่นำไปแคลไซน์ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำ CaO มาทำให้เอิบชุ่ม (impregnation) ด้วย barium (Ba) จากสารละลาย barium chloride แล้วนำไปแคลไซน์ที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ba/CaO ซึ่งจะนำไปใช้ผลิต fatty acid methyl ester (FAME) จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันข้าวโพดกับเมทานอลภายใต้การให้ความร้อนจากรังสีไมโครเวฟที่กำลัง 300W ผลการทดลองสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Ba/CaO มีประสิทธิภาพที่ดีมากในการผลิต FAME โดยได้ yield สูงสุดถึง 94% ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมคือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3wt% อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 นาที เมื่อให้ความร้อนจากรังสีไมโครเวฟที่กำลัง 300W นอกจากนั้นพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยายังคงมีประสิทธิภาพดีเมื่อนำกลับมาใช้ใหม่จำนวนมากกว่า 3 ครั้ง

W.U. Rahman และคณะ [45] ในปี ค.ศ. 2022 ได้ศึกษาการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดยางพาราโดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ตัว คือ CaO ที่ได้จากการแคลไซน์ และ Zn-CaO ที่เตรียมจากการเจือ ZnSO₄ ลงบน CaO ด้วยวิธีการเอิบชุ่ม (wet impregnation) จากการวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยาแสดงให้เห็นว่าการแคลไซน์เปลือกไข่นั้นทำให้ได้ CaO ที่มีรูพรุนมากสามารถดูดซับ Zn ได้มาก ซึ่งจากการทดลองพบว่าผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 80.2% ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-CaO ได้ผลผลิตไบโอดีเซลสูงที่สุดเท่ากับ 94.12% ภายใต้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 55 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 12:1 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 5% w/w เวลาในการทำปฏิกิริยา 1.5 ชั่วโมง (สำหรับ CaO) และ 2 ชั่วโมง (สำหรับ Zn-CaO) เมื่อนำกลับมาใช้ใหม่เป็นจำนวน 4 ครั้ง พบว่า CaO สูญเสียประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วมากเมื่อเทียบกับ Zn-CaO จากนั้นทำการทดสอบไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของเชื้อเพลิงพบว่าผ่านข้อกำหนด ASTM แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพที่ยอมรับได้

W. Xie และคณะ [46] ในปี ค.ศ. 2007 มีการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลือง โดยใช้ Ba-ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่วิริพันธ์ ซึ่งมีการโหลด Ba 2.5 mmol/g บน ZnO และแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 873 K เป็นเวลา 5 ชั่วโมง พบว่าได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม สามารถแสดงความเป็นเบสที่สูงและเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันได้ดี โดยการรีฟลักซ์น้ำมันถั่วเหลืองกับเมทานอลที่ 338 K ภายใต้อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 12:1 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก ได้ผลผลิตไบโอดีเซลเท่ากับ 95.8% จากนั้นได้ใช้เทคนิค XRD, XPS, DTA-TG และ Hammett indicator ในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา

S. Sumari [47] ในปี ค.ศ. 2022 ได้ศึกษาการนำน้ำมันเมล็ดงาเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล งานวิจัยนี้ได้พัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสที่แตกต่างกันด้วยคลื่นอัลตราโซนิกระหว่างปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน งานวิจัยมีวัตถุประสงค์ คือ เพื่อศึกษาประเภทของซีโอไลต์ธรรมชาติที่ใช้ ศึกษาลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา CaO:BaO/ANZ ที่สังเคราะห์ได้ และ ศึกษาประสิทธิภาพของ CaO:BaO/ANZ จากผลการวิจัยพบว่าซีโอไลต์ธรรมชาติจากพื้นที่ทางตอนใต้ของเมือง Malang คือ Mordenite หลังจากซัพซีโอไลต์แล้ว องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้คือ CaO:BaO-9:9/ANZ, CaO:BaO-14:9/ANZ และ CaO:BaO-4:11/ANZ โดยมีพื้นที่ผิว 129.7, 124.6 และ 128.5 ตร.ม./ก. และค่าความเป็นกรด 1.037, 0.254 และ 0.685 มิลลิโมล/กรัม ตามลำดับ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ผลการผลิตไบโอดีเซลดีที่สุดคือ CaO:BaO-9:9/ANZ ซึ่งให้ผลผลิตไบโอดีเซล 73.6% โดยมีความหนาแน่น 889.6 กก./ลบ.ม. ความหนืดจลนศาสตร์ 2.987 cSt และไบโอดีเซลที่ได้นั้นผ่านข้อกำหนด SNI 7182-2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

- 1) เปลือกไข่ไก่ จาก ร้านครัวลุงน้อย เมียงปลาเผา&อาหารตามสั่ง จ.ฉะเชิงเทรา
- 2) น้ำมันถั่วเหลืองอร่า บริษัท น้ำมันพืชไทย (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)
- 3) เมทานอล (Methanol, CH_3OH) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
- 4) กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid, H_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
- 5) โพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide, KI) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
- 6) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide, KOH) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท กรุงเทพเคมี จำกัด
- 7) อะซิโตน (Acetone, $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Lab Scan
- 8) โซเดียมซัลเฟตแอนไฮไดรอส (Sodium sulphate anhydrous, Na_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
- 9) โพแทสเซียมไอโอเดต (Potassium iodate, KIO_3) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
- 10) เอทานอล (Ethanol, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
- 11) ฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein, $\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
- 12) ไดเอทิลอีเทอร์ (Diethyl ether, $(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}$) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
- 13) ไอโอดีน (Iodine, I_2) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
- 14) กรดแอซติก (Acetic acid, CH_3COOH) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
- 15) ซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต (Zinc nitrate hexahydrate, $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
- 16) คลอโรฟอร์ม (Chloroform, CHCl_3) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
- 17) โซเดียมไทโอซัลเฟต (Sodium thiosulfate, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
- 18) โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate, Na_2CO_3) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
- 19) น้ำกลั่น
- 20) น้ำมันพาราฟิน (Paraffin oil) เกรดการค้า
- 21) แป้ง (Starch) ตราหมีคู่ดาว เกรดส่งออก
- 22) แบเรียมคลอไรด์ (Barium Chloride, BaCl_2) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 1) เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (X-ray Diffraction Spectrophotometer, XRD) ยี่ห้อ Siemets รุ่น D8 Advance
- 2) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) LEO รุ่น LEO 1450 VP
- 3) เครื่องฟูเรียทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier-Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR) Perkin Elmer รุ่น FT-IR SPECTRUM GX
- 4) เครื่องฟูเรียทรานสฟอร์ม นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนท์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier-Transform Nuclear Magnetic Resonance Spectrophotometer, FT-NMR) BRUKER รุ่น Advance DPX 300
- 5) เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (X-ray Fluorescence Spectrometer, XRF) ยี่ห้อ Rigaku รุ่น ZSX PrimusIV
- 6) เครื่องหาพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิคบรูเนอร์ เอ็มเมทท์ เทลเลอร์ (Brunauer-Emmett-Teller (BET) Surface Area Analysis instrument)
- 7) Hotplate
- 8) Megnetic stirrer
- 9) Water bath
- 10) เครื่องชั่งไฟฟ้า 2 และ 4 ตำแหน่ง
- 11) ขวดกั้นกลม
- 12) คอนเดนเซอร์
- 13) เทอร์โมมิเตอร์ 100 องศาเซลเซียส
- 14) ขวดรูปกรวย ขนาด 25, 50, 100 และ 250 มิลลิลิตร
- 15) ขวดปริมาตร ขนาด 50, 100 และ 250 มิลลิลิตร
- 16) ปีกเกอร์ ขนาด 25, 50, 100 และ 250 มิลลิลิตร
- 17) กรวยแยก ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 18) บิวเรต ขนาด 50 มิลลิลิตร
- 19) ปีเปต ขนาด 10 มิลลิลิตร
- 20) กระบอกตวง ขนาด 10 และ 50 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าในกรณีใดๆ ก็ตามหากมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 22) แท่งแก้วคน
- 23) ซ้อนตักสาร
- 24) ขาตั้งและที่จับ
- 25) เตาทอบ ยี่ห้อ Memmert
- 26) เตาเผา ยี่ห้อ Thermolyne
- 27) กระจกนาฬิกา
- 28) กระจกครอบ เบอร์ 41
- 29) กระจกยูนิเวอร์แซลอินดิเคเตอร์
- 30) ชุดกรองบุชเนอร์
- 31) กระจกฟอยด์
- 32) หลอดหยด
- 33) โกร่งบดสาร
- 34) ครุชีเปิล
- 35) ตะแกรงร่อน ขนาด 100 เมช
- 36) ถาดอะลูมิเนียม

3.3 วิธีการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่

- 1) การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์และแบเรียมบนแคลเซียมออกไซด์ที่เตรียมได้จากเปลือกไข่ไก่ (Zn-Ba/CaO)
- 2) การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา
- 3) การสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์
- 4) การทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเมทิลเอสเทอร์

3.3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์และแบเรียมบนแคลเซียมออกไซด์ที่เตรียมได้จากเปลือกไข่ไก่ (Zn-Ba/CaO)

ทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO จากเปลือกไข่ไก่ด้วยวิธีการดูดซับ (adsorption) โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) ล้างเปลือกไข่ไก่ด้วยน้ำกลั่น แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) นำเปลือกไข่ไก่มาบดด้วยโม่บดสารให้เป็นผงละเอียด จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นแล้วเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์
- 3) เตรียมสารละลาย $Zn(NO_3)_2$ และ $BaCl_2$ โดยใช้ปริมาณสารตามอัตราส่วนในตารางที่ 3.1 ละลายในน้ำกลั่นอย่างละ 10 มิลลิลิตร จากนั้นผสมสารละลายทั้ง 2 เข้าด้วยกันแล้วเทลงบิวเรต

ตารางที่ 3.1 ปริมาณของ $Zn(NO_3)_2$ และ $BaCl_2$ ที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่ร้อยละโดยโมลของ Zn : Ba ต่างๆ

ตัวเร่งปฏิกิริยา	Zn (%) (% โดยโมล)	Ba (% โดยโมล)	น้ำหนักที่ (g)	
			$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	$BaCl_2 \cdot 2H_2O$
10Zn/CaO	10	0	4.5468	0.0000
7Zn-0.3Ba/CaO	7	0.3	3.1828	0.5336
5Zn-0.5Ba/CaO	5	0.5	2.2734	0.8894
3Zn-0.7Ba/CaO	3	0.7	1.3640	1.2451
1.0Ba/CaO	0	1.0	0.0000	1.7787

- 4) ชั่ง CaO จากเปลือกไข่ไก่ ที่เผาที่อุณหภูมิ 900 °C ปริมาณ 10 กรัม ใส่บีกเกอร์จากนั้นเติมน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตร
- 5) จัดอุปกรณ์ตามรูปที่ 3.1 ค่อยๆหยดสารละลายผสมของ $Zn(NO_3)_2$ และ $BaCl_2$ จากบิวเรตลงในบีกเกอร์ที่มี CaO จากเปลือกไข่ พร้อมปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก หยดจนสารละลายผสมในบิวเรตหมดแล้วปั่นกวนต่อไปที่อุณหภูมิห้อง 3 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.1 แสดงการตั้งอุปกรณ์สำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 6) กรองตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ด้วยชุดกรองลดความดัน แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
- 7) นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่อบแล้วใส่ในครุชีเบล แล้วเผาที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อน 10 °C ต่อนาที เมื่อเผาเสร็จแล้วนำตัวเร่งปฏิกิริยามาเก็บลงในเดซิเคเตอร์เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

3.3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์และแบเรียมบนแคลเซียมออกไซด์ จะถูกนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบและลักษณะความเป็นผลึกด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (X-ray Diffraction Spectrophotometer, XRD) วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องฟูเรียทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier-Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR) การวิเคราะห์พื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องหาพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิคบรูเนอร์-เอมเมทท์-เทลเลอร์ (Brunauer-Emmett-Teller (BET) Surface Area Analysis instrument) และวิเคราะห์ธาตุบนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (X-ray Fluorescence Spectrometer, XRF) ซึ่งเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้แสดงดังรูปที่ 3.2 – 3.6 ตามลำดับ

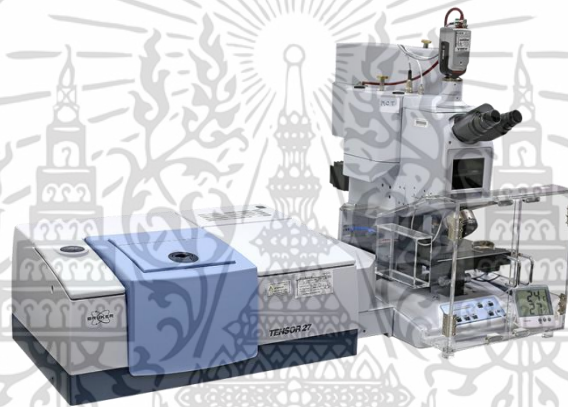


รูปที่ 3.2 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (XRD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



รูปที่ 3.4 เครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR)



รูปที่ 3.5 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องหาพื้นที่ผิวจำเพาะด้วย
เทคนิคบรูเนอร์ เอ็มเมทท์ เทลเลอร์ (BET)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (XRF)

3.3.3 การสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์

ในการทดลองนี้จะทำการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ โดยศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ Zn-Ba/CaO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ อัตราส่วนของ Zn ต่อ Ba ที่เจือปน CaO อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลือง ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยา เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ ขั้นตอนในการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์เป็นดังนี้

- 1) นำน้ำมันถั่วเหลือง 25 กรัม เมทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยาตามปริมาณที่แสดงในตารางที่ 3.2-3.6 ใส่ลงในขวดก้นกลมที่ต่อกับคอนเดนเซอร์ โดยให้ความร้อนจากอ่างน้ำนึ่งพาราฟิน ดังรูปที่ 3.6 ทำการปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 65 ± 5 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 3.7 แสดงการตั้งอุปกรณ์สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) เมื่อครบเวลาของปฏิกิริยา ทำการกรองแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกด้วยชุดกรองลดความดัน
- 3) เทของผสมที่กรองได้ใส่ในกรวยแยกแล้วตั้งทิ้งไว้เพื่อให้เกิดการแยกชั้น โดยชั้นบนจะเป็นเมทิลเอสเทอร์ซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวสีเหลืองใสคล้ายน้ำมัน ส่วนชั้นล่างเป็นชั้นของกลีเซอรอลมีลักษณะเป็นของเหลวหนืดสีน้ำตาลเข้ม



รูปที่ 3.8 แสดงการแยกชั้นของเมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอลในกรวยแยก

- 4) โขแยกชั้นกลีเซอรอลออก แล้วล้างชั้นเมทิลเอสเทอร์ด้วยน้ำกลั่นจนกว่าจะได้ชั้นเมทิลเอสเทอร์ที่มีลักษณะเป็นของเหลวสีเหลืองขุ่นเล็กน้อยและมีสภาพเป็นกลางโดยทดสอบด้วยกระดาษยูนิเวอร์แซล-อินดิเคเตอร์
- 5) เติมแอนไฮดรัสโซเดียมซัลเฟต (Anhydrous Sodium Sulfate, Na_2SO_4) เพื่อทำการดูดน้ำที่ปนอยู่กับเมทิลเอสเทอร์ จากนั้นทำการกรองแอนไฮดรัสโซเดียมซัลเฟตออกด้วยชุดกรองแบบลดความดัน จะได้เมทิลเอสเทอร์ที่มีสีเหลืองใส
- 6) นำเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ไปชั่งน้ำหนักและคำนวณหาร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ ดังสมการที่ 3.1

$$\text{ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์} = \frac{\text{น้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้}}{\text{น้ำหนักของน้ำมันถั่วเหลือง}} \times 100 \quad (3.1)$$

ในการทดลองตามตารางที่ 3.2 เป็นการศึกษาผลของอัตราส่วน Zn:Ba ของตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เพื่อคัดเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วน Zn:Ba ที่เหมาะสม ซึ่งให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุด ไปศึกษาอิทธิพลของตัวแปรอื่นๆต่อไป ดังแสดงในตารางที่ 3.2 - 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรในการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของ Zn:Ba ของตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO จากเปลือกไข่ที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

อัตราส่วนของ Zn:Ba (%)	อัตราส่วนโดยโมลของ เมทานอลต่อน้ำมัน	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)
10:0	9:1	3	65 ± 5	2
7:0.3				
5:0.5				
3:0.7				
0:1				

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรในการศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

อัตราส่วนของ Zn:Ba (%)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%)	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)
เลือกตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วน Zn:Ba ที่ให้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์สูงสุดจากตารางที่ 3.2	0.5	9:1	65 ± 5	2
	1			
	2			
	3			
	4			
5				

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรในการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

อัตราส่วนของ Zn:Ba (%)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%)	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)
เลือกตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วน Zn:Ba ที่ให้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์สูงสุดจากตารางที่ 3.2	เลือกปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุดจากตารางที่ 3.3	6:1	65 ± 5	2
		9:1		
		12:1		
		15:1		

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรในการศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

อัตราส่วนของ Zn:Ba (%)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%)	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)
เลือกตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วน Zn:Ba ที่ให้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์สูงสุดจากตารางที่ 3.2	เลือกปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุดจากตารางที่ 3.3	เลือกอัตราส่วนที่ให้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์สูงสุดจากตารางที่ 3.4	65 ± 5	1
				2
				3
				4

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรในการศึกษาผลของการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

อัตราส่วนของ Zn:Ba (%)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%)	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	จำนวนการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ (รอบ)
เลือกตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วน Zn:Ba ที่ให้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์สูงสุดจากตารางที่ 3.2	เลือกปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์สูงสุดจากตารางที่ 3.3	เลือกอัตราส่วนที่ให้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์สูงสุดจากตารางที่ 3.4	65 ± 5	เลือกเวลาที่	1
				เหมาะสม	2
				ซึ่งให้ร้อยละ	3
				เมทิลเอสเทอร์สูงสุดจาก	4

3.3.4 การทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเมทิลเอสเทอร์

- 1) ค่าความร้อน (Heating value) ตามมาตรฐาน ASTM D2015
- 2) ค่าความเป็นกรด (Acid value)
- 3) เลขไอโอดีน (Iodine value)
- 4) ศึกษาถึงลักษณะโครงสร้างทางเคมีของไบโอดีเซลโดยเครื่องฟูเรียทรานสฟอร์มมินิกเคิลียร์แมกเนติก-เรโซแนนซ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier-Transform Nuclear Magnetic Resonance Spectrophotometer, FT-NMR) และเครื่องฟูเรียทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

เอกซสาร (Fourier-Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR) อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4.1 การวิเคราะห์ค่าความร้อน (Heating value) ตามมาตรฐาน ASTM D2015

การทดสอบด้วยวิธีนี้ใช้เพื่อหาค่าความร้อนของตัวอย่างผงของแข็งและของเหลว เช่น น้ำมัน ถ่านหิน และอื่นๆ ที่เป็นระบบ Isoperibol และ dynamics ด้วยเครื่องวิเคราะห์พลังงานความร้อน (Bomb Calorimeter) ดังรูปที่ 3.9 มีหลักการทำงานโดยจะใส่ตัวอย่างลงในลูกบอมบ์เพื่อเผาจนตัวอย่างลุกไหม้ให้ความร้อนออกมา โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2015

ขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้

- 1) ชั่งตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลใส่ถ้วยตัวอย่างประมาณ 0.5 กรัม จดบันทึกน้ำหนักที่ชั่งไว้
- 2) ใช้เชือกผูกกับเส้นลวดของแท่นตัวอย่างแล้วจุ่มปลายเชือกลงในตัวอย่างน้ำมัน
- 3) นำแท่นตัวอย่างใส่ลงในลูกบอมบ์วิเคราะห์ตัวอย่าง
- 4) เปิดวาล์วถังแก๊สออกซิเจนหลังจากที่อุณหภูมิของ Cooler มีค่าเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส
- 5) เปิดเครื่อง Bomb Calorimeter
- 6) ใส่น้ำหนักตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลที่จดบันทึกไว้ จากนั้นกดปุ่มให้เครื่องเริ่มการทดสอบ เมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบเครื่องจะรายงานผลออกมาอัตโนมัติ



รูปที่ 3.9 เครื่องวิเคราะห์พลังงานความร้อน (Bomb Calorimeter)

3.3.4.2 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (Acid value)

วิธีทำ

- 1) ใส่เอทานอล (Ethanol) กับไดเอทิลอีเทอร์ (Diethyl ether) อย่างละ 10 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ เขย่าให้เข้ากัน
- 2) เติมฟีนอล์ฟทาลีน (phenolphthalein) 3-4 หยด แล้วทำให้ตัวละลายเป็นกลางด้วยการเติมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) 0.01 โมลาร์ จนเห็นเป็นสีชมพูอ่อนๆ (ไม่ต้องจดปริมาตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) นำขวดดังกล่าวไปเติมไปโอติเซลที่สังเคราะห์ขึ้นปริมาณ 5 กรัมลงไป ทำการเขย่าและไทเทรตด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) 0.01 โมลาร์ จนถึงจุดยุติซึ่งได้สารละลายสีชมพูอ่อนคงตัว (5-10 นาที)
- 4) จดปริมาตรโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต แล้วนำไปคำนวณหาค่าความเป็นกรด ดังสมการที่ 3.2

วิธีการคำนวณ

ให้ g เป็นจำนวนกรัมของน้ำมันที่ใช้

ให้ V เป็นจำนวนมิลลิลิตรของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต

จำนวนโมลของ KOH ที่ใช้ = $0.01V / 1000$

จำนวนมิลลิกรัมของ KOH = $(0.01V / 1000) \times MW_{\text{KOH}} \times 1000$

$$= (0.01V) \times 56$$

$$\text{ค่าความเป็นกรด (mg/g)} = \frac{(0.01V) \times 56}{g} \quad (3.2)$$

3.3.4.3 การวิเคราะห์หาเลขไอโอดีน (Iodine value)

1) การเตรียมสารสำหรับการวิเคราะห์หาเลขไอโอดีน

1.1 การเตรียมสารละลายฮานส์ไอโอดีน

- ละลายไอโอดีน 6.6 กรัม ในกรดอะซิติกกลั่น 500 มิลลิลิตร นำไปอุ่นให้ความร้อนเพื่อช่วยให้ไอโอดีนละลายดีขึ้น เก็บสารละลายที่ได้ไว้ในขวดสีชาที่มีฝาปิดแน่น

1.2 สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไอโอเดต (KIO₃) 0.10 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

- ชั่งโพแทสเซียมไอโอเดต (KIO₃) ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์
- ชั่งโพแทสเซียมไอโอเดต (KIO₃) 2.41 ± 0.1 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร เทสารละลายลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

1.3 สารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต (Na₂S₂O₃) 0.20 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร

- ละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (Na₂S₂O₃) 15.8000 กรัม ในน้ำกลั่น 75 ± 25 มิลลิลิตร จากนั้นเติมโซเดียมคาร์บอเนต (Na₂S₂O₃) 0.10 ± 0.01 กรัม เทสารละลายในขวดวัดปริมาตร ขนาด 500

มิลลิลิตร ทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เก็บสารละลายนี้ไว้ในขวดสีชา ทิ้งไว้อย่างน้อย 4 วันก่อนทำการตรวจสอบความเข้มข้น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 น้ำแป้ง

- ชั่งแป้งมัน 1 ± 0.5 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 5-10 มิลลิลิตร คนสารละลายให้เข้ากัน จากนั้นเติม น้ำกลั่นเพิ่มอีก 25 ± 5 มิลลิลิตร กวนสารละลายตลอดเวลาแล้วเทสารละลาย ลงในน้ำกลั่นที่ต้มเดือดปริมาตร 1 ลิตร แล้วต้มสารละลายต่อให้เดือดอีก 4-5 นาที ทิ้งให้ เย็นแล้วเก็บในขวดเก็บสารแช่ไว้ในตู้เย็น น้ำแป้งที่เตรียมได้จะใช้ภายในวันที่เตรียมเท่านั้น

2) วิธีเทียบมาตรฐานของสารละลาย

2.1 หาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)

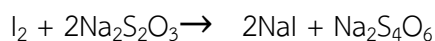
- ปิเปตสารละลายมาตรฐานปรัสมุมิไอโอเดต (IO_3^-) เข้มข้น 0.100 M มาจำนวน 25.00 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
- เติมสารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เข้มข้น 1 M ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงไปในขวดรูปชมพู่ สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง ให้รีบนำไปไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตเข้มข้น 0.200 M ซึ่งไทเทรตเตรียมไว้แล้ว ไทเทรตจนกระทั่งสารละลายสีเหลืองกลายเป็นสีเหลืองอ่อน
- เติมน้ำแป้งเข้มข้น 1 % w/v ลงไป 4 มิลลิลิตร จะได้สารละลายสีน้ำเงินแกมม่วง ไทเทรตต่อจนกระทั่งสีน้ำเงินแกมม่วงเปลี่ยนเป็นใสไม่มีสี จึงหยุดการไทเทรต และจดบันทึกปริมาตรสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ไป ให้ทำซ้ำทั้งหมด 2 ครั้ง และคำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต

3) วิธีการวิเคราะห์หาเลขไอโอดีน

- 3.1 นำขวดรูปชมพู่ที่ล้างด้วยคลอโรฟอร์มแล้วนำไปซังไปโอดิเซลที่สังเคราะห์ได้ ปริมาณ 1.000 กรัม
- 3.2 เติมคลอโรฟอร์ม 10 มิลลิลิตร แล้วปิเปตสารละลายฮานส์ไอโอดีน 20 มิลลิลิตร ลงไปในขวดรูปชมพู่แล้วทำการเขย่าให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ในที่มืด 45 นาที (ให้ทำขวดเปรียบเทียบแบบลงค์ ไปพร้อมกัน โดยทำเช่นเดียวกันแต่ไม่ใส่ไปโอดิเซล)
- 3.3 เติมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ 10% โดยน้ำหนัก ลงไป 10 มิลลิลิตร แล้วเขย่าเพื่อให้ทำปฏิกิริยากับฮานส์ไอโอดีนที่เหลืออยู่ในชั้นคลอโรฟอร์มซึ่งจะได้ไอโอดีนออกมาอยู่ในชั้นของโพแทสเซียมไอโอไดด์ (เห็นสารละลายเป็นสีน้ำตาลเข้ม)
- 3.4 ล้างไอโอดีนที่ติดอยู่ที่ขวดรูปชมพู่และฝาด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 25 มิลลิลิตร แล้วรีบปิดฝา
- 3.5 นำไปไทเทรตกับโซเดียมไทโอซัลเฟตจนสีของไอโอดีนจางลง (เห็นเป็นสีน้ำตาลจางๆอมเหลือง) จากนั้นจึงเติมน้ำแป้งลงไปประมาณ 4 มิลลิลิตร สารละลายจะเป็นสีน้ำเงินแล้วไทเทรตต่อจนสีน้ำเงินหายไป จดปริมาตรไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการคำนวณ



ให้ A = มิลลิลิตรของโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตขวดตัวอย่าง

B = มิลลิลิตรของโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตขวดเปรียบเทียบ

จากสมการ 1 โมลของไอโอดีน = 2 โมลของโซเดียมไทโอซัลเฟต

ดังนั้น จำนวนโมลของไอโอดีนที่ถูกดูดด้วยไขมัน = $\frac{1}{2} \left[\frac{0.2(B-A)}{1000} \right]$

น้ำหนักโมเลกุลของไอโอดีน = 254

จำนวนกรัมของไอโอดีนที่ทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ของไบโอดีเซล = $\frac{1}{2} \left[\frac{0.2(B-A)}{1000} \right] \times 254$
 $= \frac{2.54(B-A)}{100}$

เนื่องจาก เลขไอโอดีน = จำนวนกรัมของไอโอดีนที่ทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ในไบโอดีเซล 100 กรัม

g = จำนวนกรัมของไบโอดีเซลที่ใช้

ดังนั้น เลขไอโอดีน = $\frac{2.54(B-A)}{100} \times \frac{100}{g}$
 $= \frac{2.54(B-A)}{g}$

(3.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์และแบเรียมบนแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ (Zn-Ba/CaO) โดยการนำเสนอผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลองของงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 4 ตอน คือ ตอนที่ 1 ศึกษาลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ ได้แก่ โครงสร้างผลึก องค์ประกอบของธาตุ และพื้นที่ผิวจำเพาะ ตอนที่ 2 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของ Zn ต่อ Ba ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลือง เวลาในการทำปฏิกิริยา และการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ ตอนที่ 3 ทดสอบสมบัติทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซล ได้แก่ ค่าความเป็นกรด เลขไอโอดีน และค่าความร้อน และตอนที่ 4 ศึกษาลักษณะโครงสร้างทางเคมีของไบโอดีเซล โดยใช้เครื่องฟูเรียร์สทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR) และเครื่องฟูเรียร์สทรานส์ฟอร์มนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (FT-NMR)

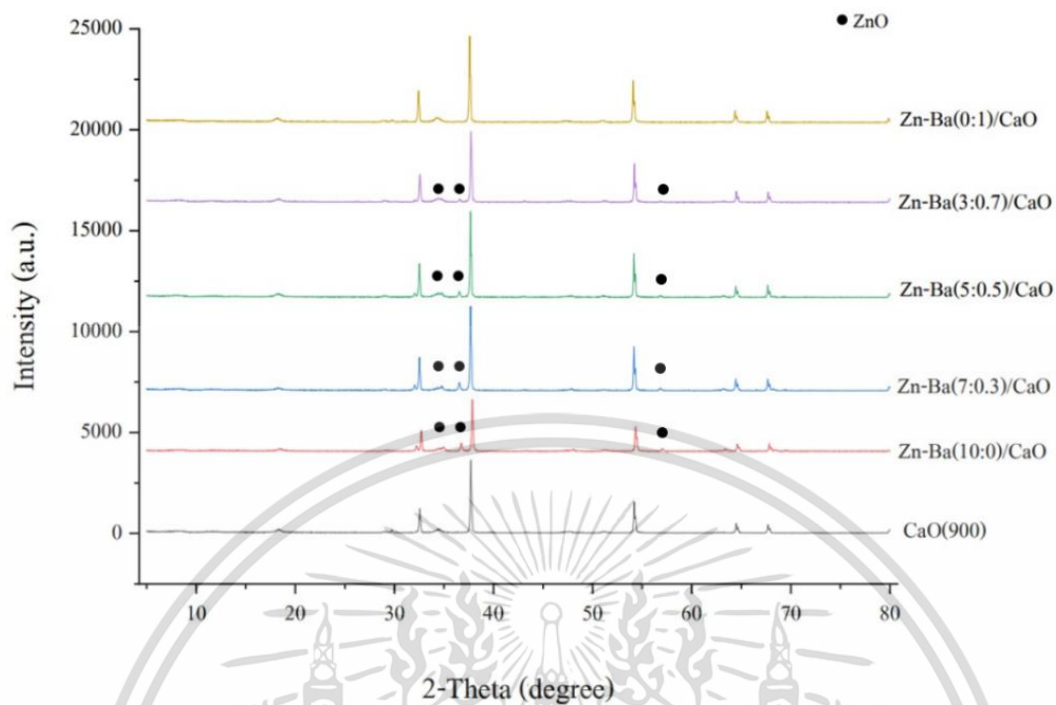
4.1 การศึกษาลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา

4.1.1 โครงสร้างและความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ซิงค์และแบเรียมบนแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ (Zn-Ba/CaO) ซึ่งผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราส่วนโดยโมลของซิงค์ต่อแบเรียม (Zn:Ba) เป็น 10:0, 7:0.3, 5:0.5, 3:0.7 และ 0:1

การศึกษาโครงสร้างและความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์และแบเรียมบนแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ (Zn-Ba/CaO) ที่อัตราส่วนโดยโมล Zn:Ba ต่างๆ เทียบกับ CaO ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD) แสดงผลการวิเคราะห์ในรูปแบบที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



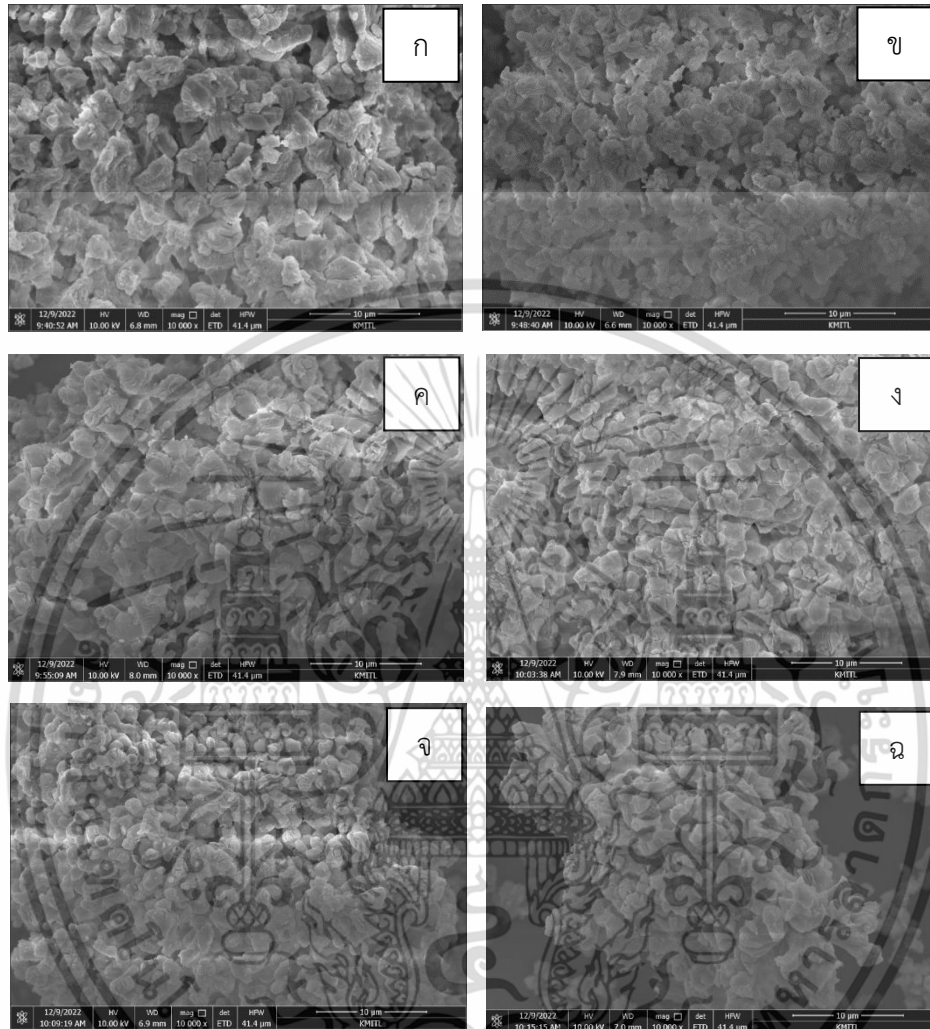
รูปที่ 4.1 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์เทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์และแบเรียมบนแคลเซียมออกไซด์ที่อัตราส่วนโดยโมล Zn:Ba เป็น 10:0, 7:0.3, 5:0.5, 3:0.7 และ 0:1

จากรูปที่ 4.1 เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ที่ได้จากการแคลไซน์เปลี่ยนไฮโดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 900 °C และ Zn-Ba/CaO ที่อัตราส่วนโดยโมลของ Zn:Ba ต่างๆ ทุกตัวเร่งปฏิกิริยาปรากฏพีกที่มีความแหลมคม (sharp) แสดงให้เห็นถึงความเป็นผลึกสูง โดย CaO จากเปลี่ยนไฮโดรอกไซด์พบพีกเอกลักษณ์ที่มุม 2θ เท่ากับ 17°, 32°, 37°, 53°, 64° และ 67° สำหรับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ในทุกอัตราส่วน Zn:Ba มีความคล้ายคลึงกับ CaO แต่จะมีพีกเอกลักษณ์ที่มี intensity ต่ำของ ZnO ปรากฏขึ้นที่มุม 2θ เท่ากับ 34°, 36° และ 57° สำหรับ Zn-Ba/CaO ที่มีอัตราส่วน Zn:Ba ตั้งแต่ 3:0.7 จนถึง 10:0 ซึ่งพีกเอกลักษณ์ของ ZnO จะมี intensity เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของ Zn ที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาพีกเอกลักษณ์ของ BaO (ซึ่งจะพบที่มุม 2θ เท่ากับ 23°, 26°, 27°, 31° และ 35°) จะไม่ปรากฏบนรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ Zn-Ba/CaO ในทุกอัตราส่วน ซึ่งอาจเป็นเพราะ Ba ที่ไหลตกลงบน CaO มีปริมาณน้อยหรือการกระจายตัวของ BaO เป็นไปอย่างทั่วถึงบน CaO [47]

4.1.2 สันฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา

การศึกษาสันฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้นำตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์และแบเรียมบนแคลเซียมออกไซด์ (Zn-Ba/CaO) ที่อัตราส่วนโดยโมล Zn:Ba ที่อัตราส่วน 10:0, 7:0.3, 5:0.5, 3:0.7 และ 0:1 และ CaO จากเปลี่ยนไฮโดรอกไซด์มาทำการศึกษาลักษณะพื้นผิวและธาตุองค์ประกอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ (Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-Ray Spectrometer, SEM-EDS) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.2



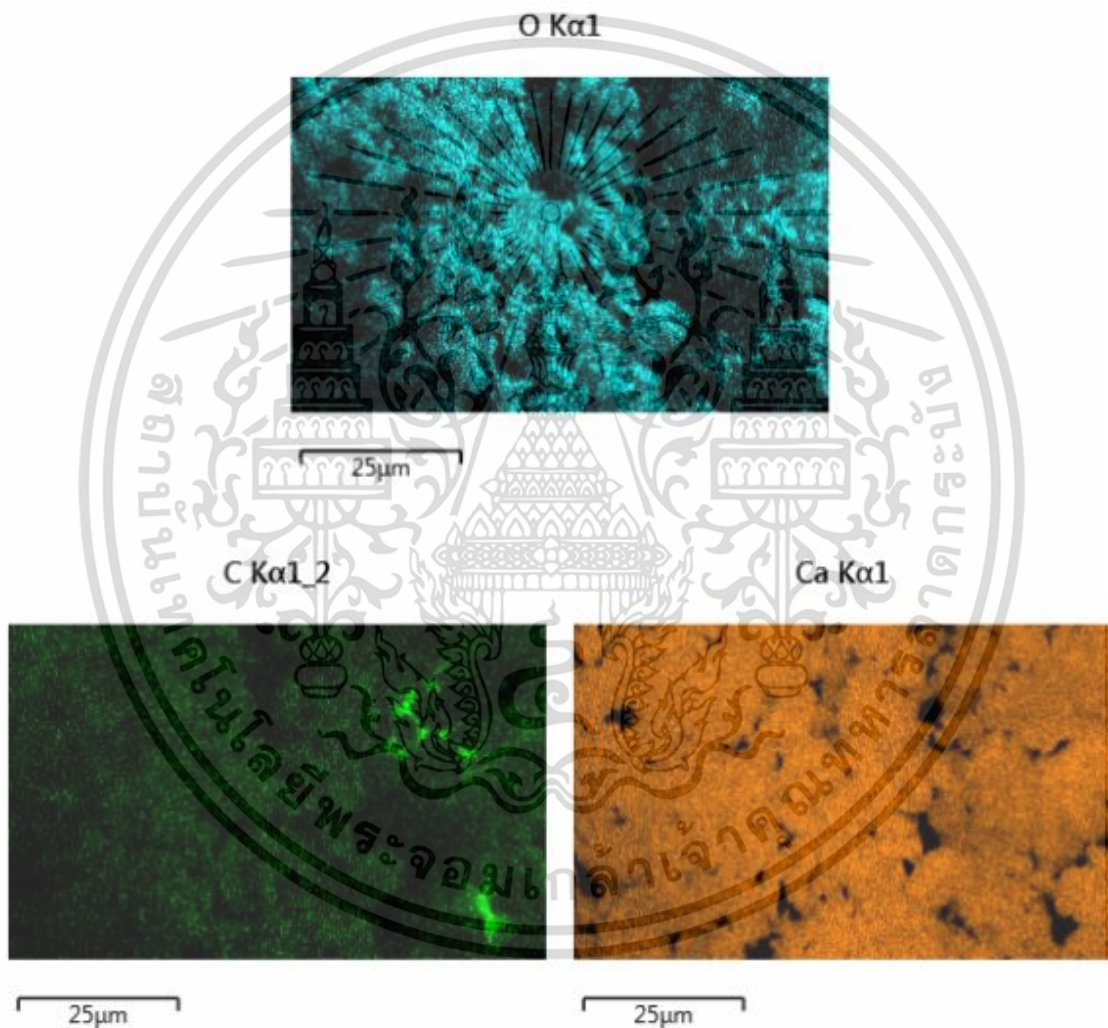
รูปที่ 4.2 SEM image ของตัวเร่งปฏิกิริยา (กำลังขยาย 10,000 เท่า)

- ก) CaO (900°C) ข) Zn-Ba(10:0)/CaO ค) Zn-Ba(7:0.3)/CaO
 ง) Zn-Ba(5:0.5)/CaO จ) Zn-Ba(3:0.7)/CaO ฉ) Zn-Ba(0:1)/CaO

จากรูปที่ 4.2 (ก) แสดงสัณฐานวิทยาของ CaO ที่ได้จากการแคลไซน์เปลือกไข่ไก่ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีลักษณะอนุภาคขนาดใหญ่ โครงสร้างเกาะกันเป็นกลุ่ม พื้นผิวมีลักษณะเรียบและมีรูพรุนสูงซึ่งเกิดจากการสลายตัวของสารอินทรีย์จากเปลือกไข่ไก่ระหว่างการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900°C และเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของ CaCO_3 เป็น CaO เมื่อพิจารณาสัณฐานวิทยาของ Zn-Ba/CaO (รูปที่ 4.2 (ข-ฉ)) พบว่าไม่แตกต่างจาก CaO โดยมีลักษณะอนุภาคขนาดใหญ่ รวมตัวกันเป็นก้อน พื้นผิวมีความขรุขระกว่า CaO สำหรับ Zn-Ba/CaO ที่มีอัตราส่วน Zn:Ba เป็น 10:0 พบว่ามีผลึกของ ZnO ไปเกาะที่ผิวของ CaO ทำให้พื้นผิวมีความหนาแน่น และรูพรุนลดลง แต่เมื่อลดอัตราส่วนของ Zn:Ba เป็น 7:0.3 และ 5:0.5 ลักษณะพื้นผิวมีความ

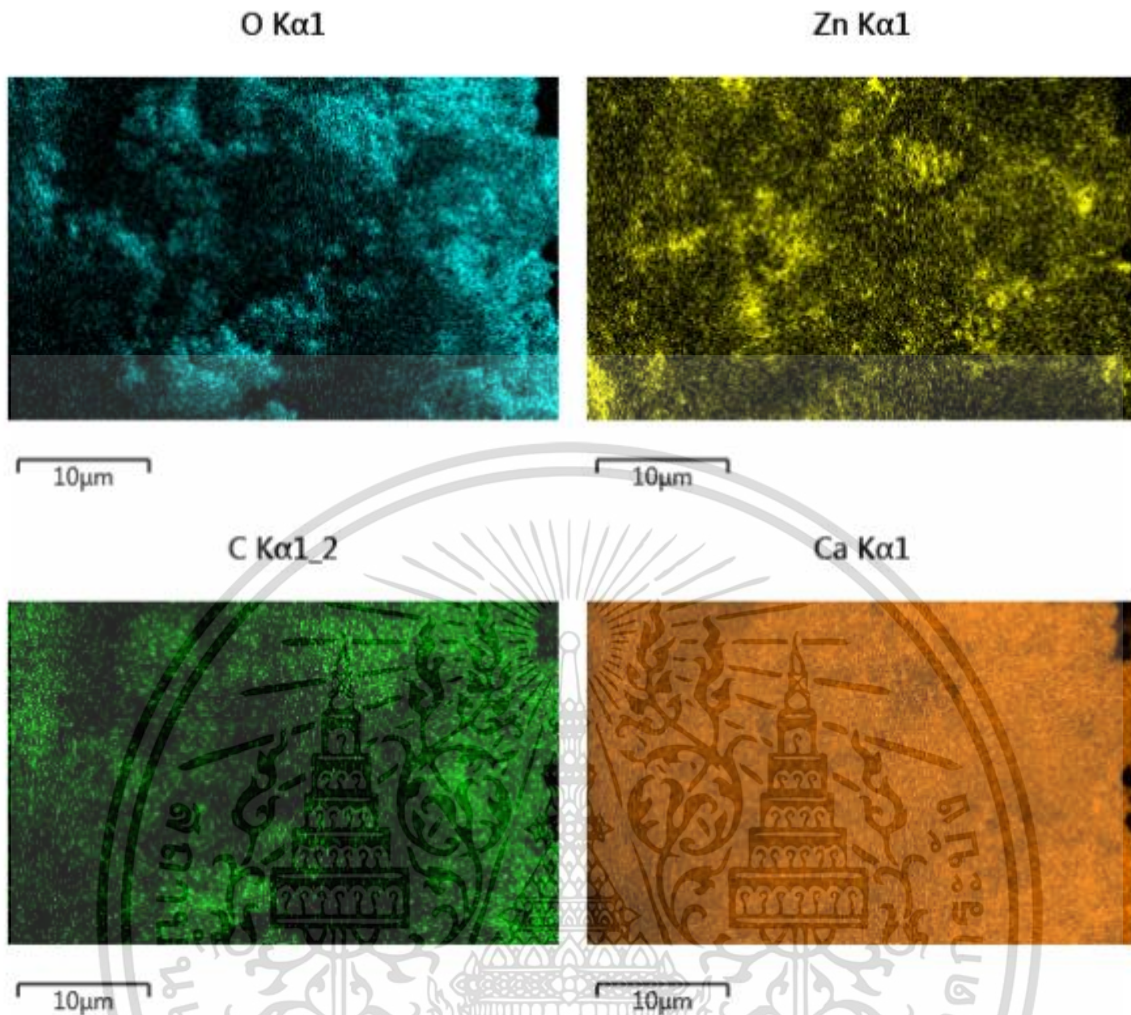
หนาแน่นลดลง และการกระจายรูพรุนเพิ่มขึ้น สำหรับอัตราส่วน Zn:Ba เป็น 3:0.7 และ 0:1 พบว่าผลึกมีการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนมากขึ้น

นอกจากนั้น ยังได้ทำการศึกษารูปร่างและลักษณะการกระจายตัวของธาตุต่างๆ บนตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ไก่และตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์และแบเรียมบนแคลเซียมออกไซด์ Zn-Ba/CaO ที่อัตราส่วนโดยโมลของซิงค์และแบเรียมเป็น 10:0, 7:0.3, 5:0.5, 3:0.7 และ 0:10 โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ติดตั้งร่วมกับเครื่องเอกซเรย์สเปกโตรสโคปแบบกระจายพลังงาน (Scanning Electron Microscope/ Energy Dispersive X-ray Spectrometer, SEM/EDX) ดังรูปที่ 4.3–4.8



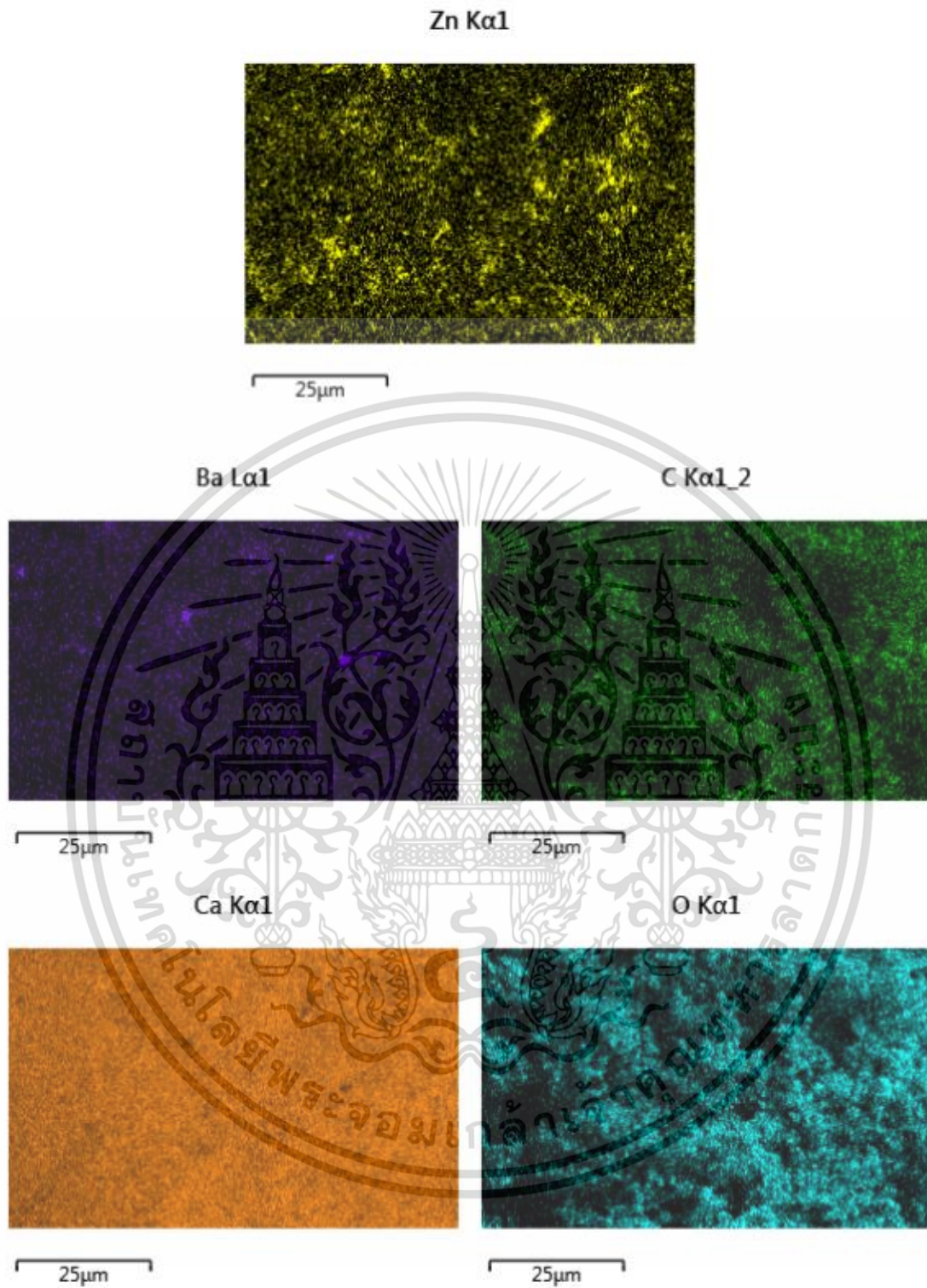
รูปที่ 4.3 ลักษณะการกระจายตัวของธาตุต่างๆ บนตัวเร่งปฏิกิริยา CaO จากเปลือกไข่ไก่ โดยวิเคราะห์จากเครื่อง SEM/EDX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



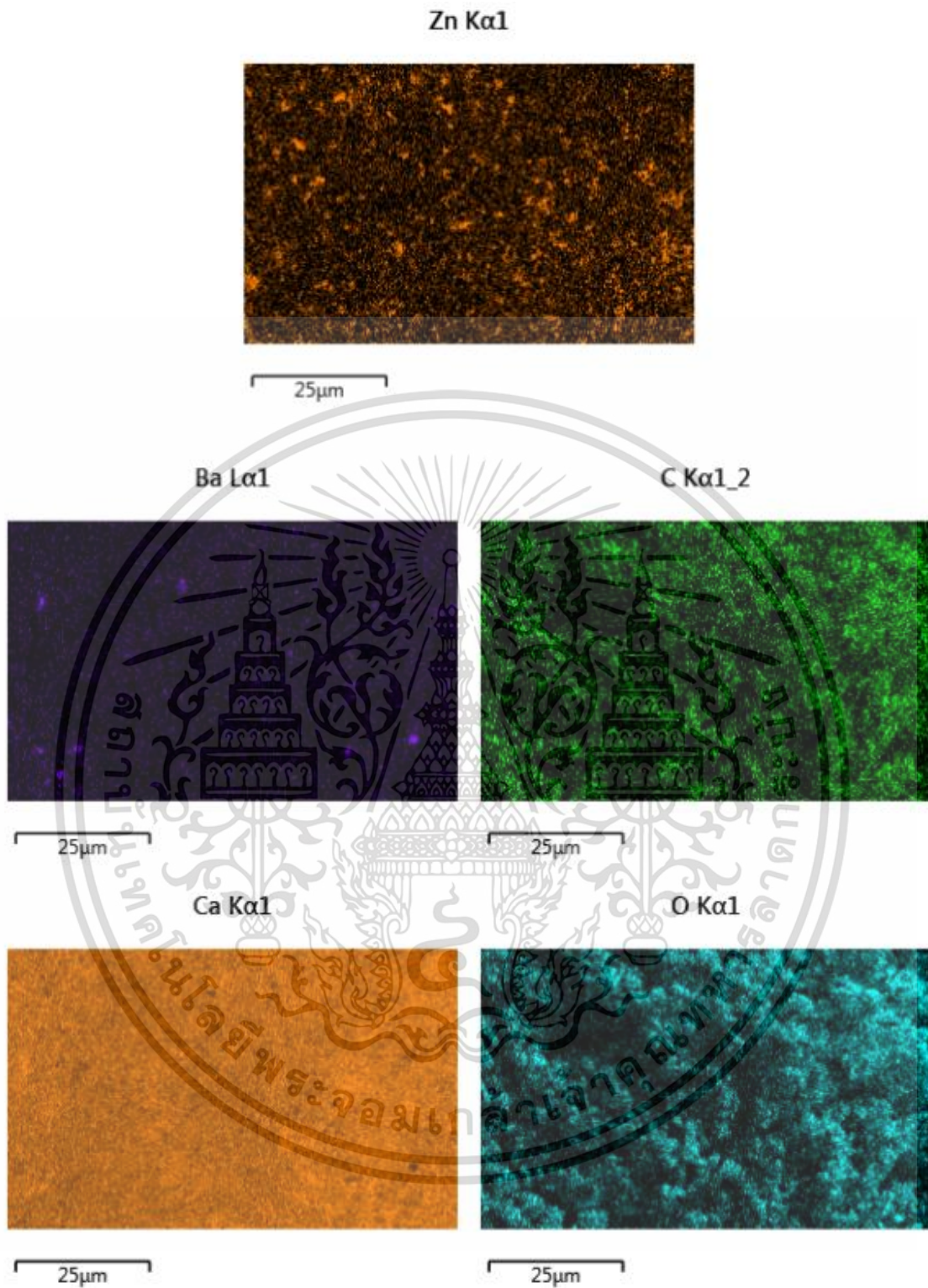
รูปที่ 4.4 ลักษณะการกระจายตัวของธาตุต่างๆ บนตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่อัตราส่วน Zn:Ba เท่ากับ 10:0 โดยวิเคราะห์จากเครื่อง SEM/EDX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



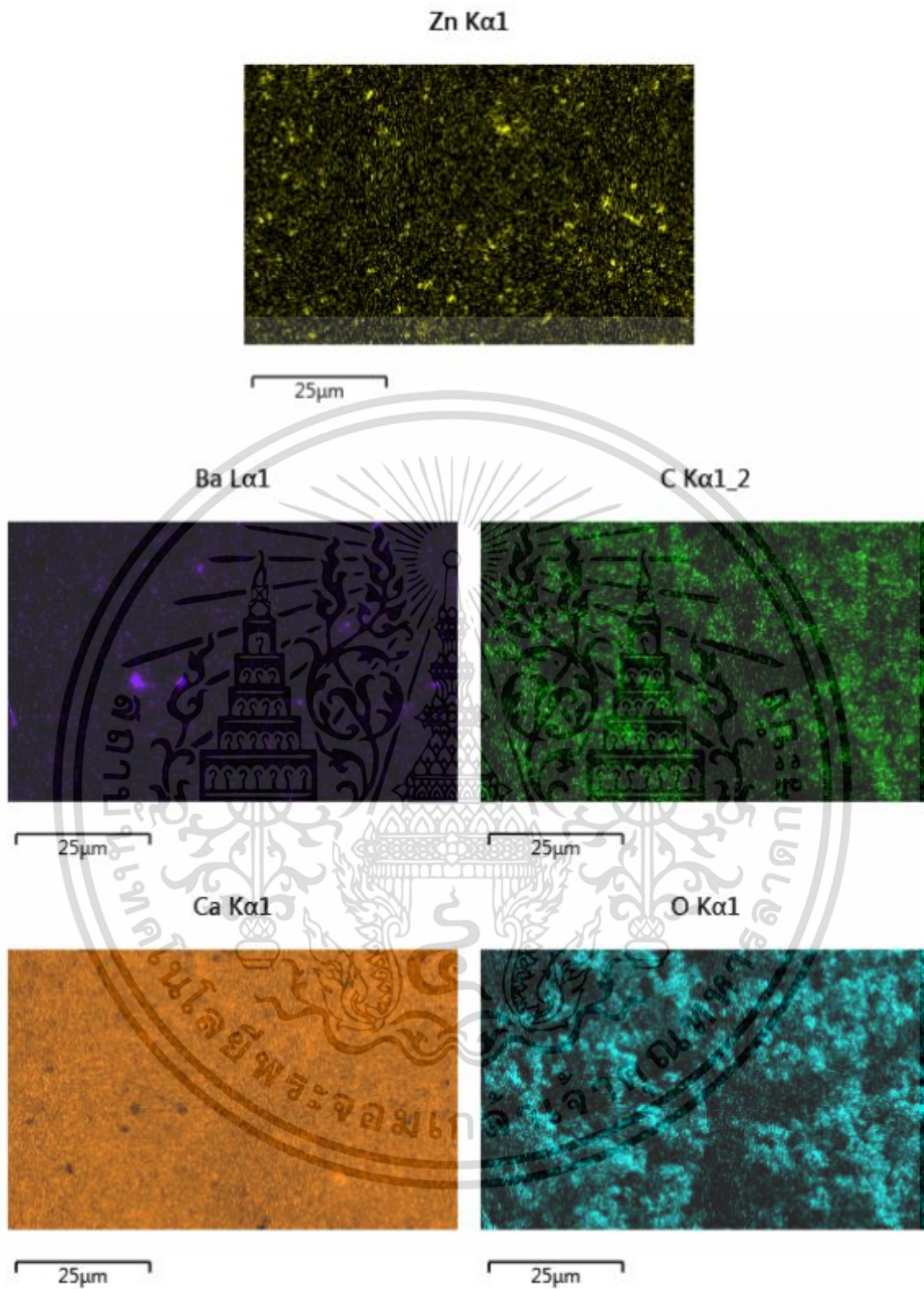
รูปที่ 4.5 ลักษณะการกระจายตัวของธาตุต่างๆ บนตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่อัตราส่วน Zn:Ba เท่ากับ 7:0.3 โดยวิเคราะห์จากเครื่อง SEM/EDX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



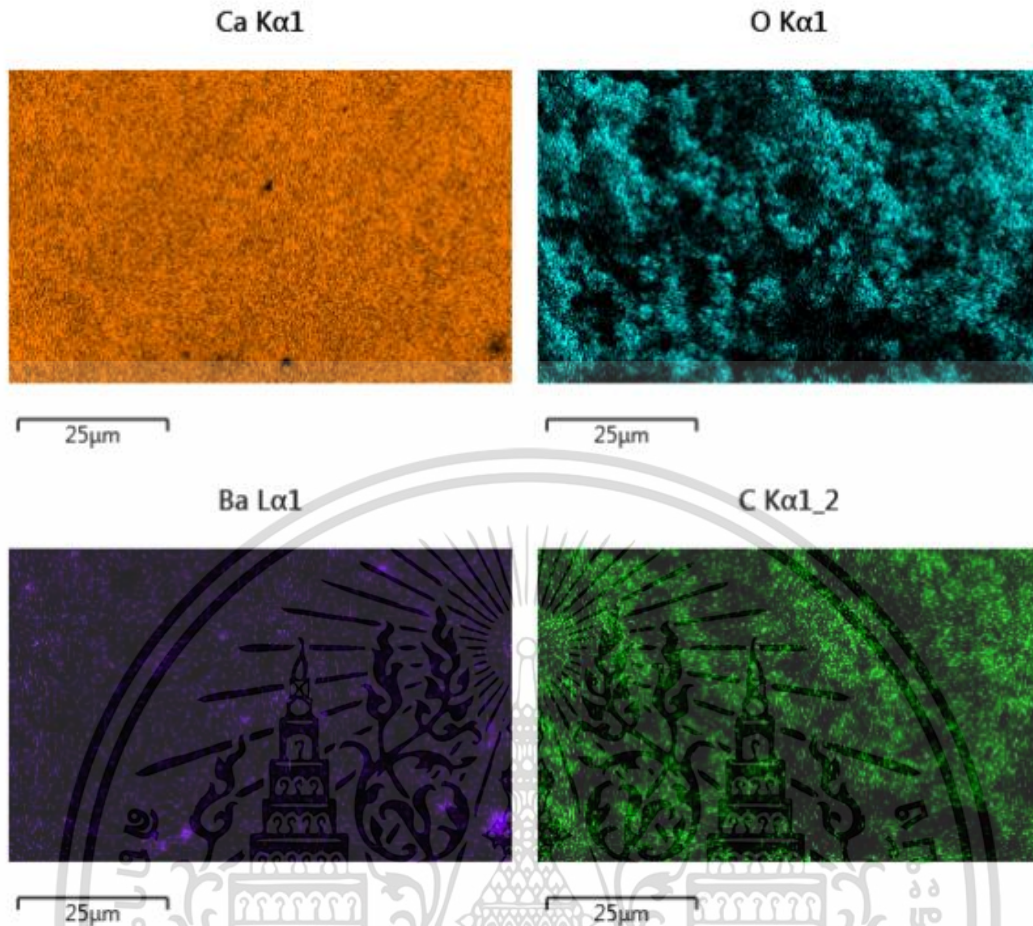
รูปที่ 4.6 ลักษณะการกระจายตัวของธาตุต่างๆ บนตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่อัตราส่วน Zn:Ba เท่ากับ 5:0.5 โดยวิเคราะห์จากเครื่อง SEM/EDX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ลักษณะการกระจายตัวของธาตุต่างๆ บนตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่อัตราส่วน Zn:Ba เท่ากับ 3:0.7 โดยวิเคราะห์จากเครื่อง SEM/EDX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ลักษณะการกระจายตัวของธาตุต่างๆ บนตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่อัตราส่วน Zn:Ba เท่ากับ 0:1 โดยวิเคราะห์จากเครื่อง SEM/EDX

จากรูปที่ 4.3 เป็นลักษณะการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ไก่ ซึ่งพบว่ามีธาตุ แคลเซียม ออกซิเจน และคาร์บอน เป็นองค์ประกอบ สำหรับ Zn-Ba(10:0)/CaO (รูปที่ 4.4) พบการกระจายตัวของธาตุแคลเซียม ออกซิเจน คาร์บอน และซิงค์ โดยการกระจายตัวของซิงค์มีการกระจุกตัวเป็นบางบริเวณ ส่วน Zn-Ba/CaO ที่อัตราส่วนโดยโมลของ Zn:Ba เป็น 7:0.3, 5:0.5 และ 3:0.7 (รูปที่ 4.5-4.7) พบการกระจายตัวของซิงค์ที่มีความสม่ำเสมอมากขึ้นกว่าที่อัตราส่วน 10:0 และ Zn-Ba (0:1)/CaO (รูปที่ 4.8) พบการกระจายตัวของธาตุแคลเซียม ออกซิเจน คาร์บอน และแบเรียม ซึ่งธาตุแบเรียมมีการกระจายตัวได้เป็นอย่างดี

จากการวิเคราะห์ SEM/EDX ของ CaO และ Zn-Ba/CaO พบธาตุคาร์บอน (C) เป็นองค์ประกอบ อาจเกิดจากการที่ CaCO_3 บางส่วนในเปลือกไข่ไก่ยังไม่เปลี่ยนเป็น CaO หลังจากที่แคลไซน์ที่ $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ดังนั้นจึงพบรูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของ CaCO_3 ที่มุม 2θ เท่ากับ 29.40° , 35.92° และ 47.56° ดังแสดงในภาคผนวก ค. (รูปที่ ค.1) เปรียบเทียบกับรูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของ CaO ที่ได้จากเปลือกไข่ไก่จากงานวิจัยนี้ (รูปที่ ค.2) อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 องค์ประกอบของธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา

นำตัวเร่งปฏิกิริยามาทำการศึกษาค่าองค์ประกอบของธาตุโดยใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (X-Ray Fluorescence Spectrophotometer, XRF) ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณธาตุองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณองค์ประกอบของธาตุ (mol%)				
	Ca	C	O	Zn	Ba
CaO	45.6	8.6	45.8	-	-
Zn-Ba(10:0)/CaO	44.0	7.5	39.3	9.2	-
Zn-Ba(7:0.3)/CaO	46.3	6.2	40.6	6.6	0.3
Zn-Ba(5:0.5)/CaO	49.0	5.7	39.4	5.2	0.5
Zn-Ba(3:0.7)/CaO	52.0	4.9	39.9	2.5	0.7
Zn-Ba(0:1)/CaO	52.5	4.5	42.0	-	1.0

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่อัตราส่วน Zn:Ba ต่างๆ มีปริมาณธาตุองค์ประกอบของ Zn:Ba ใกล้เคียงกับอัตราส่วน Zn:Ba ที่กำหนดไว้

4.1.4 พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

นำตัวเร่งปฏิกิริยา CaO และ Zn-Ba/CaO ที่อัตราส่วน Zn:Ba ต่างๆ มาทำการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวโดยใช้เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยเทคนิคบีอีที (BET) ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุนและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

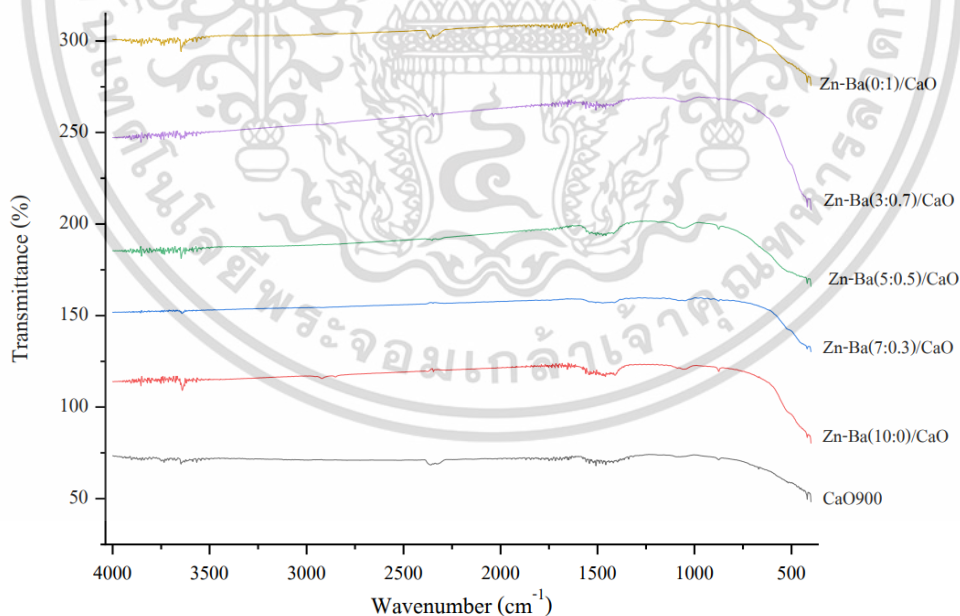
ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	BET Surface Area (m ² /g)	Pore Volume (cm ³ /g)	average pore diameter (Å)
CaO	83.23	3.86	22.71
Zn-Ba(10:0)/CaO	56.85	2.28	21.47
Zn-Ba(7:0.3)/CaO	76.62	3.28	22.67
Zn-Ba(5:0.5)/CaO	72.34	2.85	22.69
Zn-Ba(3:0.7)/CaO	55.29	1.38	22.79
Zn-Ba(0:1)/CaO	52.66	1.84	22.74

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ทุกอัตราส่วนของ Zn:Ba มีพื้นที่ผิว และ ปริมาตรรูพรุนที่ต่ำกว่า CaO เนื่องจาก ZnO และ BaO บดบังพื้นที่ผิวของ CaO ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่อัตราส่วน Zn:Ba เท่ากับ 10:0 และ 0:1 มีพื้นที่ผิวเท่ากับ $56.85 \text{ m}^2/\text{g}$ และ $52.66 \text{ m}^2/\text{g}$ ตามลำดับ ปริมาตรรูพรุนเท่ากับ $2.28 \text{ cm}^3/\text{g}$ และ $1.84 \text{ cm}^3/\text{g}$ ตามลำดับ และที่อัตราส่วน Zn:Ba เท่ากับ 7:0.3, 5:0.5 และ 3:0.7 มีพื้นที่ผิวเท่ากับ $76.62 \text{ m}^2/\text{g}$, $72.34 \text{ m}^2/\text{g}$ และ $55.29 \text{ m}^2/\text{g}$ ตามลำดับ ปริมาตรรูพรุนเท่ากับ $3.28 \text{ cm}^3/\text{g}$, $2.85 \text{ cm}^3/\text{g}$ และ $1.38 \text{ cm}^3/\text{g}$ ตามลำดับ เมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ซึ่งมีพื้นที่ผิวเท่ากับ $83.23 \text{ m}^2/\text{g}$ และมีปริมาตรรูพรุนเท่ากับ $3.86 \text{ cm}^3/\text{g}$ จะเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณ Zn และ Ba ส่งผลให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง แต่การเพิ่มปริมาณ Ba จะส่งผลให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงมากกว่า เนื่องจากขนาดโมเลกุลของ BaO นั้นมีขนาดใหญ่กว่า ZnO จึงบดบังพื้นที่ผิวและรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า

4.1.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR)

นำ CaO จากเปลือกไข่ไก่และตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่มีอัตราส่วนโดยโมล Zn:Ba เท่ากับ 10:0, 7:0.3, 5:0.5, 3:0.7 และ 0:10 ทำการตรวจวัดด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์เพื่อยืนยันถึงหมู่ฟังก์ชันของ ZnO และ BaO ที่อยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 4.9 FT-IR สเปกตรัมของ CaO จากเปลือกไข่ไก่ และ ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่มีอัตราส่วนโดยโมล Zn:Ba เท่ากับ 10:0, 7:0.3, 5:0.5, 3:0.7 และ 0:10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 เป็นการเปรียบเทียบรูปแบบ FT-IR ของ CaO กับตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่มีอัตราส่วนโดยโมล Zn:Ba เท่ากับ 10:0, 7:0.3, 5:0.5, 3:0.7 และ 0:10 โดยจะเห็นได้ว่า CaO พบพีกที่เลขคลื่น 3640 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะ $\nu(\text{O-H})$ จากไฮดรอกไซด์ของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ พีกที่เลขคลื่น 3435 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะ $\nu(\text{O-H})$ จากไฮดรอกไซด์ของน้ำ พีกที่เลขคลื่น 1600 cm^{-1} (การสั่นแบบยืดโดยสมมาตร, symmetric stretching) 1350 cm^{-1} (การสั่นแบบยืดโดยไม่สมมาตร, asymmetric stretching) 850 cm^{-1} และ 715 cm^{-1} เป็นพีกของการสั่นที่อยู่ต่างระนาบ (out-of plane) และระนาบเดียวกัน (in-plane) ตามลำดับของ เป็นการสั่นของพันธะ $(\text{C}=\text{O})$ จากคาร์บอนเนต $(\text{CO}_3)^{2-}$ และพีกของการสั่นแบบยืดหดของ (Ca-O) ที่เลขคลื่นประมาณ 550 cm^{-1} และจะสังเกตเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO พบพีกในช่วง $1365\text{--}1580\text{ cm}^{-1}$ (การสั่นแบบยืดโดยไม่สมมาตร, asymmetric stretching) ของ ZnO พีกในช่วง $1400\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$ (การสั่นแบบยืดโดยไม่สมมาตร, asymmetric stretching) ของ BaO พีกที่เลขคลื่น 550 และ 850 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะ (Zn-O) พีกที่เลขคลื่น 615 และ 690 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะ (Ba-O) [45,46]

4.2 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

4.2.1 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของซิงค์ต่อแบเรียมที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

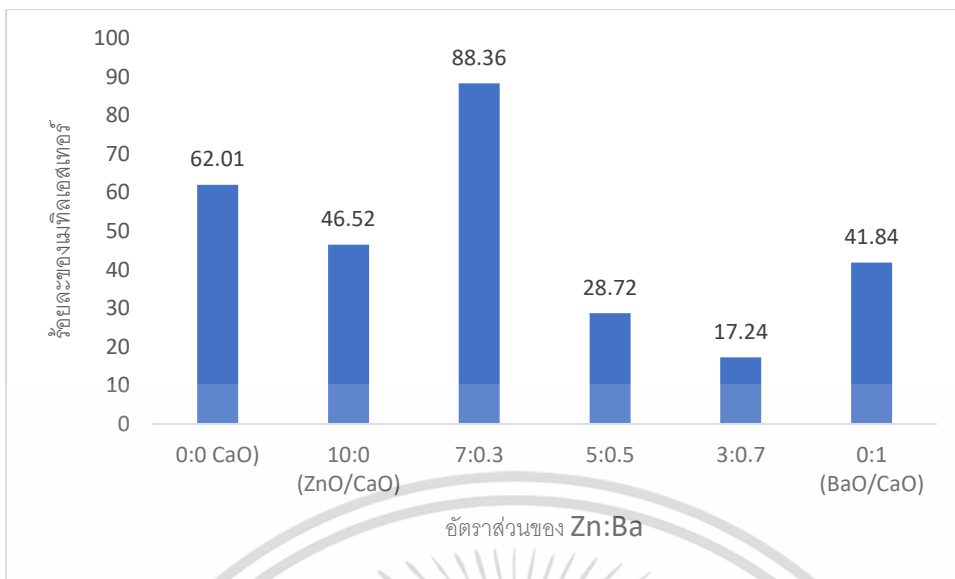
ในการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของซิงค์ต่อแบเรียมของตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO โดยกำหนดให้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 9:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมล Zn:Ba ของตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

อัตราส่วนโดยโมล Zn:Ba ของ Zn-Ba/CaO (%)	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}\text{C}$)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์
0:0	9:1	3	65	2	62.01
10:0					46.52
7:0.3					88.36
5:0.5					28.72
3:0.7					17.24
0:1					41.84

หมายเหตุ Zn-Ba/CaO ที่มีอัตราส่วนโดยโมล Zn:Ba = 0:0 หมายถึง CaO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ผลของอัตราส่วนโดยโมล Zn:Ba ของตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

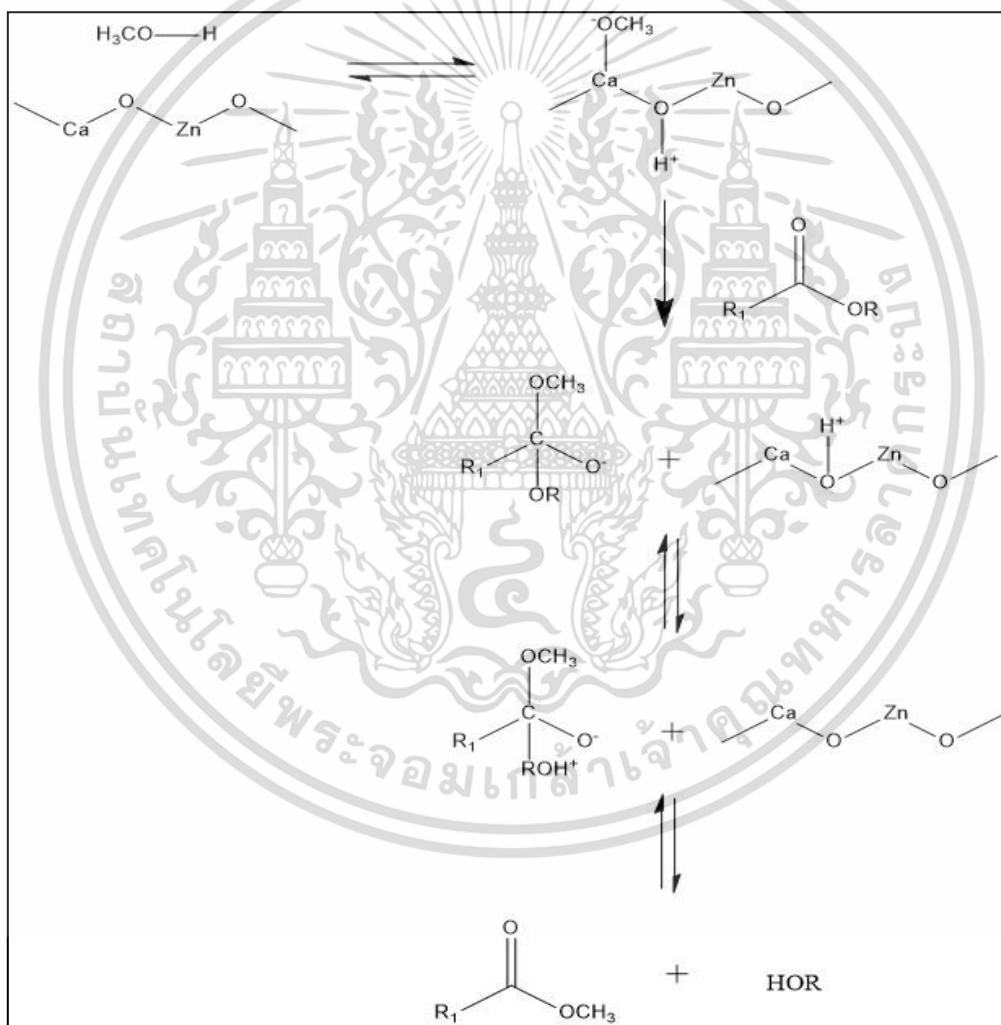
จากผลการทดลองในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ Zn-Ba(0:0)/CaO (หรือ CaO จากการแคลไซน์เปลือกไข่ไก่) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน จะให้ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ถึงร้อยละ 62.01 เนื่องจาก CaO มีความเป็นเบส แต่มีข้อเสียคือเสถียรภาพต่ำ มักจะถูกชะละลายในระหว่างการทำปฏิกิริยา ดังนั้นจึงจะทำการปรับปรุงประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาด้วยการเติม ZnO และ BaO ลงบนตัวรองรับ CaO ซึ่ง ZnO มีความเป็นกรด สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ทั้งทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันและเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระในน้ำมันถั่วเหลืองให้เป็นเมทิลเอสเทอร์ โดยจะเห็นจากการใช้ Zn-Ba(10:0)/CaO (หรือ ZnO/CaO) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งให้ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ถึงร้อยละ 46.52 โดยร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba(10:0)/CaO ต่ำกว่า CaO เนื่องจากพื้นที่ผิวของ Zn-Ba(10:0)/CaO ที่ต่ำกว่า CaO นั้นเอง สำหรับ BaO มีความเป็นเบสที่สูงกว่า CaO แต่มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า ดังนั้นเมื่อเร่งปฏิกิริยาด้วย Zn-Ba(0:1)/CaO (หรือ BaO/CaO) จึงให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่ต่ำกว่าของ CaO เนื่องจากพื้นที่ผิวของ Zn-Ba(0:1)/CaO ที่ต่ำกว่าของ CaO

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของ Zn:Ba ของตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO จาก 10:0 เป็น 7:0.3 พบว่าร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นจาก 46.52 เป็น 88.36 คาดว่าเป็นผลมาจากการมีปริมาณ ZnO บน CaO ที่น้อยลง และการมี BaO ในปริมาณที่ไม่มากเกินไป จึงทำให้พื้นที่ผิวของ Zn-Ba(7:0.3)/CaO สูงกว่า Zn-Ba(10:0)/CaO รวมทั้งการมีตำแหน่งกรดจาก ZnO และเบสจาก BaO จึงส่งผลให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น

เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของ Zn:Ba จาก 7:0.3 เป็น 5:0.5 และ 3:0.7 พบว่าร้อยละของเมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มลดลงจาก 88.36 เป็น 28.72 และ 17.24 ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากการลดปริมาณ ZnO และเพิ่ม BaO ทำให้ผลึกของ BaO เข้าไปบดบังพื้นที่ผิวของ CaO มากขึ้น ส่งผลให้พื้นที่ผิวของ Zn-Ba ไม่ว่างกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ba/CaO ลดลง จากที่กล่าวมาข้างต้น ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba(7:0.3)/CaO มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันได้สูงสุด โดยให้เมทิลเอสเทอร์ถึงร้อยละ 88.36

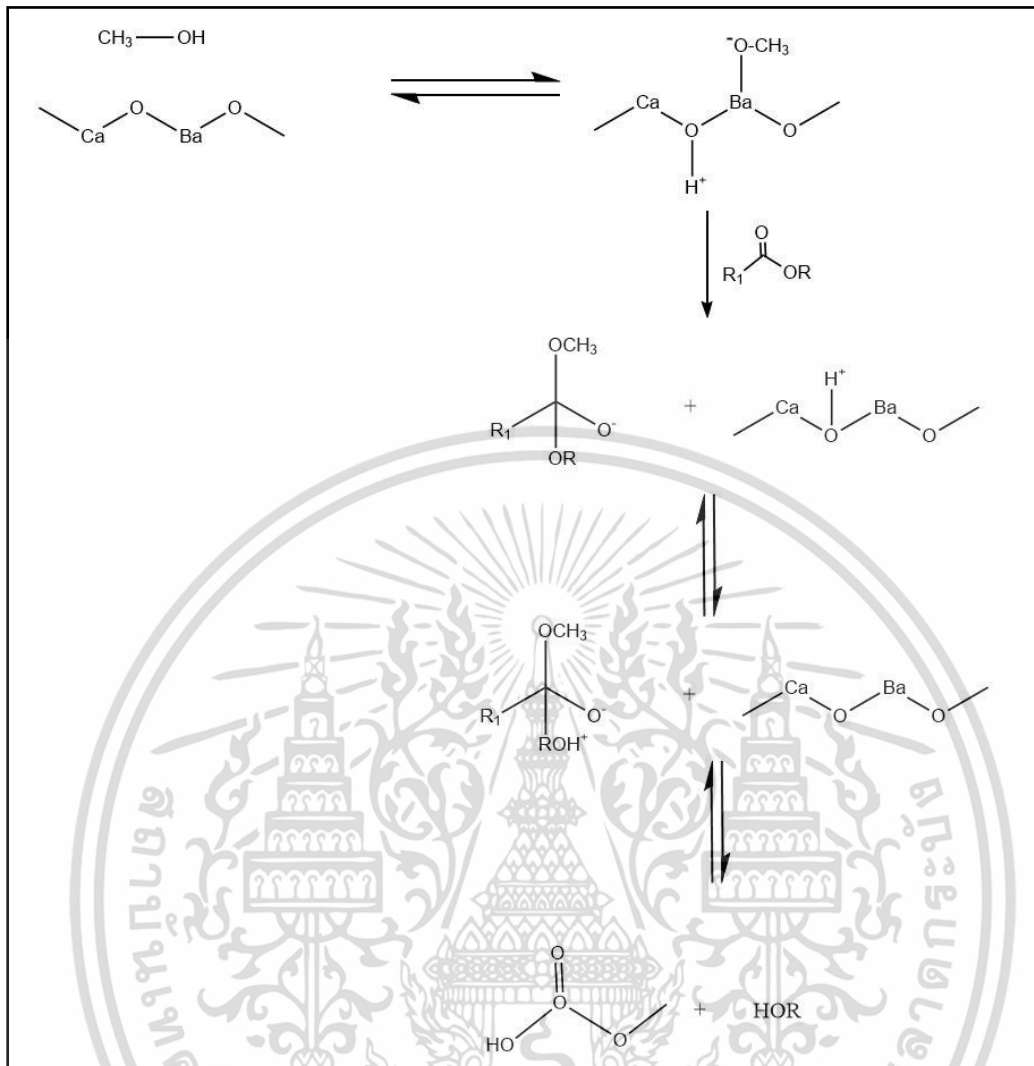
จากรูปที่ 4.10 เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมล Zn:Ba จาก 10:0 เป็น 7:0.3 ของ Zn-Ba/CaO ทำให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดขึ้นจากกลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดและเบส สำหรับบริเวณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสจะมี CaO และ BaO ซึ่งเป็นตำแหน่งว่องไวที่เป็นเบสบนตัวเร่งปฏิกิริยา ที่บริเวณพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่มี O^{2-} จะรับ H^+ จากเมทานอลกลายเป็น methoxide (CH_3O^-) จากนั้นหมู่คาร์บอนิลของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์จะเข้าทำปฏิกิริยากับ CH_3O^- เกิดเป็น tetrahedral ion ซึ่งจะดึง H^+ จากพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและเข้าทำปฏิกิริยากับ CH_3OH จนเกิดผลิตภัณฑ์เป็นเมทิลเอสเทอร์ ซึ่งมีกลไกของปฏิกิริยาที่ตำแหน่งว่องไวเป็น CaO และ BaO ดังรูปที่ 4.11 และ 4.12



R_1 คือ carbon chain of fatty acid

รูปที่ 4.11 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO เมื่อ

พิจารณาตำแหน่งว่องไวของ CaO [49]
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

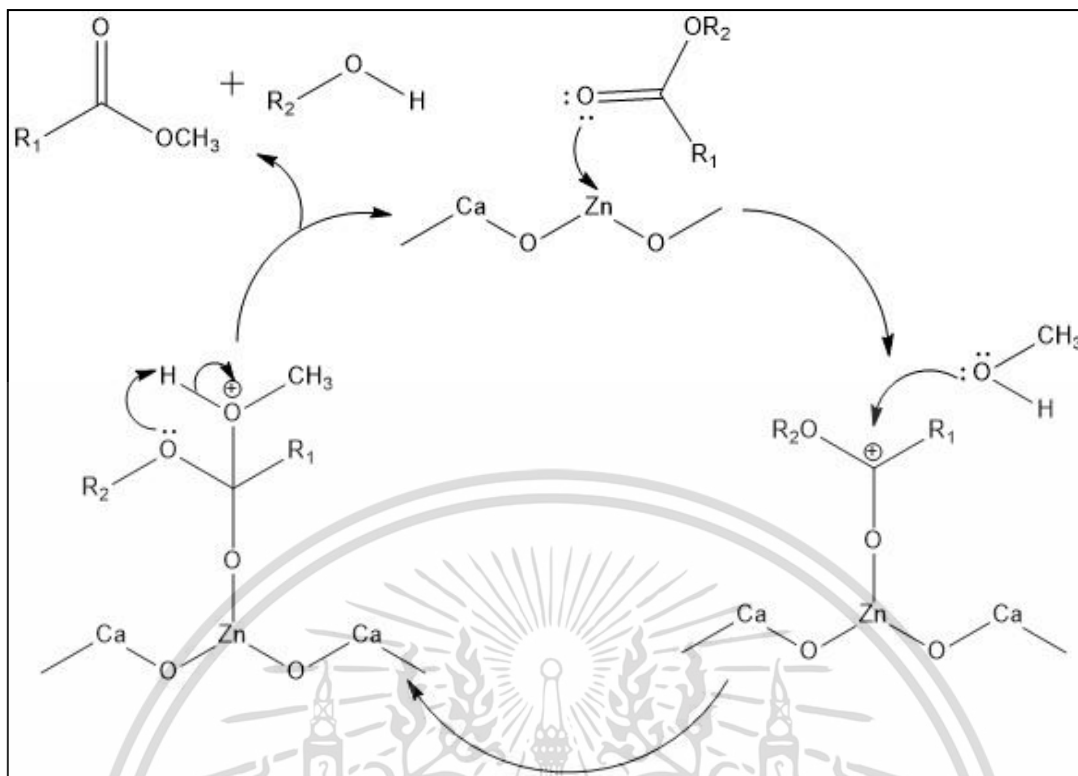


R_1 คือ carbon chain of fatty acid

รูปที่ 4.12 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO เมื่อพิจารณาตำแหน่งวงไวของ BaO

สำหรับบริเวณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดจะมี ZnO ซึ่งเป็นตำแหน่งวงไวที่เป็นกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO โดย ZnO จัดเป็นโลหะออกไซด์ที่มีความเป็นกรดลิวอิส (Lewis acid) ซึ่งสามารถดึงอิเล็กตรอนจากหมู่คาร์บอนิลของไตรกลีเซอไรด์ จากนั้นเมทานอลจะเข้าไปทำปฏิกิริยาจนได้เมทิลเอสเทอร์เป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีกลไกของปฏิกิริยาดังรูปที่ 4.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO เมื่อพิจารณาบริเวณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด [50]

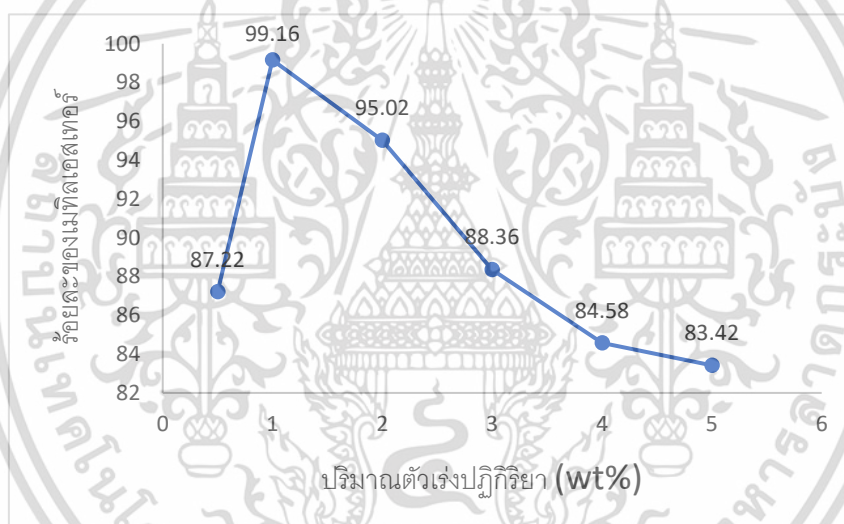
4.2.2 ผลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

ในการศึกษาผลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba(7:0.3)/CaO อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ ได้แก่ ร้อยละ 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 โดยน้ำหนักเมื่อเทียบกับน้ำมัน ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.4 รูปที่ 4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%)	อัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมัน	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์
Zn-Ba(7:0.3)/CaO	0.5	9:1	65	2	87.22
	1				99.16
	2				95.02
	3				88.36
	4				84.58
	5				83.42



รูปที่ 4.14 ผลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba(7:0.3)/CaO ที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.14 เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้นจาก 0.5wt% เป็น 1wt% พบว่า ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นจาก 87.22 เป็น 99.16 และเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า 1wt% พบว่าร้อยละของเมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของการทำปฏิกิริยาและเพิ่มความเป็นกรดหรือเบสส่งผลให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามากเกินไป อาจทำให้เกิดความต้านทานของของผสมในปฏิกิริยา (น้ำมันถั่วเหลือง, เมทานอล และตัวเร่งปฏิกิริยา) จะมีลักษณะข้นและหนืดขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อ การถ่ายโอนมวล (mass transfer) ระหว่างสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยาได้ นอกจากนี้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากเกินไปทำให้ความเป็นเบสเพิ่มสูงขึ้น จึงอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันได้สูงเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมทำให้ได้ปริมาณของเมทิลเอสเทอร์ที่ลดลง [44,45]

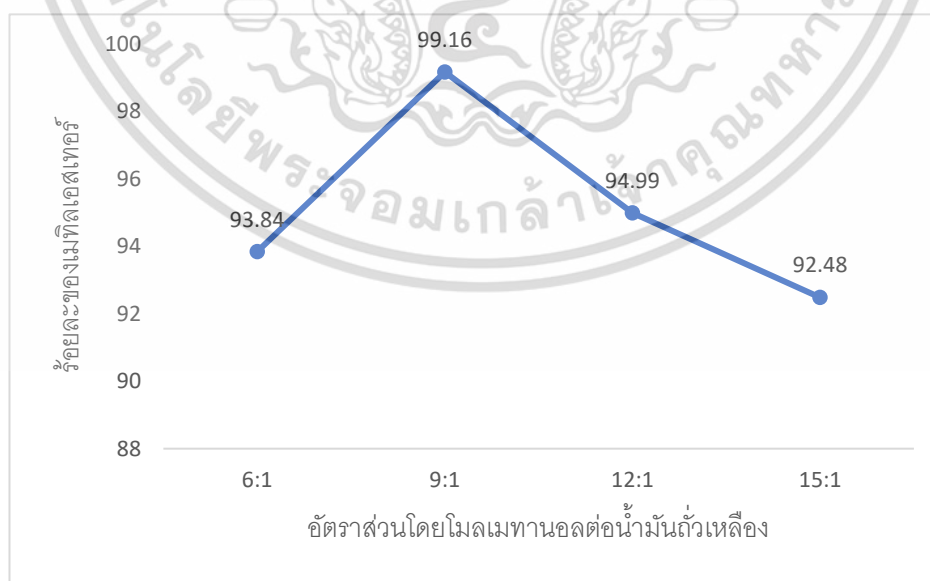
ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงถึง 99.16

4.2.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลืองที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

ในการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลืองที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ใช้ ได้แก่ อัตราส่วนที่ 6:1, 9:1, 12:1 และ 15:1 ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.5 รูปที่ 4.15

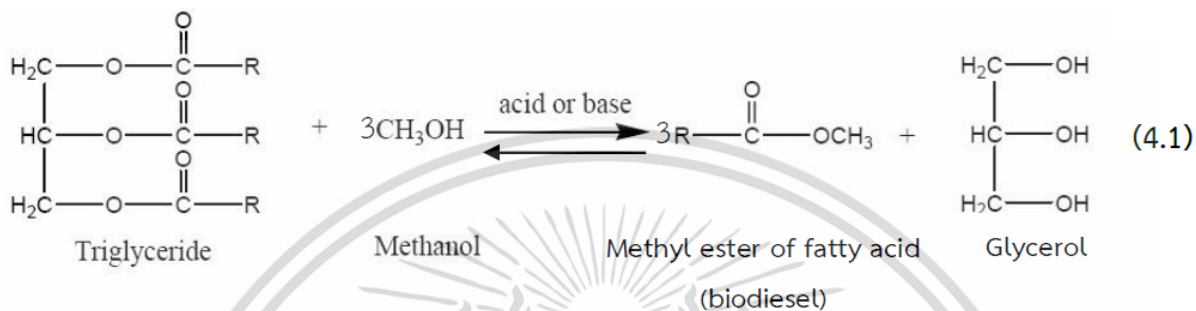
ตารางที่ 4.5 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลืองที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%)	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์
Zn-Ba(7:0.3)/CaO	1	6:1	65	2	93.84
		9:1			99.16
		12:1			94.99
		15:1			92.48

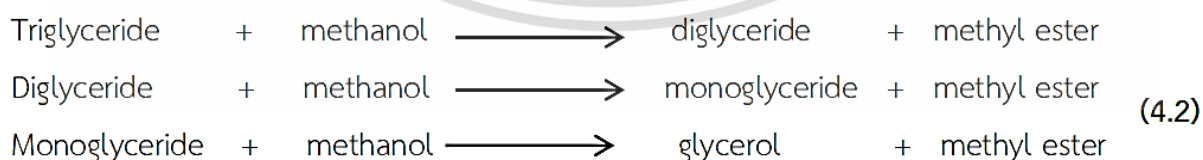


รูปที่ 4.15 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลืองที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เมื่อเร่งปฏิกิริยาด้วย Zn-Ba(7:0.3)/CaO ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.5 รูปที่ 4.15 พบว่าเมื่อเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba(7:0.3)/CaO ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นจาก 93.84 เป็น 99.16 เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลืองจาก 6:1 เป็น 9:1 และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลืองจาก 9:1 เป็น 12:1 และ 15:1 ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ลดลงเล็กน้อยจาก 99.16 เป็น 94.99 และ 92.48 ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเมทานอลที่มากเกินไปจะสามารถทำให้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริเฟชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้เลื่อนไปด้านของผลิตภัณฑ์จึงส่งผลให้ได้เมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นดังสมการที่ (4.1)



จากสมการที่ (4.1) จะเห็นได้ว่าจะต้องใช้เมทานอล 3 โมล ทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ 1 โมล เพื่อที่จะได้เมทิลเอสเทอร์ 3 โมล และกลีเซอรอล 1 โมล ซึ่งจากการทดลองพบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดทำให้ได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุด อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มเมทานอลมากเกินไป (มากกว่า 9:1) พบว่าร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ลดลง ซึ่งอธิบายได้ว่า การเกิดเมทิลเอสเทอร์ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนย่อย เริ่มจากไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) เปลี่ยนเป็นไดกลีเซอไรด์ (diglyceride) ตามด้วยการเปลี่ยนไดกลีเซอไรด์เป็นมอนอกลิเซอไรด์ (monoglyceride) และขั้นสุดท้ายมอนอกลิเซอไรด์เปลี่ยนเป็นเมทิลเอสเทอร์ (สมการที่ 4.2) การมีปริมาณเมทานอลที่มากเกินไปจะทำให้การเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์เป็นมอนอกลิเซอไรด์เกิดได้ดี แต่มอนอกลิเซอไรด์สามารถละลายเข้ากับกลีเซอรอล (glycerol) ได้ และเป็นผลให้เกิดปฏิกิริยา glycerolysis ซึ่งเป็นปฏิกิริยา glycerolysis เกิดขึ้นระหว่างเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริเฟชันกับกลีเซอรอลที่เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ เกิดเป็นมอนอกลิเซอไรด์ขึ้นด้วยเหตุนี้เมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันมากกว่า 9:1 จึงส่งผลให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ลดลง [48]



ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันที่เหมาะสมคือ 9:1 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba(7:0.3)/CaO

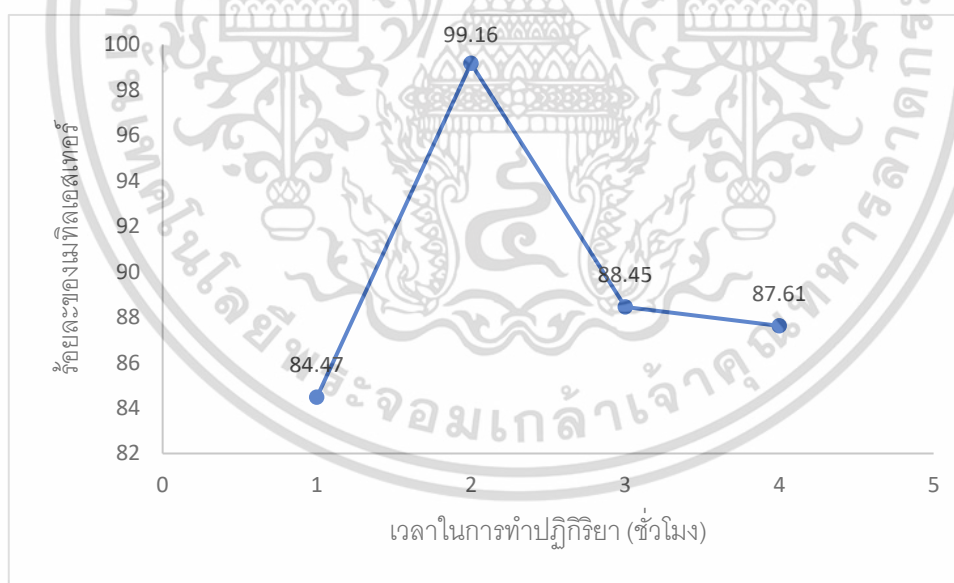
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

ในการศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba(7:0.3)/CaO อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ใช้ได้แก่ 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.6 รูปที่ 4.16

ตารางที่ 4.6 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%)	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์
Zn-Ba(7:0.3)/CaO	1	9:1	65	1	84.47
				2	99.16
				3	88.45
				4	87.61



รูปที่ 4.16 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อเร่งปฏิกิริยาด้วย Zn-Ba(7:0.3)/CaO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.16 พบว่าเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้นจาก 1 ชั่วโมง เป็น 2 ชั่วโมง ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 84.47 เป็น 99.16 แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยามากกว่า 2 ชั่วโมง ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มลดลงเป็น 888.45 และ 87.61 เมื่อใช้เวลา 3 และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ เนื่องจากในการทำปฏิกิริยาเมื่อเพิ่มเวลาจะทำให้สารตั้งต้นเข้าทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ได้สมบูรณ์มากขึ้น แต่ถ้าทำปฏิกิริยานานเกินไปเมทานอลจะระเหยออกจากระบบ เพราะน้ำหล่อเย็นใน คอนเดนเซอร์เป็นน้ำที่อุณหภูมิห้อง และนอกจากนั้นเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้น เกิดผันกลับเป็นไตรกลีเซอไรด์ ส่งผลให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ลดลง

ดังนั้นสรุปได้ว่าเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมคือ 2 ชั่วโมง ซึ่งได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงถึง 99.16

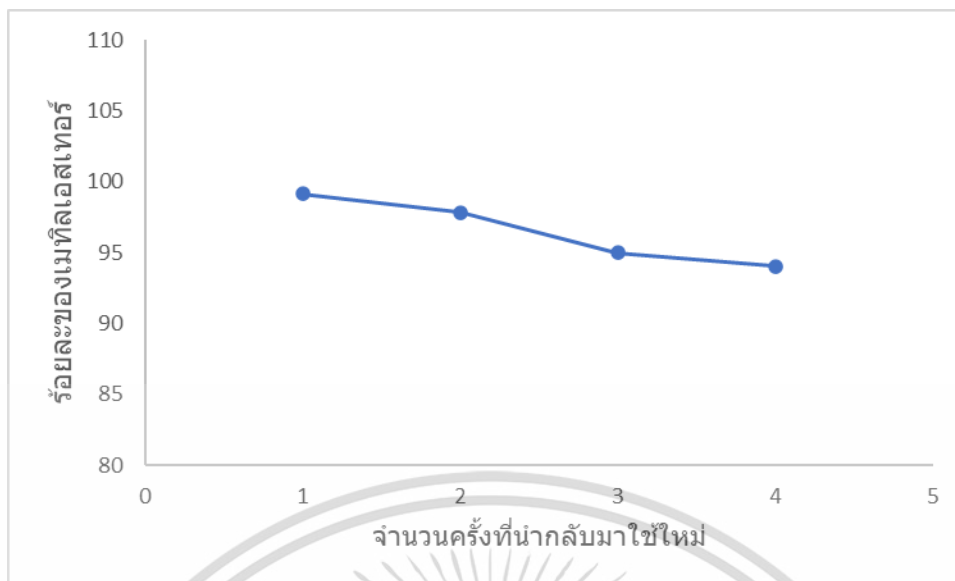
4.2.5 การศึกษาเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการนำกลับมาใช้ใหม่

เพื่อศึกษาถึงเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ในการนำกลับมาใช้ใหม่ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของร้อยละเมทิลเอสเทอร์ โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่ผ่านการทำปฏิกิริยาแล้ว นำไปล้างด้วยอะซิโตน อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยาต่อไป เป็นจำนวน 4 ครั้ง ที่สภาวะเดียวกัน ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.17

ตารางที่ 4.7 ผลของจำนวนครั้งของการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

ชนิดของ ตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณ ตัวเร่ง ปฏิกิริยา (%wt)	อัตราส่วนโดย โมลของเมทา นอลต่อน้ำมัน	อุณหภูมิใน การทำ ปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการ ทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	จำนวนการ นำตัวเร่ง ปฏิกิริยา กลับมาใช้ ใหม่ (รอบ)	ร้อยละ ของเมทิล เอสเทอร์
Zn-Ba(7:0.3)/CaO	1	9:1	65 ± 5	2	1	99.16
					2	97.82
					3	94.99
					4	94.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ผลของจำนวนครั้งในการนำตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO กลับมาใช้ใหม่ที่มีต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์

จากตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่าเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำ 1 รอบ จนถึง 4 รอบ ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยจากร้อยละ 99.16 เป็น 94.05 เนื่องมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำกลับมาใช้ใหม่นั้นมีการอุดตันรูพรุนและบดบังพื้นผิวจากโมเลกุลสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์ จึงทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพลง (Deactivation) ถึงแม้จะใช้อะซิโตนล้างเมทิลเอสเทอร์ น้ำมันถั่วเหลือง และกลีเซอรอลที่ติดค้างตามพื้นผิวและรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วก็ตาม นอกจากนั้นอาจเป็นไปได้ว่าเกิดการละลายของ CaO บางส่วนในระหว่างการทำปฏิกิริยาในแต่ละรอบ จึงทำให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาลดลงไปด้วย

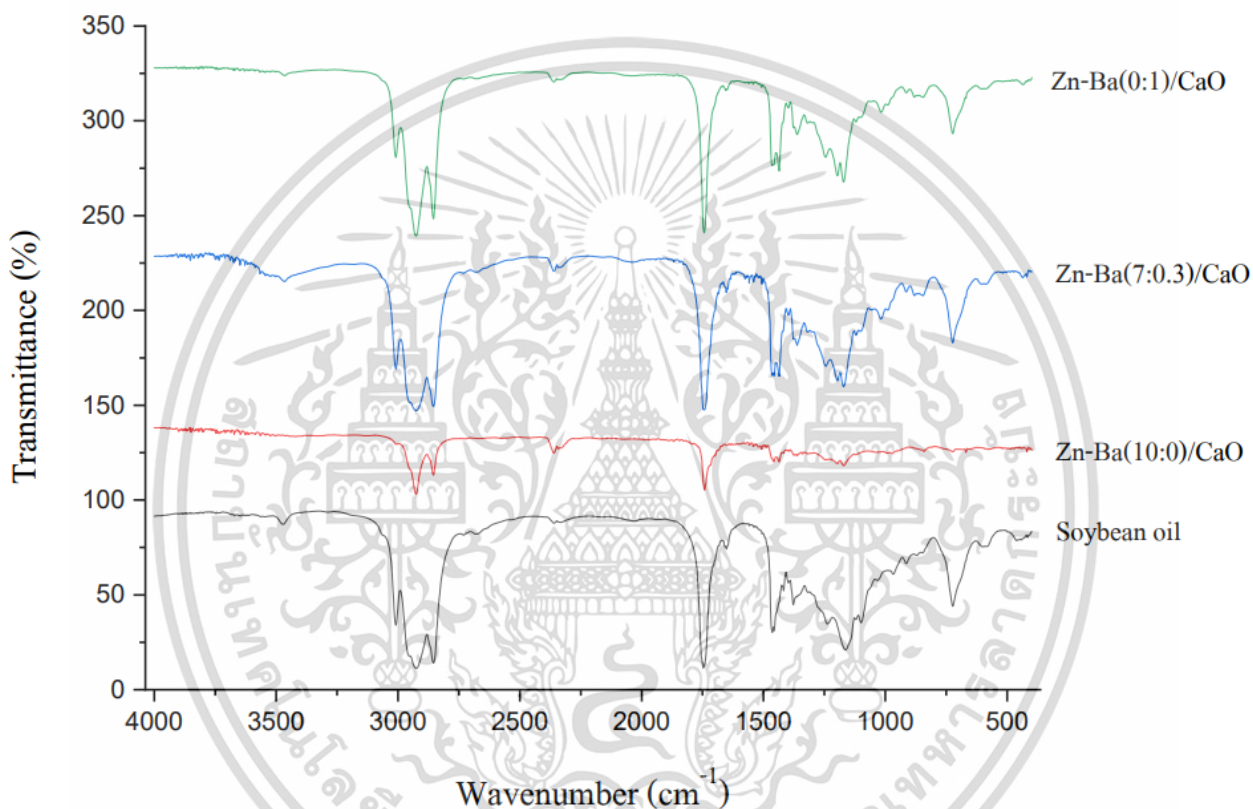
4.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์ทางกายภาพและเคมีของเมทิลเอสเทอร์

นำเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากสถานะต่างๆเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO จากเปลือกไข่ไก่ มาทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตเมทรี (FT-IR) เทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรโฟโตเมทรี (FT-NMR) รวมทั้งหาค่าความเป็นกรด และเลขไอโอดีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier-Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR)

น้ำมันถั่วเหลืองก่อนทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันและเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่อัตราส่วน Zn:Ba เป็น 0:1, 7:0.3 และ 10:0 จะถูกนำมาตรวจวัดหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ดังรูปที่ 4.18 และสรุปหมู่ฟังก์ชันที่เลขคลื่นต่างๆ ดังตารางที่ 4.8



รูปที่ 4.18 FT-IR สเปกตรัมของน้ำมันถั่วเหลืองก่อนที่ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันและเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่อัตราส่วน Zn:Ba เป็น 0:1, 7:0.3 และ 10:0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันถั่วเหลืองก่อนเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันและเมทิลเอสเทอร์ที่การดูดกลืนแสงที่เลขคลื่นต่างๆ [51]

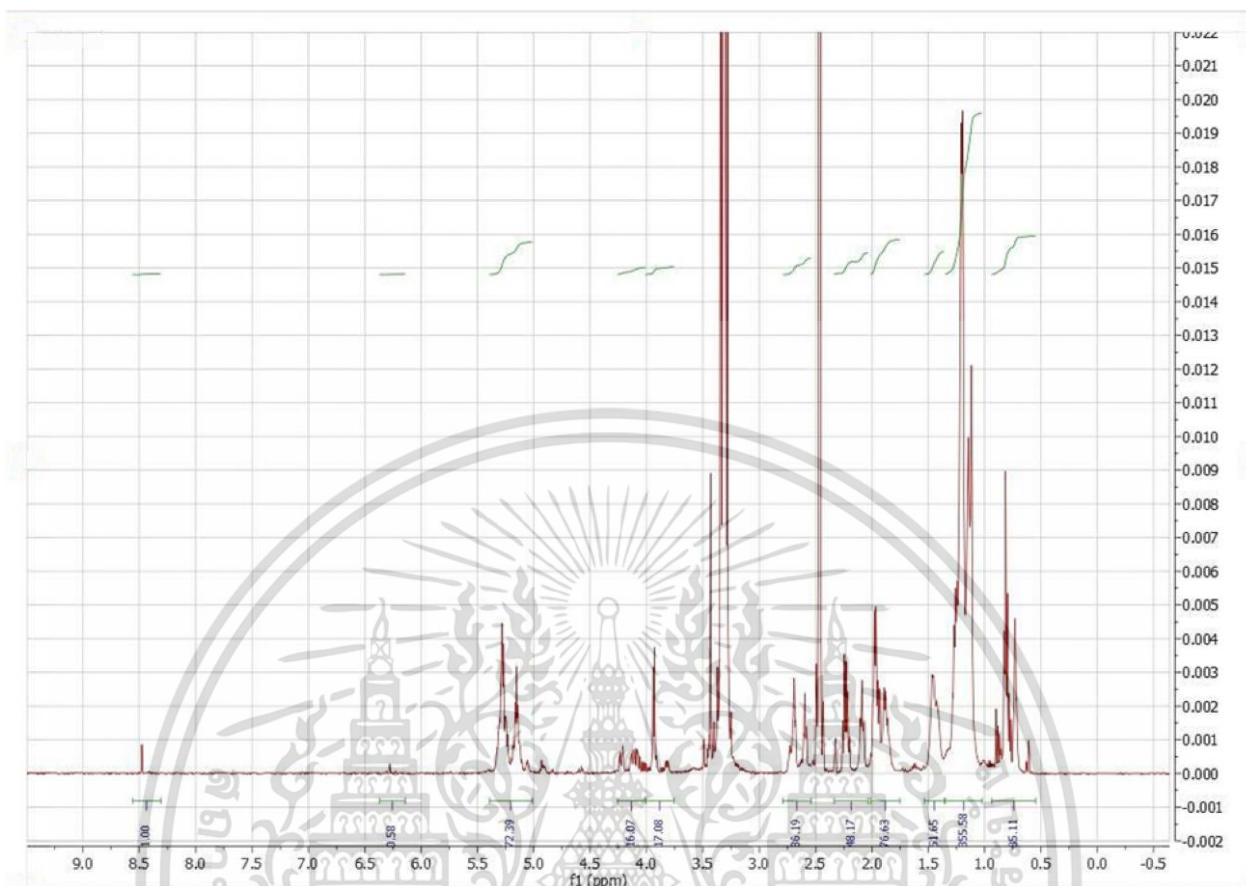
Absorption frequency (cm ⁻¹)	Factional group	Mode of vibration
3500 - 3400	Ester	C=O ester
3100 - 3000	Alkene	Unsat C-H stretching
3000 - 2800	Alkane	Sat C-H stretching
~ 1740	Ester	Carbonyl ester
-1650	Alkene	C=C stretching
1470 - 1400	Alkane	C-H bending for CH ₂
~ 1365	Alkane	C-H bending for CH ₃
1300 - 1200	Ester	C-O stretching
1250 - 1100	Ester	C-O-C ester

จากรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าสเปกตรัมของน้ำมันถั่วเหลืองก่อนทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันและเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะใกล้เคียงกัน เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกัน โดยพบเลขคลื่นที่ 1100 cm⁻¹ เป็นพีคของพันธะ C-O stretching ของ O-CH₂-C เลขคลื่นที่ 1200 cm⁻¹ เป็นพีคของพันธะเอสเทอร์ของหมู่ monoglyceride, diglyceride และ triglyceride ของน้ำมันถั่วเหลือง เลขคลื่นที่ 1740 cm⁻¹ เป็นพีคของพันธะ C (=O) vibration ของ triglyceride เลขคลื่นในช่วง 2800-3000 cm⁻¹ เป็นพีคของพันธะ C-H vibration เลขคลื่นที่ 1400-1470 cm⁻¹ เป็นพีคของพันธะ O-CH₃ ของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ ดังสรุปไว้ในตารางที่ 4.8 เพื่อให้การวิเคราะห์มีความละเอียดและถูกต้องมากขึ้น จึงนำน้ำมันถั่วเหลืองก่อนทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน และเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ไปตรวจสอบด้วยเทคนิค FT-NMR ต่อไป

4.3.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier-Transform Nuclear Magnetic Resonance Spectrophotometer, FT-NMR)

น้ำมันถั่วเหลืองก่อนทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันและเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่อัตราส่วน Zn:Ba เป็น 0:1, 7:0.3 และ 10:0 จะถูกวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งแสดง FT-NMR สเปกตรัม ดังรูปที่ 4.19-4.22 ตามลำดับ

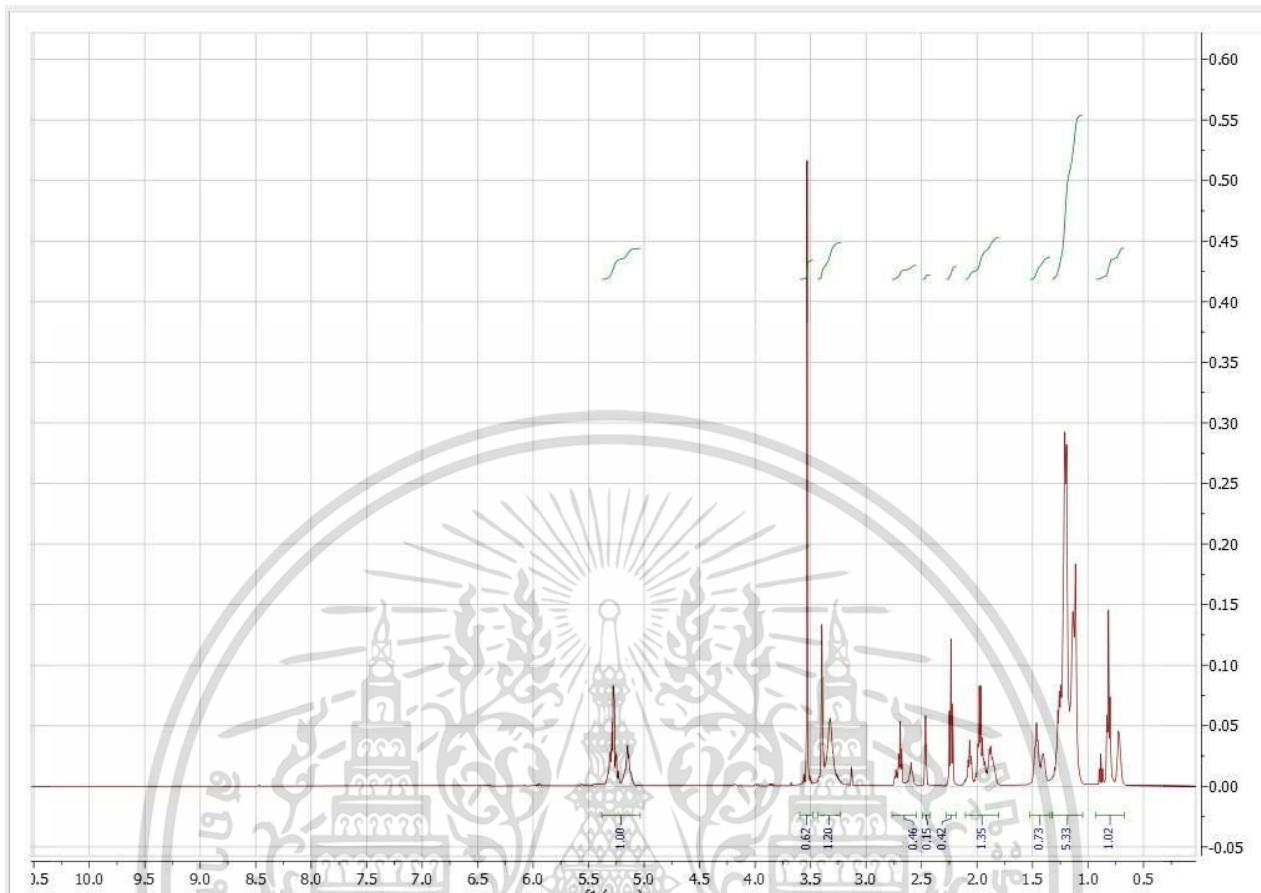
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 $^1\text{H-NMR}$ สเปกตรัมของน้ำมันถั่วเหลืองจากเครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

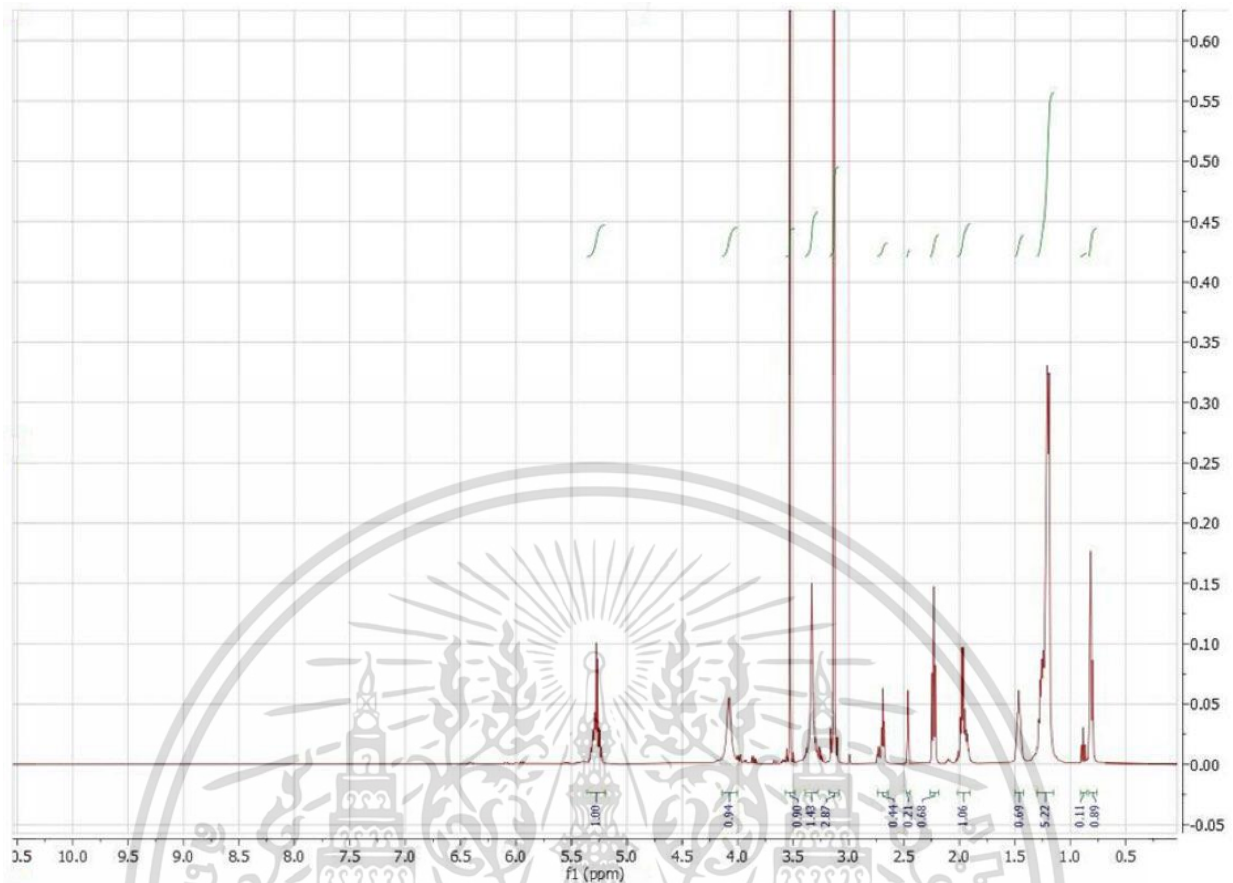
จากรูปที่ 4.19 เป็น $^1\text{H-NMR}$ สเปกตรัมของน้ำมันถั่วเหลืองก่อนทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งพบ $^1\text{H-NMR}$ สเปกตรัมของเมทิลโปรตอน ($\text{CH}_3\text{-C-}$) และ เมทิลีนโปรตอน ($\text{-C-CH}_2\text{-C-}$) ที่ δ 0.84-0.88 และ 1.25-1.30 ppm, สเปกตรัมของ $\text{-CH}_2\text{-C-COO-C-}$ ที่ δ 1.54-1.60 ppm, สเปกตรัมของ $\text{-CH}_2\text{-C=C}$ ที่ δ 1.95-2.00 ppm, สเปกตรัมของ $\text{-CH}_2\text{-COO-C-}$ ที่ δ 2.25-2.30 ppm, สเปกตรัมของ $\text{-C=C-CH}_2\text{-C=C-}$ ที่ δ 2.72-2.74 ppm, สเปกตรัมของ -CH-OOC-R และ $\text{-CH}_2\text{-OOC-R}$ ที่ δ 4.10-4.15 และ 4.20-4.30 ppm, สเปกตรัมของ -CH=CH- ที่ δ 5.22-5.36 ppm [52]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



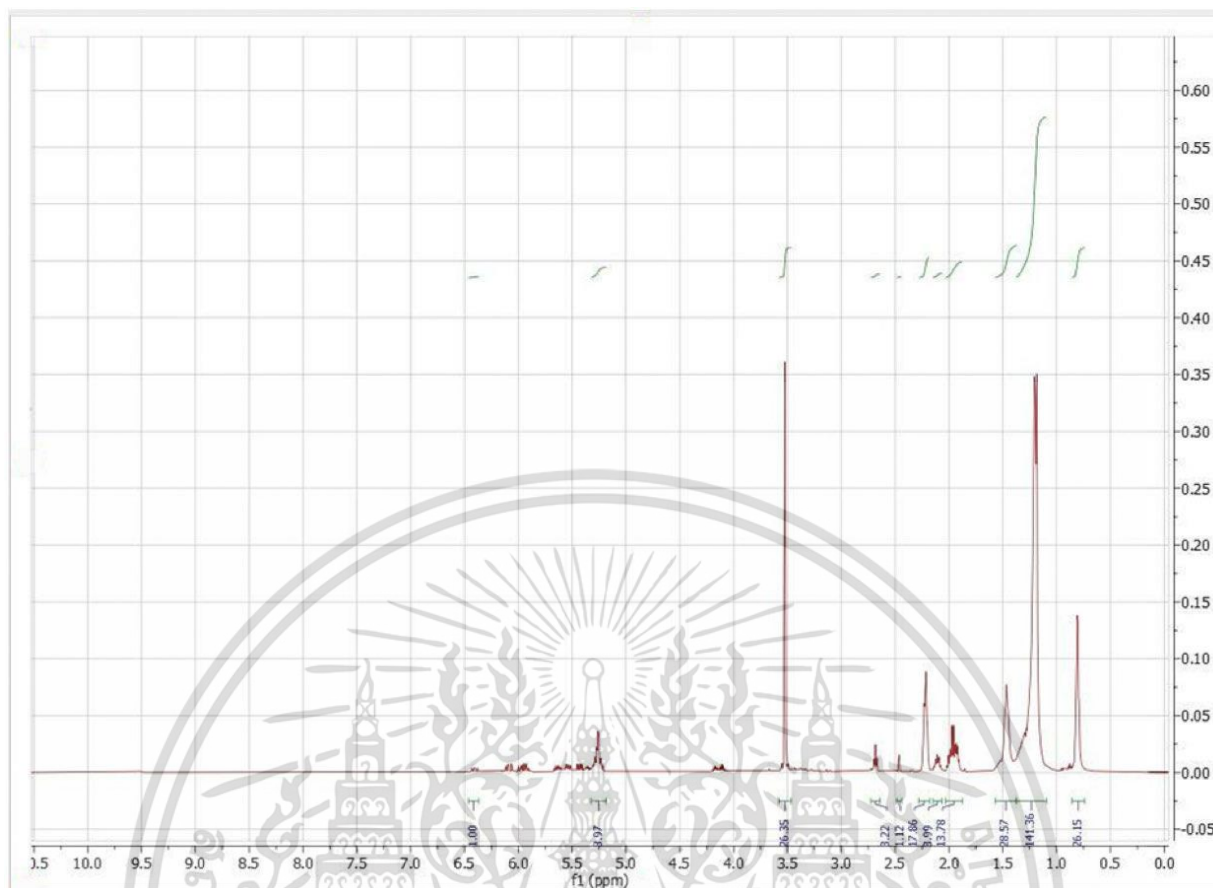
รูปที่ 4.20 $^1\text{H-NMR}$ สเปกตรัมของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO อัตราส่วน Zn:Ba เท่ากับ 0:1 อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 $^1\text{H-NMR}$ สเปกตรัมของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO อัตราส่วน Zn:Ba เท่ากับ 7:0.3 อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 $^1\text{H-NMR}$ สเปกตรัมของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO อัตราส่วน Zn:Ba เท่ากับ 10:0 อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง

จาก $^1\text{H-NMR}$ สเปกตรัมของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์จากน้ำมันถั่วเหลืองกับเมทานอล โดยใช้ Zn-Ba/CaO ที่อัตราส่วน Zn:Ba ต่างๆเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบพีคของ olefinic protons ($-\text{CH}=\text{CH}-$) ที่ $\delta 5.27-5.32$ ppm พีคที่เป็นสัญญาณแบบ singlet ของ methoxy protons ของ ester ที่ $\delta 3.52-3.60$ ppm พีคของ bis-allylic proton of polyunsaturated fatty acid (เช่น linoleic acid) ที่ $\delta 2.70-2.75$ ppm พีคที่เป็นสัญญาณแบบ triplet ที่ $\delta 2.00-2.30$ ppm ซึ่งแสดงถึง α -methylene proton ของ ester ($-\text{CH}_2-\text{CO}_2\text{ME}$) พบพีคของ α -methylene protons to double bond ($-\text{CH}_2-\text{C}=\text{C}-$) ปรากฏขึ้นที่ $\delta 1.94-2.00$ ppm พีคของ β -methylene protons to ester ($-\text{CH}_2-\text{C}-\text{CO}_2\text{ME}$) ปรากฏที่ $\delta 1.52-1.59$ ppm พีคที่ $\delta 1.22-1.28$ ppm แสดงถึง protons ของ backbone methylenes of long fatty acid chain และ terminal methyl protons ($\text{C}-\text{CH}_3$) ที่ $\delta 0.80-0.84$ ppm

เมื่อเปรียบเทียบ $^1\text{H-NMR}$ ของน้ำมันถั่วเหลืองกับเมทิลเอสเทอร์ (รูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20-4.22) พบว่าตำแหน่งโปรตอนของ $-\text{CH}-\text{OOC}-\text{R}$ และ $-\text{CH}_2-\text{OOC}-\text{R}$ ในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ที่ $\delta 4.10-4.15$ และ $4.20-4.30$ ppm หายไป เกิดเป็นตำแหน่งโปรตอนของ methoxy protons ของหมู่ ester ($\text{R}-\text{COO}-$

CH₃) ในโมเลกุลของเมทิลเอสเทอร์ขึ้นมาแทน ที่ δ 3.52-3.60 ppm แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์จากการสังเคราะห์เป็นเมทิลเอสเทอร์จริง [52]

4.3.3 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (Acid value) เลขไอโอดีน (Iodine value)

ของเมทิลเอสเทอร์

เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์จากสภาวะต่างๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์และแบเรียมบนแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ จะถูกนำมาทดสอบค่าความเป็นกรดและเลขไอโอดีน ซึ่งผลที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่กฎหมายกำหนด โดยกล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าความเป็นกรด เลขไอโอดีน และค่าความร้อนของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่อัตราส่วนซิงค์ต่อแบเรียมต่างๆ

ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง				ค่าความเป็นกรด (mgKOH /g)	เลขไอโอดีน (g ₂ /100 g)	ค่าความร้อน (kJ/kg)
	จำนวนครั้งการนำกลับมาใช้ใหม่	อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)			
Zn-Ba/CaO (10:0)	-	9:1	3%wt	120	0.76	18.54	36,048
Zn-Ba/CaO (7:0.3)	-	9:1	3%wt	120	0.63	17.27	38,645
Zn-Ba/CaO (5:0.5)	-	9:1	3%wt	120	0.59	18.80	38,721
Zn-Ba/CaO (3:0.7)	-	9:1	3%wt	120	0.61	18.54	38,755
Zn-Ba/CaO (0:1)	-	9:1	3%wt	120	0.52	18.03	39,494

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 (ต่อ) ค่าความเป็นกรด เลขไอโอดีน และค่าความร้อนของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่อัตราส่วนเชิงค้ำต่อแบเรียมต่างๆ

ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง				ค่าความเป็นกรด (mgKOH/g)	เลขไอโอดีน (gI ₂ /100g)	ค่าความร้อน (kJ/kg)
	จำนวนครั้งการนำกลับมาใช้ใหม่	อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)			
Zn-Ba/CaO (7:0.3)	-	9:1	1%wt	120	0.56	16.51	37,061
Zn-Ba/CaO (7:0.3)	-	15:1	1%wt	120	0.29	17.78	37,633
Zn-Ba/CaO (7:0.3)	-	9:1	1%wt	240	0.36	17.78	38,757
Zn-Ba/CaO (7:0.3)	2	9:1	1%wt	120	0.19	17.53	37,592
Zn-Ba/CaO (7:0.3)	4	9:1	1%wt	120	0.22	14.48	38,395
น้ำมันถั่วเหลือง	-	-	-	-	0.17	14.22	39,495

จากตารางที่ 4.9 จะเห็นว่าเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากสภาวะต่างๆ มีค่าความเป็นกรดในช่วง 0.19-0.76 mg KOH/g ค่าไอโอดีนในช่วง 14.48-18.80 g Iodine/100g และค่าความร้อนในช่วง 36,048-39,494 kJ/kg ซึ่งพบว่าค่าความเป็นกรด และค่าไอโอดีนของเมทิลเอสเทอร์ส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานไบโอดีเซล นั่นคือจะต้องมีค่าความเป็นกรดไม่เกิน 0.5 mg KOH/g และ เลขไอโอดีนต้องไม่เกิน 120 กรัม ไอโอดีน/100 กรัม และค่าความร้อนของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้มีความใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงไบโอดีเซล ซึ่งมีค่าความร้อนเท่ากับ 40,088 kJ/kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ซิงค์และแบเรียมบนแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งทำการสังเคราะห์ CaO โดยการแคลไซน์เปลือกไข่ไก่ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำไปดูดซับ $Zn(NO_3)_2$ และ $BaCl_2$ แล้วแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ สรุปว่า

1. จากการวิเคราะห์โครงสร้างของเปลือกไข่ไก่ ที่ใช้อุณหภูมิในการแคลไซน์ 900°C ด้วยเทคนิค XRD พบรูปแบบความเป็นผลึกของ CaO สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่มีอัตราส่วนโดยโมล Zn:Ba ตั้งแต่ 3:0.7 จนถึง 10:0 พบว่ามีรูปแบบโครงสร้างคล้ายคลึงกับ CaO และปรากฏฟิสิกของ ZnO โดย Zn-Ba/CaO ทุกอัตราส่วนโดยโมลของ Zn:Ba ไม่ปรากฏฟิสิกของ BaO เนื่องจากการกระจายตัวที่ดีของ BaO บน CaO และการมี BaO ปริมาณน้อย

2. เมื่อนำ Zn-Ba/CaO ที่อัตราส่วนโดยโมลของ Zn:Ba เป็น 10:0, 7:0.3, 5:0.5, 3:0.7 และ 0:1 ไปเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของ Zn:Ba มีค่าเท่ากับ 7:0.3 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม ซึ่งให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุดถึง 99.16 เนื่องจากพื้นที่ผิวของ Zn-Ba (7:0.3)/CaO ที่สูงกว่า Zn-Ba/CaO ที่อัตราส่วน Zn:Ba อื่นๆ รวมถึงปริมาณ ZnO และ BaO ที่เหมาะสม

3. สำหรับการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลืองและเมทานอล เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์และแบเรียมบนแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองและเมทานอล คือ ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลือง 9:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง และดำเนินปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 65°C ซึ่งได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุดถึง 99.16

4. เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่ผ่านการทำปฏิกิริยาแล้วกลับมาใช้ใหม่ พบว่ามีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาที่ลดลงไม่มากนักตามจำนวนรอบของการนำกลับมาใช้ใหม่

5. จากการทดสอบคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ พบว่าเชื้อเพลิงไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ส่วนใหญ่มีค่าความเป็นกรด และเลขไอโอดีน อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ซิงค์และแบเรียมบนแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่ เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วน Zn:Ba พบว่าเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้นั้นจะมีปริมาณที่ต่ำลง โดยลักษณะที่สังเกตได้คือมีการเกิดไขเป็นจำนวนมากขึ้นในผลิตภัณฑ์ ซึ่งเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาสปอนนิฟิเคชันร่วมด้วย จึงควรศึกษาเกี่ยวกับความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค Temperature-programed desorption (TPD)
2. คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ได้แก่ ความเป็นกรด และเลขไอโอดีน อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ควรทำการทดสอบสมบัติอื่นๆตามมาตรฐานอุตสาหกรรม เช่น จุดวาบไฟ จุดไหลเท ค่าความร้อน และความหนืด เพื่อตรวจสอบว่าเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้มีสมบัติทางเชื้อเพลิงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของไบโอดีเซลหรือไม่
3. เนื่องจากผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามีแนวโน้มลดลงจากอัตราส่วน Zn:Ba 7:0.3 ลงไป จึงควรศึกษาเพิ่มเติมที่เป็น 9:0.1 และ 8:0.2 เพื่อทดสอบว่าร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จะมีปริมาณร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นหรือไม่
4. ควรนำไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้มาทดลองผสมกับน้ำมันดีเซลเพื่อใช้งานกับเครื่องยนต์จริง
5. ควรทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการอัดความดัน (Parr Reactor) เพื่อป้องกันการระเหยของเมทานอล
6. ควรนำตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่ผ่านการทำปฏิกิริยาในแต่ละรอบไปพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD หรือ SEM เพื่อดูว่ามีโครงสร้างที่แตกต่างจากลักษณะก่อนทำปฏิกิริยาหรือไม่ ซึ่งจะเป็นข้อมูลสำคัญในการอธิบายการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาได้อย่างชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Manash, J.B., Ankur, D., Velentina, D., Nilutpal, B., Dhanapati, D. **Transesterification of waste cooking oil for biodiesel production catalyzed by Zn substituted waste egg shell derived CaO nanocatalyst.** Fuel 242 (2019) 345-354
- [2] กรมธุรกิจพลังงาน. **น้ำมันดีเซลและไบโอดีเซล.** [online]. Available: http://www.doeb.go.th/kmv2/news/diesel_biodiesel.pdf
- [3] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. **ไบโอดีเซลคืออะไร** [online]. Available : <http://www.biodiesel.eng.psu.ac.th/whatis.php>.
- [4] เจษฎา สุขสัมพันธ์, อาภาภรณ์ สกฤตกระเวก, วิทยา ปั่นสุวรรณ และชนากานต์ เพิ่มฉลาด **การผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันปาล์มด้วยกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันร่วมกับสภาวะเมทานอลเหนือจุดวิกฤต.** วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ; 18 (2015) 17-22.
- [5] Jakkrapong, j., Apanee, L., Napaphat, S., Narinphop, C. **Biodiesel production from Canola oil and methanol using Ba impregnated Calcium oxide with microwave irradiation-assistance.** Chiang Mai J. Sci 46 (2019) 987-1000.
- [6] Wasi, U.R., Abu, M.K., Abdul, H.A., Umar, H., Bisheswar, K., Gopinath, H. **Parametric optimization of calcined and Zn-doped waste egg-shell catalyzed biodiesel synthesis from Hevea brasiliensis oil.** Energy Nexus 6 (2022) 100073
- [7] Nur, F.S., Ainul, N.N.H., Susilawati, T., Salmiah, J.M.R., Wan Nur Aini, W.M., Renugambaal, N., Wan Azelee, W.A.B. **Biodiesel production from refined used cooking oil using co-metal oxide catalyzed transesterification.** Renewable Energy 153 (2020) 1-11.
- [8] Jakkrapong, J. **Effect of barium loading on CaO derived from waste egg shell heterogeneous catalyst for canola oil biodiesel.** MATEC web of conferences 192 (2018) 1-4.
- [9] อธิพิล วรพันธ์. **สมบัติการเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงของน้ำมันไบโอดีเซลผสมเอทานอล ผลกระทบต่อสมรรถนะ และการปล่อยสารมลพิษของเครื่องยนต์ดีเซล.** วิทยานิพนธ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี (2549).
- [10] Ziku, W., Chunli, X., Baoxin, L. **Application of waste eggshell as low-cost solid catalyst for biodiesel production.** Bioresource Technology 100(2009) 2828-2831.
- [11] กรมธุรกิจพลังงาน. **การศึกษาดูงานเกี่ยวกับการผลิตและผลผลิตจากไบโอดีเซล.** คู่มือองค์ความรู้ ประจำปีงบประมาณ 2553.
- [12] Ma, F. and Hanna, M.A. **Biodiesel Production: A Review.** Bioresource Technology 70 (1999)1-15.

เอกสารนี้เป็นของสาธารณะที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา. **เชื้อเพลิงในชีวิตประจำวัน**. [online]. Available ; <https://rb.gy/exbfnk>.
- [14] พรพิมล ม่วงไทย, เบญจมาศ ถนอมทรัพย์, มณีกานต์ ชินวรรังสี, ปิยะดา จิตรตั้งประเสริฐ. **การศึกษาความเป็นไปได้ในการเตรียมสารประกอบเอสเทอร์และกลีเซอรอลจากกากของเสียในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์นม**. รายงานวิจัยมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ 2553.
- [15] จารุวัลย์ โพธิ์ไพบูลย์, ดวงกมล อยู่เจริญ, บุรส์กร คชฤทธิ์. **การผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา**. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา 2547
- [16] ประกาศิต คุณพระศิลา. 2550. **การผลิตไบโอดีเซลจากถั่วเหลืองโดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน**. ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรการเกษตรและสิ่งแวดล้อม. 5-8.
- [17] Ma, F. and Hanna, M.A. **Biodiesel Production: A Review**. *Bioresource Technology* 70 (1999)1-15.
- [18] Schwab, A.W., Bagby, M.O. and Freedman, B. **Preparation and properties of diesel fuels from vegetable oils**. *Fuel*. 66 (1987) 1372-1378.
- [19] Atahualpa, M.M. **Production of biodiesel from corn oil and ethanol by homogeneous alkali catalyzed transesterification**. Department of Chemical Engineering Royal Institute of Technology (2011) 13-18.
- [20] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. **เทคนิคการผลิตไบโอดีเซลให้ได้คุณภาพ**. [Online]. Available: <http://www2.dede.go.th/bett/Activities/KM/BioDiesel%20Manual.pdf>
- [21] อัญญา ยอดเรือนวงศ์. 2545. **คุณสมบัติของเชื้อเพลิงดีเซลชีวภาพจากน้ำมันพืชดิบโดยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 136.
- [22] สุวดี ก้องพารากุล. **เคมีของการเร่งปฏิกิริยา**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. 2561.
- [23] Kouzu, M., Kasuno, T., Sugimoto, Y., Yamanaka, S., Hidaka, J. **Calcium oxide as a solid base catalyst for transesterification of soybean oil and its application to biodiesel production**. *Fuel*. 87 (2008) 2798-2806.
- [24] Romanoff, A.L., Romanoff, A.J. **The avian egg**. John Wiley & sons, Inc., New York, NY, 1949.
- [25] สอิ่ง จักษุศิลา. **ประโยชน์ของสังกะสีออกไซด์**. [Online]. Available : http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss_j/2538_43_139_p6-10.pdf
- [26] วิทยาศาสตร์วัฒนธรรมการศึกษาจิตวิทยาการกีฬาและสุขภาพดี. **สูตรแบบเรียนออกไซด์ คุณสมบัติความเสี่ยงและการใช้ประโยชน์**. [Online]. Available : <https://rb.gy/jtqsgq>
- [27] รติกร อลงกรณ์โชติกุล. (2550, มีนาคม-เมษายน). **สมบัติของไบโอดีเซล...ที่เราต้องการ**. วารสารวิทยาศาสตร์. 61(2): 143-147.
- [28] พิศมัย เจนวนิชปัญจกุล; และลลิตา อัตนโธ. (2549). **รอบรู้...เรื่องราว ไบโอดีเซล**. ปทุมธานี: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [29] กรมธุรกิจพลังงาน. 2556. **กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน**. กรุงเทพฯ: [ม.ป.ท.]
- [30] Teresa, L., Alleman and Robert, L., McCormick. **Biodiesel Handling and use guide (fifth edition)**. U.S. Department of Energy. DOE/GO-102016-4875, (2016).
- [31] คณะวิทยาศาสตร์ วิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีกาญจนบุรี. **ไบโอดีเซลจากน้ำมันปรุงอาหารที่ใช้แล้ว**. [Online]. Available: <http://www.riverkwai.co.th/kaset/bio.html>
- [32] Masato, K. Takekazu, K. Masahiko, T. Yohikazu, S. Shinya, Y. and Jusuke. H. **Calcium oxide as a solid base catalyst for transesterification of soybean and its application to biodiesel production**. Fuel. 6 (2008) 2798-2806.
- [33] Xuejun, L. Huayang, H. Yujun, W. Shenlin, Z. and Xianglan, P. **Transesterification of soybean oil to biodiesel using CaO as a solid base catalyst**. Fuel. 87 (2008) 216-221.
- [34] BHighina, B.K. Bugaje, I.M. and Umar, B. **Biodiesel production from Jatropha caucus oil in a batch reactor using zinc oxide as catalyst**. Journal of Petroleum Technology and Alternative Fuels. 2 (2011) 146-149.
- [35] Kesic, Z. Lukic, I. Zdujic, M. Liu, H. and Skala, D. **Mechanochemically Synthesized CaO-ZnO catalyst for biodiesel production**. Procedia Engineering. 42 (2012) 1169-1178.
- [36] Emin, S.U., Erol, S. **Transesterification of sunflower oil on single step sol-gel made Al₂O₃ supported CaO catalysts : Effect of basic strength and basicity on turnover frequency**. Bioresource Technology 106 (2012) 178-181.
- [37] Dinesh, K., Amjad, A. **Transesterification of low-quality triglycerides over a Zn/CaO heterogeneous catalyst : Kinetics and reuseability studies**. Energy and Fuels 27 (2013) 3758-3768.
- [38] Thongthai Witoon, Sittisut Bumrungsalee, Peerawut Vathavanichkul, Supaphorn Palitsakun, Maythee Sasriyoot, Kajornsak Faungnawakij. **Biodiesel production from transesterification of palm oil with methanol over CaO supported on bimodal meso-macroporous silica catalyst**. Bioresource Technology 156 (2014) 329-334.
- [39] Idris, A.M. **The effects of alcohol to oil molar ratios and the type of alcohol on biodiesel production using transesterification process**. Egyptian Journal of Petroleum (2016) 25, 21-31.
- [40] Virginia, C.R., Julieta, S.R. **Biodiesel production as a solution to waste cooking oil (WCO) disposal. Will any type of WCO do for a transesterification process? A quality assessment**. Journal of Environmental Management 228 (2018) 117-129.

- [41] Baskav, G. Selvakumari, A.E. and Aiswarya, R. **Biodiesel production from castor oil using heterogeneous Ni doped ZnO nanocatalyst.** Bioresourc Technology. (2018) 793-798
- [42] Jayashiri, N. Satyanarayana Murlthy, Y.V.V. and Ramesh, M. **Synthesis of alagae its characterization.** Rasayan J. Chem. 12 (2019) 1757-1765.
- [43] Dino, W. and Ratna Dewi, K. **Synthesis of ZnO/CaO catalyst from eggshell waste for biodiesel production.** Jurnal Bahan Alam Terbarukan. 8 (2019) 65-71.
- [44] Jakkrapong, J., Apanee, L., Napaphat, S., Narinphop, C. **Biodiesel production from canola oil with methanol using Ba impregnated calcium oxide with microwave irradiation-assistance.** Chiang Mai J. Sci. 46 (2019) 987-1000.
- [45] Wasi, U.R., Abu, M.K., Abdul, H.A., Umar, H., Bisheswar, K., Gopinath, H. **Parametric optimization of calcined and Zn-doped waste egg-shell catalyzed biodiesel synthesis from Hevea brasiliensis oil.** Energy Nexus 6 (2022) 100073.
- [46] Wenlei, X., Zhenqiang, Y. **Ba-ZnO catalysts for soybean oil transesterification.** Catalysis Letter 117 (2007) 159-165.
- [47] Sumari, S., Mega, M., Aman, S., Muhammad, R.A. **Sono-transesterification of kapok seed oil with CaO:BaO (x:y)/ active natural Zeolite catalyst.** Journal of Renewable Materials 10 (2022) 3659-3670.
- [48] Park, Y.M. Lee, D.W. Kim, D.K. Lee, J. and Lee, K.Y. **The heterogeneous Catalyst system for the continuous conversion of free fatty acid in used vegetable oil for the production of biodiesel.** Catalyst Today. 131 (2008) 238-243.
- [49] Monica, C.G.A. Diana, C.S.A. Cevalcanate, J. Jose ,S.G. Josefa, M.M.R. Ramon, M.T. Enrique, R.C. Antonio, J.L. and Pedro, M.T. **Transesterification of ethyl butyrate with methanol using MgO/CaO catalyst.** Journal of Molecular Catalysis A: Chemical. 300 (2009) 19-24.
- [50] Istadi, I., Mabruro, U., Kalimantan, B.A., Buchri, L., and Anggoro, D.D. **Reusability and Stability tests of calcium oxide based catalyst for transesterification of soybean oil to biodiesel.** Bulletin of Chemical Reaction Engineering 4 Catalysis. 11 (2016) 34-39.
- [51] Hong, Y., Joseph, I. **Characterization of semisolid fats and edible oils by Fourier transform infrared photoacoustic spectroscopy.** Journal of the American Oil Chemists' Society 77 (2000) 291-295.

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนเวสสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[52] NMR analysis. [Online]. Available: <http://www.rsc.org/suppdata/c5/ra/c5ra19575f/c5ra19575f1.pdf>

[53] Geetha, D., Hajer, A.A. **Green synthesis, characterization and application of calcium carbonate nanoparticles in the effective treatment of grey water for sustainable water management.** Journal of the Iranian Chemical Society (2023) 20:1417–1426.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.การคำนวณหาค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซล

วิธีการคำนวณ

$$\text{ค่าความเป็นกรด} = \frac{(0.01V) \times 56}{g}$$

g = น้ำหนักของไบโอดีเซล (กรัม)

V = ปริมาตรของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต (มิลลิลิตร)

ตัวอย่างการคำนวณ เติมเอทานอลและไดเอทิลอีเทอร์ อย่างละ 10 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่แล้วไทเทรตด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นเติมไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที จำนวน 2.11 กรัม แล้วนำไปไทเทรตกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จะใช้ปริมาตรของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในการไทเทรตเท่ากับ 0.76 มิลลิลิตร

จากสูตร

$$\begin{aligned} \text{ค่าความเป็นกรด} &= \frac{(0.01V) \times 56}{g} \\ &= \frac{0.01 \times 2.28 \times 56}{2.03} \\ &= 0.63 \text{ mg KOH/g} \end{aligned}$$

3.การคำนวณหาเลขไอโอดีนของไบโอดีเซล



วิธีการคำนวณ

$$\text{เลขไอโอดีน} = \frac{(2.54(B-A))}{g}$$

A = ปริมาตรของโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตขวดตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรของโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตขวดเปรียบเทียบ (มิลลิลิตร)

g = น้ำหนักของไบโอดีเซลที่ใช้ (กรัม)

ตัวอย่างการคำนวณ เติมไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที จำนวน 1.05 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ที่ล้างคลอรีนแล้ว จากนั้นเติมคลอรีน 10 มิลลิลิตร สารละลายยานัสไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอโอดีน 20 มิลลิกรัมและตั้งทิ้งไว้ในที่มีด 45 นาที จากนั้นเติม 10% โพแทสเซียมไอโอไดด์ลงไป 10 มิลลิกรัม ใช้ น้ำกลั่น 25 มิลลิกรัม ชะล้างไอโอดีน แล้วนำไปไทเทรตกับโซเดียมไทโอซัลเฟตจนสีของไอโอดีนจางลง จากนั้นเติมน้ำแ่่งลงไปประมาณ 0.5-1 มิลลิกรัมสารละลายจะเป็นสีน้ำเงินแล้วไทเทรตต่อจนสีน้ำเงินหายไป จะได้มิลลิกรัมของโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตขวดตัวอย่างเท่ากับ 7.86 มิลลิกรัม จากนั้นทำแบลงค์โดยการใส่สารละลายทั้งหมดเหมือนกันแต่ไม่ใส่ไอโอดีนลงไป เมื่อนำไปไทเทรตจะได้ มิลลิกรัมของโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตเท่ากับ 15.0 มิลลิกรัม

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร} \quad \text{เลขไอโอดีน} &= \frac{(2.54(B-A))}{g} \\ &= \frac{(2.54 (15.0-7.86))}{1.05} \\ &= 17.27 \text{ กรัมไอโอดีน/100กรัม} \end{aligned}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

1. ตารางบันทึกผลร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ในสภาวะต่าง ๆ

ตารางที่ ข.1 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของ Zn:Ba ของตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO จากเปลือกไข่ที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

อัตราส่วนของ Zn:Ba (%)	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	น้ำหนักน้ำมันพืชที่ใช้ (g)	น้ำหนักเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ (g)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์
0:0	9:1	3	65	2	25.00	15.50	62.01
10:0					25.01	11.64	46.52
7:0.3					25.00	22.09	88.36
5:0.5					25.02	7.19	28.72
3:0.7					25.00	4.31	17.24
0:1					25.04	10.48	41.84

ตารางที่ ข.2 ผลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

อัตราส่วนของ Zn:Ba (%)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%)	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	น้ำหนักน้ำมันพืชที่ใช้ (g)	น้ำหนักเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ (g)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์
7:0.3	0.5	9:1	65	2	25.04	21.84	87.22
	1				25.00	24.79	99.16
	2				25.00	23.76	95.02
	3				25.10	22.17	88.36
	4				25.06	21.20	84.58
	5				25.02	20.87	83.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

อัตราส่วนของ Zn:Ba (%)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%)	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	น้ำหนักน้ำมันพืชที่ใช้ (g)	น้ำหนักเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ (g)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์
7:0.3	1	6:1	65	2	25.03	23.49	93.84
		9:1			25.00	24.79	99.16
		12:1			25.05	23.79	94.99
		15:1			25.01	23.13	92.48

ตารางที่ ข.4 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

อัตราส่วนของ Zn:Ba (%)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%)	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	น้ำหนักน้ำมันพืชที่ใช้ (g)	น้ำหนักเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ (g)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์
7:0.3	1	9:1	65	1	25.00	21.18	84.47
				2	25.00	24.79	99.16
				3	25.03	22.14	88.45
				4	25.01	21.91	87.61

ตารางที่ ข.5 ผลของจำนวนครั้งของการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

อัตราส่วนของ Zn:Ba (%)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%wt)	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	จำนวนการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ (รอบ)	น้ำหนักน้ำมันพืชที่ใช้ (g)	น้ำหนักเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ (g)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์
7:0.3	1	9:1	65 ± 5	2	1	25.01	24.79	99.16
					2	25.01	24.46	97.82
					3	25.00	23.75	94.99
					4	25.04	23.55	94.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้复制或เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.ตารางแสดงเกณฑ์มาตรฐานต่าง ๆ ตามที่กฎหมายกำหนดของไบโอดีเซล

ตารางที่ ข.6 เกณฑ์มาตรฐานของไบโอดีเซล

ลำดับที่	ข้อกำหนด		อัตราสูงต่ำ		วิธีทดสอบ
1	เมทิลเอสเทอร์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่ต่ำกว่า	96.5	EN 14103
2	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	กิโลกรัมลูกบาศก์/เมตร	ไม่ต่ำกว่าและไม่สูงกว่า	860-900	ASTM D 1298
3	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	เซนติสโตกส์	ไม่ต่ำกว่าและไม่สูงกว่า	3.5-5.0	ASTN D 445
4	จุดวาบไฟ	องศาเซลเซียส	ไม่ต่ำกว่า	120	ASTM D 93
5	กำมะถัน	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.0010	ASTN D 2622
6	จำนวนซีเทน		ไม่ต่ำกว่า	51	ASTM D 613
7	เถ้าซัลเฟต	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.02	ASTM D 874
8	น้ำ	ร้อยละโดยปริมาตร	ไม่สูงกว่า	0.050	ASTM D 2709
9	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.0024	ASTM D5452
10	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส	ชั่วโมง	ไม่ต่ำกว่า	6	EN 14112
11	ค่าความเป็นกรด	mg KOH/g	ไม่สูงกว่า	0.50	ASTM D 664
12	ค่าไอโอดีน	กรัมไอโอดีน/100กรัม	ไม่สูงกว่า	120	EN 14111
13	กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	12.0	EN 14103
14	เมทานอล	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14110
15	โมนกรีเซอไรด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.80	EN 14105
16	ไดกรีเซอไรด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
17	ไตรกรีเซอไรด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
18	กรีเซอรินอิสระ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.02	EN 14105
19	กรีเซอรินทั้งหมด	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.25	EN 14105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.ตารางบันทึกค่าความเป็นกรด (Acid value) และ ค่าไอโอดีน (Iodine value)

ตารางที่ ข.7 ค่าความเป็นกรดของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่อัตราส่วน Zn:Ba ต่างๆ

ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง				น้ำหนักไบโอดีเซลซึ่งได้(g)	ปริมาณ KOHที่ใช้ไทเทรต (ml)	ค่าความเป็นกรด (mg KOH/g)
	จำนวนครั้งการนำกลับมาใช้ใหม่	อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)			
Zn-Ba/CaO (10:0)	-	9:1	3%wt	120	2.11	2.86	0.76
Zn-Ba/CaO (7:0.3)	-	9:1	3%wt	120	2.03	2.28	0.63
Zn-Ba/CaO (5:0.5)	-	9:1	3%wt	120	2.07	2.18	0.59
Zn-Ba/CaO (3:0.7)	-	9:1	3%wt	120	2.01	2.19	0.61
Zn-Ba/CaO (0:1)	-	9:1	3%wt	120	2.00	1.86	0.52
Zn-Ba/CaO (7:0.3)	-	9:1	1%wt	120	2.03	2.03	0.56
Zn-Ba/CaO (7:0.3)	-	15:1	1%wt	120	2.10	1.09	0.29
Zn-Ba/CaO (7:0.3)	-	9:1	1%wt	240	2.02	1.30	0.36
Zn-Ba/CaO (7:0.3)	2	9:1	1%wt	120	2.04	0.69	0.19
Zn-Ba/CaO (7:0.3)	4	9:1	1%wt	120	2.05	0.81	0.22
น้ำมันถั่วเหลือง	-	-	-	-	2.02	0.61	0.17

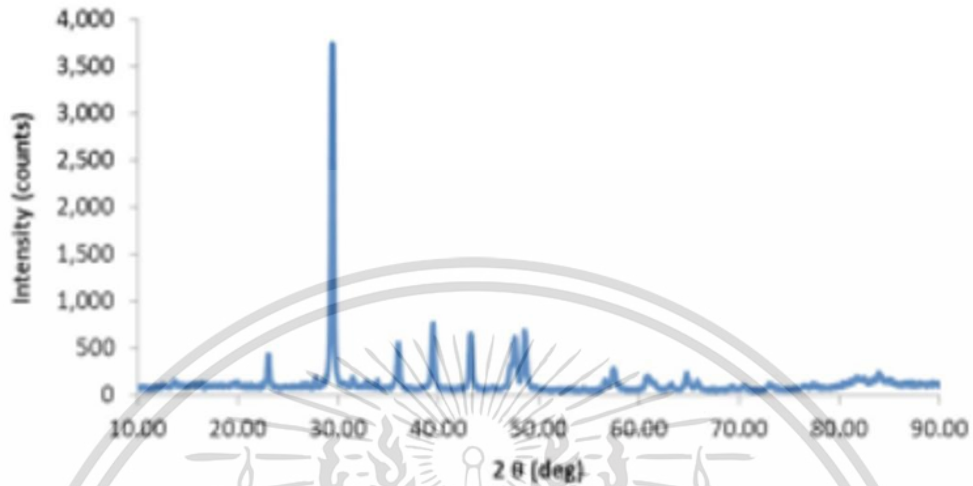
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.8 เลขไอโอดีนของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Zn-Ba/CaO ที่อัตราส่วน Zn:Ba ต่างๆ

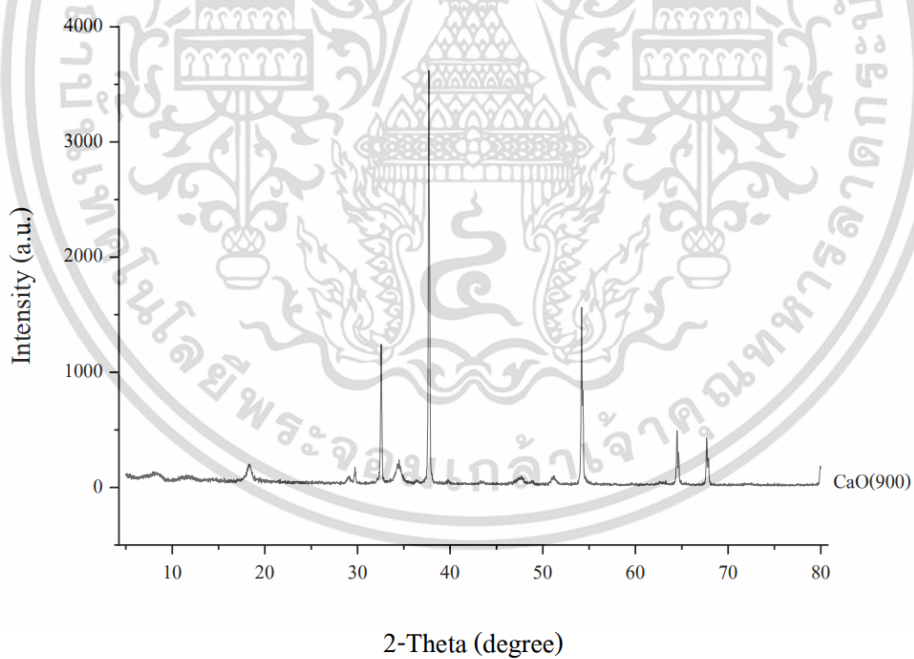
ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง				น้ำหนักไบโอดีเซลที่ซั่งได้(g)	ปริมาณ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ไทเทรต (ml)	เลขไอโอดีน(g Iodine/100g)
	จำนวนครั้งการนำกลับมาใช้ใหม่	อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)			
Zn-Ba/CaO (10:0)	-	9:1	3%wt	120	1.03	7.48	18.54
Zn-Ba/CaO (7:0.3)	-	9:1	3%wt	120	1.05	7.86	17.27
Zn-Ba/CaO (5:0.5)	-	9:1	3%wt	120	1.00	7.60	18.80
Zn-Ba/CaO (3:0.7)	-	9:1	3%wt	120	1.04	7.41	18.54
Zn-Ba/CaO (0:1)	-	9:1	3%wt	120	1.01	7.83	18.03
Zn-Ba/CaO (7:0.3)	-	9:1	1%wt	120	1.06	8.11	16.51
Zn-Ba/CaO (7:0.3)	-	15:1	1%wt	120	1.12	7.16	17.78
Zn-Ba/CaO (7:0.3)	-	9:1	1%wt	240	1.09	7.37	17.78
Zn-Ba/CaO (7:0.3)	2	9:1	1%wt	120	1.01	6.97	17.53
Zn-Ba/CaO (7:0.3)	4	9:1	1%wt	120	1.10	8.73	14.48
น้ำมันถั่วเหลือง	-	-	-	-	1.00	9.4	14.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.



รูปที่ ค.1 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของ CaCO_3 [53]



รูปที่ ค.2 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของ CaO จากการแคลไซน์เปลือกไข่ไก่ที่ 900°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา

วันที่ 12 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2566

ข้าพเจ้า นายชัชพงษ์ พินิจกิจ รหัสประจำตัว 62050274
นายธนพัฒน์ ดำรงสุสกุล รหัสประจำตัว 62050290

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี

ขอรับรองว่าโครงการพิเศษเรื่อง

ชื่อภาษาไทย การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลือง
โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์และแบเรียมบนแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่

ชื่อภาษาอังกฤษ Biodiesel production by transesterification of soybean oil using
Zinc and Barium doped on CaO from waste egg-shell as catalyst
Catalyst

ปีการศึกษา 2565

เป็นผลงานวิจัยที่ได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อน
เรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่ม
โครงการพิเศษฉบับสมบูรณ์แล้ว โปรแกรมอักษรวินิจฉัย 5.48 %

ลงชื่อ.....

(นายชัชพงษ์ พินิจกิจ)

นักศึกษา

ลงชื่อ.....

(นายธนพัฒน์ ดำรงสุสกุล)

นักศึกษา

ข้าพเจ้า ดร. อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ได้ตรวจสอบโครงการพิเศษของ
นักศึกษาข้างต้น แล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้
เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ.....

(ดร. อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้