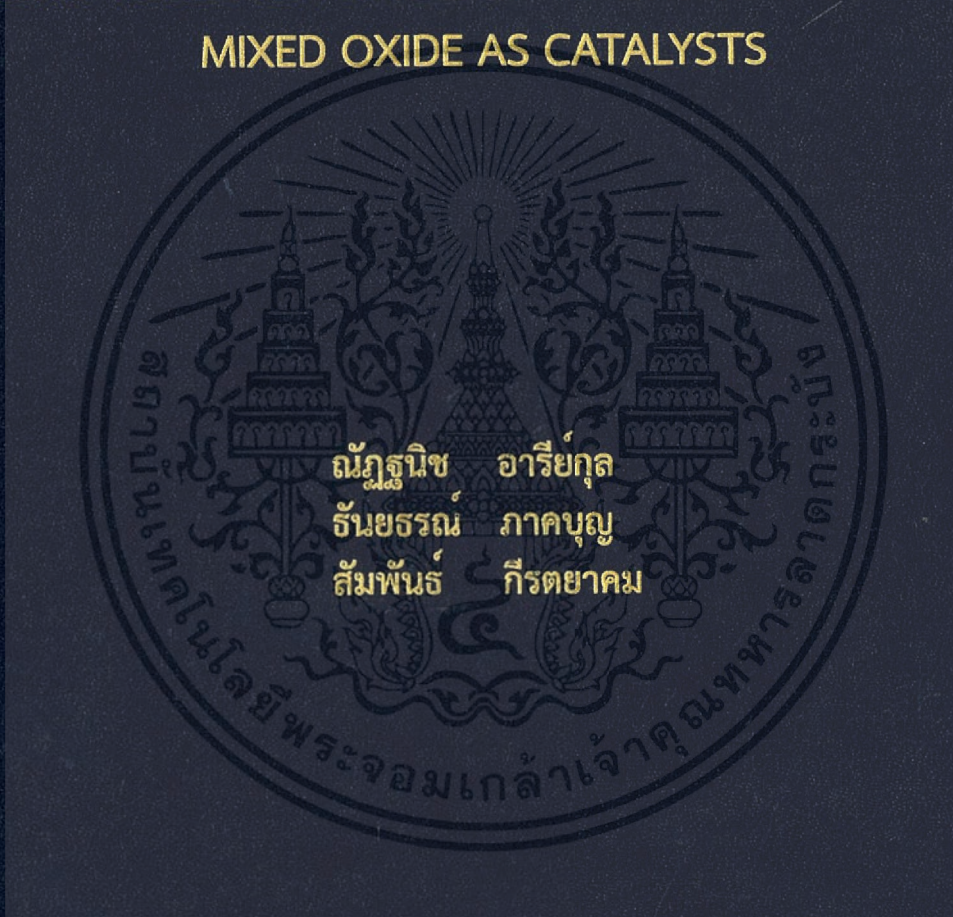


การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้ว โดยใช้ตัวเร่ง
ปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและ
แคลเซียม

SYNTHESIS OF BIODIESEL FROM WASTE PALM OIL
USING TUNGSTEN OXIDE ON MAGNESIUM CALCIUM
MIXED OXIDE AS CATALYSTS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้ว โดยใช้ตัวเร่ง
ปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและ

แคลเซียม

SYNTHESIS OF BIODIESEL FROM WASTE PALM OIL
USING TUNGSTEN OXIDE ON MAGNESIUM CALCIUM
MIXED OXIDE AS CATALYSTS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYNTHESIS OF BIODIESEL FROM WASTE PALM OIL
USING TUNGSTEN OXIDE ON MAGNESIUM CALCIUM
MIXED OXIDE AS CATALYSTS



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF
SCIENCE IN INDUSTRIAL CHEMISTRY
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้ว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
ทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม

Synthesis of biodiesel from waste palm oil using tungsten
oxide on magnesium calcium mixed oxide as catalysts

ชื่อนักศึกษา นางสาวณัฐนิช อารีย์กุล รหัสนักศึกษา 57050405
นางสาวธันยธรณ์ ภาคบุญ รหัสนักศึกษา 57050423
นายสัมพันธ์ กীরตยาคม รหัสนักศึกษา 57050524

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา เคมี
ปีการศึกษา 2560
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
(เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2560

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

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้ว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวณัฐนิช อารีย์กุล	รหัสนักศึกษา 57050405
	นางสาวธันยธรณ์ ภาคบุญ	รหัสนักศึกษา 57050423
	นายสัมพันธ์ กิรตยาคม	รหัสนักศึกษา 57050524
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)	
ภาควิชา	เคมี	
ปีการศึกษา	2560	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล	

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วกับเมทานอลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน และใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแคลเซียมของตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม ปริมาณทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มใช้แล้ว ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการนำกลับมาใช้ใหม่ จากการทดลองพบว่า การเติมทั้งสแตนออกไซด์ลงบนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมจะให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่สูงกว่าการใช้สแตนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมเพียงอย่างเดียว โดยสภาวะที่ดีที่สุดในการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ คือ ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมที่มีปริมาณทั้งสแตนบนตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มใช้แล้วคือ 12:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส พบว่าได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงถึง 81.28 นอกจากนี้ยังพบว่าเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้มีค่าความเป็นกรด ค่าไอโอดีนและค่าความร้อนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตามที่กฎหมายกำหนด

คำสำคัญ : ไบโอดีเซล ทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน ทั้งสแตนออกไซด์ เมทิลเอสเทอร์ ออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม

Special Project Title	Synthesis of biodiesel from waste palm oil using tungsten oxide on magnesium calcium mixed oxide as catalysts		
Name	Miss Nattanit Areekul	Student ID	57050405
	Miss Suthinee Tangsomsuk	Student ID	57050423
	Mr. Sumpan Keeratayakom	Student ID	57050524
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
Department	Chemistry		
Academic Year	2017		
Special project advisor	Dr.Amnat Permsubscul		

Abstract

The objectives of this research were synthesis of biodiesel via transesterification reaction of waste palm oil with methanol using tungsten oxide on magnesium calcium mixed oxide as catalysts. The variables that affect on the %yield of methyl ester such as mole ratios of Mg: Ca in magnesium calcium mixed oxide, amounts of tungsten loaded on the magnesium calcium mixed oxide, mole ratios of methanol to waste palm oil, dosage of catalysts, reaction time and catalyst stability and reusability were also studied. The results showed that the reaction using tungsten oxide loaded on magnesium calcium mixed oxide was found to be more effective than without tungsten oxide. Moreover, the highest yield of methyl ester, 81.28% was obtained by using 40 wt.% of tungsten oxide on magnesium calcium mixed oxide, methanol: oil mole ratios of 12:1, catalyst dosage 2 wt.%, for 2 hours. Also, the properties of biodiesel were tested. It was found that the acid value, iodine value and heating value were all in the commercial standard requirements.

Keywords: Biodiesel, Magnesium calcium mixed oxide, Methyl ester, Transesterification, Tungsten oxide

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยความกรุณาจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล ที่ให้คำปรึกษาและตรวจทานแก้ไขโครงการฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ และ ดร.ชาวลย์ ศรีวงษ์ กรรมการสอบโครงการพิเศษ ที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อชี้แนะ และตรวจสอบข้อมูลต่าง ๆ ในโครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความถูกต้อง

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ให้ความรู้และคำแนะนำ

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในด้านอุปกรณ์และสารเคมี

ขอขอบพระคุณ ครอบครัวอันเป็นที่รักสำหรับกำลังใจและการสนับสนุนที่มีให้เสมอมา

ขอขอบพระคุณ รุ่นพี่ทุกคนที่กรุณาให้คำแนะนำ และคอยช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ เพื่อนๆ สาขาเคมีอุตสาหกรรม ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจอยู่เสมอๆ

ณัฐนิช อารีย์กุล

ฉันทธรรม ภาคบุญ

สัมพันธ์ กิรตยาคม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ

บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.5 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 ไบโอดีเซล.....	7
2.1.1 ประเภทไบโอดีเซล.....	8
2.1.1.1 ไบโอดีเซล (Straight Vegetable Oil).....	8
2.1.1.2 ไบโอดีเซลแบบลูกผสม (Veggie / Kero Mix).....	8
2.1.1.2 ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์.....	8
2.1.2 สมบัติทางด้านเชื้อเพลิงที่สำคัญของไบโอดีเซล.....	8
2.1.2.1 ค่าความร้อน (Heating value).....	8
2.1.2.2 จุดวาบไฟ (Flash Point).....	9
2.1.2.3 ค่าความเป็นกรด (Acid value).....	9
2.1.2.4 เลขไอโอดีน (Iodine value).....	9
2.1.2.5 ความหนืด (Viscosity).....	9
2.1.3 ประโยชน์ของน้ำมันไบโอดีเซล.....	10
2.1.4 ผลกระทบของไบโอดีเซลที่มีต่อเครื่องยนต์.....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันพืช.....	11
2.3 ปฏิกริยาที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ไบโอดีเซล.....	13
2.3.1 การนำมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลโดยตรงและการผสม (Direct use and Blending).....	13
2.3.2 ไมโครอิมัลชัน (Microemulsion)	14
2.3.3 กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อน (Thermal Cracking or Pyrolysis)	14
2.3.4 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน	15
2.3.4.1 การทำปฏิกริยาโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกริยา.....	16
2.3.4.2 การทำปฏิกริยาโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกริยา	17
2.3.4.3 การทำปฏิกริยาในเหนือวิกฤตของเมทานอล.....	18
2.4 ตัวเร่งปฏิกริยา.....	18
2.5 การเตรียมตัวเร่งปฏิกริยาด้วยเทคนิคการเคลือบฝัง (Impregnation).....	20
2.5.1 การเคลือบฝังแบบแห้ง	21
2.5.2 การเคลือบฝังแบบเปียก	21
2.6 แมกนีเซียมออกไซด์.....	21
2.6.1 ประโยชน์ของสารประกอบแมกนีเซียมออกไซด์.....	21
2.7 แคลเซียมออกไซด์.....	22
2.7.1 ประโยชน์ของสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์.....	23
2.8 ทังสเดนออกไซด์.....	23
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	28
3.1 สารเคมี	28
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	28
3.3 วิธีการทดลอง.....	30
3.3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกริยาออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม	30
3.3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกริยาทังสเดนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและ	

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	32
3.3.4 การสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์.....	35
3.3.5 การทดสอบสมบัติทางเชื้อเพลิงและโครงสร้างทางเคมีของเมทิลเอสเทอร์.....	41
3.3.5.1 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (Acid value)	41
3.3.5.2 การวิเคราะห์หาเลขไอโอดีน (Iodine value)	42
3.3.5.3 การวิเคราะห์หาค่าความร้อน (Heating value).....	43
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	45
4.1 การศึกษาลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	45
4.1.1 ความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	45
4.1.2 องค์ประกอบของธาตุบนตัวเร่งปฏิกิริยา.....	47
4.1.3 ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	48
4.1.4 พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	56
4.1.5 ความแรงและปริมาณของความเป็นกรดเบสของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	57
4.1.6 การพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR)	58
4.2 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน.....	59
4.2.1 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของ Mg ต่อ Ca ของตัวเร่งปฏิกิริยา MgO-CaO ที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์	59
4.2.2 ผลของปริมาณทั้งสเดนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์	61
4.2.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์	64
4.2.4 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์.....	67
4.2.5 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์.....	68
4.2.6 การศึกษาเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการนำกลับมาใช้ใหม่.....	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีและทดสอบสมบัติของเมทิลเอสเทอร์.....	71
4.3.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier-Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR)	72
4.3.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีด้วยเครื่องฟูเรียทรานส์ฟอร์มนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier-Transform Nuclear Magnetic Resonance Spectrophotometer, FT-NMR)	74
4.3.3 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด เลขไอโอดีนและค่าความร้อนของเมทิลเอสเทอร์....	77
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	79
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	79
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	80
เอกสารอ้างอิง	81
ภาคผนวก	84
ภาคผนวก ก การคำนวณหาร้อยละของเมทิลเอสเทอร์จากการชั่งน้ำหนัก	85
ภาคผนวก ข การคำนวณหาขนาดผลึกของออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม (MgO-CaO)	86
ภาคผนวก ค ตารางบันทึกผลร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ในสภาวะต่างๆ	89
ภาคผนวก ง โปรไฟล์ TPD ของตัวเร่งปฏิกิริยา	93
คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ	95

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล	7
2.2 คุณสมบัติมาตรฐานของไบโอดีเซล	10
2.3 การเปรียบเทียบผลการใช้ไบโอดีเซล 100% (B100) และน้ำมันดีเซลซึ่งผสมด้วยไบโอดีเซล20% (B20)	11
2.4 คุณสมบัติและองค์ประกอบกรดไขมันหลักของน้ำมันพืชต่างๆ	13
2.5 การเปรียบเทียบคุณสมบัติและปัจจัยต่างๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์และแบบวิวิธพันธ์ ..	19
3.1 ตัวแปรในการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของ Mg ต่อ Ca ของตัวเร่งปฏิกิริยา MgO-CaO ที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์	38
3.2 ตัวแปรในการศึกษาผลของปริมาณทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์	39
3.3 ตัวแปรในการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่มีผลต่อร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	39
3.4 ตัวแปรในการศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มีผลต่อร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	40
3.5 ตัวแปรในการศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนแมกนีเซียมออกไซด์ผสมแคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	40
3.6 ตัวแปรในการศึกษาเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการนำกลับมาใช้ใหม่	41
4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุแมกนีเซียม(Mg) แคลเซียม(Ca) และธาตุทั้งสแตน (W) บนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence Spectroscopy).....	48
4.2 แสดงปริมาณธาตุองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาWO ₃ /MgO-CaOที่ได้จากเครื่อง SEM/EDX (mapping).....	56
4.3 พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET	56
4.4 ค่าความเป็นกรดและเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TPD	57
4.5 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของ Mg ต่อ Ca ของตัวเร่งปฏิกิริยา MgO-CaO ที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์	60
4.6 ผลของปริมาณทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.7 ผลอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่มีผลต่อร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	65
4.8 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มีผลต่อร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	67
4.9 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	69
4.10 ตัวแปรในการศึกษาเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการนำกลับมาใช้ใหม่	70
4.11 แสดงหมู่ฟังก์ชันของเมทิลเอสเทอร์ที่การดูดกลืนแสงที่เลขคลื่นต่างๆ	74
4.12 ค่าความเป็นกรด เลขไอโอดีน และค่าความร้อนของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยา MgO-CaO ที่อัตราส่วนโดยโมลแตกต่างกัน	77
4.13 ค่าความเป็นกรด เลขไอโอดีน และค่าความร้อนของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยา MgO - CaO (2:1) ที่ปริมาณทั้งสแตนออกไซด์ 20wt.% และ 40wt.% ที่สภาวะต่างๆ	78
4.14 ค่าความเป็นกรด เลขไอโอดีน และค่าความร้อนของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยา 40wt.% WO ₃ /MgO-CaO ที่สภาวะต่างๆ	78

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์	12
2.2 ปฏิกริยาการแตกสลายด้วยความร้อน	14
2.3 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน	15
2.4 กลไกการเกิดปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกริยา.....	17
2.5 กลไกการเกิดปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกริยา	18
2.6 ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกริยาด้วยเทคนิคการเคลือบฝัง.....	20
3.1 เครื่องการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD).....	32
3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	33
3.3 เครื่อง BET- Autosorb-1C Surface Area and Pore Size Analyzer.....	33
3.4 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (XRF).....	34
3.5 เทคนิคการโปรแกรมอุณหภูมิเพื่อทดสอบการคายซับ (TPD).....	34
3.6 เครื่อง Parr Reactor.....	35
3.7 การแยกชั้นของเมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอลในกรวยแยก.....	37
3.8 เมทิลเอสเทอร์ที่ผ่านการคุดน้ำด้วยโซเดียมซัลเฟตแอนไฮดรัส.....	38
3.9 เครื่องวิเคราะห์พลังงานความร้อน (Bomb Calorimeter)	43
4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกริยา CaO, MgO และ MgO-CaO (2:1).....	46
4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกริยา MgO-CaO, 10wt.% WO ₃ /MgO-CaO, 20wt.% WO ₃ /MgO-CaO และ 40wt.% WO ₃ /MgO-CaO	47
4.3 ลักษณะพื้นผิว MgO CaO และ MgO-CaO (2:1) ที่กำลังขยายต่าง ๆ	49
4.4 ลักษณะพื้นผิวของ 10wt.% WO ₃ /MgO-CaO, 20wt.% WO ₃ /MgO-CaO และ 40wt.% WO ₃ /MgO-CaO ที่กำลังขยายต่าง ๆ	51
4.5 ลักษณะการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ บนตัวเร่งปฏิกริยา 10wt.% WO ₃ /MgO-CaO ที่วิเคราะห์จากเครื่อง SEM/EDX.....	53
4.6 ลักษณะการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ บนตัวเร่งปฏิกริยา 20wt.% WO ₃ /MgO-CaO ที่วิเคราะห์จากเครื่อง SEM/EDX.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ลักษณะการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ บนตัวเร่งปฏิกิริยา 40wt.% WO ₃ /MgO-CaO ที่วิเคราะห์จากเครื่อง SEM/EDX.....	55
4.8 FT-IR สเปกตรัมของ MgO-CaO และ 40wt.% WO ₃ /MgO-CaO	58
4.9 ลักษณะพันธะที่เกิดขึ้นของ WO ₃ กับ MgO-CaO	59
4.10 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของ Mg ต่อ Ca ของตัวเร่งปฏิกิริยา MgO-CaO ที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์	60
4.11 ผลของปริมาณทั้งสเดนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์.....	62
4.12 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ MgO-CaO (2:1) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	62
4.13 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา WO ₃ /MgO-CaO	63
4.14 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของ WO ₃ , MgO-CaO (2:1) และ 40wt.% WO ₃ /MgO-CaO	64
4.15 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสเดนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม	65
4.16 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสเดนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์.....	68
4.17 ผลของเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสเดนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	69
4.18 ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยา 40wt.% WO ₃ /MgO-CaO กลับมาใช้ใหม่.....	71
4.19 FT-IR สเปกตรัมของน้ำมันปาล์มที่ผ่านการใช้แล้วจากเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์.....	72
4.20 FT-IR สเปกตรัมของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 40wt.% WO ₃ /MgO-CaO ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 12:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง	73
4.21 FT-NMR สเปกตรัมของน้ำมันปาล์มที่ผ่านการใช้แล้วจากเครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์.....	75
4.22 FT-NMR สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 40wt.% WO ₃ /MgO-CaO ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 12:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง.....	76

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากการเพิ่มขึ้นของประชากรอย่างรวดเร็วในประเทศที่กำลังพัฒนาทั่วโลก ส่งผลให้มีการลดลงของแหล่งสำรองเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ (Fossil fuel) ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัด และก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมตามมา เช่น ภาวะโลกร้อน ซึ่งเป็นผลเกี่ยวเนื่องมาจากความต้องการทางด้านพลังงานเพื่อใช้ในกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ เช่น การขนส่ง การผลิตสินค้าและบริการ ซึ่งมักใช้พลังงานจากแหล่งปิโตรเลียม นอกจากนี้ยังมีการใช้พลังงานจากถ่านหิน (Coal) พลังงานนิวเคลียร์ (Nuclear power) แก๊สธรรมชาติ (Natural gas) และไฟฟ้าพลังน้ำ (Hydroelectricity) เป็นต้น [1] มีแนวโน้มว่าในอนาคตอันใกล้นี้โลกของเราจะมีปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงไม่เพียงพอต่อความต้องการของประชากรทั่วโลก ตลอดจนปัญหาทางด้านสุขภาพของมนุษย์ที่มีความเกี่ยวข้องกับมลพิษที่เกิดจากเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ ดังนั้นในขณะนี้หลายประเทศทั่วโลก รวมทั้งหลายๆหน่วยงานในประเทศไทยกำลังตื่นตัวในการหาแหล่งพลังงานแหล่งใหม่เพื่อเป็นทางเลือกในการตอบสนองความต้องการใช้พลังงานที่เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้มีการศึกษาและพัฒนาแหล่งพลังงานทางเลือกทดแทน (Renewable energy sources alternatives) [2]

เชื้อเพลิงชีวภาพ (Biofuel) คือ เป็นเชื้อเพลิงที่ได้จากชีวมวลหรือมวลชีวภาพ (Biomass) ที่อยู่ในรูปสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เป็นผลผลิตจากสิ่งมีชีวิต หรือ ผลิตผลจากการสร้างและสลายของสิ่งมีชีวิต (metabolic byproducts) จัดเป็นพลังงานทางเลือกหมุนเวียนที่สามารถฟื้นฟูหรือสร้างขึ้นใหม่ได้ [3] ซึ่งไบโอดีเซล หรือ Fatty acid methyl ester (FAME) ที่ผลิตได้จากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ สามารถนำมาทดแทนน้ำมันดีเซลที่ได้มาจากเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ได้ จึงเป็นทางเลือกในการแก้ปัญหาการลดลงของเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์และแก้ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากความสามารถในการหมุนเวียนมาใช้ใหม่และย่อยสลาย (Biodegradable) ได้ง่าย ไบโอดีเซลก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ปปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศน้อยมาก นอกจากนี้ไบโอดีเซลยังเป็นเชื้อเพลิงที่มีออกซิเจน (Oxygenated fuel) คือมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบมากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้การที่ไบโอดีเซลไม่มีกำมะถัน (S) จึงไม่ก่อให้เกิดแก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_x) และทำให้ปริมาณคาร์บอนน้อย ไม่ก่อให้เกิดการอุดตันของระบบไอเสีย ทำให้ช่วยยืดอายุการทำงานของเครื่องยนต์ได้อีกด้วย อีกหนึ่งประโยชน์ของไบโอดีเซลคือสามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal combustion engines) ได้เหมือนกับน้ำมันดีเซล โดยที่ไม่ต้องดัดแปลงเครื่องยนต์ [4]

ในปีค.ศ.1882 ดร.รูดอล์ฟ ดีเซล (Rudolf Diesel) บิดาแห่งเครื่องยนต์ดีเซล เป็นคนแรกที่ได้ทำการทดลองใช้น้ำมันพืชในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด (Compression ignition engine) ในการทดลอง ดร.รูดอล์ฟได้ใช้น้ำมันถั่วลิสงในการทดลองกับเครื่องยนต์ แต่ในขณะนั้นราคาของน้ำมันปิโตรเลียมถูกและมีวิธีการที่เหมาะสมในการกลั่นน้ำมันดิบเพื่อให้ได้น้ำมันดีเซล น้ำมันพืชจึงไม่เป็นที่ยอมรับนัก นอกจากนี้การใช้น้ำมันพืชยังประสบปัญหาเรื่องการที่น้ำมันพืชมีความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้หัวฉีดน้ำมันเป็นฝอยได้ยาก เกิดเป็นอุปสรรคต่อการป้อนน้ำมันเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ และสันดาปไม่สมบูรณ์ อีกทั้งน้ำมันพืชมีคุณสมบัติที่ระเหยตัวกลายเป็นไอได้น้อยและช้ามากยิ่งขึ้น ทำให้เกิดการจุดระเบิดได้ยากส่งผลให้เครื่องยนต์ติดยากและหลงเหลือคราบเขม่าที่เกาะที่หัวฉีด ผนังลูกสูบ แหวนและวาล์ว จากคุณสมบัติที่น้ำมันพืชมีความหนืดสูง และระเหยได้ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลนี้ทำให้เกิดความยุ่งยากเมื่อใช้น้ำมันพืชล้วนๆโดยตรงในเครื่องยนต์ แต่หลังจากปีค.ศ.1940 น้ำมันพืชได้ถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงอีกครั้งในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 และได้มีการพัฒนาเรื่อยมาจนถึง ณ ปัจจุบันทั่วโลกประสบปัญหาด้านราคาน้ำมันปิโตรเลียมที่สูงขึ้นนับตั้งแต่ในปีค.ศ.1973 เป็นต้นมา ประกอบกับได้มีการพัฒนาและผลิตน้ำมันพืชในรูปไบโอดีเซลเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานกับเครื่องยนต์มากขึ้น ไบโอดีเซลจึงเป็นที่ยอมรับและได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางมากขึ้น [5]

โดยทั่วไป การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับเมทานอล สามารถสังเคราะห์ได้โดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส (Alkaline catalyst) หรือตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดสูง (Strong acid catalysts) ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ นั้นมักใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ชนิดเบส (Homogeneous basic catalysts) เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) หรือแอลคอกไซด์ (Alkoxides) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด แต่อย่างไรก็ตามการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสนั้น สามารถทำให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนได้ ซึ่งจำเป็นต้องมีขั้นตอนในการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาที่ยังยาก นอกจากนั้นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสยังไม่เหมาะกับน้ำมันพืชที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid หรือ FFA) และน้ำในระดับที่สูงกว่า 0.5 และ 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ เพราะส่งผลให้เกิดการสลายตัวเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ ซึ่งแยกออกจากผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลได้ยากจะทำให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้น และการเกิดเป็นกลีเซอรอลในปฏิกิริยา ส่งผลทำให้ได้ผลผลิตของไบโอดีเซลที่ได้ลดลงอีกด้วย และในส่วนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ชนิดกรด (Homogeneous acid catalysts) เช่น กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดสามารถเร่งปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระ และปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์ได้พร้อมๆ กัน จึงประหยัดต้นทุนเพราะไม่ต้องมีการกำจัดกรดไขมันอิสระออกก่อน แต่พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส ดังนั้นจึงต้องใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันนานกว่า อีกทั้งยังมีปัญหาในการแยกตัวเร่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ และสามารถเกิดการกัดกร่อนต่อผนังของเครื่องปฏิกรณ์ ระบบท่อและวาล์วได้ [6]

ทั้งนี้เพื่อเป็นการแก้ปัญหาและเพิ่มประสิทธิภาพของไบโอดีเซล พบว่าในตลอดช่วงระยะเวลาที่ผ่านมาได้มีผู้วิจัยสนใจศึกษาและทำการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดกรดและเบสขึ้นอย่างหลากหลาย สำหรับเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน เช่น ออกไซด์ของโลหะแอลคาไลน์เอิร์ธ เช่น CaO , MgO , BaO และ SrO ซึ่งมีความเป็นเบสสูง สามารถให้ผลผลิตไบโอดีเซลมากที่อุณหภูมิต่ำและความดันบรรยากาศ ซึ่ง CaO เป็นออกไซด์ของโลหะแอลคาไลน์เอิร์ธที่ให้ผลผลิตไบโอดีเซลสูงและมีข้อดีในทางเศรษฐศาสตร์ นั่นคือมีราคาถูก เสถียรภาพดี ด้านทานต่อน้ำ และมีค่าการละลายต่ำ สำหรับ MgO มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับออกไซด์ของโลหะแอลคาไลน์เอิร์ธอื่นๆ แต่มีข้อดีในแง่ของขนาดอนุภาคเล็ก พื้นที่ผิวสูงทำให้ active site สามารถกระจายตัวได้ดี ดังนั้นการทำให้เกิดออกไซด์ผสมของ CaO และ MgO จะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้มีพื้นที่ผิวสูง มีเสถียรภาพและประสิทธิภาพสูงในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน [7]

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดกรดมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเมื่อใช้วัตถุดิบตั้งต้นเป็นน้ำมันคุณภาพต่ำ เช่น น้ำมันพืชใช้แล้ว (waste cooking oil) ในน้ำมันเหล่านี้จะมีกรดไขมันอิสระ (free fatty acid) จำนวนมากซึ่งเกิดจากน้ำมันที่ผ่านการให้ความร้อน ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด ได้แก่ ออกไซด์ของโลหะทรานซิชัน เช่น ทังสเตน เซอร์โคเนีย และ โมลิบดีนัม (W , Zr , Mo) มีประสิทธิภาพดีเยี่ยมสำหรับเร่งปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (esterification) ของกรดไขมันอิสระให้เกิดเป็นไบโอดีเซลได้ [8]

จากข้อดีของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดกรดและเบส ทางคณะผู้วิจัยจึงสนใจที่จะพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดกรด-เบสนั่นคือ ทังสเตนออกไซด์บอร์ออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม ($\text{WO}_3/\text{MgO}-\text{CaO}$) เพื่อนำไปใช้ในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้วกับเมทานอลผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของ $\text{Mg} : \text{Ca}$ ปริมาณทังสเตนออกไซด์ที่เติมลงบน $\text{MgO}-\text{CaO}$ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้ว ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยาและการนำกลับมาใช้ใหม่ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา รวมทั้งศึกษาเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาและการนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์แก่การขยายกำลังการผลิตในอนาคตต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อสังเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วและเมทานอล โดยใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิธีพ่นชั้นนิคกรด-เบส
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของ Mg : Ca ในออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม ปริมาณของทั้งสแตนบนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และเวลาในการทำปฏิกิริยารวมทั้งศึกษาเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาและการนำกลับมาใช้ใหม่

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม ($WO_3 / MgO-CaO$) ที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ซึ่งได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มใช้แล้วและเมทานอล โดยทำการศึกษาดังนี้
 - 1.1) อัตราส่วนโดยโมลของ Mg : Ca ในออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม ได้แก่ 0.5:1 1:1 และ 2:1
 - 1.2) ปริมาณของทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม ได้แก่ 10 15 20 30 และ 40 % โดยน้ำหนัก
 - 1.3) อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน ได้แก่ 9:1 12:1 15:1 และ 18:1
 - 1.4) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ได้แก่ 1% 2% 3% และ 4% โดยน้ำหนัก
 - 1.5) เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ได้แก่ 1 2 3 และ 4 ชั่วโมง
 - 1.6) การนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ ได้แก่ 1 2 3 และ 4 ครั้ง
2. ศึกษาลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่
 - 2.1) องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาและลักษณะความเป็นผลึก โดยใช้เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD)
 - 2.2) ปริมาณทั้งสแตนบนตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เครื่องเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (X-ray Fluorescence Spectrophotometer, XRF)
 - 2.3) ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2.4) พื้นผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยเทคนิคบีอีที (Brunauer-Emmett-Teller Analyzer, BET)
- 2.5) ความแรงและปริมาณของความเป็นกรดเบสของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เครื่องโปรแกรมอุณหภูมิเพื่อทดสอบการคายซับ (Temperature Programmed Desorption, TPD)
- 2.6) การพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR)
3. ทดสอบหาค่าพลังงานความร้อน โดยใช้เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb Calorimeter)
4. ศึกษาถึงลักษณะโครงสร้างทางเคมีของไบโอดีเซลโดยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform infrared Spectrophotometer, FT-IR) และเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Nuclear Magnetic Resonance Spectrophotometer, FT-NMR)

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสเตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มใช้แล้วและเมทานอล
2. ทราบถึงอิทธิพลของตัวแปรสถานะที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของ Mg : Ca ในออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม ปริมาณของทั้งสเตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เวลาในการทำปฏิกิริยา และการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่

1.5 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	เดือน								
	ต.ค	พ.ย	ธ.ค	ม.ค	ก.พ	มี.ค	เม.ย	พ.ค	มิ.ย.
1.ศึกษาหาข้อมูล ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง									
2.ออกแบบวิธีการทดลอง									
3.ทำวิจัยบทที่ 1,2 และ3									
4.ทำการทดลองสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา									
5.ทำการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์									
6.ตรวจสอบลักษณะทางเคมีและทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา									
7.วิเคราะห์ผลการทดลอง									
8.สรุป และรายงานผล									

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไบโอดีเซล [9]

ไบโอดีเซล หมายถึง เชื้อเพลิงทดแทนประเภทดีเซลจากธรรมชาติ โดยการนำเอาน้ำมันจากพืชหรือสัตว์ ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทไตรกลีเซอไรด์ มาผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ (Ethanol หรือ Methanol) และมีเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จะได้ผลิตผลเป็นเอสเทอร์และผลิตภัณฑ์พลอยได้กลีเซอรอล (Glycerol) ไบโอดีเซลมีคุณสมบัติการเผาไหม้เหมือนกับดีเซลจากปิโตรเลียมมากและสามารถใช้ทดแทนกันได้ คุณสมบัติสำคัญของไบโอดีเซลคือสามารถย่อยสลายได้เองตามกระบวนการชีวภาพในธรรมชาติและไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล

Fuel Property	Diesel	Biodiesel
Fuel Standard	ASTM D975	ASTM D6751
Lower Heating Value, Btu/gal	~ 129,050	~ 118,170
Kinematic Viscosity, (40 °C)	1.3 – 4.1	4.0 – 6.0
Specific Gravity, (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	0.00 – 0.0024
Boiling Point, °C	180 - 340	315 - 350
Flash Point, °C	60 - 80	100 - 170
Cloud Point, °C	- 15 - 5	- 3 - 12
Pour Point, °C	- 35 - -15	- 15 - 10
Cetane number	40 - 55	48 - 65
Lubricity SLBOCLE, grams	2,000 – 5,000	>7,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 ประเภทของไบโอดีเซล [10]

2.1.1.1. ไบโอดีเซล (Straight Vegetable Oil)

เป็นไบโอดีเซลที่ใช้น้ำมันของพืชหรือไขมันจากสัตว์โดยตรง เช่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม หรือ น้ำมันจากไขสัตว์ เช่น น้ำมันหมู เป็นต้น นำมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลได้เลย โดยไม่ต้องผสมหรือเติมสารเคมีอื่นใดหรือปรับปรุงสมบัติของน้ำมันอีก

2.1.1.2. ไบโอดีเซลแบบลูกผสม (Veggie / Kero Mix)

ไบโอดีเซลประเภทนี้เป็นการผสมน้ำมันพืชหรือน้ำมันจากสัตว์กับน้ำมันก๊าดหรือน้ำมันดีเซลเพื่อลดความหนืดของน้ำมันพืชลง เพื่อให้ได้ไบโอดีเซลที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลให้มากที่สุด เช่น ไบโอดีเซลที่ผสมกับน้ำมันมะพร้าวเรียกว่า โคโคดีเซล (Cocodiesel) น้ำมันที่ได้จากวิธีการดังกล่าวเหมาะกับกรณีจำเป็นต้องใช้น้ำมันอย่างเร่งด่วน และใช้กับเครื่องยนต์ที่ใช้งานหนัก ตลอดจนถึงงานในภูมิภาคเขตร้อน โดยที่อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำมันก๊าดและน้ำมันพืชขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของพื้นที่ใช้งาน อัตราส่วนผสมของน้ำมันก๊าด:น้ำมันพืช มีตั้งแต่ 10:90 ไปจนถึง 40:60 แต่อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมอยู่ที่ 20:80 แต่เนื่องจากปัจจุบันราคาของน้ำมันก๊าดค่อนข้างสูงทำให้ปริมาณของน้ำมันก๊าดน้อยเกินไป ทำให้น้ำมันผสมที่ได้เมื่อนำไปใช้จึงเกิดผลกระทบต่อเครื่องยนต์จากปัญหาการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

2.1.1.3. ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์

เป็นน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้มาจากปฏิกิริยาเคมีที่เรียกว่าปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน (Transesterification process) เป็นที่ยอมรับในสากลและมีการใช้อย่างทั่วไป ผลิตได้โดยการนำน้ำมันจากพืชหรือสัตว์ ไปทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์โดยมีกรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติเหมือนกับน้ำมันดีเซลมากที่สุดทำให้ไม่มีปัญหากับเครื่องยนต์ ได้น้ำมันที่มีความคงตัวมากขึ้น สามารถนำไปเติมในเครื่องยนต์ดีเซลได้ทุกชนิด ทั้งเติมโดยตรงและผสมลงในน้ำมันดีเซล ในอัตราส่วนต่างๆ เช่น B5 หมายถึงการผสมไบโอดีเซลต่อน้ำมันดีเซลในอัตราส่วน 5:95 หรือ B100 ซึ่งเป็นน้ำมันไบโอดีเซล 100 % เป็นต้น

2.1.2 สมบัติทางด้านเชื้อเพลิงที่สำคัญของไบโอดีเซล [11]

2.1.2.1 ค่าความร้อน (Heating value)

ค่าความร้อนทางเชื้อเพลิง คือ ปริมาณความร้อนที่ต้องถ่ายเทออกจากเชื้อเพลิง เนื่องจากมีการสันดาปที่เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ในระบบ ค่าที่ได้จะอยู่ในรูปของพลังงานต่อปริมาณของมวลสารนิยมนัดโดยใช้เครื่อง Bomb Calorimeter โดยทั่วไปค่าความร้อนมี 2 ประเภท คือ ค่าความร้อนสูง (High Heating Value) และค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value) ซึ่งค่าความร้อนสูงเป็นค่าที่วัดได้โดย รวมความร้อนที่เกิดขึ้นจากการกลั่นตัวของไอน้ำเข้าด้วย เมื่อพูดถึงค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ในเครื่องยนต์จะนำค่าความร้อนต่ำมาใช้ เนื่องจากไม่มีการกลั่นตัวของไอน้ำในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.2 จุดวาบไฟ (Flash Point)

จุดวาบไฟ คือ อุณหภูมิต่ำสุดที่สามารถทำให้ของเหลวกลายเป็นไอเพียงพอต่อการเริ่มต้นลุกไหม้ขึ้นเมื่อมีแหล่งจุดติดไฟแต่มีไม่เพียงพอที่จะลุกติดไฟได้อย่างต่อเนื่องจุดวาบไฟเป็นประโยชน์ในการแบ่งประเภทของสารเคมีว่าเป็นสารไวไฟ (Flammable) สารติดไฟได้ (Combustible) และสารไม่ติดไฟ (Non-combustible) ตามมาตรฐาน NFPA 30 โดยปกติแล้ว อุณหภูมิจุดวาบไฟของไบโอดีเซลจะมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล แต่อย่างไรก็ตามไบโอดีเซลอาจมีจุดวาบไฟที่ต่ำกว่าปกติได้ หากผลิตภัณฑ์มีปริมาณแอลกอฮอล์จากกระบวนการผลิตหลงเหลือหรือเจือปนอยู่ซึ่งควรต้องจำกัดออกเพื่อให้มีจุดวาบไฟสูงปลอดภัยในการขนส่งเชื้อเพลิง

2.1.2.3 ค่าความเป็นกรด (Acid value)

ค่าความเป็นกรด คือ จำนวนมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเป็นกลางกับกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในน้ำมัน 1 กรัม ซึ่งเป็นค่าที่ชี้บอกถึงความเป็นกรดของน้ำมัน หากน้ำมันพืชหรือสัตว์นั้นมีคุณภาพดี กรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบอยู่ไม่หลุดออกเป็นกรดไขมันอิสระ น้ำมันนั้นๆจะมีค่าของกรดต่ำ แต่หากน้ำมันถูกทำลายด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซ์ น้ำมันนั้นๆจะมีกรดไขมันอิสระสูงขึ้น และมีค่าของกรดสูงขึ้นด้วย

2.1.2.4 เลขไอโอดีน (Iodine value)

ค่าไอโอดีน คือ ปริมาณไอโอดีนเป็นกรัมที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับน้ำมัน 100 กรัม โดยทั่วไปแล้ว ค่าไอโอดีนของน้ำมันพืชหรือสัตว์เป็นชี้บอกถึงปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวในน้ำมันนั้นๆ น้ำมันที่มีองค์ประกอบกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงจะมีค่าไอโอดีนสูง ซึ่งเกิดการรวมตัวที่เป็นปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรซ์ได้มากกว่าน้ำมันที่มีค่าไอโอดีนต่ำกว่าถ้าหากน้ำมันพืชที่ถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงมีค่าตัวเลขค่าไอโอดีนต่ำก็จะป้องกันการเกิดพอลิเมอร์ไรซ์ของน้ำมันพืชในเครื่องยนต์ได้ นอกจากนี้ น้ำมันพืชที่มีค่าไอโอดีนสูงจะสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในอากาศได้มาก ทำให้โครงสร้างของน้ำมันพืชเกิดการเสถียรภาพได้เป็นสารประเภทคีโตน แอลดีไฮด์ และกรดออกมาผสมอยู่ในน้ำมัน

2.1.2.5 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืด คือ ความหนืดเชิงจลศาสตร์ของน้ำมันดีเซลมีผลต่อรูปร่างของละอองน้ำมันที่ฉีดออกมาจากหัวฉีด ถ้าน้ำมันมีความหนืดเชิงจลศาสตร์สูงจะทำให้การฉีดเป็นฝอยไม่ดี ละอองน้ำมันใหญ่ การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ แต่หากน้ำมันมีความหนืดต่ำเกินไปจะทำให้ให้น้ำมันที่พ่นออกมาเป็นฝอยละเอียดมากแต่ไม่พุ่งไปไกลเท่าที่ควร ทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เช่นกัน เนื่องจากน้ำมันรวมตัวกับอากาศได้ไม่ดี ประสิทธิภาพด้านกำลังของเครื่องยนต์ก็จะลดลง

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติมาตรฐานของไบโอดีเซล

คุณสมบัติ		ข้อกำหนด	วิธีทดสอบ
ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส, เซนติสโตกส์	Viscosity at 40°C (cSt)	ไม่ต่ำกว่า 3.5 และไม่สูงกว่า 5.0	ASTM D 445
จุดวาบไฟ องศาเซลเซียส	Flash Point (°C)	ไม่ต่ำกว่า 120	ASTM D 93
ค่าความเป็นกรด มิลลิกรัมโพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์/กรัม	Acid value (mg KOH/g)	ไม่สูงกว่า 0.50	ASTM D 664
ค่าไอโอดีน กรัมไอโอดีน/100 กรัม	Iodine value (g Iodine /100 g)	ไม่สูงกว่า 120	EN 14111

2.1.3 ประโยชน์ของน้ำมันไบโอดีเซล [12]

ช่วยเพิ่มการหล่อลื่นให้เครื่องยนต์ได้ถึง 2 เท่าของดีเซล เมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล
ทั่วไป

- ช่วยสร้างรายได้ให้เกษตรกร เพราะผลิตจากพืชเกษตร
- ช่วยลดการค้าของประเทศ เพราะสามารถลดการนำเข้าน้ำมันได้ส่วนหนึ่ง รวมทั้งช่วยลดการนำเข้าสารหล่อลื่นจากต่างประเทศ
- ช่วยรักษาสิ่งแวดล้อม ช่วยลดมลพิษทางอากาศ และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Green House Effect) เพราะผลิตจากพืชมีส่วนเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

2.1.4 ผลกระทบของไบโอดีเซลที่มีต่อเครื่องยนต์ [13]

ไบโอดีเซลช่วยหล่อลื่นแทนกำมะถัน และลดฝุ่นละอองหรือควันดำ ที่เรียกว่า particulate matter ให้ต่ำลง โดยไม่ทำให้เครื่องยนต์อุดตันเพราะเผาไหม้หมด

เนื่องจากน้ำมันไบโอดีเซลตามมาตรฐานสากลนั้น มีคุณสมบัติเทียบเคียงได้กับน้ำมันดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปิโตรเลียม ดังนั้นผลกระทบต่อเครื่องยนต์ถือได้ว่าไม่มีผลทางด้านลบ หรือในกรณีของเครื่องยนต์เก่าอาจมีความจำเป็นต้องเปลี่ยนซีลยางบางส่วนเท่านั้นเอง โดยทั่วไปการใช้ น้ำมันไบโอดีเซลในต่างประเทศนั้นนิยมนำไปผสมเป็นสูตรต่าง ๆ ดังนี้

- B2 (ไบโอดีเซล 2% : ดีเซล 98 %) มีจำหน่ายทั่วไปในมลรัฐมินนิโซตา ประเทศสหรัฐอเมริกา และจะบังคับใช้ทั้งมลรัฐในปี พ.ศ. 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

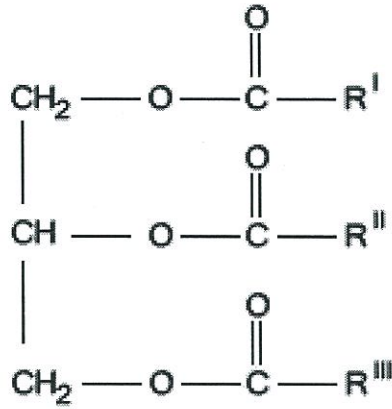
- B5 (ไบโอดีเซล 5% : ดีเซล 95%) มีจำหน่ายทั่วไปในประเทศฝรั่งเศส โดยกว่าครึ่งหนึ่งของน้ำมันดีเซลที่จำหน่ายเป็นน้ำมันสูตร B5
- B20 (ไบโอดีเซล 20% : ดีเซล 80%) เป็นน้ำมันผสมที่คณะกรรมการไบโอดีเซลแห่งชาติ และสำนักงานป้องกันสิ่งแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา แนะนำให้ใช้ตามกฎหมายยานยนต์เชื้อเพลิงทดแทนของประเทศ ปัจจุบันนิยมใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกา
- B40 (ไบโอดีเซล 40% : ดีเซล 60%) เป็นสูตรที่ใช้ในรถยนต์ขนส่งมวลชนในประเทศฝรั่งเศส ทั้งนี้เพื่อผลในการลดมลพิษ
- B100 (ไบโอดีเซล 100%) เป็นน้ำมันไบโอดีเซล 100% ที่ใช้ในประเทศเยอรมนีและออสเตรีย โดยได้รับการรับรองจากบริษัทผู้ผลิตรถยนต์รายใหญ่ของประเทศ

ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบผลการใช้ไบโอดีเซล 100% (B100) และน้ำมันดีเซลซึ่งผสมด้วยไบโอดีเซล 20% (B20)

มลพิษในไอเสีย	ไบโอดีเซล 100% (B100)	น้ำมันดีเซลที่มีไบโอดีเซล 20 % (B20)
1.แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	ลดลง 42.3 %	ลดลง 12.6 %
2.ไฮโดรคาร์บอน	ลดลง 56.2 %	ลดลง 11.0 %
3.ฝุ่นละออง	ลดลง 55.4 %	ลดลง 18.0 %

2.2 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันพืช [14]

โดยทั่วไปแล้วน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ทุกชนิดเป็นสารประกอบประเภทไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกลีเซอรอลกับกรดไขมันที่มีคาร์บอนอะตอมตั้งแต่ 10 ถึง 30 ตัว น้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์มีกรดไขมันชนิดต่างๆ กันเป็นองค์ประกอบ โดยที่มีปริมาณของกรดไขมันอยู่ในโครงสร้างถึงร้อยละ 94-96 ของน้ำหนักโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ ทำให้คุณสมบัติของน้ำมันแต่ละชนิดทั้งทางเคมีและกายภาพ แตกต่างกันไปตามคุณสมบัติของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของไตรกรีเซอไรด์

น้ำมันพืชเป็นสารประกอบประเภทเอสเทอร์มีส่วนประกอบของไตรกลีเซอไรด์ประมาณร้อยละ 98 ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกลีเซอรอลและกรดไขมันอิสระ ส่วนประกอบที่เหลือจะเป็นส่วนของโคกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และกรดไขมันอิสระซึ่งส่วนใหญ่มีคาร์บอนในกรดไขมันระหว่าง 12 ถึง 18 ตัว จากตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวในน้ำมันพืชแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน โดยน้ำมันพืชที่มีกรดไขมันอิ่มตัวในปริมาณที่สูงจะมีค่าไอโอดีนต่ำและมีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่ลดลงหรือกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงชันจะมีค่าไอโอดีนสูงชันตามลำดับ น้ำมันพืชเป็นสารที่ไม่อยู่ตัวเมื่อสัมผัสกับอากาศจะถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายและเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรซ์แล้วน้ำมันจะมีสภาพเป็นสารเหนียวข้น โดยทั่วไปค่าเลขไอโอดีนของน้ำมันพืชจะเป็นดัชนีบอกถึงปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีอยู่ในน้ำมันนั้นๆ ซึ่งบอกถึงความยากง่ายของการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันด้วย ถ้าน้ำมันมีค่าเลขไอโอดีนสูงจะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันง่าย ดังนั้นควรเลือกใช้น้ำมันพืชที่มีค่าเลขไอโอดีนต่ำเป็นเชื้อเพลิงเพราะจะป้องกันการเกิดสารเหนียวที่เกิดเนื่องจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันในเครื่องยนต์ในเบื้องต้น

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติและองค์ประกอบกรดไขมันหลักของน้ำมันพืชต่างๆ

น้ำมันดิบ	ค่าไอโอดีน	องค์ประกอบกรดไขมันหลัก						
		C12:0	C14:0	C16:0	C18:0	C18:1*	C18:2*	C18:3*
น้ำมันปาล์ม	14.1-21.0	ND-0.5	0.5-2.0	39.3-47.5	3.5-6.0	36.0-44.0	9.0-12.0	ND-0.5
น้ำมันปาล์มโอสติน	>56	0.1-1.5	0.5-1.5	38.0-43.5	3.5-5.0	39.8-46.0	10.0-13.5	ND-0.6
น้ำมันปาล์มสเตียร์น	<48	0.1-1.5	1.0-2.0	48.0-74.0	3.9-6.0	15.5-36.0	3.0-10.0	0.5
น้ำมันเมล็ดในปาล์ม	50.0-55.0	45.0-55.0	14.0-18.0	6.5-10.0	1.0-3.0	12.0-19.0	1.0-3.5	ND-0.2
น้ำมันมะพร้าว	6.3-10.6	45.1-53.2	16.8-21.0	7.5-10.2	2.0-4.0	5.0-10.0	1.0-2.5	ND
น้ำมันถั่วลิสง	86-107	ND-0.1	ND-0.1	8.0-14.0	1.0-4.5	35.0-67.0	13.0-43.0	ND-0.3
น้ำมันเมล็ดสบู่ดำ	101	ND	ND	14.9	6	41.2	37.4	ND
น้ำมันเมล็ดทับศัพท์	94-120	ND	ND-0.2	1.5-6.0	0.5-3.1	8.0-60.0	11.0-23.0	5.0-13.0
น้ำมันถั่วเหลือง	124-139	ND-0.1	ND-0.2	8.0-13.5	2.0-5.4	17.7-28.0	49.8-59.0	5.0-11.0

หมายเหตุ : ไม่พบ

*1 กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวมีพันธะคู่ระหว่างคาร์บอน 1 แห่ง

*2 กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวมีพันธะคู่ระหว่างคาร์บอน 2 แห่ง

*3 กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวมีพันธะคู่ระหว่างคาร์บอน 3 แห่ง

2.3 ปฏิบัติการใช้ในกระบวนการการสังเคราะห์ไบโอดีเซล [15]

2.3.1 การใช้โดยตรงและการผสม

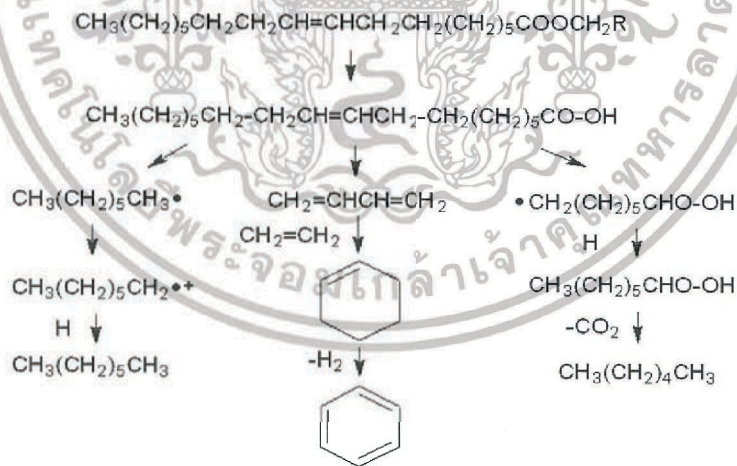
การใช้โดยตรงคือ น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชต่างๆ เช่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันหมู ซึ่งสามารถนำเอามาใช้ได้เลยกับเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่ต้องผสมหรือผสมสารเคมีอื่นหรือไม่ต้องนำมาเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำมัน ส่วนแบบผสมคือ เป็นการผสมระหว่างน้ำมันพืช (หรือไขมันสัตว์) กับน้ำมันก๊าดหรือน้ำมันดีเซลหรืออื่นๆ เพื่อให้ไบโอดีเซลที่ได้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลให้มากที่สุด เช่น โคโคดีเซลที่ประจวบคีรีขันธ์ซึ่งเป็นการผสมระหว่างน้ำมันมะพร้าวกับน้ำมันก๊าด หรือที่เรียกปาล์มดีเซล

2.3.2 ไมโครอิมัลชัน (Microemulsion)

ไมโครอิมัลชัน คือ คอลลอยด์ที่กระจายตัวในสภาวะสมดุลโดยมีอนุภาคในคอลลอยด์ส่วนมากอยู่ในช่วง 1 - 150 นาโนเมตร ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งเพื่อแก้ปัญหาค่าความหนืดสูงในน้ำมันพืช ให้มีค่าความหนืดลดลง โดยใช้ควบคู่กับตัวทำละลายเช่น เมทานอล, เอทานอล และ 1-บิวทานอล ไมโครอิมัลชันที่เกิดจากเมทานอลกับน้ำมันพืชจะได้น้ำมันที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล แต่เมื่อนำมาทดสอบกับเครื่องยนต์พบว่ามีการสะสมตัวของคราบ (ซึ่งเป็นสารประกอบคาร์บอน) เกาะรอบ ๆ หัวฉีดและวาล์วของเครื่องยนต์ซึ่งเป็นข้อเสียของน้ำมันที่ผลิตโดยวิธีนี้

2.3.3 กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis)

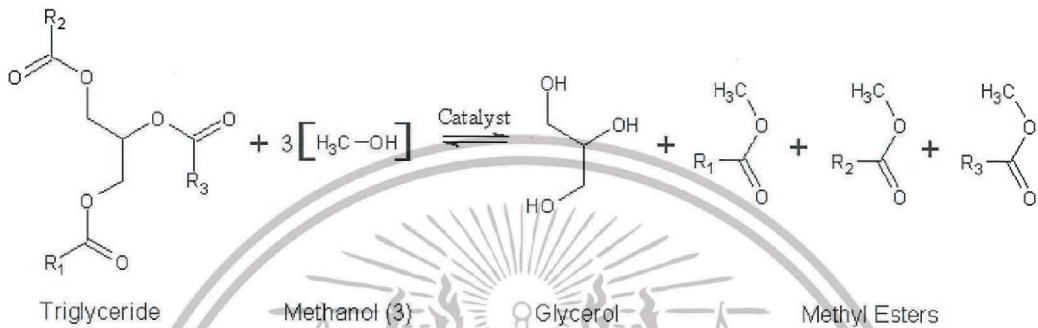
เป็นกระบวนการเปลี่ยนจากสารประกอบหนึ่งชนิดไปเป็นสารประกอบอื่น ๆ มากกว่าหนึ่งชนิด โดยใช้ความร้อนหรือใช้ความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งนี้จะต้องจำกัดปริมาณอากาศหรือออกซิเจนที่ใช้ในกระบวนการด้วยเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการประมาณ 450-600 องศาเซลเซียส สารประกอบที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสจะถูกทำให้มีขนาดโมเลกุลที่เล็กลง ซึ่งกระบวนการนี้ยากที่จะกำหนดหรือควบคุมให้ได้ผลผลิตตามที่ต้องการเนื่องด้วยความหลากหลายทางปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ วัตถุดิบที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสได้แก่ น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ กรดไขมันธรรมชาติ (Natural Fatty Acid) และ เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน กลไกของกระบวนการแตกสลายทางความร้อนแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาการแตกสลายด้วยความร้อน

2.3.4 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

ไบโอดีเซลประเภทนี้เกิดจากการปฏิกิริยาระหว่าง น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ หรือน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว กับแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล หรือ เอทานอล โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นกรดหรือด่าง โดยเปลี่ยนโครงสร้างของน้ำมันจากไตรกลีเซอไรด์ (Triglycerides) ให้เป็นโมโนอัลคิลเอสเทอร์ (Mono alkyl Ester) ได้แก่ เมทิลเอสเทอร์ (Methyl Ester) หรือ เอทิลเอสเทอร์ (Ethyl Ester) และได้ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงเป็นกลีเซอรอลหรือกลีเซอรอล (Glycerine or Glycerol) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

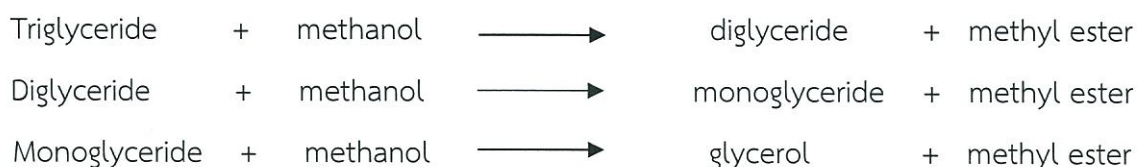
ในทางปริมาณสารสัมพันธ์ 1 โมลของไตรกลีเซอไรด์จะทำปฏิกิริยาพอดีกับ 3 โมลของแอลกอฮอล์ในการเกิดปฏิกิริยา แต่หากใช้ในอัตราส่วนที่สูงกว่าจะได้ผลิตภัณฑ์เอสเทอร์มากขึ้น จากปฏิกิริยานี้จะเห็นว่าปฏิกิริยาสามารถผันกลับได้ การใช้แอลกอฮอล์ซึ่งก็คือเมทานอลในปริมาณที่มากเกินไป จะช่วยให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าได้ดี ทำให้ได้ปริมาณของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มมากขึ้น ตามมา ซึ่งเอสเทอร์ที่ได้จะมีสมบัติใกล้เคียงกับไบโอดีเซล

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นกระบวนการที่นิยมมาก เพราะวิธีไมโครอิมัลชันและวิธีการผสมน้ำมันด้วยตัวทำละลาย มักจะเกิดปัญหาในเรื่องประสิทธิภาพของเครื่องยนต์และเกิดคราบคาร์บอน ส่วนวิธีไพโรไลซิสนั้นจะผลิตก๊าซโซลีนออกมาคือน้ำในดีเซลชีวภาพ นอกจากนี้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันยังให้ผลผลิตร่วมที่มีประโยชน์ คือ กลีเซอรอล

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ แต่สามารถเร่งปฏิกิริยาให้ไปข้างหน้าได้เร็วขึ้นโดยการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้แอลกอฮอล์ในปริมาณที่มากเกินไป โดยแอลกอฮอล์ที่ใช้ในปฏิกิริยาส่วนใหญ่มักใช้เมทานอลหรือเอทานอลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากราคาถูก ง่ายและเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว จึงสามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้เร็ว แต่ปฏิกิริยานี้ห้ามมีน้ำมาเกี่ยวข้อง เพราะอาจจะทำให้เกิดปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน (Saponification) ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตเอสเทอร์ลดลง และจะทำให้แยกเอสเทอร์ออกจากกลีเซอรอลได้ยากขึ้น ดังนั้นการเตรียมตัวเร่งต่างในปฏิกิริยาจะใช้วิธีละลายต่างในเมทานอลแทนน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันมี 3 ขั้นตอนเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ คือ ขั้นตอนแรกจะเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์เป็นไดกลีเซอไรด์ ขั้นตอนต่อมาจะเปลี่ยนไดกลีเซอไรด์เป็นโมโนกลีเซอไรด์และขั้นสุดท้ายจะเปลี่ยนโมโนกลีเซอไรด์เป็นกลีเซอรอล และได้เอสเทอร์ 3 โมล ในขั้นตอนนี้คุณสมบัติของเอสเทอร์จะคล้ายน้ำมันดีเซล แสดงขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

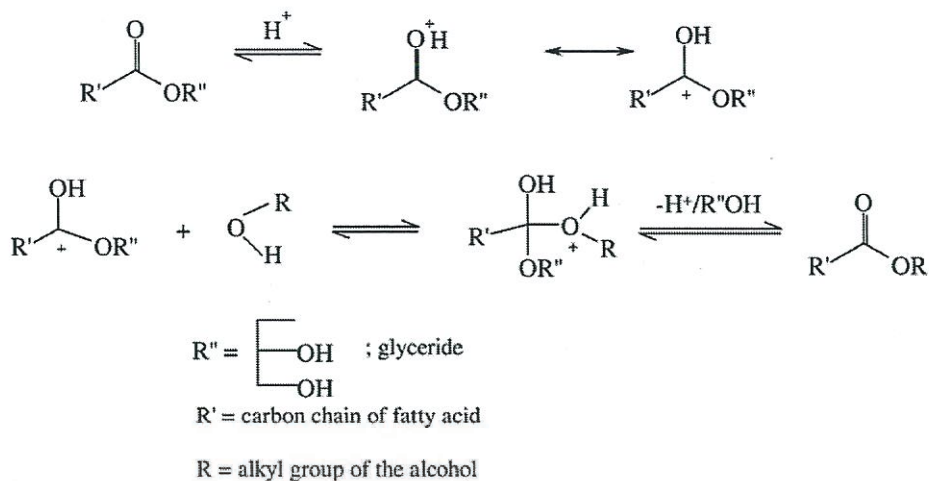


โดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่

2.3.4.1. การทำปฏิกิริยาโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Acid catalyst)

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันสามารถเร่งปฏิกิริยาได้ด้วยกรดบรอนสเตด (Bronsted acid) อาทิเช่น กรดซัลฟูริก, กรดฟอสฟอริก, กรดไฮโดรคลอริก และกรดซัลโฟนิก ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้จะทำให้ได้ผลผลิตคือน้ำมันไบโอดีเซลในปริมาณมากแต่ปฏิกิริยาจะเกิดช้ามาก อาจจะใช้เวลามากกว่า 1 วันกว่าปฏิกิริยาจะเกิดอย่างสมบูรณ์ แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดสามารถใช้ได้ดีกับกลีเซอไรด์ที่มีส่วนประกอบของกรดไขมันอิ่มตัวและน้ำในปริมาณสูง

สำหรับกลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะสามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อเติมกรดลงไปแอลกอฮอล์ในขั้นตอนแรกโปรตอนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดจะเข้าไปทำให้ไอออนของหมู่คาร์บอนิลของเอสเทอร์เกิดการเคลื่อนที่และจัดเรียงตัวใหม่กลายเป็นคาร์โบแคตไอออน จากนั้นแอลกอฮอล์จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับคาร์โบแคตไอออนเกิดเป็นสารมัธยันตร์ลักษณะเป็นเตตระฮีดรอล (Tetrahedral Intermediate) และเมื่อกำจัดกลีเซอรอลและโปรตอนก็จะได้เอสเทอร์ แสดงดังรูปที่ 2.4

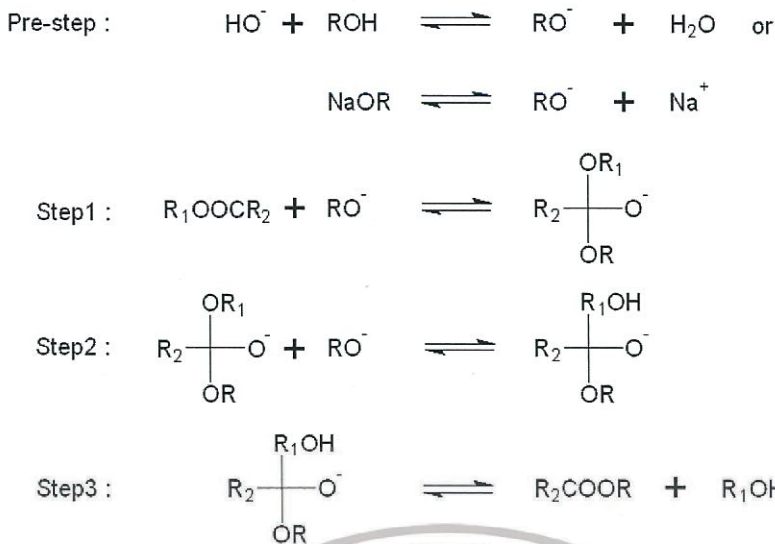


รูปที่ 2.4 การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

2.3.4.2. การทำปฏิกิริยาโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Base catalyst)

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นที่นิยมใช้มากที่สุด คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เนื่องจากมีความเป็นเบสสูง ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถรวมเข้ากับแอลกอฮอล์เป็นเนื้อเดียวกัน จึงเรียกว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (homogeneous catalyst) แม้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดดังกล่าวจะให้ผลผลิตสูงแต่มีข้อเสียในกระบวนการผลิต คือ จำเป็นต้องมีกระบวนการล้าง (washing) เพื่อแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ด้วยน้ำ ซึ่งน้ำจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้กับปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน (saponification) มีผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาบางส่วนไปรวมตัวกับกรดไขมันอิสระที่เหลือเกิดเป็นสบู่ (soap) ทำให้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหลือน้อยลงสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน ทำให้ผลผลิตของไบโอดีเซลนั้นได้น้อยกว่าที่คาดหวัง เพื่อเป็นการลดปัญหาดังกล่าวจึงมีการศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (heterogeneous catalyst) ซึ่งจะไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันกับสารตั้งต้นเพื่อกำจัดปัญหาการเกิดสบู่ในกระบวนการล้างออกไป เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์นี้สามารถแยกออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่ายโดยการกรอง จึงถือว่าเป็นกระบวนการผลิตที่ไม่ต้องผ่านขั้นตอนการล้าง ซึ่งเป็นการลดขั้นตอนในการผลิตและต้นทุนของการผลิตไบโอดีเซลได้อีกทางหนึ่ง

กลไกปฏิกิริยาเริ่มจากแอลกอฮอล์ไอออนจะเข้าปฏิกิริยาที่ตำแหน่งคาร์บอนิลของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งทำให้เกิดสารมัธยันต์ลักษณะเป็นเตตระไฮดรอล จากนั้นเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารมัธยันต์กับแอลกอฮอล์ ทำให้เกิดแอลกอฮอล์ไอออน และขั้นสุดท้ายจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของสารมัธยันต์ เกิดเป็นเอสเทอร์และไตรกลีเซอไรด์ ดังรูปที่ 2.5



R_1OH : diglyceride

R_2 : long chain alkyl group

R : short alkyl group

รูปที่ 2.5 การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

2.3.4.3. การทำปฏิกิริยาในเหนือวิกฤตของเมทานอล

เป็นกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งวิธีนี้เป็นการนำเอาน้ำมันวัตถุดิบมาทำปฏิกิริยากับเมทานอลในสภาวะเหนือวิกฤต ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อย อีกทั้งยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม กล่าวคือไม่มีของเสียจากกระบวนการ ใดๆก็ตามวิธีนี้จะต้องใช้อุณหภูมิและความดันในระดับที่ค่อนข้างสูง เพื่อให้เมทานอลอยู่ในสภาวะเหนือวิกฤต ทำให้พันธะไฮโดรเจนของเมทานอลอ่อนลงและสภาพขั้วของเมทานอลลดลงทำให้เมทานอลกับน้ำมันพืชสามารถรวมเป็นเฟสเดียวกันได้

2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยา [16]

เป็นสารที่ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น โดยที่สารตัวเร่งปฏิกิริยาอาจจะเข้าทำปฏิกิริยาแล้วเกิดเป็นสารมัธยันตร์หรือไม่ก็ได้ เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปจนเสร็จ ตัวเร่งปฏิกิริยาต้องมีปริมาณและคุณสมบัติเหมือนตอนเริ่มต้น ตัวเร่งปฏิกิริยามี 2 ประเภท คือ

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous reaction) คือ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีวัฏภาคเดียวกับสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ได้เป็นเนื้อเดียวกันและละลายอยู่ด้วยกัน ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยากรด (acid catalyst) และตัวเร่งปฏิกิริยาเบส (base catalyst) ในสารละลายน้ำ เช่น กรดซัลฟิวริก ไฮเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งข้อดีของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์

เอกส... ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำและลดปัญหาการสลายตัวของผลผลิตเนื่องจาก ปฏิกิริยาอยู่ในภาวะปกติ เช่น ความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิห้อง ตัวเร่งปฏิกิริยามีราคาไม่แพง แต่ข้อเสียคือแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารตั้งต้นและผลผลิตได้ยาก เนื่องจากอยู่ในวัฏภาคเดียวกันและหลังขั้นตอนการแยกอาจต้องเพิ่มวิธีการจัดการกับของเสีย

2. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous reaction) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีวัฏภาคแตกต่างจาก สารตั้งต้นและสารเข้าทำปฏิกิริยา หรือไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน และ ผลผลิตมักเป็นของแข็ง ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์ เช่น โลหะ และ ซีโอไลต์ เป็นต้น ข้อดีของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ คือ สามารถแยกสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาได้ง่าย สามารถใช้ได้ในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงและความดันสูงได้ ตัวเร่งปฏิกิริยามีอายุการใช้งานที่ยาวนานและอาจนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่าย

ตารางที่ 2.5 เป็นการเปรียบเทียบคุณสมบัติและปัจจัยต่างๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์และแบบวิวิธพันธุ์

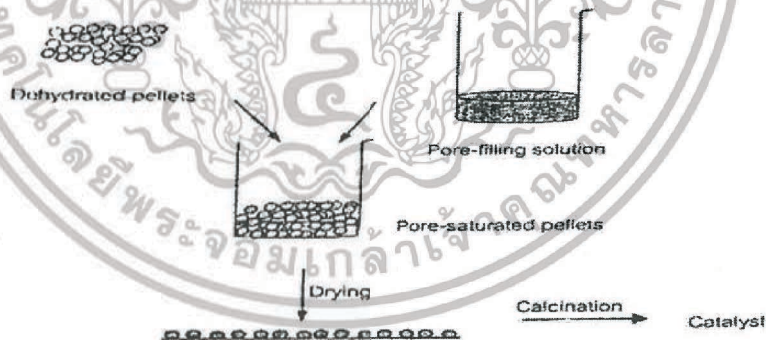
ปัจจัยหรือตัวแปรที่สนใจ	ปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์	ปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์
กัมมันตภาพเมื่อเทียบปริมาณโลหะที่เท่ากัน	สูง	แปรค่าได้
สัดส่วนการเลือกทำปฏิกิริยา	สูง	แปรค่าได้
สถานะของปฏิกิริยา	ไม่รุนแรง	รุนแรง
อายุการใช้งานของตัวเร่ง	แปรค่าได้	นาน
ความไวของตัวเร่งต่อการเกิดพอยซัน	ต่ำ	สูง
ปัญหาจากการแพร่	ไม่มี	อาจมีผล
การนำตัวเร่งกลับมาใช้งาน	แพง	ทำได้
การปรับสมบัติเชิงโมเลกุลของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการเปลี่ยนอะตอมที่เป็นองค์ประกอบ	อาจทำได้	ทำไม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการเคลือบฝัง (Impregnation) [17]

เทคนิคการเคลือบฝัง เป็นเทคนิคหนึ่งในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการสัมผัสกันของของแข็งและของเหลวที่มีสารที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ไปเกาะที่พื้นที่ผิวของตัวรองรับ ซึ่งง่ายและสะดวกที่สุด จุดประสงค์คือต้องการเติมรูพรุนด้วยสารละลายของเกลือโลหะที่มีความเข้มข้นเพียงพอสำหรับค่าปริมาณโลหะที่ต้องการ สารละลายที่ใช้ต้องมีปริมาณที่จะเติมรูพรุนได้พอดี เรียกว่าค่า Incipient wetness ขั้นตอนการเตรียมคร่าวๆ แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 เริ่มจากการให้ความร้อนแก่ตัวรองรับหรือนำไปดูดอากาศออกด้วยสุญญากาศเพื่อกำจัดความชื้นในรูพรุน และทำให้การแพร่ของสารละลายเข้าไปใน รูพรุนเกิดขึ้นได้ดีขึ้น จากนั้นหยดสารละลายในปริมาณที่พอดีที่จะเติมรูพรุนและทำให้ผิวหน้าภายนอกของตัวรองรับเปียกพอดี ลงไปบนตัวรองรับ ซึ่งปริมาณดังกล่าวสามารถคำนวณได้ก่อนการเตรียมจากปริมาตรของรูพรุนหรือทำการทดสอบก่อนโดยใช้ตัวทำละลายหยดลงบนตัวรองรับที่ทราบปริมาณแน่นอนและทำการวัดปริมาตรที่ทำให้ตัวรองรับเปียกพอดี แล้วจึงนำปริมาตรตัวทำละลายที่ได้มาใช้ในการคำนวณความเข้มข้นของสารละลายเพื่อให้ได้ปริมาณโลหะตามที่ต้องการ

การทำให้แห้งจะทำให้เกิดการตกผลึกของเกลือบนผิวหน้าของรูพรุน ขั้นตอนนี้ถ้าไม่ระวังอาจจะทำให้เกิดการกระจายตัวของสารในรูพรุนไม่สม่ำเสมอ ถ้าการทำให้แห้งช้าเกินไปจะทำให้สารละลายเคลื่อนลงไปอยู่ด้านล่างของรูพรุนเกิดการตกตะกอน ทำให้ผลึกที่ได้อยู่แต่ตอนล่างของรูพรุน ในการตรึงกันข้ามถ้าแห้งเร็วเกินไปสารละลายจะติดอยู่เฉพาะ ตอนบนของรูพรุนทำให้ผลึกเฉพาะช่วงบนของรูพรุน การทำให้แห้งในอัตราเร็วที่เหมาะสมจะทำให้ได้ผลึกที่เท่าๆกัน



รูปที่ 2.6 ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการเคลือบฝัง

การเผาเป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพราะถ้าตัวเร่งปฏิกิริยาเจอกับความชื้นในอากาศ ผลึกในรูพรุนอาจจะละลายในน้ำที่เกิดควบแน่นได้ การเผาเป็นการเปลี่ยนเกลือโลหะให้อยู่ในรูปของโลหะหรือออกไซด์ และจะหยุดการกระจายของสารละลายได้

วิธีการเคลือบฝังสามารถแบ่งได้ 2 วิธี คือ

2.5.1 การเคลือบฝังแบบแห้ง (Dry-Impregnation) จะทำการหยุดสารละลายจนเต็มรูพรุนของสารตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาจนพอดี โดยจะเกิดกระบวนการ 3 ขั้นตอน คือ

1. เกิดการถ่ายเทตัวสารละลายเข้าสู่พื้นที่ผิวภายในตัวรองรับ
2. เกิดการแพร่ตัวถูกละลายเข้าสู่รูพรุนของตัวรองรับ
3. ตัวทำละลายถูกดูดซึมอยู่ที่บริเวณผนังของรูพรุน

2.5.2 การเคลือบฝังแบบเปียก (Wet-Impregnation) จะทำการจุ่มตัวรองรับลงในสารละลายที่มีโลหะที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจะเกิดกระบวนการ 4 ขั้นตอน คือ

1. เกิดการถ่ายเทตัวถูกละลายที่บริเวณพื้นผิวภายนอกของตัวรองรับ
2. เกิดการถ่ายเทตัวถูกละลายเข้าสู่พื้นที่ผิวภายในตัวรองรับ
3. เกิดการแพร่ตัวถูกละลายเข้าสู่รูพรุนของตัวรองรับ
4. ตัวทำละลายถูกดูดซึมอยู่ที่บริเวณผนังรูพรุน

2.6 แมกนีเซียมออกไซด์ [18]

แมกนีเซียมออกไซด์ เป็นแร่สีขาวหรือเป็นผลึกไม่มีสีที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ มีสูตรทางเคมีคือ MgO โดยผลิตได้จากการเผาแร่แมกนีเซียมในสภาพที่ใช้ออกซิเจนในการเผาไหม้ ซึ่งในธรรมชาติพบในรูปของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Mg(OH)₂) เป็นส่วนมาก เพราะเป็นแร่ที่ชอบดูดความชื้นได้ดีและไม่ละลายน้ำ แต่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ด้วยการให้ความร้อนกำจัดน้ำออก



2.6.1. ประโยชน์ของสารประกอบของแมกนีเซียมออกไซด์

- ใช้เป็นตัวยาลำคัญของยาลดกรดในกระเพาะอาหาร มีคุณสมบัติในการ neutralize กรดได้ดี โดยเฉพาะกรดไฮโดรคลอริก กลายเป็นแมกนีเซียมคลอไรด์ และน้ำ ดังสมการ

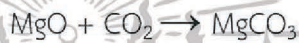


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ใช้เป็นยาลดกรดในกระเพาะอาหารของสัตว์เคี้ยวเอื้อง โดยเฉพาะกรดแลคติกที่เกิดจากการหมักเซลลูโลสของจุลินทรีย์ หรือที่เกิดภาวะ lactic acidosis ดังสมการ



- ใช้เป็นตัวประสานสำหรับก้ออิฐทนไฟในอุตสาหกรรม เช่น เตาเผา เตาอบ เป็นต้น รวมถึงวัสดุก่อสร้างต่างๆ อาทิ แผ่นฝ้า แผ่นปูนฉาบ หลังคากระเบื้อง เป็นต้น เพราะเป็นสารที่มีความคงตัวได้ดีแม้ถูกความร้อนสูง ซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงถึง 2,852 °C
- ใช้เป็นสารดูดซับ และเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้อยู่ในรูปของคาร์บอเนต ดังสมการ



- ใช้เป็นตัวพาเฉื่อยหรือ inert carrier ให้กับสารอื่น เช่น แคลเซียมซิลเฟต สำหรับดับจับคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้ในอุตสาหกรรมเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่อากาศ โดยแมกนีเซียมออกไซด์จะไม่สูญเสียออกซิเจนขณะเกิดการเผาไหม้
- ใช้เป็นส่วนผสมในอุตสาหกรรมผลิตยาง ผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี และสารทำความสะอาด
- ใช้เป็นสารแห้งสำหรับทำความสะอาดหรือขจัดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
- ใช้เป็นสารเคลือบโลหะหรือวัสดุที่ช่วยทำหน้าที่สะท้อนแสงหรือรังสี
- ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของโลหะออกไซด์ต่าง
- ใช้เป็นสารกึ่งตัวนำในเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำความร้อนได้น้อย แต่สามารถเพิ่มการแพร่ของอิเล็กตรอนให้มากขึ้น ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้า เพราะช่วยให้เซลล์แสงอาทิตย์มีความไวต่อแสง ได้เพิ่มขึ้น

2.7 แคลเซียมออกไซด์ [19]

แคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide) มีสูตรทางเคมี คือ CaO ลักษณะโดยทั่วไปเป็นผงสีขาว มีฤทธิ์เป็นด่าง กัดกร่อนได้ โดยปกติแล้วจะผลิตแคลเซียมออกไซด์, CaO จากการเผาวัสดุใดๆ ที่มีส่วนผสมของหินปูน (แคลเซียมคาร์บอเนต, CaCO₃) เป็นองค์ประกอบ ณ อุณหภูมิมากกว่า 825 องศาเซลเซียส เรียกกระบวนการเผาใหม้ว่า calcination และจะมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ออกมา ปูนขาวนี้ สามารถทำปฏิกิริยากับ CO₂ ที่อยู่ในอากาศ โดยอาศัย

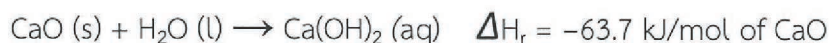
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะเวลาที่นานพอ กลับกลายเป็น CaCO_3 ได้ ดังนั้นการเก็บรักษาต้องระวังไม่ให้อากาศสามารถผ่านเข้าไปในภาชนะที่ใช้จัดเก็บได้ สมการแสดงปฏิกิริยา calcination หินปูน



2.7.1. ประโยชน์ของสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์

- ใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิตสารเคมีชนิดอื่นๆ ได้อีกมากมาย เช่น การผลิตแคลเซียมไฮดรอกไซด์, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ จากการนำปูนขาวทำปฏิกิริยากับน้ำ



- ใช้เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนแบบพกพาได้อีกด้วย ในทางกลับกันเมื่อเผา $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่อุณหภูมิ 512 องศาเซลเซียส จะได้ CaO กลับคืนมาดังสมการ

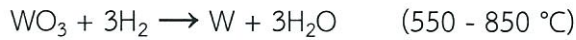


- ใช้ในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมที่หลากหลาย เช่น อุตสาหกรรมเหล็ก, แร่โลหะ, ไฟเบอร์กลาสและวัสดุก่อสร้าง
- ใช้ในการผลิตแร่สังเคราะห์ แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกผลึกช้า หรือเรียกว่า แป้งเบา หรือ Precipitated Calcium Carbonate, PCC ซึ่งถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น กระดาษ, พลาสติก, สี และอุตสาหกรรมอื่นๆ
- ใช้กันอย่างหลากหลายในด้านสิ่งแวดล้อม เช่น ใช้ในการบำบัดน้ำประปา, น้ำเสีย หรือของเสียในอุตสาหกรรม, ขยะในครัวเรือน และใช้ในกระบวนการบำบัดมลพิษทางอากาศ
- ใช้ในกระบวนการต่างๆ โดยนำมาทำเป็นสินค้าอุปโภคบริโภคที่เราใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น น้ำตาล, แก้ว, ขวด, เครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร รวมถึงผลิตภัณฑ์จากพลาสติกชีวภาพ
- ใช้ในกระบวนการทำสแตนเลส และวัสดุเคลือบนิเกิลที่ใช้ในการผลิตเครื่องใช้ในครัวเรือนที่ใช้ในชีวิตประจำวัน

2.8 ทังสเทนออกไซด์ [20]

ทังสเทนออกไซด์ (Tungsten(VI) oxide) หรือเป็นที่รู้จักว่าทังสเทนไตรออกไซด์ (Tungsten trioxide) หรือทังสติกแอนไฮไดรด์ (Tungstic anhydride) มีรูปแบบทั่วไปคือ WO_3 เป็นสารประกอบเคมีที่ประกอบด้วยออกซิเจนและโลหะทรานซิชันทังสเทน โดยได้มาจากสารมัธยันตร์ (Intermediate) ในกระบวนการนำกลับมาใช้ (Recovery) ของทังสเทนจากแร่ธาตุ (Minerals) ซึ่งแร่ทังสเทนจะถูกนำมาทำปฏิกิริยากับโลหะแอลคาไลน์ (Alkalis) เพื่อผลิตทังสเทนออกไซด์ และสามารถเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำมาทำปฏิกิริยากับคาร์บอนหรือแก๊สไฮโดรเจน เพื่อเปลี่ยนทั้งสแตนออกไซด์ให้เป็นโลหะทั้งสแตนบริสุทธิ์ ดังในสมการ



โครงสร้างผลึกของทั้งสแตนออกไซด์นั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงเกิน 740°C จะมีโครงสร้างเป็นแบบเตตระโกนอล (Tetragonal), อุณหภูมิระหว่าง 330 ถึง 740°C มีโครงสร้างแบบออร์ทอโรมบิก (Orthorhombic), 17 ถึง 330°C มีโครงสร้างแบบมอนอคลินิก (Monoclinic), และมีโครงสร้างเป็นไตรคลินิก (Triclinic) เมื่ออุณหภูมิลู่ระหว่าง -50 ถึง 17°C ซึ่งโครงสร้างโดยทั่วไปเป็นแบบ monoclinic

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Monica, C.G.A. และคณะ [21] ศึกษาเกี่ยวกับการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากเอทิลบิวทิเรต โดยใช้ออกไซด์ผสมของโลหะแมกนีเซียมและแคลเซียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อัตราการป้อน 1250 รอบต่อนาที อัตราส่วนเมทานอลต่อเอทิลบิวทิเรต เป็น $4:1$ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อลักษณะและร้อยละของไบโอดีเซลที่ทำการศึกษาคือ อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแคลเซียม (ในช่วงระหว่าง $3-15$) ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าร้อยละผลผลิตที่ได้จะมีค่าสูงสุด เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแคลเซียมเป็น $3:1$ ซึ่งให้ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 43.5

Wenlie, X. และคณะ [22] ศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลือง โดยใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา กลไกปฏิกิริยาถูกเสนอและแสดงให้เห็นถึงผลของชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งดำเนินการภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลืองเป็น $30:1$ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทั้งสิ้น 5 ชั่วโมง และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 5 กรัม จากผลการทดลองพบว่าร้อยละผลผลิตที่ได้มีค่าสูงสุดถึงร้อยละ 79.1 เมื่อใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา นอกเหนือจากนั้นยังพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์ที่ผ่านการใช้งานแล้วนั้นสามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้อีกมากถึง 4 ครั้ง โดยที่ประสิทธิภาพลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

Xuejun, L. และคณะ [23] ศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลืองเป็นไบโอดีเซล โดยใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา กลไกปฏิกิริยาถูกเสนอและแสดงให้เห็นถึงผลของอัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมันอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา และอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมัน พบว่าอัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น $12:1$ ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 8 อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่ 65 องศาเซลเซียส และปริมาณน้ำมันในเมทานอลร้อยละ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.03 จะให้ร้อยละของไบโอดีเซลมากกว่าร้อยละ 95 ในเวลา 3 ชั่วโมง นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผลิตได้ยังมีอายุการใช้งานมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$ และ $KF/\gamma-Al_2O_3$ โดยแคลเซียมออกไซด์ยังคงมีประสิทธิภาพหลังจากการใช้งานซ้ำๆ จำนวน 20 ครั้ง

Zhenzhong, W. และคณะ [24] ศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมลิเทียมบนแมกนีเซียมออกไซด์เพื่อสังเคราะห์ไบโอดีเซล พบว่าประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาจะขึ้นกับองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิของการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา จากผลการทดลองพบว่าถ้ามีเบสแก่โดยเฉพาะลิเทียมอยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้ได้ร้อยละของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น และยังพบว่าอัตราส่วนของลิเทียมต่อแมกนีเซียมเป็น 0.08 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา 550 องศาเซลเซียส ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพสูงสุด และร้อยละของไบโอดีเซลจะลดลงเมื่ออัตราส่วนของลิเทียมต่อแมกนีเซียมสูงเกินกว่า 0.08 ทั้งนี้เกิดจากลิเทียมไฮดรอกไซด์ที่มาจากไอออนของลิเทียมมีมากเกินไป นอกจากนี้อัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ยังส่งผลต่อประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

Sasiprapa, K. และคณะ [25] ศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์ไบโอดีเซล โดยใช้แคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากเศษซากเปลือกหอยในแหล่งน้ำจืดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันที่ผ่านการใช้งานมาแล้วกับเมทานอล ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่ทำการเตรียม เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวริทซ์ชนิดเบสซึ่งสามารถเตรียมได้จากการเผาซากเปลือกหอยที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง สำหรับตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อลักษณะและร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลที่ทำการศึกษา ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา จากผลการทดลองพบว่าร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลมีค่าสูงสุดถึงร้อยละ 98.19 เมื่อดำเนินปฏิกิริยาภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 9:1 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 3 กรัม และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาทั้งสิ้น 1 ชั่วโมง

Antonio, J.P. และคณะ [26] ทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดที่เป็นของแข็ง WO_x ถูกเติมบนตัวรองรับ (Support) เซอร์โคเนียมเจือ MCM-41 silica โดยเติม WO_3 บนตัวรองรับตั้งแต่ 5 ถึง 25 wt.% ด้วยวิธีการเอ็บซุ่ม (Impregnation) แอมโมเนียมเมตาซังสเตด $((NH_4)_6H_2W_{12}O_{40} \cdot 4H_2O)$ และหลังจากทำการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส แล้วทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันดอกทานตะวันกับเมทานอลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2.5 ชั่วโมง โดยได้ผลผลิตที่เป็นไบโอดีเซลมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการเติม 15 wt.% WO_3 มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงสุด (มีผลผลิต Fatty acid methyl ester หรือ FAME สูงถึง 82 wt.%) ซึ่งสามารถเร่งปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันและทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันที่ใช้แล้ว (Used oils) ได้อย่างต่อเนื่อง ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถนำมาใช้ซ้ำได้ 3 ครั้ง โดยไม่จำเป็นต้องทำการบำบัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Yahaya, M.S. และคณะ [27] ศึกษาและรวบรวมบทความทางวิชาการในปัจจุบันเกี่ยวกับการเร่งปฏิกิริยาและประโยชน์ต่างๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งชนิดกรดที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล โดยได้ศึกษารายละเอียดในวิธีการเตรียม และสภาวะต่างๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ชนิดกรด (Homogeneous acid catalysts) ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางจากการที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง อย่างไรก็ตามในการบำบัดน้ำเสียและการสูญเสียตัวเร่งปฏิกิริยาไปนั้นส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูง นำไปสู่การค้นหาทางเลือกอื่นๆ เพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้ ต่อมาการผลิตไบโอดีเซลที่ถูกเร่งด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ชนิดเบส (Heterogeneous base catalysts) ซึ่งได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเพราะสามารถลดปัญหาในการนำกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration and recycling) ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ชนิดกรด แต่ต้นทุนในการผลิตยังคงสูงอยู่ เพราะจำเป็นต้องกลั่นวัตถุดิบ (feedstock) ก่อนที่จะนำมาทำปฏิกิริยา ซึ่งมีราคาสูงถึง 88% ของราคาการผลิตทั้งหมด ดังนั้นจึงมีหลายงานวิจัยพยายามที่จะออกแบบและพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดแบบของแข็ง เป้าหมายเพื่อลดต้นทุนในการผลิต

Kandis, S. และคณะ [7] ศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันสุปุดำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสตรอนเซียมออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ชนิดเบสรุนแรงที่สามารถเตรียมได้ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) ทั้งนี้พบว่าสตรอนเซียมที่เจือผสมเข้าไปมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มสมรรถนะในการเร่งปฏิกิริยาของ CaO และ MgO ในขณะที่ MgO จะทำให้อนุภาคโดยรวมมีขนาดเล็กและ CaO ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ดีขึ้น กลไกของปฏิกิริยาถูกเสนอและแสดงให้เห็นถึงผลของชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งดำเนินการภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และสัดส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันสุปุดำเป็น 9:1 จากผลการทดลองพบว่าร้อยละผลผลิตที่ได้มีค่าสูงสุดถึงร้อยละ 99.6 เมื่อใช้สตรอนเซียมออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และยังพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถนำมาใช้ซ้ำได้มากถึง 4 ครั้ง โดยไม่จำเป็นต้องทำการบำบัด ซึ่งยังคงให้ร้อยละผลผลิตลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

Nasar, M. และคณะ [8] ศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ของโลหะผสมทั้งสแตนและโมลิบดีนัมบนตัวรองรับแคลเซียมออกไซด์ที่เตรียมได้จากเปลือกไข่ สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อลักษณะและร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเทอร์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ สัดส่วนโดยโมลของทั้งสแตนและโมลิบดีนัมบนตัวรองรับแคลเซียมออกไซด์ ($W_x\text{-Mo}_y/\text{CaO}$) โดยอาศัยหลักการของปริมาณสารสัมพันธ์ในการกำหนดสัดส่วนโดยโมลของสารดังกล่าว โดยกำหนดให้จำนวนโมลของทั้งสแตน (x) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.3 และจำนวนโมลของโมลิบดีนัม (y) มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.7 จากผลการทดลองพบว่าร้อยละผลผลิตมีค่าสูงสุดถึงร้อยละ 96.2 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ของโลหะผสมทั้งสแตนและโมลิบดีนัมบนตัวรองรับเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รองรับแคลเซียมออกไซด์ที่มีจำนวนโมลของทั้งสแตนและโมลิบดีนัมเท่ากับ 0.6 และ 0.4 ตามลำดับ ซึ่งดำเนินปฏิกิริยาภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน เป็น 15:1 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก นอกเหนือจากนั้นยังพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมีความเสถียรและมีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากสามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้มากถึง 5 ครั้ง โดยที่ยังคงให้ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์สูงถึงร้อยละ 90

Mingming, F. และคณะ [28] ศึกษาการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ของโลหะผสม แคลเซียมและแมกนีเซียม เพื่อใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างน้ำมันถั่วเหลืองกับ เมทานอลให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไบโอดีเซล พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ผสมแคลเซียมและแมกนีเซียม มีโครงสร้างเป็นบล็อก ซึ่งทำให้มีประสิทธิภาพในการต้านทานต่อน้ำที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับแคลเซียม ออกไซด์บริสุทธิ์ จากผลการทดลองพบว่าร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลสูงที่สุดถึงร้อยละ 98.4 เมื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ผสมแคลเซียมและแมกนีเซียม ที่มีสัดส่วนโดยโมลของแคลเซียมต่อ แมกนีเซียมเป็น 1:3 ซึ่งดำเนินปฏิกิริยาภายใต้อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง สัดส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 12:1 และนอกจากนั้นยังพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา ดังกล่าวสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้มากถึง 5 ครั้ง โดยที่ยังคงให้ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลสูงถึงร้อยละ 90



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. น้ำมันปาล์มตราหยก บริษัท ลำสูง (มหาชน) จำกัด (ประเทศไทย)
2. น้ำมันปาล์มที่ผ่านการใช้แล้ว จากร้านครัวปีกซีโต้ โรงอาหารคณะวิทยาศาสตร์
3. โซเดียมทังสเตตไดไฮเดรต (Sodium tungstate dehydrate, $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) เกรตวึเคราะห์ จากบริษัท ITALMAR (THAILAND)
4. แคลเซียมไนเตรต เตตระไฮเดรต (Calcium nitrate, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) เกรตวึเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba Reagent
5. แมกนีเซียมไนเตรต เฮกซะไฮเดรต (Magnesium nitrate hexahydrate, $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) เกรตวึเคราะห์ จากบริษัท Panreac Quimica
6. แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide, MgO) เกรตวึเคราะห์ จากบริษัท Loba Chemie
7. แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide, CaO) เกรตวึเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba Reagent
8. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) เกรตวึเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba Reagent
9. โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate, Na_2CO_3) เกรตวึเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba Reagent
10. โซเดียมซัลเฟตแอนไฮดรัส (Sodium sulfate anhydrous, Na_2SO_4) เกรตวึเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba Reagent
11. อะซิโตน (Acetone, $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) เกรตวึเคราะห์ จากบริษัท Lab Scan
12. เมทานอล (Methanol, CH_3OH) เกรตวึเคราะห์ จากบริษัท Fisher Carlo Erba
13. น้ำกลั่น (distilled water)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (X-ray Diffraction Spectrophotometer, XRD) ยี่ห้อ Siemens รุ่น D8 Advance
2. เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (X-ray Fluorescence, XRF) ยี่ห้อ Philips รุ่น PW2004
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ LEO 1450 VP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เครื่องโปรแกรมอุณหภูมิด้วยเทคนิคการคายซับ (Temperature Programmed Desorption, TPD)
5. เครื่องฟูเรียทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น FT-IR SPECTRUM GX
6. เครื่องฟูเรียทรานส์ฟอร์มนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Nuclear Magnetic Resonance Spectrophotometer, FT-NMR) ยี่ห้อ BRUKER รุ่น Advance DPX 300
7. เครื่อง BET- Autosorb-1C Surface Area and Pore Size Analyzer
8. เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Parr Reactor) รุ่น 4848
9. เครื่องวิเคราะห์พลังงานความร้อน (Bomb Calorimeter) ยี่ห้อ IKA รุ่น C2000 basic
10. Hotplate/stirrer ยี่ห้อ Fisher Scientific
11. เครื่องชั่งไฟฟ้า 2 และ 4 ตำแหน่ง จากบริษัท Mettler - Toledo
12. ขวดรูปخمพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร
13. ปีกเกอร์ ขนาด 100, 250 และ 600 มิลลิลิตร
14. กรวยแยก ขนาด 250 มิลลิลิตร
15. กระบอกตวง ขนาด 10 และ 50 มิลลิลิตร
16. แท่งแก้วคน
17. ช้อนตักสาร
18. ขาดังและที่จับ
19. เตาทอบ ยี่ห้อ Memmert
20. เตาเผา ยี่ห้อ Chavachote
21. กรวยแก้ว
22. กระจกนาฬิกา
23. กระจกชามนิเวอร์แซลอินดิเคเตอร์ จากบริษัท Merck
24. ชุดกรองบุชเนอร์
25. กระจกฟอยด์
26. หลอดหยด
27. กระจกกรอง เบอร์ 41,42 จากบริษัท Whatman
28. ขวดสเปรย์
29. กระบอกน้ำกลั่น
30. ครุชีเบล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการทดลอง

การทดลองแบ่งเป็น 5 ขั้นตอน ได้แก่

- 1.) การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม
- 2.) การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม
- 3.) การวิเคราะห์คุณสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยา
- 4.) การสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์
- 5.) การทดสอบสมบัติทางเชื้อเพลิงและโครงสร้างทางเคมีของเมทิลเอสเทอร์

3.3.1. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม ($MgO-CaO$) โดยวิธีการตกตะกอนร่วม (co-precipitation) มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมสารละลายผสมระหว่างแมกนีเซียมไนเตรต เฮกซะไฮเดรต ($Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) และ แคลเซียมไนเตรต เตตระไฮเดรต ($Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$) ให้มีอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแคลเซียมเป็น 0.5 : 1 โมล โดยทำการชั่ง $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ 12.8203 กรัม และ $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ 23.614 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร
2. เตรียมสารละลายผสมระหว่างสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ที่มีความเข้มข้น 4 โมลาร์และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) ที่มีความเข้มข้น 1 โมลาร์
3. หยดสารละลายที่เตรียมได้ในข้อ 1. ลงในสารละลายที่เตรียมได้ในข้อ 2. ซึ่งถูกให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พร้อมปั่นกวนตลอดเวลา
4. ปั่นกวนสารผสมในข้อ 3. อย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
5. กรองตะกอนและล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นร้อน
6. อบตะกอนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
7. แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง
8. จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแคลเซียม เป็น 0.5 : 1
9. ทำการทดลองซ้ำในข้อ 1-7 โดยชั่ง $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ 25.6407 กรัม และ $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ 23.6149 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยา $MgO-CaO$ ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ $Mg : Ca$ เป็น 1:1
10. ทำการทดลองซ้ำในข้อ 1-7 โดยชั่ง $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ 25.6407 กรัม และ $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ 11.8074 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยา $MgO-CaO$ ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ $Mg : Ca$ เป็น 2:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

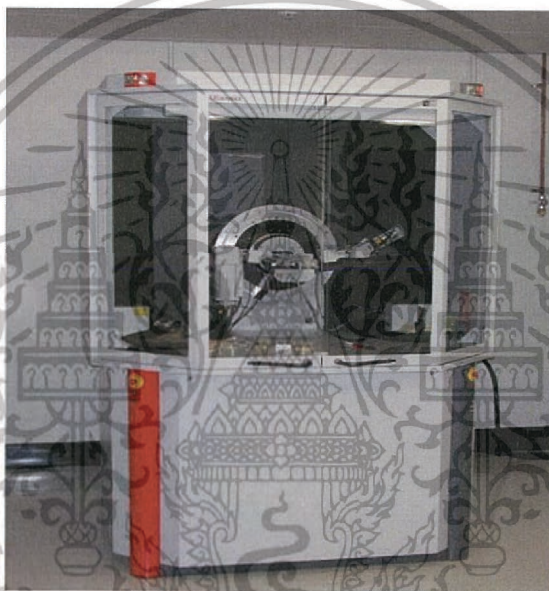
3.3.2. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม ($\text{WO}_3/\text{MgO-CaO}$)

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมโดยวิธีเคลือบฝัง (Impregnation) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. ชั่งตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมที่ผ่านการแคลไซน์แล้ว จำนวน 10 กรัม ใส่กระจกนาฬิกา
2. ชั่งโซเดียมทังสเตตไดไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 2.6913 กรัม ละลายในน้ำกลั่น ปริมาตร 25 มิลลิลิตร คนให้ละลาย จากนั้น เทใส่ขวดสเปรย์
3. ค่อยๆ สเปรย์สารละลายโซเดียมทังสเตตไดไฮเดรต ลงบนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม ที่เตรียมไว้
4. นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการสเปรย์แล้วไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
5. นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่อบแล้วไปแคลไซน์ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยา 15% $\text{WO}_3/\text{MgO-CaO}$
6. เก็บตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม ใส่ในเดซิเคเตอร์ ก่อนนำไปทำการทดลองและส่งตรวจวิเคราะห์
7. ทำการทดลองซ้ำในข้อ 1-6 โดยชั่ง $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 1.7942 กรัม จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณของทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม 10 wt.% $\text{WO}_3/\text{MgO-CaO}$
8. ทำการทดลองซ้ำในข้อ 1-6 โดยชั่ง $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 3.5884 กรัม จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณของทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม 20 wt.% $\text{WO}_3/\text{MgO-CaO}$
9. ทำการทดลองซ้ำในข้อ 1-6 โดยชั่ง $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 5.3825 กรัม จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณของทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม 30 wt.% $\text{WO}_3/\text{MgO-CaO}$
10. ทำการทดลองซ้ำในข้อ 1-6 โดยชั่ง $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 7.1767 กรัม จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณของทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม 40 wt.% $\text{WO}_3/\text{MgO-CaO}$

3.3.3. การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมที่สังเคราะห์ได้ถูกนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบและลักษณะความเป็นผลึกด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD), วิเคราะห์หาองค์ประกอบและปริมาณทั้งสแตนออกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray Fluorescence, XRF), วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM), วิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาตามวิธีของ BET (Surface Area and Porosity Analyzer) และวิเคราะห์ความเป็นกรดเบสด้วยเทคนิคการโปรแกรมอุณหภูมิเพื่อทดสอบการคายซับ (Temperature Programmed Desorption, TPD)



รูปที่ 3.1 เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

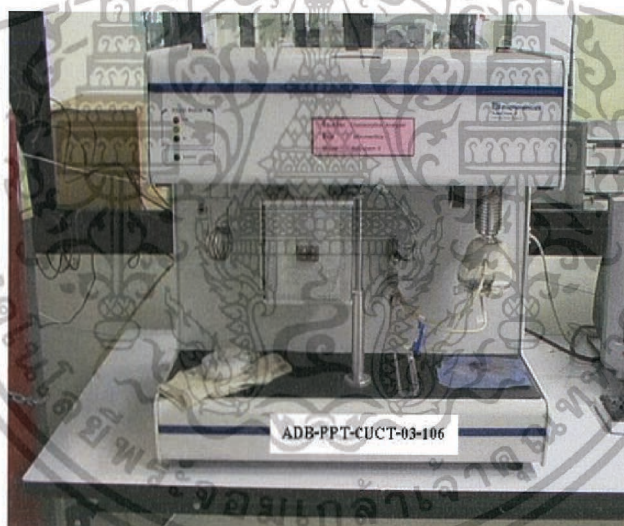


รูปที่ 3.3 เครื่อง BET- Autosorb-1C Surface Area Analyzer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (XRF)



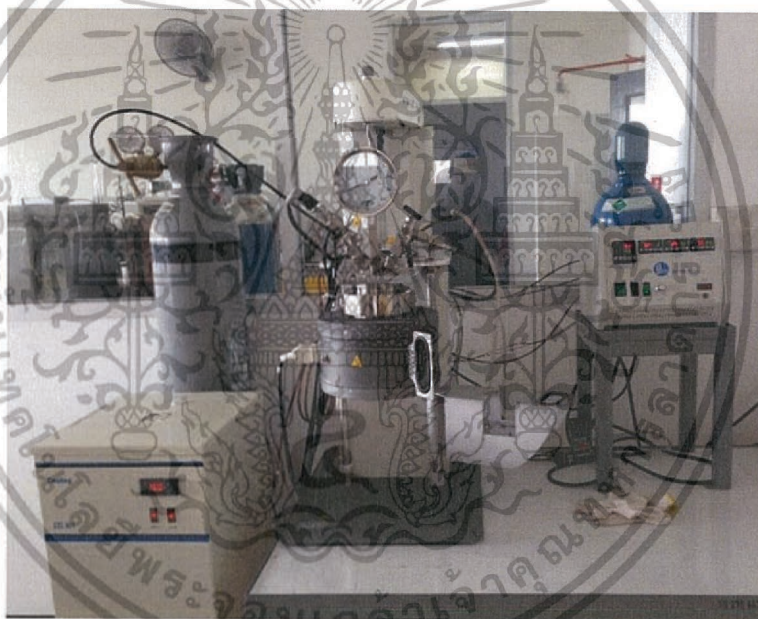
รูปที่ 3.5 เทคนิคการโปรแกรมอุณหภูมิเพื่อทดสอบการคายซับ (TPD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4. การสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์

ในการทดลองนี้จะทำการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของเมทานอลและน้ำมันปาล์มที่ผ่านการใช้งานมาแล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม โดยขั้นตอนการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ จะใช้เครื่อง Parr Reactor ในการทำปฏิกิริยา

เครื่อง Parr Reactor หรือ เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ รุ่น 4848 ถึงปฏิกรณ์มีขนาด 1 ลิตร มีคุณสมบัติ คือ สามารถใช้ที่ความดันสูง ซึ่งรับความดันได้สูงสุดที่ 3000 psi ใช้ที่อุณหภูมิสูงได้ โดยมี controller เป็นตัวควบคุม ซึ่งสามารถควบคุมความเร็วรอบในการปั่นของใบพัด ควบคุมอุณหภูมิ และวัดค่าความดันได้ และยังมีระบบ Datalog ที่จะทำให้สามารถควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ ในระยะไกลได้ รวมถึงระบบ safety ในการหล่อเย็นและปิด heater เมื่ออุณหภูมิสูง โดยชุด Parr Reactor แสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่อง Parr Reactor

ขั้นตอนการทำปฏิกิริยามีดังนี้

1. นำน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้ว ไปกรองด้วยเครื่องกรองแบบลดความดันเพื่อกำจัดอนุภาคของแข็งที่ปะปนออกไปก่อน

2. นำน้ำมันที่กรองแล้วประมาณ 100 กรัม เมทานอล 45.312 กรัม (อัตราส่วนโดยโมล เมทานอลต่อน้ำมันเป็น 12:1) และตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 800°C ปริมาณ 2 กรัม (ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2wt.%) ใส่ลงในปฏิกรณ์ แล้วทำการประกอบถังและขันน็อตให้แน่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เปิด Controller แล้วจึงเปิดระบบหล่อเย็น โดยตั้งค่าอุณหภูมิ 15°C เพื่อช่วยให้ อุณหภูมิใน Reactor ไม่สูงเกินที่ตั้งค่าไว้
4. ทำการเปิดวาล์ว Gas Inlet Valve เพื่อให้บรรจุก๊าซไนโตรเจน 10 บาร์ โดยดูค่า ความดันได้จาก Pressure Gate และ Monitor ของ Controller ที่ Pressure Display Module ว่าความดันคงที่หรือไม่
5. เมื่อตรวจสอบแล้วว่าไม่มีแก๊สรั่วไหล แล้วจึงตั้งค่าอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาไว้ที่ 70°C และเปิด Heater
6. เปิด Motor แล้วทำการตั้งค่าความเร็วรอบไว้ที่ 600 รอบต่อนาที
7. เมื่อปฏิกิริยาดำเนินเสร็จตามเวลาที่กำหนดไว้ คือ 2 ชั่วโมง จึงทำการตั้งค่าอุณหภูมิ ใหม่ให้อยู่ที่ 40°C เพื่อให้เครื่องทำการ Cool down ลง และปิด heater
8. รอกอุณหภูมิลดลงตามที่ตั้งค่าไว้ ทำการหมุนความเร็วรอบให้ลดลงจนกลายเป็น ศูนย์ ปิด Motor เปิดวาล์วเพื่อระบายแก๊สจนความดันเท่ากับศูนย์ แล้วจึงปิดสวิทช์ เพื่อปิดเครื่อง ปฏิกรณ์
9. ทำการขนน็อตแล้วปลดล๊อคคังปฏิกรณ์ หลังจากนั้นกรองของผสมแบบลดความดัน เพื่อแยกตัวเร่งปฏิกิริยา
10. นำของเหลวที่กรองได้เทใส่ลงในกรวยแยก ปล่อยให้ตก เพื่อให้เกิดการแยกชั้น ระหว่างชั้นเมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอล โดยชั้นเมทิลเอสเทอร์จะมีสีออกเหลืองใส หรือน้ำตาลอ่อนใส ส่วนชั้นกลีเซอรอลจะมีสีออกน้ำตาลเข้ม ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงการแยกชั้นของเมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอลในกรวยแยก

11. ไขชั้นกลีเซอรอลออกไป แล้วล้างชั้นเมทิลเอสเทอร์ด้วยน้ำกลั่นจนได้ชั้นเมทิลเอสเทอร์ที่มีลักษณะขุ่นเล็กน้อยและมีสภาพเป็นกลาง โดยทดสอบด้วยกระดาษยูนิเวอร์แซลอินดิเคเตอร์
12. คูดน้ำที่ปะปนกับเมทิลเอสเทอร์โดยใช้โซเดียมซัลเฟตแอนไฮดรัสจะได้เมทิลเอสเทอร์ที่ใส ตามรูปที่ 3.8 จากนั้นทำการกรองแอนไฮดรัสโซเดียมซัลเฟตออกไป
13. นำเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ไปคำนวณหาร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ และนำไปหาค่าความเป็นกรด เลขไอโอดีน ค่าความร้อน และพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีต่อไป
14. สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่กรองแยกออกจากของผสม นำมาทำการล้างด้วยอะซิโตน แล้วจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 150°C เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง
15. ทำซ้ำขั้นตอนตั้งแต่ข้อที่ 2-13 ตามสภาวะต่างๆตามตารางที่ 3.1 – 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 เมทิลเอสเทอร์ที่ผ่านการดูดน้ำด้วยโซเดียมซัลเฟตแอนไฮดรัส

ในการทดลองตามตารางที่ 3.1 จะเป็นการนำตัวเร่งปฏิกิริยา MgO-CaO ที่เตรียมได้ ไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน เพื่อคัดเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเทอร์สูงสุดมาทำการเพิ่มประสิทธิภาพโดยการเคลือบฝังด้วยทั้งสแตนออกไซด์ปริมาณต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการเพิ่มประสิทธิภาพไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน เพื่อคัดเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเทอร์สูงสุดมาศึกษาอิทธิพลของตัวแปรอื่นๆ ต่อไป ดังแสดงในตารางที่ 3.3 – 3.6

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรในการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของ Mg ต่อ Ca ของตัวเร่งปฏิกิริยา MgO-CaO ที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อัตราส่วนโดยโมลของ Mg : Ca	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)
MgO-CaO	0.5 : 1	12: 1	2	2	70
	1 : 1				
	2 : 1				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรในการศึกษาผลของปริมาณทั้งสเดนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณของทั้งสเดนออกไซด์ (wt%)	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิในการทำการทำปฏิกิริยา (°C)
MgO-CaO เลือกลงจากตารางที่ 3.1 ที่ให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุด	10	12: 1	2	2	70
	15				
	20				
	30				
	40				

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรในการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่มีผลต่อร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ทั้งสเดนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิในการทำการทำปฏิกิริยา (°C)
ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา WO ₃ /MgO-CaO ที่เหมาะสมจากตารางที่ 3.2	9: 1	2	2	70
	12: 1			
	15: 1			
	18: 1			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรในการศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มีผลต่อร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)
ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา WO ₃ /MgO-CaO ที่เหมาะสมจากตารางที่ 3.2	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่เหมาะสมจากตารางที่ 3.3	1	2	70
		2		
		3		
		4		

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรในการศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนแมกนีเซียมออกไซด์ผสมแคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)
ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา WO ₃ /MgO-CaO ที่เหมาะสมจากตารางที่ 3.2	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่เหมาะสมจากตารางที่ 3.3	ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจากตารางที่ 3.4	1	70
			2	
			3	
			4	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรในการศึกษาเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการนำกลับมาใช้ใหม่

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	จำนวนครั้งที่ทำปฏิกิริยา
ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา $WO_3/MgO-CaO$ ที่เหมาะสมจากตารางที่ 3.2	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่เหมาะสมจากตารางที่ 3.3	ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจากตารางที่ 3.4	เวลาที่เหมาะสมจากตารางที่ 3.5	70	1
					2
					3
					4

3.3.5. การทดสอบสมบัติทางเชื้อเพลิงและโครงสร้างทางเคมีของเมทิลเอสเทอร์

- 1.) ค่าความเป็นกรด (Acid value)
- 2.) เลขไอโอดีน (Iodine value)
- 3.) ค่าความร้อน (Heating value)

3.3.5.1 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (Acid value)

วิธีทำ

1. ใส่เอทานอลกับไดเอทิลอีเทอร์ อย่างละ 10 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ เขย่าให้เข้ากัน เติมฟีนอล์ฟทาไลน์ 3-4 หยด แล้วทำให้เป็นกลางด้วยการเติมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จนเห็นเป็นสีชมพูอ่อนๆ (ไม่ต้องจดปริมาตร)
2. นำขวดดังกล่าวไปวางบนเครื่องชั่ง ปรับน้ำหนักให้เป็นศูนย์ แล้วเติมน้ำมันประมาณ 5 กรัมลงไป เขย่าและไทเทรตด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จนถึงจุดยุติ ซึ่งจะได้สารละลายสีชมพูคงตัว (5-10 นาที)
3. จดปริมาตรโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไทเทรต แล้วนำไปคำนวณหาค่าความเป็นกรด

วิธีการคำนวณ

ให้ g เป็นจำนวนกรัมของน้ำมันที่ใช้

ให้ V เป็นจำนวนมิลลิลิตรของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต

จำนวนโมลของ KOH ที่ใช้ = $0.01V / 1000$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

3.3.5.2 การวิเคราะห์หาเลขไอโอดีน (Iodine value)

การเตรียมสารละลายยาน้ำไอโอดีน

ละลายไอโอดีน 13.2 กรัม ในกรดอะซิติกกลั่น 1 ลิตรนำไปอุ่นให้ร้อนเพื่อช่วยให้ไอโอดีนละลายดีขึ้น เก็บสารละลายที่ได้ไว้ในขวดสีชาที่มีฝาปิดแน่น

วิธีทำ

1. นำขวดรูปกรวย (ล้างภายในขวดด้วยคลอโรฟอร์ม) วางบนเครื่องชั่งปรับน้ำหนักให้เป็นศูนย์ แล้วเติมน้ำมันประมาณ 0.3 - 1 กรัม
2. เติมคลอโรฟอร์ม 10 มิลลิลิตร แล้วเปิดสารละลายยาน้ำไอโอดีน 20 มิลลิลิตร ลงไปในขวดแล้วปิดจุกเขย่าให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ในที่มืด 45 นาที (ให้ทำขวดเปรียบเทียบแบบลงค์ไปพร้อมกัน โดยทำเช่นเดียวกันแต่ไม่ใส่น้ำมัน)
3. เติม 10% โพแทสเซียมไอโอไดด์ลงไป 10 มิลลิลิตร แล้วเขย่าเพื่อให้ทำปฏิกิริยากับยาน้ำไอโอดีนที่เหลืออยู่ในชั้นคลอโรฟอร์ม ซึ่งจะได้ไอโอดีนออกมาอยู่ในชั้นของโพแทสเซียมไอโอไดด์ (เห็นสารละลายเป็นสีน้ำตาลเข้ม)
4. ใช้น้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร ชะล้างไอโอดีนที่ติดอยู่ที่ผนังขวดและฝาให้หมดแล้วรีบปิดฝา
5. นำไปไทเทรตกับโซเดียมไทโอซัลเฟตจนสีของไอโอดีนจางลง (เห็นเป็นสีน้ำตาลจางๆ อมเหลือง) แสดงว่าเหลือไอโอดีนอีกเพียงเล็กน้อย จึงเติมน้ำแป้งลงไปประมาณ 0.5-1 มิลลิลิตร สารละลายจะเป็นสีน้ำเงินแล้วไทเทรตต่อจนสีน้ำเงินหายไป จดปริมาตรไว้

วิธีการคำนวณ



ให้ A = มิลลิลิตรของโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตขวดตัวอย่าง

B = มิลลิลิตรของโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตขวดเปรียบเทียบ

จากสมการ 1 โมลของไอโอดีน = 2 โมลของโซเดียมไทโอซัลเฟต

$$\text{ดังนั้น จำนวนโมลของไอโอดีนที่ถูกดูดด้วยไขมัน} = \frac{1}{2} (0.2 (B-A) / 1000)$$

$$\text{น้ำหนักโมลของไอโอดีน} = 254$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\text{จำนวนกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดด้วยไขมัน} &= \frac{1}{2}(0.2(B-A) / 1000) \times 254 \\ &= 2.54(B-A)/100\end{aligned}$$

เนื่องจาก เลขไอโอดีน = จำนวนกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดด้วยไขมัน 100 กรัม

$$g = \text{จำนวนกรัมของน้ำมันที่ใช้}$$

$$\begin{aligned}\text{ดังนั้น เลขไอโอดีน} &= (2.54(B-A)/100) \times 100/g \\ &= 2.54(B-A)/g\end{aligned}$$

3.3.5.3. การวิเคราะห์หาค่าความร้อน (Heating value)


การทดสอบด้วยวิธีนี้ใช้เพื่อหาค่าความร้อนของตัวอย่างผง ของแข็งและของเหลว เช่น น้ำมัน ถ่านหิน วัสดุการเกษตร สิ่งแวดล้อมและอื่นๆ เป็นระบบ isoperibol และ dynamic มีหลักการทำงานโดยใส่ตัวอย่างลงไปในลูกบอมบ์เพื่อเผาจนตัวอย่างลุกไหม้ให้ความร้อนออกมา



รูปที่ 3.9 เครื่องวิเคราะห์พลังงานความร้อน (Bomb Calorimeter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีทำ

1. ชั่งตัวอย่างน้ำมันใส่ในถ้วยตัวอย่างประมาณ 0.5 กรัม จดบันทึกน้ำหนักที่ชั่งไว้
2. ใช้เชือกผูกกับเส้นลวดของแท่นตัวอย่าง แล้วจุ่มปลายเชือกลงในตัวอย่างน้ำมัน
3. จากนั้นนำแท่นตัวอย่างใส่ลงไปในกลุ่มบอมบ์วิเคราะห์ตัวอย่าง
4. เปิดวาล์วถังแก๊สออกซิเจน หลังจากที่อยู่ณหภูมิของ Cooler มีค่าเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส
5. ทำการเปิดเครื่อง Bomb Calorimeter จนกราฟขึ้นบนหน้าจอ และมีข้อความขึ้นว่า “waiting OK for tests” จากนั้นกด Sample
6. ใส่น้ำหนักตัวอย่างน้ำมันที่จดบันทึกไว้ จากนั้นกด Tab ไปจนถึงช่อง Bomb cell แล้วใส่เลข 1
7. เมื่อเครื่องแสดงผลว่า Safety แล้ว จึงกด OK
8. ใส่กลุ่มบอมบ์วิเคราะห์ตัวอย่างลงไปเครื่อง แล้วกด Start
9. เมื่อเครื่องตรวจเสร็จ จะรายงานผลกราฟและข้อมูลพลังงานความร้อน
10. นำกลุ่มบอมบ์วิเคราะห์ตัวอย่างออก แล้วระบายความดันภายในกลุ่มบอมบ์วิเคราะห์ตัวอย่าง
11. ล้างทำความสะอาดกลุ่มบอมบ์วิเคราะห์ตัวอย่างและถ้วยตัวอย่าง
12. จากนั้นทำการปิดเครื่อง Bomb Calorimeter โดย
 - 12.1 กด Maint.
 - 12.2 กด  มาที่ O₂ fill เพื่อระบายแก๊สออกซิเจน ป้องกันการระเบิด
 - 12.3 ทำข้อ 12.1 และ 12.2 ซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อให้แน่ใจว่าแก๊สออกซิเจนได้ถูกปล่อยออกหมดแล้ว
 - 12.4 กด Maint.
 - 12.5 กด Close MC แล้วฝาจะปิดลง
 - 12.6 ปิดสวิสซ์

บทที่ 4

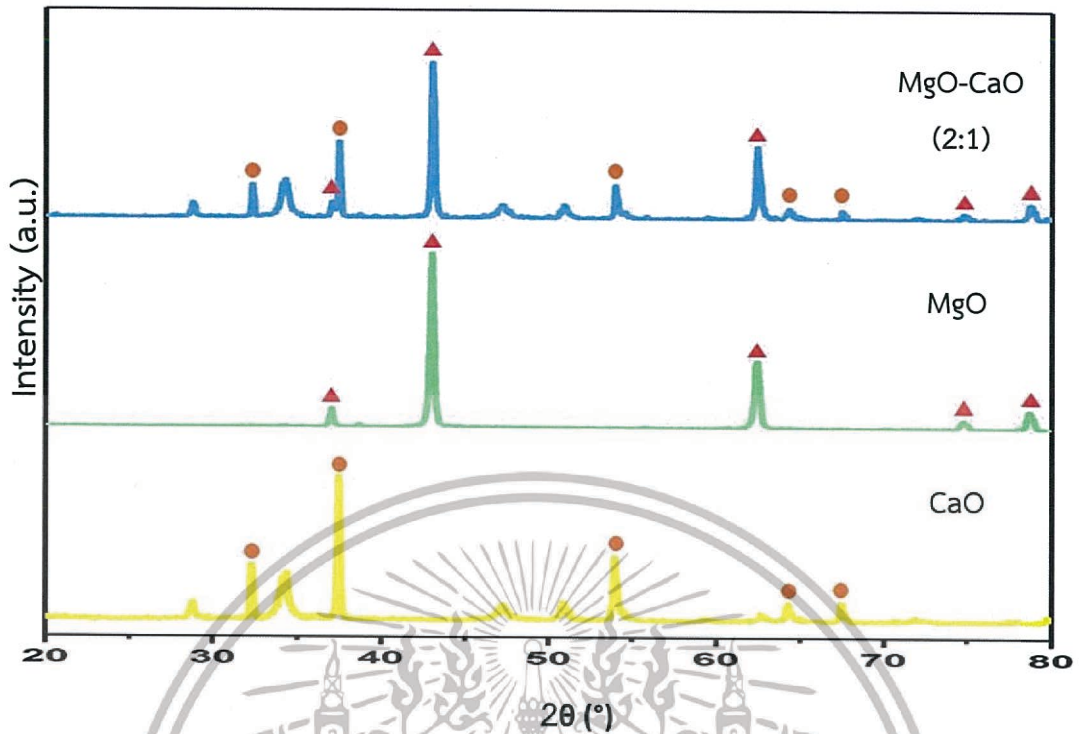
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วกับเมทานอลโดยใช้ทั้งสเตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม ($\text{WO}_3/\text{MgO}-\text{CaO}$) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการนำเสนอผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลองของงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ตอน คือ ตอนที่ 1 ศึกษาลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ ได้แก่ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา รวมถึงโครงสร้างและองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา ตอนที่ 2 เป็นการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์และศึกษาถึงตัวแปรที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของ $\text{Mg} : \text{Ca}$ ในออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม ปริมาณของทั้งสเตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการนำกลับมาใช้ใหม่ และตอนที่ 3 เป็นการพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีและทดสอบสมบัติของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากสังเคราะห์

4.1 การศึกษาลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา

4.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างและความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา

เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์สารประกอบในสารตัวอย่าง และศึกษารายละเอียดโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่าง โดยใช้เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ (X-ray diffractometer) นอกจากนี้ XRD ยังสามารถยืนยันโครงสร้างของสารตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ โดยเทียบกับโครงสร้างผลึกมาตรฐานของสารนั้น ๆ ซึ่งสารตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO , MgO , $\text{MgO}-\text{CaO}$ และ $\text{WO}_3/\text{MgO}-\text{CaO}$ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2

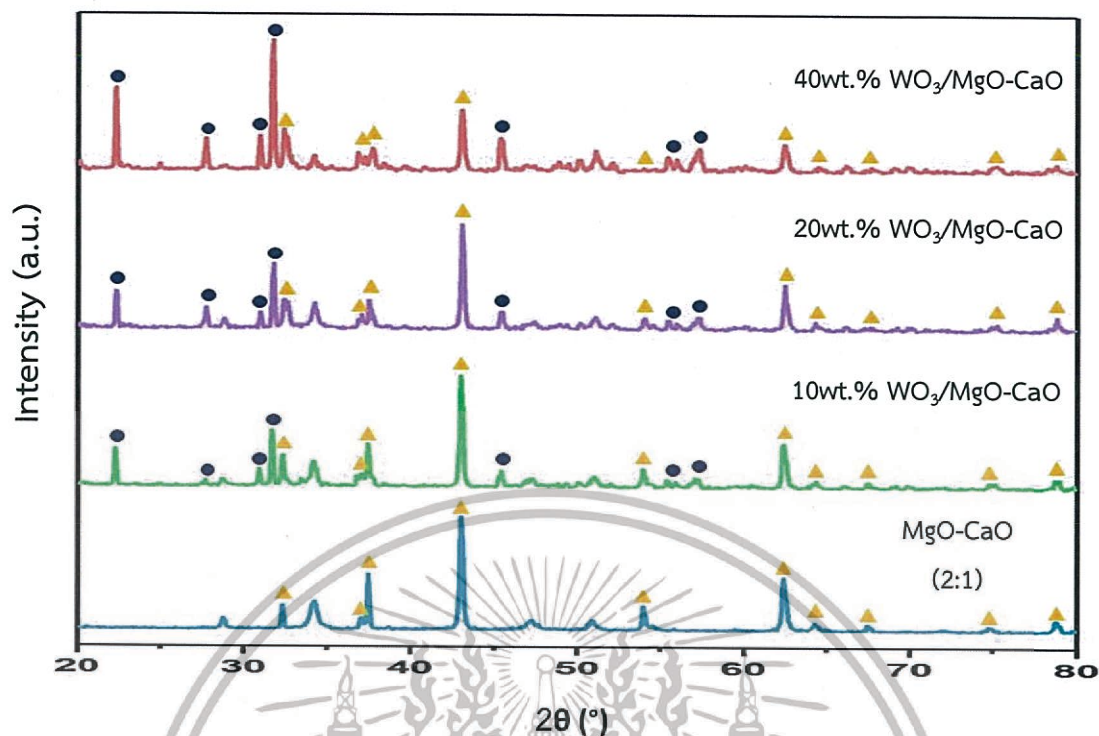


รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา CaO, MgO และ MgO-CaO (2:1)

หมายเหตุ : CaO (●), MgO (▲)

จากรูปที่ 4.1 เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา CaO, MgO และ MgO-CaO (2:1) พบพีคเอกลักษณ์ของแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ที่มีมุม 2θ เท่ากับ 37.0° , 43.0° , 62.4° , 74.76° และ 78.76° พีคเอกลักษณ์ของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่มีมุม 2θ เท่ากับ 32.32° , 37.48° , 54.0° , 64.32° และ 67.48° โดยพบพีคเอกลักษณ์ของทั้ง MgO และ CaO ปรากฏบนรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา MgO-CaO (2:1) ซึ่งมีความเป็นผลึกสูง พีคเอกลักษณ์ของ MgO ที่มีมุม 2θ เท่ากับ 43.0° มี Intensity ที่สูงกว่าพีคเอกลักษณ์ของ CaO ที่มีมุม 2θ เท่ากับ 37.48° เนื่องจากองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยามี MgO มากกว่า CaO ในอัตราส่วน 2:1 นอกจากนั้นพบว่าไม่มีผลึกแปลกปลอมที่เกิดขึ้นใหม่ในตัวเร่งปฏิกิริยา MgO-CaO

เมื่อเติมทั้งสแตนลงบนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมด้วยโซเดียมทั้งสแตดโดไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ปริมาณ 10 20 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 800°C เพื่อดูความแตกต่างของรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการเติมปริมาณทั้งสแตดที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา MgO-CaO , 10wt.% WO₃/MgO-CaO, 20wt.% WO₃/MgO-CaO และ 40wt.% WO₃/MgO-CaO
 หมายเหตุ : MgO-CaO (▲) , WO₃ (●)

จากรูปที่ 4.2 เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา MgO-CaO (2:1) , 10wt.% WO₃/MgO-CaO, 20wt.% WO₃/MgO-CaO และ 40wt.% WO₃/MgO-CaO โดยพบพีคเอกลักษณ์ของออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม (MgO-CaO) ที่มุม 2θ เท่ากับ 32.32°, 37.0°, 37.48°, 43.0°, 54.0°, 62.4°, 64.32°, 67.48°, 74.76° และ 78.76° และพบพีค WO₃ ที่มุม 2θ เท่ากับ 22.32°, 27.72°, 30.96°, 31.76°, 45.44°, 56.0° และ 57.32°

เมื่อ WO₃ มีปริมาณเพิ่มขึ้น Intensity ของพีค WO₃ จะสูงขึ้นในทางกลับกัน Intensity ของพีค MgO-CaO จะลดต่ำลง เนื่องจากเกิดการบดบังของผลึก WO₃ บนพื้นผิวของ MgO-CaO

4.1.2 องค์ประกอบของธาตุบนตัวเร่งปฏิกิริยา

นำตัวเร่งปฏิกิริยา 10 20 และ 40wt.% ทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม มาทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุและออกไซด์ ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรมิเตอร์ (X-ray Fluorescence Spectrometer, XRF Spectrometer) ซึ่งปริมาณธาตุ

แมกนีเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) ทังสเทน (W) และออกไซด์ของโลหะต่าง ๆ บนตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงดังตารางที่ 4.1

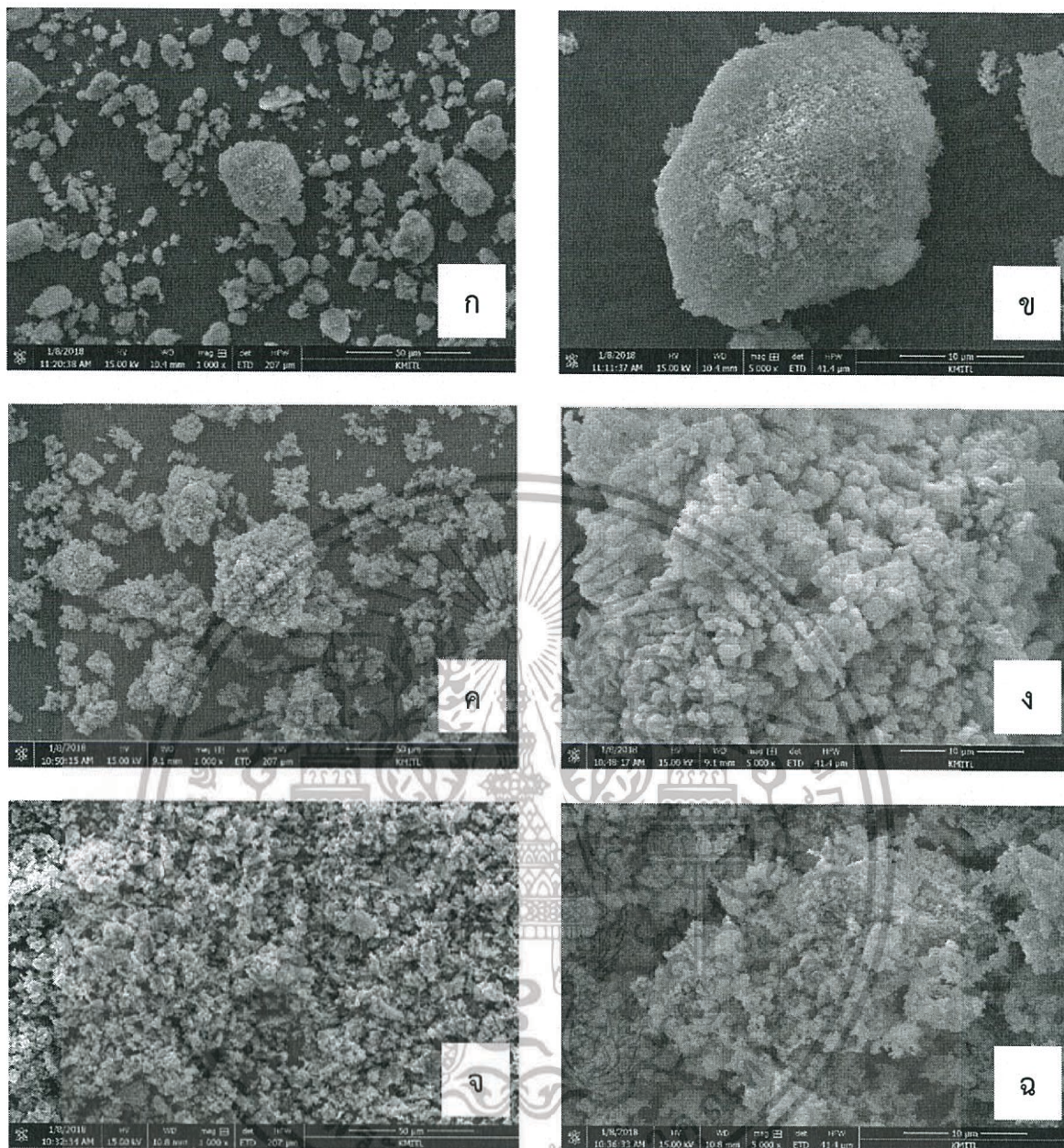
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุแมกนีเซียม(Mg) แคลเซียม(Ca) ทังสเทน (W) และออกไซด์ของโลหะต่าง ๆ บนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence Spectroscopy)

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณองค์ประกอบของออกไซด์ (mol%)			ปริมาณองค์ประกอบของธาตุ (mol%)		
	MgO	CaO	WO ₃	Mg	Ca	W
MgO-CaO (2:1)	60.7	36.5	-	36.6	26.1	-
10wt.% WO ₃ /MgO-CaO	50.9	35.4	10.0	30.7	25.3	7.94
20wt.% WO ₃ /MgO-CaO	46.0	31.5	17.5	27.8	22.5	13.8
40wt.% WO ₃ /MgO-CaO	33.5	25.5	33.4	20.2	18.2	26.5

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุและออกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม พบว่าประกอบไปด้วยธาตุแมกนีเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) และทังสเทน (W) เป็นส่วนใหญ่ เมื่อพิจารณาทั้งสแตนออกไซด์ (WO₃) จะเห็นได้ว่าปริมาณของ WO₃ ที่วิเคราะห์ได้จากเทคนิค XRF มีความใกล้เคียงกับปริมาณของ WO₃ ที่กำหนดไว้

4.1.3 ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

นำแมกนีเซียมออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ และออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมมาทำการศึกษาลักษณะพื้นผิว โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) โดยในรูปที่ 4.3 เป็นลักษณะพื้นผิวของ MgO CaO และ MgO-CaO (2:1)



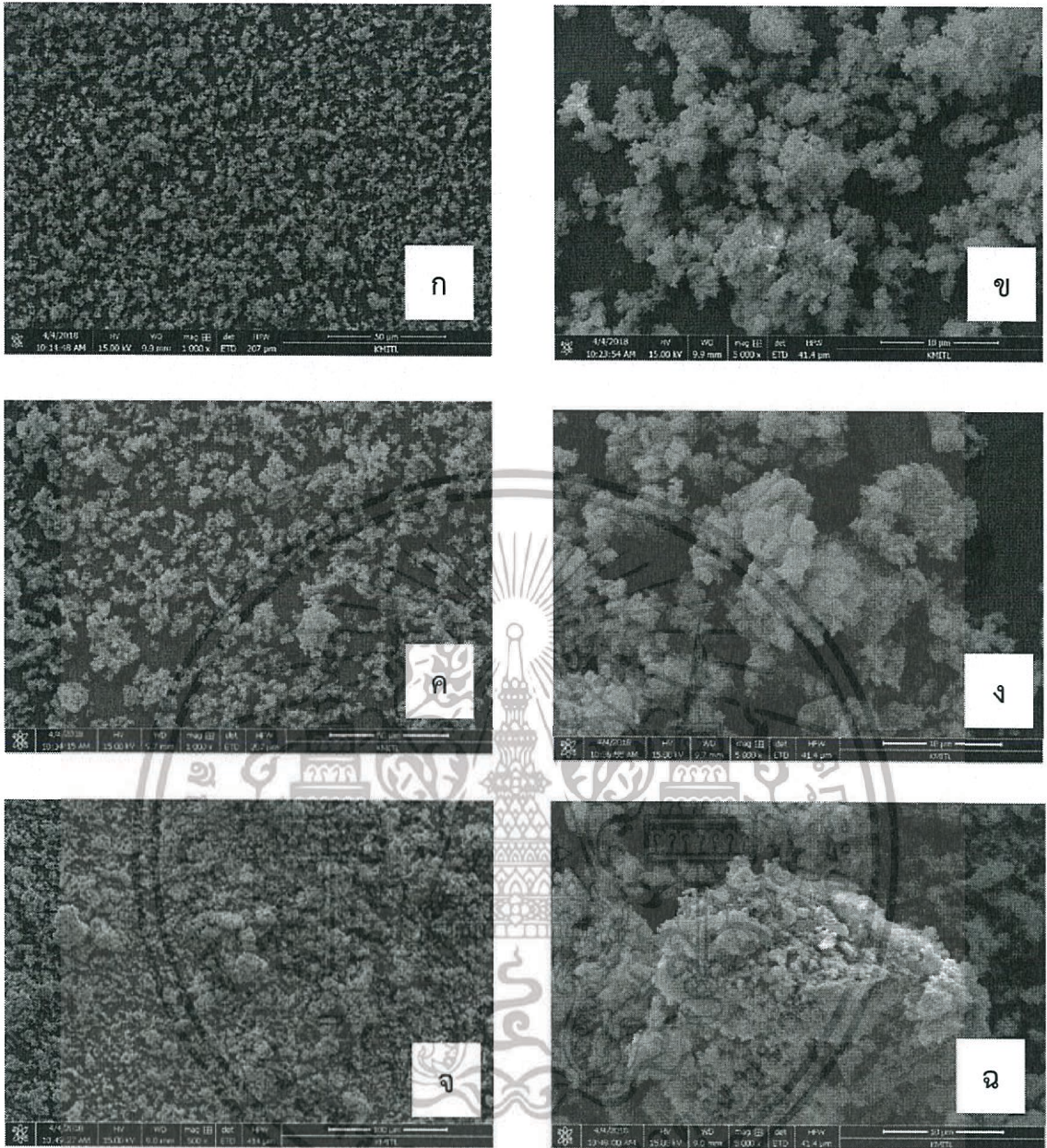
รูปที่ 4.3 ลักษณะพื้นผิว (ก) MgO ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ข) MgO ที่กำลังขยาย 5000 เท่า (ค) CaO ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ง) CaO ที่กำลังขยาย 5000 เท่า (จ) MgO-CaO (2:1) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ฉ) MgO-CaO (2:1) ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 (ก) และ (ข) แสดงลักษณะพื้นผิวของ MgO ที่กำลังขยาย 1000 และ 5000 เท่า ตามลำดับ ซึ่งมีลักษณะขรุขระและผลึกมีรูปร่างเป็นทรงหกเหลี่ยม (Hexagonal shape) จากรูป 4.3 (ค) และ (ง) แสดงลักษณะพื้นผิวของ CaO ที่กำลังขยาย 1000 และ 5000 เท่า ตามลำดับ ซึ่งมีลักษณะขรุขระและผลึกมีรูปร่างเป็นทรงลูกบาศก์ (Cubic shape) และจากรูปที่ 4.3 (จ) และ (ฉ) แสดงลักษณะพื้นผิวของ MgO-CaO ที่กำลังขยาย 1000 และ 5000 เท่า ตามลำดับ พบว่าลักษณะพื้นผิวมีความขรุขระและผลึกของ MgO และ CaO สามารถผสมเข้าด้วยกันได้เป็นอย่างดี

นอกจากนั้น ยังได้ทำการศึกษาลักษณะพื้นผิวของ 10 20 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ดังรูปที่ 4.4 เป็นลักษณะพื้นผิวของ 10wt.% $WO_3/MgO-CaO$, 20wt.% $WO_3/MgO-CaO$ และ 40wt.% $WO_3/MgO-CaO$





รูปที่ 4.4 ลักษณะพื้นผิวของ (ก) 10wt.% $WO_3/MgO-CaO$ ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ข) 10wt.% $WO_3/MgO-CaO$ ที่กำลังขยาย 5000 เท่า (ค) 20wt.% $WO_3/MgO-CaO$ ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ง) 20wt.% $WO_3/MgO-CaO$ ที่กำลังขยาย 5000 เท่า (จ) 40wt.% $WO_3/MgO-CaO$ ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ฉ) 40wt.% $WO_3/MgO-CaO$ ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

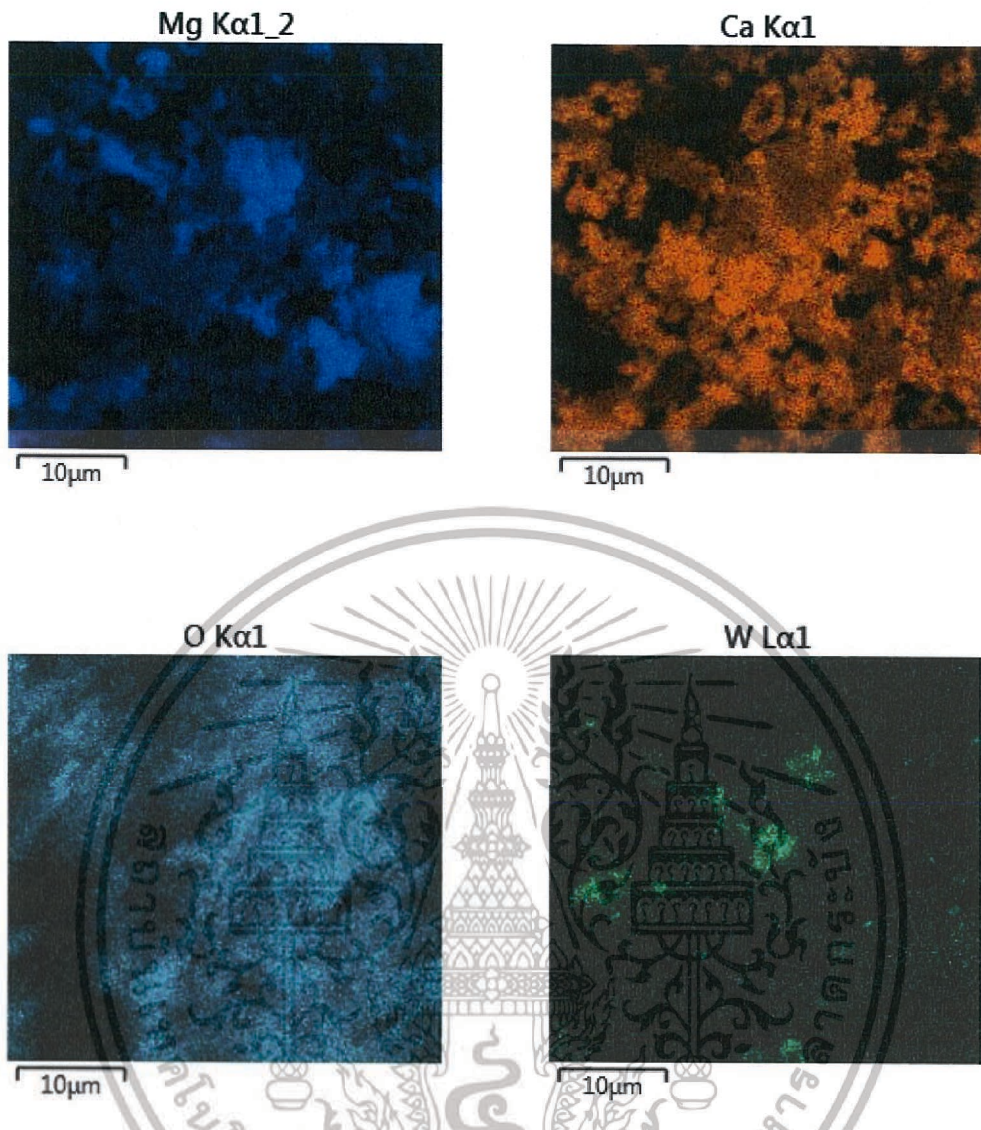
จากรูปที่ 4.4 (ก) และ (ข) แสดงลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา 10wt.% $WO_3/MgO-CaO$ ที่กำลังขยาย 1000 และ 5000 เท่า ตามลำดับ พบว่า WO_3 มีการกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous distribution) กับ $MgO-CaO$ แต่มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่และมีความขรุขระมากกว่า $MgO-CaO$ (2:1) จากรูปที่ 4.4 (ค) และ (ง) แสดงลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

20wt.% $WO_3/MgO-CaO$ พบว่าพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามีความขรุขระมากและมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า 10wt.% $WO_3/MgO-CaO$ เนื่องจากอาจจะเริ่มมีการจับตัวกันเป็นก้อนของ WO_3 เกิดขึ้นจากรูป 4.4 (จ) และ (ฉ) แสดงลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา 40wt.% $WO_3/MgO-CaO$ พบว่าพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามีความขรุขระมากและมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าทั้ง $MgO-CaO$ (2:1), 10wt.% $WO_3/MgO-CaO$ และ 20wt.% $WO_3/MgO-CaO$ เนื่องจาก WO_3 อาจเกิดการจับตัวกันเป็นก้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

นอกจากนั้น ยังได้ทำการศึกษารูปทรงประกอบและการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา 10 20 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ติดตั้งร่วมกับเครื่องเอกซเรย์สเปกโตรสโคปแบบกระจายพลังงาน (Scanning Electron Microscope/ Energy Dispersive X-ray Spectrometer, SEM/EDX) ดังรูปที่ 4.5-4.7

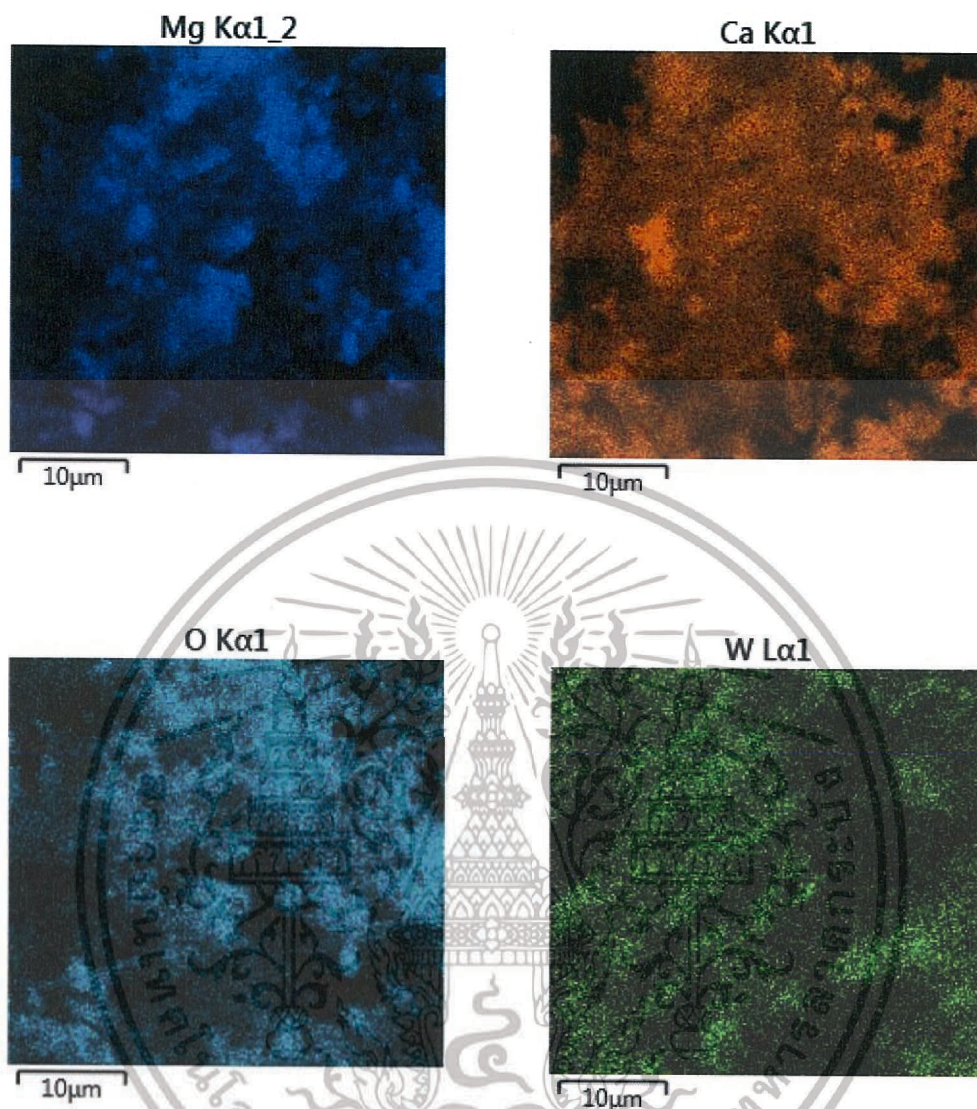


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



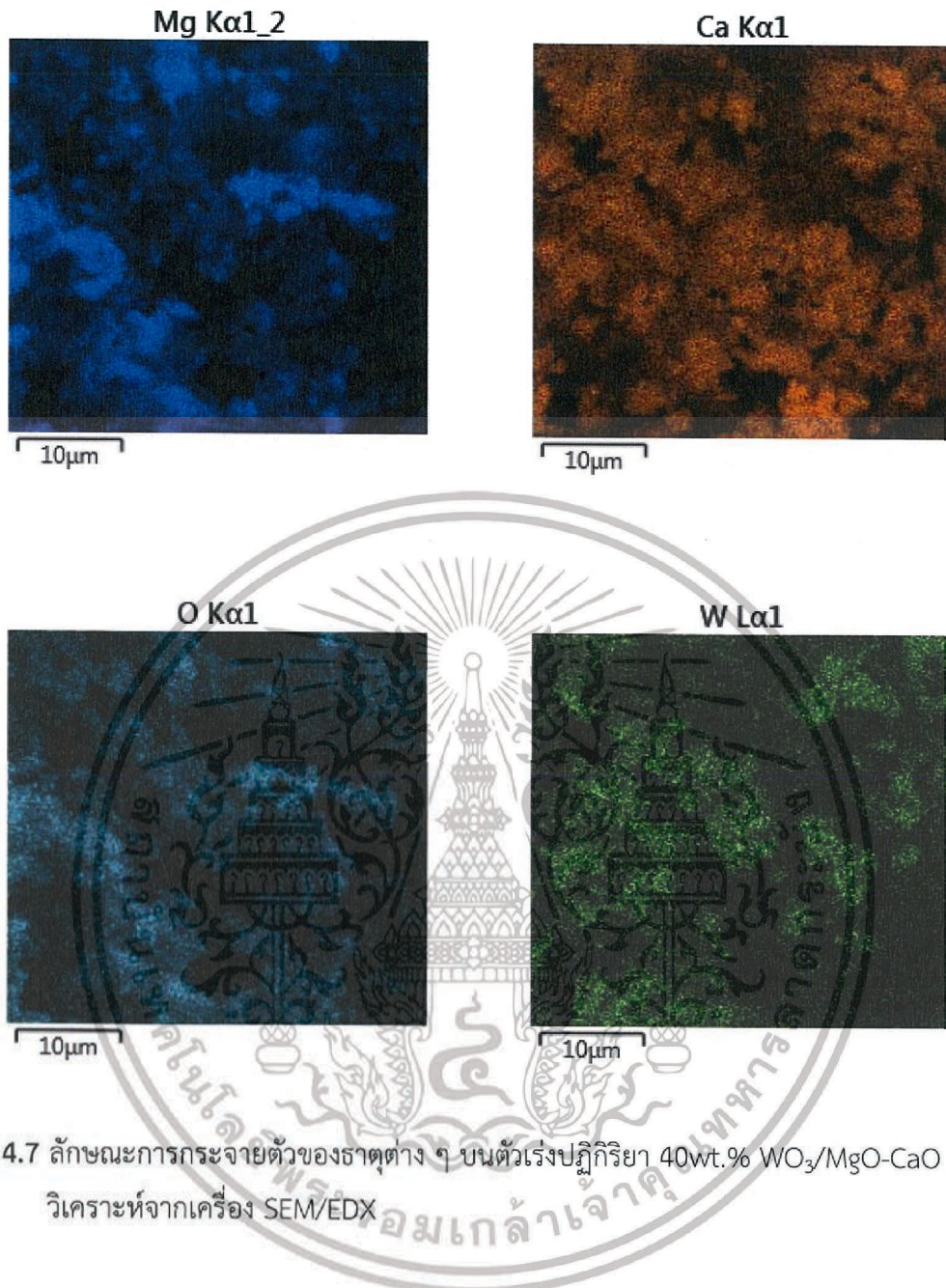
รูปที่ 4.5 ลักษณะการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ บนตัวเร่งปฏิกิริยา 10wt.% $\text{WO}_3/\text{MgO-CaO}$ ที่วิเคราะห์จากเครื่อง SEM/EDX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ลักษณะการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ บนตัวเร่งปฏิกิริยา 20wt.% $\text{WO}_3/\text{MgO-CaO}$ ที่วิเคราะห์จากเครื่อง SEM/EDX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ลักษณะการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ บนตัวเร่งปฏิกิริยา 40wt.% $WO_3/MgO-CaO$ ที่วิเคราะห์จากเครื่อง SEM/EDX

จากรูปที่ 4.5 4.6 และ 4.7 เป็นลักษณะการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ บนตัวเร่งปฏิกิริยา $WO_3/MgO-CaO$ ที่ปริมาณ WO_3 10wt.%, 20wt.% และ 40 wt.% ตามลำดับ ซึ่งพบว่ามีธาตุออกซิเจน แมกนีเซียม แคลเซียมและทังสแตนเป็นองค์ประกอบ โดยปริมาณธาตุองค์ประกอบต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 และพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 10wt.% $WO_3/MgO-CaO$, 20wt.% $WO_3/MgO-CaO$ และ 40wt.% $WO_3/MgO-CaO$ มีการกระจายตัวของทังสแตน (W) ที่ดีขึ้น ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณธาตุองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา $WO_3/MgO-CaO$ ที่วิเคราะห์จากเครื่อง SEM/EDX

ตัวเร่งปฏิกิริยา \ ธาตุ	Mg	Ca	O	W
10wt.% $WO_3/MgO-CaO$	24.33	21.59	48.82	5.25
20wt.% $WO_3/MgO-CaO$	23.90	17.76	42.88	15.46
40wt.% $WO_3/MgO-CaO$	17.59	18.25	37.02	27.14

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าปริมาณธาตุองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา $WO_3/MgO-CaO$ ที่วิเคราะห์จากเครื่อง SEM/EDX มีความใกล้เคียงกับเทคนิค XRF (ตารางที่ 4.1)

4.1.4 พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาและขนาดผลึก

นำแมกนีเซียมออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ และออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมที่อัตราส่วนโดยโมลของ Mg : Ca เป็น 0.5:1 1:1 และ 2:1 มาทำการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิค Nitrogen adsorption-desorption โดยใช้เครื่อง BET- Autosorb-1C Surface Area and Pore Size Analyzer ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET

ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	ขนาดผลึก MgO (nm)	ขนาดผลึก CaO (nm)
MgO	44.20	81.45	-
CaO	8.69	-	193.89
$MgO-CaO$ (0.5:1)	34.51	138.73	149.38
$MgO-CaO$ (1:1)	35.88	130.24	144.11
$MgO-CaO$ (2:1)	38.76	112.67	129.86

หมายเหตุ : ขนาดผลึก MgO และ CaO คำนวณจากสมการ Scherrer (ภาคผนวก ข.)

จากตารางที่ 4.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 44.20 และ 8.69 m^2/g ตามลำดับ ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ Mg : Ca เป็น 0.5:1 1:1 และ 2:1 มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 34.51 35.88 และ 38.76 m^2/g ตามลำดับ ซึ่งพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้โดยไม่ผ่านการใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แคลเซียมมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์แต่สูงกว่าแคลเซียมออกไซด์ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการปรับอัตราส่วนโมลของ Mg : Ca เนื่องจาก MgO เป็นผลึกที่มีอนุภาคขนาดเล็กส่งผลให้มีพื้นที่ผิวมาก ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณ MgO ก็ยิ่งทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมมีพื้นที่ผิวสูงขึ้นกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นอาจเกิดการจับกันเป็นก้อนของแมกนีเซียมออกไซด์ได้เช่นกัน

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในรูปแบบที่ 4.1 สามารถคำนวณขนาดผลึกจากสมการของ Scherrer โดยแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 (วิธีการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข.1) จะเห็นได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา MgO มีขนาดผลึกที่เล็กกว่า CaO, MgO-CaO (0.5:1), MgO-CaO (1:1) และ MgO-CaO (2:1) ซึ่ง MgO-CaO (2:1) มีขนาดผลึกของ MgO และ CaO ที่เล็กกว่า MgO-CaO (0.5:1), MgO-CaO (1:1) โดยสังเกตได้ว่าขนาดผลึกจะแปรผกผันกับพื้นที่ผิวจำเพาะ

4.1.5 ความแรงและปริมาณของความเป็นกรดเบสของตัวเร่งปฏิกิริยา

ความแรงและปริมาณของความเป็นกรดเบสของตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถวิเคราะห์ได้จากเทคนิคการโปรแกรมอุณหภูมิเพื่อทดสอบการคายซับ (Temperature Programmed Desorption, TPD) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้เพื่อทดสอบอันตรกิริยาระหว่างตัวถูกดูดซับซึ่งเป็นแก๊สและตัวดูดซับซึ่งคือตัวเร่งปฏิกิริยา ถ้าวเร่งปฏิกิริยามีตำแหน่งที่ว่องไว (active sites) เป็นตำแหน่งกรด จะใช้สารที่ถูกดูดซับเป็นแอมโมเนีย ซึ่งเรียกเทคนิคนี้ว่า NH_3 -TPD ในกรณีที่ตัวเร่งปฏิกิริยามีตำแหน่งที่ว่องไวเป็นตำแหน่งเบส จะใช้สารที่ถูกดูดซับเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ เรียกเทคนิคนี้ว่า CO_2 -TPD

ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{WO}_3/\text{MgO-CaO}$ ประกอบไปด้วยตำแหน่งว่องไวที่เป็นทั้งกรดและเบส จึงทำการวิเคราะห์ทั้งเทคนิค NH_3 -TPD และ CO_2 -TPD ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าความเป็นกรดและเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TPD

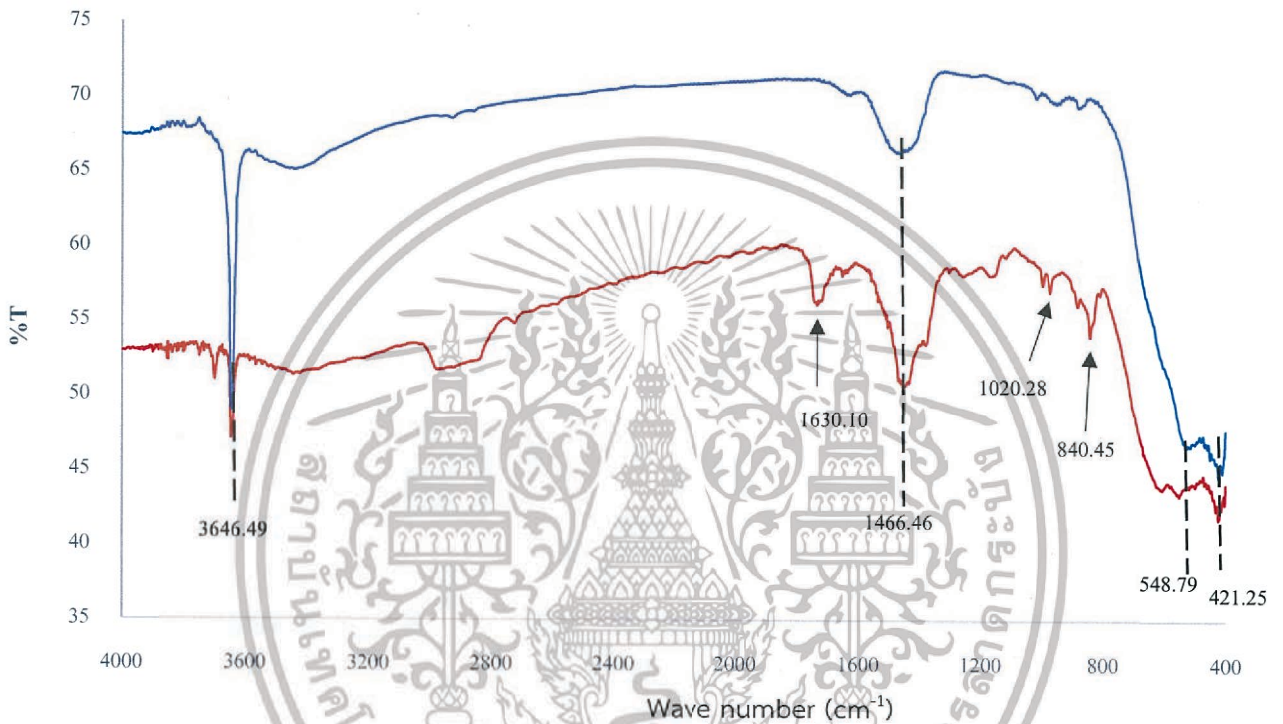
ตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณกรด ($\mu\text{mol/g}$)	ปริมาณเบส ($\mu\text{mol/g}$)
20wt.% $\text{WO}_3/\text{MgO-CaO}$	341.18334	83.83076
40wt.% $\text{WO}_3/\text{MgO-CaO}$	684.34050	13.74249

จากตารางที่ 4.4 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 20wt.% $\text{WO}_3/\text{MgO-CaO}$ และ 40wt.% $\text{WO}_3/\text{MgO-CaO}$ แสดงความเป็นกรดและเบส โดยความเป็นกรดได้มาจาก WO_3 และความเป็นเบสได้มาจาก MgO-CaO ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยา 40wt.% $\text{WO}_3/\text{MgO-CaO}$ มีปริมาณความเป็นกรดสูงกว่า 20wt.% $\text{WO}_3/\text{MgO-CaO}$ เนื่องจากปริมาณของ WO_3 มากกว่า ในขณะที่ 20wt.% $\text{WO}_3/\text{MgO-CaO}$ มีปริมาณเบสสูงกว่า 40wt.% $\text{WO}_3/\text{MgO-CaO}$ เนื่องจากมีปริมาณของ MgO และ CaO ที่มากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

นำตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยา MgO-CaO และ 40wt.% WO₃/MgO-CaO ทำการตรวจวัดด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เพื่อยืนยันถึงหมู่ฟังก์ชันของทั้งสองสแตนด์ออกไซด์

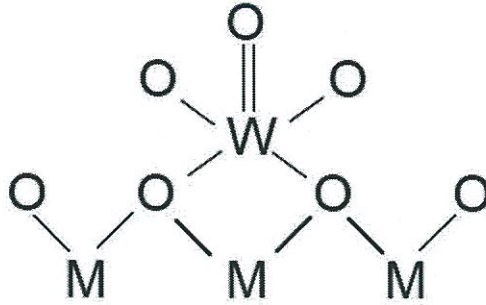


รูปที่ 4.8 FT-IR สเปกตรัมของ MgO-CaO และ 40wt.% WO₃/MgO-CaO

จากรูปที่ 4.8 เป็นการเปรียบเทียบรูปแบบ FT-IR ของ MgO-CaO กับ 40wt.% WO₃/MgO-CaO พบว่าพีคที่เลขคลื่น 421.25, 548.79 เป็นการสั่นของพันธะ $\nu(\text{Ca-O})$ และ $\nu(\text{Mg-O})$ พีคที่เลขคลื่น 1630.10 และ 3646.49 cm⁻¹ เป็นการสั่นของพันธะ $\delta(\text{H-O-H})$ และ $\nu(\text{O-H})$ นอกจากนี้สังเกตเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 40wt.% WO₃/MgO-CaO พบพีคที่เลขคลื่น 840.45, 1020.28 และ 1466.46 cm⁻¹ ซึ่งเป็นการสั่นของ $\nu(\text{O-W-O})$, Symmetric (W=O) และ $\nu(\text{W-O})$ ตามลำดับ ในขณะที่ MgO-CaO ไม่พบพีคที่ตำแหน่งนี้ จึงกล่าวได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา WO₃/MgO-CaO ที่สังเคราะห์มานั้นมีหมู่ทั้งสองสแตนด์อยู่ [31-32]

จาก FT-IR สเปกตรัมของ WO₃/MgO-CaO ซึ่งพบพีคของ W=O และ O-W-O ดังนั้น คาดว่าลักษณะพันธะที่เกิดขึ้นของทั้งสองสแตนด์ออกไซด์กับ MgO-CaO แสดงดังรูปที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



M คือ Mg, Ca

รูปที่ 4.9 ลักษณะพันธะที่เกิดขึ้นของ WO_3 กับ MgO-CaO

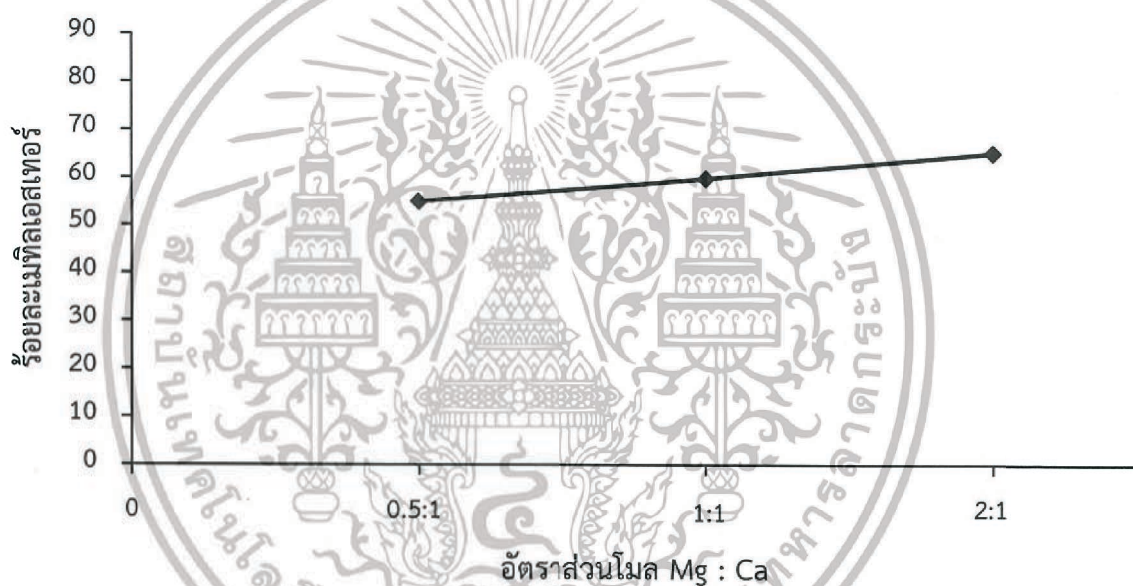
4.2 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

4.2.1. ผลของอัตราส่วนโดยโมลของ Mg ต่อ Ca ของตัวเร่งปฏิกิริยา MgO-CaO ที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

นำตัวเร่งปฏิกิริยา MgO-CaO ที่สังเคราะห์ขึ้นโดยมีอัตราส่วนโดยโมล Mg ต่อ Ca เป็น 0.5:1, 1:1 และ 2:1 มาทำการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ ที่อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 12:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 70°C และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.5 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของ Mg ต่อ Ca ของตัวเร่งปฏิกิริยา MgO-CaO ที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อัตราส่วนโดยโมลของ Mg : Ca	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์
MgO-CaO	0.5:1	12:1	2	2	70	54.95
	1:1					59.82
	2:1					65.13



รูปที่ 4.10 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของ Mg ต่อ Ca ของตัวเร่งปฏิกิริยา MgO-CaO ที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.10 พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา MgO-CaO ที่มีอัตราส่วน Mg: Ca เป็น 0.5:1 1:1 และ 2:1 มีแนวโน้มร้อยละเมทิลเอสเทอร์เพิ่มสูงขึ้นเป็น 54.95 59.82 และ 65.13 ตามลำดับ เนื่องมาจาก MgO เป็นผลึกที่มีอนุภาคขนาดเล็ก ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาให้มากยิ่งขึ้น สำหรับการเข้าทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันได้เป็นอย่างดี ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยา MgO-CaO ที่มีอัตราส่วน Mg : Ca เป็น 2:1 จึงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์สูงที่สุด เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูงกว่า MgO-CaO ที่มีอัตราส่วน Mg:Ca เป็น 0.5:1 และ 1:1 (ดังตารางที่

4.3) ดังนั้น MgO-CaO ที่มีอัตราส่วน Mg:Ca 2:1 จึงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม ในการนำไปเป็นตัวรองรับ(support) ทั้งสแตนออกไซด์ในการทดลองลำดับต่อไป

4.2.2. ผลของปริมาณทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

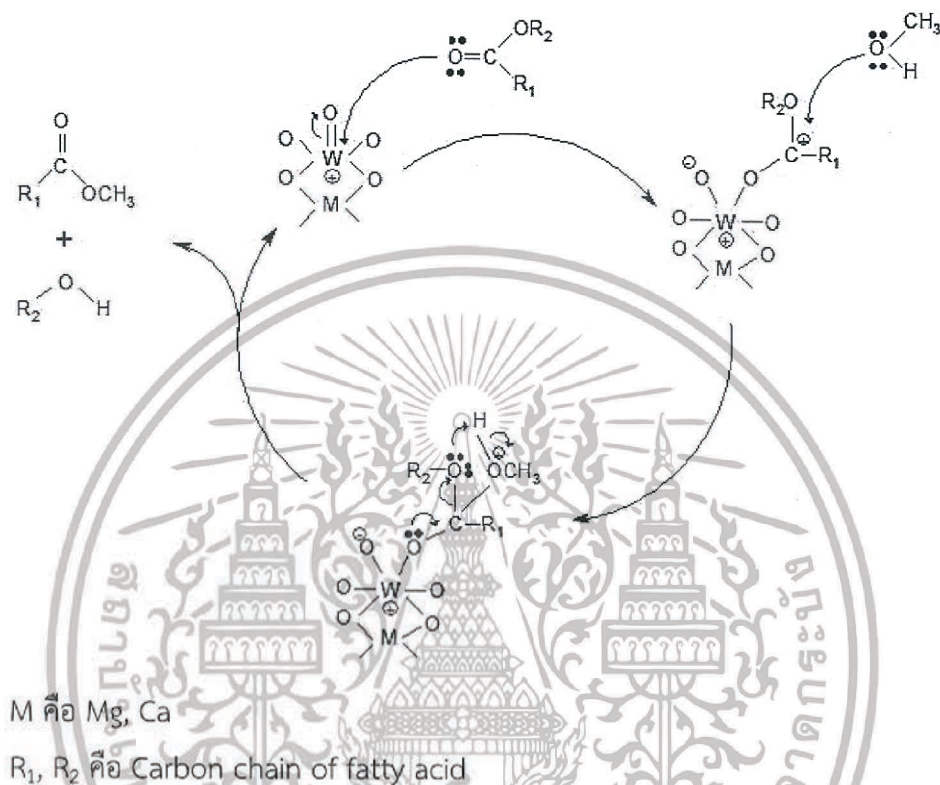
MgO-CaO ที่มีอัตราส่วน Mg:Ca เป็น 2:1 ถูกนำมาฝังเคลือบด้วย WO_3 ที่ปริมาณ 10 wt.% ถึง 50 wt.% จากนั้นนำไปเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 12:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา $70^{\circ}C$ และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.6 ผลของปริมาณทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

ชนิดของตัวรองรับ	ปริมาณของทั้งสแตนออกไซด์ (wt.%)	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}C$)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์
MgO – CaO (2:1)	10	12:1	2	2	70	65.75
	15					69.47
	20					75.35
	30					77.65
	40					81.28
	50					69.98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการเพิ่มปริมาณทั้งสแตนออกไซด์ลงบน MgO-CaO จาก 10wt.% เป็น 40wt.% พบว่า ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.11) เนื่องจาก WO_3 ที่อยู่บน MgO-CaO ทำหน้าที่เป็นหมู่ว่องไว (Active site) ซึ่งมีความเป็นกรดที่จะให้โมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์เข้าทำปฏิกิริยา ดังกลไกการเกิดปฏิกิริยาในรูปที่ 4.13

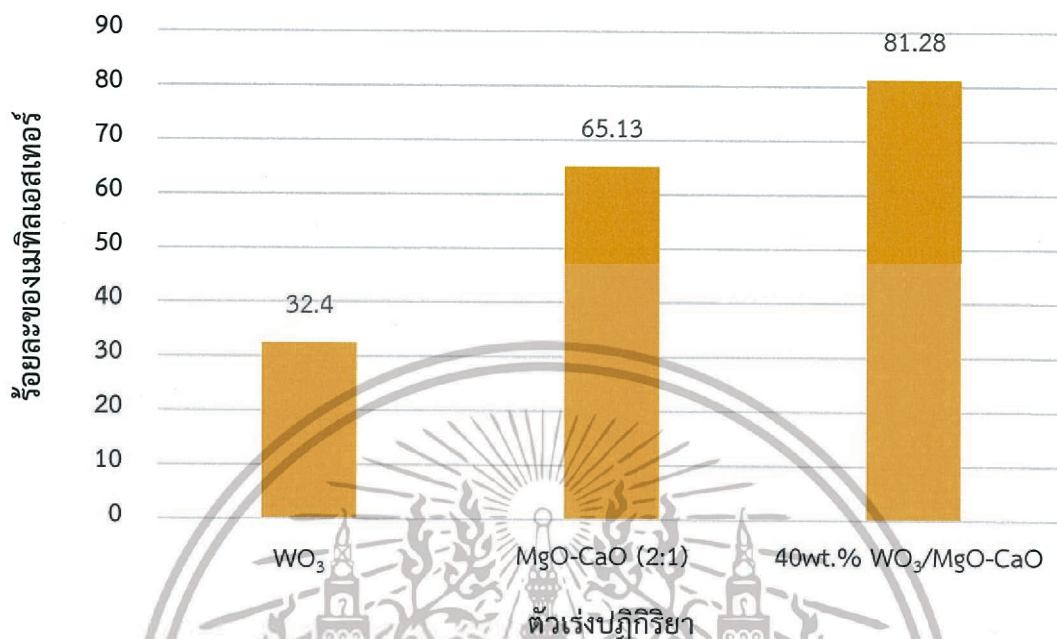


รูปที่ 4.13 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $WO_3/MgO-CaO$ [22]

เมื่อเพิ่มปริมาณ WO_3 บน MgO-CaO เป็น 50wt.% พบว่าร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ลดลงกว่าปริมาณ 40 wt.% ทั้งนี้เป็นผลมากจากการเติมปริมาณ WO_3 บน MgO-CaO มากเกินไป จึงเกิดการเกาะกลุ่มรวมกันเป็นก้อนเกิดการกระจายตัวไม่ดี ทำให้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเกิดขึ้นได้น้อยลง ดังนั้น $WO_3/MgO-CaO$ ที่มีปริมาณ WO_3 40wt.% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุดถึง 81.28 อย่างไรก็ตาม การเติม WO_3 บน MgO-CaO ในช่วงที่ศึกษาตั้งแต่ 10 wt.% ถึง 50 wt.% สามารถช่วยให้เมทิลเอสเทอร์เกิดในปริมาณที่มากขึ้นกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา MgO-CaO ที่ไม่มีการเติม WO_3

เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา $WO_3/MgO-CaO$ (2:1) และ 40wt.% $WO_3/MgO-CaO$ จึงได้ทำการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ในสภาวะเดียวกัน นั่นคือ ปริมาณตัวเร่ง

ปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 12:1 อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 70°C และเวลา 2 ชั่วโมง ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้แสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของ WO₃, MgO-CaO (2:1) และ 40wt.% WO₃/MgO-CaO

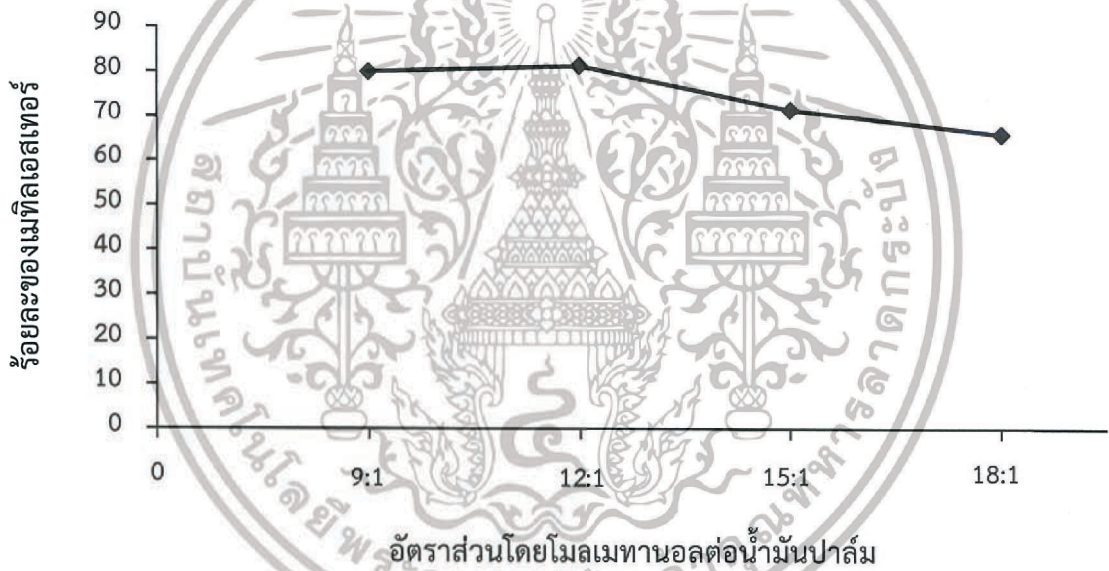
จากรูปที่ 4.14 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา WO₃, MgO-CaO (2:1) และ 40wt.% WO₃/MgO-CaO มีประสิทธิภาพในการให้เมทิลเอสเทอร์ได้ถึงร้อยละ 32.40 65.13 และ 81.28 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อนำ WO₃ มา impregnated บน MgO-CaO (2:1) จะสามารถเร่งปฏิกิริยาและให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ได้สูงขึ้นประมาณ 150.86 % ของ WO₃ และ 24.80 % ของ MgO-CaO (2:1) ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยา WO₃/MgO-CaO จึงมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันได้ดีกว่าการใช้ WO₃ หรือ MgO-CaO (2:1) เพียงอย่างเดียว

4.2.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

ในการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 40wt.% WO₃/MgO-CaO ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 70 °C ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้แสดง ดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.15

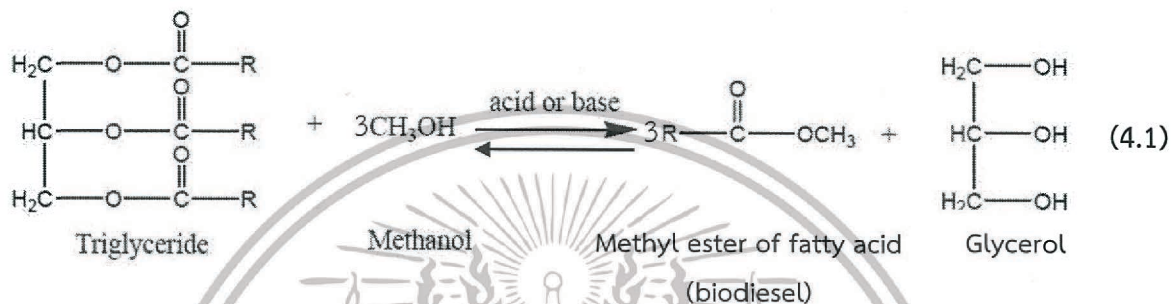
ตารางที่ 4.7 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้ 40wt.% $WO_3/MgO-CaO$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}C$)	ร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเทอร์
40wt.% $WO_3/MgO-CaO$	9:1	2	2	70	79.98
	12:1				81.28
	15:1				71.43
	18:1				65.89



รูปที่ 4.15 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 40wt.% $WO_3/MgO-CaO$

จากตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.15 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มจาก 9:1 เป็น 12:1 ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นจาก 79.98 เป็น 81.28 และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 15:1 และ 18:1 ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ลดลงเหลือ 71.43 และ 65.89 ตามลำดับ การเพิ่มปริมาณเมทานอลที่มากเกินไปจะสามารถทำให้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ เลื่อนไปด้านของผลิตภัณฑ์ จึงส่งผลให้ได้เมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นดังสมการที่ (4.1)



จากสมการที่ (4.1) จะเห็นได้ว่าจะต้องใช้เมทานอล 3 โมล ทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ 1 โมล เพื่อที่จะได้เมทิลเอสเทอร์ 3 โมล และกลีเซอรอล 1 โมล ซึ่งจากการทดลองพบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 12:1 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมทำให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงที่สุด อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มเมทานอลมากเกินไป (มากกว่า 12:1) พบว่าร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ลดลง ซึ่งอธิบายได้ว่า การเกิดเมทิลเอสเทอร์ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนย่อย เริ่มจาก triglyceride เปลี่ยนเป็น diglyceride ตามด้วยการเปลี่ยน diglyceride เป็น monoglyceride และขั้นสุดท้าย monoglyceride เปลี่ยนเป็น methyl ester (สมการที่ 4.2) การมีปริมาณเมทานอลที่มากเกินไปจะทำให้การเปลี่ยน triglyceride เป็น monoglyceride เกิดได้ดี แต่ monoglyceride สามารถละลายเข้ากับ glycerol ได้ และเป็นผลให้เกิดปฏิกิริยา glycerolysis ซึ่งปฏิกิริยา glycerolysis เกิดขึ้นระหว่าง methyl ester ที่เกิดจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันกับ glycerol ที่เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ เกิดเป็น monoglyceride ขึ้น ด้วยเหตุนี้ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 15:1 และ 18:1 จึงส่งผลให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ลดลง [23]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

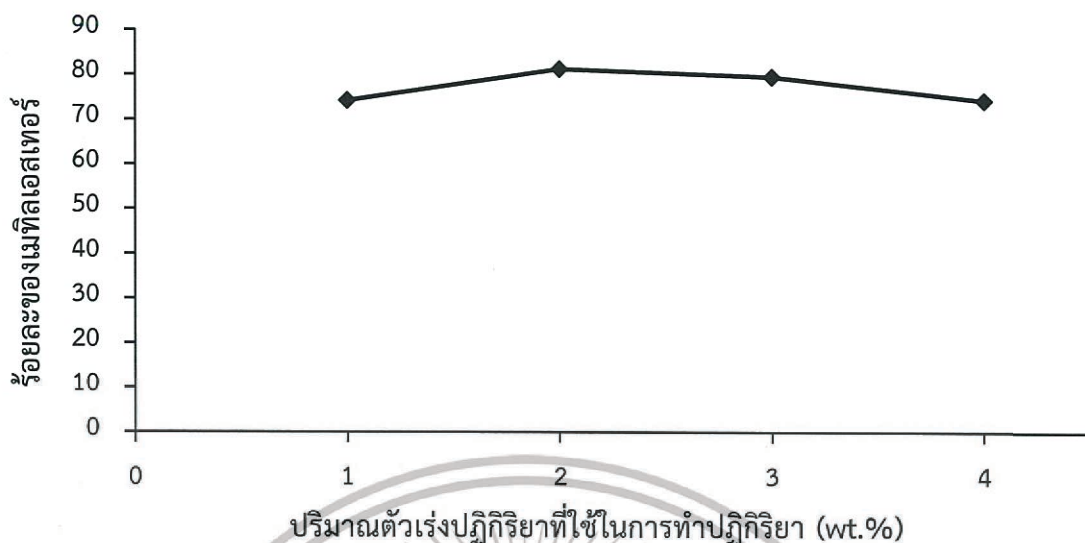
4.2.4 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

ในการศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 40wt.% $WO_3/MgO-CaO$ อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 12:1 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา $70^\circ C$ ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.16

ตารางที่ 4.8 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 40wt.% $WO_3/MgO-CaO$ ที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ($^\circ C$)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์
40wt.% $WO_3/MgO-CaO$	12:1	1	2	70	74.22
		2			81.28
		3			79.54
		4			74.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนด์บายและสแตนด์บายผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

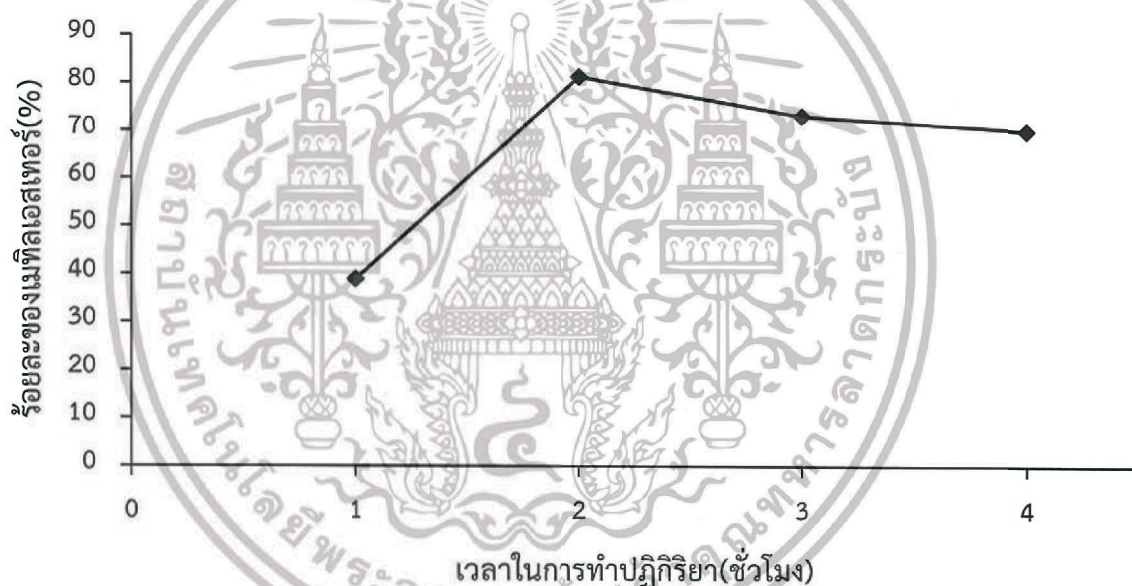
จากตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.16 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 1 wt.% เป็น 2 wt.% ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นจาก 74.22 เป็น 81.28 เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของการทำปฏิกิริยา ทำให้ปฏิกิริยาสามารถเกิดได้ดีขึ้น หลังจากเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 3 wt.% และ 4 wt.% พบว่าร้อยละของเมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มลดลงเป็น 79.54 และ 74.28 ตามลำดับ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากเกินไป อาจทำให้เกิดของผสมในปฏิกิริยามีลักษณะเหนียว ทำให้การแพร่ของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์เข้าไปยังตำแหน่งของ active site เป็นไปได้ยากขึ้นและตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณมากเกินไป อาจเกิดการเกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อนทำให้กระจายตัวในของผสมไม่ดี ดังนั้นปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันจึงเกิดได้ลดลง

4.2.5 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

จากการศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 40wt.% $WO_3/MgO-CaO$ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 12:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 70 °C ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.17

ตารางที่ 4.9 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ 40wt.% $WO_3/MgO-CaO$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	โมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}C$)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์
40wt.% $WO_3/MgO-CaO$	12 : 1	2	1	70	38.90
			2		81.28
			3		73.14
			4		70.72



รูปที่ 4.17 ผลของเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้ 40wt.% $WO_3/MgO-CaO$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

จากตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.17 พบว่าเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 2 ชั่วโมง ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 38.90 เป็น 81.28 อาจเป็นเพราะในระยะเวลา 1 ชั่วโมงเป็นเวลาที่ยังสั้นเกินไปทำให้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันยังเกิดได้ไม่สมบูรณ์ นอกจากนั้นยังพบว่าเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 3 และ 4 ชั่วโมง ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มที่ลดลงเป็น 73.14 และ 70.72 อาจเป็นผลมาจากการใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานเกินไป ทำให้เมทิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอสเทอร์ที่เกิดขึ้นเกิดผันกลับไปเป็นไตรกลีเซอไรด์ ส่งผลให้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ลดลง ดังนั้นเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่สุดคือ 2 ชั่วโมง ซึ่งได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงถึง 81.28

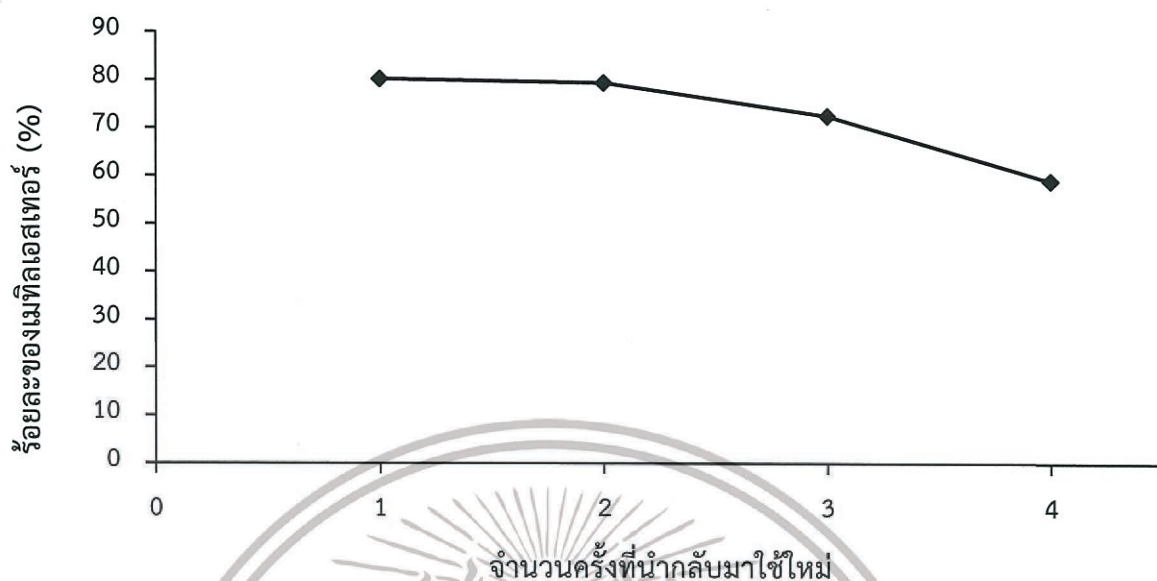
4.2.6 การศึกษาเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการนำกลับมาใช้ใหม่

เพื่อศึกษาถึงเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา $WO_3/MgO-CaO$ ในการนำกลับมาใช้ใหม่ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของร้อยละเมทิลเอสเทอร์ โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยา 40 wt.% $WO_3/MgO-CaO$ ที่ผ่านการทำปฏิกิริยาแล้ว นำไปล้างด้วยอะซิโตน อบให้แห้งที่อุณหภูมิ $150^\circ C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยาต่อไปเป็นจำนวน 4 ครั้ง ที่สภาวะเดียวกัน ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.18

ตารางที่ 4.10 ผลของจำนวนครั้งของการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	โมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ($^\circ C$)	จำนวนครั้งที่ทำปฏิกิริยา	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์
40wt.% $WO_3/MgO-CaO$	12:1	2	2	70	1	80.17
					2	79.37
					3	72.48
					4	58.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ผลของจำนวนครั้งในการนำตัวเร่งปฏิกิริยา 40wt.% $\text{WO}_3/\text{MgO}-\text{CaO}$ กลับมาใช้ใหม่ ที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

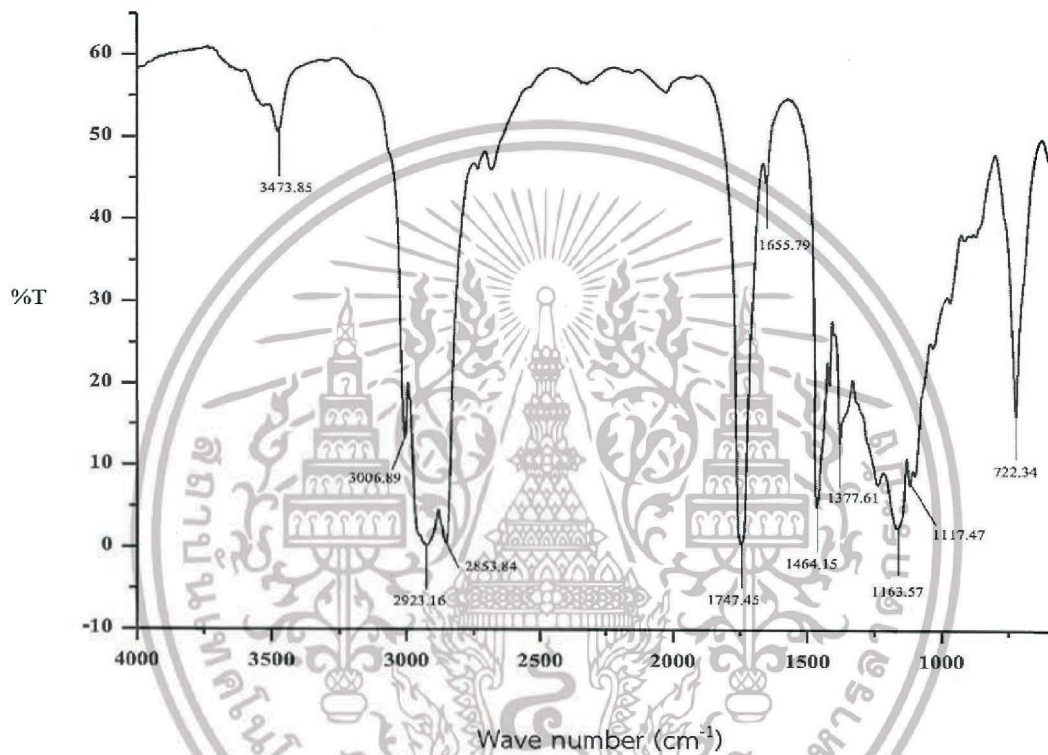
จากรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำเพิ่มขึ้นหลายๆ ครั้ง พบว่าร้อยละของเมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำกลับมาใช้ใหม่นั้นมีการอุดตันรูพรุนและบดบังพื้นผิวจากโมเลกุลสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์ จึงทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพลง (Deactivation) ส่งผลให้การเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดเมทิลเอสเทอร์ในปฏิกิริยาครั้งต่อ ๆ ไปลดลง

4.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์ทางกายภาพและเคมีของเมทิลเอสเทอร์

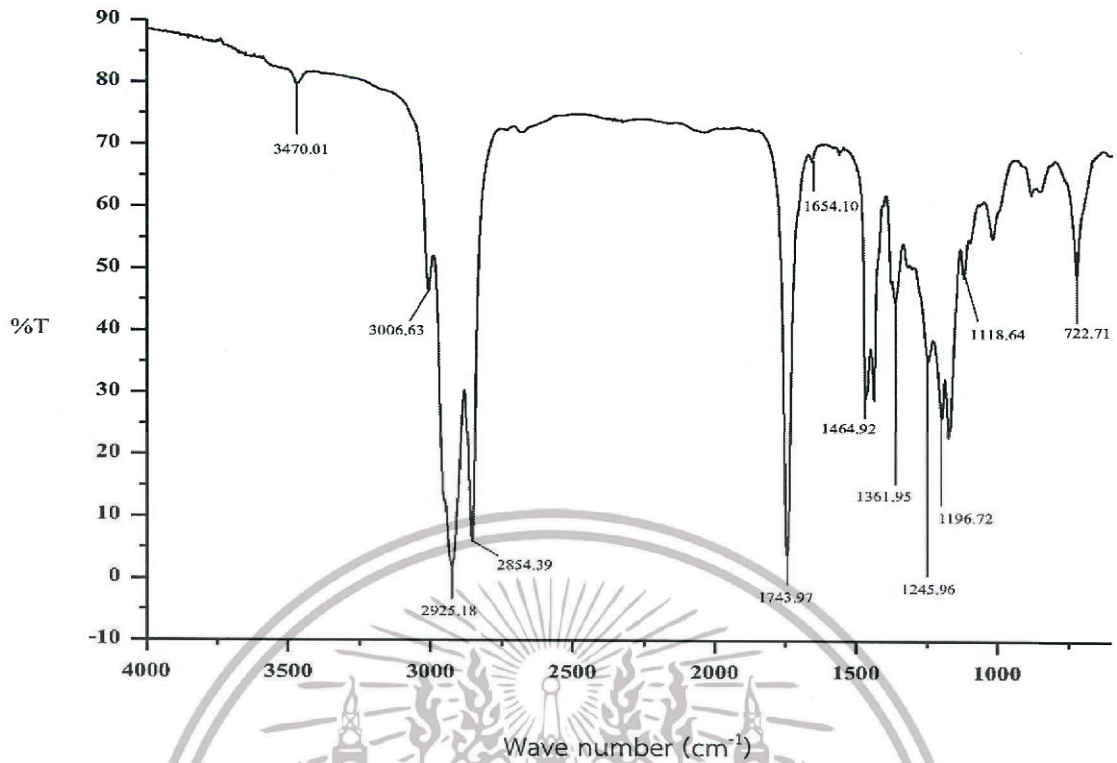
นำเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากสภาวะที่เหมาะสมเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแคลเซียมและแมกนีเซียม มาทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตเมทรี (FT-IR) เทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรโฟโตเมทรี (FT-NMR) รวมทั้งหาค่าความเป็นกรด เลขไอโอดีน และค่าความร้อน

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

น้ำมันปาล์มที่ผ่านการใช้แล้วและเมทิลเอสเทอร์ จะถูกนำมาตรวจวัดหมู่ฟังก์ชัน ด้วยเครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ดังรูปที่ 4.19-4.20 และทำการสรุปหมู่ฟังก์ชันที่เลขคลื่นต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.11



รูปที่ 4.19 FT-IR สเปกตรัมของน้ำมันปาล์มที่ผ่านการใช้แล้วจากเครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์



รูปที่ 4.20 FT-IR สเปกตรัมของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์ บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 12:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.11 แสดงหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันปาล์มใช้แล้วและเมทิลเอสเทอร์ที่การดูดกลืนแสงที่เลขคลื่นต่าง ๆ [29]

Absorption frequency (cm ⁻¹)	Factional group	Remarks
3100 – 3000	Alkene	Unsat C-H stretching
3000 – 2800	Alkane	Sat C-H stretching
~ 1740	Ester	Carbonyl ester
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

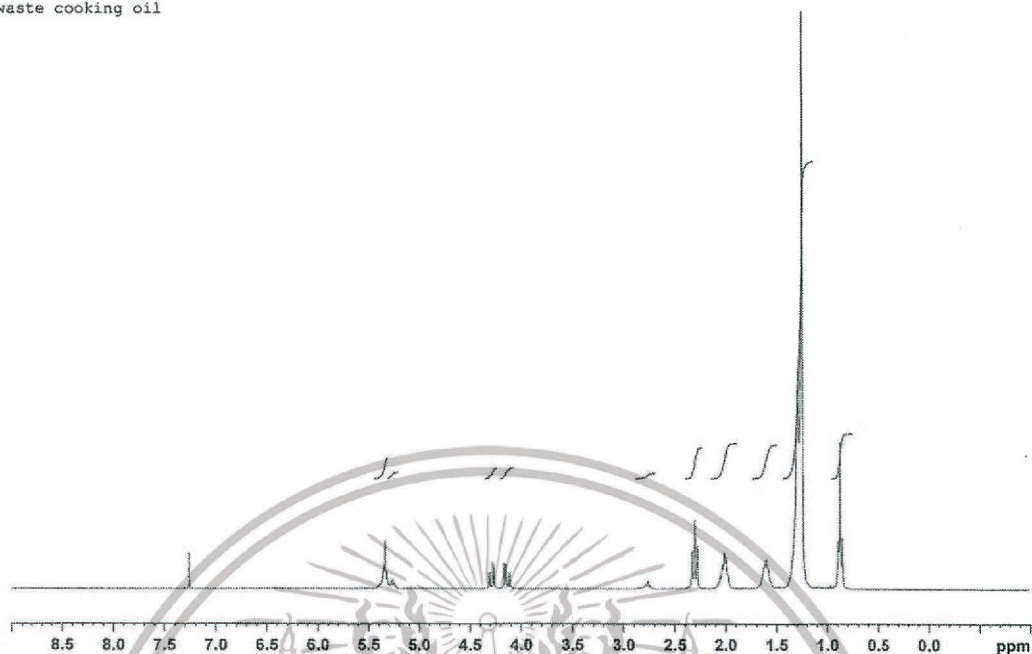
หมายเหตุ ที่ความถี่ 3470 – 3440 และ 2100 cm⁻¹ อาจเป็นสัญญาณที่มาจากความชื้นของ KBr

จากรูปที่ 4.19 และ 4.20 จะเห็นได้ว่าอินฟราเรดสเปกตรัมของน้ำมันปาล์มที่ผ่านการใช้แล้วและเมทิลเอสเทอร์มีลักษณะใกล้เคียงกัน เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกัน ดังสรุปไว้ในตารางที่ 4.11 เพื่อให้การวิเคราะห์มีความละเอียดและถูกต้องมากขึ้น น้ำมันปาล์มที่ผ่านการใช้แล้วและเมทิลเอสเทอร์จะถูกนำไปตรวจสอบด้วยเทคนิค FT-NMR ต่อไป

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

น้ำมันปาล์มที่ผ่านการใช้แล้วและเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 40wt.% WO₃/MgO-CaO จะถูกวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องฟูเรียร์-ทรานส์ฟอร์มนิวเคลียสแมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งแสดง FT-NMR สเปกตรัม ดังรูปที่ 4.21-4.22 ตามลำดับ

waste cooking oil

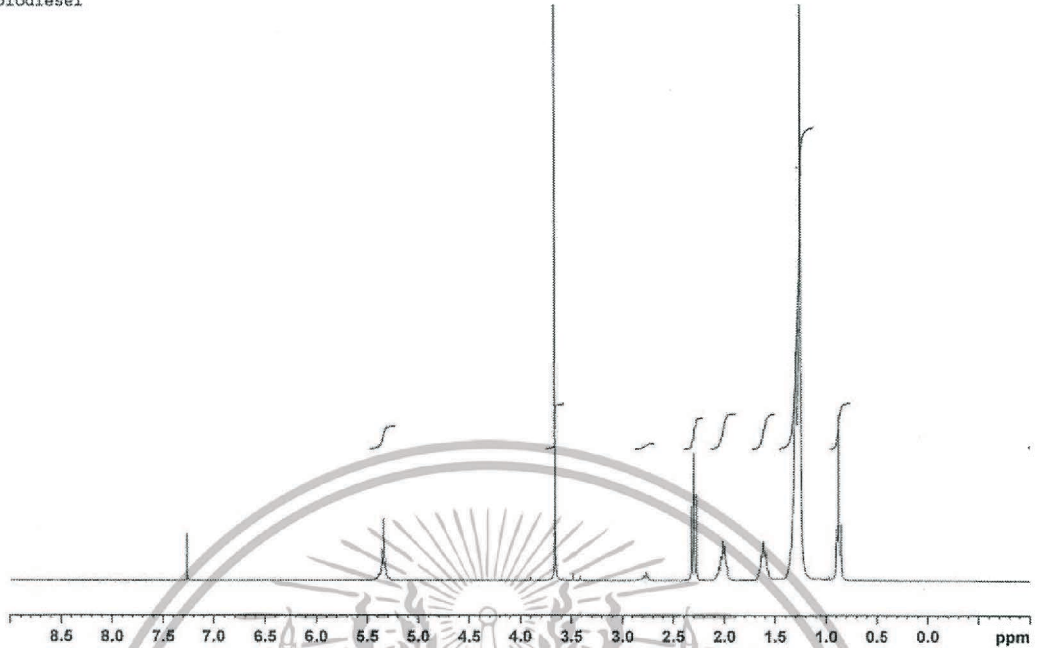


รูปที่ 4.21 FT-NMR สเปกตรัมของน้ำมันปาล์มที่ผ่านการใช้แล้วจากเครื่องนิวเคลียร์แมกเนติก เรโซแนนซ์สเปกโตรโทมิเตอร์

จากรูปที่ 4.21 แสดงถึง $^1\text{H-NMR}$ สเปกตรัมของเมทิลโปรตอน ($\text{CH}_3\text{-C-}$) และเมทิลีนโปรตอน ($\text{-C-CH}_2\text{-C-}$) ที่ $\delta 0.85\text{-}0.88$ และ $1.25\text{-}1.30$ ppm, สเปกตรัมของ $\text{-CH}_2\text{-C-COO-C-}$ ที่ $\delta 1.60\text{-}1.63$ ppm, สเปกตรัมของ $\text{-CH}_2\text{-C=C}$ ที่ $\delta 2.00\text{-}2.04$ ppm, สเปกตรัมของ $\text{-CH}_2\text{-COO-C-}$ ที่ $\delta 2.28\text{-}2.33$ ppm, สเปกตรัมของ $\text{-C=C-CH}_2\text{-C=C-}$ ที่ $\delta 2.77\text{-}2.80$ ppm, สเปกตรัมของ -CH-OOC-R และ $\text{-CH}_2\text{-OOC-R}$ ที่ $\delta 4.11\text{-}4.17$ และ $4.27\text{-}4.32$ ppm, สเปกตรัมของ -CH=CH- ที่ $\delta 5.26\text{-}5.35$ ppm [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

biodiesel



รูปที่ 4.22 FT-NMR สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 40wt.% $\text{WO}_3/\text{MgO}-\text{CaO}$ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 12:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง

จาก $^1\text{H-NMR}$ สเปกตรัมของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์จากน้ำมันปาล์มที่ผ่านการใช้แล้วกับเมทานอล โดยใช้ 40wt.% $\text{WO}_3/\text{MgO}-\text{CaO}$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบพีคของ olefinic protons ($-\text{CH}=\text{CH}-$) ที่ $\delta 5.31-5.36$ ppm พีคที่เป็นสัญญาณแบบ singlet ของ methoxy protons ของ ester ที่ $\delta 3.60-3.74$ ppm พีคของ bis-allylic proton of polyunsaturated fatty acid (เช่น linoleic acid) ที่ $\delta 2.8$ ppm พีคที่เป็นสัญญาณแบบ triplet ที่ $\delta 2.3$ 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 $\delta 1.99-2.05$ ppm พีคของ β -methylene protons to ester ($-\text{CH}_2-\text{C}-\text{CO}_2\text{ME}$) ปรากฏที่ $\delta 1.59-1.63$ ppm พีคที่ $\delta 1.24-1.30$ ppm แสดงถึง protons ของ backbone methylenes of long fatty acid chain และ terminal methyl protons ($\text{C}-\text{CH}_3$) ที่ $\delta 0.85-0.88$ ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปรียบเทียบรูปที่ 4.21 และ 4.22 พบว่าตำแหน่งโปรตอนของ CH-OOC-R และ $-\text{CH}_2-\text{OOC-R}$ ในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ที่ $\delta 4.11-4.17$ และ $4.27-4.32$ ppm หายไป เกิดเป็นตำแหน่งโปรตอนของ methoxy protons ของหมู่ ester (R-COO-CH_3) ในโมเลกุลของเมทิลเอสเทอร์ขึ้นมาแทนที่ที่ $\delta 3.60-3.74$ ppm แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์จากการสังเคราะห์เป็นเมทิลเอสเทอร์จริง [30]

4.3.3 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (Acid value) เลขไอโอดีน (Iodine value) และค่าความร้อนของเมทิลเอสเทอร์

เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์จากสภาวะต่างๆ ของปฏิกิริยา จะถูกนำมาทดสอบค่าความเป็นกรด เลขไอโอดีน และค่าความร้อน ซึ่งผลที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่กฎหมายกำหนด

ตารางที่ 4.12 ค่าความเป็นกรด เลขไอโอดีน และค่าความร้อนของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยา MgO-CaO ที่อัตราส่วนโดยโมล Mg:Ca แตกต่างกัน

ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิ (°C)	อัตราส่วนเมทานอลต่อ น้ำมัน	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ค่าความเป็นกรด (mg KOH/g)	เลขไอโอดีน (g Iodine /100g)	ค่าความร้อน (J/g)
MgO-CaO (0.5:1)	70	12:1	2	2	0.3241	19.6551	38867
MgO-CaO (1:1)					0.1904	17.4171	39115
MgO-CaO (2:1)					0.2257	16.0986	39850

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 ค่าความเป็นกรด เลขไอโอดีน และค่าความร้อนของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จาก ตัวเร่งปฏิกิริยา 20wt.% $WO_3/MgO-CaO$ และ 40wt.% $WO_3/MgO-CaO$ ที่สภาวะต่าง ๆ

ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา	อัตราส่วน เมทานอล ต่อน้ำมัน	ปริมาณ ตัวเร่ง ปฏิกิริยา (wt.%)	เวลาที่ใช้ ในการทำ ปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ค่าความ เป็นกรด (mg KOH/g)	เลข ไอโอดีน (g Iodine /100g)	ค่าความ ร้อน (J/g)
20wt.% $WO_3/MgO-CaO$	12:1	2	2	0.2128	14.7653	37990
40wt.% $WO_3/MgO-CaO$	12:1	2	1	0.2102	10.2973	38075
40wt.% $WO_3/MgO-CaO$	12:1	2	2	0.2011	14.5143	39398
40wt.% $WO_3/MgO-CaO$	12:1	1	2	0.2236	10.2973	38691
40wt.% $WO_3/MgO-CaO$	18:1	2	2	0.3563	2.4694	38573

ตารางที่ 4.14 ค่าความเป็นกรด เลขไอโอดีน และค่าความร้อนของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จาก ตัวเร่งปฏิกิริยา 40wt.% $WO_3/MgO-CaO$ ที่จำนวนครั้งที่ทำปฏิกิริยาต่างกัน

ชนิดตัวเร่ง ปฏิกิริยา	อุณหภูมิ (°C)	อัตราส่วน เมทานอล ต่อน้ำมัน	ปริมาณ ตัวเร่ง ปฏิกิริยา (wt.%)	เวลาที่ใช้ ในการทำ ปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	จำนวน ครั้งที่ทำ ปฏิกิริยา	ค่าความ เป็นกรด (mg KOH/g)	เลข ไอโอดีน (g Iodine /100g)	ค่าความ ร้อน (J/g)
40wt.% $WO_3/MgO-CaO$	70	12:1	2	2	1	0.2011	18.2498	38195
					3	0.2546	17.9329	39402

ตามเกณฑ์มาตรฐานของไบโอดีเซลตามที่กฎหมายกำหนด ค่าความเป็นกรดต้องไม่เกิน 0.5 mg KOH/g เลขไอโอดีนต้องไม่เกิน 120 กรัมไอโอดีน/100 กรัม และค่าความร้อนอยู่ในช่วง 37520-40160 J/g จากผลการวิเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ จากตารางที่ 4.12-4.14 มีค่าความเป็นกรดในช่วง 0.1904-0.3241 mg KOH/g ค่าไอโอดีนในช่วง 2.4694-19.6551 g Iodine/100g และค่าความร้อนของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้อยู่ในช่วง 37990-39402 J/g ซึ่งพบว่าค่าความเป็นกรด ค่าไอโอดีน และค่าความร้อนของเมทิลเอสเทอร์อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานไบโอดีเซล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยใช้ทั้งสเดนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม ($\text{WO}_3/\text{MgO}-\text{CaO}$) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีเอ็บซุ่ม จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ติดตั้งร่วมกับเครื่องเอกซเรย์สเปกโตรสโคปแบบกระจายพลังงาน (SEM/EDX) พูรีयरทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR) เอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (XRF) พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิค BET และหาความแรงและปริมาณความเป็นกรดเบสด้วยโปรแกรมอนุกรมเพื่อทดสอบการคายซับ (TPD) จากการทดลองสรุปได้ว่า

1. จากการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของ Mg ต่อ Ca ของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{MgO}-\text{CaO}$ ที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ พบว่า $\text{MgO}-\text{CaO}$ ที่มีอัตราส่วน Mg: Ca เป็น 2:1 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงกว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของ Mg ต่อ Ca อื่น ๆ

2. เมื่อเติมทั้งสเดนลงบนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมด้วยโซเดียมทั้งสเตดีไฮเดรตที่ปริมาณ 10 15 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า 40wt.% $\text{WO}_3/\text{MgO}-\text{CaO}$ ให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงกว่าที่ปริมาณอื่น

3. สำหรับการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มใช้แล้ว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสเดนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้ว คือ ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 40wt.% $\text{WO}_3/\text{MgO}-\text{CaO}$ ในปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มใช้แล้ว 12:1 เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก และดำเนินปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 70°C ซึ่งได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุดถึง 81.28

4. เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสเดนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมที่ผ่านการทำปฏิกิริยาแล้วกลับมาใช้ใหม่ พบว่ามีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาที่ลดลง

5. จากการทดสอบคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ พบว่ามีค่าความเอ็กส เป็นกรด เลขไอโอดีนและค่าความร้อน อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรม ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมที่เตรียมได้หลังจากนำไปเผาแล้ว ควรเก็บรักษาในสภาวะที่ปราศจากความชื้น เนื่องจากการรวมตัวของตัวเร่งปฏิกิริยากับความชื้น จะส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสูญเสียความว่องไวในการทำปฏิกิริยา

2. คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน ได้แก่ เลขโอโอดีน และค่าความร้อน อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ควรทำการทดสอบสมบัติอื่นตามมาตรฐานอุตสาหกรรม เพื่อทดสอบก่อนการนำไปใช้งานกับเครื่องยนต์ดีเซล เช่น จุดวาบไฟ จุดไหลเท และความหนืด

3. ตัวรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยาควรเลือกใช้ที่มีพื้นที่ผิวและความเป็นเบสสูง ดังนั้นอาจใช้ตัวรองรับอื่น ๆ เช่น เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ของแมกนีเซียมและอะลูมิเนียม (MgAl-layer double hydroxide) เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นชั้นและมีพื้นที่ผิวสูง



เอกสารอ้างอิง

- [1] Mansir, N., Taufiq-Yap, Y.H., Rashid U., Lokmn, I.M. Investigation of heterogeneous solid acid catalyst performance on low grade feedstocks for biodiesel production: A review. Energy Conversion and Management. 6 (2016) 100-115.
- [2] สุภกร บุญยืน, สมรักษ์ เรืองสุทธีธินฤภาพ, ยุภา อำนวยภานิช, ทศนีย์ ทัทกรี. ตัวเร่งปฏิกิริยาวิริธภัณฑ์สำหรับไบโอดีเซลน้ำมันปาล์มและน้ำมันใช้แล้ว,วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 17 ฉบับที่ 4 ต.ค. - ธ.ค. 52
- [3] vcharkarn. เชื้อเพลิงชีวภาพ(Biofuel):พลังงานจากธรรมชาติเพื่อธรรมชาติ.... [Online].Available: <http://www.vcharkarn.com/varticle/374>
- [4] Datta, A., Mandal, B.K. A comprehensive review of biodiesel as an alternative fuel for compression ignition engine. Renewable and Sustainable Energy Reviews 57 (2016) 799-821.
- [5] Siambioenergy.ทำไมต้องใช้ไบโอดีเซล.[Online].Available: <http://www.siambioenergy.com/bio65/index.php>
- [6] Xie, W., Wang, T. Biodiesel production from soybean oil transesterification using tin oxide-supported WO_3 catalysts. Fuel Processing Technology 109 (2013) 150-155.
- [7] Kandis, S., Surachet, S., Supaphorn, P., Anusorn, S., Jumras L. Biodiesel Production from Jatropha Curcas oil using strontium-doped CaO/MgO catalyst. Journal of Environmental Chemical Engineering 5 (2017) 2845-2852.
- [8] Nasar, M., Siow, H.T. M, L.I., Taufiq-Yap, Y.H. Synthesis and application of waste egg shell derived CaO supported W-Mo mixed oxide catalysts for FAME production from waste cooking oil: Effect of stoichiometry. Energy Conversation and Management 151 (2017) 216-226.
- [9] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ .ไบโอดีเซลคืออะไร. [Online].Available: <http://www.biodiesel.eng.psu.ac.th/whatis.php>
- [10] Siam bioenergy .ไบโอดีเซล.[Online].Available: <http://www.siambioenergy.com/bio/65index.php>
- [11] พชร พงษ์ไพบูลย์, สาวิตรี อ่อนก้านเหลือง, วาสนา จันทร, วิชุดา ขามสันเทียะ และ มนัส พิลา. ผลกระทบของไบโอดีเซลที่มีต่อเครื่องยนต์. [Online].Available:

- [12] cpiagrotech. ไบโอดีเซล : จากปาล์มน้ำมันสุ้น้ำมันเชื้อเพลิง. [Online].Available: <http://www.cpiagrotech.com/knowledge-020/>
- [13] N. pipatpaiboon. ไบโอดีเซลชุมชน.[Online].Available: http://biodieselchumchon.blogspot.com/2008/08/blog-post_2292.html
- [14] คมสัน หุตะแพทย์ .กำพล กาหลง และณัฐภูมิ สุดแก้ว ,สุัทศนา กำเนิดทอง ,2550 .ทำไบโอดีเซลใช้เอง .กรุงเทพฯ.สำนักพิมพ์เกษตรกรรมธรรมชาติ.5-32.
- [15] ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน. ความรู้เกี่ยวกับไบโอดีเซล.[Online].Available: <http://www.biodiesel.rdi.ku.ac.th/index.php>
- [16] ฐิติพรรณ นิมสุข .2556.ตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม.[Online].Available: http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/t_chimsook
- [17] จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษณานุรักษ์ .2547 .การเร่งปฏิกิริยาพื้นฐานการประยุกต์. กรุงเทพฯ.โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [18] Magnesium Oxide. [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/magnesium_oxide
- [19] Calcium Oxide. [Online]. Available: <http://www.chatuchak.com/listings/services/>
- [20] Tungsten trioxide. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Tungsten_trioxide#cite_note-merck-3
- [21] Monica, C.G.A., Daina, C.S.A., Celio, L., Cavalcante, J., Jose, S.G. Josefa, M.M.R., Ramon, M.T., Enrique, R.C., Antonio, J.L., Pedro, M.T. Transesterification of ethyl butyrate with methanol using MgO/CaO catalyst. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical 300 (2009) 19-24.
- [22] Xie, W., Wang, T. Biodiesel production from soybean oil transesterification using tin oxide-supported WO₃ catalysts. Fuel Processing Technology 109 (2013) 150-155.
- [23] 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.
- [24] Zhenzhong, W., Xinhai, Y., Shan, T.T., Jinyue, Y. and Erik, D. Synthesis of biodiesel from vegetable oil with methanol catalyzed by Li-doped magnesium oxide catalysts. Applied Energy, 87 (2010) 743-748.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

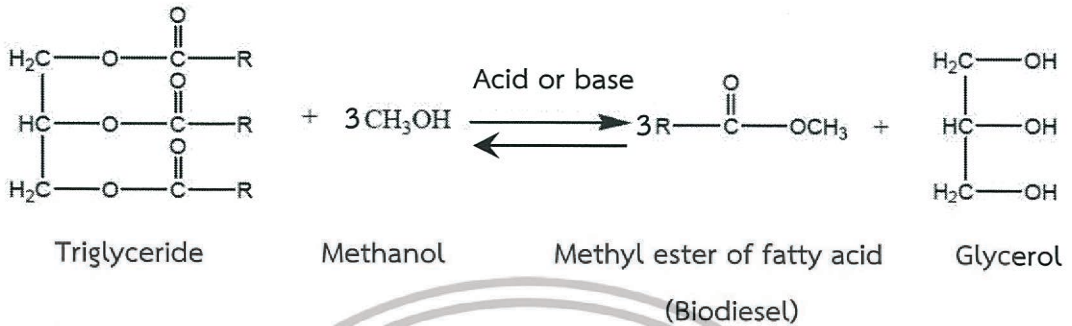
- [25] Sasiprapha Kaewdaeng, Panlop Sintuya, and Rotjapun Nirunsin. **Biodiesel production using calcium oxide from river snail shell ash catalyst.** Energy Procedia 138 (2017) 937-942.
- [26] Antonio, J. L, Ignacio, J.M, Jose, S.G., Pedro, M.T. **Biodiesel production from sunflower oil by tungsten oxide supported on zirconium doped MCM-41 silica.** Journal of Molecular Catalysis A: Chemical 335 (2011) 205-209.
- [27] Yahaya, M.S., Wan Mohd, A.W.D, Abdul Aziz, A.R. **Activity of solid acid catalysts for biodiesel production: A critical review.** Applied Catalysis A: General 470 (2014) 140-161.
- [28] Mingming, F., Yanlei, L., Pingbo, Z., Pingping, J. **Blocky shapes Ca-Mg mixed oxides as a water-resistant catalyst for effective synthesis of biodiesel by transesterification.** Fuel Processing Technology 149 (2016) 163-168.
- [29] **Infrared Spectopy differences between biodiesel prepare from rapeseed and the edible rapeseed oil.** [Online]. Available: <http://shimadzu.hr/sites/default/files/Infrared%20Spectroscopy%20differences%20rapased%20oil.pdf>
- [30] **NMR analysis.** [Online]. Available: <http://www.rsc.org/suppdata/c5/ra/c5ra19575f/c5ra19575f1.pdf>.
- [31] K. Jothivenkatachalam, S. Prabhu, A. Nithya, and K. Jeganathan. **Facile synthesis of WO₃ with reduced particle size on zeolite and enhanced photocatalytic activity.** RSC Advances 41 (2014) 21221-21229.
- [32] Kriangsak Ketpang, MinsunKim, SoonhyunKim, SangarajuShanmugam. **High performance catalyst for electrochemical hydrogen evolution reaction based on SiO₂/WO_{3-x} nanofacets.** International Journal of Hydrogen Energy 38 (2013) 9732-9740.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

1. การคำนวณหาร้อยละของเมทิลเอสเทอร์จากการชั่งน้ำหนัก



จากสมการแสดงปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน ต้องใช้ 3 โมลของเมทานอลและ 1 โมลของไตรกลีเซอไรด์ เพื่อที่จะได้ 3 โมลของเมทิลเอสเทอร์กับ 1 โมลของกลีเซอรอล ดังนั้นร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ (%yield) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (ก-1)

$$\text{ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์} = \frac{\text{น้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้}}{\text{น้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์ตามทฤษฎี}} \times 100 \quad (\text{ก-1})$$

ตัวอย่างการคำนวณ

ที่สภาวะการสังเคราะห์ไบโอดีเซล ใช้น้ำมันพืช 100.04 กรัม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 40wt% $\text{WO}_3/\text{MgO}-\text{CaO}$ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา คือ 2% โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 12:1 และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง พบว่า น้ำหนักของไบโอดีเซลมีค่าเท่ากับ 81.38 กรัม

ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ หาได้จาก

$$\text{น้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์ตามทฤษฎี} = 100.04 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้} = 81.38 \text{ กรัม}$$

$$\text{ดังนั้น ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (\%yield)} = (81.38 / 100.04) \times 100 = 81.28 \%$$

ภาคผนวก ข.

การคำนวณหาขนาดผลึกของออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม (MgO-CaO)

สามารถคำนวณหาขนาดผลึกของออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม จะใช้สูตรในการคำนวณจากสมการของเชอร์เรอร์ (Scherrer equation) ดังแสดงในสมการที่ (ข-1)

$$\text{สูตร} \quad D = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (\text{ข-1})$$

โดยที่

D คือ ขนาดของผลึก

K คือ ค่าคงที่ของเชอร์เรอร์ มีค่าเท่ากับ 0.94

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ มีค่าเท่ากับ 1.5406 อังสตรอม

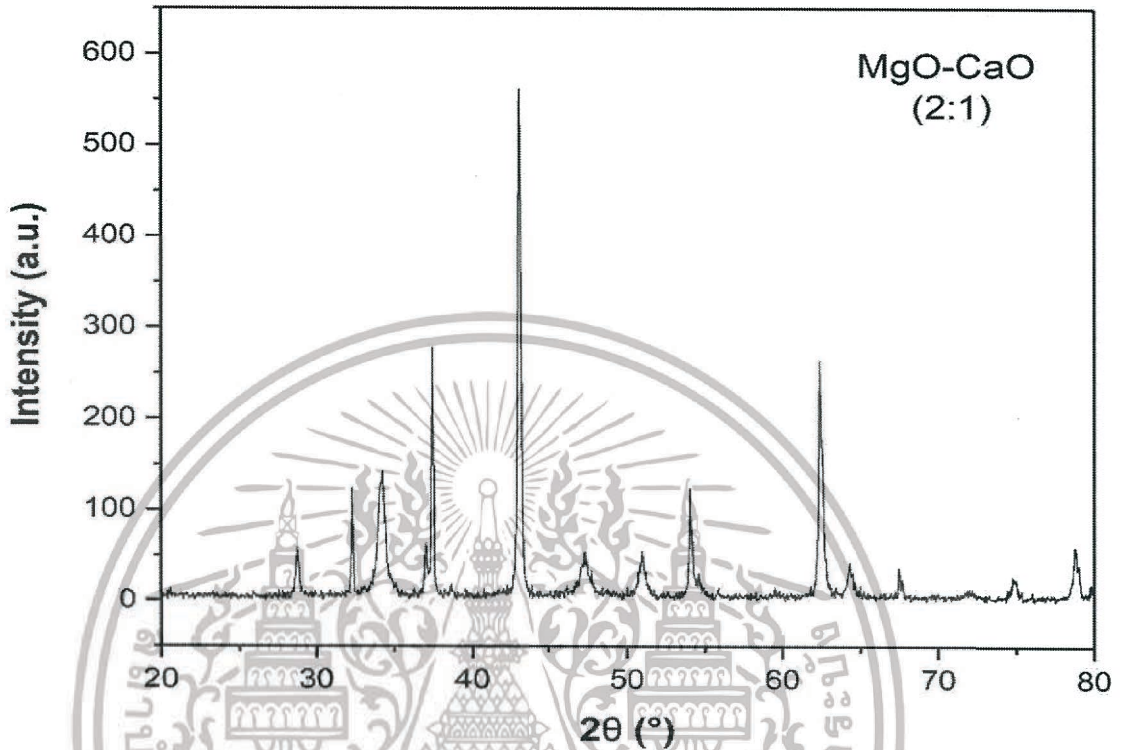
β คือ ค่าความกว้างที่ความสูงครึ่งหนึ่งของพีค (Full Width at Half Maximum, FWHM) ของพีคในมุมเรเดียนที่ 2θ
(หน่วย : เรเดียน, rad)

θ คือ มุมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (หน่วย : องศา)

ตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณหาขนาดผลึกของออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม (MgO-CaO)

อัตราส่วน 2:1 ที่สังเคราะห์ได้



รูปที่ ข.1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม (MgO-CaO) อัตราส่วน 2:1

จากพีคที่สูงที่สุดของรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่า ที่มุม $2\theta = 43.00^\circ$ จะได้ $\theta = 21.50^\circ$

โดย ค่าความกว้างที่ความสูงครึ่งหนึ่งของพีค (FWHM) มีค่าเท่ากับ 0.07913°

และจากมุม 180° มีค่าเท่ากับ π (rad)

ถ้าหากมุม 0.07913° จะมีค่าเท่ากับ $\frac{\pi \text{ (rad)} \times 0.07913^\circ}{180^\circ} = 0.001381 \text{ rad}$

จากสมการของเซอร์เรอร์

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta}$$

$$D = \frac{0.94 \times 1.5406 \text{ \AA}}{0.001381(\text{rad}) \times \cos(21.50^\circ)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D = 1126.7044 \text{ \AA}$$

$$D = 112.67 \text{ nm}$$

ดังนั้น ขนาดผลึกของออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมมีค่าเท่ากับ 112.67 นาโนเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

1. ตารางบันทึกผลร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ในสภาวะต่าง ๆ

ตารางที่ ค.1 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของ Mg ต่อ Ca ของตัวเร่งปฏิกิริยา MgO-CaO ที่มีต่อ ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

ชนิดของ ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	อัตราส่วน โดย โมลของ Mg : Ca	อัตราส่วน โดย โมลของ เมทานอล ต่อน้ำมัน	ปริมาณ ตัวเร่ง ปฏิกิริยา (wt.%)	เวลาใน การทำ ปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ ในการทำ ปฏิกิริยา (°C)	น้ำหนัก น้ำมันที่ซัง ได้ (g)	น้ำหนัก เมทิล เอสเทอร์ ที่ซังได้ (g)	ร้อยละ ของเมทิล เอสเทอร์
MgO- CaO	0.5:1	12:1	2	2	70	100.02	54.96	54.95
	1:1	12:1	2	2	70	100.04	59.84	59.82
	2:1	12:1	2	2	70	100.00	65.13	65.13

ตารางที่ ค.2 ผลของปริมาณทั้งสเดนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียมที่มีผลต่อ ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

ชนิดของ ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	ปริมาณ ของ ทั้งสเดน ออกไซด์ (wt.%)	อัตราส่วน โดย โมลของ เมทานอล ต่อน้ำมัน	ปริมาณ ตัวเร่ง ปฏิกิริยา (wt.%)	เวลาใน การทำ ปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ ในการทำ ปฏิกิริยา (°C)	น้ำหนัก น้ำมันที่ซัง ได้ (g)	น้ำหนัก เมทิล เอสเทอร์ ที่ซังได้ (g)	ร้อยละ ของเมทิล เอสเทอร์
MgO-CaO (2:1)	10	12:1	2	2	70	100.06	65.79	65.75
	15	12:1	2	2	70	100.00	69.47	69.47
	20	12:1	2	2	70	100.02	75.37	75.35
	30	12:1	2	2	70	100.05	77.69	77.65
	40	12:1	2	2	70	100.04	81.31	81.28
	50	12:1	2	2	70	100.04	70.01	69.98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์
เมื่อใช้ 40wt.% $WO_3/MgO-CaO$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดของ ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	อัตราส่วน โดย โมลของ เมทานอล ต่อน้ำมัน	ปริมาณ ตัวเร่ง ปฏิกิริยา (wt.%)	เวลาใน การทำ ปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ ในการทำ ปฏิกิริยา (°C)	น้ำหนัก น้ำมันที่ ซังได้ (g)	น้ำหนัก เมทิล เอสเทอร์ ที่ซังได้ (g)	ร้อยละ ของเมทิล เอสเทอร์
40wt.% $WO_3/MgO-$ CaO	9:1	2	2	70	100.08	80.04	79.98
	12:1	2	2	70	100.01	81.29	81.28
	15:1	2	2	70	100.03	71.45	71.43
	18:1	2	2	70	100.06	65.93	65.89

ตารางที่ ค.4 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 40wt.% $WO_3/MgO-CaO$ ที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

ชนิดของ ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	อัตราส่วน โดย โมลของเม ทานอล ต่อน้ำมัน	ปริมาณ ตัวเร่ง ปฏิกิริยา (wt.%)	เวลาใน การทำ ปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ ในการทำ ปฏิกิริยา (°C)	น้ำหนัก น้ำมันที่ ซังได้ (g)	น้ำหนัก เมทิล เอสเทอร์ ที่ซังได้ (g)	ร้อยละ ของเมทิล เอสเทอร์
40wt.% $WO_3/MgO-$ CaO	12:1	1	2	70	100.00	74.22	74.22
	12:1	2	2	70	100.03	81.30	81.28
	12:1	3	2	70	100.02	79.56	79.54
	12:1	4	2	70	100.02	74.29	74.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.5 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ 40wt.% $WO_3/MgO-CaO$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	โมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}C$)	น้ำหนักน้ำมันที่ซั่งได้ (g)	น้ำหนักเมทิลเอสเทอร์ที่ซั่งได้ (g)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์
40wt.% $WO_3/MgO-CaO$	12:1	2	1	70	100.05	38.92	38.90
	12:1	2	2	70	100.07	81.34	81.28
	12:1	2	3	70	100.03	73.16	73.14
	12:1	2	4	70	100.04	70.75	70.72

ตารางที่ ค.6 ผลของจำนวนครั้งของการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	โมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}C$)	จำนวนครั้งที่ทำปฏิกิริยา	น้ำหนักน้ำมันที่ซั่งได้ (g)	น้ำหนักเมทิลเอสเทอร์ที่ซั่งได้ (g)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์
40wt.% $WO_3/MgO-CaO$	12:1	2	2	70	1	100.01	80.18	80.17
	12:1	2	2	70	2	100.02	79.39	79.37
	12:1	2	2	70	3	100.02	72.49	72.48
	12:1	2	2	70	4	100.00	58.96	58.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

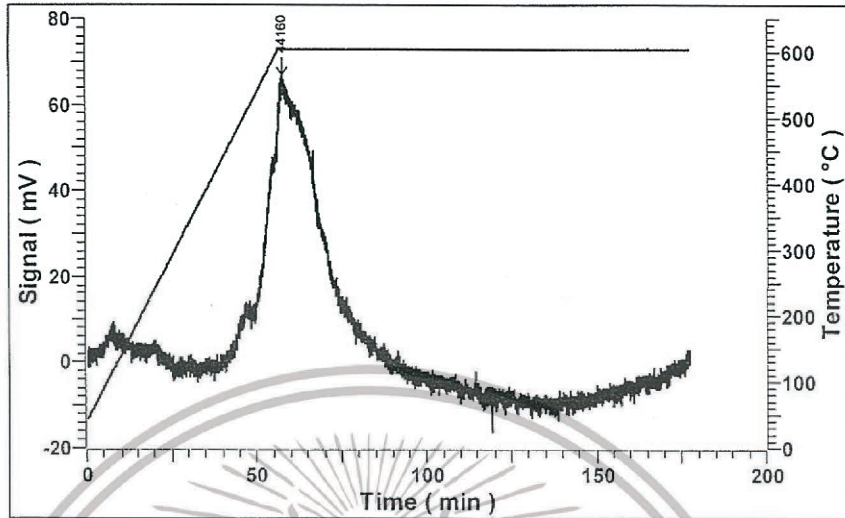
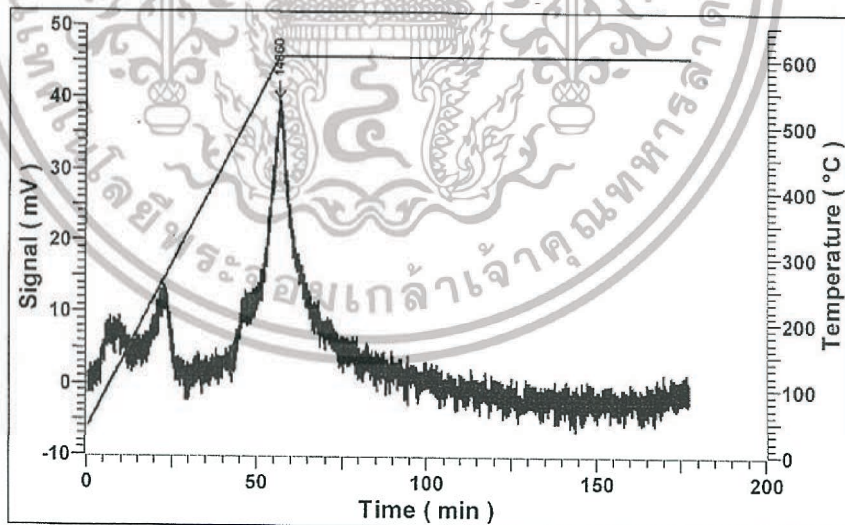
2.ตารางแสดงเกณฑ์มาตรฐานต่าง ๆ ตามที่กฎหมายกำหนดของไบโอดีเซล

ตารางที่ ค.7 เกณฑ์มาตรฐานของไบโอดีเซล

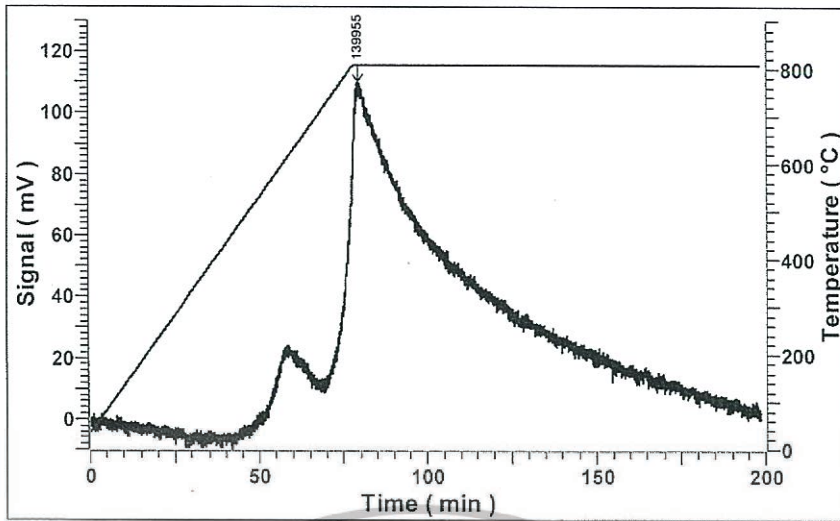
ลำดับที่	ข้อกำหนด		อัตราสูงต่ำ		วิธีทดสอบ
1	เมทิลเอสเทอร์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่ต่ำกว่า	96.5	EN 14103
2	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	กิโลกรัมลูกบาศก์/เมตร	ไม่ต่ำกว่าและ ไม่สูงกว่า	860-900	ASTM D 1298
3	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	เซนติสโตกส์	ไม่ต่ำกว่าและ ไม่สูงกว่า	3.5-5.0	ASTN D 445
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	เถ้าซิลเฟต	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	โมนอกรีเซอไรด์	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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

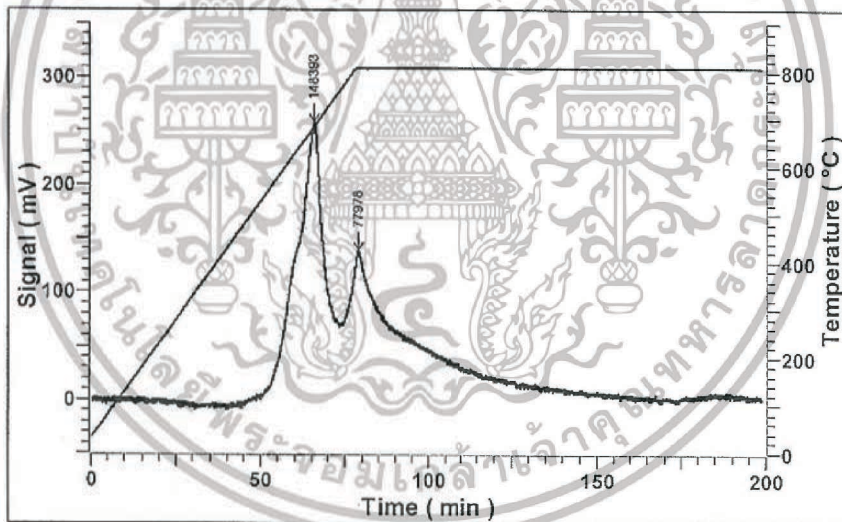
ภาคผนวก ง.

รูปที่ ง.1 โปรไฟล์ CO₂-TPD ของตัวเร่งปฏิกิริยา 20wt.% WO₃/MgO-CaOรูปที่ ง.2 โปรไฟล์ CO₂-TPD ของตัวเร่งปฏิกิริยา 40wt.% WO₃/MgO-CaO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง.3 โพรไฟล์ NH_3 -TPD ของตัวเร่งปฏิกิริยา 20wt.% $\text{WO}_3/\text{MgO-CaO}$



รูปที่ ง.4 โพรไฟล์ NH_3 -TPD ของตัวเร่งปฏิกิริยา 40wt.% $\text{WO}_3/\text{MgO-CaO}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ

วันที่ 19 เดือน มิถุนายน พ.ศ 2561

ข้าพเจ้า นางสาว ณัฐฐนิช อารีย์กุล รหัสประจำตัว 57050405
นางสาว ธันยธรณ์ ภาคบุญ รหัสประจำตัว 57050423
นาย สัมพันธ์ กิรตยาคม รหัสประจำตัว 57050524

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม ภาควิชา เคมี
ขอรับรองว่าโครงการพิเศษ เรื่อง

ชื่อภาษาไทย การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้ว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนออกไซด์ผสมของแมกนีเซียมและแคลเซียม

ชื่อภาษาอังกฤษ Synthesis of biodiesel from waste palm oil using tungsten oxide on magnesium calcium mixed oxide as catalysts

ปีการศึกษา 2560

เป็นผลงานวิจัยที่มีได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่มโครงการพิเศษฉบับสมบูรณ์แล้ว

โปรแกรมอักขราวิสุทธิ์ 1.90 %

ลงชื่อ.....ณัฐฐนิช.....อารีย์กุล.....

ลงชื่อ.....ธันยธรณ์.....ภาคบุญ.....

ลงชื่อ.....สัมพันธ์.....กิรตยาคม.....

(นางสาวณัฐฐนิช อารีย์กุล)

(นางสาวธันยธรณ์ ภาคบุญ)

(นายสัมพันธ์ กิรตยาคม)

นักศึกษา

นักศึกษา

นักศึกษา

ข้าพเจ้า ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ได้ตรวจสอบโครงการพิเศษศึกษาของนักศึกษาข้างต้น แล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า อาจารย์ที่ปรึกษาไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Plagiarism Checking Report

Created on Jun 19, 2018 at 17:06 PM

Submission Information

ID	SUBMISSION DATE	SUBMITTED BY	ORGANIZATION	FILENAME	STATUS	SIMILARITY INDEX
872017	Jun 19, 2018 at 17:06 PM	57050423@kmitl.ac.th	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	biodiesel WCM.pdf	Completed	1.90 %

Match Overview

NO.	TITLE	AUTHOR(S)	SOURCE	SIMILARITY INDEX
1	ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อการตัดสินใจเลือกใช้น้ำมันไบโอดีเซล B5 ในกรุงเทพมหานคร, Factors relationship for decision making of biodiesel B5 oil in Bangkok Metropolitan	ดิฏฐา ศิริโสม	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	0.70 %
2	การศึกษาและพัฒนาเตากลั่นเซอรอลสำหรับการให้ความร้อนใน กระบวนการผลิตไบโอดีเซล	อุบลศักดิ์ คงโนนคอก	มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย	0.34 %
3	การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ดูดซับบนโซเดียมซิลิเกตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิธพันธ์, Biodiesel production using potassium hydroxide adsorbed on sodium silicate as heterogeneous catalyst	วิรพงษ์ เจนสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	0.25 %
4	ADSORPTION OF METHANOL IN BIODIESEL WITH CARBON ADSORBENTFROM MACADAMIA NUT SHELLS, การดูดซับเมทานอลในไบโอดีเซลด้วยถ่านดูดซับจากเปลือกถั่วแมคคาเดเมีย, ADSORPTION OF METHANOL IN BIODIESEL WITH CARBON ADSORBENTFROM MACADAMIA NUT SHELLS, การดูดซับเมทานอลในไบโอดีเซล	นางสาวพรรณธิดา บรรจง, Miss Punthida Bunchong, นางสาวพรรณธิดา บรรจง, Miss Punthida Bunchong	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	0.24 %
5	A NOVEL APPROACH TO REDUCE VISCOSITY OF CERTAIN VEGETABLE OIL AND LARD USING WATER AND CARBON TETRACHLORIDE AS SOLVENTS DURING GAMMA-RAY IRRADIATION FROM COBALT-60, แนวทางใหม่ในการลดความหนืดของน้ำมันพืชบางชนิดและน้ำมันหมูโดยใช้ น้ำและคาร์บอนเตตราคลอไรด์	นางสาวชนิดา พรน พานา, Miss Chanis Pornnumpa, นางสาวชนิดา พรน พานา, Miss Chanis Pornnumpa	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	0.21 %
6	PRODUCTION OF BIODIESEL FROM PALM OIL IN SUPERCRITICAL AND SUBCRITICAL ETHANOL WITH HETEROGENEOUS CATALYSTS IN FIXED BED REACTOR, การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มในเอทานอลภาวะเหนือวิกฤตและกึ่งวิกฤตด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาวิธพันธ์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบดิ่ง, PRO	นางสาวพรนิชา เทศวิริช, Miss Pornicha Tejvirat, นางสาวพรนิชา เทศวิริช, Miss Pornicha Tejvirat	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	0.17 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Match Details

TEXT FROM SUBMITTED DOCUMENT

การที่น้ำมันพืชมีความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซลทำให้หัวฉีดน้ำมันเป็นฝอยได้ยาก เกิดเป็นอุปสรรคต่อการป้อนน้ำมันเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้และสันดาปไม่ สมบูรณ์เอ็กทั้งน้ำมันพืชมีความหนืดที่ระเหยตัวกลายเป็นไอได้น้อยและช้ามาก ยิ่งทำให้เกิดการจุดระเบิดได้ยากส่งผลให้เครื่องยนต์ติดยากและหลงเหลือคราบ เขม่าที่เกาะที่หัวฉีดผนังลูกสูบแหวนและวาล์วจากคุณสมบัติที่น้ำมันพืชมีความ หนืดสูงและระเหย

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 2.1 ไบโอดีเซล 9 ไบโอดีเซลหมายถึง เชื้อเพลิงทดแทนประเภทดีเซลจากธรรมชาติโดยการนำเอาน้ำมันจากพืชหรือ สัตว์ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทไตรกลีเซอไรด์มาผ่านกระบวนการทาง เคมีที่เรียกว่าทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชันโดยทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ Ethanol หรือ Methanol และมีเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเช่นโซเดียมไฮดรอกไซด์ NaOH จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์และผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้กลีเซอรอล Glycerol ไบโอดีเซลมีคุณสมบัติการเผาไหม้เหมือนกับดีเซลจาก

โดยทั่วไปการใช้น้ำมันไบโอดีเซลในต่างประเทศนั้นนิยมนำไปผสมเป็นสูตร ต่างๆดังนี้ B2 ไบโอดีเซล 2 ดีเซล 98 มีจำหน่ายทั่วไปในมลรัฐมิชิแกน ประเทศสหรัฐอเมริกาและจะบังคับใช้ทั้งหมดรัฐในปีพ.ศ. 2548

ตัวเหลืองน้ำมันหม้อซึ่งสามารถนำเอามาใช้ได้เลยกับเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่ต้อง ผสมหรือผสมสารเคมีอื่นหรือไม่ต้องนำมาเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำมันส่วน แบบผสมคือการผสมระหว่างน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์กับน้ำมันก๊าดหรือน้ำมัน ดีเซลหรืออื่นๆเพื่อให้ไบโอดีเซลที่ได้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลให้ มากที่สุดเช่นโคโคดีเซลที่ประจวบคีรีขันธ์ซึ่งเป็นการผสมระหว่างน้ำมัน มะพร้าวกับน้ำมันก๊าดหรือที่เรียกปาล์มดีเซลน้ำมันดีเซลไอโอดีของค์ประกอบ กรดไขมันหลัก C12 0 C14 0 C16

TEXT FROM SOURCE DOCUMENT(S)

ผ่านได้แก่งานน้ำมันท่อทางเดินน้ำมันชุดกรองน้ำมันอุณหภูมิของน้ำมันที่อุณหภูมิ 70C แนวทางในการนำน้ำมันพืชมาใช้โดยตรงเป็นวิธีการที่ 23 ได้นำ น้ำมันในราคาที่ถูกโดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำน้ำมันพืชซึ่งยังไม่ผ่านกระบวนการ กลั่นมาใช้แต่การที่จะนำมาใช้ได้เหมาะสมจำเป็นต้องอาศัยความรู้ในการ หลอมเหลวไขแข็งและลดความหนืดของน้ำมันเนื่องจากน้ำมันพืชมีความ หนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซลประมาณ 11 - 17 เท่าที่อุณหภูมิที่น้ำมันพืชยังมีความ หนืดสูงขึ้นเป็นลำดับจนเกิดเป็นไขการที่น้ำมันพืชมีความหนืดสูงกว่าน้ำมัน ดีเซลทำให้หัวฉีดน้ำมันฉีดน้ำมันให้เป็นฝอยได้ยากเกิดเป็นอุปสรรคต่อการป้อน น้ำมันเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้และเกิดการสันดาปไม่สมบูรณ์นอกจากนี้ แล้วน้ำมันพืชมีความหนืดที่ระเหยตัวกลายเป็นไอได้ช้าและน้อยมาก (Slow / Lowvolatility) ยิ่งทำให้เกิดการจุดระเบิดได้ยากเครื่องยนต์ติดยากและหลง เหลือคราบเขม่าที่เกาะที่หัวฉีดผนังลูกสูบแหวนและวาล์วจากคุณสมบัติที่น้ำมัน พืชมีความหนืดสูงและระเหยตัวได้ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลทำให้เกิดความยุ่งยาก เมื่อใช้น้ำมันพืชโดยตรงในเครื่องยนต์

ตัดสินใจในการเลือกใช้น้ำมันไบโอดีเซลมี 5 และทัศนคติที่แตกต่างกัน บท ที่ 3 \ ก สภาพทั่วไปของไบโอดีเซล \ ก ไบโอดีเซลหมายถึงเชื้อเพลิงทดแทน ประเภทดีเซลจากธรรมชาติโดยการนำเอาน้ำมันจากพืช \ ก หรือสัตว์ซึ่งเป็น สารประกอบอินทรีย์ประเภทไตรกลีเซอไรด์มาผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียก ว่า \ ก ทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชัน (Transesterification) โดยทำปฏิกิริยากับ แอลกอฮอล์ (Ethanol หรือ Methanol) \ ก และมีตัวเร่งปฏิกิริยาเช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์ (Ester) และ \ ก ผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้กลีเซอรอล (Glycerol) ซึ่งเราจะเรียกชนิดของไบโอดีเซลแบบเอสเตอร์ที่ตาม \ ก ชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไบโอดีเซลชนิดเอสเตอร์ที่มีคุณสมบัติที่เหมือนกับน้ำมัน \ ก ดีเซลมากที่สุดเพราะไม่มี ปัญหาเกี่ยวกับเครื่องยนต์นอกจากนี้ยังได้กลีเซอรอลและกรดไขมันเป็นผลพลอย \ ก ได้ซึ่งปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4 \ ก ภาพที่ 4 โครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์ \ ก การเรียกชื่อขึ้นกับชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ ในการทำปฏิกิริยาเช่นเมทิลเอสเตอร์เป็นเอส \ ก เทอร์ที่ได้จากการใช้เมทานอลเป็นสารในการทำปฏิกิริยาหรือเอทิลเอสเตอร์เป็นเอสเทอร์ที่ได้จาก \ ก การใช้เอทานอลเป็นสารในการทำปฏิกิริยา

การใช้น้ำมันไบโอดีเซลในต่างประเทศนั้นนิยมนำไปผสมเป็นสูตรต่างๆเช่น \ ก B2 (ไบโอดีเซล 2% : ดีเซล 98%) มีจำหน่ายทั่วไปในมลรัฐมิชิแกน ประเทศ สหรัฐอเมริกา \ ก และจะบังคับใช้ทั้งหมดรัฐในปีพ.ศ. 2548 \ ก B5 (ไบโอดีเซล 5% : ดีเซล 95%) มีจำหน่ายทั่วไปในประเทศฝรั่งเศสโดยกว่าครึ่งหนึ่งของ \ ก น้ำมันดีเซลที่จำหน่ายเป็นน้ำมันสูตร B5 \ ก B20 (ไบโอดีเซล 20% : ดีเซล 80%) เป็นน้ำมันผสมที่คณะกรรมการไบโอดีเซลแห่งชาติและ \ ก นักงานป้องกันสิ่งแวดล้อมของประเทศ

หม้อซึ่งสามารถนำเอามาใช้ได้เลยกับเครื่องยนต์ดีเซล \ ก โดยไม่ต้องผสมหรือ เดิมสารเคมีอื่นหรือไม่ต้องนำมาเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำมันให้เปลือง เวลา \ ก เปลืองทรัพยากรอีกน้ำมันพืชหรือสัตว์มีปัญหาค่อนข้างมากเนื่องจาก คุณสมบัติของมันต่างกับดีเซล \ ก ค่อนข้างมากอย่างที่กล่าวมาแล้วข้างต้นก็เลย มีปัญหาเรื่องการสันดาปไม่สมบูรณ์เครื่องสะดุดมีผลต่อ \ ก ลูกสูบและวาล์วมี ตะกรันขาวอยู่ในถังน้ำมันและหนืดความหนืดสูงที่อุณหภูมิต่างทำให้จากที่ \ ก สตาร์ทไม่ค่อยจะติดอยู่แล้วกลายเป็นไม่ติดไปเลยในที่อากาศเย็นๆแต่มีข้อดีก็คือมีราคาถูกพอใช้ได้กับ \ ก เครื่องยนต์รอบต่ำแต่ก็ไม่ค่อยนิยมใช้กัน \ ก 2. ไบโอดีเซลแบบลูกผสม (Veggie / Kero Mix) \ ก ไบโอดีเซลชนิดนี้เป็นลูกผสม ระหว่างน้ำมันพืช (หรือสัตว์) กับน้ำมันก๊าดน้ำมันดีเซลหรือ \ ก อะไรก็ได้เพื่อให้ไบโอดีเซลที่ได้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลให้มากที่สุดเช่นโคโคดีเซล \ ก (coco-diesel) ที่อำเภอทับสะแกจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ซึ่งเป็นการผสมกัน ระหว่างน้ำมันมะพร้าวกับ \ ก น้ำมันก๊าดหรือปาล์มดีเซล (palm-diesel) เป็นการ ผสมระหว่างน้ำมันปาล์มกับน้ำมันดีเซลไบโอดีเซล \ ก ชนิดนี้จะลดปัญหาเรื่อง ความหนืดลงไปได้บ้างแต่ก็ยังมีปัญหาตอนที่อากาศเย็นและปัญหาเรื่องการจุด \ ก ต้นของเครื่องยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

92 2 ตารางแสดงเกณฑ์มาตรฐานต่างๆตามที่กฎหมายกำหนดของไบโอดีเซล ตารางที่ 7 เกณฑ์มาตรฐานของไบโอดีเซลลำดับที่ข้อกำหนดอัตราสูงตัววิธีทดสอบ 1 เมทิลเอสเทอร์ร้อยละโดยน้ำหนักไม่ต่ำกว่า 96.5 EN 14103 2 ความหนาแน่นอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส กิโลกรัมลูกบาศก์เมตรไม่ต่ำกว่า และไม่สูงกว่า 860.900 ASTM D 1298 3 ความหนืดอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เซนติสโตกส์ไม่ต่ำกว่าและไม่สูงกว่า 3.55.0 ASTM D 445 4 จุดวาบไฟองศา

เซลเซียสไม่ต่ำกว่า 120 ASTM D 93 5 กะมะถันร้อยละโดยน้ำหนักไม่สูงกว่า 0.0010 ASTM D 2622 6 จำนวนซีเทนไม่ต่ำกว่า 51 ASTM D 613 7 เถ้าซัลเฟต ร้อยละโดยน้ำหนักไม่สูงกว่า 0.02 ASTM D 874 8 น้ำร้อยละโดยปริมาตรไม่สูงกว่า 0.050 ASTM D 2709 9 สิ่งปนเปื้อนทั้งหมดร้อยละโดยน้ำหนักไม่สูงกว่า 0.0024 ASTM D 5452 10 เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ชั่วโมงไม่ต่ำกว่า

6 EN 14112 11 ค่าความเป็นกรด mg KOH/g ไม่สูงกว่า 0.50 ASTM D 664 12 ค่าไอโอดีนกรัมไอโอดีน 100 กรัมไม่สูงกว่า 120 EN 14111 13 กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ร้อยละโดยน้ำหนักไม่สูงกว่า 12.0 EN 14103 14 เมทานอลร้อยละโดยน้ำหนักไม่สูงกว่า 0.20 EN 14110 15 โมโนกลีเซอไรด์ร้อยละโดยน้ำหนักไม่สูงกว่า 0.80 EN 14105 16 ไตรกลีเซอไรด์ร้อยละโดยน้ำหนักไม่สูงกว่า 0.20

EN 14105 17 ไตรกลีเซอไรด์ร้อยละโดยน้ำหนักไม่สูงกว่า 0.20 EN 14105 18 กรีเซอรินอิสระร้อยละโดยน้ำหนักไม่สูงกว่า 0.02 EN 14105 19 กรีเซอรินทั้งหมดร้อยละโดยน้ำหนักไม่สูงกว่า 0.25 EN 14105

อลหรือเอทานอล โดยมีต่างหรือกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ดีเซลทางเลือกนอกเหนือจากดีเซลที่ผลิตจากปิโตรเลียมคุณสมบัติที่สำคัญของไบโอดีเซลคือสามารถย่อยสลายเองตามกระบวนการชีวภาพในธรรมชาติ และไม่เป็นพิษการเผาไหม้เหมือนกับดีเซลจากปิโตรเลียมมากและสามารถใช้แทนกันได้ [2] การควบคุมคุณภาพไบโอดีเซลตามมาตรฐานกรมธุรกิจพลังงานได้แสดงดังตารางที่ 1.1 ตารางที่ 1.1 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันพ.ศ. 2548 ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน [1] ที่ข้อกำหนดอัตราสูงตัววิธีทดสอบ 1 เมทิลเอสเทอร์ร้อยละโดยน้ำหนักไม่ต่ำกว่า 96.5 EN 14103 2 ความหนาแน่นอุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรไม่ต่ำกว่าและไม่สูงกว่า 860.900 ASTM D 1298 3 ความหนืดอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เซนติสโตกส์ไม่ต่ำกว่าและไม่สูงกว่า 3.55.0 ASTM D 445 4 จุดวาบไฟองศาเซลเซียสไม่ต่ำกว่า 120 ASTM D 93 2 ที่ข้อกำหนดอัตราสูงตัววิธีทดสอบ 5

ASTM D 1298 2 ความหนืดอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (Viscosity at 40 °C) (cSt) ไม่ต่ำกว่าและไม่สูงกว่า 1.98.0 ASTM D 445 3 จุดวาบไฟองศาเซลเซียส (Flash Point) (°C) ไม่ต่ำกว่า 120 ASTM D 93 4 กะมะถันร้อยละโดยน้ำหนัก (Sulphur) (% wt.) ไม่สูงกว่า 0.0015 ASTM D 2622 5 จำนวนซีเทน (Cetane Number) ไม่ต่ำกว่า 47 ASTM D 613 6 เถ้าซัลเฟต ร้อยละโดยน้ำหนัก (Sulphated Ash) (% wt.) ไม่สูงกว่า 0.02 ASTM D 874 7 น้ำและตะกอนร้อยละโดยน้ำหนัก (Water and Sediment) (% vol) ไม่สูงกว่า 0.2 ASTM D 2079 8 การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Strip Corrosion) ไม่สูงกว่าหมายเลข 3 ASTM D 130 9 ค่าความเป็นกรดมีลิลกรัมโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม (Acid Number) (mgKOH / g) ไม่สูงกว่า 0.80 ASTM D 664 10 กลีเซอรินอิสระร้อยละโดยน้ำหนัก (Free glycerin) (% wt.) ไม่สูงกว่า 0.02 ASTM D 6584 11 กลีเซอรินทั้งหมดร้อยละโดยน้ำหนัก (Total glycerin

2709) (n) 12 การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Strip Corrosion) (n) ไม่สูงกว่าหมายเลข 1 หมายเลข 3 ASTM D 130 (n) 19 ตารางที่ 2-3 (ต่อ) (n) ลำดับข้อกำหนด (n) มาตรฐานไบโอดีเซลวิธีทดสอบ (n) B100 ชุมชน (n) 13 เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 110C (n) Oxidation Stability at 110C) ชั่วโมง (n) ไม่ต่ำกว่า 10 ไม่กำหนด EN 14112 (n) 14 ค่าความเป็นกรด (Acid Value) (n) (mg KOH / g) (n) ไม่สูงกว่า 0.50.8 ASTM (n) D 664 (n) 15 ค่าไอโอดีน (Iodine Value) ไม่สูงกว่า 120 ไม่กำหนด EN 14111 (n) 16 กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ (n) (Linolenic Acid Methyl Esters) (n) ร้อยละโดยน้ำหนัก (% wt) (n) ไม่สูงกว่า 12 ไม่กำหนด EN 14103 (n) 17 เมทานอล (Methanol) (n) ร้อยละโดยน้ำหนัก (% wt) (n) ไม่สูงกว่า 0.2 ไม่กำหนด EN 14110 (n) 18 โมโนกลีเซอไรด์ (Monoglycerides) (n) ร้อยละโดยน้ำหนัก (% wt) (n) ไม่สูงกว่า 0.8 ไม่กำหนด EN 14105 (n) 19 ไตรกลีเซอไรด์

14105 18 ไตรกลีเซอไรด์ (Diglyceride) ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt. %) ไม่สูงกว่า 0.20 EN 14105 19 ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt. %) ไม่สูงกว่า 0.20 EN 14105 20 กลีเซอรินอิสระ (Free glycerin) ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt. %) ไม่สูงกว่า 0.02 EN 14105 21 กลีเซอรินทั้งหมด (Total glycerin) ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt. %) ไม่สูงกว่า 0.25 EN 14105 22 โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโปแตสเซียม) (Group I metals (Na-K) มิลลิกรัม/กิโลกรัม mg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้