

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การใช้โลหะแอลคาไลน์บนแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์

เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล

Use of Calcium Oxide and Magnesium Oxide

Supported Alkaline as Catalysts for Biodiesel Production



T117351



สาขา...
เลขทะเบียน... 117351
ในเดือน, ปี... 20 ก.ค. 2554

b. 12340510
i.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้โลหะออกไซด์บนแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์

เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล

Use of Calcium Oxide and Magnesium Oxide

Supported Alkaline as Catalysts for Biodiesel Production



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานปีการศึกษา 2553 นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**USE OF CALCIUM OXIDE AND MAGNESIUM OXIDE SUPPORTED
ALKALINE AS CATALYSTS FOR BIODIESEL PRODUCTION**



**MR. KHASIDIT WITHURAT
MISS NUTTIDA RUTTANAKUMNERD
MISS NITCHAYA PLOYNUCH**

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN INDUSTRIAL CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE**

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ACADEMIC YEAR 2010

หัวข้อโครงการพิเศษ การใช้โลหะออกไซด์บนแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์
เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล

Use of Calcium Oxide and Magnesium Oxide Supported Alkaline as
Catalysts for Biodiesel Production

นักศึกษา นาย กษิต วิรุรัตน์
นางสาว ณัฐริดา รัตนกำเนิด
นางสาว ณิชยา พลอยนุช

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชา
เคมีอุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2553

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. ดวงกมล กิติ์สัน	ดวงกมล กิติ์สัน
ดร. สามารถ คงทวีเลิศ	สามารถ คงทวีเลิศ
ดร. อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล	อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อแหล่งอื่นและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การใช้โลหะแอลคาไลน์บนแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล	
นักศึกษา	นาย กษิดิศ	วิรุรัตน์
	นางสาว ณัฐธิดา	รัตนกำเนิด
	นางสาว นิชยา	พลอยนุช
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต	
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม	
ปีการศึกษา	2553	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. อำนาจ	เพิ่มทรัพย์สกุล

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มและเมทานอลผ่านกระบวนการทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชัน ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ที่มีการปรับปรุงความเป็นเบส โดยเลือกใช้เกลือไนเตรดของโลหะแอลคาไลน์บนตัวรองรับออกไซด์ของโลหะแอลคาไลน์เอิร์ทเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งได้แก่ ลิเทียมไนเตรด (LiNO_3) และ โซเดียมไนเตรด (NaNO_3) บนตัวรองรับแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) รวมถึงศึกษาผลของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ ได้แก่ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราส่วน โดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันจากการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาดีเยี่ยมไนเตรดบนตัวรองรับแคลเซียมออกไซด์ ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ให้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ คือ ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดีเยี่ยมไนเตรดบนตัวรองรับแคลเซียมออกไซด์ ความเข้มข้นของสารละลายลิเทียมไนเตรดร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของแคลเซียมออกไซด์ ปริมาณตัวเร่งร้อยละ 3 โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำมันพืช และอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 10:1 ที่อุณหภูมิ 60 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อทำการศึกษาสมบัติด้านเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลพบว่า ค่าความเป็นกรดและเลขไอโอดีอินของไบโอดีเซลอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title Use of Calcium Oxide and Magnesium Oxide Supported Alkaline as Catalysts for Biodiesel Production

Student Mr. Khasidit Withurat
Miss Nuttida Ruttanakumnerd
Miss Nitchaya Ploynuch

Degree Bachelor of science

Major Program Industrial Chemistry

Academic 2010

Advisor Dr. Amnat Permsubsacul

ABSTRACT

This special project investigate the synthesis of biodiesel via transesterification reaction of palm oil with methanol using the nitrate salt of alkaline metal, there are Lithium and Sodium, supported on alkali earth metal oxide, namely magnesium oxide (MgO) and calcium oxide (CaO), as heterogeneous solid base catalysts. Variables that affect on the %yield of methyl ester, namely the type of catalyst, concentration of alkali metal nitrates, quantity of catalyst and methanol/oil molar ratio were also studied. From the results, lithium nitrate supported on calcium oxide (LiNO₃/CaO) which calcined at temperature of 600 °C was shown to be more effective than another catalyst. Moreover, the results also indicated that the suitable condition was using LiNO₃/CaO catalyst with the concentration of lithium nitrate of 10%w/w, catalyst amount of 3%w/w and methanol/oil molar ratio of 10:1 at 60±5 °C for 3 hours. It was found that the acid value and iodine number were all in the commercial standard requirement of biodiesel.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยความกรุณาจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษา ดร. อำนวย เพิ่มทรัพย์สกุล ที่ให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง และตรวจทานแก้ไขโครงการฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ และ กรรมการสอบโครงการพิเศษ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ข้อชี้แนะ และ ตรวจสอบข้อมูลต่างๆในโครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความถูกต้อง

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. พชณี เจริญยิ่ง ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม นิวเคลียร์ แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fouier-Transform Nuclear Magnetic Resonance Spectrophotometer, FT-NMR) มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้ความรู้ และคำแนะนำ

ขอขอบพระคุณ คุณสุภัทร บานเย็น เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fouier-Transform Infrared, FT-IR)

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในด้านอุปกรณ์และสารเคมี

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์สาร

ขอขอบพระคุณ ครอบครัวอันเป็นที่รัก สำหรับกำลังใจที่มีให้เสมอมา

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ และพี่ๆ ที่คอยช่วยเหลือ และกำลังใจที่มีให้เสมอมา

นาย กษิตศ	วิรุรัตน์
นางสาว ณิชชิตา	รัตนกำเนิด
นางสาว ณิชชา	พลอยนุช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1	
บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2	
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันพืช	6
2.2 ปฏิกริยาที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ไบโอดีเซล	8
2.2.1 การนำมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซล โดยตรงและการผสม	8
2.2.2 การทำไมโครอิมัลชัน	8
2.2.3 การแตกสลายด้วยความร้อน	8
2.2.4 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน	9
2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา	13
2.4 การดูดซับ	19
2.4.1 ลักษณะการดูดซับ	19
2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	21
2.5 มาตรฐาน IA	22
2.5.1 สมบัติที่สำคัญของมาตรฐาน IA	22
2.5.2 สารประกอบของมาตรฐาน IA	23
2.5.3 ประโยชน์ของมาตรฐาน IA	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้เฉพาะในวงจำกัดของงานวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 แมกนีเซียมออกไซด์	24
2.6.1 การประยุกต์ใช้	24
2.6.2 ข้อควรระวัง	25
2.7 แคลเซียมออกไซด์	25
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	30
3.1 สารเคมี	30
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	30
3.3 วิธีการทดลอง	31
3.3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาและการวิเคราะห์คุณสมบัติ	31
3.3.2 การสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์	33
3.3.3 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา	36
3.3.4 การทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเมทิลเอสเทอร์	37
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	41
4.1 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์	41
4.1.1 ผลของชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์	41
4.1.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะที่มีต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์	46
4.1.3 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์	47
4.1.4 ผลของอัตราส่วน โดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันที่มีต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์	48
4.2 การศึกษาลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา	50
4.2.1 ความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา	50
4.2.2 องค์ประกอบของธาตุบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ 4.2.3 **พื้นฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยานั้น** ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ 54 การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.4 ค่าความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยา	56
4.3 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของเมทิลเอสเทอร์	57
4.3.1 ค่าความเป็นกรด	57
4.3.2 เลขไอโอดีน	57
4.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีของเมทิลเอสเทอร์	58
4.4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่องฟูเรียทรานฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์	59
4.4.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วย เครื่องฟูเรียทรานฟอร์ม นิวเคลียร์ แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์	60
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	62
5.1 สรุปผลการวิจัย	62
5.2 ข้อเสนอแนะ	63
เอกสารอ้างอิง	64
ภาคผนวก ก	68
ภาคผนวก ข	71
ภาคผนวก ค	75
ภาคผนวก ง	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	คุณสมบัติและองค์ประกอบกรดไขมันหลักของน้ำมันพืชต่างๆ	7
2.2	องค์ประกอบกรดไขมัน และน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของน้ำมันปาล์มที่ผ่านการทอดแล้ว	7
2.3	สมบัติของไหลเหนือภาวะวิกฤตเปรียบเทียบกับแก๊สและของเหลว	12
2.4	ประเภทของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน	13
2.5	การเปรียบเทียบปัจจัยต่างๆในการเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์และแบบวิวิธพันธุ์	14
2.6	แสดงสมบัติบางประการของโลหะหมู่ IA	23
3.1	ศึกษาผลของชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์	35
3.2	ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะที่มีต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์	35
3.3	ศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์	36
3.4	ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันที่มีต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์	36
4.1	ผลของชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์	42
4.2	ผลของความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะที่มีต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์	46
4.3	ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์	47
4.4	ผลของอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันที่มีต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์	49
4.5	แสดงผลการวิเคราะห์การหาปริมาณโซเดียมในตัวเร่งปฏิกิริยา	54
4.6	แสดงค่าความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาและร้อยละของเมทิลเอสเทอร์	56
4.7	แสดงค่าความเป็นกรดของเมทิลเอสเทอร์	57
4.8	แสดงเลขไอโอดีนของเมทิลเอสเทอร์	58
4.9	แสดงหมู่ฟังก์ชันของเมทิลเอสเทอร์ที่การดูดกลืนแสงที่ความถี่ต่างๆ	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	โครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์	6
2.2	ปฏิกิริยาการแตกสลายด้วยความร้อน	8
2.3	ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน	9
2.4	กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรด	10
2.5	กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบส	11
2.6	เฟสไดอะแกรมของของไหลเหนือภาวะวิกฤต	12
2.7	ขั้นตอนในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาดัวยวิธีตกตะกอน	16
2.8	(a) การเตรียม โดยวิธีการคูดซับ (b) ไอโซเทอมของการคูดซับของไอออนที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	16
2.9	ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาดัวยวิธีเอิบซุ่ม	18
3.1	เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (XRF)	32
3.2	เครื่องเอกซเรย์ดิฟเฟรคโทรมิเตอร์ (XRD)	32
3.3	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	33
3.4	การตั้งอุปกรณ์สำหรับการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์	33
3.5	การแยกชั้นของสารละลายในกรวยแยก	34
3.6	เมทิลเอสเทอร์ที่ผ่านการคูดน้ำด้วยแอนไฮดรัสโซเดียมซัลเฟต	34
3.7	เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR)	37
3.8	เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (FT-NMR)	38
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา และการแคลไซน์กับร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวรองรับ	42
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาและการแคลไซน์กับร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวรองรับ	43
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาและการแคลไซน์กับร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ โดยแสดงถึงผลของชนิดตัวรองรับที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะกับร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยา LiNO_3/CaO ที่ผ่านการแคลไซน์	46
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยากับร้อยละของเมทิลเอสเทอร์	48
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันกับร้อยละของเมทิลเอสเทอร์	49
4.7(ก) รูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชันของ MgO	51
4.7(ข) รูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชันของ LiNO_3/MgO (calcined)	51
4.7(ค) รูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชันของ LiNO_3/MgO (non-calcined)	52
4.7(ง) รูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชันของ CaO (calcined)	52
4.7(จ) รูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชันของ LiNO_3/CaO (calcined)	53
4.7(ฉ) รูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชันของ LiNO_3/CaO (non-calcined)	53
4.8(ก) MgO โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง	55
4.8(ข) LiNO_3/MgO (calcined) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง	55
4.8(ค) CaO โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง	55
4.8(ง) LiNO_3/CaO (calcined) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง	55
4.8(จ) LiNO_3/CaO (non-calcined) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง	55
4.8(ฉ) NaNO_3/CaO (calcined) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง	55
4.8(ช) NaNO_3/CaO (non-calcined) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง	55
4.9 สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ จากเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์	59
4.10 สเปกตรัมของน้ำมันปาล์มจากเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์	60
4.11 สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ จากเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม นิวเคลียร์แมกเนติก เรโซแนนซ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันความต้องการพลังงานเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้งในการพัฒนาประเทศและเพื่อการดำรงชีพของมนุษย์ ในสถานะที่ราคาน้ำมันได้ปรับตัวสูงขึ้นเรื่อยๆ ความต้องการใช้ไบโอดีเซลก็เพิ่มขึ้นโดยเฉพาะการขนส่งและเกษตรกรรม ในขณะที่ประชาชนส่วนใหญ่เป็นเกษตรกรที่มีรายได้น้อย และเนื่องจากน้ำมันสำรองของโลกลดลงเรื่อยๆ ซึ่งประเทศไทยของเราไม่มีแหล่งน้ำมัน มีเพียงแต่แหล่งก๊าซธรรมชาติปริมาณเล็กน้อยซึ่งสามารถได้อีกเพียง 15-20 ปี ดังนั้นจึงต้องหาเชื้อเพลิงทดแทน ซึ่งก็คือน้ำมันพืชที่มีความเป็นไปได้มาใช้แทน แต่เนื่องจากน้ำมันพืชที่ได้จากพืชเป็นน้ำมันที่มีสมบัติหลายประการที่แตกต่างจากน้ำมันดีเซล คือค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าความหนืด จุดไหลเท ดังนั้นจึงต้องนำน้ำมันพืชไปผ่านกระบวนการปรับปรุงโครงสร้างให้มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลก่อนนำมาใช้งานได้ ซึ่งก็คือ กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน (Transesterification) จะได้น้ำมันไบโอดีเซลที่มีจุดเด่นกว่าน้ำมันดีเซล คือ น้ำมันไบโอดีเซลจะช่วยลดเขม่าควันพิษ ให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่น้อยกว่า และไม่เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ น้ำมันไบโอดีเซลช่วยให้ห้องเผาไหม้สะอาด เนื่องจากมีเขม่าคาร์บอนน้อยไม่เกิดการอุดตันของระบบ จึงช่วยยืดอายุการใช้งานของเครื่องยนต์ ไบโอดีเซลมีองค์ประกอบของออกซิเจนอัดในปริมาณสูง ช่วยให้การเผาไหม้ในระบบอวกาศสมบูรณ์ มีค่าความหล่อลื่นสูงช่วยให้ชิ้นส่วนในระบบน้ำมันเชื้อเพลิง เช่น ปั๊มลูกสูบมีอายุในการใช้งานนานขึ้น จุดวาบไฟและค่าซีเทนมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ สามารถย่อยสลายได้เองตามกระบวนการชีวภาพในธรรมชาติ ค่าความหนืดใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลและมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง [1]

นายรูดอล์ฟดีเซล (Rudolf Diesel) ซึ่งเป็นผู้ประดิษฐ์เครื่องยนต์ดีเซล ได้สาริตเครื่องยนต์ดีเซลด้วยน้ำมันจากถั่วลิสงล้วนๆ โดยเครื่องยนต์นี้สร้างขึ้นเป็นพิเศษเฉพาะให้สามารถทำงานได้โดยใช้ น้ำมันดิบจากพืชได้เลยไม่ต้องทำการปรับเปลี่ยนใดๆทั้งสิ้น และพบว่าเครื่องเดินได้เหมือนการใช้ น้ำมันพืชชนิดอื่น เขาได้ใช้น้ำมันถั่วลิสงจำนวน 240 กรัมต่อชั่วโมงต่อแรงม้า สำหรับค่าความร้อนของ น้ำมันมีค่า 8600 แคลอรีต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าเทียบเท่ากับน้ำมันดิน (Tar oil) และมีปริมาณไฮโดรเจนร้อยละ 11.8 น้ำมันถั่วลิสงมีประสิทธิภาพเกือบจะเทียบเท่ากับน้ำมันจากปิโตรเลียมและยังสามารถใช้เป็น น้ำมันหล่อลื่นได้อีกด้วย ทำให้การผลิตน้ำมันชนิดนี้เกิดประโยชน์ได้ทั้งสองทาง ดังนั้นนายดีเซลจึงสรุปว่าเครื่องยนต์ดีเซลจะเป็นเครื่องยนต์สำหรับการพึ่งพาตัวเองสำหรับประเทศเขตร้อน โดยหลักการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลประการสำคัญคือ การอัดอากาศในห้องเผาไหม้ให้เกิดความร้อนสูง เมื่อฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงเข้าไปก็จะเกิดการลุกไหม้ขึ้นทำให้ก๊าซร้อนขึ้น ขยายตัวดันลูกสูบให้เคลื่อนที่ส่งกำลังงานออกมา แต่เนื่องจากในช่วงเวลาดังกล่าวน้ำมันปิโตรเลียมมีราคาถูกลงและหาได้ง่าย น้ำมันพืชจึงไม่เป็นที่ยอมรับเพราะมีราคาแพงกว่าน้ำมันปิโตรเลียม นอกจากนี้การใช้ น้ำมันพืชยังประสบปัญหาเรื่องการที่น้ำมันพืชมีความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้หัวฉีดน้ำมันฉีดน้ำมันให้เป็นฝอยได้ยาก เกิดเป็นอุปสรรคต่อการป้อนน้ำมันเชื้อเพลิงสู่ห้องเผาไหม้และเกิดการสันดาปไม่สมบูรณ์ อีกทั้ง น้ำมันพืชมีสมบัติที่ระเหยตัวกลายเป็นไอได้น้อยและช้ามากยิ่งทำให้เกิดการจุดระเบิดได้ยาก ส่งผลให้เครื่องยนต์ติดยากและหลงเหลือคราบเขม่าเกาะติดที่หัวฉีด ผนังลูกสูบ แหวน และวาล์ว จากสมบัติที่น้ำมันพืชมีความหนืดสูงและระเหยได้ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลนี้ ทำให้เกิดความยุ่งยากเมื่อใช้น้ำมันพืชล้วนๆ โดยตรงในเครื่องยนต์ การพัฒนาไบโอดีเซลสามารถพบได้ใน 28 ประเทศโดยมีประเทศเยอรมันและฝรั่งเศสเป็นประเทศสำคัญในการผลิตไบโอดีเซลของโลก ตั้งแต่ปี ค.ศ.1997 ประเทศญี่ปุ่นในกรุงโตเกียวตั้งเป้าหมายว่าจะผลิตไบโอดีเซลให้ถึงระดับการค้า โดยปัจจุบันรถที่ใช้วิ่งใน 220 จังหวัดนั้นจะใช้ไบโอดีเซลคิดเป็นร้อยละ 100 และมีการทดลองต่อเนื่อง โดยให้รถประจำทางใน 81 จังหวัดใช้ไบโอดีเซลในอัตราส่วนการผสมน้ำมันไบโอดีเซลร้อยละ 20 น้ำมันดีเซลร้อยละ 80 [2,3]

โดยทั่วไปในการผลิตไบโอดีเซลนิยมใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากให้ผลผลิตสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เนื่องจากมีความเป็นเบสสูง ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าว สามารถรวมเข้ากับแอลกอฮอล์เป็นเนื้อเดียวกัน จึงเรียกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst) ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดดังกล่าว แม้จะทำให้ได้ผลผลิตสูงแต่มีข้อเสียในกระบวนการผลิต คือ จำเป็นต้องมีกระบวนการล้าง (washing) เพื่อแยกตัวเร่งออกจากผลิตภัณฑ์ด้วยน้ำ ซึ่งน้ำจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้กับปฏิกิริยาสaponification มีผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาบางส่วนไปรวมตัวกับกรดไขมันอิสระที่เหลือเกิดเป็นสบู่ (soap) ทำให้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหลือน้อยลงสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ส่งผลให้ผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้้น้อยกว่าที่คาดหวัง[4] เพื่อที่จะแก้ปัญหาที่กล่าวไปข้างต้น จึงมีการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalyst) ชนิดต่างๆ ทั้งที่เป็นกรดหรือเบสมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซล ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ส่วนใหญ่นิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งในการเร่งปฏิกิริยาที่มีสารตั้งต้นอยู่ในวัฏภาคก๊าซหรือของเหลว ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยากันที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ออกไซด์ของโลหะ ซีโอไลต์ โลหะทรานส์ซิชัน และเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้จะไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันกับสารตั้งต้น เพื่อกำจัดปัญหาการเกิดสบู่ในกระบวนการล้างออกไป เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์นี้สามารถแยกออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการกรอง จึงถือว่าเป็นกระบวนการผลิตที่ไม่ต้องผ่านขั้นตอนการล้าง ซึ่งเป็นการลดขั้นตอนในการผลิต และลดต้นทุนของการผลิตไบโอดีเซลได้อีกทางหนึ่ง [5]

งานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มและเมทานอลผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิหพันธุ์ที่มีการปรับปรุงความเป็นเบสให้มากขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยเลือกใช้เกลือไนเตรดของโลหะแอลคาไลนั้เป็นตัวรองรับออกไซด์ของโลหะแอลคาไลนั้เอิร์ทเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งได้แก่ ลิเทียมไนเตรด (LiNO_3) และโซเดียมไนเตรด (NaNO_3) บนตัวรองรับแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) การศึกษาผลของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ ได้แก่ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน จากนั้นทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมรวมถึงทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไบโอดีเซล

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ลิเทียมไนเตรด (LiNO_3) และโซเดียมไนเตรด (NaNO_3) บนตัวรองรับแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
- 2) เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ได้แก่ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน
- 3) เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้จากน้ำมันปาล์มที่ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ลิเทียมไนเตรด (LiNO_3) และโซเดียมไนเตรด (NaNO_3) บนตัวรองรับแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน รวมถึงหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่
 1. ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือ ลิเทียมไนเตรตและ โซเดียมไนเตรตบนตัวรองรับแมกนีเซียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์
 2. ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะ ช่วงที่ทำการศึกษาคือ ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักเมื่อเทียบกับแมกนีเซียมออกไซด์หรือแคลเซียมออกไซด์
 3. ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ช่วงที่ทำการศึกษาคือ ร้อยละ 1, 2, 3, 4 และ 5 โดยน้ำหนักเมื่อเทียบกับน้ำมันพืช
 4. อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน ช่วงที่ทำการศึกษาคือ 6:1, 9:1, 10:1 และ 12:1
- 2) ศึกษาลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่
 1. ความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (X-ray Diffraction Spectrophotometer, XRD)
 2. องค์ประกอบของธาตุบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (X-ray Fluorescence Spectrophotometer, XRF)
 3. สัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)
 4. ความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยา
- 3) ศึกษาสมบัติทางกายภาพของไบโอดีเซล ได้แก่ เลขไอโอดีน และค่าความเป็นกรด
- 4) ศึกษาสมบัติทางเคมีของไบโอดีเซล โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier-Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR) และเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม นิวเคลียร์แมกเนติก เรโซแนนซ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier-Transform Nuclear Magnetic Resonance Spectrophotometer, FT-NMR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบถึงชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาและประเภทของสารประกอบของโลหะแอลคาไลน์บนแมกนีเซียมออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ ที่มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เพื่อให้ได้ไบโอดีเซลที่มีร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุด
- 2) สามารถนำสภาวะข้อมูลที่เหมาะสมไปประยุกต์ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เพื่อให้ได้ไบโอดีเซลที่มีคุณภาพ สามารถใช้ทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมได้อย่างมีประสิทธิภาพ



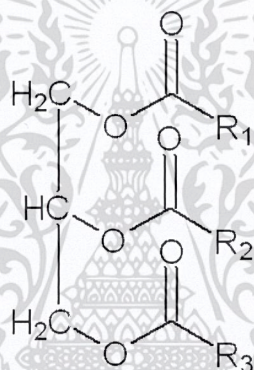
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันพืช [6]

โดยทั่วไปแล้วน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ทุกชนิดเป็นสารประกอบประเภทไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกลีเซอรอลกับกรดไขมันที่มีคาร์บอนอะตอมตั้งแต่ 10 ถึง 30 ตัว น้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์มีกรดไขมันชนิดต่างๆกันเป็นองค์ประกอบ โดยที่มีปริมาณของกรดไขมันอยู่ในโครงสร้างถึงร้อยละ 94-96 ของน้ำหนักโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ ทำให้คุณสมบัติของน้ำมันแต่ละชนิดทั้งทางเคมีและกายภาพแตกต่างกันไปตามคุณสมบัติของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์

น้ำมันพืชเป็นส่วนประกอบประเภทเอสเทอร์มีส่วนประกอบของไตรกลีเซอไรด์ประมาณร้อยละ 98 ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกลีเซอรอลและกรดไขมันอิสระ ส่วนประกอบที่เหลือจะเป็นส่วนของไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์และกรดไขมันอิสระ ซึ่งส่วนใหญ่มีคาร์บอนในกรดไขมันระหว่าง 12 ถึง 18 ตัว จากตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวในน้ำมันพืชแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน โดยน้ำมันพืชที่มีกรดไขมันอิ่มตัวในปริมาณที่สูงจะมีค่าเลขไอโอดีนต่ำ และเมื่อมีปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวที่ลดลงหรือกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงขึ้นค่าเลขไอโอดีนจะสูงขึ้นตามลำดับ น้ำมันพืชเป็นสารที่ไม่อยู่ตัว เมื่อสัมผัสกับอากาศจะถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย และเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน แล้วน้ำมันจะมีสภาพเป็นสารเหนียวขึ้น โดยทั่วไปค่าเลขไอโอดีนของน้ำมันพืชจะเป็นดัชนีบอกถึงปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีอยู่ในน้ำมันนั้นๆ ซึ่งบอกถึงความยากง่ายของการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันด้วย ถ้าน้ำมันมีค่าเลขไอโอดีนสูงจะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันง่าย ดังนั้นควรเลือกใช้ น้ำมันพืชที่มีค่าเลขไอโอดีนต่ำเป็นเชื้อเพลิง เพราะจะป้องกันการเกิดสารเหนียวที่เกิดเนื่องจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในเครื่องยนต์ในเบื้องต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติและองค์ประกอบกรดไขมันหลักของน้ำมันพืชต่างๆ [7]

น้ำมันชนิดดิบ	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
น้ำมันปาล์มโอสลิน	>56	0.1-0.5	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	0.1-0.5	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
น้ำมันเมล็ดเรป	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 ND : ไม่พบ

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบกรดไขมัน และน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของน้ำมันปาล์มที่ผ่านการทอดแล้ว

องค์ประกอบกรดไขมัน (%)	
Dodecanoic acid	0.48
Tetradecanoic acid	0.91
Palmitic acid	37.05
Stearic acid	4.82
Oleic acid	46.20
Linoleic acid	10.54
Free fatty acid (%)	4.5
Iodine value	55.91
Saponification	209.53
Molecular weight	850.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ปฏิกริยาที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ไบโอดีเซล [8]

ไบโอดีเซลที่สามารถทดแทนน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม สามารถเตรียมได้ 4 วิธี

2.2.1 การนำมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลโดยตรงและการผสม (Direct use and blending)

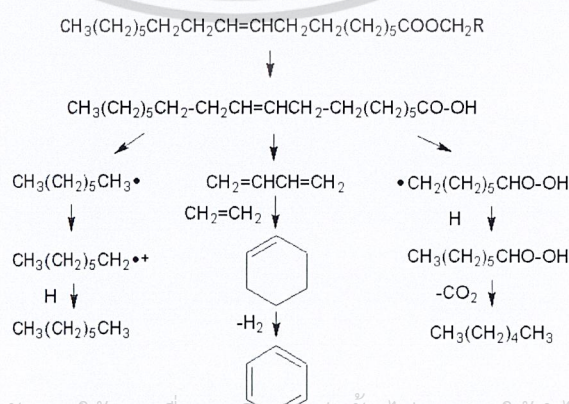
ไบโอดีเซลประเภทนี้เกิดจากการผสมกันระหว่างน้ำมันพืชและน้ำมันปิโตรเลียม เพื่อลดความหนืดของน้ำมันพืชโดยตรงโดยไม่ต้องเตรียมสารเคมีอื่นเพื่อการเปลี่ยนแปลง แต่ถ้าผสมมากเกินไปอาจเกิดผลกระทบต่อเครื่องยนต์ในระยะยาว เพราะน้ำมันพืชมีส่วนประกอบของไขมันอิสระนำไปสู่ปัญหาของสภาพน้ำมันเครื่อง ซึ่งทำให้เกิดคราบยางเหนียวจากปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างการเก็บรักษาและปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจากการเผาไหม้ จึงเกิดคราบสะสมที่เครื่องยนต์ นอกจากนี้ยังทำให้เครื่องยนต์เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ทั้งนี้ในการนำน้ำมันพืชผสมกับน้ำมันดีเซล พบว่าอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันดีเซลต่อน้ำมันพืชที่อัตราส่วน 80:20 จะให้ผลเหมือนกรณีใช้น้ำมันดีเซลร้อยละ 100 อัตราส่วนดังกล่าวจึงเป็นที่นิยมใช้มากที่สุด

2.2.2 การทำไมโครอิมัลชัน (Microemulsion)

การผสมน้ำมันพืชกับเมทานอล ซึ่งของเหลวทั้งสองชนิดไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน แต่กระจายอยู่ได้ด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดมีประจุและไม่มีประจุ โดยเกิดในลักษณะกระจายอนุภาคของเหลวในตัวกลางที่แขวนลอยในตัวกลางอีกชนิดหนึ่งอย่างสมดุล มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 1-150 นาโนเมตร วิธีนี้ลดปัญหาความหนืดได้ดีโดยใช้ตัวทำละลาย เช่น เมทานอล เอทานอล และ 1-บิวทานอล แต่จะเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้กระบวนการนี้ได้มีการปรับปรุงลักษณะการฉีดเป็นละอองฝอยของน้ำมันจากหัวฉีด

2.2.3 การแตกสลายด้วยความร้อน (Thermal cracking or Pyrolysis)

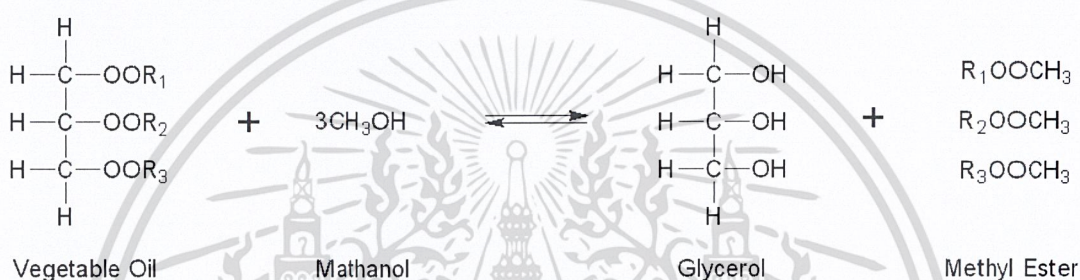
กระบวนการไพโรไลซิสเป็นการเปลี่ยนสารหนึ่งไปเป็นสารอื่นมากกว่าหนึ่งสาร โดยใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียวหรือมีตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย โดยไม่ใช้ออกซิเจนหรือออกซิเจน เป็นการนำน้ำมันพืชมาให้ความร้อนในสภาวะไร้ออกซิเจน เพื่อให้ไขมันแตกตัวเป็นโมเลกุลที่เล็กลง ซึ่งทำให้ความหนืดของน้ำมันพืชลดลง แต่เกิดปัญหาคือ ควบคุมการเกิดผลิตภัณฑ์ได้ยาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.2 ปฏิกริยาการแตกสลายด้วยความร้อน
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification)

ปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันพืชกับแอลกอฮอล์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกรดเบส หรือไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันพืชจากโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ของกรดไขมันสายยาวสามสาย ซึ่งถูกเชื่อมด้วยพันธะเอสเทอร์เข้ากับโมเลกุลของกลีเซอรอล 1 โมเลกุล โดยกรดไขมันนี้แตกต่างกัน เนื่องจากความยาวของสายโซ่คาร์บอน ตำแหน่งพันธะคู่ในสายโซ่น้ำมันพืชจะถูกเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีไปเป็น โมโนอัลคิลเอสเทอร์ของกรดไขมันสายยาว (ไบโอดีเซล) และได้กลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมยาและเครื่องสำอางก็ได้



รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

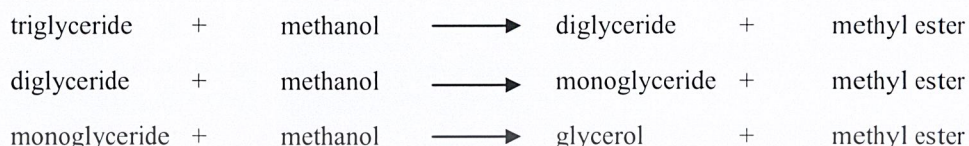
ในทางปริมาณสารสัมพันธ์ 1 โมลของไตรกลีเซอไรด์ต้องการ 3 โมลของแอลกอฮอล์ในการเกิดปฏิกิริยา แต่หากใช้อัตราส่วนที่สูงกว่าจะได้ผลิตภัณฑ์เอสเทอร์มากขึ้น จากปฏิกิริยานี้จะเห็นว่าปฏิกิริยาสามารถย้อนกลับได้ การใช้แอลกอฮอล์ซึ่งก็คือเมทานอลในปริมาณมากเกินไปจะช่วยให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าได้ดี ทำให้ได้ปริมาณของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งเอสเทอร์ที่ได้นี้จะมีสมบัติใกล้เคียงกับไบโอดีเซล

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นกระบวนการที่นิยมมาก เพราะวิธีไมโครอิมัลชันและวิธีการผสมน้ำมันด้วยตัวทำละลาย มักเกิดปัญหาในเรื่องประสิทธิภาพของเครื่องยนต์และเกิดการคาร์บอน ส่วนวิธีไพโรไลซิสนั้นจะผลิตก๊าซโซลีนออกมาคือน้ำมันดีเซลชีวภาพ นอกจากนี้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันยังให้ผลผลิตร่วมที่มีประโยชน์ทางการคือ กลีเซอรอล

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ แต่สามารถเร่งปฏิกิริยาให้ไปข้างหน้าได้เร็วขึ้นโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้แอลกอฮอล์ในปริมาณมากเกินไป โดยแอลกอฮอล์ที่ใช้ในปฏิกิริยาส่วนมากมักใช้เมทานอลหรือเอทานอลเป็นตัวทำปฏิกิริยา เนื่องจากมีราคาถูก หาง่าย เป็นโมเลกุลขนาดเล็กที่มีขั้ว จึงสามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว แต่ปฏิกิริยานี้ต้องไม่มีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง เพราะน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน (Saponification) ทำให้

ประสิทธิภาพการผลิตเอสเทอร์ลดลง และการแยกเอสเทอร์ออกจากกลีเซอรอลทำได้ยากมากขึ้น ดังนั้นการเตรียมค่าในปฏิกิริยาจะใช้วิธีละลายค่าในเมทานอลแทนน้ำ
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันมี 3 ขั้นตอนเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ คือ ขั้นตอนแรกจะเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์เป็นไดกลีเซอไรด์ ขั้นตอนต่อมาจะเปลี่ยนไดกลีเซอไรด์เป็นโมโนกลีเซอไรด์ และขั้นสุดท้ายจะเปลี่ยนโมโนกลีเซอไรด์เป็นกลีเซอรอล และได้เอสเทอร์ 3 โมล ในขั้นนี้คุณสมบัติของเอสเทอร์จะคล้ายน้ำมันดีเซล แสดงขั้นตอนต่างๆ ได้ดังนี้

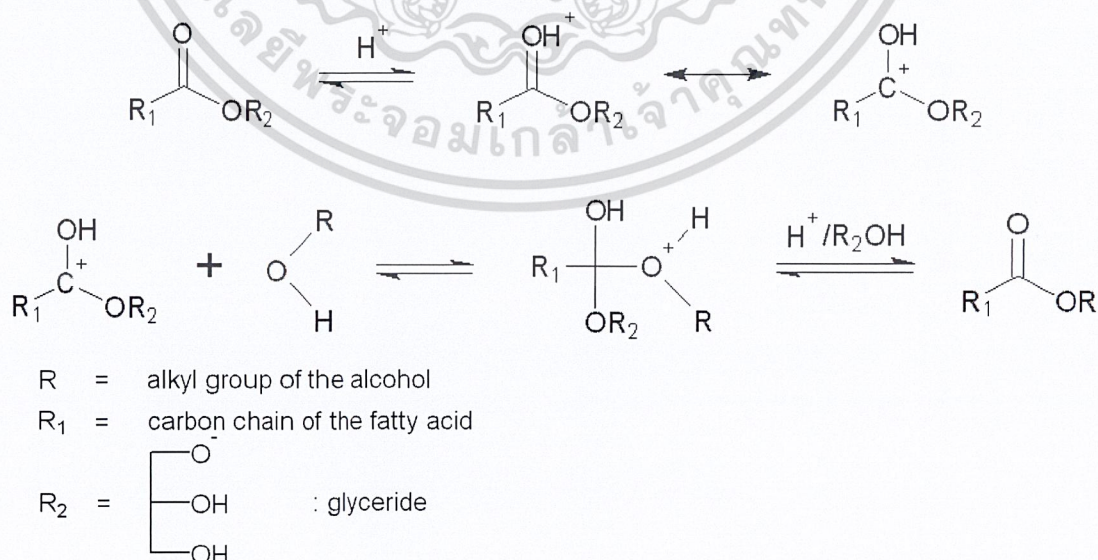


โดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่

1. การทำปฏิกิริยาโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

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

กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้กรดบรอนสเตด เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเริ่มจากโปรตอนไปโปรตอนเตต (Protonate) ที่หมู่คาร์บอนิลของเอสเทอร์ทำให้เกิดคาร์โบแคทไอออน หลังจากนั้นจึงเกิดการเข้าทำปฏิกิริยาของนิวคลีโอไฟล์ ซึ่งก็คือแอลกอฮอล์ เกิดสารมัธยันต์ลักษณะเป็นเตตระฮีดรอล โดยสารมัธยันต์นี้จะปล่อยกลีเซอรอลออกมา ทำให้เกิดเอสเทอร์ใหม่และตัวเร่งปฏิกิริยาใหม่ แสดงดังรูป

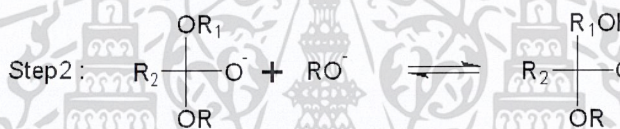
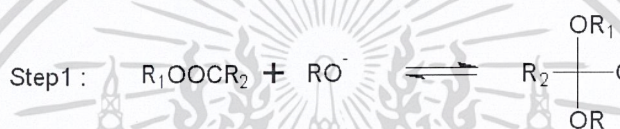


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับอาจารย์ผู้สอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปเผยแพร่ในที่สาธารณะได้
รูปที่ 2.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การทำปฏิกิริยาโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การทำปฏิกิริยาโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดเร็วกว่าใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่อาจเกิดปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันร่วมด้วย ทำให้ความบริสุทธิ์ของเอสเทอร์ที่ได้ลดลง

กลไกปฏิกิริยาเริ่มจากแอลกอฮอล์ไอออนจะเข้าทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งคาร์บอนิลของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งทำให้เกิดสารมัธยันต์ลักษณะเป็นเตตระฮีดรอล จากนั้นเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารมัธยันต์กับแอลกอฮอล์ ทำให้เกิดแอลกอฮอล์ไอออน และขั้นสุดท้ายจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของสารมัธยันต์ เกิดเป็นเอสเทอร์และไตรกลีเซอไรด์ แสดงดังรูป



R_1OH : diglyceride

R_2 : long chain alkyl group

R : short alkyl group

รูปที่ 2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบส

ถึงแม้ว่าปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสจะให้ปริมาณของผลผลิตเมทิลเอสเทอร์สูงโดยใช้เวลาที่สั้น แต่ปฏิกิริยานี้มีข้อเสียคือสิ้นเปลืองพลังงานในการเกิดปฏิกิริยามาก การนำกลีเซอรอลกลับมาใช้ใหม่ทำได้ยาก ต้องกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยากรดและเบสออกจากผลิตภัณฑ์น้ำเสียที่มีเบสต้องผ่านกระบวนการบำบัดก่อนปล่อยทิ้ง กรดไขมันและน้ำจะรบกวนการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

3. การทำปฏิกิริยาในสถานะเหนือวิกฤตของเมทานอล

จากตารางที่ 2.3 การทำปฏิกิริยาในสถานะเหนือวิกฤตของเมทานอลเป็นวิธีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เพราะที่สภาวะนี้ต้องใช้อุณหภูมิสูง ทำให้พันธะไฮโดรเจนของเมทานอลอ่อนลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า และสภาพัฒน์ของเมทานอลลดลง ทำให้เมทานอลกับน้ำมันพืชสามารถรวมเป็นเฟสเดียวกันได้ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

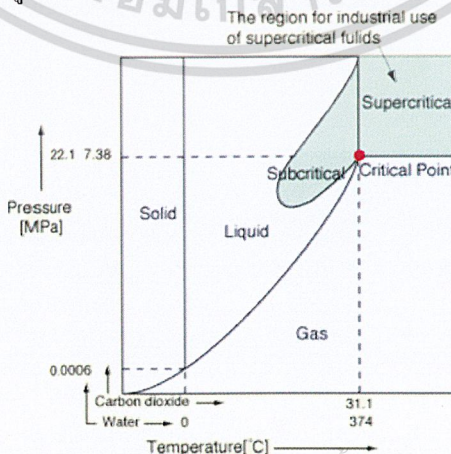
ตารางที่ 2.3 สมบัติของไหลเหนือภาวะวิกฤตเปรียบเทียบกับแก๊สและของเหลว

สถานะของของไหล	ความหนาแน่น (g/cm. ³)	Diffusivity (cm. ³ /sec)	ความหนืด (g/cm.sec)
แก๊ส P = 1 atm, T = 15-30 °C	(0.6 – 2) x 10 ³	0.1 – 0.4	(1 – 3) x 10 ⁻⁴
ของเหลว P = 1 atm, T = 15-30 °C	0.6 – 1.6	(0.2 – 2) x 10 ⁻⁵	(0.2 – 3) x 10 ⁻²
เหนือภาวะวิกฤต P = P _c , T = T _c	0.2 – 0.5	0.7 x 10 ⁻³	(1 – 3) x 10 ⁻⁴
P = 4P _c , T = T _c	0.4 – 0.9	0.2 x 10 ⁻³	(3 – 9) x 10 ⁻⁴

ของไหลเหนือภาวะวิกฤต (Supercritical fluid, SCF)

ของไหลเหนือภาวะวิกฤตหมายถึง สารใดๆในสถานะซึ่งจำแนกไม่ได้ว่าเป็นแก๊สหรือเป็นของเหลว เมื่อพิจารณาถึงแก๊สที่สามารถเปลี่ยนเป็นของเหลวได้มีอยู่ 2 วิธี โดยการลดอุณหภูมิหรือการเพิ่มความดัน เพื่อลดพลังงานจลน์ทำให้ระยะระหว่างโมเลกุลลดลงเกิดแรงดึงดูดระหว่างกัน ควบแน่นเป็นของเหลว แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดๆหนึ่ง โมเลกุลของแก๊สจะมีพลังงานจลน์มาก ถึงแม้จะให้ความดันเท่าไรก็ไม่สามารถทำให้แก๊สเกิดการควบแน่นเป็นของเหลวได้ อุณหภูมิสูงสุดที่แก๊สยังสามารถควบแน่นเป็นของเหลวได้เรียกว่า อุณหภูมิวิกฤต ความดันที่จุดๆนี้เรียกว่า ความดันวิกฤต เพราะฉะนั้นจุดวิกฤตคือ จุดที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิวิกฤต และมีความดันเท่ากับความดันวิกฤต

ที่อุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิวิกฤต และความดันมากกว่าความดันวิกฤต เรียกว่า ภาวะเหนือวิกฤต โดยสารที่อยู่ในสถานะนี้จะจำแนกไม่ได้ว่าเป็นแก๊สหรือเป็นของเหลว



รูปที่ 2.6 เฟสไดอะแกรมของของไหลเหนือภาวะวิกฤต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของไหลเหนือภาวะวิกฤตมีคุณสมบัติอยู่ระหว่างแก๊สกับของเหลว จากตารางที่ 2.3 พบว่า ความหนาแน่นของของไหลเหนือภาวะวิกฤตมีค่าใกล้เคียงกับของเหลว เมื่อนำมาใช้เป็นตัวทำละลายโมเลกุลของสารที่ต้องการละลายจะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของของไหลเหนือภาวะวิกฤตเกิดอันตรกิริยากันเกิดการละลายได้ดี ขณะเดียวกันของไหลเหนือภาวะวิกฤตมีความหนืดและการแพร่กระจายใกล้เคียงกับแก๊ส ทำให้สามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างภายในตัวถูกละลายได้ดี และด้วยสมบัติเหล่านี้จึงนำของไหลเหนือภาวะวิกฤตมาใช้เป็นตัวทำละลาย

ตารางที่ 2.4 แสดงประเภทของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน		
กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	ภาวะเหนือวิกฤตของเมทานอล
- ทำปฏิกิริยา 1 - 45 ชั่วโมง	- ทำปฏิกิริยา 1 - 8 ชั่วโมง - เกิดปฏิกิริยาสaponification	- ทำปฏิกิริยา 2 - 4 ชั่วโมง - ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง

2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา [9]

ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแยกออกได้เป็น 2 แบบ คือ

- 1) ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะเดียวกับสารที่ทำปฏิกิริยา ไม่ว่าจะเป็นแก๊สหรือของเหลว ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาในสิ่งมีชีวิตที่เร่งด้วยเอนไซม์และปฏิกิริยาในสารละลาย ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์มักเป็นโมเลกุลที่มีตำแหน่งสำหรับเร่งปฏิกิริยาชัดเจนทำให้ง่ายต่อการศึกษา แต่ก็มีข้อเสียคือมักสลายตัวหรือเสียดสภาพในสถานะที่ใช้ความร้อนหรือความดันสูง
- 2) ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalyst) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะแตกต่างกับสารที่ทำปฏิกิริยา เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นของแข็ง สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สหรือของเหลว การใช้ตัวเร่งแบบวิวิธพันธ์พบได้ในอุตสาหกรรมหลายอย่าง เช่น ปุ๋ย ผลิตภัณฑ์ยา เชื้อเพลิง เส้นใยสังเคราะห์ ตัวทำละลาย เนื่องจากสามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกมาจาก สารผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้นที่เหลือได้ง่ายกว่าระบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์

ตารางที่ 2.5 เป็นการเปรียบเทียบสมบัติและปัจจัยต่างๆของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์และแบบวิวิธพันธ์ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์อยู่ในวัฏภาคเดียวกับสารตั้งต้น จึงมีข้อดีคือประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาสูงและสามารถเลือกให้เร่งปฏิกิริยาที่ต้องการได้ง่ายกว่า อีกทั้งสภาวะการทดลองที่ใช้ไม่รุนแรงสามารถศึกษากลไกของปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าด้วยเทคนิคทาง

สเปกโทรสโกปีต่างๆและไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการแพร่ของสารตั้งต้นไปหาตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากอยู่ในวัฏภาคเดียวกัน แต่มีข้อเสียคือแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกมาจากสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำได้ยาก วิธีการที่ใช้ส่วนใหญ่คือการกลั่นหรือการสกัดด้วยตัวทำละลายและการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ทำได้ยากกว่าและอายุการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์นั้นสั้นกว่า

ข้อดีของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์คือ สามารถแยกสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ออกมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาได้ง่าย สามารถใช้ได้ ในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงหรือ/และมีความดันสูงได้ ตัวเร่งปฏิกิริยามีอายุการใช้งานที่ยาวนานและอาจนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่ายกว่า

ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบปัจจัยต่างๆในการเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์และแบบวิวิธพันธุ์

ปัจจัยหรือตัวแปรที่สนใจ	การเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์	การเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์
กัมมันตภาพเมื่อเทียบกับปริมาณโลหะที่เท่ากัน	สูง	แปรค่าได้
สัดส่วนการเลือกทำปฏิกิริยา	สูง	แปรค่าได้
สภาวะของปฏิกิริยา	ไม่รุนแรง	รุนแรง
อายุการใช้งานของตัวเร่ง	แปรค่าได้	นาน
ความไวของตัวเร่งต่อการเกิดพอยซัน	ต่ำ	สูง
ปัญหาจากการแพร่	ไม่มี	อาจมีผล
การนำตัวเร่งกลับมาใช้งาน	แพง	ทำได้
การปรับสมบัติเชิงโมเลกุลของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการเปลี่ยนอะตอมที่เป็นองค์ประกอบ	อาจทำได้	ทำไม่ได้

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นกับกรรมวิธีที่ใช้ในการเตรียมสาร การเตรียมแต่ละครั้งต้องคำนึงถึงสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ พื้นที่ผิว เสถียรภาพ และความทนทาน การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่

กลุ่มที่ 1 คือ การเตรียมตัวเร่งกลุ่มออกไซด์ (Active oxide component)

กลุ่มที่ 2 คือ การนำองค์ประกอบที่ไวต่อปฏิกิริยาวางบนตัวรองรับ (Deposition-produced activity component)

กลุ่มที่ 3 คือ กลุ่มที่มีการเตรียมพิเศษเฉพาะตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การเตรียมตัวเร่งกลุ่มออกไซด์ (Active oxide component)

ตัวเร่งกลุ่มออกไซด์ในที่นี้มีความหมายรวมทั้งองค์ประกอบกัมมันต์และตัวรองรับ ซึ่งจะถูกรวมให้มีพื้นที่ผิวและความพรุนสูง เช่น ไฮดรอกไซด์ ซึ่งอาจเป็นทั้งองค์ประกอบกัมมันต์และตัวรองรับ

การเตรียมออกไซด์ผสม(Dual Oxides) คือ การรวมตัวของออกไซด์สองชนิดเพิ่มคุณสมบัติของการเร่งปฏิกิริยา วิธีที่ดีที่สุด คือ การตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) และการเตรียมเจลสองชนิด เพื่อให้ได้การกระจายตัวและมีอันตรกิริยาต่อกันสูง ตัวอย่างเช่น $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\text{NiO-Al}_2\text{O}_3$ และซีโอไลต์

2. การนำองค์ประกอบที่ไวต่อปฏิกิริยาของตัวรองรับ (Deposition-produced activity component)

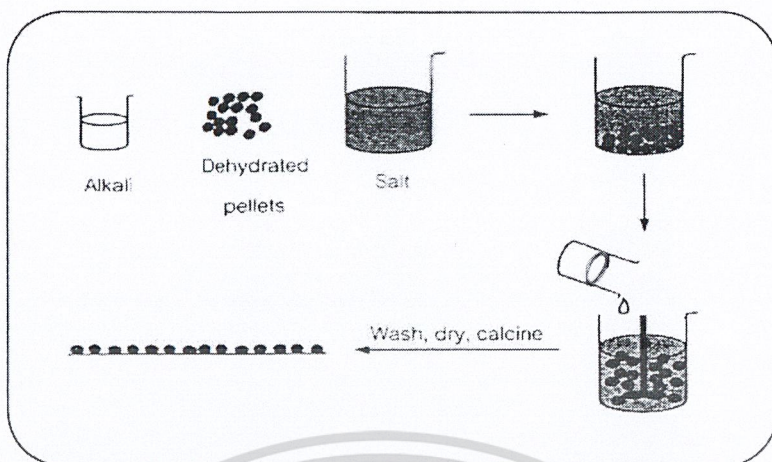
การทำให้ออกไซด์กระจายตัวบนตัวรองรับเป็นวิธีการที่นิยมมาก สามารถทำได้ 4 วิธี คือ การตกตะกอน การดูดซับ การแลกเปลี่ยน ไอออน และการทำให้เอ็บซุ่ม แต่ละเทคนิคมีทั้งข้อดีและข้อเสีย ซึ่งต้องพิจารณาจากการใช้ตัวรองรับที่ใช้อาจเป็นผงหรือเป็นก้อนเล็กๆ ในการเติมองค์ประกอบกัมมันต์ลงไปในพื้นที่ผิวหน้าด้านในตัวรองรับอาจมีข้อจำกัดเรื่องการแพร่เข้าไปในรูพรุน

2.1 การตกตะกอน

การตกตะกอน คือ การทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างผองอนุภาคของตัวรองรับกับเกลือของสารละลายซึ่งอาจจะเป็นออกซาเลต ไนเตรต ซัลเฟต หรือคลอไรด์ ในตัวกลางที่เป็นเบส เช่น NaOH , KOH , NH_4OH , Na_2CO_3 , NaHCO_3 ทำให้ได้ไฮดรอกไซด์หรือคาร์บอเนตของโลหะที่ไม่ละลายน้ำ สารเหล่านี้สามารถเปลี่ยนเป็นออกไซด์โดยการให้ความร้อน

การตกตะกอนเหมาะกับการเตรียมเพื่อให้มีปริมาณ โลหะ>Loading) ขององค์ประกอบกัมมันต์ประมาณ 10-20% ถ้าต้องการปริมาณที่ต่ำกว่านี้ควรพิจารณาใช้วิธีอื่น

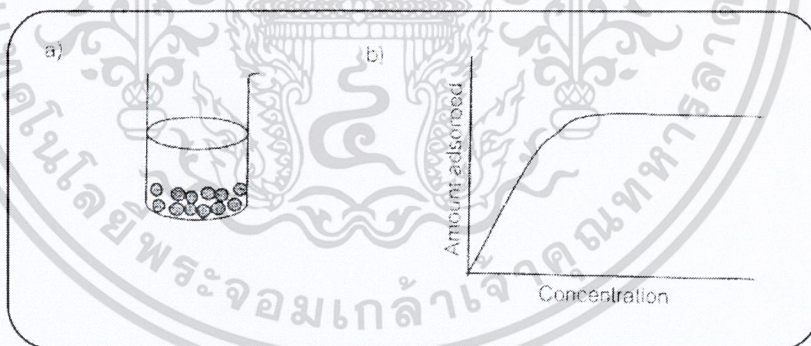
การเตรียมทำได้โดยการกละเคล้ากันของผงตัวรองรับกับสารละลายเกลือตามปริมาณที่เหมาะสมกับความต้องการก่อนทำปฏิกิริยา แต่ในบางกรณีตัวรองรับอาจจะต้องดูดไล่อากาศในตัวรองรับเพื่อแน่ใจว่าไม่มีอากาศในรูพรุน หลังจากนั้นจึงเติมสารละลายเบสเพื่อทำให้เกิดการตกตะกอน ขั้นตอนมาคือการกรองหรือการแยก แล้วล้างกำจัดสารต่างๆ ได้แก่ สารละลายเบส ซึ่งเป็นไอออนของสารตั้งต้น และสารที่จับอยู่บนผิวหน้าที่มากเกินไปออก



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีตกตะกอน

2.2 การดูดซับ

การดูดซับ คือ การนำเอาวัสดุที่เป็นตัวรองรับมาแช่ในสารละลายเกลือที่มีความเข้มข้นที่เหมาะสมกับการดูดซับ และการดูดซับจะให้ไอโซเทอม ดังรูป 2.8 (b) การดูดซับเป็นวิธีการที่เหมาะสมเมื่อต้องการปริมาณองค์ประกอบต่ำ ผงหรืออนุภาคจะถูกนำมากำจัดน้ำและทำให้ชุ่มในสารละลายที่เหมาะสมในเวลาที่เหมาะสม การจับแบบนี้จะสม่ำเสมอและองค์ประกอบกับมันต์จะเข้าไปจับในรูพรุนอย่างทั่วถึงระหว่างการทำให้ชุ่ม



รูปที่ 2.8 (a) การเตรียมโดยวิธีการดูดซับ

(b) ไอโซเทอมของการดูดซับของไอออนที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การดูดซับจากสารละลายอาจเป็นทั้งการดูดซับไอออนบวกหรือไอออนลบ ขึ้นกับสมบัติของผิวหน้า ตัวอย่างเช่น ซีโอไลต์เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนบวกที่ดี แต่ซิลิกาเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนบวกไม่ดี ส่วนอะลูมินาเป็นตัวดูดซับที่ไม่ดีทั้งไอออนบวกและไอออนลบ แมกนีเซียมเป็นตัวดูดซับไอออนลบที่ดี และคาร์บอนมักจะเกิดเป็นสารเชิงซ้อนที่มีการถ่ายโอนประจุ (Charge transfer complex) กับการให้อิเล็กตรอน แต่ดูดซับไอออนบวกได้บ้างเช่นกัน ถ้าไม่นับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซีโอไลต์ซึ่งมีกลไกการดูดซับที่ต่างออกไปแล้ว ลักษณะการดูดซับเชิงไอออนิกของหมู่ที่มีความสำคัญในเชิงการเร่งปฏิกิริยา

2.3 การแลกเปลี่ยนไอออน

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนจะเหมือนกับการดูดซับไอออนิกต่างกันเพียงแต่มีการแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นนอกเหนือจากโปรตอน ไอออนที่มีประจุต่ำ เช่น Na^+ จะแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีประจุสูงกว่า เช่น Ni^{2+} และมีสมมูลเกิดขึ้นดังนี้ (เมื่อให้ S คือ หมู่ฟังก์ชันชั้นใดๆ)



การแลกเปลี่ยนไอออนจะเกิดขึ้นได้ดี เมื่อไอออนตัวใหม่ที่เข้ามาแทนที่สามารถจับกับตัวรองรับได้แข็งแรงกว่าไอออนเดิม ส่วนใหญ่เมื่อพูดถึงการแลกเปลี่ยนไอออน เรามักจะนึกถึงการแช่ตัวรองรับลงในสารละลายของเกลือ โลหะที่ต้องการแลกเปลี่ยน แล้วรอนได้ปริมาณการแลกเปลี่ยนที่ต้องการ ข้อดีของการแลกเปลี่ยนไอออนคือจะได้รับการกระจายตัวของไอออนโลหะที่เป็นเนื้อเดียว แต่การแลกเปลี่ยนมีข้อจำกัด เนื่องจากใช้เวลานาน และเมื่อการแลกเปลี่ยนอิ่มตัวแล้วจะไม่สามารถเพิ่มปริมาณไอออนได้อีก

2.4 การทำให้เอิบชุ่ม (Impregnation)

เทคนิคการทำให้เอิบชุ่ม เป็นเทคนิคที่ง่ายและสะดวกที่สุด เพราะเป็นการจับตัวรองรับโดยตรง จุดประสงค์คือต้องการเติมรูพรุนด้วยสารละลายของเกลือ โลหะที่มีความเข้มข้นเพียงพอสำหรับค่าปริมาณโลหะที่ต้องการ สารละลายที่ใช้ต้องมีปริมาณที่จะเติมรูพรุนได้พอดีเรียกว่า ค่า Incipient wetness

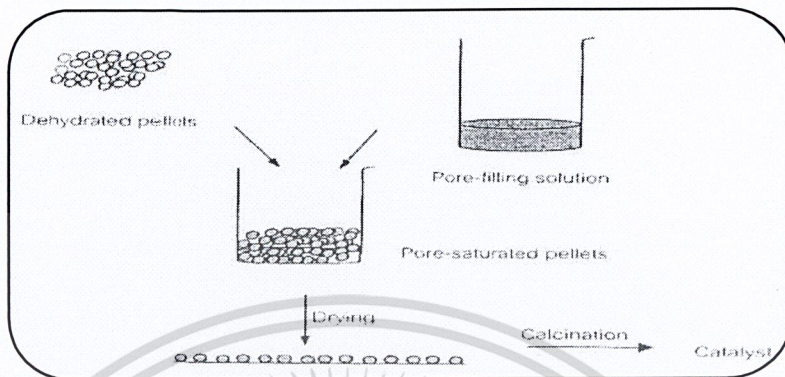
เริ่มจากการให้ความร้อนแก่ตัวรองรับหรือนำไปดูดอากาศออกด้วยสูญญากาศเพื่อกำจัดความชื้นในรูพรุน และทำให้การแพร่ของสารละลายเข้าไปในรูพรุนเกิดได้ดีขึ้น จากนั้นหยดสารละลายในปริมาณที่พอดีที่จะเติมในรูพรุน และทำให้ผิวหน้าภายนอกของตัวรองรับเปียกพอดีลงไปบนตัวรองรับ ซึ่งปริมาณดังกล่าวสามารถคำนวณได้ก่อนการเตรียมจากปริมาตรของรูพรุนหรือทำการทดสอบก่อน โดยใช้ตัวทำละลายหยดลงบนตัวรองรับที่ทราบปริมาณแน่นอนและทำการวัดปริมาตรที่ทำให้ตัวรองรับเปียกพอดี แล้วจึงนำปริมาตรตัวทำละลายที่ได้มาใช้ในการคำนวณความเข้มข้นของสารละลายเพื่อให้ได้ปริมาณโลหะตามที่ต้องการ

การทำให้แห้งจะทำให้เกิดการตกผลึกของเกลือบนผิวหน้าของรูพรุน ขั้นตอนนี้ถ้าไม่ระวังอาจจะทำให้เกิดการกระจายตัวของสารในรูพรุนไม่สม่ำเสมอ ถ้าการทำให้แห้งช้าเกินไปจะทำให้

สารละลายเคลื่อนลงไปอยู่ด้านล่างของรูพรุนเกิดการตกตะกอน ทำให้ผลึกที่ได้อยู่แต่ตอนล่าง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของรูพรุน ในทางตรงกันข้ามถ้าแห้งเร็วเกินไป สารละลายจะติดอยู่เฉพาะตอนบนของรูพรุน ทำให้ผลึกเกิดเฉพาะช่วงบนของรูพรุน การทำให้แห้งในอัตราเร็วที่พอเหมาะจะทำให้ได้ผลึกที่เท่าๆกัน



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีเอ็บซุ่ม

การแคลไซน์เป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพราะถ้าตัวเร่งปฏิกิริยาเจอกับความชื้นในอากาศ ผลึกในรูพรุนอาจจะละลายในน้ำที่เกิดควบแน่นได้ การแคลไซน์เป็นการเปลี่ยนเกลือโลหะให้อยู่ในรูปของโลหะหรือออกไซด์ และจะหยุดการกระจายของสารละลายได้

ขั้นสุดท้ายของการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา คือการเปลี่ยนวัสดุที่เปลี่ยนได้ให้เป็องค์ประกอบกัมมันต์ วัสดุที่เตรียมได้มักอยู่ในรูปออกไซด์ ดังนั้นถ้าสารที่ต้องการคือรูปที่เป็นออกไซด์อาจจะไม่ต้องทำการกระตุ้น แต่ถ้าต้องการในรูปโลหะจะต้องใช้ปฏิกิริยารีดักชัน และถ้าเป็นรูปซัลไฟด์ต้องใช้ปฏิกิริยาการเติมซัลไฟด์

3. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบอื่นๆ

1) Raney metal

ตัวเร่งปฏิกิริยาอีกแบบหนึ่ง คือ โลหะที่มีความว่องไวและมีรูพรุน (Active porous metal) ซึ่งเรียกว่า Raney metal โลหะที่เตรียมโดยวิธีนี้ ได้แก่ นิกเกิล เหล็ก โคบอลต์และทองแดง โลหะเหล่านี้สามารถเกิดเป็นอัลลอยกับอะลูมิเนียมได้ และส่วนที่เป็นอะลูมิเนียมสามารถล้างออกได้โดยสารละลายที่มีความสามารถในการกัดกร่อน (Caustic) ทำให้เหลือแต่ส่วนที่เป็นโลหะที่มีความพรุนและมีพื้นที่ผิวสูง

2) Reduced fused oxides

ตัวอย่างของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้คือ $Fe-Al_2O_3-K_2O$ ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการสังเคราะห์แอมโมเนีย ซึ่งสามารถเตรียมได้โดยการหลอม Fe_2O_3 , Al_2O_3 และ K_2O ในปริมาณที่พอเหมาะที่อุณหภูมิ 1500 °C เมื่อผสมกันดีแล้วทำให้เย็นลงก่อนที่จะนำมาบดและร่อนเพื่อใช้งาน โดยจะมีขนาดประมาณ 1-2 เซนติเมตร ขั้นตอนสุดท้ายคือ การรีดิวซ์ด้วยไฮโดรเจนเพื่อกำจัด

ออกซิเจนในโครงสร้าง Fe_3O_4 ทำให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กที่มีความพรุนสูง การยุบตัวของ
เอกสารนี้... ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างรูพรุนซึ่งมักเกิดขึ้นที่ 400-500 °C จะไม่เกิดขึ้นเพราะมีอะลูมินาซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกั้นช่องอยู่ ส่วน K_2O ทำหน้าที่เป็นตัวโปรโมเตอร์ โดยเชื่อกันว่ามันจะเข้าไปจับบนตำแหน่งที่เป็นกรด ซึ่งป้องกันการหลุดออกไปของแอมโมเนีย ทำให้เกิดตำแหน่งที่ว่างไว้ต่อปฏิกิริยา และเป็นตัวให้อิเล็กตรอนแก่เหล็ก ทำให้ในโตรเจนถูกดูดซับง่ายขึ้น

2.4 การดูดซับ (Adsorption) [10]

การดูดซับเป็นการทำให้ตัวถูกดูดซับเข้มข้นที่ผิวตัวดูดซับ ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับสัมผัสกับตัวถูกดูดซับ และชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นที่พื้นที่ผิวตัวถูกดูดซับ เนื่องจากแรงดึงดูดที่ผิวของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ หรือเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ

การดูดซับเกิดขึ้นเป็น 3 ระยะติดต่อกัน ได้แก่

ระยะที่ 1 โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในสารละลายจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับ

ระยะที่ 2 โมเลกุลตัวถูกดูดซับจะแพร่กระจาย (diffusion) เข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ

ระยะที่ 3 เกิดการดูดซับผิวในรูพรุนระหว่างตัวถูกดูดซับและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งอาจจะดูดซับผิวด้วยแรงทางกายภาพหรือทางเคมี หรือทั้ง 2 แรงพร้อมกัน

2.4.1 ลักษณะการดูดซับ

การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption or Physisorption) การดูดซับประเภทนี้จะไม่มีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอนและสามารถย้อนกลับได้ จะเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของตัวถูกดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้นต้องมีปริมาณของตัวถูกดูดซับมากกว่าตัวดูดซับและความร้อนที่ใช้ในการดูดซับ 1 กิโลแคลอรีต่อโมล เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ซึ่งมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับสารละลาย ดังนั้นตัวถูกดูดซับจะยึดติดแน่นบนผิวของตัวดูดซับ ถ้าตัวดูดซับมีรูพรุนสูง ของเหลวหรือก๊าซที่ควบแน่นนั้นจะซึมผ่านเข้าสู่ช่องว่างภายในของตัวดูดซับได้ ถึงแม้ว่าความดันของระบบจะต่ำกว่าความดันไอของระบบนั้นก็ตาม ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำ จะให้ความร้อนออกมาเล็กน้อยแต่มากกว่าความร้อนของการควบแน่น เมื่อลดความดันของระบบหรือลดอุณหภูมิลงจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง ทำให้ตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซับ ปรากฏการณ์ช่วงนี้เรียกว่า การคายการดูดซับ (desorption) ซึ่งเป็นวิธีการนำตัวดูดซับกลับมาใช้อีกครั้ง (reversible) การดูดซับนี้สารดูดซับจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมี การดูดซับทางกายภาพบางครั้งเรียกว่า การดูดซับแบบวานเดอร์วาลส์

(van der waals adsorption) แรงดึงดูดของการดูดซับทางกายภาพ เช่น แรงวานเดอร์วาลส์ รวมทั้งแรงไฟฟ้าสถิตบริเวณผิวรอบนอกของสารประกอบ

แรงวานเดอร์วาลส์ อะตอมที่อยู่อย่างอิสระหรือ โมเลกุลที่ไม่มีสภาพขั้ว สามารถเกิดแรงดึงดูดอ่อนๆได้ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบในอะตอมหรือโมเลกุล ทำให้มีความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในแต่ละบริเวณภายในอะตอมหรือโมเลกุลไม่เท่ากันมีผลให้เกิดสภาพขั้วขึ้น และสามารถถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับได้ การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานในการดูดซับต่ำจึงเป็นการเกาะจับกันด้วยแรงอ่อนๆ ดังนั้นการคายการดูดซับจะทำได้ง่ายซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย

แรงทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วเข้าด้วยกันหรือระหว่างสารที่ไม่มีขั้ว ซึ่งการเกาะจับโมเลกุลชนิดต่างๆเหล่านี้ เกิดขึ้นเนื่องจาก

1. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว เกิดจากการจัดเรียงโมเลกุล (Orientation effect) ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงข้ามกัน
2. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เกิดจากผลของการกระจาย (Dispersion effect) ซึ่งเป็นผลจากการที่โมเลกุลไม่มีขั้วสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้ เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปอยู่ด้านใดด้านหนึ่งมาก และเมื่อมีโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะเช่นเดียวกันเข้ามา ก็จะเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน มักเป็นแรงที่อ่อน เช่น อินทรีย์สารและถ่านกัมมันต์ ทั้งนี้เนื่องจากอินทรีย์สารส่วนใหญ่เป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว
3. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เป็นผลเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำ (Inductive effect) โดยโมเลกุลที่มีขั้วเข้ามาใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว แล้วเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ตรงกันข้าม ซึ่งทำให้เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกัน

การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption or Chemisorption) เป็นการดูดซับที่ตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับสร้างพันธะระหว่างกัน มีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของตัวถูกดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้นต้องขึ้นอยู่กับทั้งตัวถูกดูดซับและความร้อนที่ใช้ในการดูดซับ 50-100 กิโลแคลอรีต่อโมล ซึ่งแตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพทุกประการ โดยจะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ สร้างสารประกอบระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับที่พื้นผิวของตัวดูดซับ ทำให้ปริมาณของตัวดูดซับลดลง ซึ่งไม่ขึ้นกับความดันมากนักและดูดซับตัวถูกดูดซับไว้ในปริมาณอย่างน้อยหนึ่งหน่วยต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ เนื่องจากการดูดซับทางกายภาพเกิดขึ้นได้บนพื้นผิวทั้งหมด ปฏิกิริยานี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิปกติองค์ประกอบบางชนิดจะไม่เกิดการดูดซับทางเคมี แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะสามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้ แรงทางเคมีเกิดเนื่องจากการเกิดอัตรกิริยา (Interaction) ในช่วงสั้นๆ รวมถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนบริเวณผิวด้านใน ซึ่งจะเกิดกลไกการแลกเปลี่ยนลิแกนด์ (ligand exchange)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

2.4.2.1 ธรรมชาติของตัวดูดซับ (Nature of the adsorption) โดยเฉพาะพื้นที่ผิว และโครงสร้างของรูพรุน (Surface area and pore structure) และขนาดของตัวดูดซับ ในกรณีที่ตัวดูดซับไม่มีรูพรุน

พื้นที่ผิวเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ นั่นคือความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมากขึ้น อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ดี โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะถ้าขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับได้ การดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับได้ ความสามารถในการดูดซับก็จะต่ำลง

ในกรณีที่ตัวดูดซับไม่มีรูพรุนนั้น พื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของตัวดูดซับลดลง ซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้าตัวดูดซับมีรูพรุนมาก พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน เพราะฉะนั้นในกรณีนี้ความสามารถในการดูดซับจะไม่เกิดขึ้นกับวัตถุ

2.4.2.2 ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ (Nature of the adsorbate) ได้แก่ ความสามารถในการละลาย น้ำหนักและขนาดของโมเลกุล และความมีขั้วของโมเลกุล (polarity)

ตัวถูกดูดซับที่มีความสามารถในการละลายสูง จะถูกดูดซับได้น้อย เพราะก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับขึ้น จะต้องมีการทำลายพันธะระหว่างตัวถูกละลายและตัวทำละลายก่อน

เมื่อน้ำหนักและขนาดของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เช่น ถ้าโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเป็นสารอินทรีย์ เมื่อจำนวนคาร์บอนอะตอมมากขึ้น การดูดซับก็มากขึ้น เพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลจะเป็นผลทำให้ความสามารถในการละลายลดลง

ความสามารถในการดูดซับจะลดลง เมื่อสภาพขั้วของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มสภาพขั้ว จะทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น

2.4.2.3 สภาพแวดล้อม

ผลของอุณหภูมิของสารละลาย (Effect of temperature) เนื่องจากการยึดเกาะระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับเกี่ยวกับชนิดของพันธะที่ยึดเหนี่ยวกัน ดังนั้นการดูดซับจะเกิดได้มากหรือน้อย จึงขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ด้วย กล่าวคือ ถ้าปฏิกิริยาการดูดซับเป็นชนิดคายความร้อน การดูดซับจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่ในกรณีที่ปฏิกิริยาการดูดซับความร้อน ความสามารถในการดูดซับจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยนั้น

เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 แสดงสมบัติบางประการของโลหะหมู่ IA

สมบัติ	Li	Na	K	Rb	Cs
เลขอะตอม	3	11	19	31	55
การจัดเรียงอิเล็กตรอน	2 1	2 8 1	2 8 8 1	2 8 18 8 1	2 8 18 18 8 1
การจัดเรียงอิเล็กตรอน ในระดับพลังงานย่อย	[He] 2s ¹	[Ne] 3s ¹	[Ar] 4s ¹	[Kr] 5s ¹	[Xe] 6s ¹
มวลอะตอม	6.939	22.898	39.102	85.47	132.905
รัศมีอะตอมในโลหะ	152	186	227	248	265
รัศมีไอออน	60	95	133	148	169
ปริมาณของอะตอม	13.1	23.7	45.5	55.8	71
จุดหลอมเหลว	180	97.8	64	39	28.5
จุดเดือด	1317	892	774	688	690
ความร้อนแฝงของ การหลอมเหลว	2.89	2.6	2.32	2.3	2.1
ความร้อนแฝงของ การกลายเป็นไอ	135	98	79	76	68
พลังงานไฮเดรชัน	-498	-393	-310	-284	-251
ความหนาแน่น	0.53	0.97	0.86	1.53	1.87
อิเล็กโตรเนกาติวิตี	0.98	0.93	0.82	0.82	0.79
พลังงานไอออไนเซชัน ลำดับที่ 1	526	502	425	409	382
ปริมาณในธรรมชาติ	65	28300	25900	310	7

2.5.2 สารประกอบของธาตุหมู่ IA

ธาตุหมู่ IA มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาจึงไม่พบในรูปของธาตุอิสระแต่จะพบในรูปของสารประกอบต่างๆมากมาย เช่น LiCl, NaCl, KCl, NaNO₃, KNO₃, NaHCO₃ เป็นต้น

สารประกอบของธาตุหมู่ IA ที่พบมากที่สุด คือ สารประกอบของธาตุโซเดียม เช่น เกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ในน้ำทะเล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติบางประการของสารประกอบของธาตุหมู่ IA มีดังนี้

1. สารประกอบของโลหะหมู่ IA ละลายน้ำได้ดี
2. มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูง เนื่องจากมีพันธะไอออนิก
3. เมื่อหลอมเหลวหรือละลายน้ำแล้ว จะเป็นสารละลายที่นำไฟฟ้าได้
4. สารประกอบคลอไรด์ของธาตุหมู่ IA เมื่อละลายน้ำเป็นสารละลายที่มีสมบัติเป็นกลาง ส่วนสารประกอบออกไซด์ ซัลไฟด์ และไฮไดรด์ของธาตุหมู่ IA เมื่อละลายน้ำเป็นสารละลายที่มีสมบัติเป็นเบส

2.5.3 ประโยชน์ของธาตุหมู่ IA

Na ใช้ถ่ายเทความร้อนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู เพราะนำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดีรวมทั้งราคาไม่แพง

Cs ใช้ทำโฟโตเซลล์สำหรับเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า

Na ใช้บรรจุในท่อพอลิเอทิลีน สำหรับใช้แทนสายเคเบิล เพราะโลหะโซเดียมมีน้ำหนักเบา ราคาถูกกว่า และประสิทธิภาพดีกว่า

2.6 แมกนีเซียมออกไซด์ [12]

แมกนีเซียมออกไซด์ หรือแมกนีเซียม มีลักษณะเป็นของแข็ง สีขาว เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มีสูตรโครงสร้างโมเลกุลคือ MgO ซึ่งเกิดจากการสร้างพันธะไอออนิกระหว่างอะตอมของแมกนีเซียมและอะตอมของออกซิเจน แมกนีเซียมออกไซด์เป็นธาตุที่ว่องไวต่อความชื้นมาก โดยจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการ



ซึ่งปฏิกิริยานี้สามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้โดยการให้ความร้อน

2.6.1 การประยุกต์ใช้

- ปูนซีเมนต์ (Cement)

แมกนีเซียมออกไซด์เป็นหนึ่งในวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ โดยในการผลิตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่ผสมแมกนีเซียมออกไซด์จะต้องผสมแร่เซอร์เพนทีไนท์และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย ซึ่งจะเป็นการช่วยลดการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อีกทางหนึ่ง

- สารดูดความชื้น (Desiccant)

แมกนีเซียมออกไซด์สามารถนำไปใช้เป็นตัวดูดความชื้นได้ ซึ่งจะนำไปใช้ในห้องสมุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เพื่อรักษาหนังสือต่างๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การแพทย์ (Medical)

ทางการแพทย์ ได้นำแมกนีเซียมออกไซด์มาใช้ในการบรรเทาอาการเจ็บปวดในช่องท้อง กระเพาะอาหารอักเสบ ลดกรดในกระเพาะอาหาร และใช้เป็นยาระบายอ่อนๆ นอกจากนี้ยังช่วยให้อาการอาหารไม่ย่อยดีขึ้น แต่แมกนีเซียมออกไซด์อาจส่งผลข้างเคียง เช่น อาการคลื่นไส้ หรือการเป็นตะคริว และหากใช้เป็นยาระบายในระยะยาว อาจทำให้ลำไส้อุดตันได้

- อื่นๆ

แมกนีเซียมออกไซด์ถูกนำไปใช้เป็นฉนวนในอุตสาหกรรมเคเบิล ใช้ทำครุชชีเบล ใช้ทำวัสดุก่อสร้างที่ทนไฟ และยังใช้ทำผนัง เนื่องจากแมกนีเซียมออกไซด์มีคุณสมบัติทนไฟ ทนต่อเชื้อรา และยังมีความแข็งแรงอีกด้วย

นำไปใช้ในอุตสาหกรรมสี เนื่องจากแมกนีเซียมออกไซด์มีคุณสมบัติในการกระจายแสง และสะท้อนแสงได้ดี

นำไปใช้ในอุปกรณ์ในความร้อนไฟฟ้า โดยการนำแมกนีเซียมออกไซด์มาอัดให้แน่น และเหลือช่องว่างเพียงเล็กน้อย เนื่องจากแมกนีเซียมออกไซด์มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า

ใช้เป็นวัสดุเกี่ยวกับทางด้านกรมองเห็น เนื่องจากแมกนีเซียมออกไซด์มีความโปร่งใส มีค่า refractive index ต่ำ

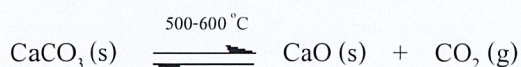
และนอกจากนี้ยังสามารถนำแมกนีเซียมออกไซด์ไปประยุกต์ในด้านต่างๆ ได้อีกมากมาย

2.6.2 ข้อควรระวัง

แมกนีเซียมออกไซด์ง่ายต่อการทำให้ไหม้ โดยการถูกออกซิไดซ์ด้วยแสง ซึ่งเปลวไฟที่เกิดขึ้นจะดับได้ยากมาก และนอกจากนั้นหากสูดควันของแมกนีเซียมที่เกิดขึ้น อาจทำให้เราไม่สบายได้

2.7 แคลเซียมออกไซด์ [13]

แคลเซียมออกไซด์ มีลักษณะเป็นผลึกของแข็ง สีขาว มีจุดหลอมเหลวเท่ากับ 2572 องศาเซลเซียส สามารถผลิตได้จากการให้ความร้อนกับหินปูน ปะการัง หอยทะเล หรือชอล์ก ซึ่งส่วนใหญ่จะผลิตมาจากแคลเซียมคาร์บอเนต สามารถแสดงได้ดังสมการ



ปฏิกิริยานี้สามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ โดยการให้แคลเซียมออกไซด์ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไดออกไซด์ ก็จะเกิดเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต

ในการผลิตแคลเซียมออกไซด์จากหินปูนเป็นหนึ่งในกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของผลิตภัณฑ์จากเหมืองที่เก่าที่สุด ภาษาที่เก่าแก่ที่สุดหลายภาษาได้เรียกแคลเซียมออกไซด์ในชื่อที่ต่าง ๆ กัน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไป ในภาษาลาตินเรียกว่า “calx” ซึ่งมาจากชื่อของธาตุแคลเซียม ในภาษาอังกฤษเรียกว่า “lim” ซึ่งมาจาก lime ที่เป็นชื่อทางการค้าของแคลเซียมออกไซด์ ในปัจจุบันนี้ได้มีการผลิตแคลเซียมออกไซด์มาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆกันอย่างกว้างขวาง ซึ่งมีการผลิตมากกว่า 22 ล้านตันในประเทศสหรัฐอเมริกาในปี.ศ. 2000

ในอดีตมีการนำแคลเซียมออกไซด์มาทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ เกิดเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต เมื่อนำแคลเซียมออกไซด์มาผสมกับน้ำและทราย จะได้เป็นปูนก่อสร้าง (mortar) ซึ่งจะนำไปใช้ในงานก่อสร้างร่วมกับอิฐและหิน ปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมออกไซด์กับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิห้องจะเกิดปฏิกิริยาได้ช้ามาก แต่หากเรานำแคลเซียมออกไซด์ไปผสมกับน้ำ จะเกิดเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์เรียกว่า “slaked lime”



ปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับคาร์บอนไดออกไซด์เกิดเร็วกว่า

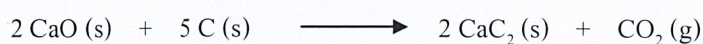


ปฏิกิริยานี้เป็นการเพิ่มความเร็วในการเกิดปฏิกิริยา ปูนก่อสร้าง มีความต้องการมากขึ้น นอกจากนี้แคลเซียมออกไซด์ยังได้ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้างต่างๆ รวมถึงปูนพลาสติกและปูนพอร์ตแลนด์

เมื่อนำแคลเซียมออกไซด์ไปให้ความร้อนร่วมกับทราย (SiO_2) และ โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จะไม่เป็นผลึกเมื่อให้ความเย็น มีลักษณะเป็นของแข็ง ใส ไม่มีสี เรียกว่า แก้ว เนื่องจากเป็นวัสดุที่ได้จากการผสม จึงทำให้แก้วมีจุดหลอมเหลวที่ไม่แน่นอน แต่จะอ่อนลงเมื่อให้ความร้อน ดังนั้นเราสามารถกำหนดรูปร่างของแก้วได้ โดยการใช้แม่พิมพ์หรือการเป่า

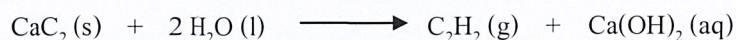
แคลเซียมออกไซด์กว่า 45% ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเหล็กกล้า ซึ่งเหล็กกล้าและเหล็กสามารถผลิตได้จากสินแร่ที่มีออกไซด์ของเหล็ก มีสินแร่จำนวนมากที่มีองค์ประกอบเป็นซิลิเกต ซึ่งเมื่อนำแคลเซียมออกไซด์มารวมกับสินแร่แล้วหลอม ซิลิเกตจะรวมตัวกับแคลเซียมออกไซด์เกิดเป็นสแลค (slag) ซึ่งสแลคนี้จะไม่รวมตัวกับเหล็กที่หลอมเหลว ดังนั้นซิลิเกตจะแยกตัวออกจากสแลค โดยประมาณ 80 กิโลกรัมของแคลเซียมออกไซด์จะถูกใช้ในการผลิตเหล็ก 1000 กิโลกรัม

แคลเซียมออกไซด์เป็นวัตถุดิบที่สำคัญในอุตสาหกรรมเคมี ซึ่งจะเป็นนำไปใช้ผลิตแคลเซียมคาร์ไบด์ (CaC_2) โดยการนำแคลเซียมออกไซด์มาให้ความร้อนร่วมกับถ่านหิน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแคลเซียมคาร์ไบด์ทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดเป็นอะเซทิลีน (C_2H_2)

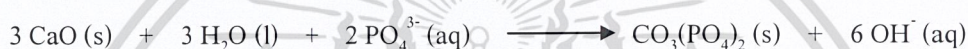


อะเซทิลีนเป็นเชื้อเพลิงที่สำคัญ และยังใช้เป็นสารตั้งต้นของไวนิลคลอไรด์, นิโอพรีน และอะคริโลไนไทรล์ ซึ่งจะนำไปใช้ในการผลิตพอลิเมอร์

การใช้แคลเซียมออกไซด์กำจัดมลพิษทางอากาศ โดยการนำไปใช้เป็นตัวกรองอากาศที่มีซัลเฟอร์ไดออกไซด์ถูกปลดปล่อยออกมา



นอกจากนี้ยังใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เพื่อกำจัดฟอสเฟต



นอกจากนี้แคลเซียมออกไซด์ยังถูกนำไปประยุกต์ในด้านต่างๆอีกมากมาย

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

S.T. Keera และคณะ [14] ศึกษาเกี่ยวกับการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันเมล็ดฝ้าย โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวแปรที่มีผลต่อลักษณะและร้อยละของไบโอดีเซลที่ทำการศึกษาได้แก่ เวลาในการทำปฏิกิริยา (1-3 ชั่วโมง), ความเข้มข้นของเบสบนตัวเร่งปฏิกิริยา (0.5-1.5 %w/wt) และอัตราส่วนของน้ำมันต่อเมทานอล (1:3 - 1:9) ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าร้อยละของผลผลิตที่ได้สูงสุด คือใช้อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นหาปริมาณของเมทิลเอสเทอร์ ด้วยเครื่อง HPLC และหาส่วนประกอบของเมทิลเอสเทอร์ ด้วยเครื่อง Gas chromatography ซึ่งจากผลที่ได้ไบโอดีเซลที่ผลิตได้อยู่ในมาตรฐาน

Xuejun Liu และคณะ [15] ศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลืองเป็นไบโอดีเซล โดยใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา กลไกปฏิกิริยาถูกเสนอและแสดงให้เห็นถึงผลของอัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมัน อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา และอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันและน้ำ พบว่าอัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 12:1 ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 8 อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่ 65 องศาเซลเซียส และปริมาณน้ำในเมทานอลร้อยละ 2.03 จะให้ร้อยละของไบโอดีเซลมากกว่าร้อยละ 95 ในเวลา 3 ชั่วโมง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผลิตได้ยังมีอายุการใช้งานมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$ และ $KF/\gamma-Al_2O_3$ โดยเคลือบออกไซด์ยังคงมีประสิทธิภาพหลังจากการใช้งานซ้ำๆ จำนวน 20 ครั้ง

Zhenzhong Wen และคณะ [16] ศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมลิเทียมบนแมกนีเซียมออกไซด์ เพื่อสังเคราะห์ไบโอดีเซล พบว่าประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาจะขึ้นกับองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิของการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา จากผลการทดลองพบว่าถ้ามีเบสแก่ โดยเฉพาะลิเทียมอยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้ได้ร้อยละของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น และยังพบว่าอัตราส่วนของลิเทียมต่อแมกนีเซียมเป็น 0.08 และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา 823 เคลวิน ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพสูงสุด และร้อยละของไบโอดีเซลจะลดลงเมื่ออัตราส่วนของลิเทียมต่อแมกนีเซียมสูงเกินกว่า 0.08 ทั้งนี้เกิดจากลิเทียมไฮดรอกไซด์ที่มาจากไอออนของลิเทียมมีมากเกินไป นอกจากนี้อัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ยังส่งผลต่อประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

ร.ต. หญิง ญัฐมณฑน์ ลีจินดา และคณะ [17] ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันดีเซลจากไขปาล์มสเตียรีน (palm stearin) มาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซล เนื่องจากไขปาล์มสเตียรีนเป็นผลผลิตจากการเกษตรที่สามารถผลิตได้ภายในประเทศ มีราคาถูกและให้ค่าความร้อนสูง โดยนำมาผ่านกระบวนการทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชัน ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เนื่องจากราคาถูกและให้ผลผลิตสูง แต่มีข้อเสียในกระบวนการผลิต คือ จำเป็นต้องมีกระบวนการล้าง (washing) เพื่อแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ด้วยน้ำ ซึ่งน้ำจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้กับปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน มีผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาบางส่วนไปรวมตัวกับกรดไขมันอิสระที่เหลือเกิดเป็นสบู่ ทำให้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหลือน้อยลงสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชัน ทำให้ผลผลิตของไบโอดีเซลนั้นได้น้อยกว่าที่คาดหวัง จึงได้ศึกษาแนวทางการผลิตไบโอดีเซลจากไขปาล์มสเตียรีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ ซึ่งจะไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันกับสารตั้งต้นเพื่อกำจัดปัญหาการเกิดสบู่ในกระบวนการล้างออกไป เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์นี้ สามารถแยกออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่ายโดยการกรอง จึงถือว่าเป็นกระบวนการผลิตที่ไม่ต้องผ่านขั้นตอนการล้าง ซึ่งเป็นการลดขั้นตอนในการผลิต และลดต้นทุนของการผลิตไบโอดีเซลได้อีกทางหนึ่ง

D. Martin Alonso และคณะ [18] ศึกษาเกี่ยวกับผลของปริมาณลิเทียมและอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาลิเทียมบนเคลือบออกไซด์ที่ใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชันระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับเมทานอลและความเป็นเนื้อเดียวกัน ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการศึกษามีปริมาณลิเทียมที่แตกต่างกัน โดยเมื่อความเข้มข้นของลิเทียมมากกว่าร้อยละ 3.6 โดยน้ำหนัก ลิเทียม

จะเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยา ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า เมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 4.5 ต้องใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นที่สูงกว่าจุดหลอมเหลวของลิเทียมไนเตรต (492 เคลวิน) เพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเร่งปฏิกิริยาได้ดียิ่งขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นพบว่าความเป็นเนื้อเดียวกัน และการกำจัดลิเทียมออกไปขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นที่มากกว่า 973 เคลวิน (87% ใน 3 ชั่วโมง) อย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อลิเทียมออกไซด์เกิดขึ้นบนตัวเร่งปฏิกิริยา ความเป็นเนื้อเดียวกันจะมีความสัมพันธ์ที่น้อยลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นที่น้อยกว่า 773 เคลวิน ซึ่งลิเทียมไนเตรตจะไม่สลายตัวไป ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นควรอยู่ระหว่าง 773 ถึง 973 เคลวิน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

- 1) น้ำมันปาล์ม บริษัท มรกต อินดัสตรีส์ จำกัด
- 2) แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide, MgO) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
- 3) แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide, CaO) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Fluka Analytical
- 4) ลิเทียมไนเตรด (Lithium nitrate, LiNO₃) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Himedia Laboratories
- 5) โซเดียมไนเตรด (Sodium nitrate, NaNO₃) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Ajax Finechem
- 6) เมทานอล (Methanol, CH₃OH) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Fisher Scientific
- 7) แอนไฮไดรอสโซเดียมซัลเฟต (Anhydrous sodium sulfate, NaSO₄) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Fisher Scientific
- 8) น้ำกลั่น
- 9) น้ำมันพาราฟิน

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 1) เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier-Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น FT-IR SPECTRUM GX
- 2) เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier-Transform Nuclear Magnetic Resonance Spectrophotometer, FT-NMR) ยี่ห้อ BRUKER รุ่น Advance DPX 300
- 3) เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (X-ray Fluorescence Spectrophotometer, XRF) ยี่ห้อ Philips รุ่น PW2004
- 4) เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (X-ray Diffraction Spectrophotometer, XRD) ยี่ห้อ Siemens รุ่น D8 Advance
- 5) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1450 VP
- 6) แท่นให้ความร้อน (Hotplate)
- 7) ไม้พีดปั้นกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 8) Water bath
- 9) เครื่องชั่งไฟฟ้าละเอียด 2 ตำแหน่ง
- 10) ขวดกั้นกลมสามคอ
- 11) คอนเดนเซอร์
- 12) เทอร์โมมิเตอร์
- 13) เครื่องแก้ว
- 14) ตู้อบสาร
- 15) เตาเผา
- 16) ชุดกรองลดความดัน
- 17) กระดาษลิทมัส

3.3 วิธีการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

- 1) การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา และวิเคราะห์คุณสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยา ลิเทียม ไนเตรตบนแมกนีเซียมออกไซด์ (LiNO_3/MgO) ตัวเร่งปฏิกิริยา ลิเทียมไนเตรตบนแคลเซียมออกไซด์ (LiNO_3/CaO) โซเดียมไนเตรตบนแมกนีเซียมออกไซด์ (NaNO_3/MgO) และโซเดียมไนเตรตบนแคลเซียมออกไซด์ (NaNO_3/CaO) ทั้งแคลเซียมและไมแคลไซน์ วิธีที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา คือ วิธีทำให้เอิบซุ่ม
- 2) การสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์
- 3) การทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเมทิลเอสเทอร์

3.3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาและการวิเคราะห์คุณสมบัติ

- 1) ชั่งตัวรองรับ (แมกนีเซียมออกไซด์ หรือแคลเซียมออกไซด์) จำนวน 25 กรัม นำไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง
- 2) ชั่งเกลือไนเตรต (ลิเทียมไนเตรต หรือโซเดียมไนเตรต) ตามความเข้มข้นที่ต้องการ (5%, 10%, 15% และ 20% โดยน้ำหนัก) ละลายด้วยน้ำกลั่นปริมาณ 30 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 3) นำตัวรองรับที่อบแล้ว 25 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ แล้วเทสารละลายเกลือไนเตรตที่เตรียมไว้ลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) นำของผสมในข้อ 3 ไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (หรือจน น้ำแห้ง) จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ได้ผ่านการแคลไซน์
- 5) ถ้าต้องการตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการแคลไซน์ ให้ นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่อบแล้วในข้อ 4 ไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส [18] นาน 5 ชั่วโมง
- 6) เมื่อครบเวลา นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้เก็บใส่เดซิเคเตอร์
- 7) นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ไปทำการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (X-ray Fluorescence Spectrophotometer, XRF) และเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (X-ray Diffraction Spectrophotometer, XRD) และตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

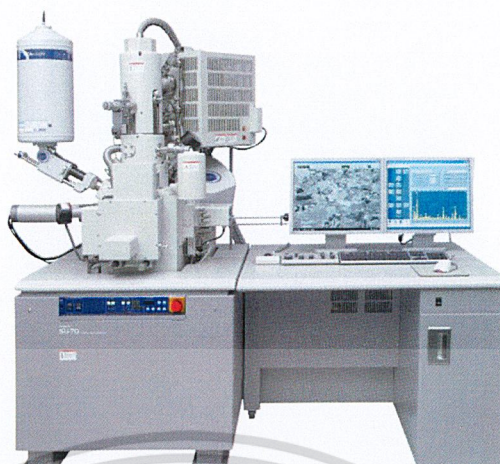


รูปที่ 3.1 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (XRF)



รูปที่ 3.2 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (XRD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.3.2 การสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์

- 1) นำเมทานอลตามอัตราส่วน โดยโมลต่อน้ำมันปาล์มตามที่กำหนด และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากตอนที่ 1 ใส่ลงในขวดสามคอ ที่ประกอบไปด้วยใบพัดปั่นกวน เทอร์โมมิเตอร์ และคอนเดนเซอร์ โดยให้ความร้อนจากอ่างน้ำมันพาราฟิน ดังรูปที่ 3.4 ทำการปั่นกวน และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 3.4 แสดงการตั้งอุปกรณ์สำหรับการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์

- 2) เติมน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิที่อุณหภูมิเท่ากับ 60 ± 5 องศาเซลเซียส ลงในขวดสามคอ จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

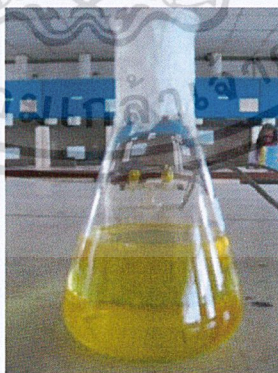
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) เมื่อครบเวลาของการทำปฏิกิริยาแล้ว เทของผสมที่ได้ใส่กรวยแยก แล้วตั้งทิ้งไว้เพื่อให้เกิดการแยกชั้น โดยชั้นบนสุดจะเป็นชั้นของเมทิลเอสเทอร์ มีลักษณะเป็นของเหลวสีเหลืองใสคล้ายน้ำมัน ส่วนชั้นล่างสุดเป็นชั้นของกลีเซอรอล มีลักษณะเป็นของเหลวหนืดสีน้ำตาล ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงการแยกชั้นของสารละลายในกรวยแยก

- 4) โขแยกชั้นกลีเซอรอลออกไป แล้วกรองแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน
- 5) สร้างชั้นเมทิลเอสเทอร์ด้วยน้ำกลั่นจนได้ชั้นเมทิลเอสเทอร์ที่มีลักษณะบุนเล็กน้อยและมีสภาพเป็นกลาง โดยทดสอบด้วยกระดาษยูนิเวอร์แซลอินดิเคเตอร์
- 6) คูดน้ำที่ปะปนกับเมทิลเอสเทอร์ โดยใช้แอนไฮดริส โซเดียมซัลเฟต จะได้เมทิลเอสเทอร์ที่ใส จากนั้นกรองแอนไฮดริส โซเดียมซัลเฟตออกไป ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงเมทิลเอสเทอร์ที่ผ่านการคูดน้ำด้วยแอนไฮดริส โซเดียมซัลเฟต

- 7) นำเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ไปขังน้ำหนักและหาว้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ด้วยเทคนิคฟูเรียรานฟอรัม นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโตรสโกปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองที่ 3.3.1 (ตาราง 3.1) จะทำการศึกษาอิทธิพลของชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการแคลไซน์ และไม่ผ่านการแคลไซน์ โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายเกลือโลหะ 10% โดยน้ำหนัก และเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 3% เมื่อเทียบกับน้ำหนักน้ำมันพืช จากนั้นเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุด มาทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมต่อไป ดังแสดงในตารางที่ 3.2, 3.3 และ 3.4

ตารางที่ 3.1 ศึกษาผลของชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์

การทดลองที่	ตัวเร่งปฏิกิริยา	การแคลไซน์	ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะ (%w/w)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%)
1	LiNO ₃ /MgO	แคลไซน์	10	3
2	LiNO ₃ /MgO	ไม่แคลไซน์	10	3
3	LiNO ₃ /CaO	แคลไซน์	10	3
4	LiNO ₃ /CaO	ไม่แคลไซน์	10	3
5	NaNO ₃ /MgO	แคลไซน์	10	3
6	NaNO ₃ /MgO	ไม่แคลไซน์	10	3
7	NaNO ₃ /CaO	แคลไซน์	10	3
8	NaNO ₃ /CaO	ไม่แคลไซน์	10	3

หมายเหตุ อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 เวลาของปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง และ อุณหภูมิ 60±5 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3.2 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะที่มีต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์

การทดลองที่	ตัวเร่งปฏิกิริยา	ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะ (%w/w)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%)
1	เลือกตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์สูงสุด จากตารางที่ 3.1	5	3
2		10	3
3		15	3
4		20	3

หมายเหตุ อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 เวลาของปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง และ

อุณหภูมิ 60±5 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์

การทดลอง ที่	ตัวเร่งปฏิกิริยา	ความเข้มข้นของสารละลาย เกลือของโลหะ (%w/w)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%)
1	เลือกตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ ร้อยละเมทิลเอสเทอร์สูงสุด จากตารางที่ 3.1	เลือกความเข้มข้นของ สารละลายเกลือของโลหะ ที่ให้ร้อยละ เมทิลเอสเทอร์สูงสุด จากตารางที่ 3.2	1
2			2
3			3
4			4
5			5

หมายเหตุ อัตราส่วน โดย โมลเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 เวลาของปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง และ อุณหภูมิ 60±5 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3.4 ศึกษาผลของอัตราส่วน โดย โมลเมทานอลต่อน้ำมันที่มีต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์

การ ทดลองที่	อัตราส่วนโดยโมล เมทานอลต่อน้ำมัน	ตัวเร่งปฏิกิริยา	ความเข้มข้นของสารละลาย เกลือของโลหะ (%w/w)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%)
1	6:1	เลือกตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ สูงสุด จากตารางที่ 3.1	เลือกความเข้มข้นของ สารละลายเกลือของโลหะ ที่ให้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ สูงสุด จากตารางที่ 3.2	เลือกปริมาณตัวเร่ง
2	9:1			ปฏิกิริยาที่ให้ร้อยละ
3	10:1			เมทิลเอสเทอร์สูงสุด
4	12:1			จากตารางที่ 3.3

หมายเหตุ เวลาของปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง และอุณหภูมิ 60±5 องศาเซลเซียส

3.3.3 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 8 ชนิดในตารางที่ 3.1 จะถูกนำไปวิเคราะห์ตามคุณลักษณะดังต่อไปนี้

- 1) ความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (X-ray Diffraction Spectrophotometer, XRD)
- 2) องค์ประกอบของธาตุบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (X-ray Fluorescence Spectrophotometer, XRF)
- 3) สัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสาร (Scanning Electron Microscope, SEM) เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยา

โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยา 1 กรัม ใส่ลงในน้ำกลั่นปริมาณ 25 กรัม แล้วปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นกรองตัวเร่งปฏิกิริยาออก แล้วนำสารละลายที่กรองได้มาไทเทรตกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลาร์

3.3.4 การทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเมทิลเอสเทอร์

เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากสภาวะที่ดีที่สุด ในตาราง 3.1, 3.2, 3.3 และ 3.4 จะนำมาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีดังนี้

- 1) ค่าความเป็นกรด (Acid value)
- 2) เลขไอโอดีน (Iodine value)
- 3) ศึกษาลักษณะทางเคมีของไบโอดีเซล โดยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fouier-Transform Infrared, FT-IR) และเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fouier-Transform Nuclear Magnetic Resonance Spectrophotometer, FT-NMR)



รูปที่ 3.7 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (FT-NMR)

3.3.4.1 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (Acid value) [19]

โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

- 1) ใส่เอทานอลกับอีเทอร์อย่างละ 10 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปกรวยเขย่าให้เข้ากันเติมฟีนอล์ฟทาลิน 3-4หยด แล้วทำให้ตัวละลายเป็นกลางด้วยการเติมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จนเห็นเป็นสีชมพูอ่อนๆ (ไม่ต้องจดปริมาณ)
- 2) นำขวดดังกล่าวไปวางบนเครื่องชั่ง ปรับน้ำหนักให้เป็นศูนย์ แล้วเติมน้ำมันประมาณ 5 กรัม ลงไป เขย่าและไทเทรตด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) จนถึงจุดยุติ ซึ่งได้สารละลายสีชมพูคงตัว (5-10 นาที)
- 3) จดปริมาตรค้างที่ใช้ไทเทรต แล้วนำไปคำนวณหาค่าความเป็นกรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณ

ให้ g เป็นจำนวนกรัมของน้ำมันที่ใช้

ให้ V เป็นจำนวนมิลลิลิตรของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต

$$\text{จำนวนโมลของ KOH ที่ใช้} = 0.01V / 1000$$

$$\begin{aligned} \text{จำนวนมิลลิกรัมของ KOH} &= (0.01V / 1000) \times MW_{\text{KOH}} \times 1000 \\ &= (0.01V) \times 56 \end{aligned}$$

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

3.3.4.2 การวิเคราะห์หาเลขไอโอดีน (Iodine value) [19]

การเตรียมสารละลายฮานส์ไอโอดีน

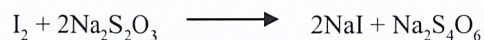
ละลายไอโอดีน 13.2 กรัม ในกรดอะซิติก 1 ลิตร นำไปอุ่นให้ร้อนเพื่อช่วยให้ไอโอดีนละลายดีขึ้น เก็บสารละลายที่ได้ไว้ในขวดสีชาที่มีฝาปิดแน่น

ขั้นตอนการวิเคราะห์หาเลขไอโอดีนมีดังนี้

- 1) นำขวดรูปกรวย (ล้างภายในด้วยคลอโรฟอร์ม) วางบนเครื่องชั่งปรับน้ำหนักให้เป็นศูนย์เดิม น้ำมันประมาณ 0.3-1 กรัม
- 2) เติมคลอโรฟอร์ม 10 มิลลิลิตร แล้วเปิดสารละลายฮานส์ไอโอดีน 20 มิลลิลิตร ลงไปในขวด แล้วปิดจุกเขย่าให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ในที่มีด 45 นาที (ให้ทำขวดเปรียบเทียบแบบลงค้ไปพร้อมกัน โดยทำเช่นเดียวกันแต่ไม่ใส่น้ำมัน)
- 3) เติมโพแทสเซียมไอโอไดด์ลงไป 10 มิลลิลิตร แล้วเขย่าเพื่อให้ทำปฏิกิริยากับฮานส์ไอโอดีนที่เหลืออยู่ในชั้นคลอโรฟอร์ม ซึ่งจะได้อิโอดีนออกมาอยู่ในชั้นของโพแทสเซียมไอโอไดด์ (เห็นสารละลายเป็นสีน้ำตาลเข้ม)
- 4) ใช้น้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร ละลายไอโอดีนที่ติดอยู่ที่ผนังขวดและฝาให้หมดแล้วรีบปิดฝา
- 5) นำไปไทเทรตกับ โซเดียมไทโอซัลเฟตจนสีของไอโอดีนจางลง (เห็นเป็นสีน้ำตาลจางๆ อมเหลือง) แสดงว่าเหลือไอโอดีนอีกเพียงเล็กน้อย จึงเติมน้ำแป้งลงไปประมาณ 0.5-1 มิลลิลิตร สารละลายจะเป็นสีน้ำเงินแล้วไทเทรตต่อจนสีน้ำเงินหายไป จดปริมาตรไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณ



ให้ A = มิลลิลิตรของโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตขวดตัวอย่าง

B = มิลลิลิตรของโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตขวดเปรียบเทียบ

จากสมการ 1 โมลของไอโอดีน = 2 โมลของโซเดียมไทโอซัลเฟต

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

น้ำหนักโมเลกุลของไอโอดีน = 254

จำนวนกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดด้วยไขมัน = $\frac{1}{2} [0.2 (B-A) / 1000] \times 254$

= $2.54/100(B-A)$

เนื่องจาก เลขไอโอดีน = จำนวนกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดด้วยไขมัน 100 กรัม

g = จำนวนกรัมของน้ำมันที่ใช้

ดังนั้น เลขไอโอดีน = $[2.54/100(B-A)] \times 100/g$

= $2.54(B-A) / g$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มกับเมทานอล โดยใช้เกลือในเตรตของโลหะแอลคาไลน์บนตัวรองรับออกไซด์ของโลหะแอลคาไลน์เอิร์ทเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการนำเสนอผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลองของงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 4 ตอนคือ ตอนที่ 1 การสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์โดยใช้เกลือในเตรตของโลหะแอลคาไลน์บนตัวรองรับออกไซด์ของโลหะแอลคาไลน์เอิร์ทเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยศึกษาถึงตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์ ได้แก่ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช ตอนที่ 2 การศึกษาลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ ได้แก่ ความเป็นผลึก องค์ประกอบบนพื้นผิว สัณฐานวิทยา และความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยา ตอนที่ 3 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ ได้แก่ เลขไอโอดีน และค่าความเป็นกรด และตอนที่ 4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีของเมทิลเอสเทอร์

4.1 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์

4.1.1 ผลของชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์

ในการศึกษาผลของชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์ จะกำหนดให้ ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะคงที่ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา คงที่ที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยา 60 ± 5 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 4.1

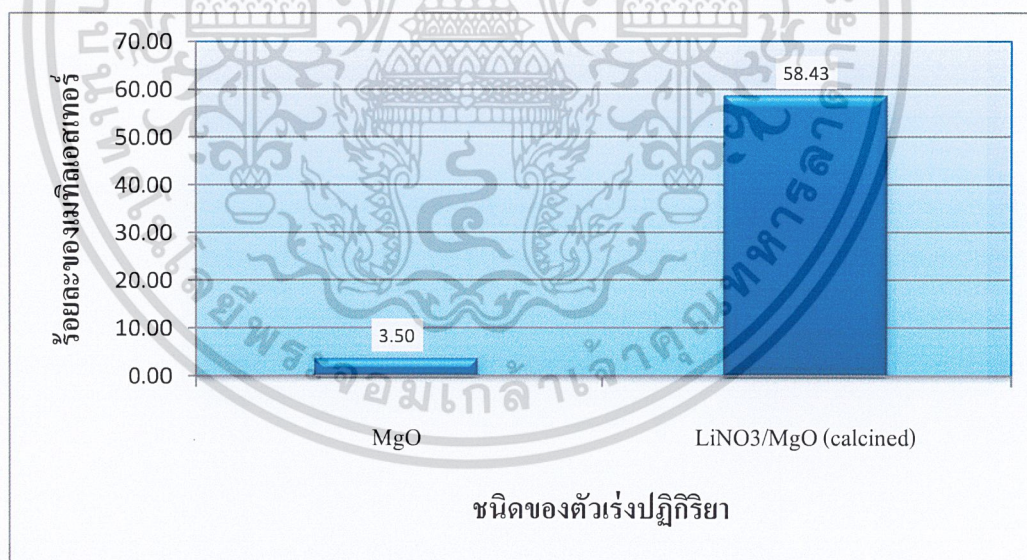
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลของชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์

การทดลองที่	ตัวเร่งปฏิกิริยา	การแคลไซน์	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์
1	LiNO ₃ /MgO	แคลไซน์	58.43
2	LiNO ₃ /MgO	ไม่แคลไซน์	0.00
3	LiNO ₃ /CaO	แคลไซน์	102.50
4	LiNO ₃ /CaO	ไม่แคลไซน์	92.42
5	NaNO ₃ /MgO	แคลไซน์	0.00
6	NaNO ₃ /MgO	ไม่แคลไซน์	0.00
7	NaNO ₃ /CaO	แคลไซน์	99.57
8	NaNO ₃ /CaO	ไม่แคลไซน์	75.78

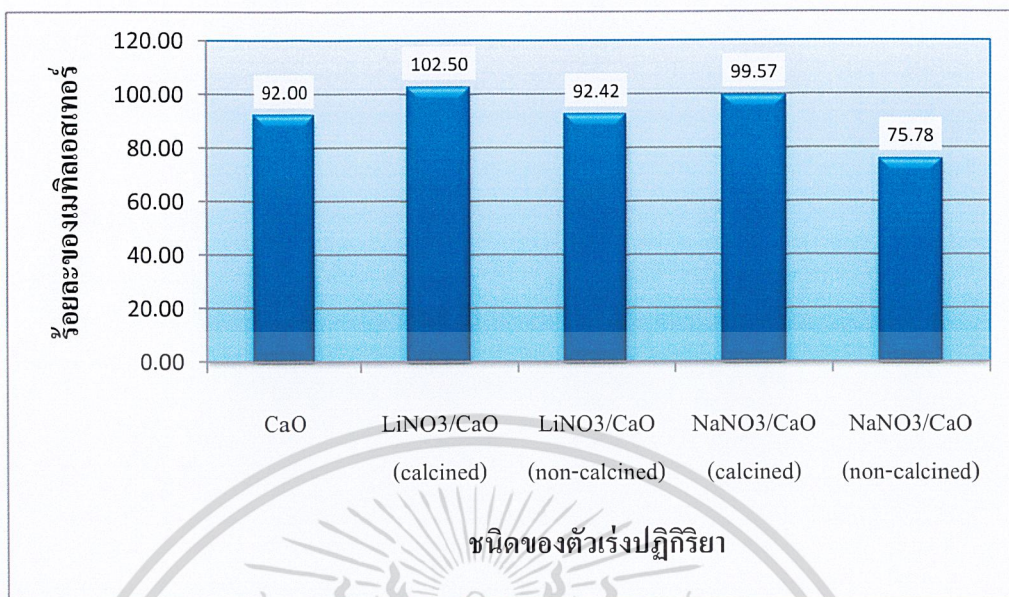
หมายเหตุ เมื่อใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเกิดเมทิลเอสเทอร์ร้อยละ 3.5 และเมื่อใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเกิดเมทิลเอสเทอร์ร้อยละ 92 [16, 18]

จากตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยากับร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ แสดงดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2

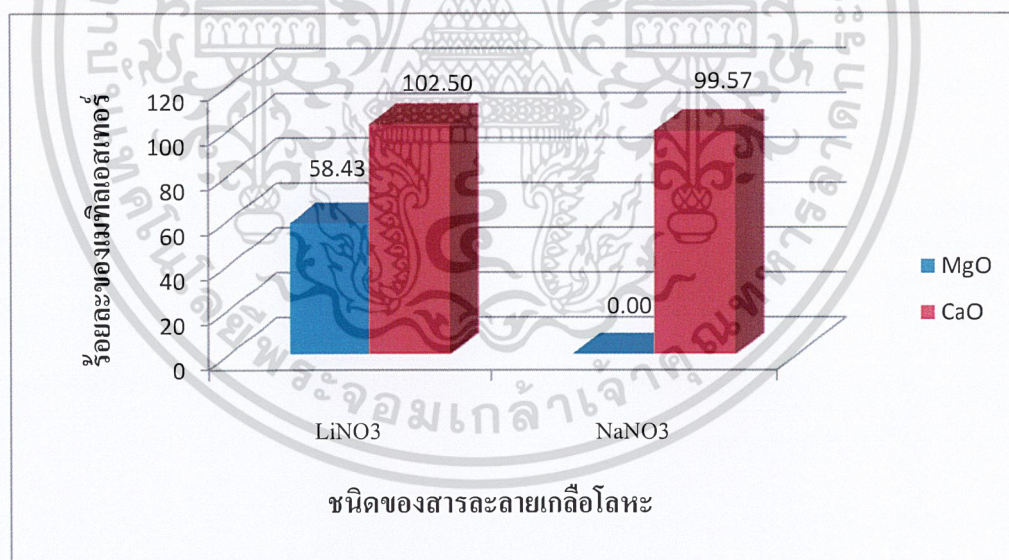


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา และการแคลไซน์กับร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวรองรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาและการแคลไซน์กับร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวรองรับ



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาและการแคลไซน์กับร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ โดยแสดงถึงผลของชนิดตัวรองรับที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

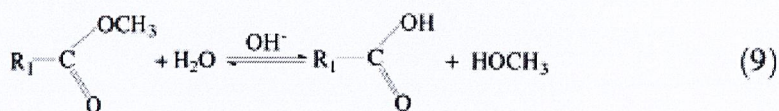
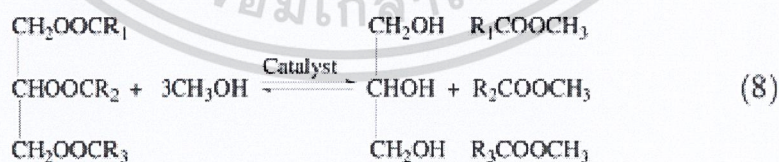
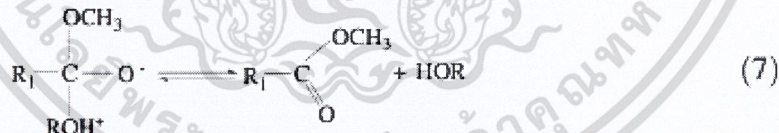
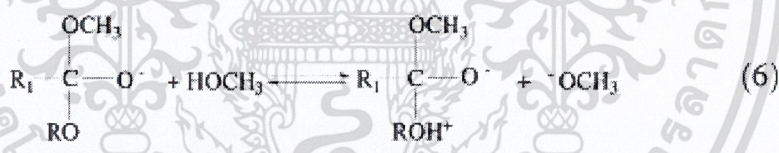
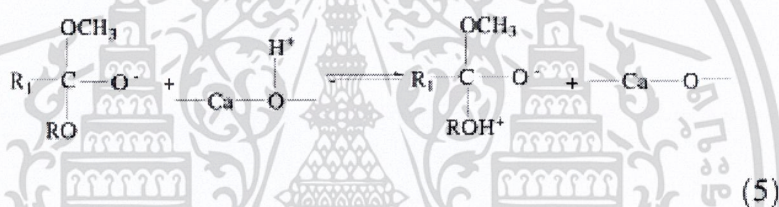
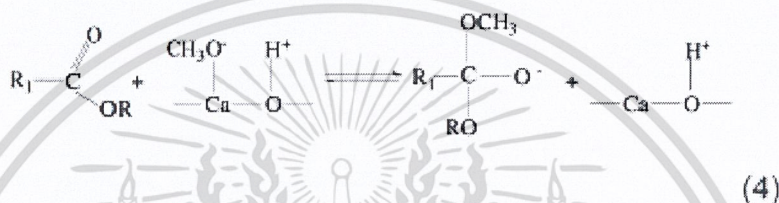
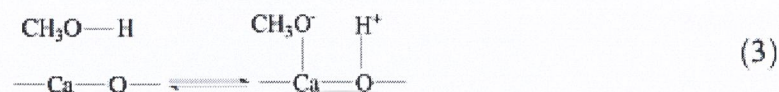
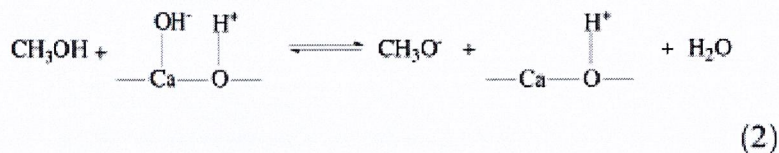
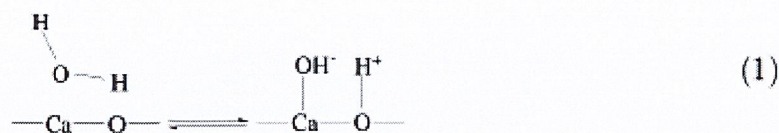
จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 – รูปที่ 4.2 เมื่อเปรียบเทียบผลของการแคลไซน์ จะพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการแคลไซน์ จะทำให้เกิดร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านการแคลไซน์ เนื่องจากการแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นการกำจัดความไม่บริสุทธิ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยามากขึ้น และได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบชนิดของตัวรองรับ ดังรูปที่ 4.3 จะพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวรองรับและผ่านการแคลไซน์ จะทำให้เกิดร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวรองรับ เนื่องจากแคลเซียมออกไซด์มีความเป็นเบสสูงกว่า แคลเซียมออกไซด์จึงช่วยเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันได้ดีกว่า [20] และทำให้ได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบชนิดของสารละลายเกลือไนเตรต ดังรูปที่ 4.3 จะพบว่าเมื่อใช้ลิเทียมไนเตรตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับทั้งสองชนิด จะทำให้เกิดร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงกว่าเมื่อใช้โซเดียมไนเตรตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากลิเทียมไนเตรตมีความเป็นเบสสูงกว่า จึงเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่า ทำให้ได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงกว่า

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมด จะเห็นได้ว่าแคลเซียมออกไซด์เป็นตัวรองรับที่มีความเหมาะสมมากกว่าแมกนีเซียมออกไซด์ เนื่องจากความเป็นเบสที่สูง รวมทั้งแคลเซียมออกไซด์มีรัศมีไอออนิก (ionic radius) มากกว่าแมกนีเซียมออกไซด์ ดังนั้นจึงเป็นผลให้ออกไซด์ของลิเทียมและโซเดียมเข้าไปยึดเกาะและฝังตัวบนพื้นผิวดังตัวรองรับแคลเซียมออกไซด์ได้ดี [20] แต่ LiNO_3/CaO ให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงกว่า NaNO_3/CaO เพียงเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากไอออนของลิเทียมมีขนาดที่เล็กกว่าไอออนของโซเดียม จึงสามารถเข้าไปอุดซบบนพื้นผิวดังตัวรองรับแคลเซียมออกไซด์ได้มากกว่า และเมื่อผ่านการแคลไซน์ก็จะเกิดเป็นลิเทียมออกไซด์ (Li_2O) ซึ่งเป็นหมู่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน [21]

กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์แสดงดังกลไกต่อไปนี้



กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

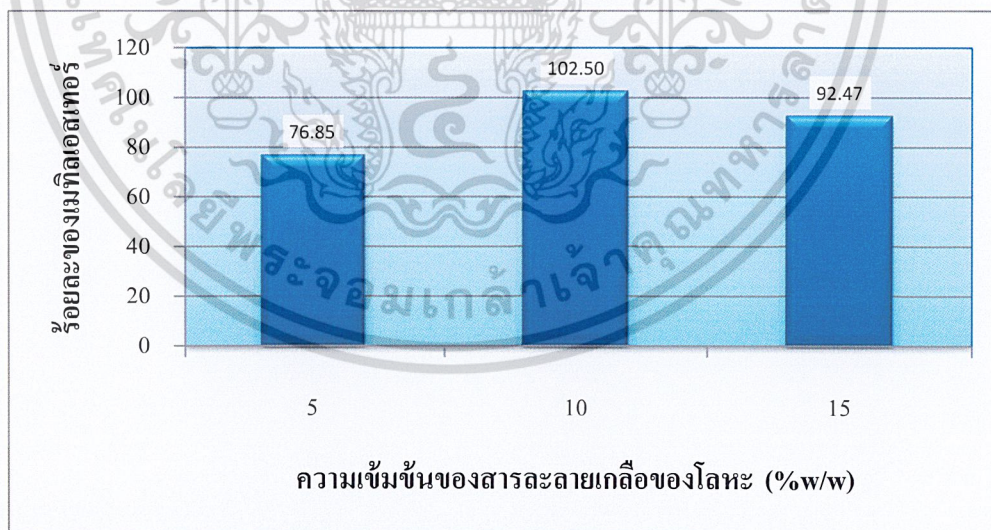
4.1.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะที่มีต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์

ในการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะที่มีต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์ จะกำหนดให้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา LiNO_3/CaO (แคลไซน์) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาคงที่ที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยา 60 ± 5 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะที่มีต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์

การทดลองที่	ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะ (%w/w)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์
1	LiNO_3/CaO (แคลไซน์)	5	76.85
2		10	102.50
3		15	92.47
4		20	เกิดสบู่จำนวนมาก

จากตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะกับร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะกับร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยา LiNO_3/CaO ที่ผ่านการแคลไซน์

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สารละลายลิเทียมไนเตรดจากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 10 โดยที่ความเข้มข้นของสารละลาย ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลิเทียมไนเตรดร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่ใช้ในการปรับปรุงความเป็นเบสของแคลเซียมออกไซด์ จะให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์มากที่สุด เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย ลิเทียมไนเตรดก็จะทำให้มีปริมาณลิเทียมไอออน (Li^+) จำนวนมากขึ้นที่จะไปดูดซับบนพื้นผิวและ รูพรุนของตัวรองรับแคลเซียมออกไซด์ จากนั้นเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปแคลไซน์ ก็จะเกิด ลิเทียมออกไซด์ บนแคลเซียมออกไซด์ ซึ่งเป็นหมู่ที่มีความเป็นเบสสำหรับการเร่งปฏิกิริยาและช่วย ในการเร่งปฏิกิริยาร่วมกับแคลเซียมออกไซด์ดังกล่าวที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ สารละลายลิเทียมไนเตรดมากขึ้นกว่าร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก อาจทำให้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ลดลง เนื่องจากเกิดลิเทียมออกไซด์มากขึ้นบนตัวรองรับแคลเซียมออกไซด์ ส่งผลให้ปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเกิด ได้น้อยลง ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์จึงลดลงด้วย และนอกจากนั้นการ เพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเกลือของ โลหะ เป็นการเพิ่มความเป็นเบสให้สูงขึ้น ซึ่งหากใช้ ความเข้มข้นของสารละลายของเกลือโลหะสูงเกินไป จะทำให้ความเป็นเบสสูงมากเกินไป ทำให้ เกิดสบู่ขึ้น ดังตารางที่ 4.2 เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายของเกลือ โลหะเป็น 20%w/w จะพบว่า เกิดสบู่จำนวนมาก

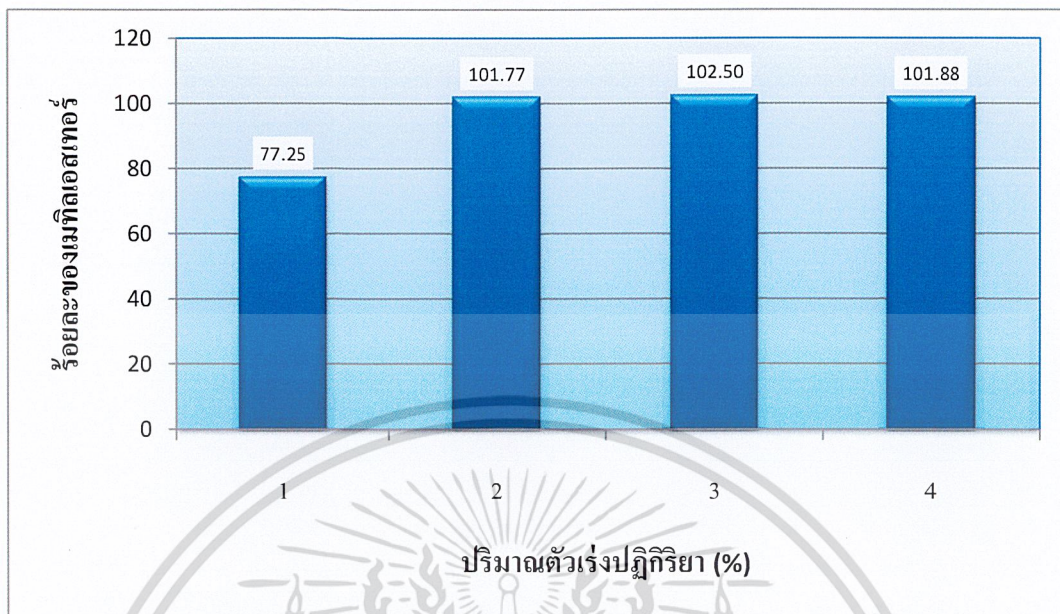
4.1.3 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์

ในการศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์ จะกำหนดให้ใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยา LiNO_3/CaO (แคลไซน์) ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของ โลหะคงที่ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก อัตราส่วน โดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาทรานส์ เอสเทอร์ฟิเคชัน 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยา 60 ± 5 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์

การทดลอง ที่	ชนิดของ ตัวเร่งปฏิกิริยา	ความเข้มข้นของ สารละลายเกลือของ โลหะ (%w/w)	ปริมาณ ตัวเร่งปฏิกิริยา (%)	ร้อยละของ เมทิลเอสเทอร์
1	LiNO_3/CaO (แคลไซน์)	10	1	77.25
2			2	101.77
3			3	102.50
4			4	101.88
5			5	เกิดสบู่จำนวนมาก

จากตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยากับร้อยละของเมทิลเอสเทอร์
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
แสดงดังรูปที่ 4.5
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยากับร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

พบว่า ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น โดยปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ร้อยละ 3 จะทำให้ได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ใกล้เคียงกับการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 และ 4 อย่างไรก็ตามการใช้ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 จะทำให้เกิดสบู่มขึ้น เนื่องจากความเป็นเบสที่มากเกินไปในปฏิกิริยา ซึ่งส่งผลให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้มีค่าลดลง

4.1.4 ผลของอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันที่มีต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์

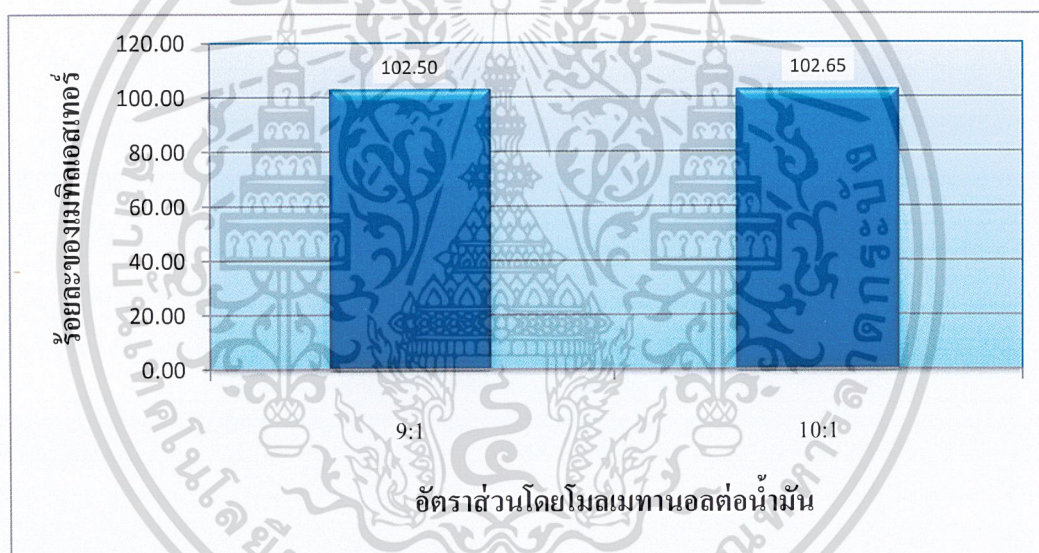
ในการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันที่มีต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์ จะกำหนดให้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา LiNO_3/CaO (แคลไซน) ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะคิงที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาคิงที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยา 60 ± 5 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลของอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันที่มีต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์

การทดลองที่	ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะ (%w/w)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%)	อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์
1	LiNO ₃ /CaO (แคลไซน์)	10	3	6:1	0.00
2				9:1	102.50
3				10:1	102.65
4				12:1	เกิดสบู่จำนวนมาก

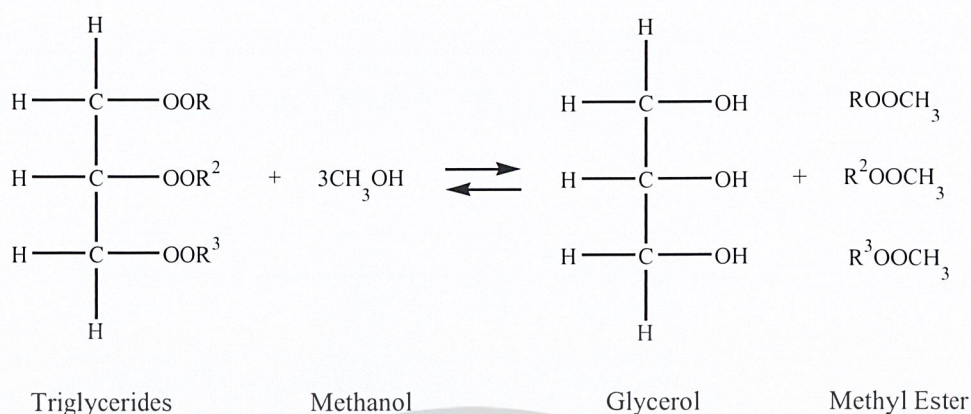
จากตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันกับร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันกับร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

จากรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่อใช้ LiNO₃/CaO (แคลไซน์) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเพิ่มขึ้น เพราะปริมาณเมทานอลที่มากเกินไปจะสามารถทำให้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้เลื่อนไปทางด้านของผลิตภัณฑ์ จึงส่งผลให้ได้เมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

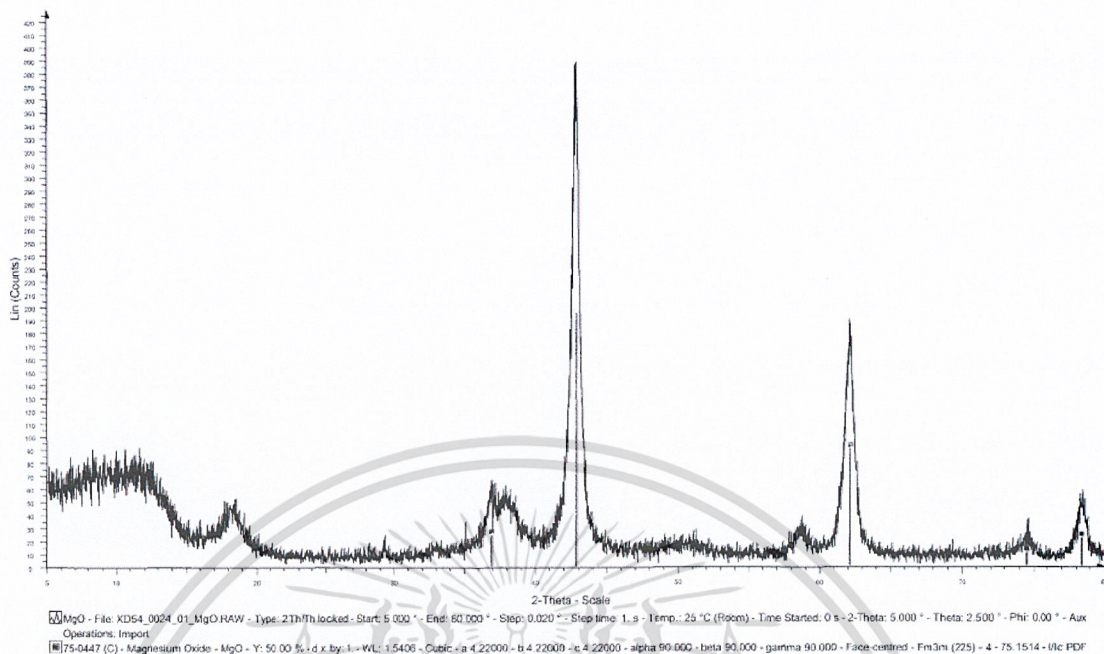


จากสมการ จะเห็นได้ว่าจะต้องใช้ 3 โมลของเมทานอล และ 1 โมลของไตรกลีเซอไรด์ เพื่อที่จะได้ 3 โมลของเมทิลเอสเทอร์กับ 1 โมลของกลีเซอรอล โดยอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 9:1 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม ทำให้ได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์มากที่สุด ซึ่งใกล้เคียงกับอัตราส่วน 10:1 อย่างไรก็ตามอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่สูงกว่า 10:1 กลับไม่ปรากฏชั้นของไบโอดีเซลชั้น อาจเนื่องมาจากมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากความชื้นในอากาศปะปนกับแคลเซียมออกไซด์บางส่วน โดยแคลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถละลายในเมทานอล เกิดเป็นแคลเซียมเมทอกไซด์ ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันแบบเอกพันธ์ได้ เมื่อปริมาณเมทานอลมากขึ้น แต่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาคงที่ ส่งผลให้ความเข้มข้นของแคลเซียมเมทอกไซด์ลดลง ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจึงเกิดได้ช้าลง จนอาจทำให้ไม่มีเมทิลเอสเทอร์เกิดขึ้น

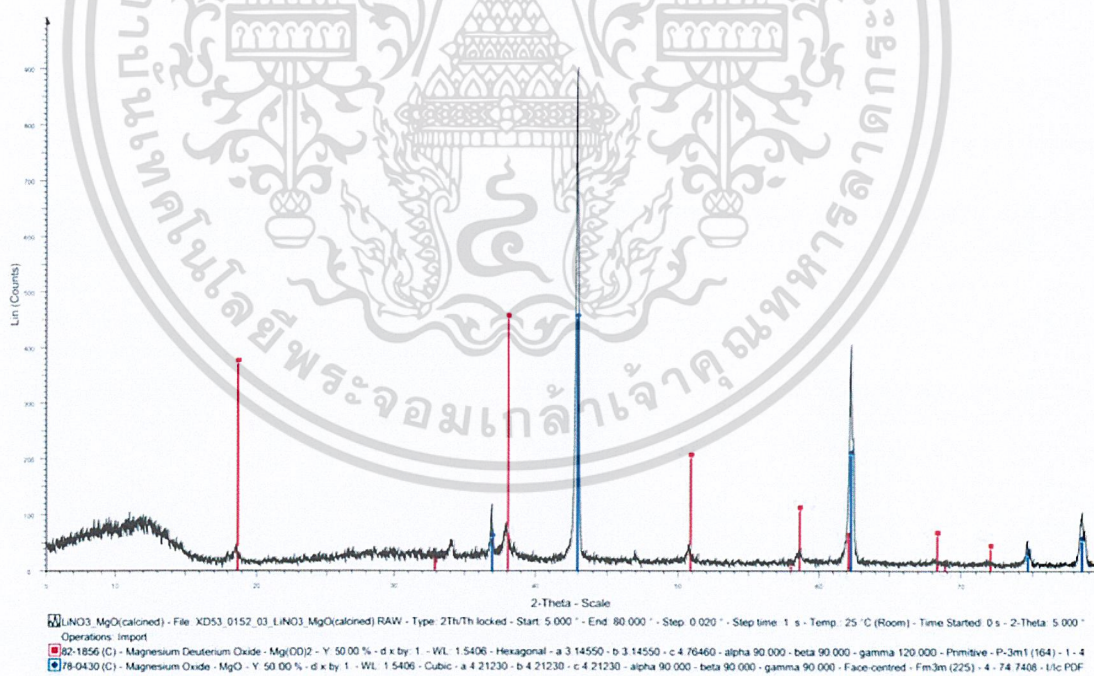
4.2 การศึกษาลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา

4.2.1 ความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา

นำตัวเร่งปฏิกิริยามาทำการศึกษาความเป็นผลึก โดยใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (X-ray Diffraction Spectrophotometer, XRD) ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.7 (ก) ถึง 4.7 (จ)

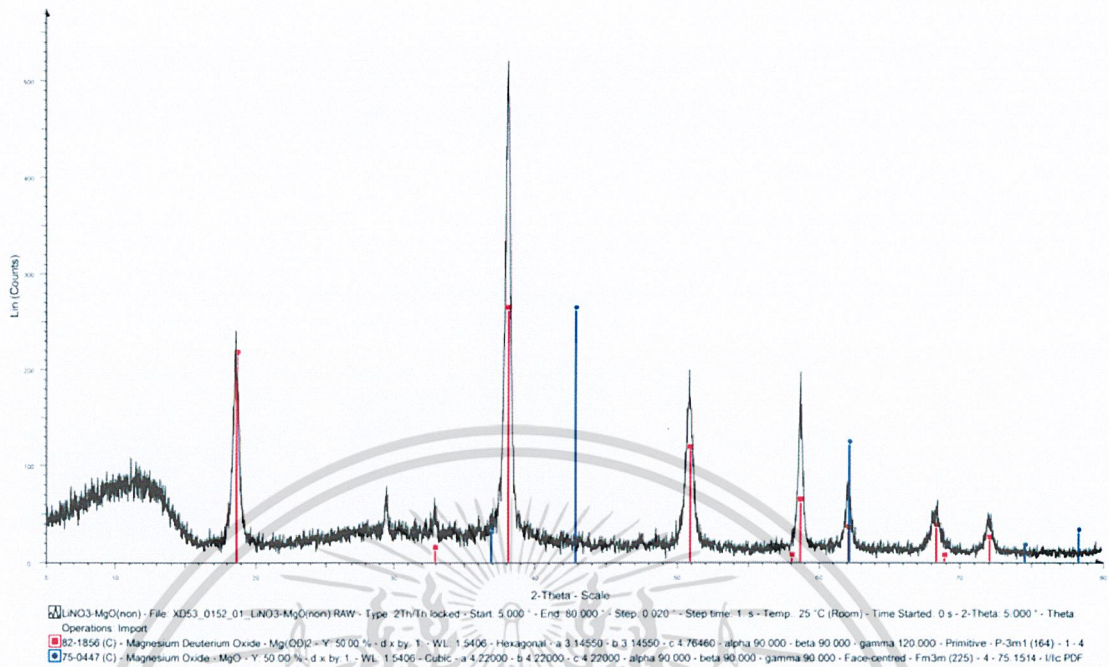


รูปที่ 4.7 (ก) รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของ MgO

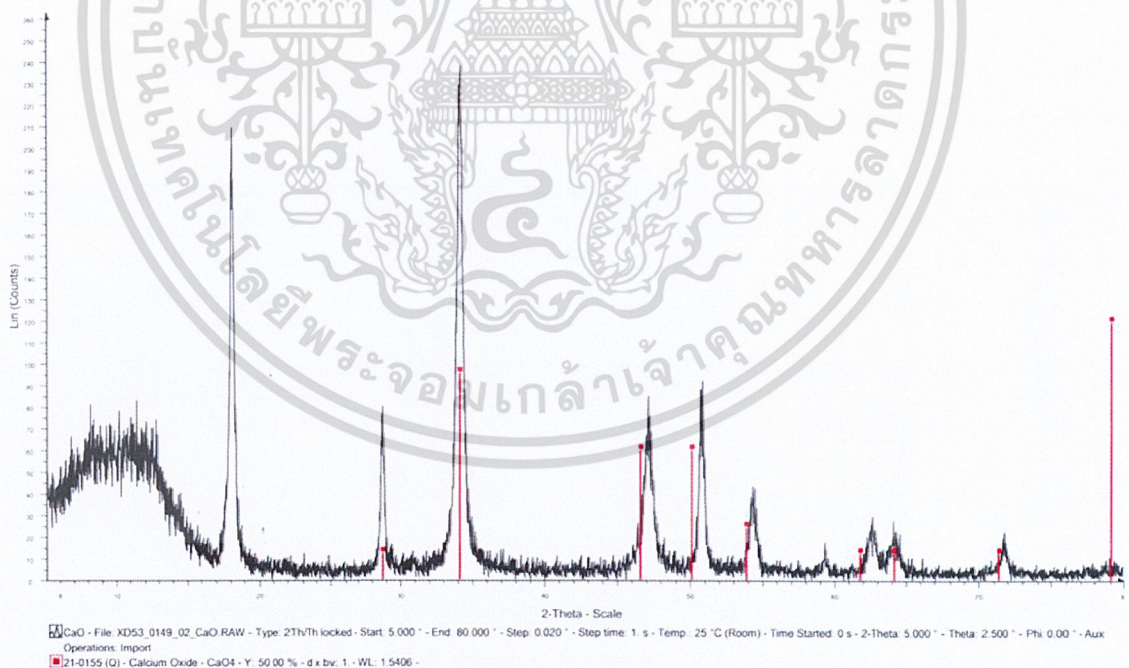


รูปที่ 4.7 (ข) รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของ LiNO₃/MgO (calcined)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

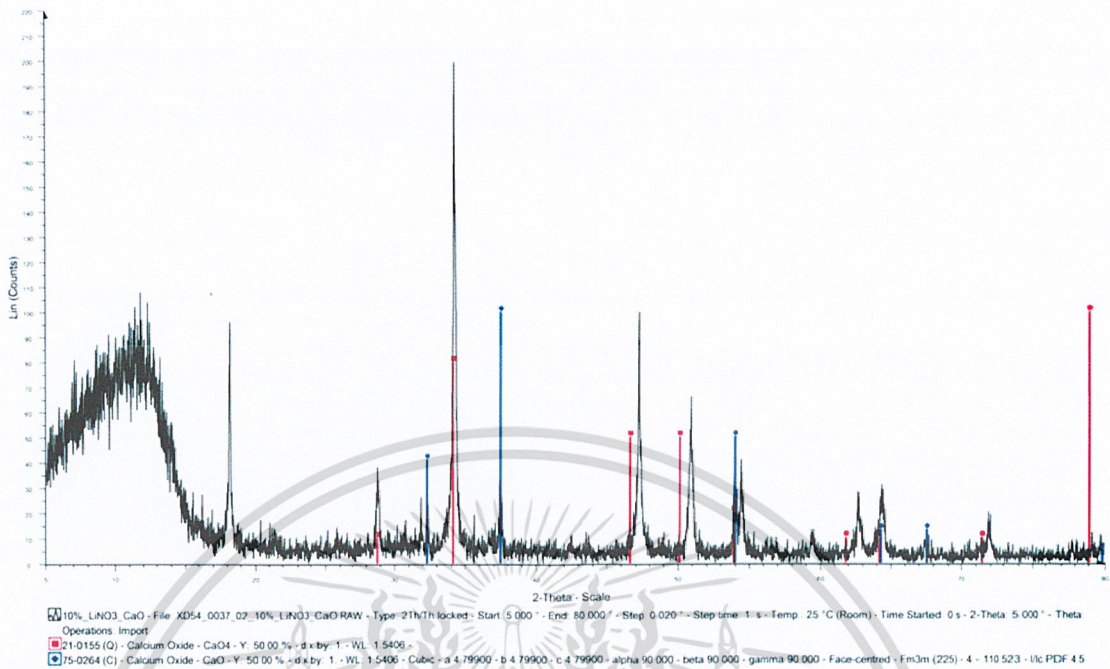


รูปที่ 4.7 (ค) รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของ LiNO₃/MgO (non-calcined)

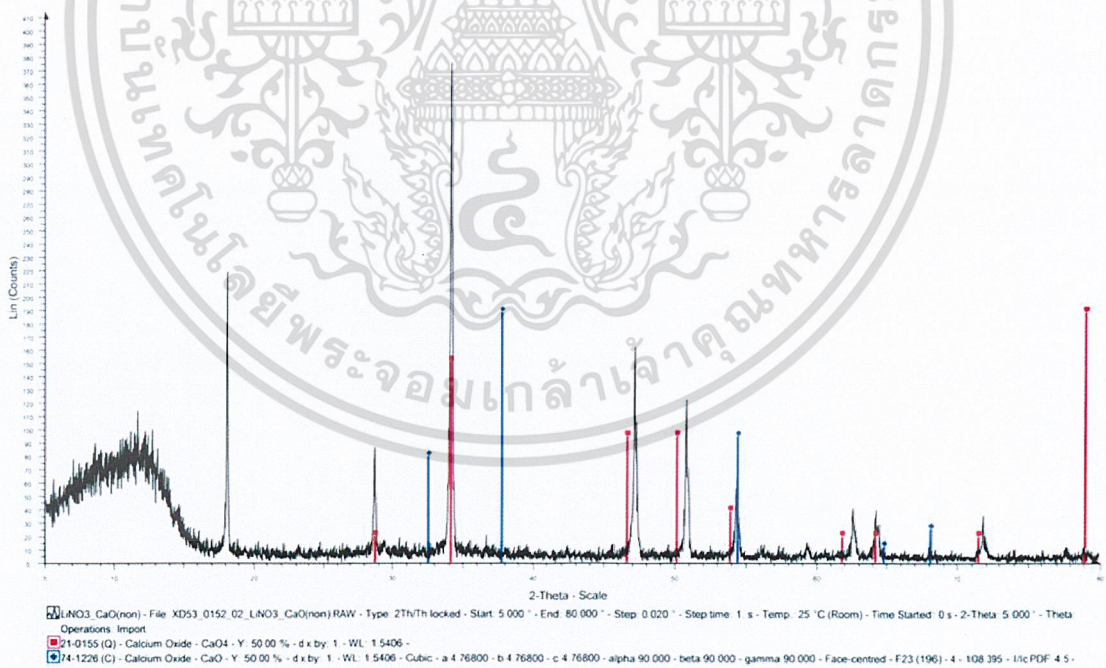


รูปที่ 4.7 (ง) รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของ CaO (calcined)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 (จ) รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของ LiNO₃/CaO (calcined)



รูปที่ 4.7 (ฉ) รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของ LiNO₃/CaO (non-calcined)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7 (ก) ถึงรูปที่ 4.7 (ค) พบว่ารูปแบบของเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชันของแมกนีเซียมออกไซด์ และ LiNO_3/MgO (ไม่แคลไซน์) มีรูปแบบผลึกที่ใกล้เคียงกัน ส่วน LiNO_3/MgO (แคลไซน์) ดังรูปที่ 4.7(ข) พบว่า ปรากฏพีกที่ตำแหน่ง $2\theta = 43^\circ$ ขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งต่างจาก LiNO_3/MgO (ไม่แคลไซน์) ที่ปรากฏพีกที่ตำแหน่ง $2\theta = 38^\circ$ ขึ้นอย่างชัดเจน

จากรูปที่ 4.7 (ง) ถึงรูปที่ 4.7 (จ) พบว่ารูปแบบของเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชันของแคลเซียมออกไซด์, LiNO_3/CaO (ไม่แคลไซน์) และ LiNO_3/CaO (แคลไซน์) มีรูปแบบผลึกที่ใกล้เคียงกัน

4.2.2 องค์ประกอบของธาตุบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

นำตัวเร่งปฏิกิริยามาทำการศึกษารายละเอียดองค์ประกอบของธาตุบนพื้นผิว โดยใช้เครื่องเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (X-ray Fluorescence Spectrophotometer, XRF) ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์การหาปริมาณโซเดียมในตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณธาตุ Na_2O (%w/w)
NaNO_3/MgO (ไม่แคลไซน์)	3.50
NaNO_3/MgO (แคลไซน์)	3.79
NaNO_3/CaO (ไม่แคลไซน์)	1.28
NaNO_3/CaO (แคลไซน์)	2.41

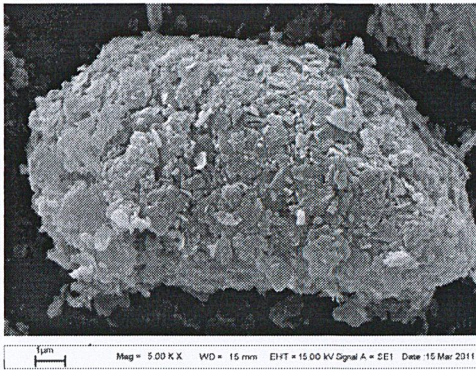
จากตารางที่ 4.5 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา NaNO_3/MgO และ NaNO_3/CaO ที่ผ่านการแคลไซน์ จะมีปริมาณโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านการแคลไซน์ เนื่องจากเมื่อทำการดูดซับโซเดียมไนเตรตบนผิวตัวรองรับแล้วนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อแคลไซน์ จะทำให้โซเดียมไนเตรตเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นโซเดียมออกไซด์

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา NaNO_3/CaO ซึ่งมีปริมาณโซเดียมออกไซด์น้อยกว่า NaNO_3/MgO ทำให้พื้นที่ผิวสำหรับเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าจึงสามารถทำให้เกิดเมทิลเอสเทอร์ได้มากกว่า ดังผลการทดลองในตาราง 4.1

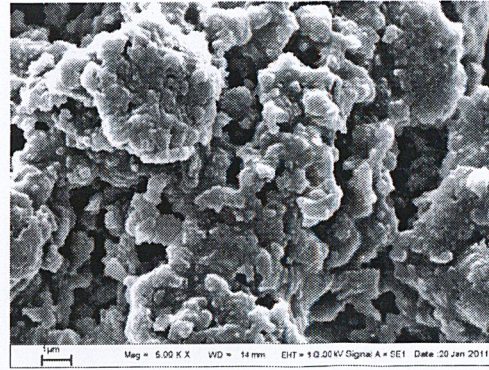
4.2.3 ลักษณะวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา

นำตัวเร่งปฏิกิริยามาทำการศึกษาลักษณะวิทยา โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.8 (ก) ถึง 4.8 (ข) สำหรับกำลังขยาย 5000 เท่า

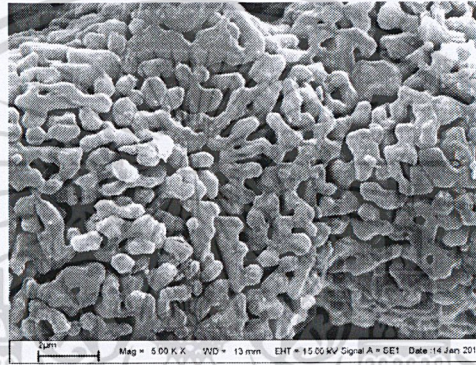
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



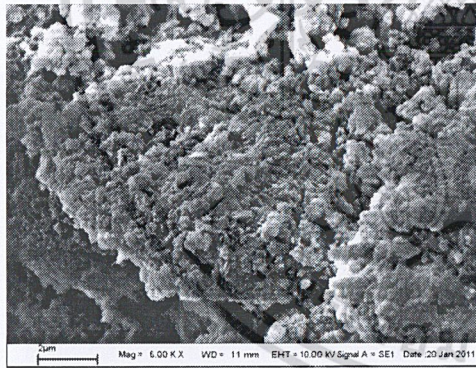
รูปที่ 4.8 (ก) MgO



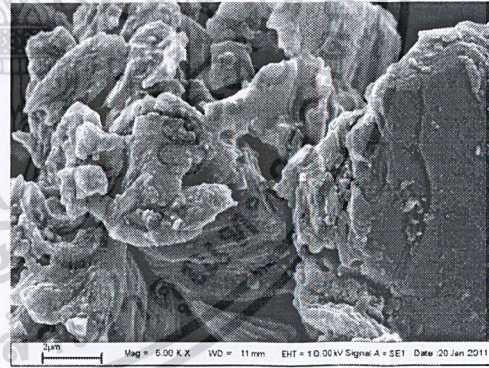
รูปที่ 4.8 (ข) LiNO₃/MgO (calcined)



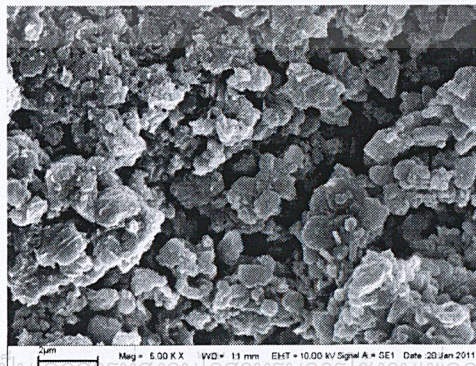
รูปที่ 4.8 (ค) CaO



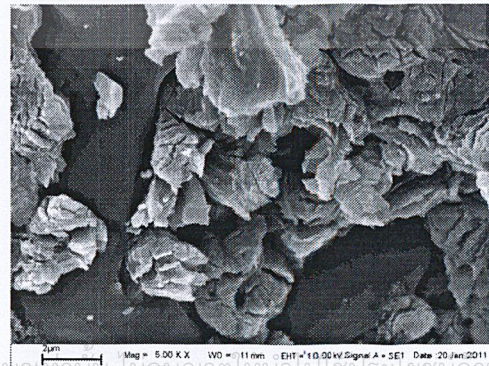
รูปที่ 4.8 (ง) LiNO₃/CaO (calcined)



รูปที่ 4.8 (จ) LiNO₃/CaO (non-calcined)



รูปที่ 4.8 (ฉ) NaNO₃/CaO (calcined)



รูปที่ 4.8 (ช) NaNO₃/CaO (non-calcined)

จากรูปที่ 4.8 (ก) ถึงรูปที่ 4.8 (ข) เป็นรูปที่แสดงถึงสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสำหรับกำลังขยาย 5000 เท่า พบว่าเมื่อเติมโลหะอัลคาไลด์ลงบนตัวรองรับแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ พบว่าพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามีลักษณะเปลี่ยนไปจากเดิม และเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปผ่านกระบวนการแคลไซน์ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีรูพรุนและพื้นที่ผิวที่ขรุขระเพิ่มขึ้น เนื่องจากการแคลไซน์เป็นการกำจัดสิ่งเจือปนต่างๆ ส่งผลให้สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ดีขึ้น

4.2.4 ค่าความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยา

นำตัวเร่งปฏิกิริยามาทำศึกษาค่าความเป็นเบส ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาและร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

ตัวเร่งปฏิกิริยา	การแคลไซน์	ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะ (%w/w)	ค่าความเป็นเบส (mmol/g.)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์
LiNO ₃ /MgO	แคลไซน์	10	0.299	58.43
LiNO ₃ /MgO	ไม่แคลไซน์	10	0.008	0.00
LiNO ₃ /CaO	แคลไซน์	10	0.601	102.50
LiNO ₃ /CaO	ไม่แคลไซน์	10	0.250	92.42
NaNO ₃ /MgO	แคลไซน์	10	0.041	0.00
NaNO ₃ /MgO	ไม่แคลไซน์	10	0.008	0.00
NaNO ₃ /CaO	แคลไซน์	10	0.240	99.57
NaNO ₃ /CaO	ไม่แคลไซน์	10	0.211	75.78
LiNO ₃ /CaO	แคลไซน์	5	0.221	76.85
LiNO ₃ /CaO	แคลไซน์	15	0.273	92.47
LiNO ₃ /CaO	แคลไซน์	20	0.921	เกิดสบู่จำนวนมาก

จากตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าค่าความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีความสอดคล้องกับร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ นั่นคือตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นเบสมาก จะให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่มากด้วย โดยตัวเร่งปฏิกิริยา LiNO₃/CaO (แคลไซน์) มีค่าความเป็นเบส 0.601 mmol/g จะให้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ 102.50 สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีค่าความเป็นเบสในช่วง 0.20-0.30 mmol/g จะให้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ในช่วง 58-99 กรณีตัวเร่งปฏิกิริยา 20% LiNO₃/CaO

(แคลไซน์) มีค่าความเป็นเบสสูงสุดคือ 0.921 mmol/g แต่เมื่อนำไปเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน พบว่าเกิดสบู่ขึ้นในผลิตภัณฑ์จำนวนมาก แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ไม่

ความเป็นเบสที่สูงมากเกินไปเนื่องจากมีการเติม LiNO_3 ที่ความเข้มข้นสูง จึงไปเกิดลิเทียมออกไซด์ ปริมาณมากบนตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยา 20% LiNO_3/CaO (แคลไซน์) จึงไม่เหมาะสม สำหรับใช้ในการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีค่าความเป็นเบสน้อยกว่า 0.1 mmol/g จะไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาได้

4.3 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของเมทิลเอสเทอร์

4.3.1 ค่าความเป็นกรด

นำเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้มาทำการศึกษาค่าความเป็นกรด ผลการวิเคราะห์แสดงดัง ตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความเป็นกรดของเมทิลเอสเทอร์

ตัวเร่งปฏิกิริยา	การแคลไซน์	ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะ (%w/w)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%)	อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน	ค่าความเป็นกรด (mg.KOH/g.)
LiNO_3/MgO	แคลไซน์	10	3	9 : 1	0.52
LiNO_3/CaO	แคลไซน์	10	3	9 : 1	0.10
LiNO_3/CaO	ไม่แคลไซน์	10	3	9 : 1	0.42
NaNO_3/CaO	แคลไซน์	10	3	9 : 1	0.18
NaNO_3/CaO	ไม่แคลไซน์	10	3	9 : 1	0.48
LiNO_3/CaO	แคลไซน์	5	3	9 : 1	0.51
LiNO_3/CaO	แคลไซน์	15	3	9 : 1	0.42
LiNO_3/CaO	แคลไซน์	10	1	9 : 1	0.51
LiNO_3/CaO	แคลไซน์	10	2	9 : 1	0.18
LiNO_3/CaO	แคลไซน์	10	3	10 : 1	0.10

4.3.2 เลขไอโอดีน

นำเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้มาทำการศึกษาเลขไอโอดีน ผลการวิเคราะห์แสดงดัง ตารางที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงเลขไอโอดีนของเมทิลเอสเทอร์

ตัวเร่งปฏิกิริยา	การแคลไซน์	ความเข้มข้น ของสารละลาย เกลือของโลหะ (%w/w)	ปริมาณ ตัวเร่งปฏิกิริยา (%)	อัตราส่วน โดยโมล เมทานอลต่อ น้ำมัน	เลข ไอโอดีน
LiNO ₃ /MgO	แคลไซน์	10	3	9 : 1	3.39
LiNO ₃ /CaO	แคลไซน์	10	3	9 : 1	1.23
LiNO ₃ /CaO	ไม่แคลไซน์	10	3	9 : 1	2.38
NaNO ₃ /CaO	แคลไซน์	10	3	9 : 1	1.64
NaNO ₃ /CaO	ไม่แคลไซน์	10	3	9 : 1	2.12
LiNO ₃ /CaO	แคลไซน์	5	3	9 : 1	2.42
LiNO ₃ /CaO	แคลไซน์	15	3	9 : 1	2.49
LiNO ₃ /CaO	แคลไซน์	10	1	9 : 1	2.78
LiNO ₃ /CaO	แคลไซน์	10	2	9 : 1	2.02
LiNO ₃ /CaO	แคลไซน์	10	3	10 : 1	2.08

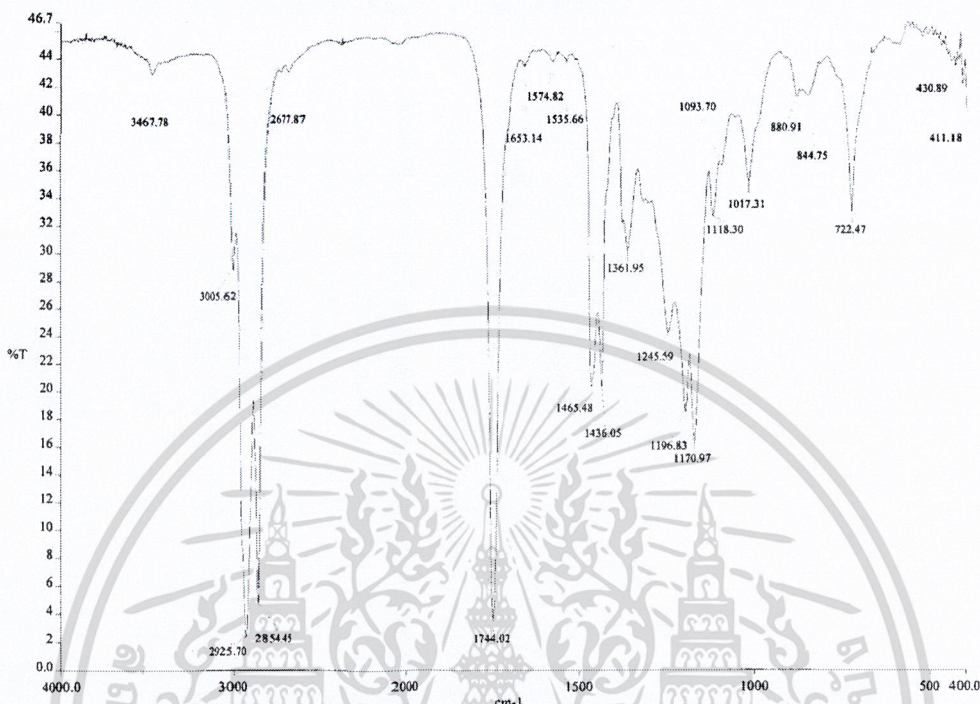
จากตารางที่ 4.7 – 4.8 แสดงให้เห็นว่าค่าความเป็นกรดของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ อยู่ในช่วง 0.10-0.62 mg KOH/g ซึ่งตามเกณฑ์มาตรฐานค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซล ตามมาตรฐาน EN 14214 คือน้อยกว่า 0.50 mg KOH/g [22] ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ส่วนมากอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน อาจมีเพียงบางสภาวะ ที่ได้เมทิลเอสเทอร์สูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งอาจเป็นผลจากการมีกรดไขมันอิสระที่หลงเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ สำหรับเลขไอโอดีนของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ อยู่ในช่วง 1.64-3.39 ตามเกณฑ์มาตรฐานของ EN 14214 กำหนดว่าไบโอดีเซลต้องมีเลขไอโอดีนน้อยกว่า 120 ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้มีเลขไอโอดีนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

4.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีของเมทิลเอสเทอร์

นำเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากใช้เกลือไนเตรตของโลหะแอลคาไลน์บนตัวรองรับ ออกไซด์ของโลหะแอลคาไลน์เอิร์ทเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา มาทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีของเมทิลเอสเทอร์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตเมทรีและเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรโฟโตเมทรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fouier-Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR)



รูปที่ 4.9 สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา LiNO_3/CaO (calcined) ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะทองที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทองที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 จากเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

ตารางที่ 4.9 แสดงหมู่ฟังก์ชันของเมทิลเอสเตอร์ที่การดูดกลืนแสงที่ความถี่ต่างๆ

Absorption frequency (cm^{-1})	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 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกมัดเห็นาใบเซอร์เวย์ชันด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วย เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fouier-Transform Nuclear Magnetic Resonance Spectrophotometer, FT-NMR)



รูปที่ 4.10 สเปกตรัมของน้ำมันปาล์มจากเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

จากรูปที่ 4.10 แสดงถึง ¹H-NMR สเปกตรัมของเมทิลโปรตอน ($\text{CH}_3\text{-C-}$) และเมทิลีนโปรตอน ($\text{-C-CH}_2\text{-C-}$) ที่ δ 0.85-0.88 และ 1.25-1.30 ppm, สเปกตรัมของ $\text{-CH}_2\text{-C-COO-C-}$ ที่ δ 1.60-1.63 ppm, สเปกตรัมของ $\text{-CH}_2\text{-C=C}$ ที่ δ 2.00-2.04 ppm, สเปกตรัมของ $\text{-CH}_2\text{-COO-C-}$ ที่ δ 2.28-2.33 ppm, สเปกตรัมของ $\text{-C=C-CH}_2\text{-C-}$ ที่ δ 2.77-2.80 ppm, สเปกตรัมของ $\text{CH}_3\text{-OOC-R}$ และ $\text{-CH}_2\text{-OOC-R}$ ที่ δ 4.11-4.17 และ 4.27-4.32 ppm, สเปกตรัมของ -CH=CH- ที่ δ 5.26-5.35 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา LiNO_3/CaO (calcined) ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะทองที่ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทองที่ที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 จากเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

จากรูปที่ 4.11 แสดงถึง $^1\text{H-NMR}$ สเปกตรัมของเมทิลโปรตอน ($\text{CH}_3\text{-C-}$) และเมทิลีนโปรตอน ($\text{-C-CH}_2\text{-C-}$) ที่ δ 0.88-0.90 และ 1.28-1.30 ppm, สเปกตรัมของ $\text{-CH}_2\text{-C-COO-C-}$ ที่ δ 1.61-1.65 ppm, สเปกตรัมของ $\text{-CH}_2\text{-C=C}$ ที่ δ 2.01-2.05 ppm, สเปกตรัมของ $\text{-CH}_2\text{-COO-C-}$ ที่ δ 2.28-2.33 ppm, สเปกตรัมของเมทิลเอสเทอร์ (-R-COO-CH_3) ที่ δ 3.68-3.70 ppm, สเปกตรัมของ -CH=CH- ที่ δ 5.34-5.36 ppm

จากรูปที่ 4.10 - รูปที่ 4.11 เมื่อนำน้ำมันปาล์มมาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันกับเมทานอล โดยใช้ลิเทียมไนเตรด (LiNO_3) บนตัวรองรับแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะพบว่าตำแหน่งโปรตอนของ $\text{CH}_3\text{-OOC-R}$ และ $\text{-CH}_2\text{-OOC-R}$ ในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ที่ δ 4.11-4.17 และ 4.27-4.32 ppm หายไป เกิดเป็นตำแหน่งโปรตอนของ -R-COO-CH_3 ในโมเลกุลของเมทิลเอสเทอร์ขึ้นมาแทนที่ที่ δ 3.68-3.70 ppm สำหรับที่สถานะอื่นๆ

เอกสารนี้ผลิตที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยแสดงที่ภาคผนวกรูปที่ 1-10 รูปที่ 1-10 นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้เกลือ ไนเตรตของโลหะแอลคาไลน์บนตัวรองรับออกไซด์ของโลหะแอลคาไลน์อิทธิเป็น ตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ ลิเทียมไนเตรต (LiNO_3) และ โซเดียมไนเตรต (NaNO_3) บนตัวรองรับ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งได้ทำการศึกษาถึงตัวแปรที่มี ผลกระทบต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ และทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ พบว่า

1. ตัวเร่งปฏิกิริยา LiNO_3/CaO (แคลไซน์) สามารถเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น ทำให้ได้ปริมาณร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุด
2. สภาพที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ คือ ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา LiNO_3/CaO (แคลไซน์) ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วน โดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชเท่ากับ 10:1 ที่อุณหภูมิ 60 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
3. ตัวเร่งปฏิกิริยาลิเทียมไนเตรต และ โซเดียมไนเตรตบนตัวรองรับแมกนีเซียม ออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีความไวในการทำปฏิกิริยามากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ได้ผ่านการแคลไซน์
4. สมบัติต่างๆ ด้านเชื้อเพลิงของไบโอดีเซล ได้แก่ ค่าความเป็นกรดและ เลขไอโอดีนของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน
5. จากการวิเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ ด้วยเครื่องเครื่องฟูเรียร์ ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR) และเครื่องฟูเรียร์ ทรานสฟอร์ม นิวเคลียร์แมกเนติก เรโซแนนซ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (FT-NMR) พบหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์ของเมทิลเอสเทอร์ และพบว่าเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของ เมทิลเอสเทอร์ (% yield methyl ester) เป็น 100%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. สามารถนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. ควรนำเมทิลเอสเทอร์ที่ได้มาทดลองผสมกับน้ำมันดีเซลเพื่อใช้กับเครื่องยนต์จริง
3. ควรนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคขั้นสูง เช่น การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวด้วยวิธี Bruner-Emmet-Teller (BET)
4. ควรนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปวิเคราะห์หาปริมาณลิเทียมออกไซด์ ด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Spectroscopy (ICP-MS)
5. ควรทดสอบค่าความเป็นเบสของแมกนีเซียมออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์
6. ควรวิเคราะห์หาผลึกของลิเทียมออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนตัวเร่งปฏิกิริยา LiNO_3/MgO และ LiNO_3/CaO
7. ควรนำเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ไปวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิง เช่น ความหนืด จุดวาบไฟ จุดไหลเท และค่าความร้อน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Hobson, G.D. **Modern Petroleum Technology Part 2**, 5th ed. New York: John Wiley & Sons, 1984.
- [2] Maloney, T.M., **Modern Particleboard and Dry Process Fiberboard manufacturing**, 1stEd., Sanfrancisco: Miller Freeman Publication, 1977.
- [3] สถาบันวิจัยพลังงาน. **น้ำมันพืชกับเครื่องยนต์ดีเซล**. [online]. Available: <http://www.thaibiodiesel.com/thaistory5.html>
- [4] คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. **ไบโอดีเซลกับการใช้งาน**. [online]. Available: <http://www.vcharkarn.com/include/article/showarticle.php?Aid=409&page=2>
- [5] Kusdiana, D. and Saka, Sh. **Effects of Water on Biodiesel Fuel Production by Supercritical Methanol Treatment**. Journal of Bioresource Technology, 91(2004) 289-295.
- [6] คมสัน หุตะแพทย์, สุทัศน์า กำเนิดทอง, กำพล กาหลง และณัฐภูมิ สุดแก้ว. 2550. **ทำไบโอดีเซลใช้เอง**. หน้า 5, 23, 32. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์เกษตรกรรมธรรมชาติ.
- [7] Ma F. and Hanna, M.A. **Biodiesel Production: A Review**. Bioresource Technology, 70 (1999) 1-15.
- [8] คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. **ความรู้เกี่ยวกับไบโอดีเซล**. [online]. Available: http://www.biodiesel.rdi.ku.ac.th/index.php?option=com_content&task=view&id=7&Itemid=12
- [9] จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. 2547. **การเร่งปฏิกิริยา: พื้นฐานการประยุกต์**. กรุงเทพฯ. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [10] Vasanth K. K., Subanandam K., Ramamurthi V. and Sivanesan S. S. **Solid Liquid Adsorption for Wastewater Treatment: Principle Design and Operation**. [online]. Available: <http://www.eco-web.com/cgi-local/sfc?a=/editorial/index.html&b=/editorial/040201.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] วีรวัช อุดคำณี. ปฏิกริยาของธาตุและสารประกอบของธาตุตามหมู่. [online]. Available: <http://kme10.com/student/kme43/Index/patigiriya.html>
- [12] **Magnesium oxide.** [online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Magnesium_oxide
- [13] **Calcium oxide – CaO.** [online]. Available: www.scifun.org
- [14] Keera, S.T., El Sabagh, S.M. and A.R. Taman. **Transesterification of vegetable oil to biodiesel fuel using alkaline catalyst.** [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/fuel
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] ร.ต.หญิง ณัฐมณฑน์ สัจจินดา. การผลิตไบโอดีเซล. [online]. Available: <http://www.bloggang.com/viewblog.php?id=pow03&date=15-09-2008&group=2&gblog=1>
- [18] Martin Alonso, D., Mariscal, R., Lopez Granados, M. and Maireles-Torres, P. **Biodiesel preparation using Li/CaO catalyst: Activation process and homogeneous contribution.** Catalyst Today, 143 (2009) 167-171
- [19] สิริภัก สระตันต์. ปฏิบัติการชีวเคมีเบื้องต้น. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 73-81
- [20] Shuli, Y., Houfang, L. and Bin, L. **Supported CaO catalysts Used in the Transesterification of Rapeseed Oil for the Purpose of Biodiesel production.** Energy & Fuels, 22 (2008) 646-651

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [21] Thomas, B., Johannes, S., Martin, S., Oliver, D. and Erich, K. **Lithium Ion Induced Surface Reactivity Changes on MgO Nanoparticles.** *Journal of catalysis*, 247 (2007) 61-67
- [22] **EN 14214.** [online]. http://en.wikipedia.org/wiki/EN_14214



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

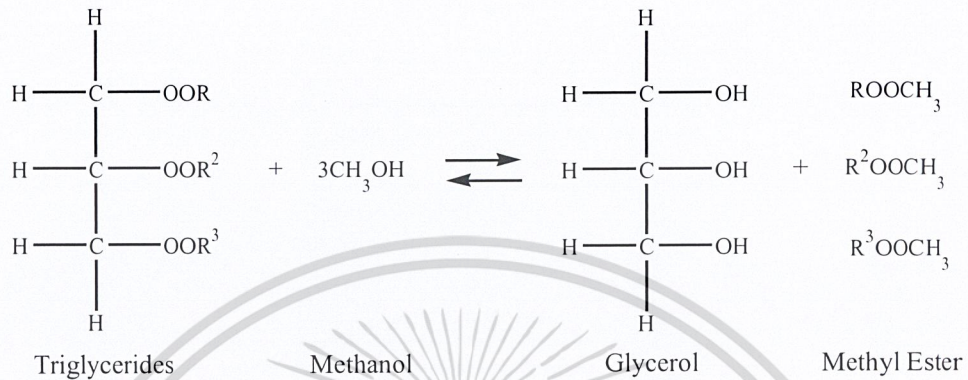


ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

1. การคำนวณหาร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก



จากสมการแสดง ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันต้องใช้ 3 โมลของเมทานอล และ 1 โมลของไตรกลีเซอไรด์เพื่อที่จะได้ 3 โมลของเมทิลเอสเทอร์กับ 1 โมลของกลีเซอรอล ดังนั้น ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (%yield) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$\text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (\%yield)} = \frac{\text{โมลของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้}}{\text{โมลของของเมทิลเอสเทอร์ตามทฤษฎี}} \times 100 \quad (1)$$

ตัวอย่างการคำนวณ ที่สภาวะในการสังเคราะห์ไบโอดีเซล ใช้น้ำมันพืช 50 กรัม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา LiNO_3/CaO (calcined) ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะหนักที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาครั้งที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 พบว่า น้ำหนักของไบโอดีเซลชั้นบนมีค่าเท่ากับ 17.39 กรัม

โมลของของเมทิลเอสเทอร์ตามทฤษฎีและที่สังเคราะห์ได้หาได้จาก

$$\text{โมลของเมทิลเอสเทอร์} = \text{น้ำหนักที่ซั่งได้/น้ำหนักมวลโมเลกุล}$$

$$\text{โมลของของเมทิลเอสเทอร์ตามทฤษฎี} = (50/850.25) \times 3 = 0.1764$$

$$\text{โมลของของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้} = (17.39/850.25) \times 3 = 0.0614$$

ดังนั้น ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (%yield) = $(0.0614/0.1764) \times 100 = 34.81 \%$

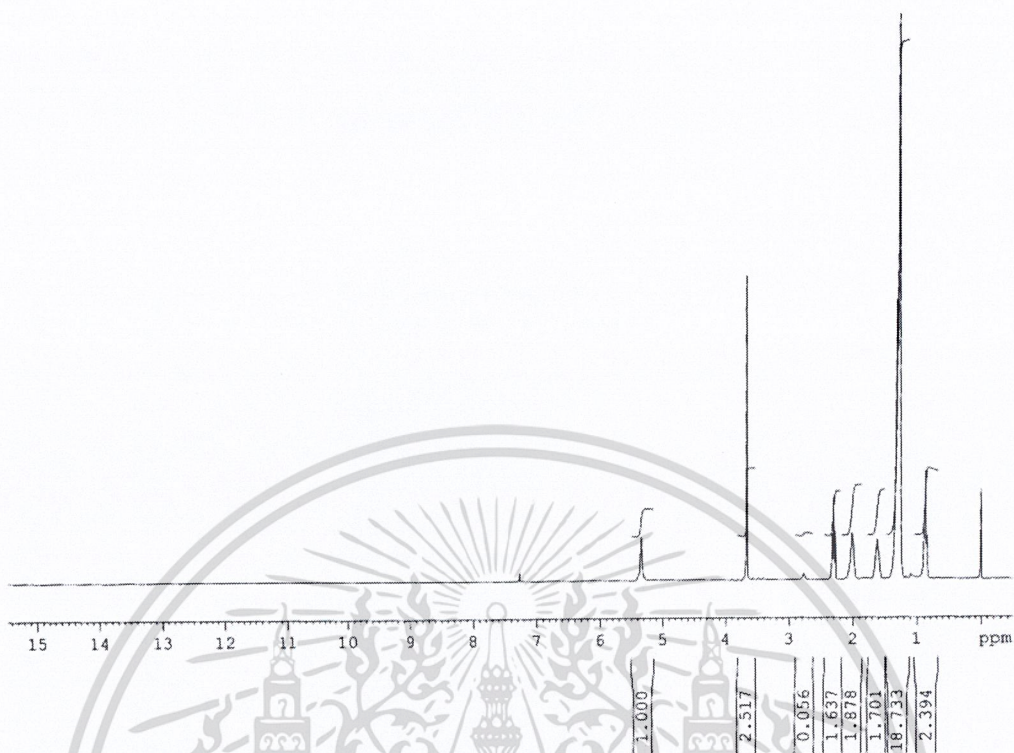
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การคำนวณหาร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ (%methyl ester) จากไฮโดรเจนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกตรัม (H^1 -NMR)

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์ในน้ำมันสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้พีค (Integration) ของ NMR Spectrum ซึ่งเมทิลเอสเทอร์บริสุทธิ์ จะให้พื้นที่ใต้พีคที่ Chemical shift ประมาณ 2.2–2.4 ppm (A_1) ต่อพื้นที่ใต้พีคที่ Chemical shift ประมาณ 3.6–3.8 ppm (A_2) เป็น 2 ต่อ 3 เนื่องจากจำนวนโปรตอนในกลุ่มเมทิลลีนและเมทิลเท่ากับ 2 และ 3 โปรตอนตามลำดับ ส่วนจำพวกไตรกลีเซอไรด์จะให้พีคที่ Chemical shift ประมาณ 2.2–2.4 ppm เพียงอย่างเดียว ดังนั้นหากเมทิลเอสเทอร์บริสุทธิ์มีสารจำพวกไตรกลีเซอไรด์เจือปน จะทำให้อัตราส่วนของพื้นที่ใต้พีค A_1/A_2 เปลี่ยนแปลงไปจาก 2/3 โดยการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์เมทิลเอสเทอร์สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{เปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์} = \frac{\text{พื้นที่ใต้พีค } A_2 \times 2 \times 100}{\text{พื้นที่ใต้พีค } A_1 \times 3} \quad (2)$$

ตัวอย่างการคำนวณ ที่สภาวะในการสังเคราะห์ไบโอดีเซล ใช้ น้ำมันพืช 50 กรัม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $LiNO_3/CaO$ (calcined) ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะคงที่ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาคงที่ที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 การคำนวณหา ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ สามารถหาได้จากไฮโดรเจนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกตรัม (H^1 -NMR) ในรูปที่ ก.1 และสมการที่ 2



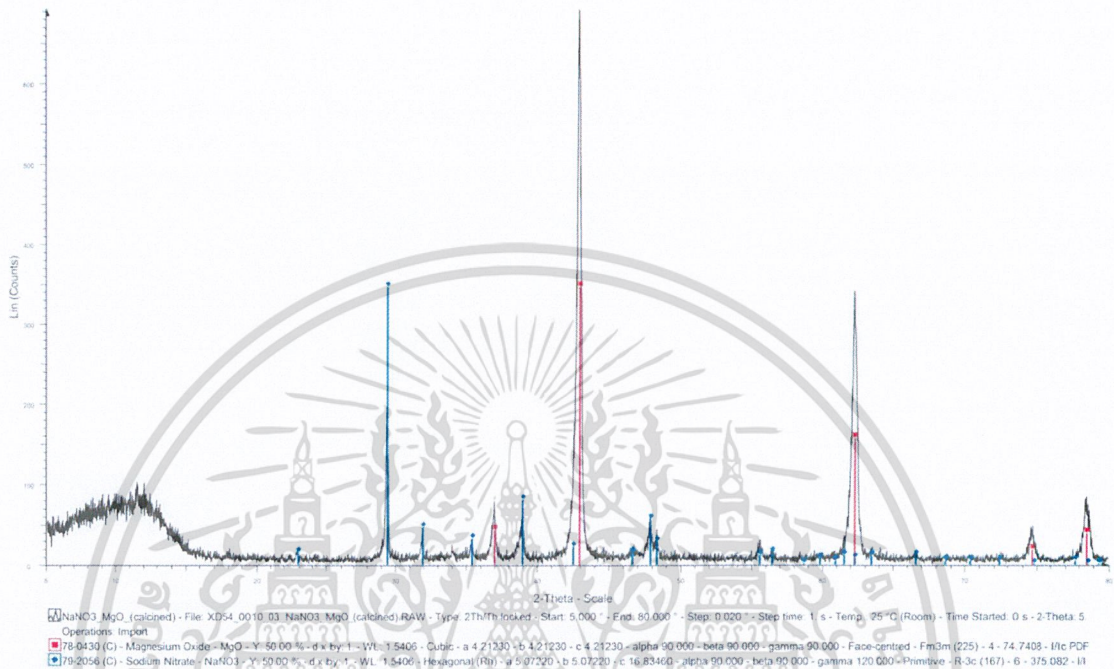
รูปที่ ก.1 สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลจากเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม นิวเคลียร์แมกเนติก เรโซแนนซ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

$$\begin{aligned} \text{จาก } \text{เปอร์เซ็นต์ของเมทิลเอสเทอร์} &= \frac{\text{พื้นที่ใต้พีค } A_2 \times 2 \times 100}{\text{พื้นที่ใต้พีค } A_1 \times 3} \quad (2) \\ \text{ดังนั้น } \text{เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของเมทิลเอสเทอร์} &= \frac{2.527 \times 2 \times 100}{1.637 \times 3} \\ &= 102.5046 \% \end{aligned}$$

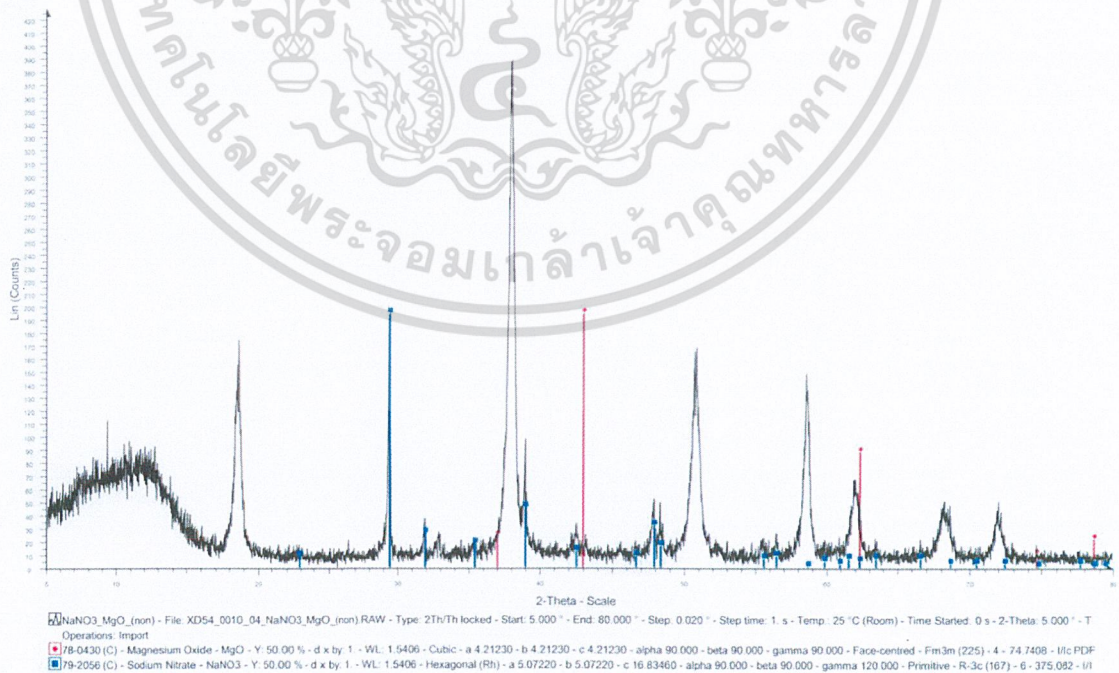
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ลักษณะความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (X-ray Diffraction Spectrophotometer, XRD)

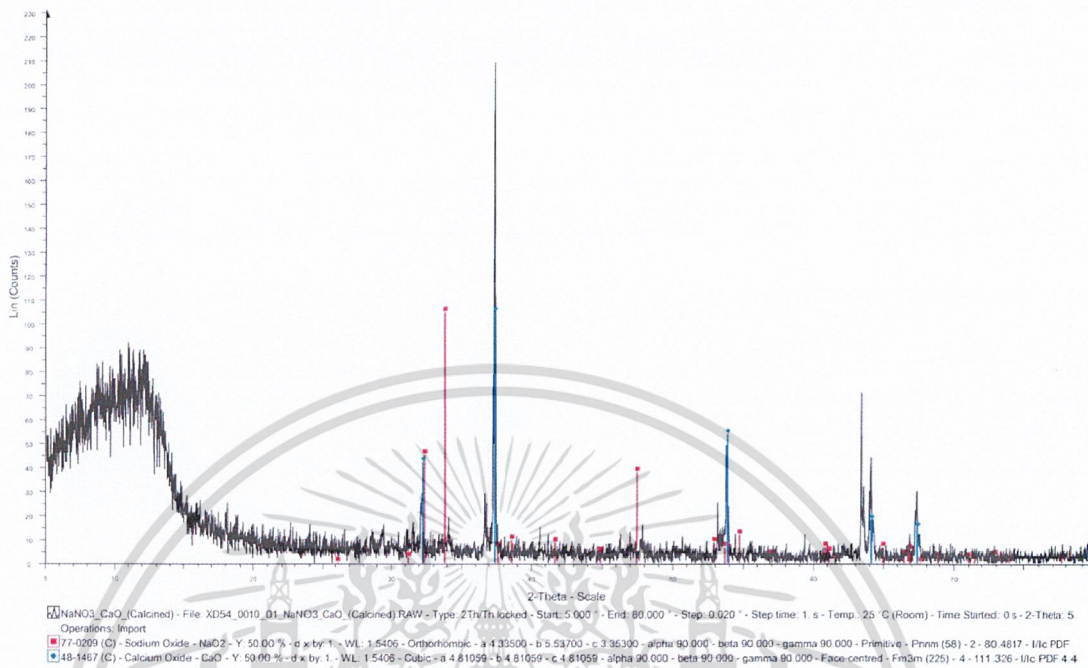


รูปที่ ข.1 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของ NaNO₃/MgO (calcined)

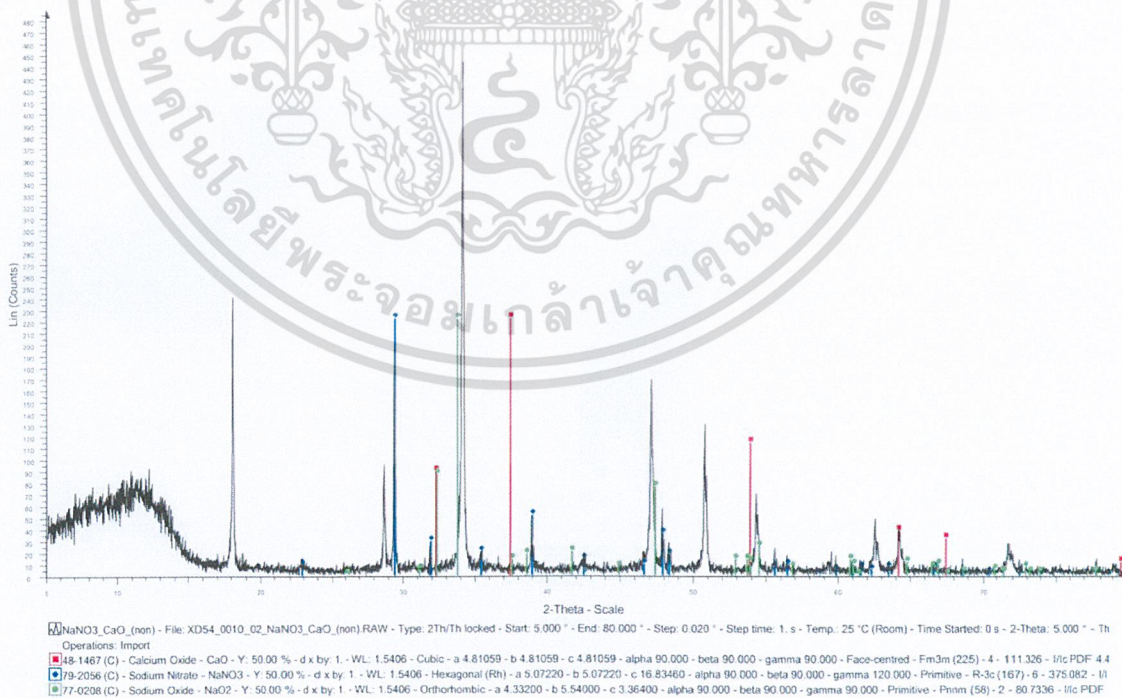


รูปที่ ข.2 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของ NaNO₃/MgO (non-calcined)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิฉะนั้นผู้ใดที่นำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

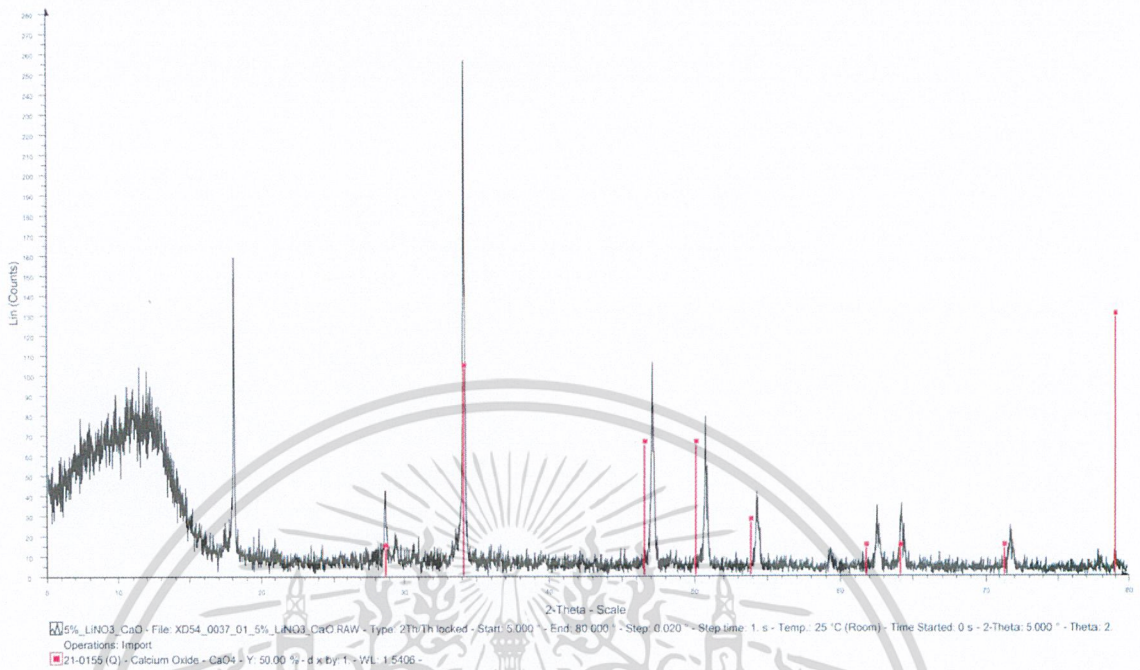


รูปที่ ข.3 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของ NaNO₃/CaO (calcined)

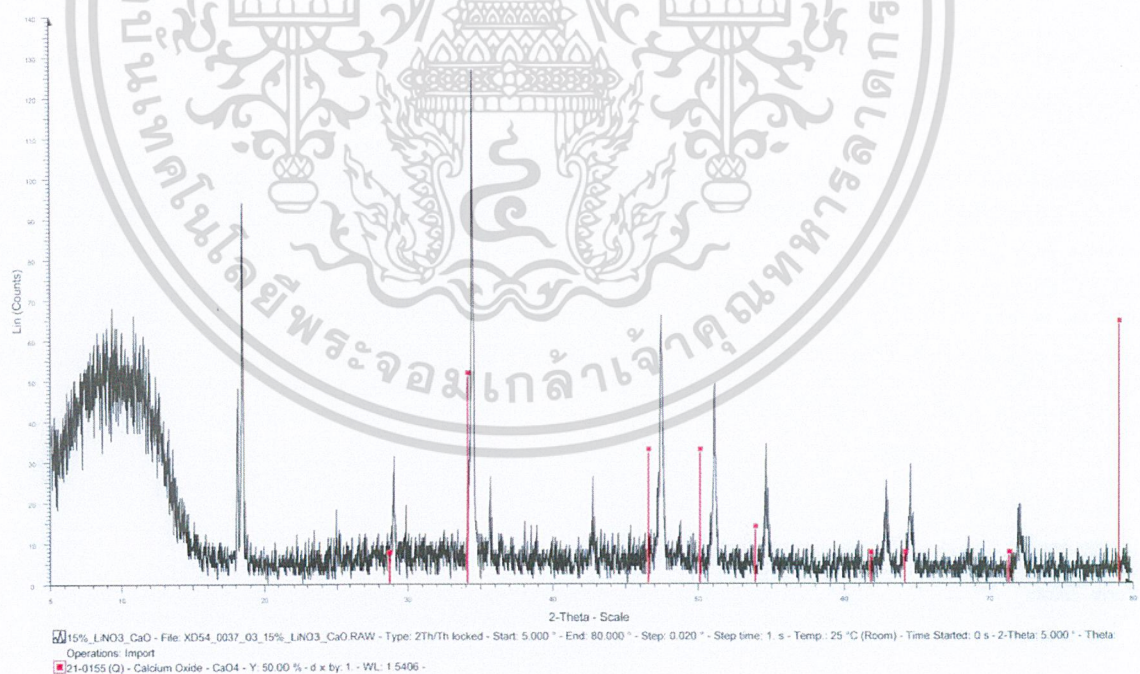


รูปที่ ข.4 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของ NaNO₃/CaO (non-calcined)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

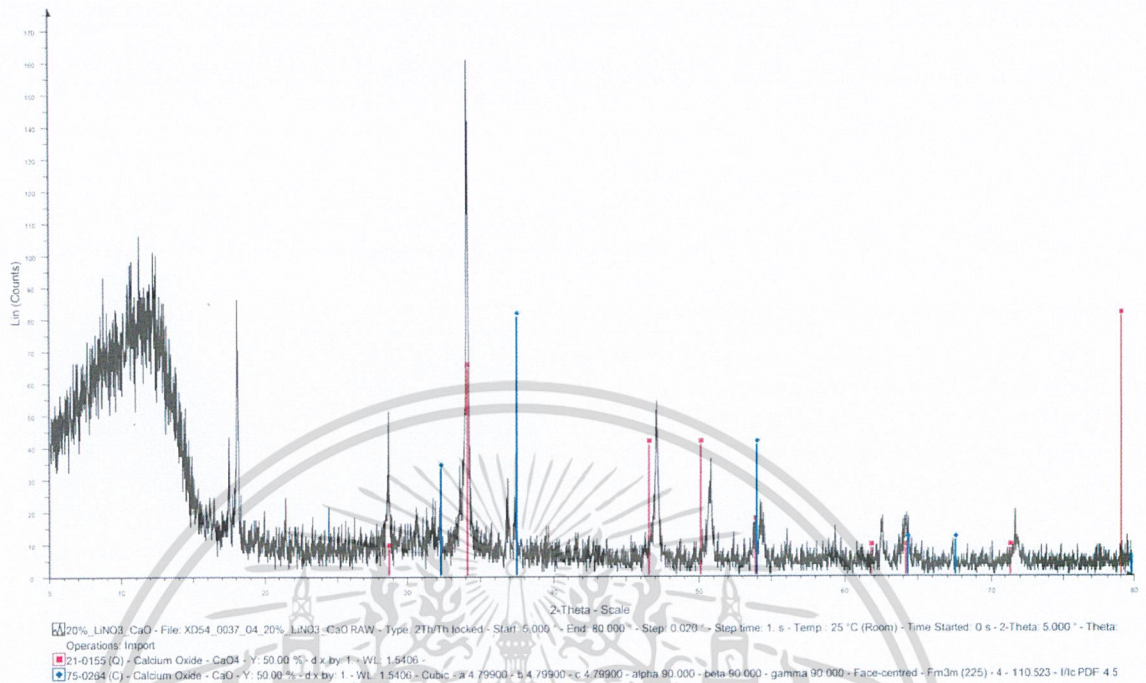


รูปที่ ข.5 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของ 5% LiNO₃/CaO (calcined)



รูปที่ ข.6 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของ 15% LiNO₃/CaO (calcined)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

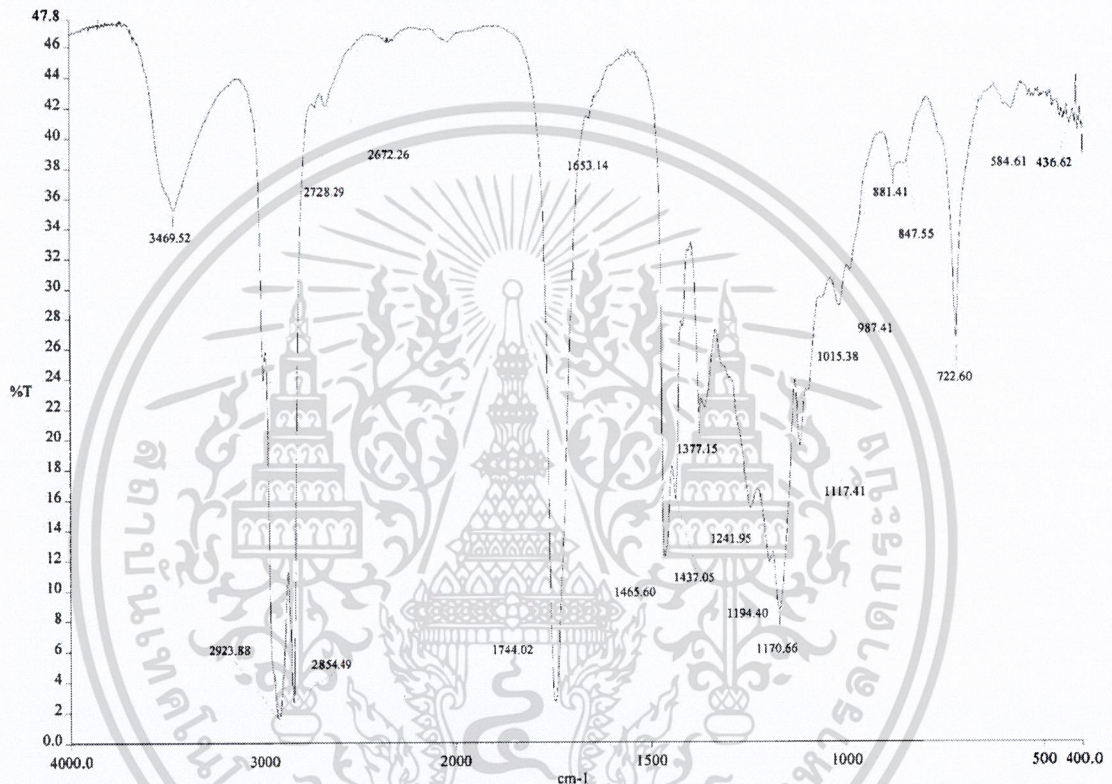


รูปที่ ข.7 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของ 20% LiNO₃/CaO (calcined)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

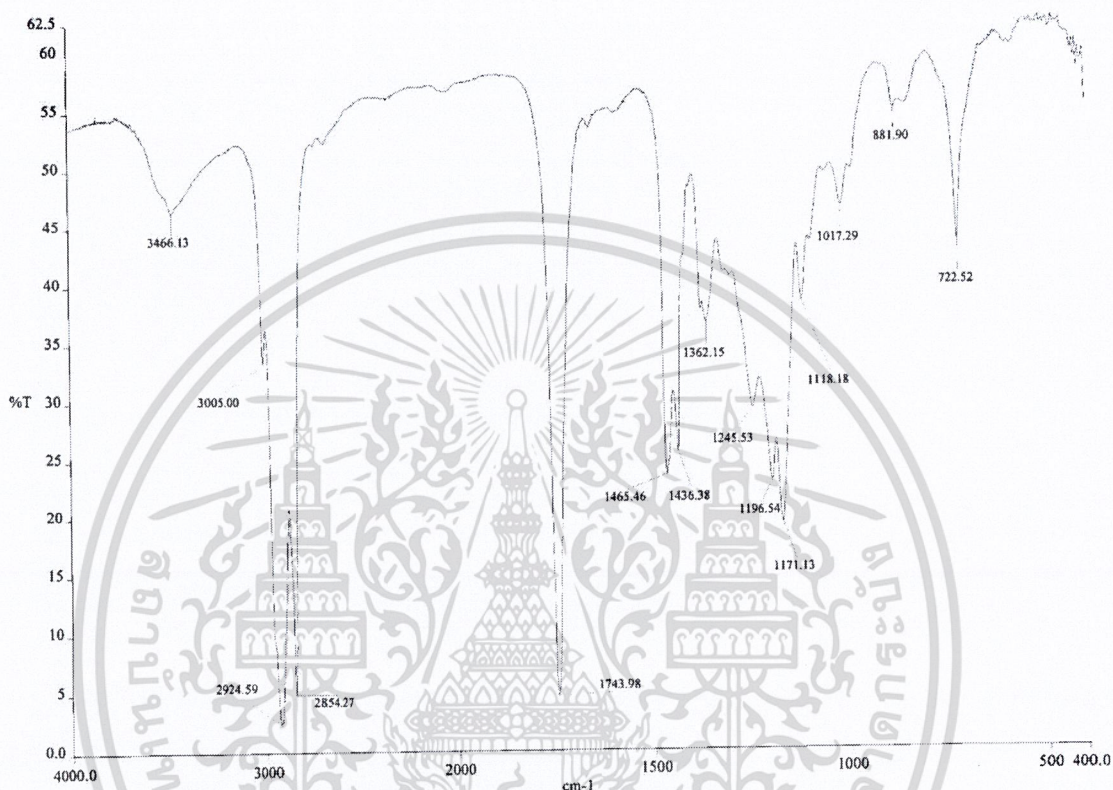
ภาคผนวก ค.

การพิสูจน์เอกลักษณ์ของไบโอดีเซล โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fouier-Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR)



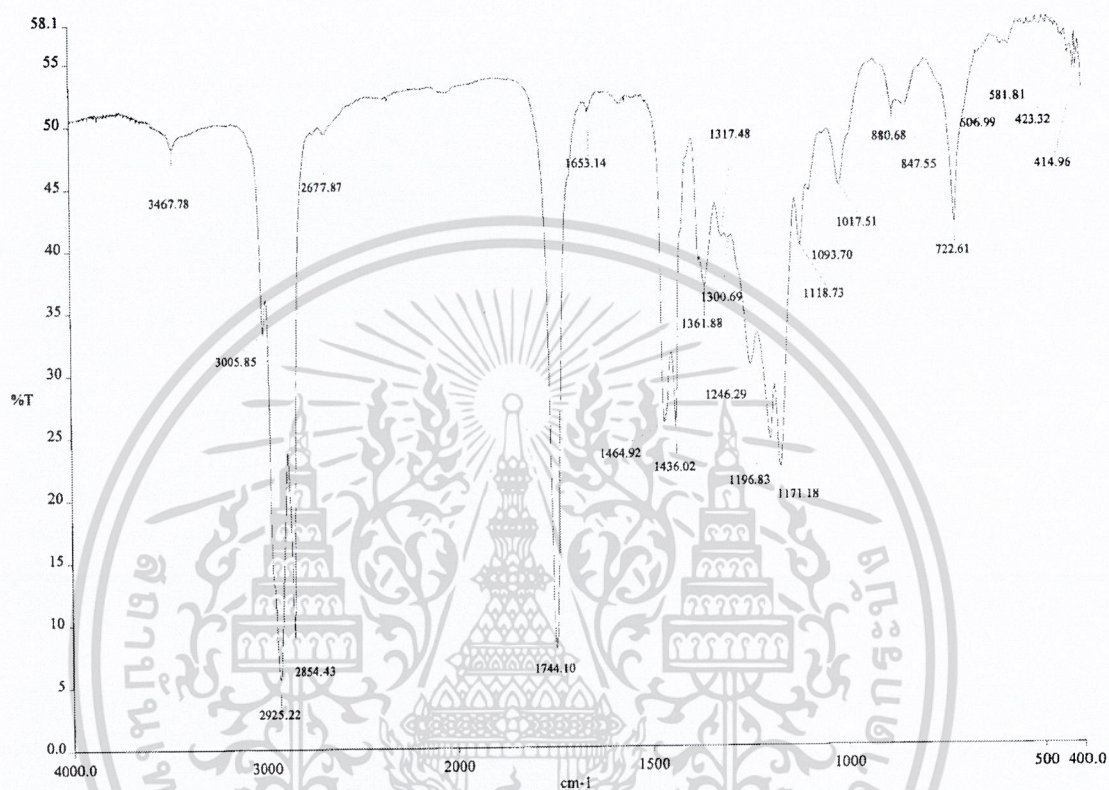
รูปที่ ค.1 สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา LiNO_3/MgO (calcined) ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะทองที่ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทองที่ที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 จากเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



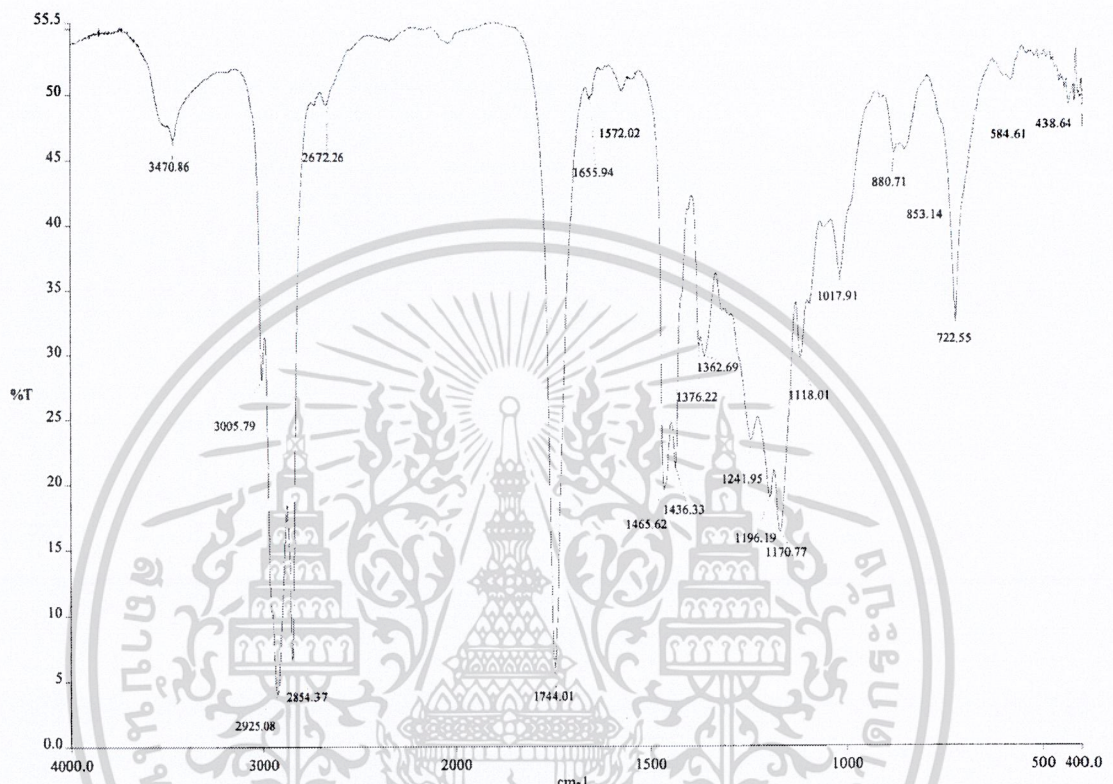
รูปที่ ก.2 สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา LiNO_3/CaO (non-calcined) ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะทองที่ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทองที่ที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 จากเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



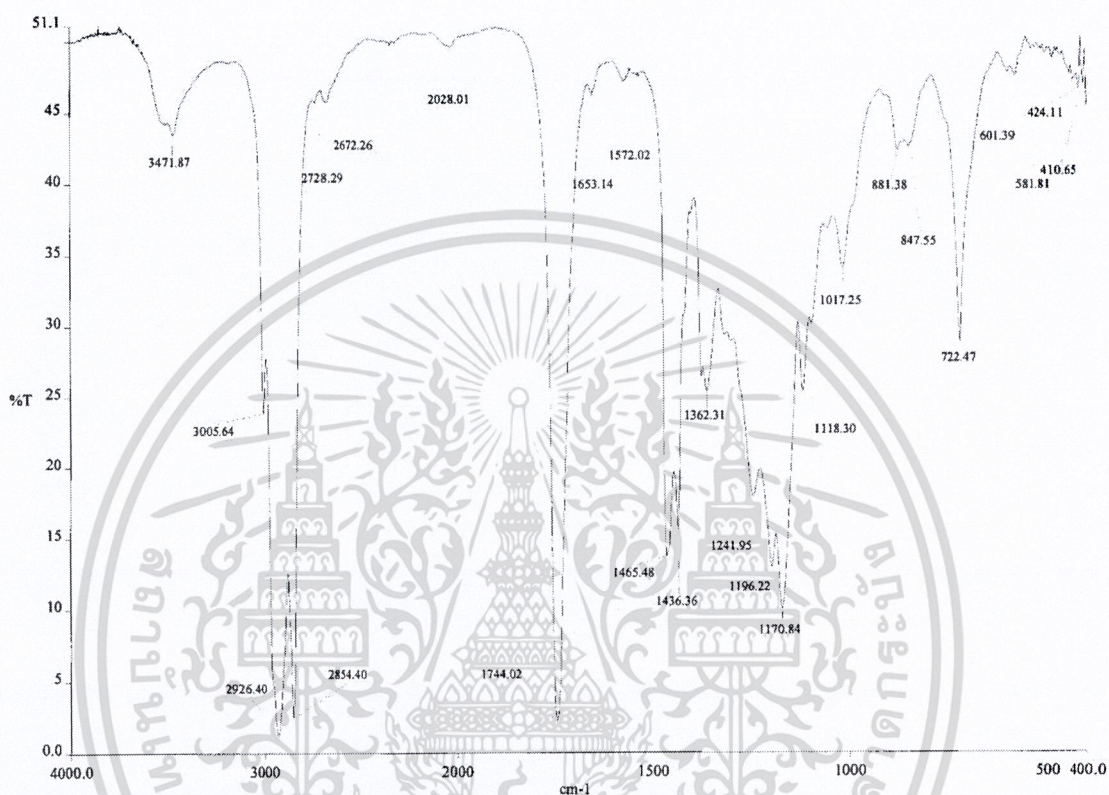
รูปที่ ๓.3 สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NaNO_3/CaO (calcined) ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะคังที่ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาคังที่ที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 จากเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



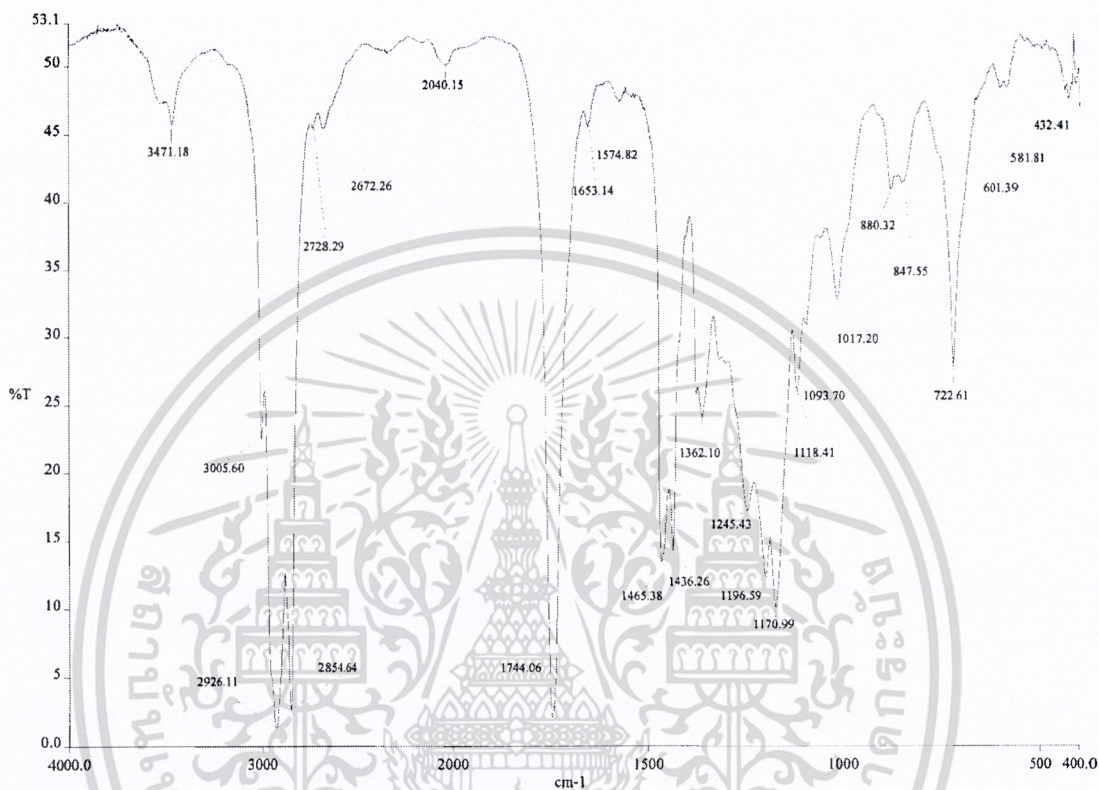
รูปที่ ก.4 สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NaNO_3/CaO (non-calcined) ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะคงที่ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาคงที่ที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 จากเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



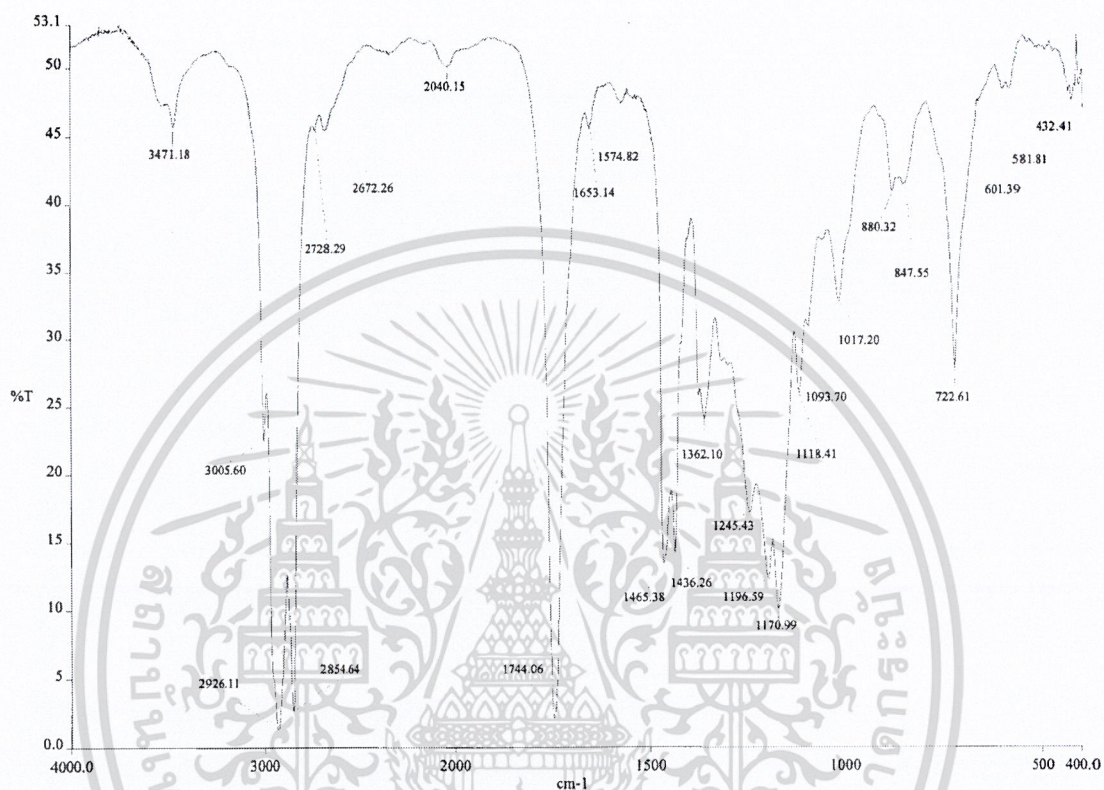
รูปที่ ก.5 สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา LiNO_3/CaO (calcined) ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะทองที่ที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทองที่ที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 จากเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



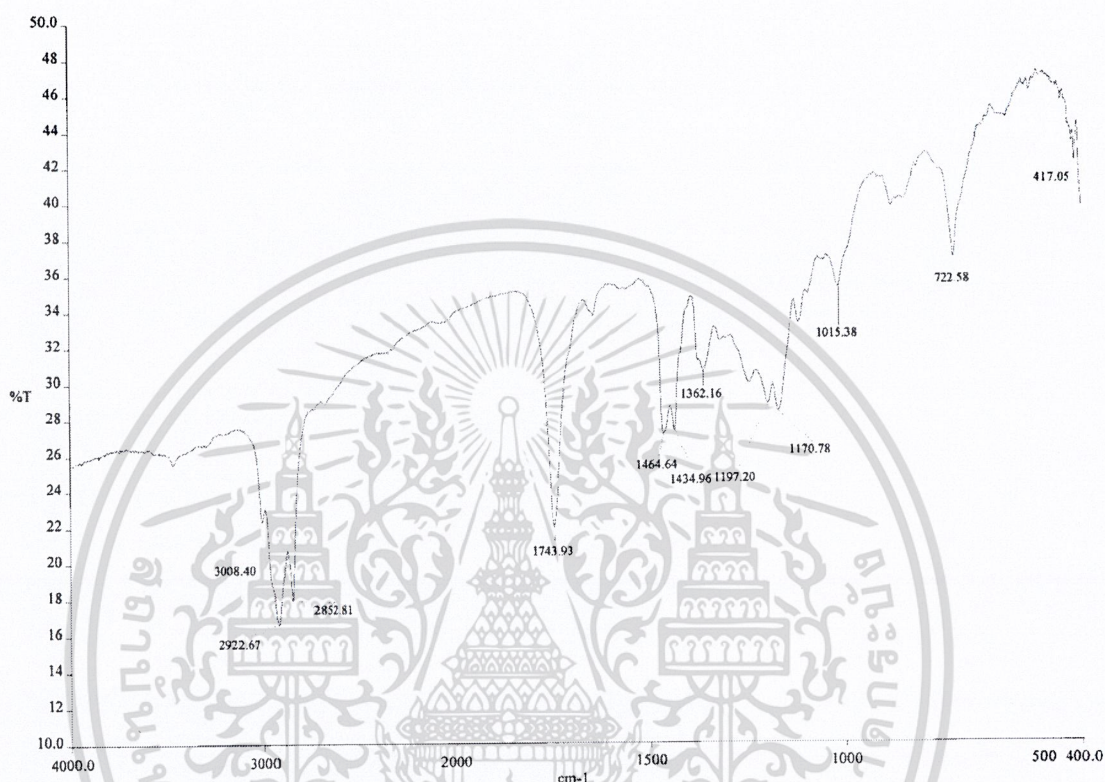
รูปที่ ๓.๖ สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา LiNO_3/CaO (calcined) ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะกึ่งที่ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาครั้งที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 จากเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



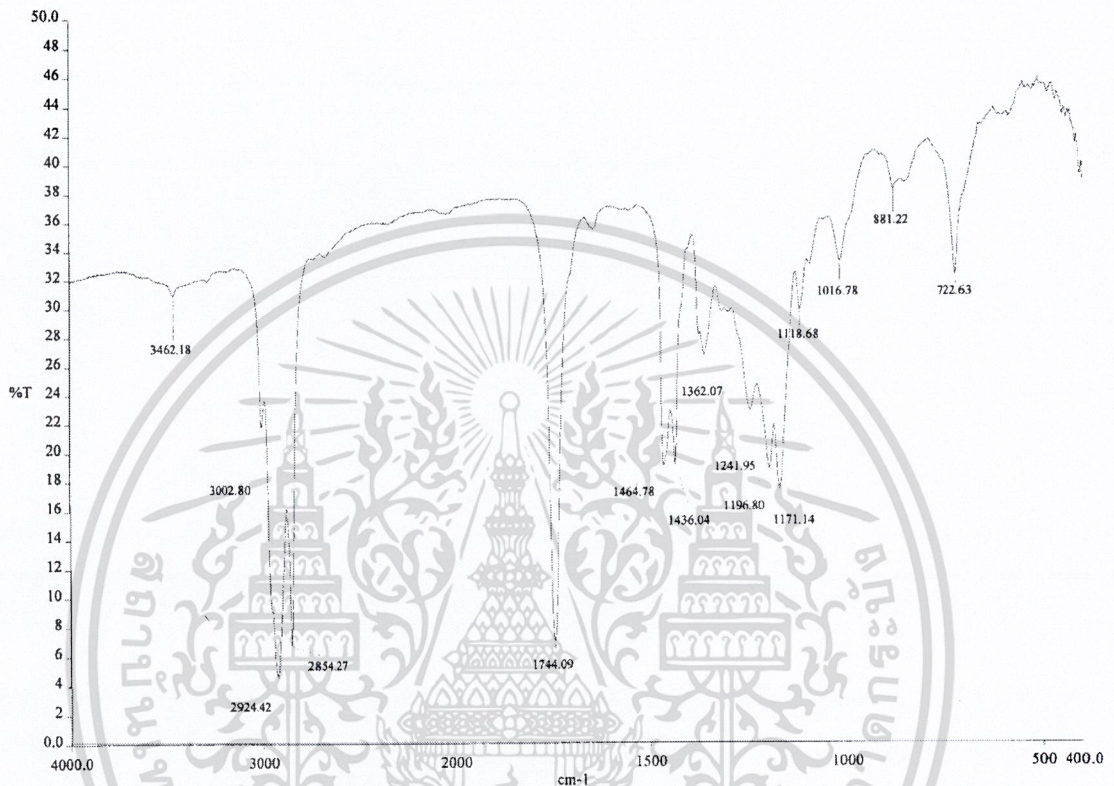
รูปที่ ๓.7 สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา LiNO_3/CaO (calcined) ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะคองที่ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาคองที่ที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 จากเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



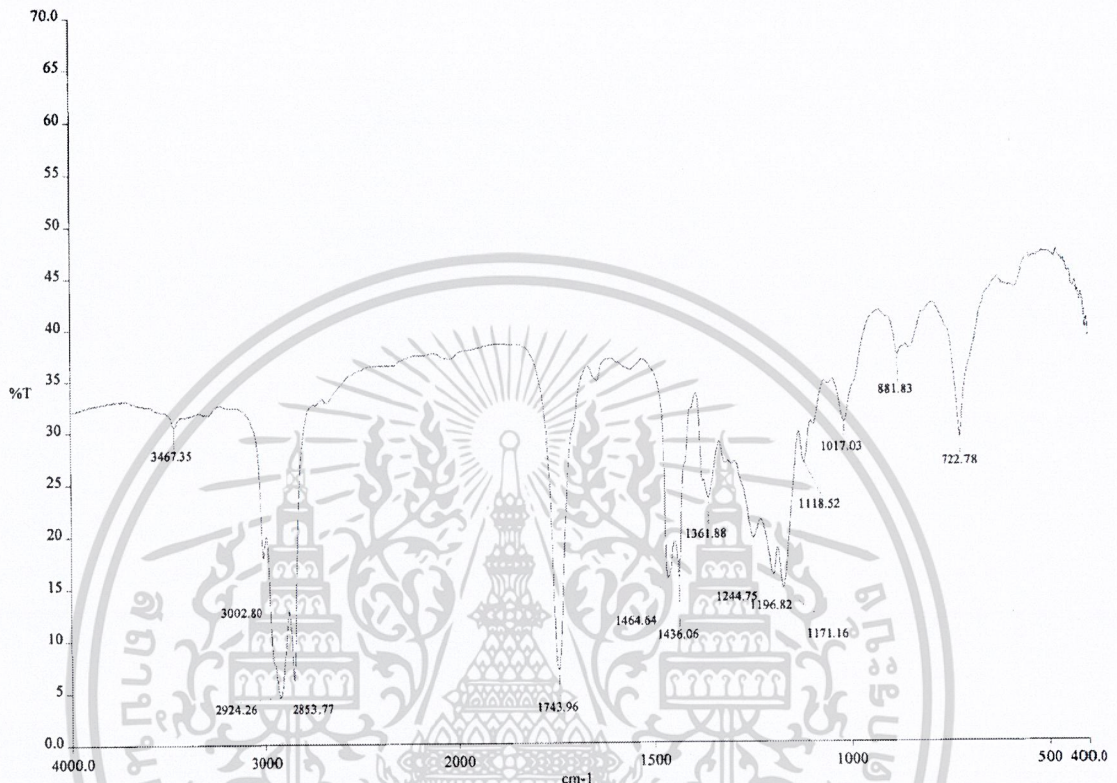
รูปที่ ๘.8 สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา LiNO_3/CaO (calcined) ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะทองที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทองที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 จากเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๑.๑ สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา LiNO_3/CaO (calcined) ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะคิงที่ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาคิงที่ที่ร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 จากเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.10 สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา LiNO_3/CaO (calcined) ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะคองที่ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาคองที่ที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 10:1 จากเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

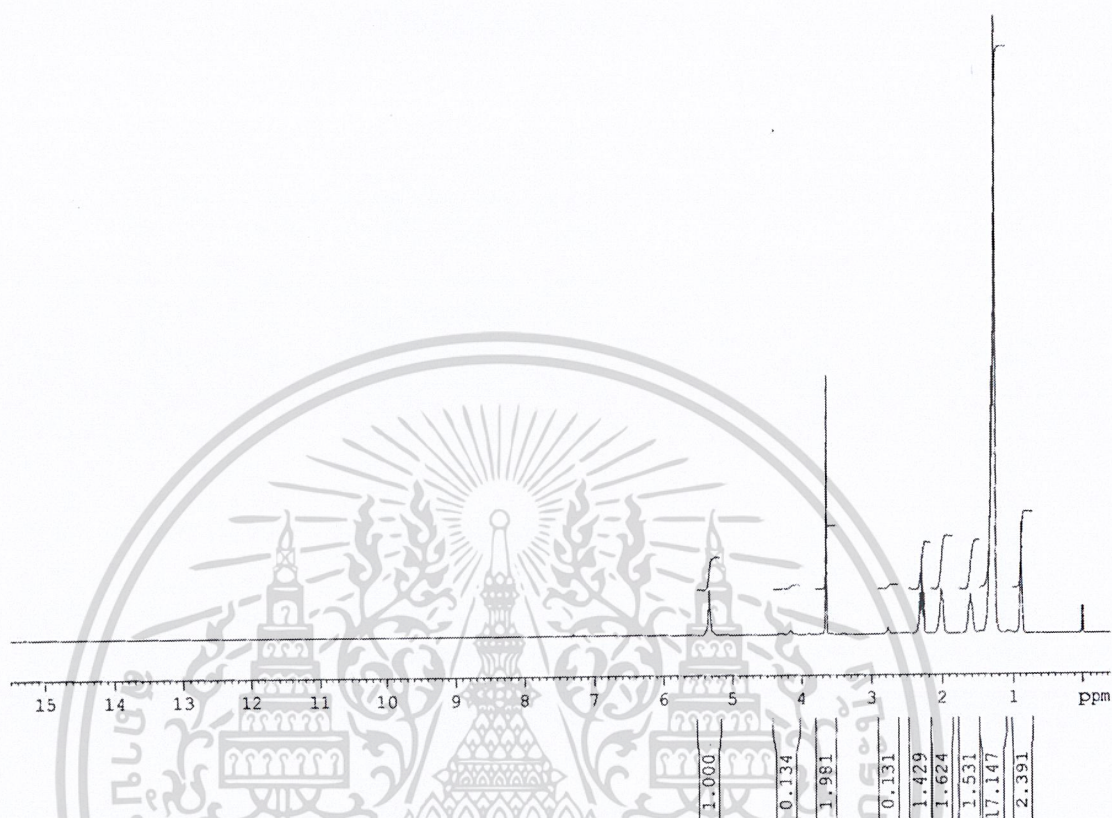
ภาคผนวก ง.

ลักษณะทางเคมีของไบโอดีเซล โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม นิวเคลียร์แมกเนติก เรโซแนนซ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fouier-Transform Nuclear Magnetic Resonance Spectrophotometer, FT-NMR)



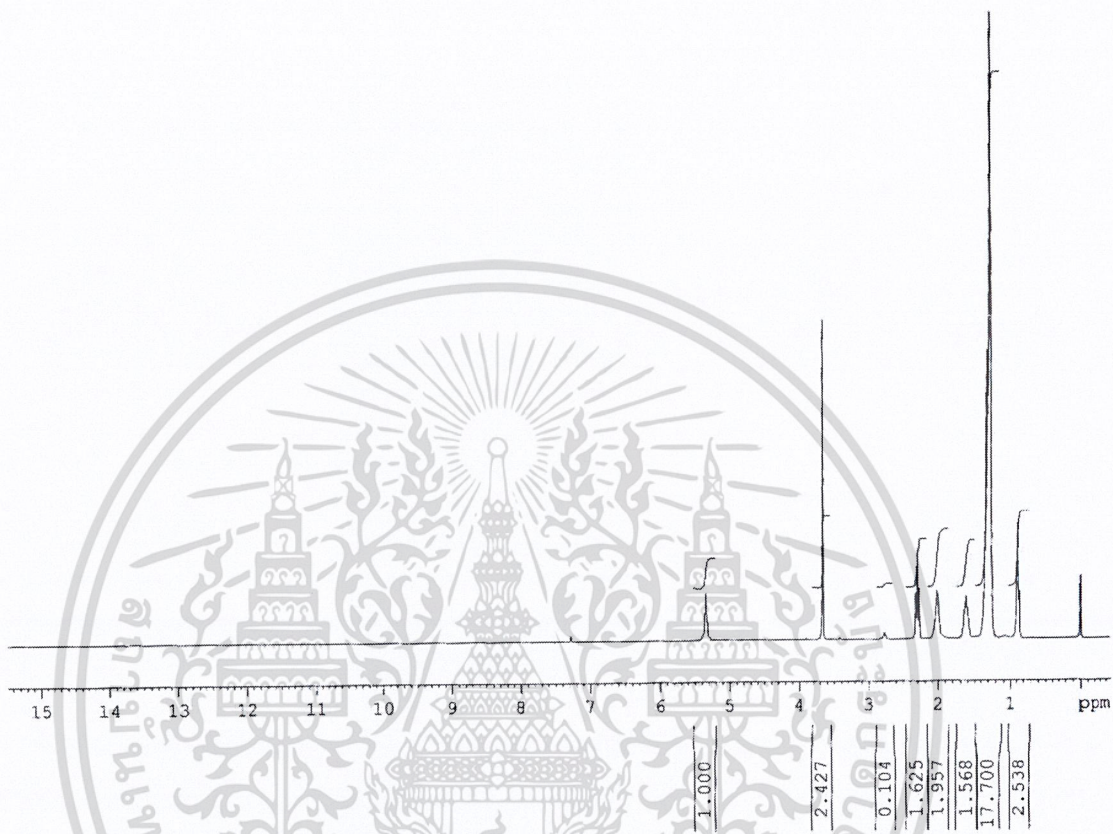
รูปที่ ง.1 สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา LiNO_3/MgO (calcined) ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะคิงที่ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาคิงที่ที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 จากเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม นิวเคลียร์แมกเนติก เรโซแนนซ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง.2 สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา LiNO_3/CaO (non-calcined) ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะคิงที่ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาคิงที่ที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 จากเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม นิวเคลียร์แมกเนติก เรโซแนนซ์ สเปกโตรสโกปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



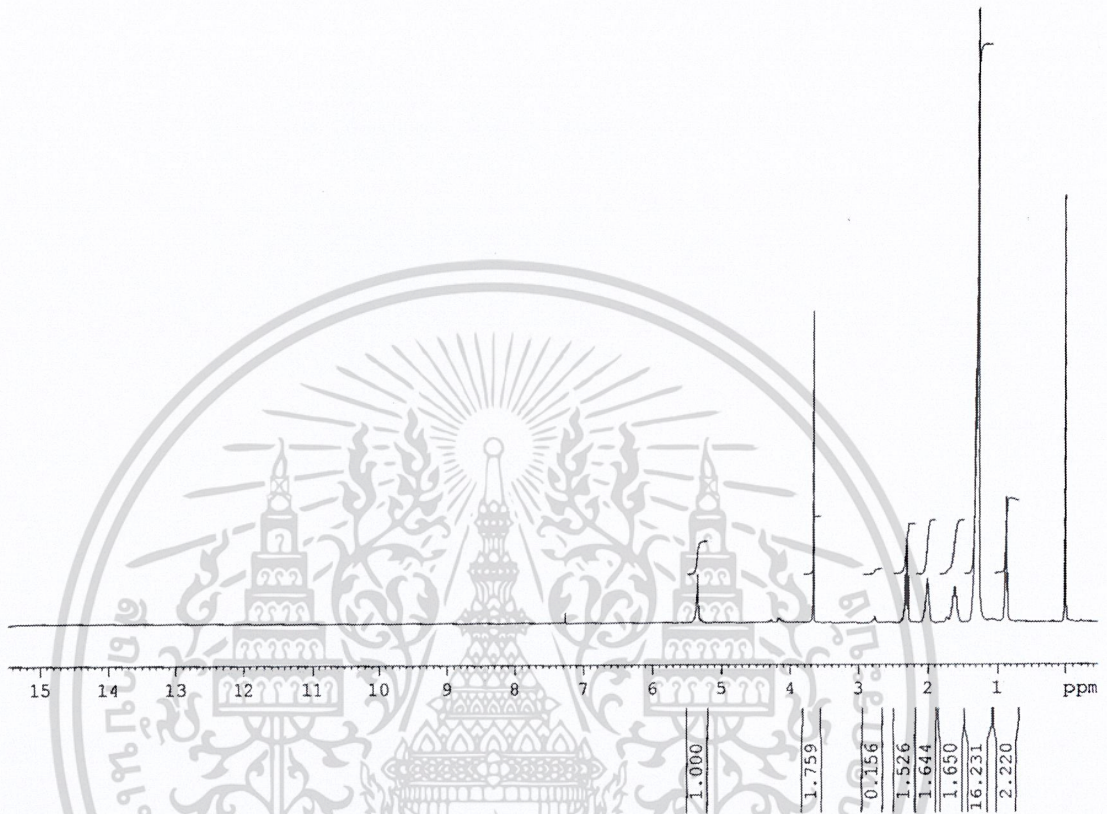
รูปที่ ง.3 สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NaNO_3/CaO (calcined) ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะทองที่ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยากงที่ที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 จากเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม นิวเคลียร์แมกเนติก เรโซแนนซ์ สเปกโตรสโกปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

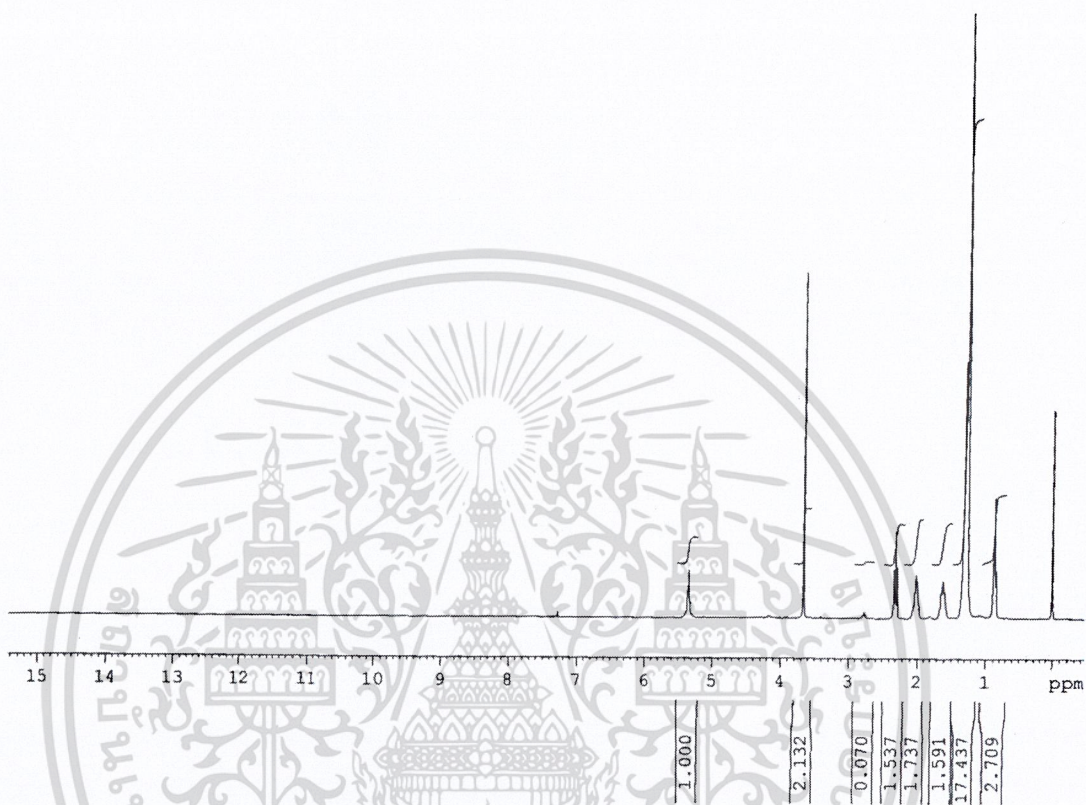


รูปที่ ๔.4 สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NaNO_3/CaO (non-calcined) ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะคิงที่ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาคิงที่ที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 จากเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม นิวเคลียร์แมกเนติก เรโซแนนซ์ สเปกโตรสโกปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา LiNO_3/CaO (calcined) ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะทองที่ที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทองที่ที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 จากเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโตรสโกปี



รูปที่ ง.6 สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา LiNO_3/CaO (calcined) ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะคิงที่ที่ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาคิงที่ที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 จากเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม นิวเคลียร์แมกเนติก เรโซแนนซ์ สเปกโตรสโกปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



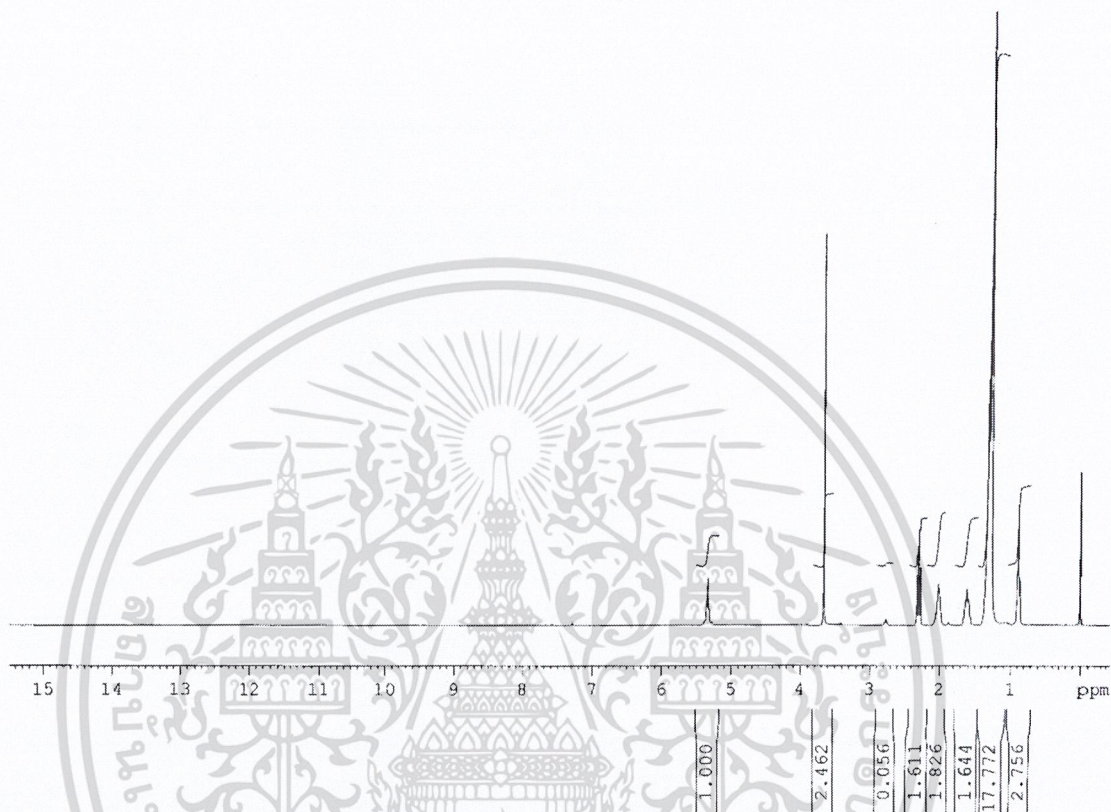
รูปที่ ง.7 สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา LiNO_3/CaO (calcined) ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะทองที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทองที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 จากเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม นิวเคลียร์แมกเนติก เรโซแนนซ์ สเปกโตรสโกปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.8 สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา LiNO_3/CaO (calcined) ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะทองที่ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทองที่ที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 จากเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม นิวเคลียร์แมกเนติก เรโซแนนซ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๙.๑ สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา LiNO_3/CaO (calcined) ความเข้มข้นของสารละลายเกลือของโลหะทองที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทองที่ร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 จากเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม นิวเคลียร์แมกเนติก เรโซแนนซ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

