

การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม โดยใช้เกลือฟอสเฟต
บนอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์
ALUMINA-SUPPORTED PHOSPHATE COMPOUNDS AS
A HETEROGENEOUS CATALYST FOR BIODIESEL
PRODUCTION FROM PALM OIL



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (สาขาเคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม โดยใช้เกลือฟอสเฟต
บนอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

ALUMINA-SUPPORTED PHOSPHATE COMPOUNDS AS
A HETEROGENEOUS CATALYST FOR BIODIESEL
PRODUCTION FROM PALM OIL



T149507

ธวัชณี

ฝนทัง

อรณิชา

สรวงประดิษฐ์

อุบลวรรณ

วะริวงศ์

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 149507
ปีเดือนปี - 8 ส.ค. 2561

12884182

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (สาขาเคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

ALUMINA-SUPPORTED PHOSPHATE COMPOUNDS AS
A HETEROGENEOUS CATALYST FOR BIODIESEL
PRODUCTION FROM PALM OIL



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY OF FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม โดยใช้เกลือฟอสเฟตอะลูมินา เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์
ALUMINA-SUPPORTED PHOSPHATE COMPOUNDS AS A HETEROGENEOUS CATALYST FOR BIODIESEL PRODUCTION FROM PALM OIL

ชื่อนักศึกษา นางสาวธวชนี ฝนทัง รหัสนักศึกษา 56050502
นางสาวอรณิชา สรวงประดิษฐ์ รหัสนักศึกษา 56050655
นางสาวอุบลวรรณ วรรวิวงศ์ รหัสนักศึกษา 56050661

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา เคมี
ปีการศึกษา 2559
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.ชวาลย์ ศรีวงศ์ ประธานกรรมการ	
ดร.ณวิสิทธิ์ โชติแสง กรรมการ	ณวิสิทธิ์ โชติแสง
ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม โดยใช้เกลือฟอสเฟตบนอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวรชชินี	ฝนทัง	รหัสนักศึกษา 56050502
	นางสาวอรณิชา	สรวงประดิษฐ์	รหัสนักศึกษา 56050655
	นางสาวอุบลวรรณ	วะริวงศ์	รหัสนักศึกษา 56050661
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2559		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล		

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มกับเมทานอลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้เกลือฟอสเฟตบนอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ โดยศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ ได้แก่ ชนิดของเกลือฟอสเฟต ปริมาณฟอสเฟตบนตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และการนำกลับมาใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา จากการทดลองพบว่า การเติมฟอสเฟตลงบนอะลูมินาจะให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่สูงกว่าการใช้อะลูมินาเพียงอย่างเดียว และจากการเปรียบเทียบชนิดของเกลือฟอสเฟตที่เติมลงบนอะลูมินาพบว่า โซเดียมฟอสเฟตจะให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงกว่าโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต โดยสภาวะที่ดีที่สุดในการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ คือ ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตบนอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณฟอสเฟต 20% โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 9:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% โดยน้ำหนัก เวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิจุดเดือดของเมทานอล พบว่าได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เป็น 87.05 จากการศึกษานำตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตบนอะลูมินากลับมาใช้ซ้ำ พบว่าร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ลดลง เมื่อจำนวนของการใช้ซ้ำเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้มีค่าความเป็นกรดและค่าไอโอดีนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตามที่กฎหมายกำหนด

คำสำคัญ : ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ไบโอดีเซล เมทิลเอสเทอร์ ฟอสเฟต อะลูมินา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	ALUMINA-SUPPORTED PHOSPHATE COMPOUNDS AS A HETEROGENEOUS CATALYST FOR BIODIESEL PRODUCTION FROM PALM OIL
Name	Miss Thawachinee Fonthag Student ID 56050502 Miss Ornicha Sroungpradit Student ID 56050655 Miss Ubonwanna Wariwong Student ID 56050661
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)
Department	Chemistry
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2016
Special project advisor	Dr.Amnat Permsubscul

Abstract

The objectives of this research were synthesis of biodiesel via transesterification reaction of palm oil with methanol using alumina supported phosphate compounds as a heterogeneous catalyst. The variables that affect on the %yield of methyl ester, namely the type of phosphate salt, content of phosphate on the catalyst, mole ratio of methanol to oil, dosage of catalysts, reaction time and recyclability of catalyst were also studied. The results shown that the reaction using alumina supported phosphate compounds was found to be more effective than without phosphate. Besides, when compare the types of phosphate salts, sodium phosphate was shown to be the most effective than sodium hydrogen phosphate. Moreover, the highest yield of methyl ester, 87.05%, was obtained using 20 wt.% of phosphate, mole ratio of methanol to oil 9:1, catalyst dosage 1 wt.% for 2 hours at the reflux temperature of methanol. The study of recyclability of sodium phosphate supported on alumina in the reaction, it was found that %yield of methyl ester decrease with the increasing of reaction cycles. The properties of biodiesel were tested. It was found that the acid value and iodine value were all in the commercial standard requirements.

Keywords : Transesterification, Biodiesel, Methyl ester , Phosphate , Alumina

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยความกรุณาจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล ที่ให้คำปรึกษาและตรวจทานแก้ไขโครงการฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ดร.ชาวลย์ ศรีวงษ์ และดร.ณวลีธิ์ โชติแสง กรรมการสอบโครงการพิเศษที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อชี้แนะ และตรวจสอบข้อมูลต่างๆ ในโครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความถูกต้อง

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ให้ความรู้และคำแนะนำ

ขอขอบคุณ คุณวิษระ สิริพิพัฒกุลณ์ นักวิทยาศาสตร์ สำนักงานศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารโดยใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันสเปคโตรโฟโตมิเตอร์

ขอขอบคุณสำนักบริหารงานวิจัยและนวัตกรรมพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารโดยใช้เครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ขอขอบคุณ คุณพีรพัฒน์ ไกรวัฒนวงศ์ นักวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารโดยใช้เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยเทคนิคบีอีที และพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีของเมทิลเอสเทอร์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์พลังงานความร้อน

ขอขอบคุณ คุณสุภัทร บานเย็น นักวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารและเอกลักษณ์ทางเคมีของเมทิลเอสเทอร์โดยใช้เครื่องฟูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรโฟโตมิเตอร์

ขอขอบคุณ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีของเมทิลเอสเทอร์โดยใช้เครื่องฟูเรียรทรานสฟอร์ม นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปคโตรโฟโตมิเตอร์

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในด้านอุปกรณ์และสารเคมี

ขอขอบพระคุณ ครอบครัวอันเป็นที่รักสำหรับกำลังใจและการสนับสนุนที่มีให้เสมอมา

ขอขอบพระคุณ รุ่นพี่ทุกคนที่กรุณาให้คำแนะนำ และคอยช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ เพื่อนๆ สาขาเคมีอุตสาหกรรม ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจอยู่เสมอๆ

ธวัชณี ฝนทั้ง

อรณิชา สรวงประดิษฐ์

อุบลวรรณ วะริวงศ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ไบโอดีเซล.....	5
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันพืช.....	6
2.3 ปาล์มน้ำมัน.....	7
2.4 ปฏิกริยาที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ไบโอดีเซล.....	9
2.4.1 การนำมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลโดยตรงและการผสม.....	9
2.4.2 ไมโครอิมัลชัน.....	9
2.4.3 กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อน.....	9
2.4.4 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	10
2.4.4.1 การทำปฏิกริยาโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกริยา.....	11
2.4.4.2 การทำปฏิกริยาโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกริยา.....	11
2.4.4.3 การทำปฏิกริยาในภาวะเหนือวิกฤตของเมทานอล.....	13
2.5 ชนิดของตัวเร่งปฏิกริยา.....	14
2.5.1 ตัวเร่งปฏิกริยาเอกพันธ์.....	14
2.5.2 ตัวเร่งปฏิกริยาแบบวิวิธพันธ์.....	15
2.5.3 อะลูมินา.....	16
2.5.4 โลหะหมู่ 1A.....	18
2.5.4.1 สมบัติที่สำคัญของธาตุหมู่ 1A.....	18
2.5.4.2 สารประกอบของธาตุหมู่ 1A.....	19
2.5.4.3 ประโยชน์ของธาตุหมู่ 1A.....	20
2.5.4.4 สารประกอบไฮเดรียมฟอสเฟต.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่าย หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ได้ หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยไว้ล่วงหน้า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 สมบัติทางด้านเชื้อเพลิงที่สำคัญของไบโอดีเซล.....	20
2.6.1 ค่าความร้อน.....	20
2.6.2 จุดวาบไฟ.....	20
2.6.3 ความหนืด.....	21
2.6.4 ค่าความเป็นกรด.....	21
2.6.5 เลขไอโอดีน.....	21
2.7 ประโยชน์ของไบโอดีเซล.....	22
2.7.1 ประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อม.....	22
2.7.2 ประโยชน์ทางด้านสมรรถนะเครื่องยนต์.....	22
2.7.3 ประโยชน์ด้านเศรษฐกิจ.....	23
2.7.4 ประโยชน์ด้านการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงภายในประเทศ.....	23
2.8 ผลกระทบของไบโอดีเซลที่มีต่อเครื่องยนต์.....	23
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	28
3.1 สารเคมี.....	28
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	28
3.3 วิธีการทดลอง.....	29
3.3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาฟอสเฟตบนอะลูมินา.....	30
3.3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	31
3.3.3 การสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์.....	33
3.3.4 การทดสอบสมบัติทางเชื้อเพลิงและโครงสร้างทางเคมีของเมทิลเอสเทอร์.....	38
3.3.4.1 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด.....	38
3.3.4.2 การวิเคราะห์หาเลขไอโอดีน.....	38
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	40
4.1 การศึกษาลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	40
4.1.1 โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	40
4.1.2 ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	44
4.1.3 พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	46
4.2 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์.....	46
4.2.1 ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา.....	46
4.2.2 ผลของปริมาณเกลือฟอสเฟตบนตัวรองรับอะลูมินา.....	49
4.2.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม.....	51
4.2.4 ผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา.....	53
4.2.5 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา.....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปตีพิมพ์หรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.6 การนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำ.....	57
4.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีและทดสอบสมบัติของเมทิลเอสเทอร์.....	58
4.3.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีของเมทิลเอสเทอร์โดยใช้เครื่องฟูเรียรทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์.....	58
4.3.2 ลักษณะทางเคมีของไบโอดีเซล โดยใช้เครื่องฟูเรียรทรานสฟอร์มนิวเคลียร์แมกเนติก เรโซแนนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์.....	62
4.3.3 การทดสอบค่าความเป็นกรดและเลขไอโอดีนของเมทิลเอสเทอร์.....	65
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	66
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	66
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	67
เอกสารอ้างอิง.....	68
ภาคผนวก.....	71
ภาคผนวก ก.....	72
ภาคผนวก ข.....	74
ภาคผนวก ค.....	79

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล.....	5
2.2 คุณสมบัติและองค์ประกอบกรดไขมันหลัก ของน้ำมันพืชต่างๆ.....	7
2.3 สมบัติของไหลภาวะเหนือวิกฤตเปรียบเทียบกับแก๊สและของเหลว.....	14
2.4 แสดงประเภทปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	14
2.5 การเปรียบเทียบปัจจัยต่างๆ ในการเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์และวิวิธพันธ์.....	15
2.6 แสดงสมบัติบางประการของโลหะหมู่ IA.....	19
2.7 แสดงคุณสมบัติมาตรฐานของไบโอดีเซล.....	22
2.8 แสดงการเปรียบเทียบมลพิษในไอเสียจากเครื่องยนต์ที่ใช้ไบโอดีเซล.....	24
2.9 แสดงการเปรียบเทียบผลการใช้ไบโอดีเซล100%(B100)และน้ำมันดีเซลซึ่งผสมด้วยไบโอดีเซล20%(B20).....	24
3.1 ปริมาณของเกลือฟอสเฟตชนิดต่างๆ สำหรับใช้ในการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	30
3.2 ตัวแปรในการศึกษาผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาและปริมาณฟอสเฟตบนตัวรองรับอะลูมินาที่มีผลต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้เกลือฟอสเฟตชนิดต่างๆบนตัวรองรับอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	36
3.3 ตัวแปรในการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่มีต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้ฟอสเฟตอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	36
3.4 ตัวแปรในการศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ฟอสเฟตอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	37
3.5 ตัวแปรในการศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้ฟอสเฟตอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	38
3.6 ตัวแปรในการศึกษาผลของการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้ฟอสเฟตอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	38
4.1 พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาเกลือฟอสเฟตบนตัวรองรับอะลูมินาวิเคราะห์โดยเทคนิค BET.....	46
4.2 ปริมาณผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์.....	47
4.3 ผลของปริมาณเกลือฟอสเฟตบนอะลูมินาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์.....	49
4.4 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้เกลือฟอสเฟตบนอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	51
4.5 ผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้เกลือฟอสเฟตบนอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	53
4.6 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้เกลือฟอสเฟตบนอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	55
4.7 แสดงหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันปาล์มและเมทิลเอสเทอร์ที่ทำการดูกลืนแสงที่เลขคลื่นต่างๆ.....	61
4.8 ค่าความเป็นกรดและเลขไอโอดีนของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากสภาวะต่างๆ.....	65
ข.1 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์.....	74

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.2 อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์.....	75
ข.3 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์.....	75
ข.4 เวลาที่ในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์.....	76
ข.5 การนำปฏิกิริยามาใช้ใหม่ในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์.....	77
ข.6 ค่าความเป็นกรดและเลขไอโอดีนของเมทิลเอสเทอร์ที่ใช้สังเคราะห์ได้จากสภาวะต่างๆ.....	78



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์.....	6
2.2 แสดงผลของปาล์มน้ำมัน.....	8
2.3 ปฏิกิริยาการแตกสลายด้วยความร้อน.....	10
2.4 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน.....	10
2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรด.....	11
2.6 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรด.....	12
2.7 เฟสไดอะแกรมของของไหลเหนือภาวะวิกฤต.....	13
2.8 ภาพการหลุดออกของน้ำจากผิวของอะลูมินา.....	17
2.9 (ก) แสดงตำแหน่งที่เป็นกรดและเบสแบบลิวอิสบนอะลูมินา (ข) การดูดซับของแอมโมเนียบนตำแหน่งที่เป็นกรดแบบลิวอิส.....	17
3.1 แสดงการนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปทำการแคลไซน์.....	31
3.2 เครื่องเอ็กซ์เรย์กัฟแฟรคชันสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (XRD).....	32
3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	32
3.4 แสดงเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยเทคนิคบีอีที.....	33
3.5 แสดงการตั้งอุปกรณ์รีฟลักซ์สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน.....	34
3.6 แสดงการแยกชั้นของเมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอลในกรวยแยก.....	34
3.7 แสดงเมทิลเอสเทอร์ที่ผ่านการดูดน้ำด้วยแอนไฮดรัสโซเดียมซัลเฟต.....	35
4.1 รูปแบบเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันของอะลูมินา(Al_2O_3).....	41
4.2 รูปแบบเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน(a) Al_2O_3 , (b)20% Na_2HPO_4/Al_2O_3 , (c)20% Na_3PO_4/Al_2O_3 , (d)30% Na_3PO_4/Al_2O_3	42
4.3 รูปแบบFT-IR ของ (---) Al_2O_3 , (—)20% Na_2HPO_4/Al_2O_3 , (---) Na_2HPO_4 ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 °C.....	43
4.4 รูปแบบFT-IR ของ (---) Al_2O_3 , (—) 20% Na_3PO_4/Al_2O_3 , (---) Na_3PO_4 ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 °C.....	43
4.5 รูปแบบFT-IR ของ (---) Al_2O_3 , (—) 30% Na_3PO_4/Al_2O_3 , (---) Na_3PO_4 ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 °C.....	44
4.6 ลักษณะพื้นที่ผิวของตัวรองรับ Al_2O_3 และตัวเร่งปฏิกิริยา20% Na_3PO_4/Al_2O_3 ที่กำลังขยายต่างๆ.....	45
4.7 ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์.....	47
4.8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกลือฟอสเฟตบนอะลูมินา.....	48
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเกลือฟอสเฟตบนตัวรองรับอะลูมินากับร้อยละของเมทิลเอสเทอร์.....	50
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มกับร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้เกลือฟอสเฟตบนอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	52
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้เกลือฟอสเฟตบนอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้เกลือฟอสเฟต บนอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	56
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยากับร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้ เกลือฟอสเฟตบนอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	57
4.14 FT-IR สเปกตรัมของน้ำมันปาล์มจากเครื่องฟูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์.....	58
4.15 FT-IR สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 20%Na ₃ PO ₄ /Al ₂ O ₃ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 9:1 เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก.....	59
4.16 FT-IR สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 20%Na ₂ HPO ₄ /Al ₂ O ₃ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 9:1 เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก.....	60
4.17 FT-NMR สเปกตรัมของน้ำมันปาล์มจากเครื่องฟูเรียรทรานสฟอร์มนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์.....	62
4.18 FT-NMR สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 20%Na ₃ PO ₄ /Al ₂ O ₃ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 9:1 เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก.....	63
4.19 FT-NMR สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 20%Na ₂ HPO ₄ /Al ₂ O ₃ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 9:1 เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก.....	64
ก.1 สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลจากเครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์.....	72
ค.1 FT-IR สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Na ₃ PO ₄ /Al ₂ O ₃ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 9:1 เวลาที่ใช้ทำ ปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก.....	79
ค.2 FT-IR สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 15%Na ₃ PO ₄ /Al ₂ O ₃ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 9:1 เวลาที่ใช้ทำ ปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก.....	80
ค.3 FT-IR สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 30%Na ₃ PO ₄ /Al ₂ O ₃ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 9:1 เวลาที่ใช้ทำ ปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก.....	81
ค.4 FT-IR สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Na ₂ HPO ₄ /Al ₂ O ₃ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 9:1 เวลาที่ใช้ทำ ปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก.....	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- ค.5 FT-IR สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
 15%Na₂HPO₄/Al₂O₃ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 9:1 เวลาที่ใช้ทำ
 ปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก..... 83
- ค.6 FT-IR สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
 30%Na₂HPO₄/Al₂O₃ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 9:1 เวลาที่ใช้ทำ
 ปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก..... 84



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ

ในปัจจุบันทั่วโลกประสบปัญหาเกี่ยวกับราคาน้ำมันดิบที่ปรับตัวสูงขึ้นเนื่องจากการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะน้ำมันดีเซล เนื่องจากเครื่องยนต์ดีเซลสามารถประยุกต์ใช้งานได้กว้างขวางกว่าเครื่องยนต์ชนิดอื่นๆ ทั้งในการขับเคลื่อนเครื่องยนต์ขนาดเล็ก เครื่องจักรอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ยวดยานพาหนะต่างๆ [1] ดังนั้นความต้องการในการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลจึงมีปริมาณสูง เฉพาะภายในประเทศตะวันตกวันละ 50 ล้านลิตร หรือเดือนละ 1,500 ล้านลิตร คิดเป็นสัดส่วนประมาณ 8% ส่งผลให้แหล่งปิโตรเลียมซึ่งเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดอยู่แล้วยิ่งลดน้อยลงมากขึ้น กระทรวงพลังงานจึงได้จัดทำแผนการพัฒนาระบบและส่งเสริมการผลิตและการใช้ไบโอดีเซล(Biodiesel) มีการผลักดันให้เปิดสถานีบริการไบโอดีเซลชุมชน 70 ชุมชน ภายในสิ้นปี 2549 ซึ่งจะมีกำลังผลิตรวม 7,000 – 21,000 ลิตรต่อวัน [2] รวมทั้งการผลิตไบโอดีเซล (ในรูปเมทิลเอสเทอร์) จากน้ำมันปาล์ม โดยไบโอดีเซลมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล สามารถใช้แทนน้ำมันดีเซลหรือเติมเป็นส่วนผสมในดีเซลเพื่อใช้กับเครื่องยนต์ได้โดยไม่ต้องปรับแต่งเครื่องยนต์ คุณสมบัติที่พิเศษแตกต่างจากน้ำมันดีเซลทั่วไปนั้น คือ การเผาไหม้ที่สะอาดกว่าเชื้อเพลิงที่ได้จากปิโตรเลียมที่ใช้กันอยู่ทั่วไป โดยไอเสียจากเครื่องยนต์ที่ใช้ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงมีความสะอาดมากกว่า เพราะออกซิเจนในไบโอดีเซลให้การสันดาปที่สมบูรณ์กว่าดีเซลปกติ จึงมีก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยกว่า และเนื่องจากไบโอดีเซลไม่มีกำมะถันจึงไม่ก่อให้เกิดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และทำให้ลดการเกิดคาร์บอนน้อยไม่ก่อให้เกิดการอุดตันของระบบไอเสียช่วยยืดอายุการทำงานของเครื่องยนต์ นอกจากนี้การใช้ไบโอดีเซลไม่ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศเพิ่มขึ้นและลดการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกด้วย

การใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์เกิดขึ้นครั้งแรกเมื่อ ดร.รูดอล์ฟ ดีเซล ชาวเยอรมัน ซึ่งเป็นผู้คิดค้นเครื่องยนต์ดีเซลได้สำเร็จ ในปี ค.ศ. 1882 ในขณะนั้นได้ใช้น้ำมันถั่วลิสงเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงในการทดสอบเครื่องยนต์ครั้งนั้น จนประสบความสำเร็จและเป็นต้นแบบของเครื่องยนต์ดีเซลจนถึงปัจจุบัน [3] แต่เนื่องจากในช่วงเวลาดังกล่าวน้ำมันจากปิโตรเลียมราคาถูกและหาได้ง่าย น้ำมันพืชจึงไม่เป็นที่ยอมรับเพราะราคาแพงกว่าน้ำมันปิโตรเลียม นอกจากนี้การใช้น้ำมันพืชยังประสบปัญหาเรื่องการที่น้ำมันพืชมีความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้หัวฉีดน้ำมันเป็นฝอยได้ยาก เกิดเป็นอุปสรรคต่อการป้อนน้ำมันเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้และสันดาปไม่สมบูรณ์ อีกทั้งน้ำมันพืชมีคุณสมบัติที่ระเหยตัวกลายเป็นไอน้ำน้อยและช้ามากยิ่งขึ้นทำให้เกิดการจุดระเบิดได้ยากส่งผลให้เครื่องยนต์ติดยากและหลงเหลือคราบเขม่าเกาะที่หัวฉีด ผนังลูกสูบ แหวน และวาล์ว จากคุณสมบัติที่น้ำมันพืชมีความหนืดสูงและระเหยได้ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลนี้ ทำให้เกิดความยุ่งยากเมื่อใช้น้ำมันพืช

ล้วนๆ โดยตรงในเครื่องยนต์ [4] จนกระทั่งปัจจุบันทั่วโลกประสบปัญหาด้านราคาน้ำมันปิโตรเลียมที่

สูงขึ้นนับตั้งแต่วิกฤตน้ำมันในปี ค.ศ. 1973 เป็นต้นมา ประกอบกับได้มีการพัฒนาและผลิตน้ำมันพืช ในรูปไบโอดีเซลเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานกับเครื่องยนต์มากขึ้น ไบโอดีเซลจึงเป็นที่ยอมรับ และได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง

การพัฒนาไบโอดีเซลสามารถพบได้ใน 28 ประเทศ โดยมีเยอรมันและฝรั่งเศสเป็นประเทศ สำคัญในการผลิตไบโอดีเซลของโลก ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1997 ประเทศญี่ปุ่นได้เริ่มผลิตไบโอดีเซลขึ้นใน กรุงโตเกียวโดยตั้งเป้าหมายว่าจะผลิตไบโอดีเซลให้ถึงระดับการค้า โดยปัจจุบันรถที่ใช้วิ่งใน 220 จังหวัดนั้นจะใช้น้ำมันไบโอดีเซลคิดเป็นร้อยละ 100 และมีการทดลองต่อเนื่องโดยให้รถประจำทางใน 81 จังหวัดใช้ไบโอดีเซลในลักษณะการผสมระหว่างไบโอดีเซลร้อยละ 20 และน้ำมันดีเซลร้อยละ 80 [5]

โดยทั่วไปการสังเคราะห์ไบโอดีเซล (ในรูปแบบเมทิลเอสเทอร์) จากน้ำมันปาล์ม ด้วย กระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับเมทานอล โดยอาศัยตัวเร่ง ปฏิกริยาซึ่งไบโอดีเซลที่ได้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลที่กลั่นได้จากปิโตรเลียม สามารถใช้แทน น้ำมันดีเซลหรือเติมเป็นส่วนผสมในน้ำมันดีเซลเพื่อใช้กับเครื่องยนต์ได้โดยไม่ต้องปรับแต่งเครื่องยนต์ ตัวเร่งปฏิกริยาที่ใช้ในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ตัวเร่งปฏิกริยาแบบวิวิธ พันธุ์ (Heterogeneous catalyst) และ ตัวเร่งปฏิกริยาแบบเอกพันธุ์ (Homogeneous catalyst) ซึ่งตัวเร่งปฏิกริยาแบบเอกพันธุ์นั้นให้ผลผลิตไบโอดีเซลที่ค่อนข้างสูง แต่เนื่องจากเกิดปัญหาในการ แยกตัวเร่งปฏิกริยาดังกล่าวออกจากไบโอดีเซลได้ยากดังนั้นจึงทำให้มีการพัฒนาตัวเร่งปฏิกริยาแบบ วิวิธพันธุ์เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ซึ่งมีข้อได้เปรียบในเรื่องของการแยกตัวเร่งออกจากไบโอดีเซลแล้ว ยัง สามารถนำตัวเร่งกลับมาใช้ซ้ำได้อีกด้วย

สารประกอบหลายชนิดได้ถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกริยาวิวิธพันธุ์ในการสังเคราะห์ไบโอดีเซล ได้แก่ ออกไซด์ของโลหะ (metal oxide) และสารประกอบของโลหะแอลคาไลน์หรือแอลคาไลน์เอิร์ธ แต่ข้อเสียของตัวเร่งปฏิกริยาวิวิธพันธุ์ คือ อัตราเร็วของการเกิดปฏิกริยาจะช้ากว่าตัวเร่งปฏิกริยาชนิด เอกพันธุ์ เนื่องจากข้อจำกัดด้านการแพร่ (diffusion limitation) ของสามัญภาค (oil / alcohol / catalyst) ดังนั้นตัวเร่งปฏิกริยาวิวิธพันธุ์ในปัจจุบันจึงมีลักษณะเป็นผง (powder) ซึ่งช่วยลดปัญหา ด้าน diffusion limitation แต่จะเกิดความยุ่งยากในการแยกออกจากของผสมในปฏิกริยา วิธีการ หนึ่งในที่จะแก้ปัญหาก็กล่าวมาได้ คือ ใช้ตัวเร่งปฏิกริยาบนตัวรองรับ (catalyst support) ซึ่งสามารถ ให้พื้นที่ผิวที่มากพอสำหรับ active species ในการกระจายตัว ตัวรองรับที่นิยมใช้ ได้แก่ อะลูมิเนียม ออกไซด์หรืออะลูมินา (Aluminium oxide) ในรูปของ γ - Al_2O_3 ซึ่งเป็นตัวรองรับที่มีพื้นที่ผิวมาก และมีเสถียรภาพทนความร้อนสูง [6] จากงานวิจัยของ S.T. Jiang และคณะ [7] พบว่าเกลือโซเดียม ฟอสเฟต (Na_3PO_4) สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันได้ แต่ข้อเสียของ Na_3PO_4 คือ มักเกิดการละลายในของผสมของน้ำมันและเมทานอลซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ไบโอดีเซล โดย Na_3PO_4 เกิดการละลายประมาณ 3-3.5 % โดยน้ำหนัก ซึ่งร้อยละผลได้ของ ไบโอดีเซลเป็น 71.3% ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะพัฒนาตัวเร่งปฏิกริยาวิวิธพันธุ์ ฟอสเฟตบนตัวรองรับอะลูมินา โดยวิธีการทำให้เปียกชื้น (incipient-wetness impregnation) โดยใช้

เอกสารนี้... 2 ชนิด คือ โซเดียมฟอสเฟต (Na_3PO_4) และโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวมทั้งศึกษาสภาวะที่ดีที่สุดของการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มกับเมทานอลผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ ได้แก่ ชนิดของสารประกอบฟอสเฟต ปริมาณของฟอสเฟตบนอะลูมิน่า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อให้ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์แก่การขยายกำลังการผลิตในอนาคตต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1) เพื่อสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ฟอสเฟตบนตัวรองรับอะลูมิน่าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์
- 2) เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ ได้แก่ ชนิดของเกลือฟอสเฟต ปริมาณของฟอสเฟตบนตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1) ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม และเมทานอล เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาฟอสเฟตบนอะลูมิน่า ตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่

1.1 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจะใช้อะลูมิน่า (Al_2O_3) เป็นตัวรองรับ โดยใช้สารประกอบฟอสเฟตต่างๆ ได้แก่ โซเดียมฟอสเฟต (Na_3PO_4) และโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4)

1.2 ปริมาณของฟอสเฟตบนตัวรองรับอะลูมิน่า ได้แก่ 10%, 15%, 20%, และ 30% โดยน้ำหนัก

1.3 อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม ได้แก่ 6:1, 9:1, และ 12:1

1.4 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ 0.5%, 1.0%, 2.0% และ 3.0% โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม

1.5 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ได้แก่ 2, 3 และ 4 ชั่วโมง

1.6 การนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำ ได้แก่ การใช้ซ้ำครั้ง 1 และ ครั้งที่ 2

- 2) ศึกษาลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ ได้แก่

2.1 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน

(X-Ray Diffraction, XRD) และเครื่องฟูเรียรทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier-Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานวิจัยที่อาจารย์ผู้แต่งได้ดำเนินการวิจัยไปเรียบร้อยแล้วให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

2.4 พื้นผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยเทคนิคบีอีที (BET Surface Area Analyzer)

- 3) ทดสอบสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของไบโอดีเซล ได้แก่ เลขไอโอดีนและความเป็นกรด
- 4) ศึกษาโครงสร้างทางเคมีของไบโอดีเซล โดยใช้เครื่องฟูเรียรทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier-Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR) และเครื่องฟูเรียรทรานสฟอร์ม นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier-Transform Nuclear Magnetic Resonance Spectrophotometer, FT-NMR)

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาฟอสเฟตบนอะลูมินาที่มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์-เอสเทอร์ิฟิเคชัน เพื่อให้ได้ไบโอดีเซลที่มีร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุด
2. ทราบถึงอิทธิพลของตัวแปรสถานะที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ ได้แก่ ปริมาณฟอสเฟตบนอะลูมินา อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เวลาของปฏิกิริยา และการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ซ้ำ
3. ทราบถึงสถานะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์ไบโอดีเซลที่มีร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุด

1.5 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	เดือน									
	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ษ.	พ.ค.	
1. ศึกษาหาข้อมูล ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง										
2. ออกแบบวิธีการทดลอง										
3. ทำวิจัยบทที่ 1,2 และ 3										
4. ทำการทดลอง สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา										
5. ตรวจสอบลักษณะทางเคมี และทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา										
6. ทำการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์										
7. วิเคราะห์ผลการทดลอง										
8. สรุป และรายงานผล										

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไบโอดีเซล [8]

ไบโอดีเซล(Biodiesel)เป็นเชื้อเพลิงที่ผลิตจากแหล่งทรัพยากรหมุนเวียน เช่น น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ หรือสาหร่าย โดยผ่านกระบวนการทางเคมี เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างไขมันให้เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมัน ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลหมุนเร็วและสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องยนต์ และยังช่วยลดมลภาวะในอากาศ เนื่องจากไบโอดีเซลมีออกซิเจนผสมอยู่มากกว่าน้ำมันดีเซล อีกทั้งยังสามารถเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกร เนื่องจากไบโอดีเซลผลิตมาจากน้ำมันพืชและไขมันสัตว์ แสดงดังตารางที่ 2.1

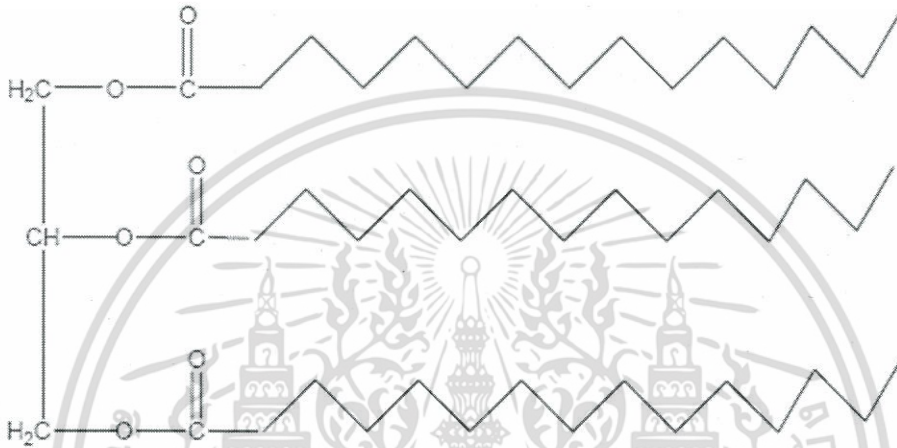
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล [8]

fuel property	Diesel	Biodiesel
fuel standard	ASTMD975	ASTMD6751
lower heating value, But/gal	~129,050	~118,170
Kinematic viscosity, (40°C)	1.3 to 4.1	4.0 to 6.0
Specific gravity kg/L, (60°F)	0.85	0.88
Density, lb./gal (15°C)	7.079	7.328
water and sediment, vol%	0.05 max	0.05 max
Carbon, wt.%	87	77
Hydrogen, wt.%	13	12
Sulfur, wt.%	0.05 max	00 to 0.0024
Boiling point, °C	180 to 340	315 to 350
Flash point, °C	60 to 80	100 to 170
Cloud point, °C	-18 to 5	-3 to 12
Pour point, °C	-35 to -15	-15 to 10
Cetane number	40 to 55	48 to 65
Lubricity SLBOCLE, grams	2,000 to 5,000	>7,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันพืช [9]

โดยทั่วไปแล้วน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ทุกชนิดเป็นสารประกอบประเภทไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกลีเซอรอลกับกรดไขมันที่มีคาร์บอนอะตอมตั้งแต่ 10 ถึง 30 ตัว (รูปที่ 2.1) มีโครงสร้างเป็น C_3H_5 เชื่อมต่อกับกรดไขมัน จากการที่กรดไขมันอยู่ในโครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์ถึงร้อยละ 94-96 ของน้ำหนักโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ ทำให้คุณสมบัติของน้ำมันแต่ละชนิดทั้งทางเคมีและกายภาพแตกต่างกันไปตามคุณสมบัติของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์ [9]

ส่วนใหญ่แล้วมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในกรดไขมันระหว่าง 12 ถึง 18 ตัว โดยมีทั้งกรดไขมันอิ่มตัวประเภทอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวในปริมาณที่แตกต่างกัน จากการที่น้ำมันพืชมีกรดไขมันอิ่มตัวอยู่ในปริมาณที่สูง จะมีค่าไอโอดีนสูงด้วย ค่าไอโอดีนของน้ำมันพืชเป็นตัวบอกว่าน้ำมันพืชชนิดนั้นสามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้มากหรือน้อย ซึ่งน้ำมันที่มีค่าไอโอดีนสูงจะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้มากและเร็วกว่าน้ำมันพืชที่มีค่าไอโอดีนต่ำ

น้ำมันพืชมีความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้ฉีดเป็นฝอยได้ยากเป็นอุปสรรคต่อการป้อนน้ำมันเชื้อเพลิงและเกิดการสันดาปได้ไม่สมบูรณ์ และระเหยเป็นไอได้น้อยกว่าน้ำมันดีเซล จุดระเบิดยาก เครื่องยนต์ติดยาก เกิดคราบเขม่าเกาะหัวฉีด ซึ่งสมบัติที่แตกต่างกันนี้ทำให้ไม่สามารถใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิงทดแทนในเครื่องยนต์ที่ยังไม่ได้ดัดแปลงส่วนของเครื่องยนต์ได้ แต่จากการที่น้ำมันพืชมีค่าความร้อนที่สูงที่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ จึงมีความพยายามที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงในเครื่องยนต์ โดยทำการดัดแปลงเครื่องยนต์ให้มีความเหมาะสมกับคุณสมบัติของน้ำมันพืช สมบัติและองค์ประกอบของน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติและองค์ประกอบกรดไขมันหลักของน้ำมันพืชต่าง ๆ [9]

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

*1 กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวมีพันธะคู่ระหว่างคาร์บอน 1 แห่ง

*2 กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวมีพันธะคู่ระหว่างคาร์บอน 2 แห่ง

*3 กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวมีพันธะคู่ระหว่างคาร์บอน 3 แห่ง

2.3 ปาล์มน้ำมัน [10]

ปาล์มน้ำมัน (Oil palm) เป็นพืชน้ำมันที่นิยมใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทยในขณะนี้เนื่องจากเป็นพืชที่มีศักยภาพในการนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงสูงกว่าพืชน้ำมันชนิดอื่นคือมีต้นทุนการผลิตต่ำให้ผลผลิตต่อพื้นที่สูงกว่าเรป (Rape) ที่เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตไบโอดีเซลในประเทศแถบยุโรปถึง 5 เท่าและสูงกว่าถั่วเหลืองที่ใช้กันมากในสหรัฐอเมริกาถึง 10 เท่าเนื่องจากปาล์มน้ำมันเป็นไม้ยืนต้น ทนต่อภัยธรรมชาติและให้ผลผลิตได้นานถึง 20 ปี ในประเทศไทยปาล์มน้ำมันเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่ปลูกขึ้นเพื่อเป็นอาหารเท่านั้น จากข้อมูลของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์การเกษตรพบว่าโดยเฉลี่ยการเพาะปลูกน้ำมันมีผลตอบแทนกำไรต่อไร่สูงถึงประมาณ 4,000 บาทต่อปีจึงมีส่งเสริมให้เกษตรกรมีการปลูกปาล์มพันธุ์ดีทดแทนพืชอื่น ๆ ที่มีรายได้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่ำกว่าและให้ความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีการเพาะปลูกแก่เกษตรกรโดยพื้นที่เพาะปลูกส่วนใหญ่จะอยู่ในพื้นที่ภาคใต้ เช่น จังหวัดชุมพร สุราษฎร์ธานี ธานี กระบี่ ตรัง สงขลา สตูล



รูปที่ 2.2 แสดงผลของปาล์มน้ำมัน [10]

ผลปาล์มมีส่วนให้น้ำมันสองส่วนคือเมล็ดใน(Kernel) และเนื้อหุ้มเมล็ดน้ำมันในเมล็ดมีสมบัติคล้ายน้ำมันมะพร้าวคือมีกรดลอริก (Lauric) ส่วนน้ำมันปาล์มจากส่วนเนื้อหุ้มเมล็ดมีองค์ประกอบคล้ายน้ำมันหมู่วิตามินเอและอีสูงกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่น ผลปาล์มสุกมีเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการดัดไขมันอิสระในตัวเองสูงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นปาล์มสุกเมื่อตัดจากต้นต้องส่งโรงงานสกัดโดยเร็ว การสกัดน้ำมันปาล์มมีหลายวิธีมีทั้งสกัดจากปาล์มทั้งผล (เนื้อผสมเมล็ด) สกัดเฉพาะเนื้อปาล์มและสกัดจากเมล็ดใน โดยน้ำมันที่ได้จะมีสมบัติและองค์ประกอบแตกต่างกันน้ำมันจากเมล็ดในปาล์มคิดเป็นร้อยละ 44-55 ของเมล็ดปาล์มแห่งมักนำมาใช้ทำสบู่และผลิตอาหารเช่นมาร์การีนและเนยมีค่าไอโอดีนสูงกว่าน้ำมันมะพร้าวเพราะว่ามีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นส่วนประกอบมากกว่า และมีกรดไขมันชนิดอิ่มตัวที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเช่นกรดคาพโรอิก(Caprylic) และกรดคาพโรลิก (Caprylic) น้อยกว่าน้ำมันมะพร้าวจุดหลอมเหลวสูงกว่าน้ำมันมะพร้าว 2-3องศาเซลเซียส และเนื่องจากค่าไอโอดีนสูงกว่าน้ำมันมะพร้าวเมื่อทำHydrogenation จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพมากกว่าน้ำมันเมล็ดในปาล์ม สามารถแยกออกเป็นส่วนของแข็งและส่วนที่เป็นของเหลวได้โดยการกรองและการบีบอัดความดันส่วนที่เป็นของแข็งเรียกว่าสเตียรีน ใช้ทำเนยส่วนที่เป็นของเหลวเรียกว่าโอเลอิน ใช้บริโภคและอุตสาหกรรมสบู่

น้ำมันปาล์มมีส่วนประกอบจำนวนมากเป็นกรดไขมันอิ่มตัวโดยเฉพาะอย่างยิ่งกรดปาล์มมิติก (Palmitic) โอเลอินเป็นส่วนหนึ่งของเหลวที่เหลือจากการตกผลึกของสเตียรีนซึ่งมีส่วนประกอบของกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงเช่นกรดโอเลอิก (Oleic) และกรดลิโนเลอิก (Linoleic) น้ำมันปาล์มเป็นสารอินทรีย์เอ็กสารเป็นเอ็กสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าประเภทไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์จะได้เอสเทอร์ (Ester) และไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลีเซอรอล(Glycerol)จากการวิเคราะห์กรดไขมันของน้ำมันปาล์มพบว่ามีกรดไขมันอิ่มตัวเช่น ปาล์ม มิติก (Palmitic) และสเตียริก(Stearic) รวมร้อยละ 52 ที่เหลือเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว เช่น โอเลอิก, ลิโนเลอิกและลิโนเลนิก(Linolenic)

2.4 ปฏิบัติการใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ไบโอดีเซล [9]

ไบโอดีเซลที่สามารถทดแทนน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม สามารถเตรียมได้ 4กระบวนการ

2.4.1 การนำมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลโดยตรงและการผสม (Direct use and Blending)

ไบโอดีเซลประเภทนี้เกิดจากการผสมกันระหว่างน้ำมันพืชกับน้ำมันปิโตรเลียม เพื่อลดความหนืดของ น้ำมันพืชโดยตรงโดยไม่ต้องเสียสารเคมีอื่นเพื่อการเปลี่ยนแปลง แต่ถ้าผสมมากเกินไปอาจเกิดผลกระทบต่อเครื่องยนต์ในระยะยาว เพราะน้ำมันพืชมีส่วนประกอบของไขมันอิสระนำไปสู่ปัญหา เสื่อมสภาพของน้ำมันเครื่อง ซึ่งทำให้เกิดคราบยางเหนียวจากปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างการเก็บ รักษาและปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ทั้งนี้ในการนำน้ำมันพืชผสมกับน้ำมัน ดีเซล พบว่าอัตราส่วนโดยมวลของน้ำมันดีเซลต่อน้ำมันพืชที่อัตราส่วน 80:20 จะให้ผลเหมือนกรณีใช้ น้ำมันดีเซล ร้อยละ 100 อัตราส่วนดังกล่าวจึงเป็นที่นิยมใช้มากที่สุด

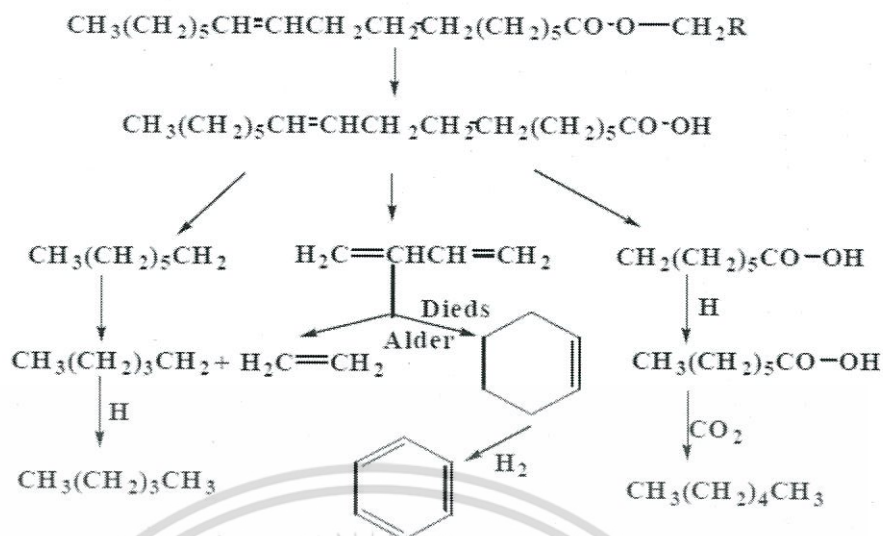
2.4.2 ไมโครอิมัลชัน (Microemulsion)

ไมโครอิมัลชัน คือ คอลลอยด์ที่กระจายตัวในสภาวะสมดุลโดยมีอนุภาคในคอลลอยด์ ส่วนมากอยู่ในช่วง 1-150 นาโนเมตร ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งเพื่อแก้ปัญหาค่าความหนืดสูงในน้ำมันพืชให้มี ค่าความหนืดลดลง โดยใช้ควบคู่กับตัวทำละลายเช่น เมทานอล, เอทานอล และ 1-บิวทานอล ไมโคร อิมัลชันที่เกิดจากเม-ทานอลกับน้ำมันพืชจะได้น้ำมันที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล แต่เมื่อ นำมาทดสอบกับเครื่องยนต์พบว่าการสะสมตัวของคราบ (ซึ่งเป็นสารประกอบคาร์บอน) เกาะรอบ ๆ หัวฉีดและวาล์วของเครื่องยนต์ซึ่งเป็นข้อเสียของน้ำมันที่ผลิตโดยวิธีนี้

2.4.3 กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อน (Thermal Cracking or Pyrolysis)

กระบวนการไพโรไลซิสเป็นการเปลี่ยนจากสารประกอบหนึ่งชนิดไปเป็นสารประกอบอื่น ๆ มากกว่าหนึ่งชนิด โดยใช้ความร้อนหรือใช้ความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา (รูปที่ 2.3) ทั้งนี้จะต้อง จำกัดปริมาณอากาศหรือออกซิเจนที่ใช้ในกระบวนการด้วยเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเผาไหม้ที่ สมบูรณ์ อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการประมาณ 450 - 600 องศาเซลเซียส สารประกอบที่ผ่าน กระบวนการไพโรไลซิสจะถูกทำให้มีขนาดโมเลกุลที่เล็กลง ซึ่งกระบวนการนี้ยากที่จะกำหนดหรือ ควบคุมให้ได้ผลตามที่ต้องการเนื่องด้วยความหลากหลายทางปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก กระบวนการ วัตถุดิบที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส ได้แก่ น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ กรด ไขมันธรรมชาติ (Natural Fatty Acid) และเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน

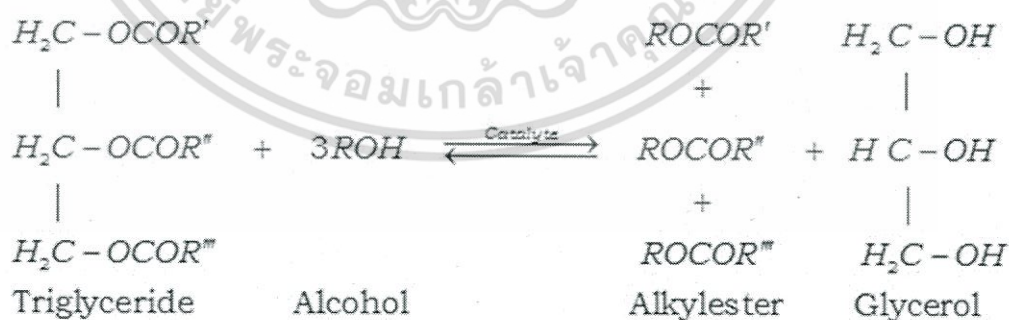
เอกลสารเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาการแตกสลายด้วยความร้อน

2.4.4 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์ของไขมันสัตว์หรือน้ำมันที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (รูปที่ 2.4) โดยการนำเอาน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์มาผ่านการกรองก่อนที่จะถูกนำไปทำปฏิกิริยากับด่างเพื่อกำจัดอนุมูลไขมันอิสระ แล้วจึงผสมรวมกับเมทานอลและโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้สารไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันถูกเปลี่ยนเป็นสารเอสเทอร์และกลีเซอรอล เมื่อกลิเซอรอลถูกนำออกจากน้ำมันพืชแล้วโมเลกุลที่เหลือจะมีสมบัติคล้ายกับน้ำมันปิโตรเลียมจะต่างกันที่โมเลกุลของไบโอดีเซลเป็นกลุ่มของไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีกำมะถันหรือองค์ประกอบที่ซับซ้อนอื่น ๆ วิธีนี้นิยมในเชิงพาณิชย์



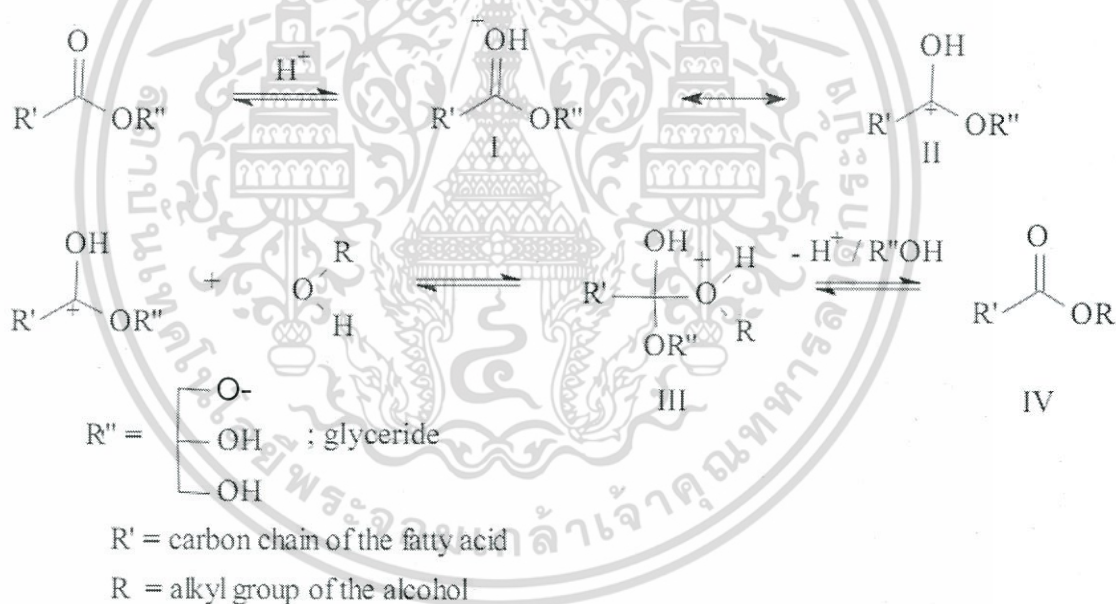
รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่

2.4.4.1 การทำปฏิกิริยาโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดมีข้อเสียคืออัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำมากทำให้ใช้เวลานานในการผลิตไบโอดีเซล กลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วย ขั้นแรกโปรตอนจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอน (Carbonyl Group) ของโมโนกลีเซอ-ไรด์เกิดเป็นคาร์โบแคตไอออน (Carbocation) จากนั้นคาร์โบแคตไอออนจะทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์เกิดเป็นสารมัธยันตร์เตตระฮีดรอล (Tetrahedral Intermediate) และเมื่อกำจัดกลีเซอรอลและโปรตอนก็จะได้อีเทอร์ [11] กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลที่ราคาถูกและสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันโดยเปลี่ยนเป็นกรดไขมันอิสระให้เป็นเอสเตอร์ซึ่งน้ำจะทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดลดลงอย่างมาก ทำให้อีเทอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันลดกลไกการเกิดปฏิกิริยาในตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดแสดงดังรูปที่ 2.5



Mechanism of the acid-catalyzed transesterification of vegetable oils.

รูปที่ 2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรด [12]

2.4.4.2 การทำปฏิกิริยาโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสเป็นระบบที่ได้รับความนิยมที่สุดเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดให้ปริมาณไบโอดีเซลสูงในระยะเวลาอันสั้นกลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วย

ขั้นตอนที่หนึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสจะเข้าทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์เกิดเป็นอัลคอกไซด์ (Alkoxide, RO) และโปรตอนเนต (Protonated Catalyst, BH⁺)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ประโยชน์ในการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

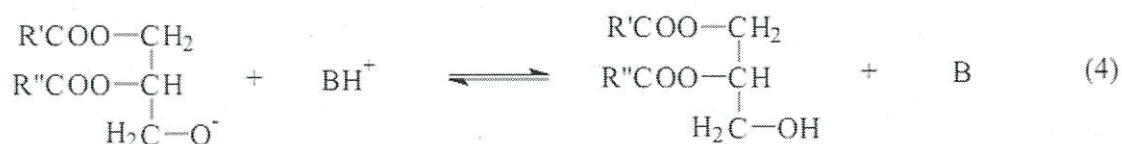
ขั้นตอนที่สองจากนั้นเป็นอัลคอกไซด์จะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอนิลของไตรกลีเซอไรด์ เกิดเป็นสารมัธยันตร์เตตระฮีดรอล (Tetrahedral Intermediate)

ขั้นตอนที่สามสารมัธยันตร์เตตระฮีดรอลจะเปลี่ยนไปเป็นอัลคิลเอสเทอร์และแอนไอออนของไตรกลีเซอไรด์

ขั้นตอนที่สี่แอนไอออนของไตรกลีเซอไรด์จะทำปฏิกิริยากับโปรตอนเนตเกิดเป็นไตรกลีเซอไรด์ และให้ตัวเร่งเบสกลับคืนมา

ขั้นตอนที่ห้ากลไกของปฏิกิริยาจะกลับไปขั้นตอนที่หนึ่งใหม่สุดท้ายจะให้กลีเซอรอล และอัลคิลเอสเทอร์ออกมา

การใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นที่นิยมในการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากมีราคาถูกและเป็น ตัวเร่งที่ให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เร็ว แต่ข้อจำกัดคือปฏิกิริยาจะมีความไวต่อน้ำและกรดไขมันอิสระ โดยน้ำจะทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงขณะที่กรดไขมันอิสระจะทำปฏิกิริยากับตัวเร่ง ปฏิกิริยาที่เป็นเบสทำให้เกิดปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันหรือเกิดสบู่ทำให้สิ้นเปลืองตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ และการเกิดสบู่ยังทำให้เกิดคอลลอยด์ ซึ่งเป็นผลทำให้การเพิ่มความบริสุทธิ์ให้กับไบโอดีเซลได้ยากขึ้น ดังนั้นก่อนที่จะนำน้ำมันพืชและตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสมาใช้เป็นวัตถุดิบจึงควรที่จะไล่น้ำออกก่อน กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงดังรูป 2.6



Mechanism of the base-catalyzed transesterification of vegetable oils.

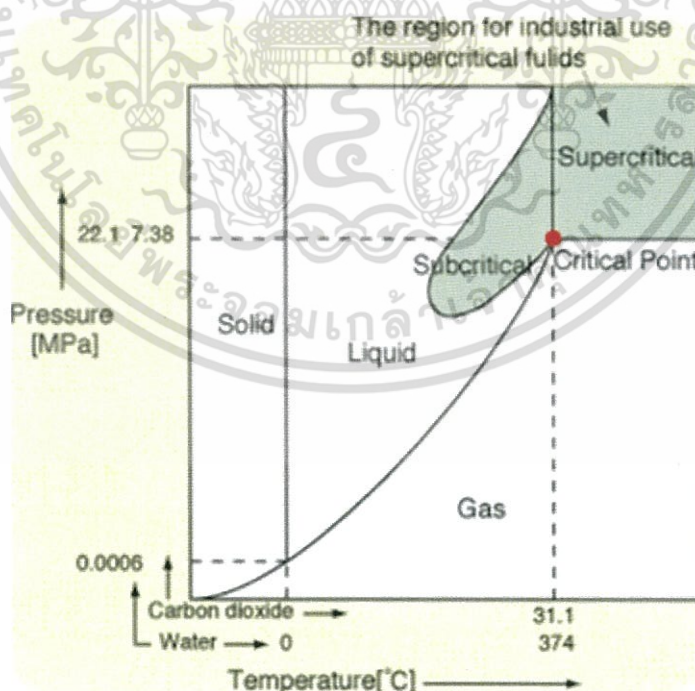
เอกสารนี้เป็นรูปที่ 2.6 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบส [9] ในด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4.3 การทำปฏิกิริยาในภาวะเหนือวิกฤตของเมทานอล [14]

การทำปฏิกิริยาในภาวะเหนือวิกฤตของเมทานอลเป็นวิธีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เพราะที่สภาวะนี้ต้องใช้อุณหภูมิสูง ทำให้พันธะไฮโดรเจนของเมทานอลอ่อนลงและสภาพขี้ของเมทานอลลดลงทำให้เมทานอลกับน้ำมันพืชสามารถรวมเป็นเฟสเดียวกันได้

ของไหลเหนือภาวะวิกฤต (Supercritical fluid, SCF)

ของไหลเหนือภาวะวิกฤต หมายถึง สารใดๆในสภาวะซึ่งจำแนกไม่ได้ว่าเป็นแก๊สหรือเป็นของเหลว เมื่อพิจารณาถึงแก๊สที่สามารถเปลี่ยนเป็นของเหลวได้มีอยู่ 2 วิธีโดยการลดอุณหภูมิหรือการเพิ่มความดัน เพื่อลดพลังงานจลน์ทำให้ระยะระหว่างโมเลกุลลดลงเกิดแรงดึงดูดระหว่างกัน ควบแน่นเป็นของเหลว แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดๆ หนึ่งโมเลกุลของแก๊สจะมีพลังงานจลน์มาก ถึงแม้ว่าจะให้ความดันเท่าไรก็ไม่สามารถทำให้แก๊สเกิดการควบแน่นเป็นของเหลวได้ อุณหภูมิสูงสุดที่แก๊สยังสามารถควบแน่นเป็นของเหลวได้ เรียกว่า อุณหภูมิวิกฤต ความดันที่จุดๆ นี้ เรียกว่า ความดันวิกฤต เพราะฉะนั้นจุดวิกฤตคือ จุดที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิวิกฤตและมีความดันเท่ากับความดันวิกฤตที่อุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิวิกฤต และความดันมากกว่าความดันวิกฤต เรียกว่า สภาวะเหนือวิกฤต โดยสารที่อยู่ในสภาวะนี้จะจำแนกไม่ได้ว่าเป็นแก๊สหรือเป็นของเหลว ดังแสดงในเฟสไดอะแกรมของของไหลเหนือภาวะวิกฤต (รูปที่ 2.7)



รูปที่ 2.7 เฟสไดอะแกรมของของไหลเหนือภาวะวิกฤต [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3สมบัติของไหลภาวะเหนือวิกฤตเปรียบเทียบกับแก๊สและของเหลว [14]

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

ของไหลเหนือภาวะวิกฤตมีคุณสมบัติอยู่ระหว่างแก๊สกับของเหลว จากตารางที่ 2.3 พบว่าความหนาแน่นของของไหลเหนือภาวะวิกฤต มีค่าใกล้เคียงกับของเหลว เมื่อนำมาใช้เป็นตัวทำละลายโมเลกุลของสารที่ต้องการละลายจะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของของไหลภาวะเหนือวิกฤต เกิดอันตรกิริยากันเกิดการละลายได้ดี ขณะเดียวกันของไหลเหนือภาวะวิกฤตมีความหนืดและการแพร่กระจายใกล้เคียงกับแก๊ส ทำให้สามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างภายในของตัวถูกละลายได้ดีและด้วยสมบัติเหล่านี้จึงนำของไหลเหนือภาวะวิกฤตมาใช้เป็นตัวทำละลาย

ตารางที่ 2.4แสดงประเภทปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน [15]

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน		
ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันมีตัวเร่งปฏิกิริยา		ภาวะเหนือวิกฤตของเมทานอล
กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
- ทำปฏิกิริยา 1-45 ชั่วโมง	- ทำปฏิกิริยา 1-8 ชั่วโมง - เกิดปฏิกิริยาสปอนนิฟิเคชัน	- ทำปฏิกิริยา 2-4 ชั่วโมง - ผลผลิตกันที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง

2.5 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา [16]

2.5.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous Catalyst)

คือตัวเร่งที่อยู่ในสถานะเดียวกับสารที่ทำปฏิกิริยาไม่ว่าจะเป็นแก๊สหรือของเหลว ตัวอย่างเช่นปฏิกิริยาในสิ่งมีชีวิตที่เร่งด้วยเอนไซม์และปฏิกิริยาในสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์มักเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเลกุลที่มีตำแหน่งสำหรับเร่งปฏิกิริยาชัดเจน แต่มีข้อเสียคือ มักสลายตัวหรือเสียสภาพในสภาวะที่ใช้ความร้อนหรือความดันสูง

2.5.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalyst)

คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะแตกต่างกับสารที่ทำปฏิกิริยาเช่นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นของแข็ง สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สหรือของเหลวการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์พบได้ในอุตสาหกรรมหลายอย่างเช่น ปุ๋ย ผลิตภัณฑ์ยา เชื้อเพลิงเส้นใยสังเคราะห์ เป็นต้น เนื่องจากสามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้นที่เหลือได้ง่ายกว่า สามารถใช้ได้ในสภาวะที่มีอุณหภูมิหรือความดันสูงได้ตัวเร่งปฏิกิริยามีอายุการใช้งานที่ยาวนานและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

ตารางที่ 2.5 เป็นการเปรียบเทียบสมบัติและปัจจัยต่าง ๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์ และวิวิธพันธุ์ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์อยู่ในวิภาคเดียวกับสารตั้งต้น จึงมีข้อดีคือ ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาสูงและสามารถเลือกให้เร่งปฏิกิริยาที่ต้องการได้ง่ายกว่า อีกทั้งสภาวะการทดลองที่ใช้ไม่รุนแรงสามารถศึกษากลไกของปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีต่าง ๆ และไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการแพร่ของสารตั้งต้นไปหาตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากอยู่ในวิภาคเดียวกัน แต่มีข้อเสียคือการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ทำได้ยาก วิธีการที่ใช้ส่วนใหญ่คือการกลั่นหรือการสกัดด้วยตัวทำละลายและการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ทำได้ยากกว่าและอายุการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์นั้นสั้นกว่า

ข้อดีของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์คือ สามารถแยกสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาได้ง่าย สามารถใช้ได้ในสภาวะที่มีอุณหภูมิ และ/หรือ ความดันสูงได้ ตัวเร่งปฏิกิริยามีอายุการใช้งานที่ยาวนานและอาจนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่ายกว่า

ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบปัจจัยต่าง ๆ ในการเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์และวิวิธพันธุ์

ปัจจัยหรือตัวแปรที่น่าสนใจ	การเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์	การเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์
กัมมันตภาพเมื่อเทียบปริมาณโลหะที่เท่ากัน	สูง	แปรค่าได้
สัดส่วนการเลือกทำปฏิกิริยา	สูง	แปรค่าได้
สภาวะของตัวเร่งปฏิกิริยา	ไม่รุนแรง	รุนแรง
อายุการใช้งานของตัวเร่ง	แปรค่าได้	นาน
ความไวของตัวเร่งต่อการเกิดพอยซัน	ต่ำ	สูง
ปัญหาจากการแพร่	ไม่มี	อาจมีผล
การนำตัวเร่งกลับมาใช้งาน	แพง	ทำได้
การปรับสมบัติเชิงโมเลกุลของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการเปลี่ยนอะตอมที่เป็นองค์ประกอบ	อาจทำได้	สามารถทำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับครูผู้ใช้งานเพื่อการศึกษานำไปใช้ประโยชน์ในด้านการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

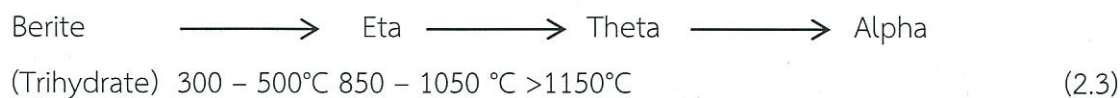
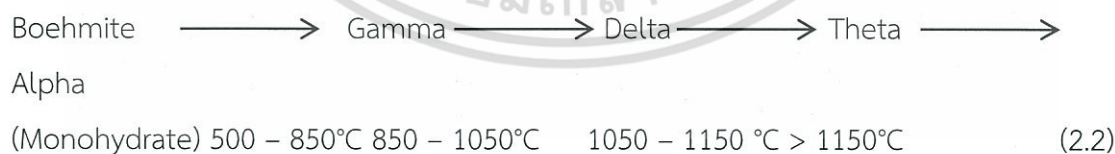
2.5.3 อะลูมินา (Alumina) [16]

อะลูมินามีสูตรทั่วไป คือ Al_2O_3 เป็นตัวรองรับที่นิยมใช้เนื่องจากราคาไม่แพงสามารถเตรียมให้มีอนุภาคขนาดเล็กได้ง่าย และการเตรียมสามารถกำหนดพื้นที่ผิวและการกระจายของรูพรุนได้ตามต้องการ อะลูมินาที่มีจำหน่ายมีพื้นที่ผิวระหว่าง 100 – 600 ตารางเมตรต่อกรัม การที่อะลูมินามีความพรุนสูงทำให้อนุภาคของโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยากระจายตัวได้ดีและเพิ่มประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยา อะลูมินามีอยู่หลายชนิดซึ่งแตกต่างกันโดยพื้นที่ผิว การกระจายตัวของขนาดรูพรุน สมบัติความเป็นกรดของพื้นที่ผิว และโครงสร้างของผลึก ซึ่งสมบัติของอะลูมินาขึ้นอยู่กับการเตรียม ความบริสุทธิ์ของสารตั้งต้นในการเตรียมและการผ่านกระบวนการให้ความร้อน ผลึกของอะลูมินาไฮดรอกไซด์สามารถสร้างขึ้นโดยการตกผลึกทั้งจากสารละลายกรดหรือสารละลายเบส โดยจำนวนหมู่ไฮดรอกไซด์สามารถกำหนดได้จากค่าพีเอชของสารละลายที่ใช้เตรียม เช่น ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 9 อะลูมินาจะเป็นผลึกแบบโมนไฮดรอกไซด์ ($Al_2O_3 \cdot H_2O$) หรือเรียกว่า Pseudo-boehmite เป็นต้น

การผลิตอะลูมินาในระดับอุตสาหกรรมใช้วัตถุดิบคือแร่บอกไซต์ (Bauxite) โดยใช้กระบวนการเบียร์เยอร์ (Bayer process) โดยนำแร่บอกไซต์ที่กำจัดสิ่งเจือปนแล้วมาละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้เกิดสารละลายโซเดียมอะลูมิเนต และตะกอน ที่ประกอบด้วยซิลิกาและเหล็ก เมื่อแยกตะกอนออกไปแล้วนำสารละลายมาทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นอะลูมินาไตรไฮดรอกไซด์ (หรือเรียกว่า Bayerite)



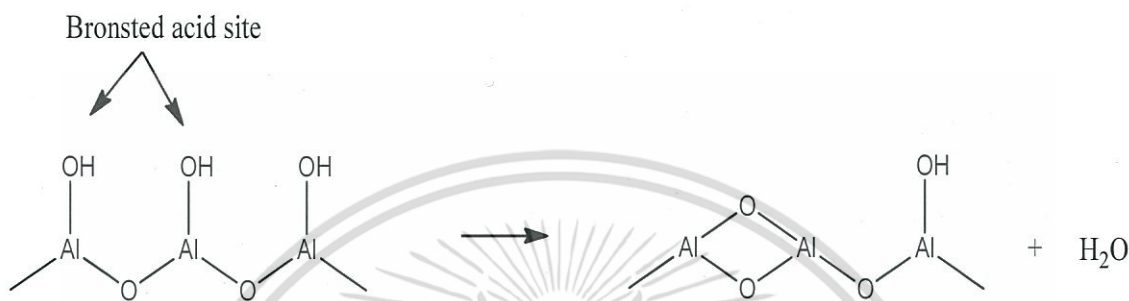
อะลูมินามีหลายวัฏภาคเชิงผลึกโดยการเปลี่ยนแปลงของผลึกของอะลูมินาจะแปรผันตามอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในกระบวนการให้ความร้อนหรือการเผาเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว ซึ่งตัวอย่างของการเปลี่ยนแปลงของวัฏภาคผลึกอะลูมินาโมนไฮดรอกไซด์และไตรไฮดรอกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันดังสมการที่ (2.2) และ (2.3)



วัฏภาคเชิงผลึกของอะลูมินาที่นิยมใช้ในในอุตสาหกรรม คือ แกมมา ($\gamma-Al_2O_3$) ซึ่งเตรียมได้จากการกำจัดน้ำออกจากอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 900 องศาเซลเซียส อะลูมินาที่มีวัฏภาคเชิงผลึกแกมมาจะมีความพรุนสูง ทำให้มีพื้นที่ผิวมากซึ่งเป็นเหตุผลสำคัญที่ใช้อะลูมินาที่มีวัฏภาคเชิงผลึกแกมมาเป็นตัวรองรับสำหรับการใช้ในงานเพื่อการศึกษาด้าน ไมออนกาศให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะเป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้ในงานเพื่อการศึกษาด้าน ไมออนกาศให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

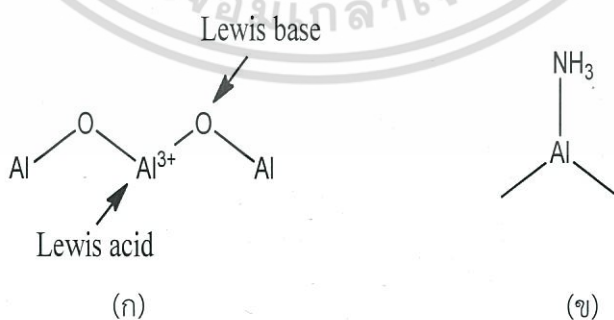
ภาคเชิงผลึกแอลฟา ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) ซึ่งไม่มีรูพรุน แต่วัสดุภาคเชิงผลึกแกมมาก็มีเสถียรภาพพอสมควร เพราะที่สภาวะทั่วไปมันจะไม่เปลี่ยนวัสดุภาคไปเป็นอะลูมินาที่มีวัสดุภาคเชิงผลึกแอลฟา

เมื่ออะลูมินาไปสัมผัสความชื้นจะเกิดการดูดซับทำให้ผิวหน้าจะถูกคลุมไปด้วยโมเลกุลของน้ำ หากนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 – 250 องศาเซลเซียส จะเกิดการคายโมเลกุลของน้ำ แต่ยังมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ทำให้อะลูมินามีความเป็นกรดแบบบรอนสเตด



รูปที่ 2.8 ภาพการหลุดออกของน้ำจากผิวหน้าของอะลูมินา [16]

ในรูปที่ 2.8 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น กลุ่ม -OH ที่อยู่ใกล้กันจะรวมตัวกัน และคาย H_2O ออกมามากขึ้น ทำให้เกิด Al^{3+} ที่เป็นตำแหน่งกรดแบบลิวอิส และ O^{2-} เป็นตำแหน่งเบสแบบลิวอิส แต่ด้วยความแข็งแรงของผิวหน้าทำให้ทั้งตำแหน่งกรดลิวอิสและเบสแบบลิวอิสอยู่รวมกันได้โดยที่ไม่ทำปฏิกิริยากันเอง ซึ่งตำแหน่งทั้งสองแบบมีกัมมันตภาพสูงในการเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ เช่น ปฏิกิริยาการกำจัดน้ำของแอลกอฮอล์ เป็นต้น เนื่องจากผิวหน้าของอะลูมินามีตำแหน่งกรดแบบลิวอิส ดังนั้นจึงสามารถดูดซับโมเลกุลที่เป็นเบสแบบลิวอิสได้เช่น การดูดซับแอมโมเนีย ในรูปที่ 2.9 ความแข็งแรงของการดูดซับโมเลกุลขึ้นกับการเป็นขั้วของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ



รูปที่ 2.9 (ก) แสดงตำแหน่งที่เป็นกรดและเบสแบบลิวอิสบนอะลูมินา [16]

(ข) การดูดซับของแอมโมเนียบนตำแหน่งที่เป็นกรดแบบลิวอิส [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 โลหะหมู่ 1A [17]

ธาตุหมู่ 1A เรียกว่า โลหะแอลคาไล (alkali metals) มี 6 ธาตุ คือ ลิเทียม (Li), โซเดียม (Na), โพแทสเซียม (K), รูบิเดียม (Rb), ซีเซียม (Cs) และแฟรนเซียม (Fr)

2.5.4.1 สมบัติที่สำคัญของธาตุหมู่ 1A มีดังนี้

1. ธาตุหมู่ 1A ทุกชนิดเป็นของแข็งเนื้ออ่อน สามารถใช้มีดตัดได้ นำความร้อนและไฟฟ้าได้ดี
2. ธาตุหมู่ 1A ทุกชนิดเป็นโลหะและมีความเป็นโลหะมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับธาตุอื่นในคาบเดียวกัน
3. มีความหนาแน่นต่ำ (Li, Na และ K มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ)
4. มีขนาดอะตอมใหญ่ที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับธาตุอื่นในคาบเดียวกัน
5. มีค่าพลังงานไอออไนเซชันลำดับที่ 1 (IE_1) และค่าอิเล็กโทรเนกาติวิตี (EN) ต่ำและเมื่อเปรียบเทียบกับธาตุอื่นในคาบเดียวกันจะมีค่าต่ำสุด แสดงว่าเสียอิเล็กตรอนได้ง่ายที่สุด
6. เป็นโลหะที่เสียอิเล็กตรอนได้ง่ายที่สุด (ตัวรีดิวซ์ที่ดีที่สุด) เมื่อเปรียบเทียบกับธาตุอื่นในคาบเดียวกัน
7. ธาตุหมู่ 1A เมื่อรวมตัวกับโลหะได้สารประกอบไอออนิก และในสารประกอบไอออนิกธาตุหมู่ 1A มีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +1 เพราะให้ 1 อิเล็กตรอนแก่โลหะ
8. ธาตุหมู่ 1A เป็นโลหะที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามาก เช่น ธาตุหมู่ 1A สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนหลายชนิด

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	22.989	39.102	85.47	132.905
รัศมีอะตอมในโลหะ (pm)	152	186	227	248	265
รัศมีไอออน (pm)	60	95	133	148	169
ปริมาณของอะตอม	13.1	23.7	45.5	55.8	71
จุดหลอมเหลว(°C)	180	97.8	64	39	28.5
จุดเดือด(°C)	1317	892	774	688	690
ความร้อนแฝงของการ หลอมเหลว(KJ/mol)	2.89	2.6	2.32	2.3	2.1
ความร้อนแฝงของการ กลายเป็นไอ(KJ/mol)	135	98	79	76	68
พลังงานไฮเดรชัน(KJ)	-498	-393	-310	-284	-251
ความหนาแน่น(g/cm ³)	0.53	0.97	0.86	1.53	1.87
อิเล็กโตรเนกาติวิตี	0.98	0.93	0.82	0.82	0.79
พลังงานไอออไนเซชัน ลำดับที่ 1 (KJ/mol)	526	502	425	409	382
ปริมาณในธรรมชาติ	65	28300	25900	310	7

2.5.4.2 สารประกอบของธาตุหมู่ IA

ธาตุหมู่ IA มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาจึงไม่พบในรูปของธาตุอิสระ แต่จะพบในรูปของสารประกอบต่างๆ มากมาย เช่น LiCl, NaCl, KCl, NaNO₃, KNO₃, NaHCO₃ เป็นต้น

สารประกอบของธาตุหมู่ IA ที่พบมากที่สุด คือ สารประกอบของธาตุโซเดียม เช่น เกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ในน้ำทะเล

สมบัติบางประการของสารประกอบของธาตุหมู่ IA มีดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4.3 ประโยชน์ของธาตุหมู่ IA

Na ใช้ถ่ายเทความร้อนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู เพราะนำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดีรวมทั้งราคาไม่แพง

Cs ใช้ทำโฟโตเซลล์สำหรับเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า

Na ใช้บรรจุในท่อพอลิเอทิลีน สำหรับใช้แทนสายเคเบิล เพราะโลหะโซเดียมมีน้ำหนักเบา ราคาถูกกว่าและประสิทธิภาพดีกว่า

2.5.4.3 สารประกอบโซเดียมฟอสเฟต (Na_3PO_4) [18]

สารประกอบโซเดียมฟอสเฟต(Na_3PO_4)สูตรทางเคมี $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ มีลักษณะเป็นผงสีขาวมันวาว เป็นสารบัพเฟอร์ที่เป็นด่างแก่ ทำงานเป็นสารลดแรงตึงผิว (Emulsifier) เพื่อรักษาความเหนียวและป้องกันการแยกตัวของฟอสเฟต

2.5.4.4 สารประกอบโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) [18]

สารประกอบโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) สูตรทางเคมี Na_2HPO_4 มีลักษณะเป็นผงสีขาว ละลายน้ำได้ดี ช่วยยับยั้งการเกิดเป็นก้อน(Anti-cracking)ของอาหารผง นอกจากนี้ยังใช้ในการผลิตอาหารเข้าซีเรียล(Cereal) เพื่อให้ผลิตได้เร็วขึ้น และใช้ในเตาBoilerเพื่อให้เกิดตะกรันข้าง

2.6 สมบัติทางด้านเชื้อเพลิงที่สำคัญของไบโอดีเซล [19]

2.6.1 ค่าความร้อน (Heating value)

ค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงคือ ปริมาณความร้อนที่ต้องถ่ายเทออกจากเชื้อเพลิงเนื่องจากการสันดาปที่เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ในระบบ ค่าที่ได้จะอยู่ในรูปของพลังงานต่อปริมาณของมวลสารนิยมนวัดโดยใช้เครื่อง Bomb Calorimeter โดยปกติการสันดาปของเชื้อเพลิงจำพวกสารไฮโดรคาร์บอน เมื่อสันดาปในบรรยากาศของออกซิเจน ผลของการสันดาปจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (ซึ่งอยู่ในสถานะของไอน้ำ) ถ้าไอน้ำสามารถกลั่นตัวแล้วคายความร้อนแฝงออกมา ค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงที่ได้จะเป็นค่าความร้อนแฝงสูงสุด แต่ถ้าไอน้ำไม่กลั่นตัวค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงจะเป็นค่าความร้อนต่ำ

2.6.2 จุดวาบไฟ (Flash point)

จุดวาบไฟ หมายถึงอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่ไอของสารติดไฟและลุกไหม้ เมื่อมีเปลวไฟจ่ออยู่ที่ผิวหน้าของสาร ถ้าเอาเปลวไฟออกสารจะไม่ลุกไหม้อีกต่อไป ซึ่งจะมีความสำคัญในด้านการป้องกันอันตรายจากอัคคีภัยในการเก็บรักษาแต่ไม่มีผลต่อสมบัติการเผาไหม้และประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ โดยปกติแล้วอุณหภูมิจุดวาบไฟของไบโอดีเซลจะมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล แต่อย่างไรก็ตามไบโอดีเซล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาจมีจุดวาบไฟที่ต่ำกว่าปกติได้หากในผลิตภัณฑ์มีปริมาณแอลกอฮอล์จากกระบวนการผลิตหลงเหลือหรือเจือปนอยู่ ซึ่งควรต้องกำจัดออกเพื่อให้มีจุดวาบไฟสูงปลอดภัยในการขนส่งเชื้อเพลิง

2.6.3 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดหรือความข้นใสคือ ความหนืดเชิงจลนศาสตร์ของน้ำมันดีเซลมีผลต่อรูปร่างของละอองน้ำมันที่ฉีดออกมาจากหัวฉีด ถ้าน้ำมันมีความหนืดเชิงจลนศาสตร์สูงจะทำให้การฉีดเป็นฝอยไม่ดี ละอองน้ำมันมีขนาดใหญ่ ทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์แต่หากน้ำมันมีความหนืดต่ำเกินไป จะทำให้น้ำมันที่พ่นออกมาเป็นฝอยละเอียดมากแต่ไม่พุ่งไปไกลเท่าที่ควร ทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เช่นกัน เนื่องจากน้ำมันรวมตัวกับอากาศได้ไม่ดีประสิทธิภาพด้านกำลังของเครื่องยนต์ก็จะลดลง

2.6.4 ค่าความเป็นกรด (Acid value)

ค่าความเป็นกรดจะแสดงถึงปริมาณของกรดไขมันอิสระในไบโอดีเซล ซึ่งส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของน้ำมัน เนื่องจากการเสื่อมสภาพของน้ำมันนอกจากจะเกิดจากการออกซิไดซ์พันธะคู่ของกรดไขมันแล้ว ยังอาจเกิดจากการสลายพันธะเอสเทอร์ให้กรดไขมันอิสระออกมา ปริมาณกรดไขมันอิสระรวมทั้งความเป็นกรดที่เพิ่มขึ้นจึงเป็นตัวบ่งชี้คุณภาพและความเก่าใหม่ของน้ำมัน

2.6.5 เลขไอโอดีน (Iodine value)

เลขไอโอดีนคือค่าที่มีความสัมพันธ์กับความไม่อิ่มตัวของน้ำมันพืชโดยวัดเป็นจำนวนกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับด้วยน้ำมัน 100 กรัม ซึ่งค่าไอโอดีนสามารถใช้เป็นดัชนีบ่งชี้การเกิดพอลิเมอร์ไรซ์ (การเกิดยางเหนียวเกิดในเครื่องยนต์) ถ้าน้ำมันพืชที่ถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงมีค่าตัวเลขไอโอดีนต่ำก็จะป้องกันการเกิดพอลิเมอร์ไรซ์ของน้ำมันพืชในเครื่องยนต์ได้ นอกจากนี้ น้ำมันพืชที่มีค่าไอโอดีนสูงจะสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนในอากาศได้มาก ทำให้โครงสร้างของน้ำมันพืชเกิดการเสียหายได้เป็นสารประเภทคีโตนแอลดีไฮด์และกรดออกมาผสมอยู่ในน้ำมัน

ตารางที่ 2.7 แสดงคุณสมบัติมาตรฐานของไบโอดีเซล [19]

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

2.7 ประโยชน์ของไบโอดีเซล [20, 21]

2.7.1 ประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อม

การใช้ไบโอดีเซลสามารถลดพิษทางอากาศ ซึ่งเป็นผลจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ คณะกรรมการไบโอดีเซลแห่งชาติ (National Biodiesel Board) และสำนักงานป้องกันสิ่งแวดล้อม (US Environmental Agency) ของประเทศสหรัฐอเมริกาได้ทำการทดลองวิจัยใช้ไบโอดีเซลสูตรต่างๆ กับเครื่องยนต์ดีเซลและได้รายงานว่ไบโอดีเซลสูตร B100 และ B20 สามารถลดมลสารที่ปลดปล่อยจากการเผาไหม้ได้อย่างมีนัยสำคัญในส่วนกรมอุทกหารเรือ กองทัพเรือก็ได้รายงานผลการทดลองใช้น้ำมันไบโอดีเซลกับเครื่องยนต์ดีเซล ขนาด 145 แรงม้าว่าสามารถลดควันดำได้มากกว่าร้อยละ 40 การใช้ไบโอดีเซลสามารถลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจกเพราะผลิตจากพืชการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว นอกจากช่วยลดการนำน้ำมันที่ใช้แล้วไปประกอบอาหารซ้ำแล้วยังช่วยป้องกันมิให้น้ำมันที่ใช้แล้ว (ซึ่งมีสารไดออกซินที่เป็นสารก่อมะเร็ง) ผลิตเป็นอาหารสัตว์

2.7.2 ประโยชน์ทางด้านสมรรถนะเครื่องยนต์

การผสมไบโอดีเซลในระดับร้อยละ 1-2 สามารถช่วยเพิ่มดัชนีการหล่อลื่นให้กับน้ำมันดีเซลจากผลการทดลองของสถาบันวิจัยและเทคโนโลยีของบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) พบว่าการเติมไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชใช้แล้วและน้ำมันมะพร้าวในอัตราร้อยละ 0.5 สามารถเพิ่มดัชนีการหล่อลื่นได้ถึง 2 เท่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีขึ้น เนื่องจากในไบโอดีเซลมีออกซิเจนผสมอยู่ประมาณร้อยละ 10 ทำให้การผสมระหว่างอากาศกับน้ำมันมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและเป็นการเพิ่มอัตราส่วนปริมาตรของอากาศต่อน้ำมันได้เป็นอย่างดี จึงทำให้การเผาไหม้ดีขึ้น ถึงแม้ว่าค่าความร้อนของไบโอดีเซลจะต่ำกว่าน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดีเซลประมาณร้อยละ 10 แต่ข้อด้อยนี้ไม่มีผลกระทบต่อการใช้งาน เพราะการใช้ไบโอดีเซล ทำให้การเผาไหม้ดีขึ้น จึงทำให้กำลังเครื่องไม่ลดลง

2.7.3 ประโยชน์ด้านเศรษฐกิจ

การใช้ไบโอดีเซลช่วยสร้างงานในชนบทด้วยการสร้างตลาดพลังงานไว้รองรับผลผลิตทางการเกษตรที่เหลือจากการบริโภคการใช้ไบโอดีเซลสามารถช่วยลดการนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศได้บางส่วน ซึ่งในแต่ละปีประเทศไทยสูญเสียเงินตราต่างประเทศเพื่อนำเข้าน้ำมันดิบกว่า 300,000 ล้านบาท

2.7.4 ประโยชน์ด้านการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงภายในประเทศ

ประเทศไทยมีสัดส่วนการใช้น้ำมันดีเซลสูงกว่าน้ำมันเบนซินมากกว่าตลาดน้ำมันดีเซลในประเทศไทยมีมูลค่ามากกว่าน้ำมันเบนซินกว่า 2 เท่าและในอนาคตมีแนวโน้มที่โรงกลั่นอาจจะผลิตน้ำมันดีเซลไม่เพียงพอต่อการใช้ในประเทศ ดังนั้นการใช้ไบโอดีเซลจึงช่วยลดความไม่สมดุลด้านการผลิตของโรงกลั่นได้

การผสมไบโอดีเซลในอัตราส่วนร้อยละ 1 - 2 ช่วยเพิ่มความหล่อลื่นในน้ำมันดีเซลได้โดยเฉพาะกรณีที่จะมีการลดปริมาณกำมะถันในน้ำมันดีเซล

2.8 ผลกระทบของไบโอดีเซลที่มีต่อเครื่องยนต์ [20]

เนื่องจากน้ำมันไบโอดีเซลตามมาตรฐานสากล มีคุณสมบัติเทียบเคียงได้กับน้ำมันดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปิโตรเลียม ดังนั้นผลกระทบต่อเครื่องยนต์ถือว่าไม่มีผลทางด้านลบ หรือกรณีเครื่องยนต์เก่า อาจมีความจำเป็นต้องเปลี่ยนซีลยางบางส่วน โดยทั่วไปการใช้น้ำมันไบโอดีเซลในต่างประเทศนั้นนิยมผสมเป็นสูตรต่าง ๆ เช่น

- B2 (ไบโอดีเซล 2% : ดีเซล 98%) มีจำหน่ายทั่วไปในมลรัฐมินนิโซตา ประเทศสหรัฐอเมริกา และได้บังคับใช้ทั้งมลรัฐ
- B5 (ไบโอดีเซล 5% : ดีเซล 95%) มีจำหน่ายทั่วไปในประเทศฝรั่งเศส โดยกว่าครึ่งหนึ่งของน้ำมันดีเซลที่จำหน่ายเป็นน้ำมันสูตร B5
- B20 (ไบโอดีเซล 20% : ดีเซล 80%) เป็นน้ำมันผสมที่คณะกรรมการไบโอดีเซลแห่งชาติและสำนักงานป้องกันสิ่งแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกาแนะนำให้ใช้ตามกฎหมายยานยนต์เชื้อเพลิงทดแทนของประเทศ (Alternative Motor Fuels Act:AMFA1988) ปัจจุบันนิยมใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยเฉพาะรถของบริษัทและรถของหน่วยงานราชการ รวมทั้งการใช้น้ำมันในพื้นที่ที่ต้องคำนึงถึงมลพิษเป็นพิเศษ เช่น รถรับส่งนักเรียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รถประจำทาง เรือ หรือเครื่องจักรกลที่ใช้ในเมืองแร่ ทั้งนี้ได้รับการรับรองจากบริษัทผู้ผลิต ระบบหัวฉีดน้ำมันและเครื่องยนต์

- B40 (ไบโอดีเซล 40% : ดีเซล 60%) เป็นสูตรที่ใช้ในรถขนส่งมวลชนในประเทศฝรั่งเศส ทั้งนี้เพื่อผลในการลดมลพิษ

- B100 (ไบโอดีเซล 100%) เป็นน้ำมันไบโอดีเซลร้อยละ 100 ที่ใช้ในประเทศเยอรมนีและ ออสเตรเลียได้รับการรับรองจากบริษัทผู้ผลิตเครื่องยนต์รายใหญ่ของประเทศ

จากตารางที่ 2.8 และ 2.9 พบว่าแม้เครื่องยนต์ที่ใช้ไบโอดีเซลจะปลดปล่อยแก๊ส คาร์บอนมอนอกไซด์ออกมาในปริมาณใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล แต่ปริมาณของไฮโดรคาร์บอน แก๊ส ไนโตรเจนออกไซด์ ฝุ่นละอองและสารก่อมะเร็งอื่นจะมีปริมาณน้อยกว่า จึงส่งผลดีในแง่สิ่งแวดล้อม และสุขภาพของประชาชน ทั้งนี้หากมีการผสมไบโอดีลกับน้ำมันดีเซลจะส่งผลให้แก๊ส คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรคาร์บอน ฝุ่นละอองและสารก่อมะเร็งลดลงในสัดส่วนที่น้อยกว่าเมื่อ เปรียบเทียบกับไบโอดีเซลบริสุทธิ์

ตารางที่ 2.8 แสดงการเปรียบเทียบมลพิษในไอเสียจากเครื่องยนต์ที่ใช้ไบโอดีเซล [20]

แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์	เทียบเท่ากับน้ำมันดีเซล
ไฮโดรคาร์บอน	ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลร้อยละ 40
แก๊สไนโตรเจนออกไซด์	ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลร้อยละ 15
ฝุ่นละออง	ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลร้อยละ 40
สารก่อมะเร็ง	ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลร้อยละ 50

ตารางที่ 2.9 แสดงการเปรียบเทียบผลการใช้ไบโอดีเซล 100%(B100)และน้ำมันดีเซลซึ่งผสมด้วย ไบโอดีเซล 20% (B20) [20]

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

S.L. Dmytryshyn. และคณะ [22] ได้ศึกษาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันพืช 4 ชนิด ได้แก่ น้ำมันคาโนลา (canola oil), น้ำมันเมล็ดคาโนลาดิบจากการสกัดร้อน (green seed canola oil from heat-damaged seeds), ของเสียไขมันที่ผ่านการทอด (processed waste fryer grease) และของเสียไขมันที่ยังไม่ผ่านการทอด (Unprocessed waste fryer grease) ถูกดำเนินการโดยเมทานอลและใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมทิลเอสเทอร์จะแปรตามน้ำมัน หลังจากที่ถูกแยกออกจากกลีเซอรอล, การทำให้สารบริสุทธิ์และจะถูกพิสูจน์เอกลักษณ์โดยวิธีต่างๆ เพื่อประเมินความหนาแน่น, ความหนืด, ค่าไอโอดีน, ค่าความเป็นกรด, จุดหมอก, จุดไหลเทและค่าความร้อน, กรดไขมันและองค์ประกอบของเหลว, คุณสมบัติความหล่อลื่น และคุณสมบัติทางความร้อน องค์ประกอบกรดไขมันของเอสเทอร์ประมาณ 80-85% มาจากกรดไขมันอิ่มตัว ความหนาแน่นและความหนืดของเมทิลเอสเทอร์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อถูกเทียบกับน้ำมันที่อยู่ในรูป มอนอ หรือ ไดกลีเซอไรด์ ความหล่อลื่นของเมทิลเอสเทอร์เมื่อผสมที่ร้อยละ 1 โดยปริมาตรกับสารอ้างอิงเชื้อเพลิง ISOPAR^R M แสดงให้เห็นว่าเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันคาโนลา มีความหล่อลื่นของเชื้อเพลิงสูงขึ้น จากการถูกใช้งานวิเคราะห์ได้ว่า เอสเทอร์ที่ได้มีศักยภาพสูงสุด เมทิลเอสเทอร์จากคาโนลาถูกใช้เพื่อเป็นสารเติมแต่งหรือทดแทนเชื้อเพลิงดีเซลได้เพราะมีลักษณะทางกายภาพและทางเคมีคล้ายกับเชื้อเพลิงดีเซล

X.Wenlei และคณะ [23] ได้ศึกษาการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจากน้ำมันถั่วเหลืองกับเมทานอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์โพแทสเซียมไอโอไดด์บนตัวรองรับอะลูมินา (KI/Al_2O_3) รวมถึงศึกษาถึงผลของความแรงของความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากสถานะต่างๆ กันต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้และทำการศึกษาสถานะการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่เหมาะสมที่ปัจจัยการทำปฏิกิริยาต่างๆ ได้แก่ สัดส่วนโมลของเมทานอล ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ซึ่งจากการทดลองพบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโพแทสเซียมไอโอไดด์ 35% บนตัวรองรับอะลูมินาที่ถูกเผาด้วยความร้อนสูงที่อุณหภูมิ 773 K เป็นเวลา 3 ชั่วโมงมีความเป็นเบสแรงที่สุดและให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงที่สุดถึงร้อยละ 96 จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่สถานะการใช้สัดส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2.5% โดยมีการกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 8 ชั่วโมงภายใต้กระบวนการควบแน่นของเมทานอล

H.J. Kim. และคณะ [24] ได้ศึกษาไบโอดีเซลที่ถูกผลิตโดยการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันพืช (VOs) ซึ่งใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงทางเลือกทดแทนน้ำมันดีเซลที่มีทรัพยากรจำกัดของแหล่งฟอสซิล และเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืช โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ $Na/NaOH/\gamma-Al_2O_3$ ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดเบสถูกใช้ครั้งแรก ในการผลิตไบโอดีเซล การศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยา เช่น เวลาในการเกิดปฏิกิริยา, ความเร็วในการปั่นกวน, การใช้ตัวทำละลายร่วม, อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันและ

เมทานอล และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา, ถูกเลือกให้ดำเนินการ $\text{Na}/\text{NaOH}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ตัวเร่งปฏิกิริยา วิวิธพันธุ์ชนิดเบส ให้ประสิทธิภาพที่เหมือนกันภายใต้สภาวะที่เหมาะสมเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่ง NaOH แบบเอกพันธุ์ ค่าความแรงของเบสของตัวเร่ง $\text{Na}/\text{NaOH}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ได้ถูกประมาณไว้ให้ มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพของการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

วันัญญา สวงโท และคณะ [25] ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับสังเคราะห์ไบโอดีเซลจาก น้ำมันปาล์มและเมทานอลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์คือ กลีโอฟอสเฟตซีมบนอะลูมินา จากการทดลองพบว่า เมื่อใช้ $\text{KF}/\text{Al}_2\text{O}_3$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณ KF บนอะลูมินาร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มเป็น 6:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิจุดเดือดของเมทานอล จะให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ สูงสุด นอกจากนี้สมบัติต่างๆด้านเชื้อเพลิงของไบโอดีเซล เลขไอโอดีน และค่าความเป็นกรด อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

เกตน์ณนิภา วันชัย และคณะ [26] ได้สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ ($\text{Kl}/\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$) เพื่อใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มกับเมทานอล ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้โดยวิธีเอ็มซุ่มโพแทสเซียมไอโอดีด (Kl) เข้มข้น 35% โดยน้ำหนัก ลงบนแคลเซียมออกไซด์ (CaO) 50% โดยน้ำหนัก และตัวรองรับอะลูมินา (Al_2O_3) จากนั้นแคลไซน์ที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 5% โดยน้ำหนัก อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มที่ 9:1 ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง ได้ปริมาณไบโอดีเซลสูงถึง 98.5 %

นิตา เตชาติวงศ์ ณ อรุณยา และคณะ [27] ได้ทำการสังเคราะห์ไบโอดีเซล โดยวิธีการทรานส์-เอสเทอร์ฟิเคชันจากน้ำมันสบู่ดำด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ โดยทำการสังเคราะห์ไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอน และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ โพแทสเซียมไนเตรดที่ความเข้มข้นต่างๆ บนอะลูมินา โดยเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง พบว่าปฏิกิริยาเกิดได้ดีที่สุดเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 35 wt.% $\text{KNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ และในการสังเคราะห์ไบโอดีเซล ได้ทำการศึกษา 2 ตัวแปรได้แก่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณน้ำมัน และอัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมัน โดยใช้อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่าได้ปริมาณไบโอดีเซลสูงสุด 91.3% โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมันคือ 7.0% และ 15:1 ตามลำดับ จากนั้นทำการทดสอบประสิทธิภาพในการใช้ซ้ำ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไม่สามารถนำมาใช้ซ้ำได้โดยตรง แต่สามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วมาสังเคราะห์ใหม่ได้ โดยได้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 97.3%

S.T. Jiange และคณะ [28] ได้นำโซเดียมฟอสเฟต (Na_3PO_4) มาสังเคราะห์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันเรป ได้ทำการศึกษาอัตราส่วนโดยมวลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และอัตราเร็วในการปั่นกวน พบว่าอัตราส่วนโดยมวลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมัน 3% อัตราส่วนโดยมวลของเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1 ที่อุณหภูมิ 343 เคลวิน และอัตราเร็วในการปั่นกวน 600 รอบ/นาที

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่เกิดขึ้นเกือบจะเสร็จใน 20 นาที โซเดียมฟอสเฟต มีการทำงานที่ใกล้เคียงกับตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ และยังสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อีก 8 ครั้ง โดยไม่มีการปรับแต่ง และการเกิดปฏิกิริยาไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญ ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในไบโอดีเซลอยู่ในช่วง 0.6 – 0.7 mg/g และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่าง Na_3PO_4 และ $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ซึ่งมีราคาถูกกว่า แต่ได้ปริมาณไบโอดีเซล 71.5% ซึ่งน้อยกว่าผลผลิตของ Na_3PO_4 ที่ได้ปริมาณไบโอดีเซล 99.7%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

- 1) น้ำมันปาล์มหยก บริษัท ล้ำสูง (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)
- 2) เมทานอล (Methanol, CH_3OH) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Fisher Scientific
- 3) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide, Al_2O_3) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
- 4) โซเดียมฟอสเฟต (Sodium phosphate, $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
- 5) โซเดียมฟอสเฟตไดเบสิกแอนไฮไดรึส (Sodium phosphate dibasic anhydrous, Na_2HPO_4) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
- 6) อะซิโตน (Acetone, $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Lab Scan
- 7) โซเดียมซัลเฟตแอนไฮไดรึส (Sodium sulphate anhydrous, Na_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Rankem
- 8) เอทานอล (Ethanol, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Lab Scan
- 9) ฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein, $\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
- 10) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Fisher Scientific
- 11) ไดเอทิลอีเทอร์ (Diethyl ether, $(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}$) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
- 12) ไอโอดีน (Iodine, I_2) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
- 13) กรดแอซติก (Acetic acid, CH_3COOH) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Lab Scan
- 14) คลอโรฟอร์ม (Chloroform, CHCl_3) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Lab Scan
- 15) โซเดียมไทโอซัลเฟต (Sodium thiosulfate, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) เกรดวิเคราะห์จากบริษัท Lab Scan
- 16) โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Fisher Scientific
- 17) น้ำกลั่น
- 18) น้ำมันพาราฟิน (Paraffin oil) เกรดการค้า
- 19) แป้ง (Starch) ตราโบว์แดง เกรดการค้า

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 1) เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (X-ray Diffraction Spectrophotometer, XRD) ยี่ห้อ Siemnts รุ่น D8 Advance
- 2) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ LEO 1450 VP
- 3) เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาตามวิธีของ BET (Surface Area and Porosity Analyzer) รุ่น ASAP 2020
- 4) เครื่องฟูเรียทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier-Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น FT-IR SPECTRUM GX
- 5) เครื่องฟูเรียทรานสฟอร์มนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Transform Nuclear Magnetic Resonance Spectrophotometer, FT-NMR) ยี่ห้อ BRUKER รุ่น Advance DPX 300

- 6) Hotplate/stirrer ยี่ห้อ Fisher Scientific
- 7) Water bath
- 8) เครื่องชั่งไฟฟ้า 2 และ 4 ตำแหน่ง
- 9) ขวดก้นกลม ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 10) คอนเดนเซอร์
- 11) ขวดรูปกรวย ขนาด 25, 50, 100 และ 250 มิลลิลิตร
- 12) ปีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 13) กรวยแยก ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 14) บิวเรต ขนาด 50 มิลลิลิตร
- 15) ปิเปต ขนาด 10 มิลลิลิตร
- 16) กระบอกตวง ขนาด 10 และ 50 มิลลิลิตร
- 17) ขวดปรับปริมาตร ขนาด 50 และ 100 มิลลิลิตร
- 18) กรวยแก้ว
- 19) แท่งแก้วคน
- 20) ซ้อนตักสาร
- 21) ขาตั้งและที่จับ
- 22) เตายกยี่ห้อ Memmert
- 23) เตายกยี่ห้อ Thermolyne
- 24) กระจกนาฬิกา
- 25) กระจกทรง เบอร์ 41
- 26) กระจกยูนิเวอร์แซลอินดิเคเตอร์
- 27) ชุดกรองบุชเนอร์
- 28) กระจกฟอยด์
- 29) หลอดหยด

3.3 วิธีการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่

- 1) การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาฟอสเฟตบนอะลูมินา
- 2) การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา
- 3) การสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์
- 4) การทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเมทิลเอสเทอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาฟอสเฟตบนอะลูมินา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมคือ ฟอสเฟตบนตัวรองรับอะลูมินา ซึ่งวิธีที่ใช้ในการเตรียมคือ วิธีการทำให้เปียกชุ่ม (Incipient-wetness impregnation) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- 1) ชั่ง Al_2O_3 จำนวน 110 กรัม นำไปเผา อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง
- 2) เตรียมสารละลายเกลือฟอสเฟตเข้มข้นร้อยละ 10, 15, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก โดยใช้ปริมาณเกลือฟอสเฟต ตามตารางที่ 3.1 ละลายเกลือฟอสเฟตด้วยน้ำกลั่น ปริมาตร 25 มิลลิลิตร

ตารางที่ 3.1 ปริมาณของเกลือฟอสเฟตชนิดต่างๆ สำหรับใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดเกลือฟอสเฟต	ปริมาณฟอสเฟต (%โดยน้ำหนัก)	น้ำหนักที่ใช้ (g)
Na_3PO_4	10	4.6528
Na_3PO_4	15	6.9612
Na_3PO_4	20	9.2613
Na_3PO_4	30	13.9054
Na_2HPO_4	10	2.0351
Na_2HPO_4	15	3.1314
Na_2HPO_4	20	4.0201
Na_2HPO_4	30	6.0272

- 3) ชั่ง Al_2O_3 ที่เผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส 12 กรัม ใส่กระจกนาฬิกาเกลี่ยให้กระจายตัว แล้วนำสารละลายเกลือฟอสเฟตที่เตรียมไว้ในขวดสเปรย์ หลังจากนั้นทำการฉีดพ่นให้เป็นละอองลงบนตัวรองรับอะลูมินา เมื่อฉีดพ่นจนสารละลายหมดแล้วให้ทิ้งไว้ข้ามคืนที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้เกิดการดูดซับอย่างสมบูรณ์ระหว่างฟอสเฟตและอะลูมินา
- 4) นำตัวเร่งปฏิกิริยาเกลือฟอสเฟตบนตัวรองรับอะลูมินาที่เตรียมไว้ไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
- 5) หลังจากนั้นทำการเผา (แคลไซน์) ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาแล้วนำตัวเร่งปฏิกิริยาเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์



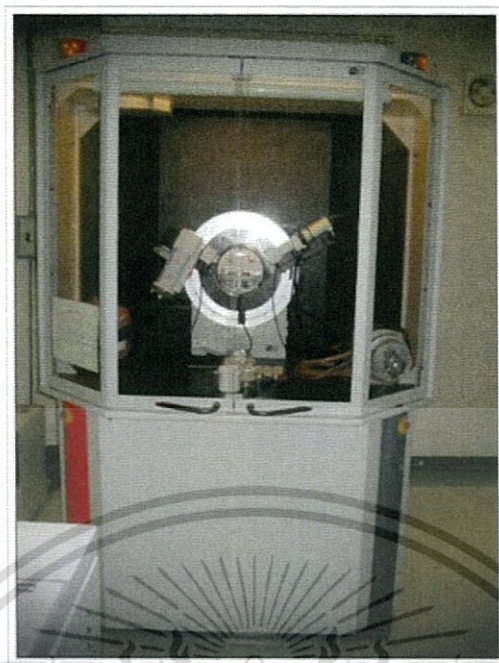
รูปที่ 3.1 แสดงการนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปทำการแคลไซน์

6) สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 8 ชนิด ตามตารางที่ 3.1 จะนำไปทดสอบประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์

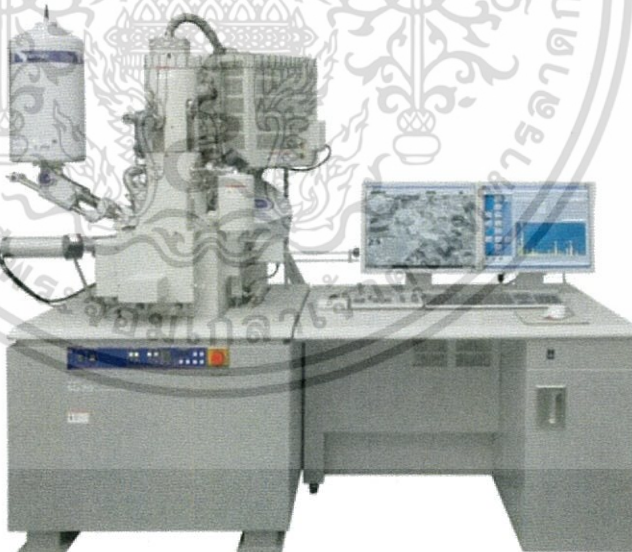
เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มและเมทานอล ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์สูงสุด จะถูกนำไปศึกษาผลของปริมาณฟอสเฟตบนอะลูมินา โดยจะทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณฟอสเฟต 10%, 15%, 20% และ 30% โดยน้ำหนัก

3.3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาเกลือฟอสเฟตบนอะลูมินาที่สังเคราะห์ได้ จะถูกนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบและลักษณะความเป็นผลึกด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffraction, XRD), วิเคราะห์หาปริมาณฟอสเฟตบนตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-Ray Fluorescence, XRF), วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM), วิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาตามวิธีของ BET (Surface Area and Porosity Analyzer)



รูปที่ 3.2 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (XRD) [31]



รูปที่ 3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) [32]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยเทคนิคบีอีที(BET) [33]

3.3.3 การสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์

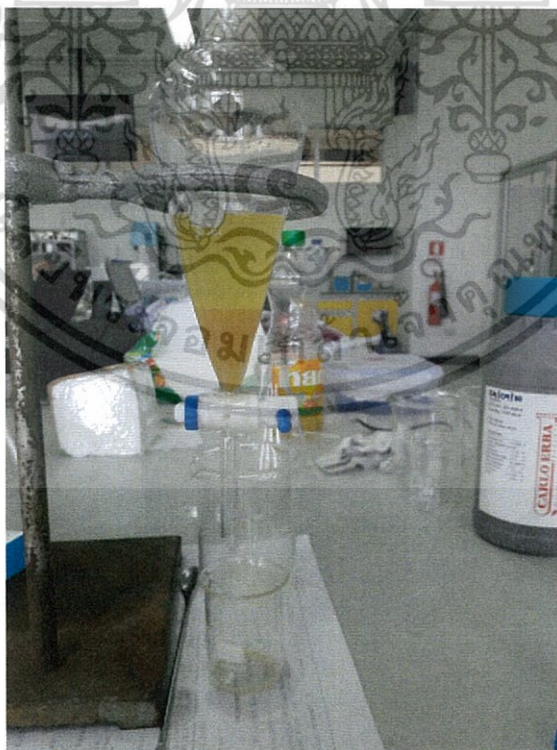
ในการทดลองนี้จะทำการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ โดยศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ฟอสเฟตบนอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณฟอสเฟตบนอะลูมินา อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ในปฏิกิริยา เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาและการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ ขั้นตอนในการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์เป็นดังนี้

- 1) นำน้ำมันปาล์มประมาณ 50 กรัม อุ่นบนเครื่องให้ความร้อนเป็นเวลา 2 นาที
- 2) นำน้ำมันปาล์มประมาณ 50 กรัมที่ผ่านการอุ่นแล้วเทใส่ขวดก้นกลม ตามด้วยเมทานอล และตัวเร่งปฏิกิริยาตามปริมาณที่แสดงในตารางที่ 3.2-3.5 ประกอบขวดก้นกลมเข้ากับคอนเดนเซอร์จากนั้นนำไปให้ความร้อนบนอ่างน้ำมันพาราฟิน ดังรูปที่ 3.5 เมื่ออุณหภูมิของผสมถึงอุณหภูมิรีฟลักซ์แล้ว เริ่มจับเวลาโดยกำหนดเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 3.5 แสดงการตั้งอุปกรณ์รีฟลักซ์สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

3) เมื่อครบเวลาของปฏิกิริยาแล้ว เทของผสมในขวดก้นกลมได้ใส่กรวยแยกแล้วตั้งทิ้งไว้เพื่อให้เกิดการแยกชั้นโดยชั้นบนจะเป็นชั้นอินทรีย์ ซึ่งเป็นเมทิลเอสเทอร์มีลักษณะเป็นของเหลวสีเหลืองใสคล้ายน้ำมัน ส่วนชั้นล่างเป็นชั้นของกลีเซอรอลมีลักษณะเป็นของเหลวหนืดสีน้ำตาล ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงการแยกชั้นของเมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอลในกรวยแยก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) ไชแยกชั้นกลีเซอรอลออกไป จากนั้นทำการกรองแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน จากนั้นนำของเหลวที่ผ่านการกรองแบบลดความดันแล้วใส่กรวยแยก แล้วทำการปรับค่า pH ของชั้นเมทิลเอสเทอร์ด้วยน้ำกลั่นจนได้ชั้นเมทิลเอสเทอร์ที่มีลักษณะขุ่นเล็กน้อยและมีสภาพเป็นกลาง โดยทดสอบด้วยกระดาษยูนิเวอร์แซลอินดิเคเตอร์
- 5) ควบน้ำที่ปะปนกับเมทิลเอสเทอร์โดยใช้โซเดียมซัลเฟตแอนไฮดรัส จะได้เมทิลเอสเทอร์ที่ใส จากนั้นทำการกรองแบบลดความดันเพื่อกรองแอนไฮดรัสโซเดียมซัลเฟตออกไปดังรูปที่ 3.7
- 6) นำเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ไปคำนวณหาร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ และนำไปหาค่าความเป็นกรด เลขไอโอดีน และพิสจูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีต่อไป



รูปที่ 3.7 แสดงเมทิลเอสเทอร์ที่ผ่านการควบน้ำด้วยแอนไฮดรัสโซเดียมซัลเฟต

ในการทดลองตามตารางที่ 3.2 เป็นการนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากเกลือฟอสเฟตชนิดต่างๆ และปริมาณฟอสเฟตบนตัวรองรับอะลูมินาไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน เพื่อคัดเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุด มาทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรอื่นๆ ต่อไปดังแสดงในตารางที่ 3.3 – 3.5

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรในการศึกษาผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาและปริมาณฟอสเฟตบนตัวรองรับอะลูมินาที่มีผลต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้เกลือฟอสเฟตชนิดต่างๆบนตัวรองรับอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณของฟอสเฟตบนอะลูมินา (wt%)	อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%)	เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)
$\text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$	10	9:1	0.5	2
$\text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$	15	9:1	0.5	2
$\text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$	20	9:1	0.5	2
$\text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$	30	9:1	0.5	2
$\text{Na}_2\text{HPO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$	10	9:1	0.5	2
$\text{Na}_2\text{HPO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$	15	9:1	0.5	2
$\text{Na}_2\text{HPO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$	20	9:1	0.5	2
$\text{Na}_2\text{HPO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$	30	9:1	0.5	2

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรในการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้ฟอสเฟตบนอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณของฟอสเฟตบนอะลูมินา (wt%)	อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ (wt%)	เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)
เลือกตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุดจากตารางที่ 3.2	เลือกปริมาณฟอสเฟตที่ให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุดจากตารางที่ 3.2	6:1	0.5	2
		9:1	0.5	2
		12:1	0.5	2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรในการศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ฟอสเฟตบนอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณของฟอสเฟตบนอะลูมินา (wt%)	อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%)	เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)
เลือกตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้อ้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุดจากตารางที่ 3.2	เลือกปริมาณฟอสเฟตที่ให้อ้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุดจากตารางที่ 3.2	เลือกอัตราส่วนที่ให้อ้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุดจากตารางที่ 3.3	0.5	2
			1	2
			2	2
			3	2

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรในการศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ฟอสเฟตบนอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณของฟอสเฟตบนอะลูมินา (wt%)	อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%)	เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)
เลือกตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้อ้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุดจากตารางที่ 3.2	เลือกปริมาณฟอสเฟตที่ให้อ้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุดจากตารางที่ 3.2	เลือกอัตราส่วนที่ให้อ้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุดจากตารางที่ 3.3	เลือกปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาให้อ้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุดจากตารางที่ 3.4	1
				2
				3
				4

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรในการศึกษาผลของการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ฟอสเฟตบนตัวรองรับอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณของเกลือฟอสเฟตบนอะลูมินา (wt%)	อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%)	เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	การนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ (ครั้งที่)
เลือกตัวเร่งปฏิกิริยาจากตารางที่ 3.2	เลือกปริมาณฟอสเฟตจากตารางที่ 3.2	เลือกอัตราส่วนจากตารางที่ 3.3	เลือกปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจากตารางที่ 3.4	เลือกเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจากตารางที่ 3.5	1
					2

3.3.4 การทดสอบสมบัติทางเชื้อเพลิงและโครงสร้างทางเคมีของเมทิลเอสเทอร์

1) ค่าความเป็นกรด (Acid value)

2) เลขไอโอดีน (Iodine value)

3) ศึกษาถึงลักษณะโครงสร้างทางเคมีของไบโอดีเซลโดยเครื่องฟูเรียทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier-Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR) และเครื่องฟูเรียทรานสฟอร์มนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier-Transform Nuclear Magnetic Resonance Spectrophotometer, FT-NMR)

3.3.4.1 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (Acid value)

วิธีทำ

- 1) ใส่เอทานอลกับไดเอทิลอีเทอร์ อย่างละ 10 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปกรวยเขย่าให้เข้ากัน เติมน้ำฟอสฟอรัส 3-4 หยด แล้วทำให้ตัวละลายเป็นกลางด้วยการเติมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จนเห็นเป็นสีชมพูอ่อนๆ (ไม่ต้องจดปริมาตร)
- 2) นำขวดดังกล่าวไปวางบนเครื่องชั่ง ปรับน้ำหนักให้เป็นศูนย์ แล้วเติมน้ำมันประมาณ 5 กรัม ลงไป เขย่าและไทเทรตด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จนถึงจุดยุติ ซึ่งได้สารละลายสีชมพูคงตัว (5-10 นาที)
- 3) จดปริมาตรโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไทเทรต แล้วนำไปคำนวณหาค่าความเป็นกรด

วิธีการคำนวณ

ให้ g เป็นจำนวนกรัมของน้ำมันที่ใช้

ให้ V เป็นจำนวนมิลลิลิตรของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต

จำนวนโมลของ KOH ที่ใช้ = $0.01V / 1000$

จำนวนมิลลิลิตรกรัมของ KOH = $(0.01V / 1000) \times MW_{KOH} \times 1000$
 $= (0.01V) \times 56$

ค่าความเป็นกรด = $(0.01V) \times 56 / g$

3.3.4.2 การวิเคราะห์หาเลขไอโอดีน (Iodine value)

การเตรียมสารละลายฮานส์ไอโอดีน

ละลายไอโอดีน 13.2 กรัม ในกรดอะซิติกกลั่น 1 ลิตร นำไปอุ่นให้ร้อนเพื่อช่วยให้ไอโอดีนละลายดีขึ้น เก็บสารละลายที่ได้ไว้ในขวดสีชาที่มีฝาปิดแน่น

วิธีทำ

- 1) นำขวดรูปกรวย (ล้างภายในด้วยคลอโรฟอร์ม) วางบนเครื่องชั่งปรับน้ำหนักให้เป็นศูนย์ เติมน้ำมันประมาณ 0.3-1 กรัม
- 2) เติมคลอโรฟอร์ม 10 มิลลิลิตร แล้วเปิดสารละลายฮานส์ไอโอดีน 20 มิลลิลิตร ลงไปในขวดแล้ว ปิดจุกเขย่าให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ในที่มืด 45 นาที (ให้ทำขวดเปรียบเทียบแบบลงสีไปพร้อมกัน โดยทำเช่นเดียวกันแต่ไม่ใส่น้ำมัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) เติม 10% โพแทสเซียมไอโอไดด์ลงไป 10 มิลลิลิตร แล้วเขย่าเพื่อให้ทำปฏิกิริยากับฮานส์ไอโอดีนที่เหลืออยู่ในชั้นคลอโรฟอร์ม ซึ่งจะได้ไอโอดีนออกมาอยู่ในชั้นของโพแทสเซียมไอโอไดด์ (เห็นสารละลายเป็นสีน้ำตาลเข้ม)
- 4) ใช้น้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร ชะล้างไอโอดีนที่ติดอยู่ที่ผนังขวดและฝาให้หมดแล้วรีบปิดฝา
- 5) นำไปไทเทรตกับโซเดียมไทโอซัลเฟตจนสีของไอโอดีนจางลง (เห็นเป็นสีน้ำตาลจางๆอมเหลือง) แสดงว่าเหลือไอโอดีนอีกเพียงเล็กน้อย จึงเติมน้ำแบ่งลงไปประมาณ 0.5-1 มิลลิลิตร สารละลายจะเป็นสีน้ำเงินแล้วไทเทรตต่อจนสีน้ำเงินหายไปแล้วจดปริมาตรไว้

วิธีการคำนวณ



ให้ A = มิลลิลิตรของโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตขวดตัวอย่าง

B = มิลลิลิตรของโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตขวดเปรียบเทียบ

จากสมการ 1 โมลของไอโอดีน = 2 โมลของโซเดียมไทโอซัลเฟต

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

น้ำหนักโมเลกุลของไอโอดีน = 254

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

$$= 2.54(B-A)/100$$

เนื่องจาก

เลขไอโอดีน = จำนวนกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดด้วยไขมัน 100 กรัม

g = จำนวนกรัมของน้ำมันที่ใช้ดังนั้น

$$\text{เลขไอโอดีน} = (2.54(B-A)/100) \times 100/g$$

$$= 2.54(B-A)/g$$

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มกับเมทานอล โดยใช้เกลือฟอสเฟตบนตัวรองรับอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการนำเสนอผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลองของงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ตอนคือตอนที่ 1 ศึกษาลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ ได้แก่ โครงสร้างและองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา และลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ ตอนที่ 2 เป็นการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์และศึกษาถึงตัวแปรที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ได้แก่ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณของเกลือฟอสเฟตบนตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และการนำกลับมาใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา และตอนที่ 3 เป็นการพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีและทดสอบสมบัติของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้

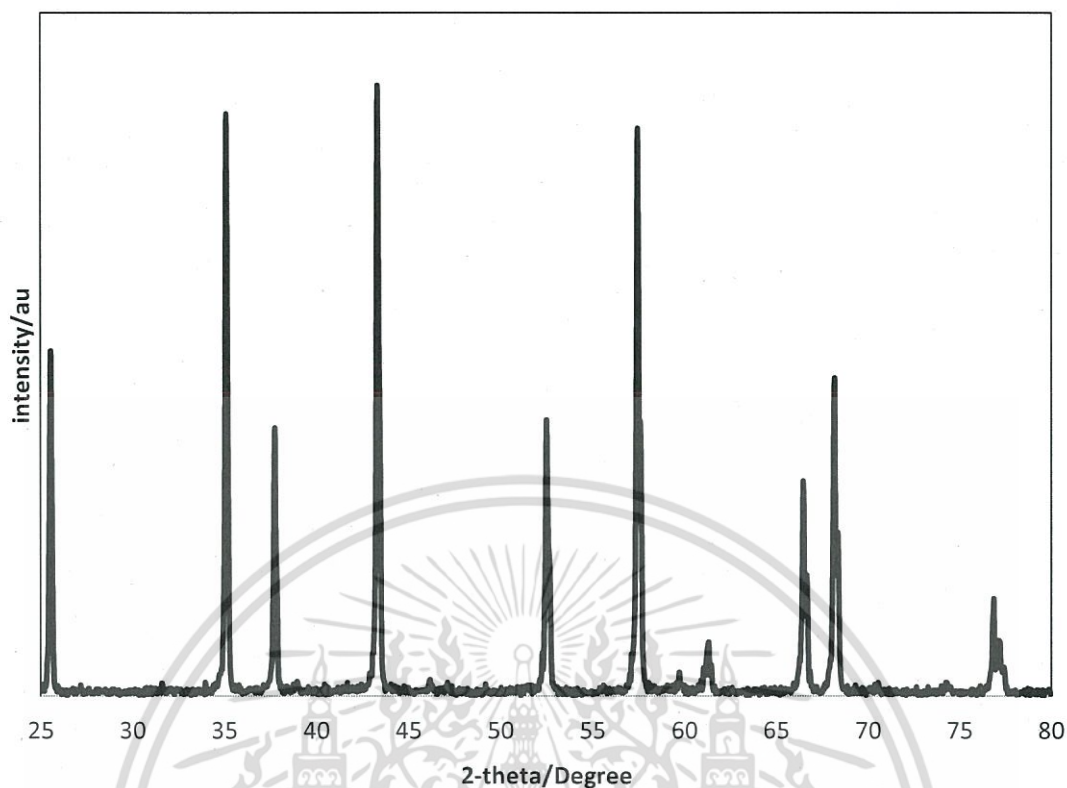
4.1 การศึกษาลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา

4.1.1 โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ เกลือฟอสเฟตบนตัวรองรับอะลูมินา ซึ่งผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เกลือฟอสเฟตที่ใช้มีดังต่อไปนี้

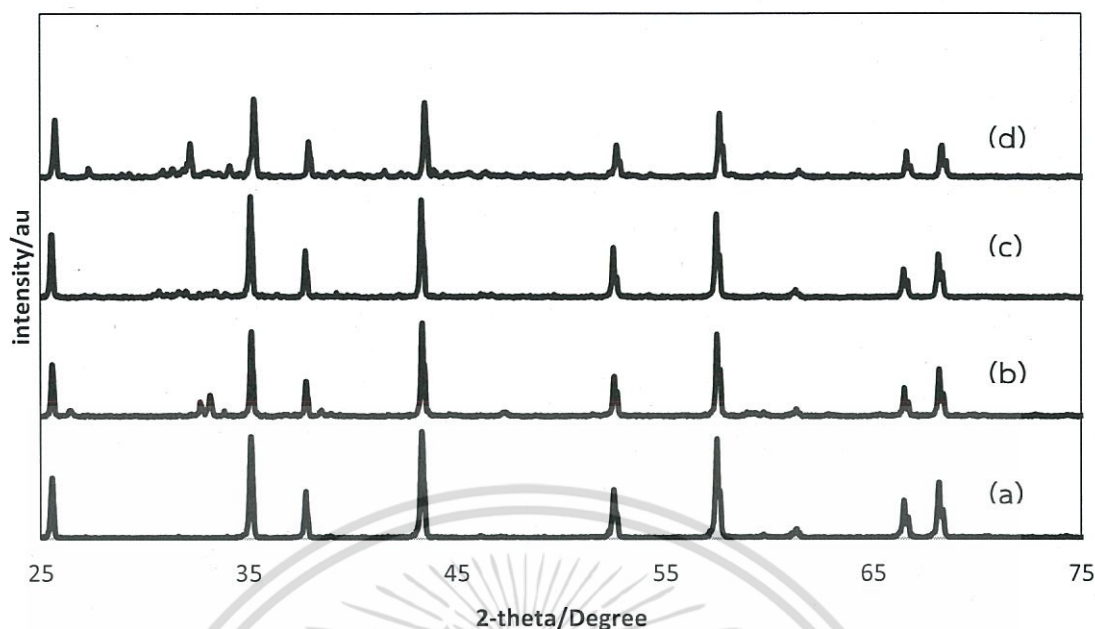
1. โซเดียมฟอสเฟต($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)
2. โซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต(Na_2HPO_4)

ในการศึกษาโครงสร้างของเกลือโพแทสเซียมบนตัวรองรับอะลูมินา จะใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffraction, XRD) ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของตัวรองรับอะลูมินา (Al₂O₃)

จากรูปที่ 4.1 พบว่าพีคเอกลักษณ์ที่มุม $2\theta = 25.56^\circ, 35.16^\circ, 37.76^\circ, 43.32^\circ, 52.52^\circ, 57.44^\circ, 61.28^\circ, 66.40^\circ, 68.08^\circ$ และ 76.88° แสดงให้เห็นถึงความบริสุทธิ์และรูปแบบความเป็นผลึกสูงของอะลูมินา



รูปที่ 4.2 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (a) Al_2O_3 , (b) $20\%\text{Na}_2\text{HPO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$, (c) $20\%\text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ และ (d) $30\%\text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$

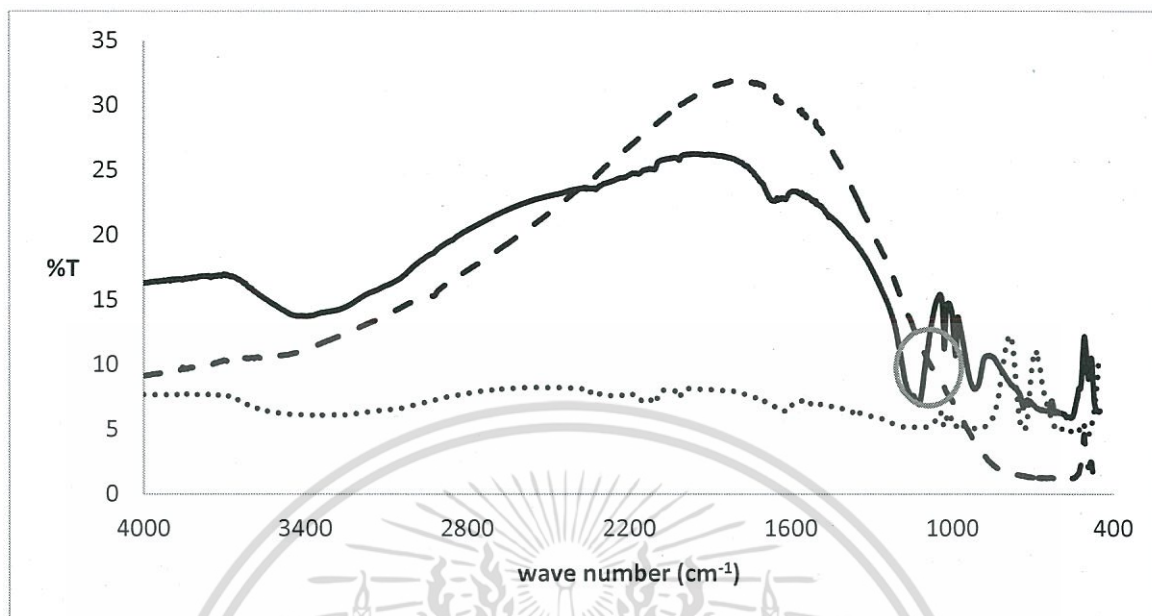
จากรูปที่ 4.2 เป็นรูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของตัวเร่งปฏิกิริยา $20\%\text{Na}_2\text{HPO}_4$, $20\%\text{Na}_3\text{PO}_4$ และ $30\%\text{Na}_3\text{PO}_4$ พบว่าที่มุม $2\theta = 25.56^\circ$, 35.12° , 37.80° , 43.32° , 52.56° , 57.52° , 61.36° , 66.52° , 68.24° และ 76.88° ซึ่งเป็นรูปแบบความเป็นผลึกสูงของอะลูมินา โดยพบพีคที่เป็นรูปแบบความเป็นผลึกของ Na_2HPO_4 และ Na_3PO_4 [32] จากรูปแบบ XRD ที่ได้ อาจเกิดจากการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของ Na_2HPO_4 และ Na_3PO_4 บนอะลูมินา ในลักษณะเป็นชั้นเดียว (monolayer)

เพื่อพิสูจน์ให้เห็นถึงลักษณะโครงสร้างหรือพันธะที่เกิดขึ้นบนตัวเร่งปฏิกิริยา จึงใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FT-IR) ในการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา ดังรูปที่ 4.3 - 4.5

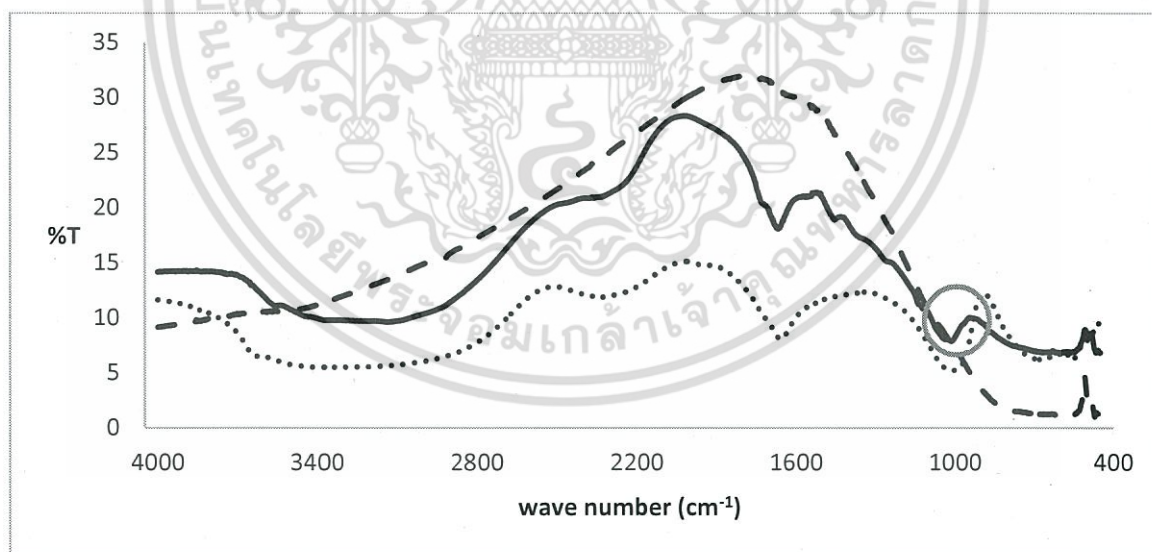
จากรูปที่ 4.3 เป็นการเปรียบเทียบรูปแบบ FT-IR ของ Al_2O_3 , Na_2HPO_4 และ $20\%\text{Na}_2\text{HPO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยจะเห็นได้ว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิด Strong peak ที่เลขคลื่นประมาณ 1080 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งเลขคลื่นเดียวกับเกลือ Na_2HPO_4 แต่ตัวรองรับ Al_2O_3 จะไม่พบพีคตำแหน่งนี้ โดยพีคที่เลขคลื่น 1080 cm^{-1} เป็นพีคเอกลักษณ์ของพันธะคู่ระหว่างฟอสฟอรัสกับออกซิเจน ($\text{P}=\text{O}$) ของหมู่ฟอสเฟต ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่า บนตัวรองรับอะลูมินาจะมีหมู่ฟอสเฟตดูดซับอยู่ [29]

สำหรับรูปที่ 4.4 และ 4.5 เป็นการเปรียบเทียบรูปแบบ FT-IR ของตัวเร่งปฏิกิริยา $20\%\text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ และ $30\%\text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ กับ Al_2O_3 และ Na_3PO_4 ตามลำดับ ซึ่งพบ Strong peak ที่เลขคลื่นประมาณ 1080 cm^{-1} เช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.3 ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกส $\text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ มีหมู่ฟอสเฟตที่ถูกดูดซับอยู่บนอะลูมินาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

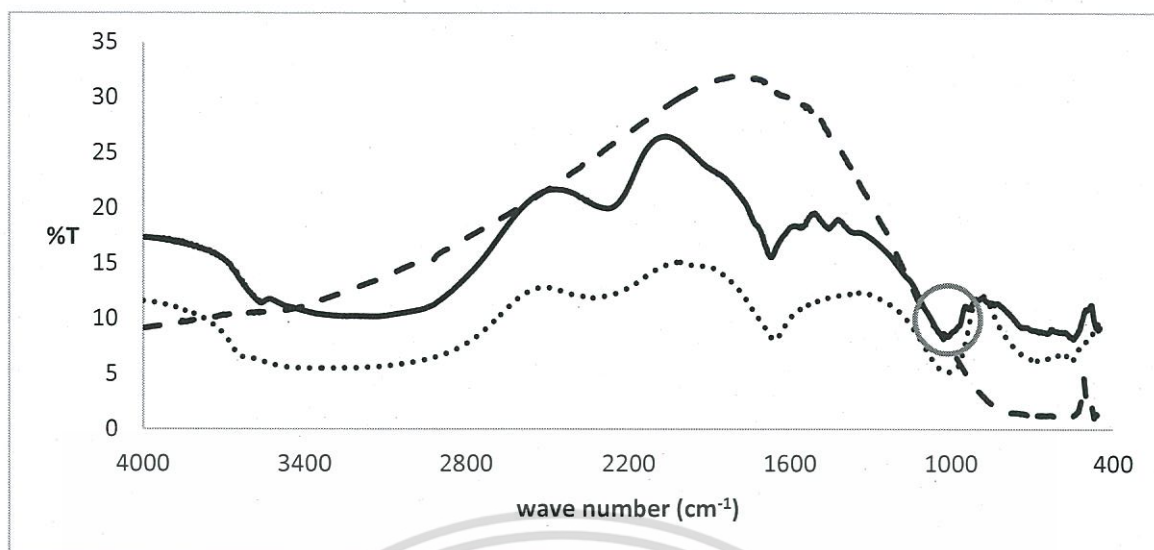


รูปที่ 4.3 รูปแบบ FT-IR ของ (---) Al₂O₃, (—) 20% Na₂HPO₄/Al₂O₃ และ (···) Na₂HPO₄ ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 °C



รูปที่ 4.4 รูปแบบ FT-IR ของ (---) Al₂O₃, (—) 20% Na₃PO₄/Al₂O₃ และ (···) Na₃PO₄ ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

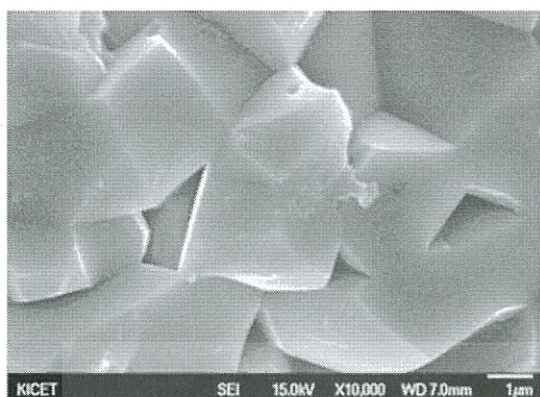


รูปที่ 4.5 รูปแบบ FT-IR (---) Al_2O_3 , (—) $30\%\text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ และ (...) Na_3PO_4 ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ $500\text{ }^\circ\text{C}$

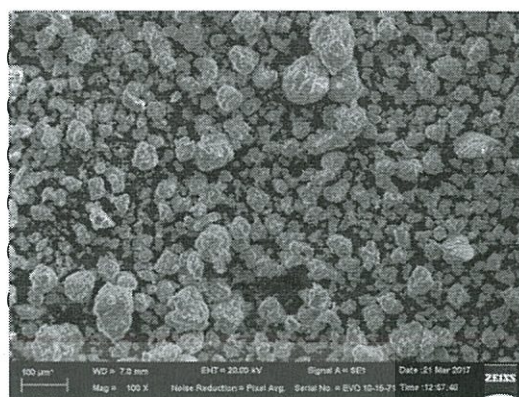
จากรูปที่ 4.1-4.5 พบว่าอะลูมินาและเกลือฟอสเฟตบนตัวรองรับอะลูมินาที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ $500\text{ }^\circ\text{C}$ องศาเซลเซียส มีรูปแบบการเป็นผลึกที่แสดงถึงพื้นที่ผิวที่เป็นอะลูมินา ส่วนเกลือฟอสเฟตบนตัวรองรับอะลูมินา ไม่พบรูปแบบความเป็นผลึกของเกลือฟอสเฟตเลย เป็นผลมาจากการกระจายตัวที่ดีของเกลือฟอสเฟตบนพื้นผิวของอะลูมินาในลักษณะเป็นชั้นเดียว จึงเกิด interaction ระหว่างเกลือฟอสเฟตกับพื้นผิวของอะลูมินา ทำให้เกลือฟอสเฟตไม่สามารถเกิดเป็นโครงสร้างผลึกได้

4.1.2 ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

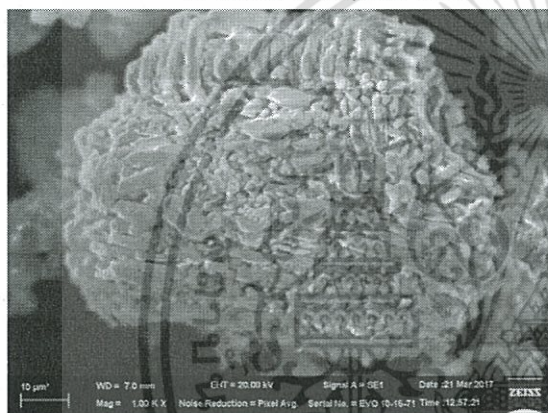
นำตัวรองรับอะลูมินาและตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตบนตัวรองรับอะลูมินา ($\text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$) ที่มีปริมาณ Na_3PO_4 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ $500\text{ }^\circ\text{C}$ องศาเซลเซียส มาทำการศึกษาลักษณะพื้นผิว โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ที่กำลังขยายต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.6



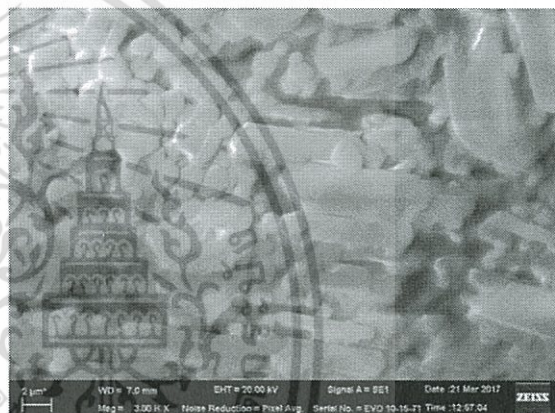
(ก) Al_2O_3
(กำลังขยาย 10,000 เท่า)



(ข) $20\% \text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$
(กำลังขยาย 100 เท่า)



(ค) $20\% \text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$
(กำลังขยาย 1,000 เท่า)



(ง) $20\% \text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$
(กำลังขยาย 20,000 เท่า)

รูปที่ 4.6 ลักษณะพื้นผิวของตัวรองรับ Al_2O_3 และตัวเร่งปฏิกิริยา $20\% \text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่กำลังขยายต่างๆ

จากรูปที่ 4.6 เป็นลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา $20\% \text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่กำลังขยาย 100 เท่า, 1,000 เท่า และ 20,000 เท่า เปรียบเทียบกับพื้นผิวของตัวรองรับอะลูมินา จะเห็นได้ว่าพื้นผิวของ Al_2O_3 มีลักษณะที่เรียบ เมื่อทำการเติม Na_3PO_4 ลงไปบน Al_2O_3 พบว่า พื้นที่มีผิวมีลักษณะขรุขระมากขึ้น โดยมีผลของเกลือโซเดียมฟอสเฟตที่มีลักษณะเป็นแท่งเกาะตัวอยู่บนพื้นผิวอะลูมินา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาเกลือโซเดียมฟอสเฟตบนตัวรองรับอะลูมินา ด้วยเทคนิคบีอีที (BET) โดยการดูดซับแก๊สไนโตรเจน หรือ N_2 adsorption ซึ่งพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาถือว่าเป็นปัจจัยสำคัญมาก ส่งผลต่อความว่องไวและความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาเกลือฟอสเฟตบนตัวรองรับอะลูมินาวิเคราะห์โดยเทคนิค BET

ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)
Al_2O_3	175.21
10% Na_3PO_4/Al_2O_3	168.35
20% Na_3PO_4/Al_2O_3	168.85
30% Na_3PO_4/Al_2O_3	137.93
10% Na_2HPO_4/Al_2O_3	165.42
20% Na_2HPO_4/Al_2O_3	161.75
30% Na_2HPO_4/Al_2O_3	135.24

จากตาราง 4.1 จะเห็นได้ว่าตัวรองรับ Al_2O_3 มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 175.21 m^2/g เมื่อทำการเติมเกลือฟอสเฟตลงไปบนตัวรองรับ พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยามีแนวโน้มลดลง เนื่องจากตัวรองรับ

อะลูมินามีโครงสร้างที่เป็นผลึก และมีรูพรุน ซึ่งหลังจากทำการเติมเกลือฟอสเฟตลงบนอะลูมินา ทำให้เกิดการฝังตัวและการปกคลุมของเกลือฟอสเฟต บนพื้นผิวของตัวรองรับอะลูมินา ส่งผลให้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง และเมื่อปริมาณของเกลือฟอสเฟตในการเติมลงบนตัวรองรับอะลูมินาเพิ่มขึ้น พบว่าพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามีแนวโน้มลดลง เนื่องจากจากการที่เพิ่มปริมาณเกลือฟอสเฟตสูงขึ้น ทำให้การกระจายตัวของพื้นที่ผิวของตัวรองรับอะลูมินาไม่ดี เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน บดบังบนพื้นที่ผิว จึงส่งผลให้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง โดยตัวเร่งปฏิกิริยาเกลือฟอสเฟตบนอะลูมินาที่ปริมาณฟอสเฟต 10% และ 20% มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่แตกต่างกันไม่มากนัก แต่เมื่อเติมปริมาณฟอสเฟต เป็น 30% พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะลดลงอย่างมาก เนื่องจากการเติมเกลือฟอสเฟตมากเกินไป ทำให้เกิดการเกาะกลุ่มเป็นก้อนนั่นเอง

4.2 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์

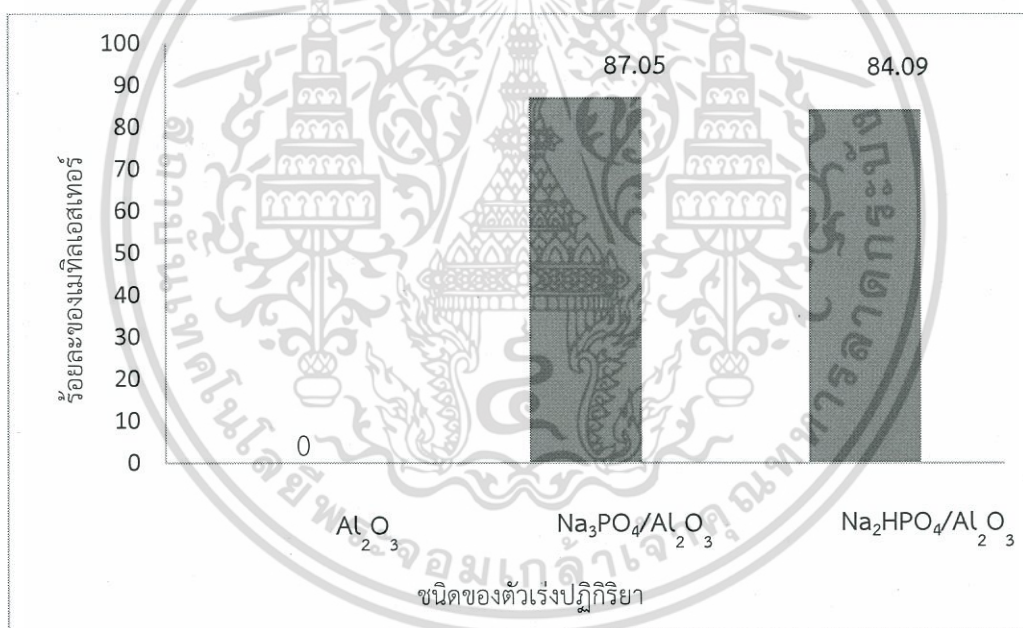
4.2.1 ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการศึกษาผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาเกลือฟอสเฟตบนตัวรองรับอะลูมินา จะกำหนดให้ปริมาณของเกลือฟอสเฟตบนตัวรองรับอะลูมินาเป็นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิที่ใช้ในการแคลไซน์ 500 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มเป็น 9:1 เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิจุดไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดือดของเมทานอล กลือฟอสเฟตที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาได้แก่ Na_3PO_4 และ Na_2HPO_4 ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.2 ปริมาณผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

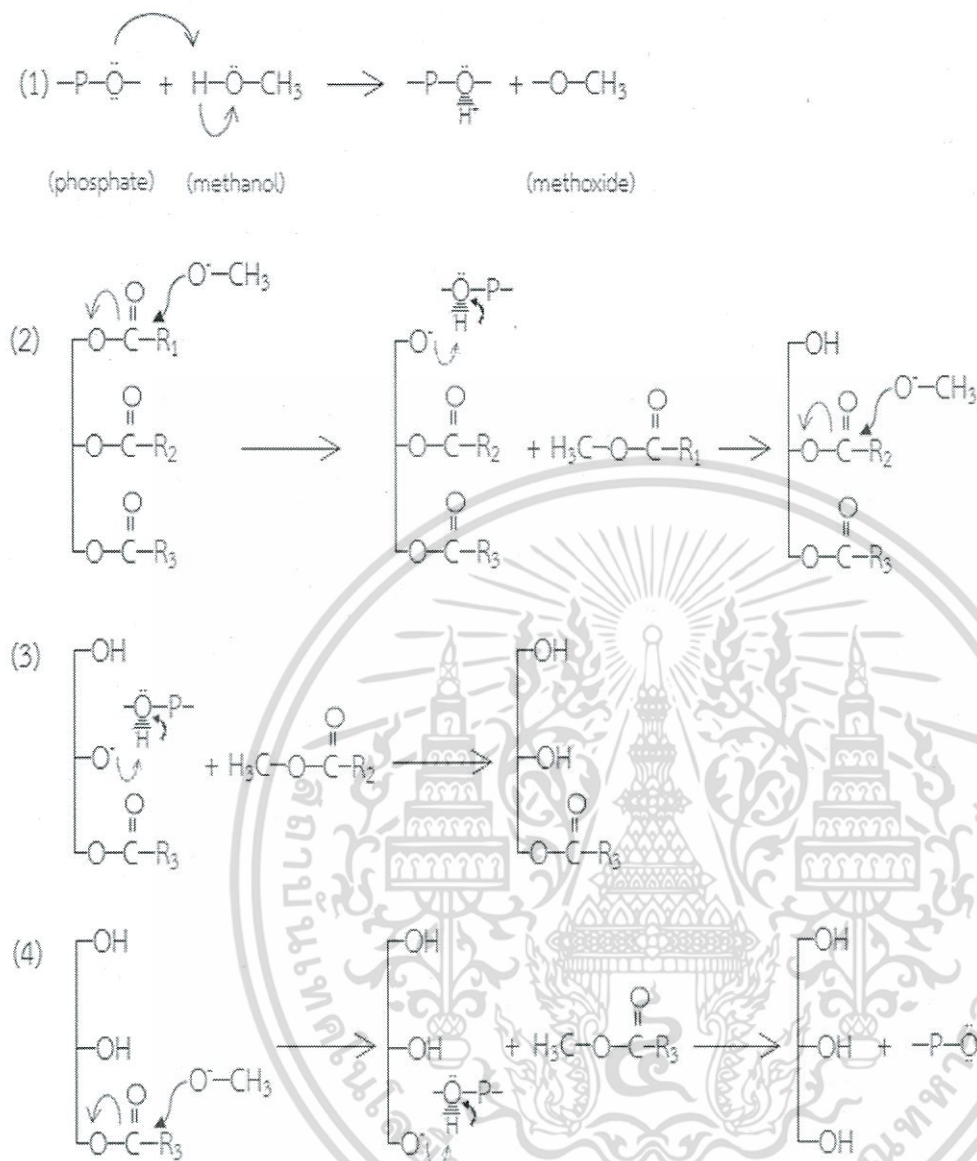
ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณของเกลือฟอสเฟตบนอะลูมินา (wt%)	อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน	เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์
Al_2O_3	-	9:1	2	1.0	0.0
$\text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$	20	9:1	2	1.0	87.05
$\text{Na}_2\text{HPO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$	20	9:1	2	1.0	84.09



รูปที่ 4.7 ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.3 และ รูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่า เมื่อใช้อะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะไม่สามารถช่วยให้เกิดเมทิลเอสเทอร์ขึ้นได้ เนื่องจากอะลูมินามีความเป็นเบสน้อย เมื่อเติมเกลือฟอสเฟตบนตัวรองรับอะลูมินา พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ และ $\text{Na}_2\text{HPO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ สามารถเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันได้ โดยร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุดถึง 87.05 เมื่อใช้ $\text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ขณะที่ $\text{Na}_2\text{HPO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ ให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ 84.09 ซึ่งน้อยกว่าการใช้ $\text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ ไม่มากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกลือฟอสเฟตบนอะลูมินา

การที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเกลือฟอสเฟตบนอะลูมินา ($\text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ และ $\text{Na}_2\text{HPO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$) มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันได้นั้น เป็นผลมาจากความเป็นเบรอนสเตดเบส (Bronsted base) ของหมู่ฟอสเฟตบนอะลูมินา ซึ่งเมทานอลจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ฟอสเฟต เกิดเป็นเมทอกไซด์ไอออน (methoxide ion) ขึ้น จากนั้น methoxide จะทำปฏิกิริยาต่อกับ triglyceride เกิดเป็น methyl ester และ glycerol ดังแสดงในกลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ดังรูป 4.8

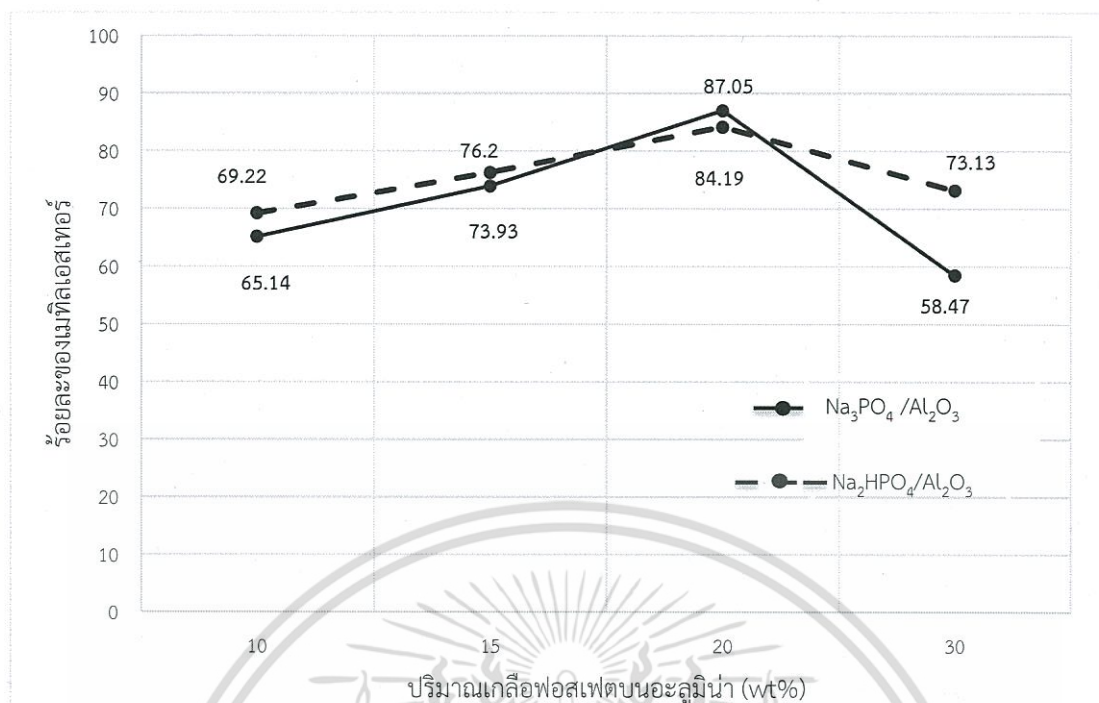
จากผลการทดลองตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ ให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงกว่า $\text{Na}_2\text{HPO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ เนื่องจากหมู่ฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ของ Na_3PO_4 มีความเป็นเบสมากกว่าหมู่ไฮโดรเจนฟอสเฟต (HPO_4^{2-}) ของ Na_2HPO_4 ดังนั้นจึงสามารถดึงโปรตอนจากเมทานอลได้ดีกว่า

4.2.2 ผลของปริมาณเกลือฟอสเฟตบนตัวรองรับอะลูมินา

ในการศึกษาปริมาณของเกลือฟอสเฟตบนตัวรองรับอะลูมินาโดยกำหนดให้อุณหภูมิที่ใช้ในการแคลไซน์ 500 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มเป็น 9:1 โดยโมล เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิจุดเดือดของเมทานอล ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.3 ผลของปริมาณเกลือฟอสเฟตบนอะลูมินาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณของเกลือฟอสเฟตบนอะลูมินา (wt%)	อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน	เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์
$\text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$	10	9:1	2	1.0	65.14
	15				73.93
	20				87.05
	30				58.47
$\text{Na}_2\text{HPO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$	10	9:1	2	1.0	69.22
	15				76.28
	20				84.19
	30				73.13



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเกลือฟอสเฟตบนตัวรองรับอะลูมินากับร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

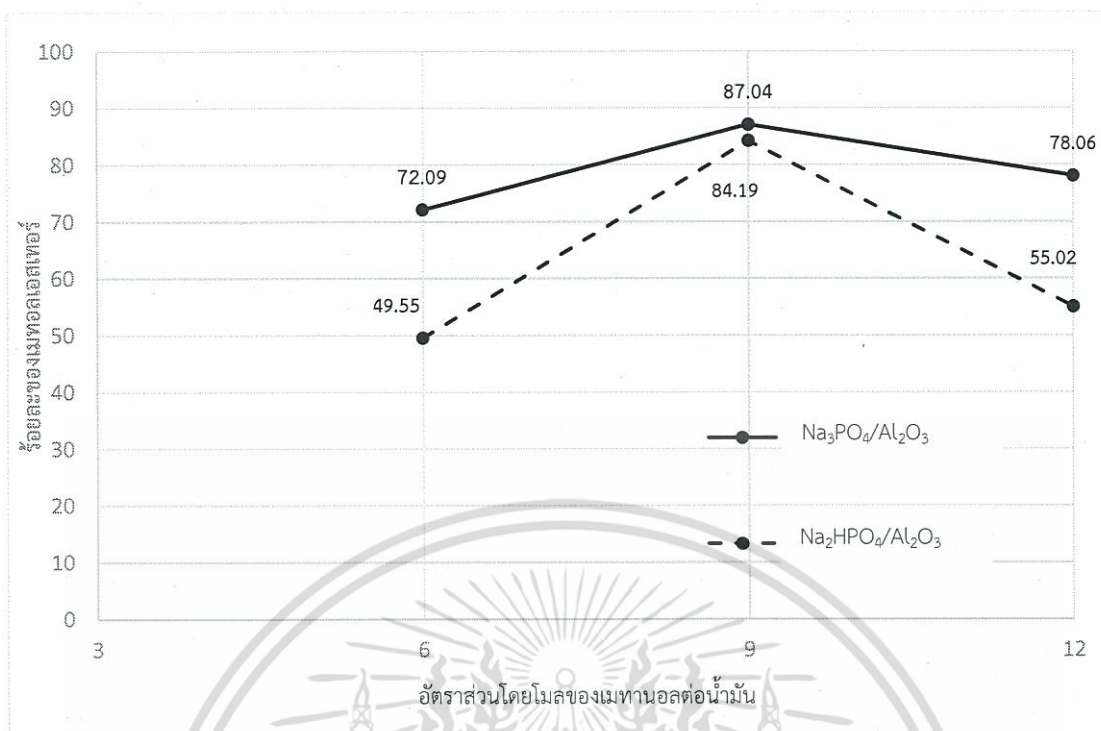
จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.9 พบว่า เมื่อปริมาณของเกลือฟอสเฟตบนตัวรองรับอะลูมินาเพิ่มขึ้นจาก 10% เป็น 20% ผลของร้อยละเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณเกลือฟอสเฟตบนตัวรองรับอะลูมินามีมากเกินไปที่จะสามารถทำให้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเกิดได้สมบูรณ์ และเมื่อร้อยละของเกลือโพแทสเซียมเพิ่มเป็น 30% นั้นทำให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ลดลงเนื่องจากปริมาณเกลือฟอสเฟตบนตัวรองรับอะลูมินามีมากเกินไป จึงเกาะกลุ่มเป็นก้อน ทำให้การกระจายตัวไม่ดี จึงเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันได้ลดลง ส่งผลให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ลดลงด้วย ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ปริมาณฟอสเฟตเป็น 20% ให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงสุด ถึงร้อยละ 87.05

4.2.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม

ในการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ โดยกำหนดให้ปริมาณของเกลือฟอสเฟตบนอะลูมินาคงที่ที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาคงที่ที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิจุดเดือดของเมทานอล ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.10

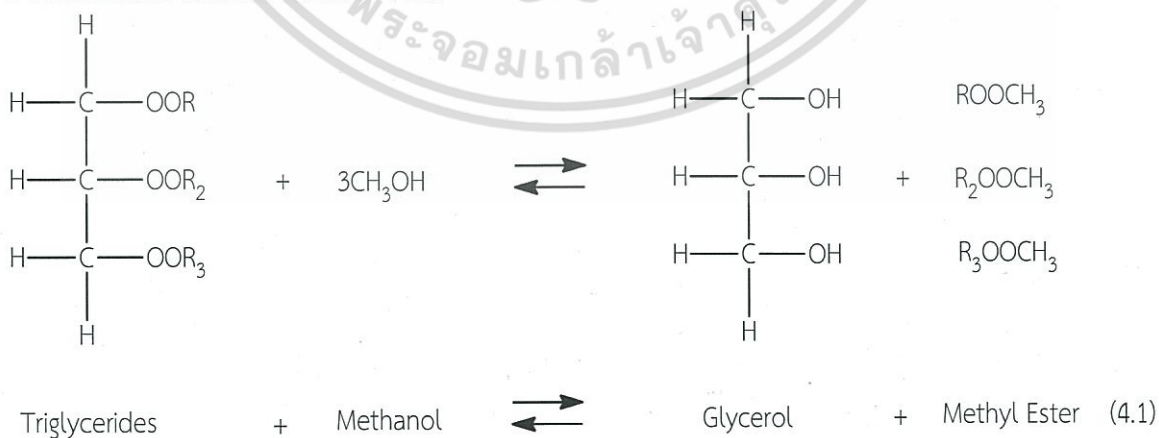
ตารางที่ 4.4 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้เกลือฟอสเฟตบนอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณเกลือฟอสเฟตบนอะลูมินา (wt%)	อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน	เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (wt%)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์
$\text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$	20	6:1	2	1.0	72.09
		9:1			87.05
		12:1			78.06
$\text{Na}_2\text{HPO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$	20	6:1	2	1.0	49.55
		9:1			84.19
		12:1			55.02



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มกับร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้เกลือฟอสเฟตบนอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

จากรูปที่ 4.10 เป็นผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอส-เทอร์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 20%Na₃PO₄/Al₂O₃ และ 20% Na₂HPO₄/Al₂O₃ ซึ่งจากการทดลองพบว่า เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มเพิ่มขึ้นจาก 6:1 เป็น 9:1 ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มสูงขึ้น เนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณเมทานอลที่มากเกินไป จะสามารถทำให้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาผันที่กลับได้เลื่อนไปทางด้านของผลิตภัณฑ์ จึงทำให้ได้เมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นดังสมการ (4.1)



เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มจาก 9:1 เป็น 12:1 กลับทำให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ลดลง เมื่อใช้Na₃PO₄/Al₂O₃ และNa₂HPO₄/Al₂O₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากปริมาณเมทานอลที่มากเกินไปจะทำให้ปริมาตรโดยรวมของของผสมในปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้นของเมทอกไซด์ (methoxide) ลดลง และนอกจากนั้นในการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มที่สูงมากๆ จะทำให้การแยกเฟสของเมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอลเป็นไปได้ยาก โดยในการทดลองที่อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 12:1 จะเกิดชั้นของเมทานอลที่เหลือนอกจากปฏิกิริยาเหนือชั้นของเมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล ดังนั้นอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มที่เหมาะสมที่สุดคือ 9:1 ซึ่งให้ปริมาณของเมทิลเอสเทอร์สูงสุด

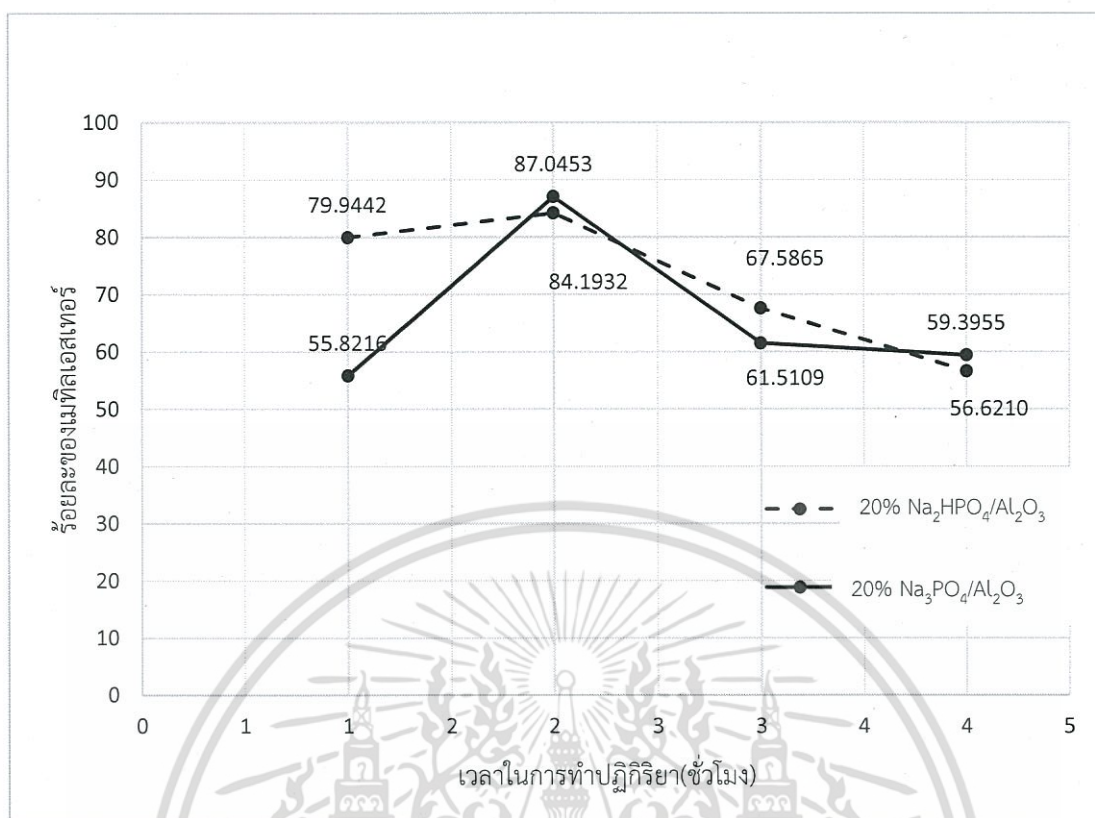
4.2.4 ผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ในการศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ จะทำให้การแปรเปลี่ยนเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 1,2,3 และ 4 ชั่วโมง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา กลีเซอโรฟอสเฟตบนอะลูมินาที่มีปริมาณฟอสเฟตร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 9:1 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิจุดเดือดของเมทานอล ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.5 ผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้กลีเซอโรฟอสเฟตบนอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณของกลีเซอโรฟอสเฟตบนอะลูมินา (wt%)	อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน	เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (wt%)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์
$\text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$	20	9:1	1	1.0	55.82
			2		87.05
			3		61.51
			4		59.40
$\text{Na}_2\text{HPO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$	20	9:1	1	1.0	79.94
			2		84.19
			3		67.59
			4		56.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้เกลือฟอสเฟตบนอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

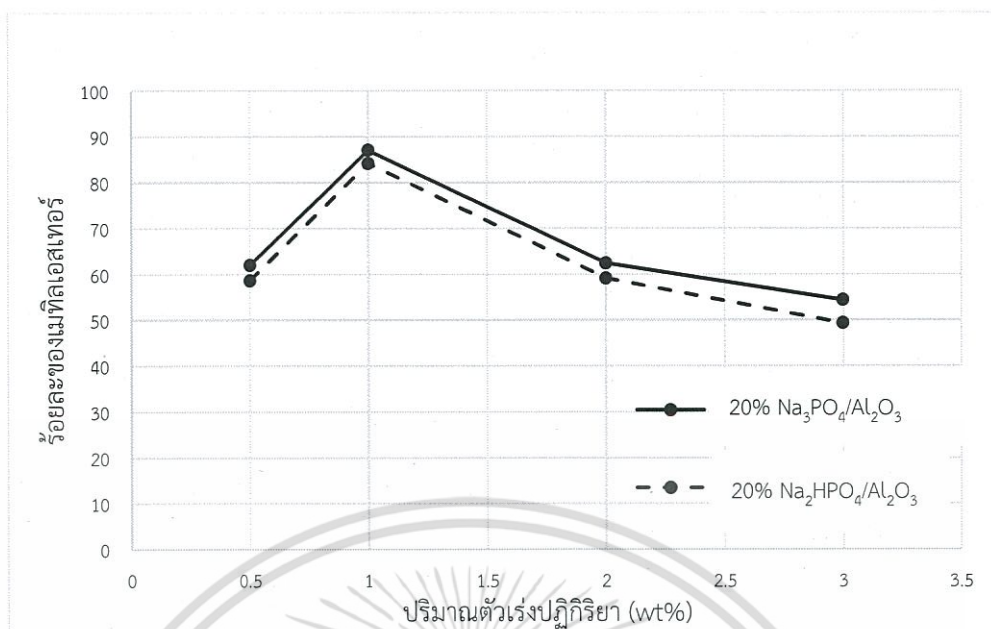
จากรูปที่ 4.11 จะเห็นว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 1 ชั่วโมงเป็น 2 ชั่วโมง ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มสูงขึ้นจากร้อยละ 55.82 เป็น 87.05 สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา 20%Na₃PO₄/Al₂O₃ และจากร้อยละ 79.94 เป็น 84.19 สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา 20%Na₂HPO₄/Al₂O₃ แต่เมื่อเพิ่มเวลามากกว่า 2 ชั่วโมง ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยานานเกินไป ทำให้เกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ ทำให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ลดต่ำลง ดังนั้นเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมคือ 2 ชั่วโมง โดยได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุดเป็น 87.05 เมื่อใช้ 20%Na₃PO₄/Al₂O₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

4.2.5 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ โดยกำหนดให้ปริมาณของเกลือฟอสเฟตบนอะลูมินาคงที่ที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 9:1 เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิจุดเดือดของเมทานอล ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.12

ตารางที่ 4.6 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้เกลือฟอสเฟตบนอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณของเกลือฟอสเฟตบนอะลูมินา (wt%)	อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน	เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (wt%)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์
$\text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$	20	9:1	2	0.5	61.95
				1.0	87.05
				2.0	62.41
				3.0	54.39
$\text{Na}_2\text{HPO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$	20	9:1	2	0.5	58.60
				1.0	84.19
				2.0	59.12
				3.0	49.34



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยากับร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้เกลือฟอสเฟตบนอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

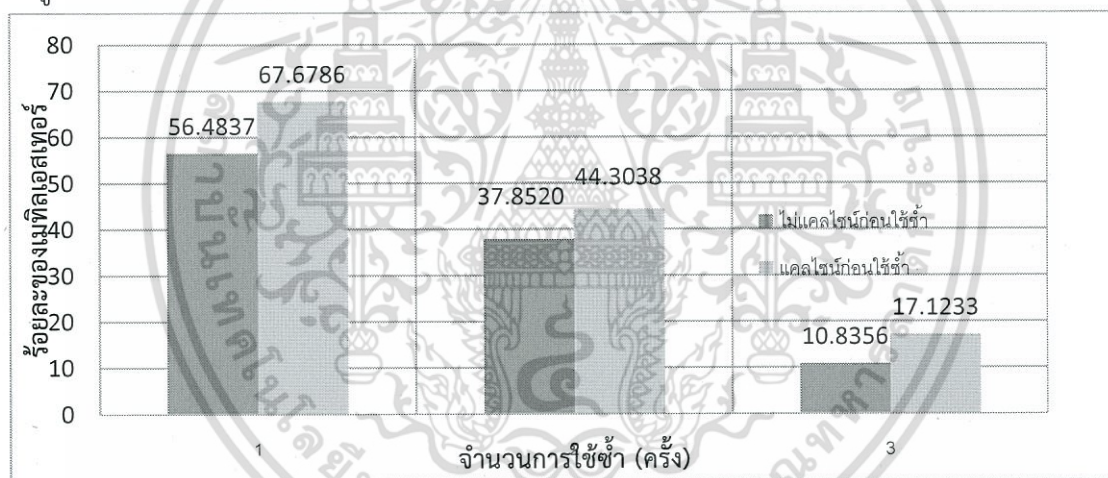
จากรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.5 เป็น 1.0 ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของการทำปฏิกิริยา และเพิ่มความเป็นเบสจึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดี ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์จึงเพิ่มขึ้น โดยเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจากร้อยละ 0.5 เป็น ร้อยละ 1 จะเห็นได้ว่าร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 61.95 เป็นร้อยละ 87.05 เมื่อใช้ $\text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และเมื่อใช้ $\text{Na}_2\text{HPO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 58.60 เป็นร้อยละ 84.19

เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นร้อยละ 2 และ 3 พบว่า ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มที่ลดลง สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเกิดจากการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งมากเกินไป จะทำให้ของผสมในปฏิกิริยา (น้ำมันปาล์ม , เมทานอล และตัวเร่งปฏิกิริยา) มีลักษณะข้นและหนืดขึ้น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อ การถ่ายโอนมวลระหว่างสารตั้งต้นกับตัวเร่งปฏิกิริยาได้ ซึ่งในงานวิจัยของ Ilgen และคณะ [30] ก็พบปัญหาในลักษณะเดียวกัน ดังนั้นปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ $\text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ และ $\text{Na}_2\text{HPO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ ร้อยละ 1 จึงเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่จะให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุด

4.2.6 การนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำ

ปัญหาสำคัญของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์คือ การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องมาจากการละลายหรือหลุดออกของหมู่ว่องไว (active site) เข้าไปในผลิตภัณฑ์หรือสารตั้งต้น ในงานวิจัยนี้ จึงทำการศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ ต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อมีการนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการทำปฏิกิริยาแล้วมาใช้ซ้ำอีก เพื่อดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของร้อยละของเอสเทอร์ที่เกิดขึ้น

ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่มีปริมาณฟอสเฟตร้อยละ 20 ที่ใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยมีอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 9:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิจุดเดือดของเมทานอล จะถูกทำการศึกษากลับมาใช้ซ้ำเป็น 2 กรณี กรณีแรกตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการทำปฏิกิริยาแล้วจะถูกนำไปล้างด้วยอะซิโตน อบให้แห้ง และนำไปใช้ต่อในการทำปฏิกิริยาต่อไป กรณีที่สองจะทำเหมือนกรณีแรก แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อบแห้งแล้วจะถูกนำไปแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 °C หลังจากนั้นจึงนำไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยากับร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้เกลือฟอสเฟตบนอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนครั้งของการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำเพิ่มขึ้น ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มลดลง ทั้งกรณีแคลไซน์ก่อนใช้ซ้ำ และไม่แคลไซน์ก่อนใช้ซ้ำ ซึ่งประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาที่ลดลงนี้ เนื่องจากการละลายหรือหลุดออกของหมู่ฟอสเฟตเข้าไปในสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่มีขี้ เช่น เมทานอล, กลีเซอรอล และเมทิลเอสเทอร์ จึงทำให้เหลือหมู่ฟอสเฟตซึ่งเป็นหมู่ว่องไวบนอะลูมินาน้อยลง การเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดเมทิลเอสเทอร์ในปฏิกิริยาครั้งต่อไปจึงลดลงด้วย

ในส่วนของการนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปผ่านการแคลไซน์ก่อนนำไปใช้ซ้ำ พบว่าให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านการแคลไซน์ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ เนื่องมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาเอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นองอยู่ต่อไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ที่ผ่านการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันแล้ว จะมีโมเลกุลของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์เข้าไปติดไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้เกลือฟอสเฟตบนอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเกลือฟอสเฟตบนอะลูมินาที่ใช้ ได้แก่ โซเดียมฟอสเฟต และโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต เตรียมโดยวิธีทำให้เอิบชุ่ม จากนั้นแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ สรุปว่า

1. จากการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค XRD พบรูปแบบความเป็นผลึกของเกลือฟอสเฟต และความเป็นผลึกของอะลูมินา เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR พบพีกเอกลักษณ์ของหมู่ฟอสเฟตเกิดขึ้น ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้มีหมู่ฟอสเฟตที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวอะลูมินา

2. ตัวเร่งปฏิกิริยาเกลือฟอสเฟตบนอะลูมินา $\text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ และ $\text{Na}_2\text{HPO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเนื่องจากความเป็นบรอนสเตดเบส (Brønsted base) ของหมู่ฟอสเฟตบนอะลูมินา โดย $\text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ สามารถให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงกว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Na}_2\text{HPO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ เนื่องจากความเป็นเบสที่แรงกว่า

3. สภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม เมื่อใช้โซเดียมฟอสเฟตบนอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุดที่ 87.05 ที่สภาวะการทำปฏิกิริยา โดยใช้ปริมาณโซเดียมฟอสเฟตบนอะลูมินาร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 9:1 เวลา 2 ชั่วโมง และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มที่จุดเดือดของเมทานอล

4. ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมฟอสเฟตบนอะลูมินาที่ผ่านการแคลไซน์และไม่ผ่านการแคลไซน์ จะมีประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาลดลง เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปใช้ทำปฏิกิริยาต่อในครั้งต่อไป แต่การแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนนำมาใช้ จะทำให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงกว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านการแคลไซน์

5. จากการทดสอบคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ พบว่า เลขไอโอดีนและค่าความเป็นกรด อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรม

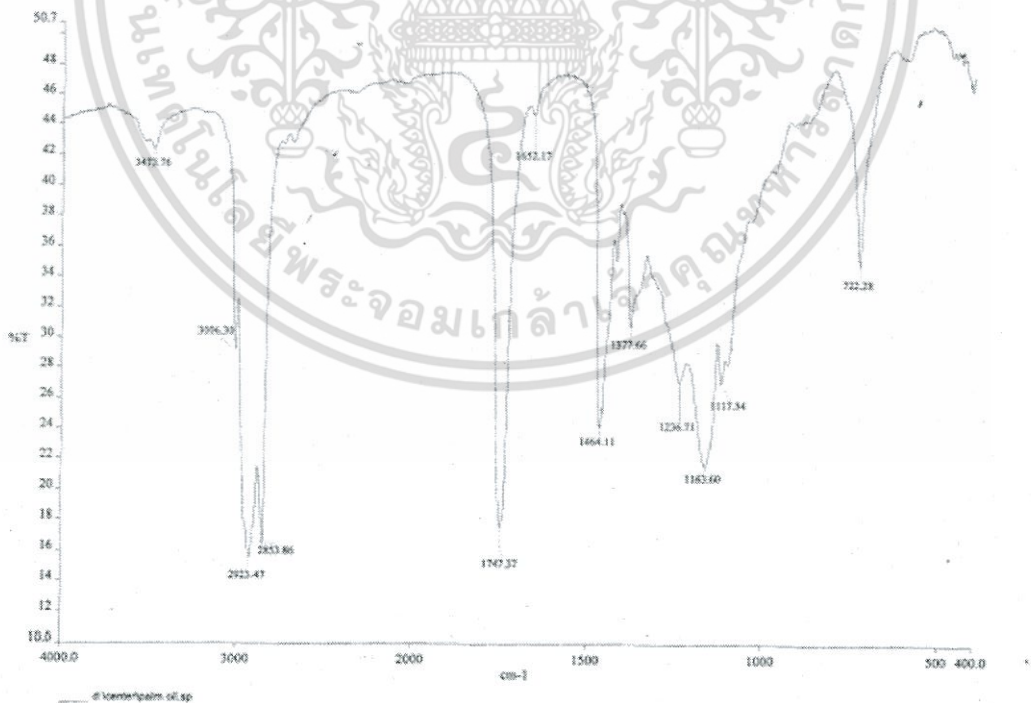
ซึ่งอยู่ภายในรูพรุน ซึ่งจะทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 °C โมเลกุลของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่เจือปนอยู่ภายในรูพรุนตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกกำจัดออก ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงมีประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาที่สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านการแคลไซน์

4.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีและทดสอบสมบัติของเมทิลเอสเทอร์

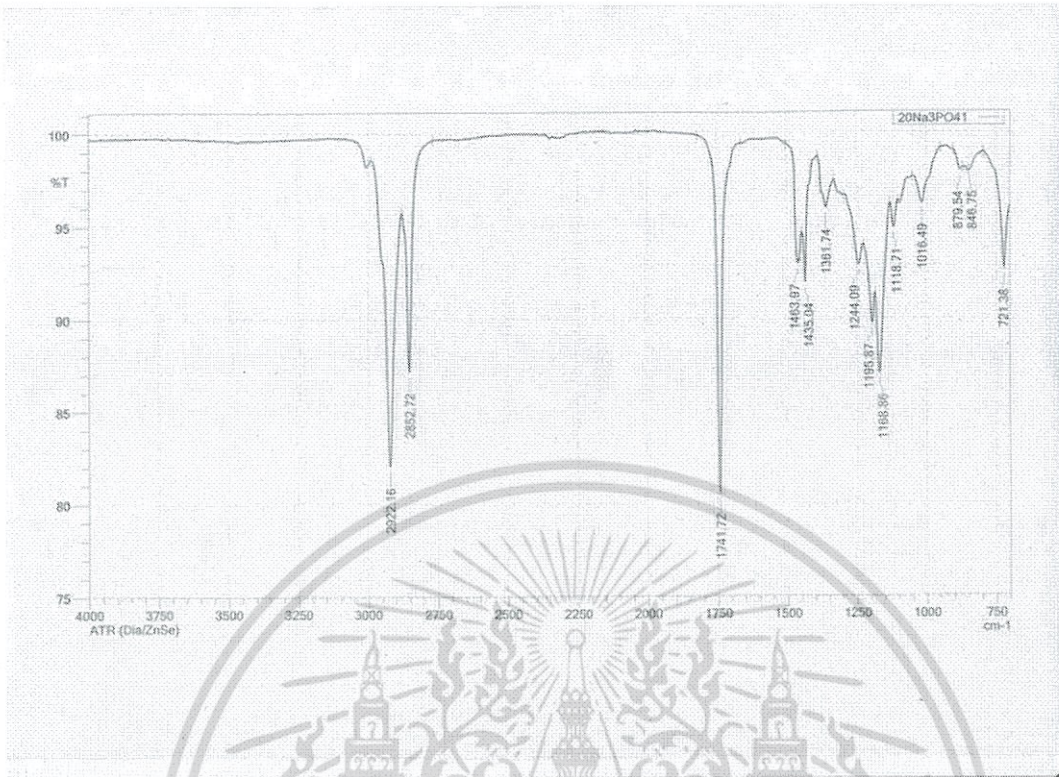
นำเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาฟอสเฟตบนอะลูมินามาทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีของเมทิลเอสเทอร์ด้วยเทคนิคฟูเรียทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตเมทรี (FT-IR) และเทคนิคฟูเรียทรานสฟอร์ม นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรโฟโตเมทรี (FT-NMR)

4.3.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีของเมทิลเอสเทอร์โดยใช้เครื่องฟูเรียทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier-Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR)

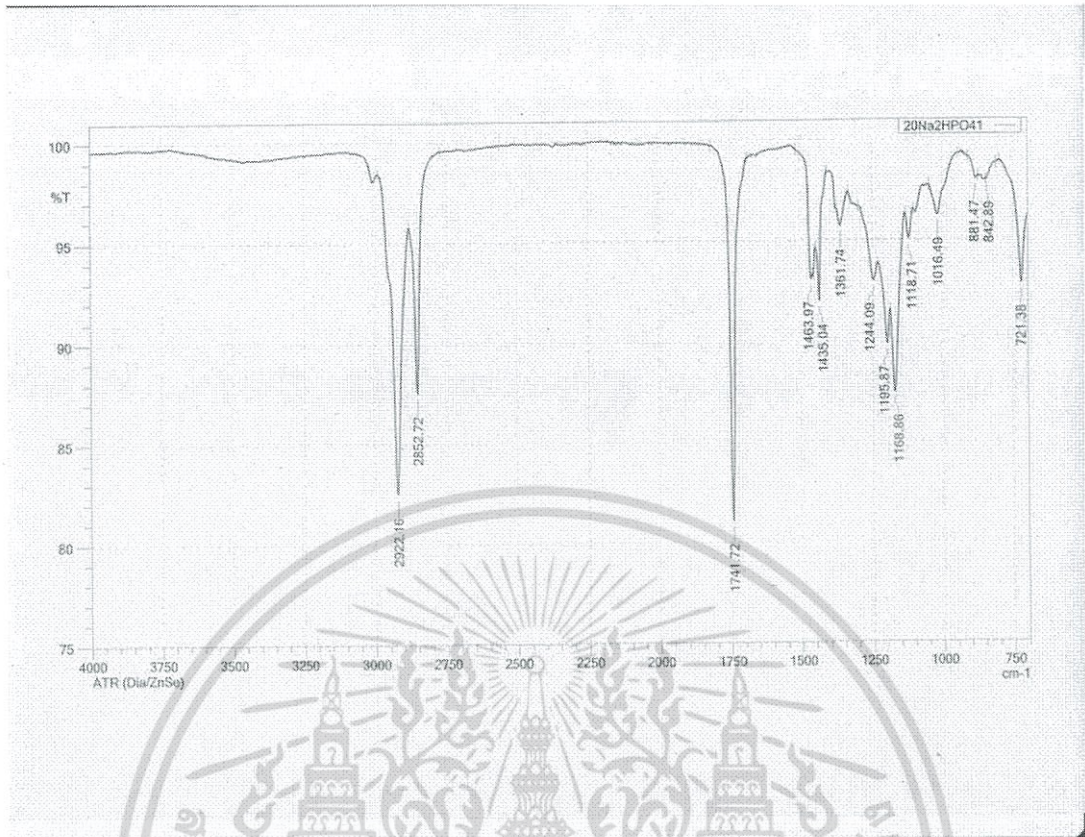
FT-IR สเปกตรัมของน้ำมันปาล์มก่อนทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน และเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 20% $\text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ และ 20% $\text{Na}_2\text{HPO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ ซึ่งทำการตรวจวัดด้วยเครื่องฟูเรียทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แสดงดังรูปที่ 4.13 - 4.15 ตามลำดับ



รูปที่ 4.14 FT-IR สเปกตรัมของน้ำมันปาล์มจากเครื่องฟูเรียทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เอกสารนี้ขึ้นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 FT-IR สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 20% $\text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 9:1 เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.16 FT-IR สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 20% $\text{Na}_2\text{HPO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 9:1 เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.14 - 4.16 แสดงหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันปาล์มและเมทิลเอสเทอร์ที่ดูดกลืนแสงที่เลขคลื่นต่างๆ สรุปได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันปาล์มและเมทิลเอสเทอร์ที่การดูดกลืนแสงที่เลขคลื่นต่างๆ [29]

เลขคลื่น (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
1375	Alkane	C-H bending for CH_3
1300-1200	Ester	C-O stretching
1250, 1100	Ester	C-O-C ester
~700-690	cis-Alkene	C-H (OOP bending)

หมายเหตุ: OOP = out - of - plane (การสั่นออกนอกระนาบ)

จากรูปที่ 4.13 - 4.15 จะเห็นว่า อินฟราเรดสเปกตรัมของน้ำมันปาล์มและเมทิลเอสเทอร์มีลักษณะใกล้เคียงกัน เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกัน ดังสรุปไว้ในตารางที่ 4.8 เพื่อให้การวิเคราะห์มีความละเอียดและถูกต้องมากขึ้น น้ำมันปาล์มและเมทิลเอสเทอร์จะถูกนำไปตรวจสอบด้วยเทคนิค FT-NMR ต่อไป

สำหรับ FT-IR สเปกตรัมของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกลือฟอสเฟตบนอะลูมินาที่ปริมาณเกลือฟอสเฟต 10%, 15% และ 30% แสดงไว้ในภาคผนวก

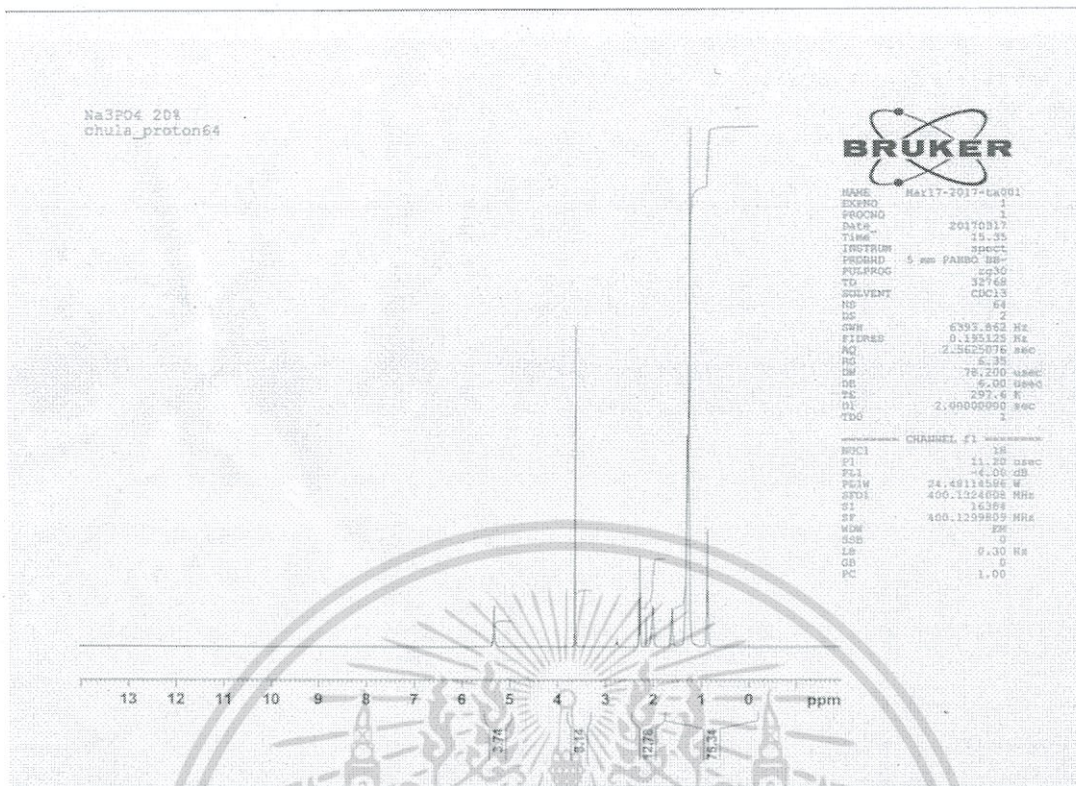
4.3.2 ลักษณะทางเคมีของไบโอดีเซล โดยใช้เครื่องฟูเรียทรานสฟอร์มนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier-Transform Nuclear Magnetic Resonance Spectrophotometer, FT-NMR)

น้ำมันปาล์มและเมทิลเอสเทอร์จะถูกนำมาวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีด้วยเทคนิค FT-NMR ซึ่งแสดงสเปกตรัมดังรูปที่ 4.16 - 4.18



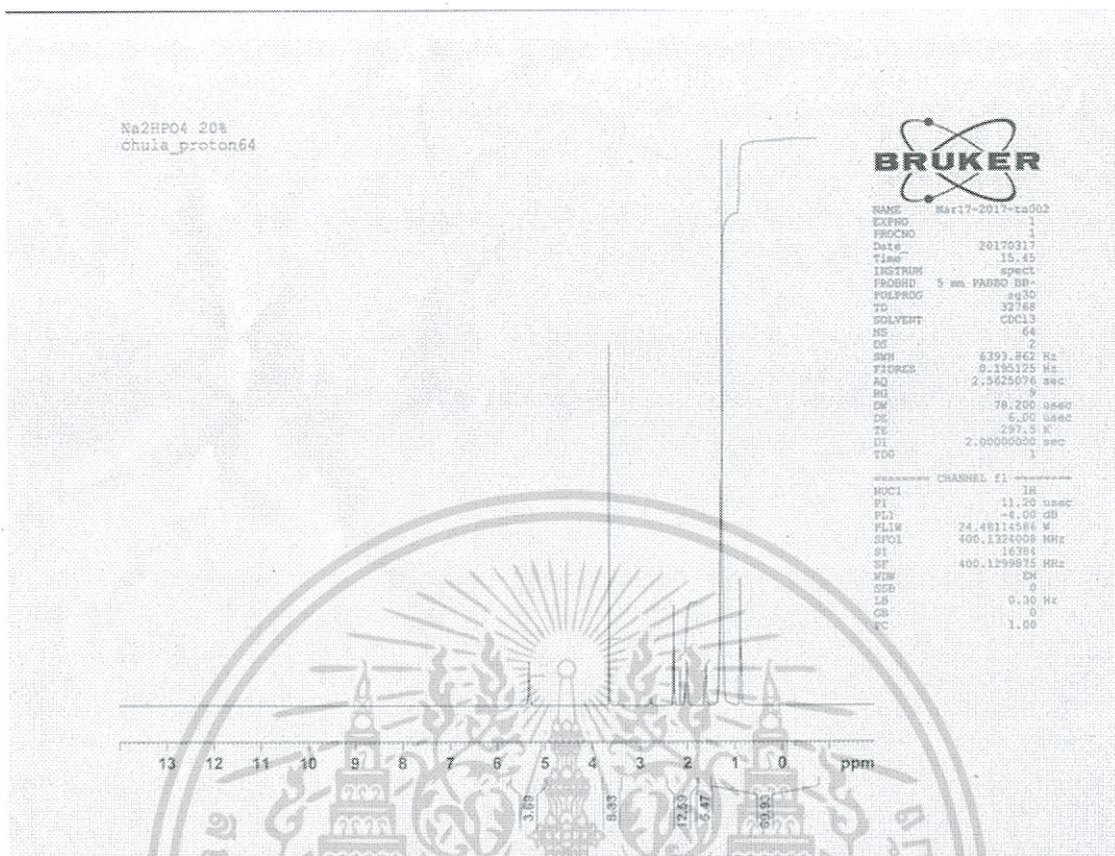
รูปที่ 4.17 FT-NMR สเปกตรัมของน้ำมันปาล์มจากเครื่องฟูเรียทรานสฟอร์มนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

จากรูปที่ 4.17 เป็น FT-NMR สเปกตรัมของน้ำมันปาล์มก่อนทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งพบ $^1\text{H-NMR}$ สเปกตรัมของเมทิลโปรตอน ($\text{CH}_3\text{-C-}$) และ เมทิลีนโปรตอน ($\text{-C-CH}_2\text{-C-}$) ที่ δ 0.85-0.88 และ 1.25-1.30 ppm, สเปกตรัมของ $\text{-CH}_2\text{-C-COO-C-}$ ที่ δ 1.61 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, สเปกตรัมของ $\text{-C=C-CH}_2\text{-C=C-}$ ที่ δ 2.74-2.76 ppm, สเปกตรัมของ $\text{-CH}_2\text{-OOC-R}$ และ -CH-OOC-R ที่ δ 4.11-4.17 และ 4.27-4.32 ppm, สเปกตรัมของ -CH=CH- ที่ δ 5.26-5.35 ppm



รูปที่ 4.18 FT-NMR สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 20% Na₃PO₄/Al₂O₃ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 9:1 เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 FT-NMR สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 20% Na₂HPO₄/Al₂O₃ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 9:1 เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.17 และ 4.19 เมื่อนำน้ำมันปาล์มมาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันกับเมทานอล โดยใช้ 20% Na₃PO₄/Al₂O₃ และ 20% Na₂HPO₄/Al₂O₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาตามลำดับ จะพบว่าตำแหน่งโปรตอนของ -CH₂-OOC-R และ -CH-OOC-R ในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ที่ δ4.11-4.17 และ 4.27-4.32 ppm หายไปเกิดเป็นตำแหน่งโปรตอนของ -R-COO-CH₃ ในโมเลกุลของเมทิลเอสเทอร์ขึ้นมาแทนที่ δ3.66 ppm

4.3.3 การทดสอบค่าความเป็นกรดและเลขไอโอดีนของเมทิลเอสเทอร์

เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเกลือฟอสเฟตบนอะลูมินา ที่ร้อยละของฟอสเฟตต่างๆจะถูกนำมาทดสอบเลขไอโอดีนและค่าความเป็นกรด ซึ่งผลที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานเกณฑ์ที่กฎหมายกำหนดโดยกล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.8 ค่าความเป็นกรดและเลขไอโอดีนของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากสภาวะต่างๆ

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ค่าความเป็นกรด (mgKOH/g)	เกณฑ์มาตรฐานของค่าความเป็นกรด		เลขไอโอดีน (g Iodine /100g)
		ไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์	ไบโอดีเซลชุมชน	
10% Na ₃ PO ₄ /Al ₂ O ₃	0.2236	ผ่าน	ผ่าน	12.065
15% Na ₃ PO ₄ /Al ₂ O ₃	0.1831	ผ่าน	ผ่าน	10.922
20% Na ₃ PO ₄ /Al ₂ O ₃	0.2906	ผ่าน	ผ่าน	13.335
30% Na ₃ PO ₄ /Al ₂ O ₃	0.1453	ผ่าน	ผ่าน	11.557
10% Na ₂ HPO ₄ /Al ₂ O ₃	0.2227	ผ่าน	ผ่าน	10.668
15% Na ₂ HPO ₄ /Al ₂ O ₃	0.2789	ผ่าน	ผ่าน	8.509
20% Na ₂ HPO ₄ /Al ₂ O ₃	0.2745	ผ่าน	ผ่าน	11.938
30% Na ₂ HPO ₄ /Al ₂ O ₃	0.2930	ผ่าน	ผ่าน	10.795

จากตารางที่ 4.9 จะเห็นว่าเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากสภาวะต่างๆ มีค่าความเป็นกรดในช่วง 0.14 – 0.29 มิลลิกรัม KOH/กรัม และเลขไอโอดีนในช่วง 8.51 – 13.34 กรัมไอโอดีน/100 กรัม ซึ่งพบว่าค่าความเป็นกรดและเลขไอโอดีนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของไบโอดีเซล นั่นคือจะต้องมีค่าความเป็นกรดไม่สูงกว่า 0.5 มิลลิกรัม KOH /กรัม (ไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์) ค่าความเป็นกรดไม่สูงกว่า 0.8 มิลลิกรัม KOH ต่อกรัมน้ำมัน (ไบโอดีเซลชุมชน) และค่าเลขไอโอดีนไม่สูงเกิน 120 กรัมไอโอดีน/100 กรัม

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ฟอสเฟตบนอะลูมินาที่เตรียมได้ หลังจากการนำไปแคลไซน์แล้ว ควรเก็บรักษาในสภาวะปราศจากความชื้น หรือหลีกเลี่ยงการสัมผัสกับอากาศ เนื่องจากการรวมตัวของตัวเร่งปฏิกิริยากับความชื้น จะส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสูญเสียความว่องไวในการทำปฏิกิริยา

2. สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน สารตั้งต้นสองชนิดที่ใช้มีคุณสมบัติการละลายที่ต่างกัน ประกอบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองเป็นของแข็ง ทำให้เมื่อตั้งทิ้งไว้จะเกิดการแยกตัวทางกายภาพอย่างชัดเจน ซึ่งหากไม่มีการทำให้เกิดการผสมกันด้วยการปั่นกวนอย่างเพียงพอ ปฏิกิริยาก็ไม่สามารถดำเนินไปและเกิดผลิตภัณฑ์ได้ ความเร็วรอบในการปั่นกวนเป็นอีกปัจจัยหนึ่งในการเพิ่มผลผลิตของเมทิลเอสเทอร์จากปฏิกิริยา ดังนั้นควรทำการศึกษาถึงความเร็วรอบในการปั่นกวน พร้อมทั้งศึกษาเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อใช้งานในสภาวะที่รุนแรง ส่งผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์อย่างไร

3. คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ได้แก่เลขไอโอดีน และค่าความเป็นกรดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ควรทำการทดสอบสมบัติอื่นๆตามมาตรฐานอุตสาหกรรมเช่นความหนืด จุดวาบไฟ ค่าความร้อน เพื่อตรวจสอบว่าเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้มีสมบัติทางเชื้อเพลิงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของไบโอดีเซลหรือไม่

4. ควรนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ไปวิเคราะห์ค่าความเป็นเบสด้วยเทคนิคโปรแกรมอุณหภูมิเพื่อทดสอบการคายซับ (Temperature – programmed desorption , TPD)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Hobson, G.D. "Modern Petroleum Technonology Part 2". 5th ed. New York: John Wiley & Sons (1984) 821-823.
- [2] บริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน).ปตท. ลงนาม MOU พัฒนาไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ร่วมกับทักษิณ ปาล์มไบโอเอ็นเนอียพลัส. [Online]. Available: <http://www.thaipr.net/general/111071>
- [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] Kusdia, D. and Saka, Sh. "Effects of Water on Biodiesel Fuel Production by Supercritical Methanol Treatment". Journal of Bioresource Technology 91 (2004) 289-295.
- [6] Thinnakorn, K. and Tscheikuna, J. "Transesterification of plam olein using sodium phosphate impregnated on an alumina support". Applied Catalysis A: General 484 (2014) 122-133.
- [7] Jiang, S.T. ,Zhang, F.T. and Pan, L.J. "Sodium phosphate as a solid catalyst for biodiesel preparation". Brazillian Journal of Chemical Engineering 27(2010) 137-144.
- [8] Tyson, K.S. "Biodiesel Handling and Use Guidelines". National Renewable Energy Laboratory. U.S. Department of Energy (2004): 17-18.
- [9] Ma, F. and Hanna, M.A. "Biodiesel Production: A Review". Bioresource Technology 70 (1999)1-15.
- [10] SRS International. Tranesterification. [Online].Available: <http://www.srsbiodiesel.com/technologies/transesterification/>
- [11] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. เทคนิคการผลิตไบโอดีเซลให้ได้คุณภาพ. [Online]. Available: <http://www2.dede.go.th/bett/Activities/KM/BioDiesel%20Manual.pdf>
- [12] Chakrit Tongurai. PSU ไบโอดีเซล 9: ทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน [Online]. Available: <http://share.psu.ac.th/blog/eng-biodiesel/21132>
- [13] Schuchardt Ulf., R. Sercheli , and R.M. Vargas. Transesterification of Vegetable Oils: aReview. J. Braz. Chem. Soc. (1998), Vol. 9, No. 1: 199-210.
- [14] Weiliang, C., Hengwen, H. and Jingchang, Z. "Preparation of biodiesel from soybean oil using supercritical methanol and co-solvet". Fuel 84 (2005) 347-351.
- [15] Ayhan, D. "Biodiesel fules from vegetable oils via catalytic and non-catalytic supercritical alcohol transesterifications and other methods: a survey". Energy Conversion and Management 44 (2003) 2093-2098.

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนที่อื่นใดที่ปรากฏบนนั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] จตุพร วิทยาคุณ และ นุรักษ์ กฤษดาบุรุษ. การเร่งปฏิกิริยา พื้นฐานและการประยุกต์. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. 2547.
- [17] กษิตศ วิรุจน์, ณัฐธิดา รัตนกำเนิดและณิชยา พลอยนุช. การใช้โลหะแอลคาไลน์บนแคลเซียม ออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล. ปรินญา นิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต, สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (2553)
- [18] ศูนย์ข้อมูลสัตว์อันตรายและเคมีภัณฑ์ กรมควบคุมมลพิษ. โซเดียมฟอสเฟต กับโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต.[Online]. Available: <http://gammaco.com/gammaco/th/3097160>
- [19] ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน. กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2550 [Online]. Available: <http://www.dede.go.th/dede/index.php?id=351>
- [20] สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. ข้อดี ข้อด้อยของไบโอดีเซล.[Online]. Available: http://www.biodiesel.eng.psu.ac.th/adv_disadv.php
- [21] คณะวิชาสัตวศาสตร์: วิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีกาญจนบุรี. ไบโอดีเซลจากน้ำมันปรุงอาหารที่ใช้แล้ว.[Online]. Available: <http://www.riverkwai.co.th/kaset/bio.html>
- [22] S.L. Dmytryshyn, A.K. Datal, S.T. Chaudhari, H.K. Mishra and M.J. Reaney. "Synthesis and characterization of vegetable oil derived ester: evaluation for their diesel additive properties". Bioresource Technology 92 (2004) 55-64.
- [23] X.Wenlei and L. Haiitao, "Alumina-supported potassium iodide as a heterogeneous catalyst for biodiesel production from soybean oil". Journal of Molecular Catalysis A: Chemical 255 (2006) 1-9.
- [24] H.J. Kim, B.S. Kang, M.J. Kim, Y.M. Park, D.K. Kim, J.S. Lee and K.Y. Lee. "Transesterification of vegetable oil to biodiesel using heterogeneous base catalyst". Catalysis Today 93-95 (2004) 315-320.
- [25] วณัญญา สวงโท, ศศริธร สกลหลักและหนึ่งฤทัย นาพรม. การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เกลือโพแทสเซียมบนอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา. ปรินญา นิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรมคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (2557).
- [26] เกตนันนิภา วันชัย และเพชรไพลิน ปรางนาง. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้ $KI/CaO/Al_2O_3$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 23 (2558) 1-9.
- [27] นิดา เตชาติวงศ์ ณ อยุธยา และไพศาล คงคาอุยฉาย. การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำโดยใช้โพแทสเซียมไนเตรดบนอะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา. [Online]. Available:www.lib.ku.ac.th>KUCONF>data51

- [28] M. Verziu, M. Florea, S. Simon, V. Simon, P. Filib, V.I. Parvulescu, and C. Hardacre. “Tranesterification of Vegetable Oils on basic Large Mesoporous Alumina Supported Alkaline Fluorides-Evidences of The Nature of The Active Site and Catalytic Performance”. *Journal of Catalysis* 263 (2009) 56-66.
- [29] Infrared Spectra and Characteristic Frequencies of Inorganic Ions [Online]. Available: https://chem.libretexts.org/Core/Physical_and_Theoretical_Chemistry/Spectroscopy/Vibrational_Spectroscopy/Infrared_Spectroscopy/Infrared%3A_Interpretation
- [30] O. Ilgen and A.N. Akin. “Development of Alumina Supported Alkaline Catalyst Used for Biodiesel Production”. *Turk J Chem* 33 (2009) 281-287
- [31] GEOTHERMAL ENERGY. Exploration Technique: X-Ray Diffraction (XRD). [Online]. Available: [http://en.openei.org/wiki/X-Ray_Diffraction_\(XRD\)](http://en.openei.org/wiki/X-Ray_Diffraction_(XRD))
- [32] Northwestern University . SEM. [Online]. Available: <http://www.nuance.northwestern.edu/epic/instruments-epic/sem/>
- [33] Indian Institute of Technology. [Online]. Available: <https://www.iitk.ac.in/cese/Facilities/bet.php>
- [34] Yuruo Qi และคณะ. pH-regulative synthesis of $\text{Na}_3(\text{VPO}_4)_2\text{F}_3$ nanoflowers and their improved Na cycling stability. [Online]. Available: <http://pubs.rsc.org/-/content/articlelanding/2016/ta/c6ta01023g/unauth#divAbstract>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของเมทิลเอสเทอร์ (%yield methyl ester) จากไฮโดรเจนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกตรัม

ตัวอย่างการคำนวณ ที่สภาวะในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลใช้น้ำมันปาล์ม 100 กรัม ปริมาณของเกลือโพแทสเซียมบนตัวรองรับอะลูมินาร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มคงเท่ากับ 6:1โดยโมล เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของเมทิลเอสเทอร์ สามารถหาได้จากไฮโดรเจนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกตรัมในรูปที่ ก.1และสมการที่ (1)



รูปที่ ก.1 สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลจากเครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Y_{ME} = \frac{100 \times [2 \times \text{integration value of } -OCH_3]}{[3 \times \text{integration value of } \alpha-CH_2]} \quad (1)$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของเมทิลเอสเทอร์ (Y}_{ME}\text{)} &= 100 \times \frac{(2 \times 1.182)}{(3 \times 1.387)} \\ &= 56.81\% \end{aligned}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ตารางบันทึกผลร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ในสภาวะต่างๆ

ตารางที่ ข.1 ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

ชนิดของ ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	ปริมาณ K บนตัวเร่ง ปฏิกิริยา (wt.%)	อัตราส่วน โดยโมล เมทานอล ต่อน้ำมัน	ปริมาณ ตัวเร่ง ปฏิกิริยา (wt.%)	เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนัก น้ำมันที่ ซังได้ (g)	น้ำหนัก เมทิล เอสเทอร์ ที่ซังได้ (g)	%yield
Na ₃ PO ₄ / Al ₂ O ₃	10	9 : 1	1	2	50.07	40.4200	80.7270
	15				51.40	33.0000	64.2023
	20				50.33	43.8099	87.0453
	30				50.14	29.3158	58.4679
Na ₂ HPO ₄ /Al ₂ O ₃	10	9 : 1	1	2	50.15	34.7126	69.2175
	15				50.25	38.3296	76.2778
	20				51.04	42.9722	84.1932
	30				50.83	37.2026	73.1902

ตารางที่ ข.2 อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณ K บนตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักน้ำมันที่ซั่งได้ (g)	น้ำหนักเมทิลเอสเทอร์ที่ซั่งได้ (g)	%yield
$\text{Na}_3\text{PO}_4 / \text{Al}_2\text{O}_3$	20	6:1	1	2	50.05	36.0820	72.0919
		9:1			50.33	43.8099	87.0453
		12:1			50.04	39.0631	78.0637
$\text{Na}_2\text{HPO}_4 / \text{Al}_2\text{O}_3$	20	6:1	1	2	50.07	24.8100	49.5506
		9:1			51.04	42.9722	84.1932
		12:1			50.16	27.6000	55.0239

ตารางที่ ข.3 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณ K บนตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักน้ำมันที่ซั่งได้ (g)	น้ำหนักเมทิลเอสเทอร์ที่ซั่งได้ (g)	%yield
$\text{Na}_3\text{PO}_4 / \text{Al}_2\text{O}_3$	20	9 : 1	0.5	2	50.07	31.0200	61.9533
			1		50.33	43.8099	87.0453
			2		50.25	31.3600	62.4080
			3		50.32	27.3700	54.3919
$\text{Na}_2\text{HPO}_4 / \text{Al}_2\text{O}_3$	20	9 : 1	0.5	2	50.12	29.3700	58.5994
			1		51.04	42.9772	84.1932
			2		50.70	29.9800	59.1321
			3		50.34	24.8400	49.3445

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณ K บนตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักน้ำมันที่ซั่งได้ (g)	น้ำหนักเมทิลเอสเทอร์ที่ซั่งได้ (g)	%yield
Na ₃ PO ₄ / Al ₂ O ₃	20	9 : 1	1	1	50.07	28.07	55.82
				2	50.33	43.81	87.05
				3	50.25	30.94	61.51
				4	50.32	29.87	59.40
Na ₂ HPO ₄ / Al ₂ O ₃	20	9 : 1	1	1	50.12	40.14	79.94
				2	51.04	42.97	84.19
				3	50.70	33.80	67.59
				4	50.34	28.52	56.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 การนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ใหม่ในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณ K บนตัวเร่งปฏิกิริยา	อัตราส่วนโดยโมล เมทานอลต่อน้ำมัน	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	เวลา (ชั่วโมง)	นำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ใหม่	เผา/ไม่เผาตัวเร่งปฏิกิริยา	น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาที่ซั้งได้ (g)	น้ำหนักน้ำมันที่ซั้งได้ (g)	น้ำหนักเมทิลเอสเทอร์ที่ซั้งได้ (g)	%yield
Na ₃ PO ₄ / Al ₂ O ₃	20	9 :1	0.5	2	1		0.2551	27.01	18.2800	67.6786
					2	เผา	0.1169	11.85	5.2500	44.3038
					3		0.0561	5.84	1.0000	17.1233
Na ₃ PO ₄ / Al ₂ O ₃	20	9 :1	0.5	2	1		0.2678	26.96	15.2280	56.4837
					2	ไม่ เผา	0.1517	15.27	5.7800	37.8520
					3		0.101	5.05	0.5472	10.8356

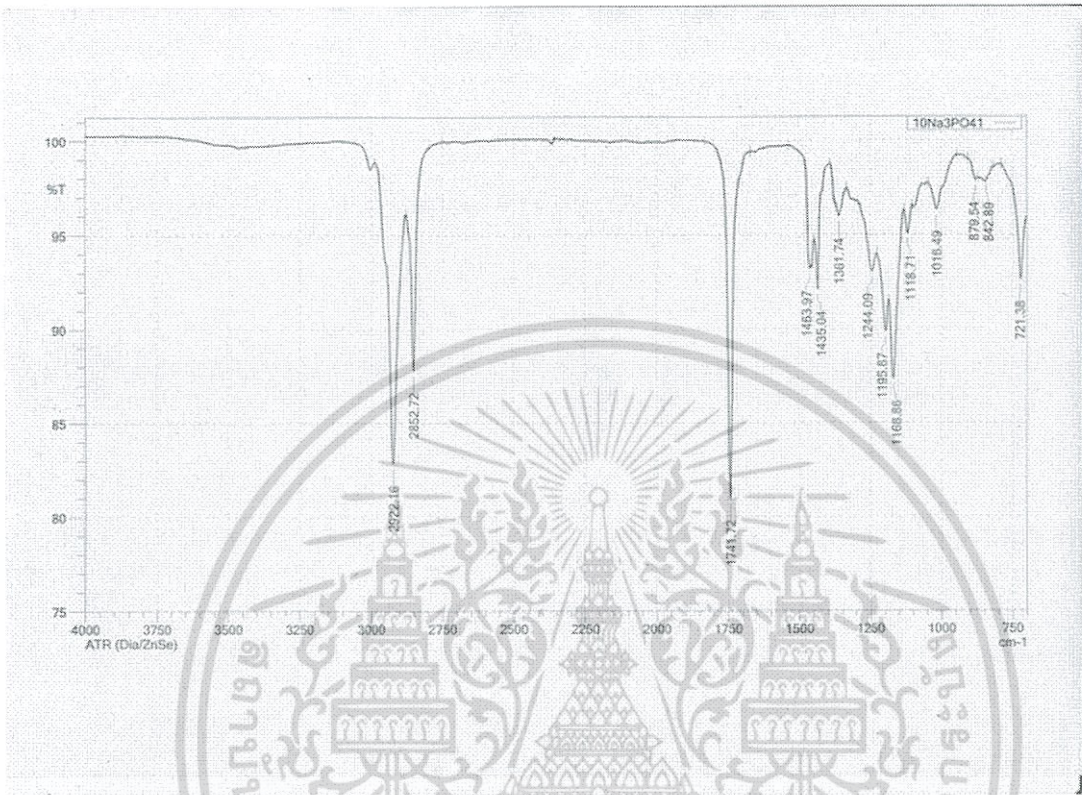
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.6 ค่าความเป็นกรดและเลขไอโอดีนของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากสภาวะต่างๆ

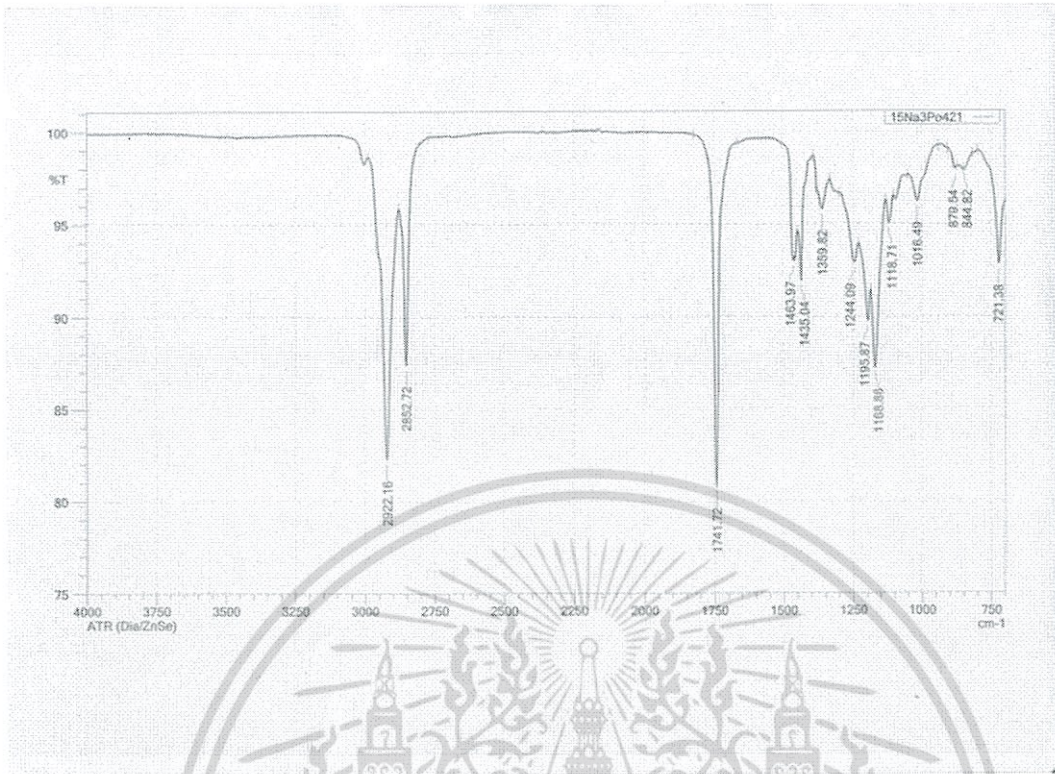
ชนิดของ ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	ร้อยละของ เกลือ ฟอสเฟตบน อะลูมินา (wt%)	อัตราส่วน โดยโมล เมทานอล ต่อน้ำมัน	เวลาที่ใช้ ในการทำ ปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ปริมาณ ตัวเร่ง ปฏิกิริยาที่ ใช้ในการ ทำ ปฏิกิริยา (wt%)	ค่า ความ เป็นกรด (mg KOH/g)	เลขไอโอดีน (g Iodine /100g)
Na ₃ PO ₄ / Al ₂ O ₃	10	9:1	2	1	2	0.2236
	15				1.7	0.1831
	20				2.6	0.2906
	30				1.3	0.1453
Na ₂ HPO ₄ / Al ₂ O ₃	10	9:1	2	1	2	0.2227
	15				2.5	0.2789
	20				2.5	0.2745
	30				2.7	0.2930

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

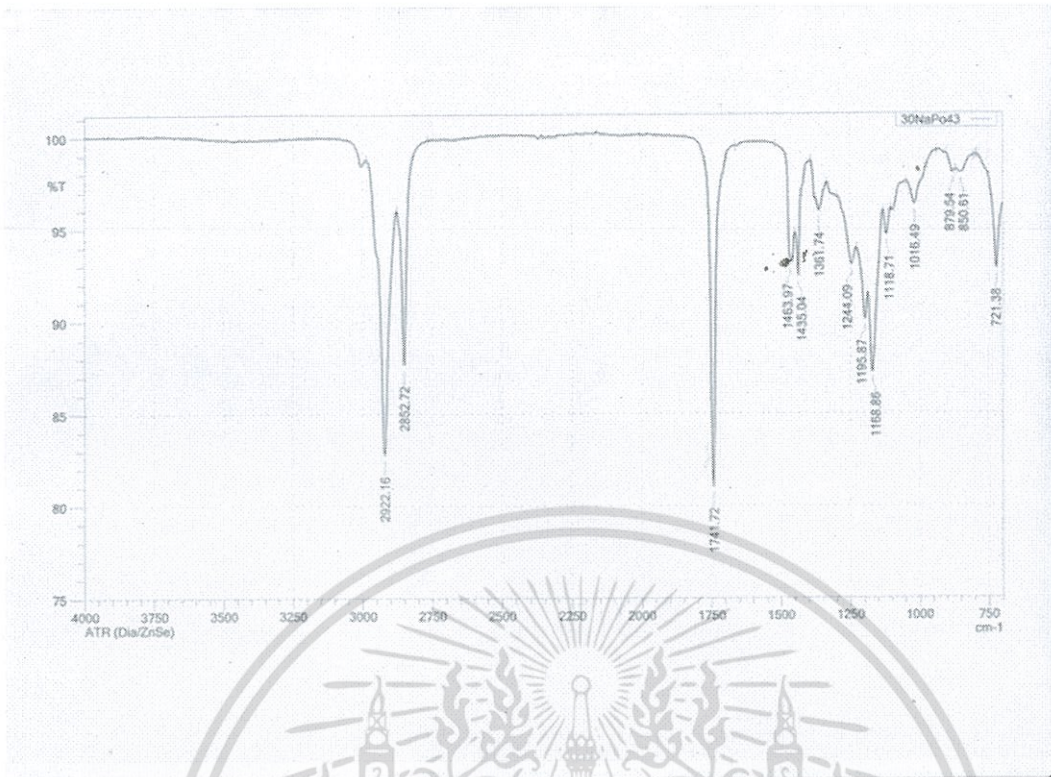
ภาคผนวก ค



รูปที่ ค.1 FT-IR สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 10% $\text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มคงเท่ากับ 9:1 โดยโมล เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก



รูปที่ ค.2 FT-IR สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 15% $\text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 9:1 เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก



รูปที่ ค.3 FT-IR สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 30% $\text{Na}_3\text{PO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 9:1 เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

