

การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  
ทังสเทนออกไซด์บนทินออกไซด์

Synthesis of Biodiesel from Palm Oil using  
Tungsten Oxide Supported Tin Oxide as a Catalyst



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ( เคมีอุตสาหกรรม )  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  
ทังสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์

Synthesis of Biodiesel from Palm Oil using  
Tungsten Oxide Supported Tin Oxide as a Catalyst



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 149492  
วันเดือนปี ๘ ส.ค. 2561

b. 12883943  
i. ....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Synthesis of Biodiesel from Palm Oil using  
Tungsten Oxide Supported Tin Oxide as a Catalyst



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนออกไซด์  
บนทินออกไซด์

Synthesis of Biodiesel from Palm Oil using Tungsten Oxide  
Supported Tin Oxide as a Catalyst

ชื่อนักศึกษา นายรัชพล เกตุคง รหัสนักศึกษา 56050581  
นางสาวทันทยา พรหมวิสุทธิคุณ รหัสนักศึกษา 56050587  
นางสาวสุ่มชญา เสียงใส รหัสนักศึกษา 56050637



ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2559

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล

คณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตร (เคมีอุตสาหกรรม)  
ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. มন্ত্রী ทองคำ ประธานกรรมการ	
ดร. การุณย์ สาดอ่อน กรรมการ	
ดร. อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>หัวข้อโครงการพิเศษ</b>	การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเทนออกไซด์บนทินออกไซด์		
	Synthesis of Biodiesel from Palm Oil using Tungsten Oxide Supported Tin Oxide as a Catalyst		
<b>ชื่อนักศึกษา</b>	นายรัชพล เกตุคง	รหัสนักศึกษา	56050581
	นางสาวทันยา พรหมวิสุทธิคุณ	รหัสนักศึกษา	56050587
	นางสาวสุ่มชญา เสี่ยงใส	รหัสนักศึกษา	56050637
<b>ปริญญา</b>	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
<b>ภาควิชา</b>	เคมี		
<b>คณะ</b>	วิทยาศาสตร์		
<b>มหาวิทยาลัย</b>	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
<b>ปีการศึกษา</b>	2559		
<b>อาจารย์ที่ปรึกษา</b>	ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล		

#### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ไบโอดีเซลหรือเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มและเมทานอลผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยใช้ทังสเทนออกไซด์บนตัวรองรับทินออกไซด์ ( $WO_3/SnO_2$ ) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวีวทัศน์ชนิดกรด โดยงานวิจัยนี้จะศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการเอ็บซุ่มของทินออกไซด์และโซเดียมทังสเตดไดไฮดรต โดยใช้ร้อยละของทังสเทนบนทินออกไซด์ 5-40 โดยน้ำหนัก แล้วนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมแล้วไปพิสูจน์เอกลักษณ์ต่างๆ นอกจากนี้ยังศึกษาผลของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ ได้แก่ ปริมาณทังสเทนออกไซด์บนทินออกไซด์ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา เวลาในการทำปฏิกิริยา และความสามารถในการกลับมาใช้ใหม่ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้น จากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่ใช้ร้อยละของทังสเทนออกไซด์ 30 โดยน้ำหนักบนทินออกไซด์ซึ่งถูกเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 12:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 150 องศาเซลเซียส เป็นสภาวะที่ทำให้ร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเทอร์สูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 63.80 และจากการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเทนออกไซด์บนทินออกไซด์กลับมาใช้ซ้ำ พบว่าร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ลดลง เมื่อเพิ่มจำนวนในการใช้ซ้ำ

**คำสำคัญ :** ตัวเร่งปฏิกิริยาวีวทัศน์ชนิดกรด ไบโอดีเซล ทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน ทังสเทนออกไซด์  
ทินออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Synthesis of Biodiesel from Palm Oil using Tungsten Oxide Supported Tin Oxide as a Catalyst		
<b>Students</b>	Mr.Ratchopon Ketkong	Student ID 56050581	
	Ms.Watanya Promwisuttikun	Student ID 56050587	
	Ms.Sumachaya Siangsai	Student ID 56050638	
<b>Degree</b>	Bachelor of science (Industrial Chemistry)		
<b>Department</b>	Chemistry		
<b>Faculty</b>	Science		
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
<b>Academic Year</b>	2016		
<b>Advisor</b>	Dr. Amnat Permsubscul		

### Abstract

This special project aimed to study the optimum condition for biodiesel synthesis from palm oil with methanol via transesterification reaction using tungsten oxide supported on tin oxide ( $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$ ) as a heterogeneous acid catalyst, with  $\text{WO}_3$  loading ranging from 5 to 40 wt%, has been prepared by impregnation with sodium tungstate dihydrate ( $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) on tin oxide. The optimum catalyst characterizations were investigated and the effects of reaction conditions e.g., the amount of  $\text{WO}_3$  loading on  $\text{SnO}_2$ , calcination temperature, molar ratios of methanol to palm oil, the amount of catalyst in the reaction, reaction temperature, reaction time, and reusability of the catalyst were also studied. The catalyst with 30wt%  $\text{WO}_3$  loading and calcined at a temperature of  $800^\circ\text{C}$ , shown the best catalytic activity. The maximum conversion to FAME of 63.80% was achieved after 2 h at  $150^\circ\text{C}$  when 12:1 molar ratio of methanol to palm oil and 2 wt% of catalyst were employed. The reusability of the solid catalyst was found that the conversion of FAME decreased when enhancing the number of reuse.

**Keyword :** Heterogeneous acid catalyst, Biodiesel, Transesterification, Tungsten oxide, Tin oxide.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยความกรุณาจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล ที่ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทาง และตรวจทานแก้ไขโครงการฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ และ ดร.การุณย์ สาดอ่อน กรรมการสอบโครงการพิเศษที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ข้อชี้แนะ และตรวจสอบข้อมูลต่างๆ ในโครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความถูกต้อง

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ให้ความรู้และคำแนะนำ

ขอขอบพระคุณ คุณวัชร สิริพิพัฒนกุล นักวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ขอขอบพระคุณ คุณสุภัทร บานเย็น นักวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ให้ความช่วยเหลือในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี

ขอขอบพระคุณ คุณพีรพัฒน์ ไกรวัฒนวงศ์ นักวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารด้วยเครื่องวิเคราะห์หาปริมาณพื้นที่ผิว และพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีของเมทิลเอสเทอร์ด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์

ขอขอบพระคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) ที่ให้ความช่วยเหลือในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในด้านอุปกรณ์และสารเคมี

ขอขอบพระคุณ ครอบครัวอันเป็นที่รักสำหรับกำลังใจที่มีให้เสมอมา

ขอขอบพระคุณ เพื่อนๆ และพี่ๆ ที่คอยช่วยเหลือและกำลังใจที่มีให้เสมอมา

รัชพล เกตุคง

วทันยา พรหมวิสุทธิคุณ

สุ่มชญา เสียงใส

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
1.5 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน.....	5
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....</b>	<b>6</b>
2.1 ไบโอดีเซล .....	6
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันพืช.....	7
2.3 ปาล์มน้ำมัน.....	8
2.3.1 การสกัดน้ำมันปาล์ม.....	10
2.4 ปฏิกริยาที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ไบโอดีเซล .....	11
2.4.1 การนำมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลโดยตรงและการผสม (Direct use and Blending).....	11
2.4.2 ไมโครอิมัลชัน (Microemulsion) .....	11
2.4.3 กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อน (Thermal Cracking or Pyrolysis) .....	11
2.4.4 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน .....	12
2.4.4.1 การทำปฏิกริยาโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกริยา.....	13
2.4.4.2 การทำปฏิกริยาโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกริยา .....	14
2.4.4.3 การทำปฏิกริยาในเหนื่อวิกฤตของเมทานอล .....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.4.4 การทำปฏิกิริยาโดยใช้เอนไซม์ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา .....	17
2.4.4.5 การทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์.....	17
2.5 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา .....	17
2.5.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous Catalyst) .....	17
2.5.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalyst) .....	18
2.5.3 ทินออกไซด์ (Tin(IV) Oxide) .....	19
2.5.4 ทังสเทนออกไซด์ (Tungsten(VI) oxide).....	19
2.6 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	20
2.6.1 การเตรียมตัวเร่งกลุ่มออกไซด์ .....	20
2.6.2 การเตรียมออกไซด์ผสม.....	20
2.6.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการวางองค์ประกอบกัมมันต์บนตัวรองรับ .....	20
2.6.3.1 การตกตะกอน .....	20
2.6.3.2 การดูดซับ .....	21
2.6.3.3 การแลกเปลี่ยนไอออน.....	22
2.6.3.4 การทำให้เอ็บซุ่ม (Impregnation).....	22
2.6.4 การเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาให้อยู่ในรูปที่ว่องไว.....	23
2.7 สมบัติทางด้านเชื้อเพลิงที่สำคัญของไบโอดีเซล .....	23
2.7.1 ค่าความร้อน (Heating value) .....	23
2.7.2 จุดวาบไฟ (Flash point) .....	23
2.7.3 ค่าความเป็นกรด (Acid value).....	23
2.7.4 เลขไอโอดีน (Iodine value) .....	23
2.7.5 ความหนืด (Viscosity).....	24
2.8 ประโยชน์ของการใช้ไบโอดีเซล.....	24
2.8.1 ประโยชน์ของการใช้ไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ .....	24
2.8.2 ประโยชน์ของการใช้ไบโอดีเซลด้านสิ่งแวดล้อม .....	25
2.8.3 การใช้ไบโอดีเซลสามารถลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจกเพราะผลิตจากพืช .....	25
2.8.4 ประโยชน์ของการใช้ไบโอดีเซลด้านสมรรถนะเครื่องยนต์.....	25

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8.5 ประโยชน์ของการใช้ไบโอดีเซลด้านเศรษฐศาสตร์.....	25
2.8.6 ประโยชน์ของการใช้ไบโอดีเซลด้านการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงในประเทศ.....	25
2.9 ผลกระทบของไบโอดีเซลที่มีต่อเครื่องยนต์ .....	26
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....</b>	<b>30</b>
3.1 สารเคมี .....	30
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ .....	30
3.3 วิธีการทดลอง.....	31
3.3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์.....	32
3.3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	32
3.3.3 การสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์.....	35
3.3.4 การทดสอบสมบัติทางเชื้อเพลิงและโครงสร้างทางเคมีของเมทิลเอสเทอร์.....	40
3.3.4.1 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (Acid value) .....	40
3.3.4.2 การวิเคราะห์หาเลขไอโอดีน (Iodine value) .....	41
3.3.4.3 การวิเคราะห์หาค่าความร้อน (Heating value).....	42
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง .....</b>	<b>44</b>
4.1 การศึกษาลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา .....	44
4.1.1 โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	44
4.1.2 องค์ประกอบของธาตุบนตัวเร่งปฏิกิริยา .....	48
4.1.3 ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	49
4.1.4 พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	51
4.1.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีของเมทิลเอสเทอร์โดยใช้เครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR).....	51
4.2 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.1 ผลของปริมาณทั้งสแตนออกไซด์บนตัวรองรับทินออกไซด์ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์.....	53
4.2.2 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา $WO_3/SnO_2$ ที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์.....	56
4.2.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์.....	58
4.2.4 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์.....	60
4.2.5 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์.....	61
4.2.6 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์.....	63
4.2.7 การศึกษาเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการนำกลับมาใช้ใหม่.....	64
4.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีและทดสอบสมบัติของเมทิลเอสเทอร์ .....	65
4.3.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีของเมทิลเอสเทอร์โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม-อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR).....	65
4.3.2 ลักษณะทางเคมีของไบโอดีเซล วิเคราะห์โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier-Transform Nuclear Magnetic Resonance Spectrophotometer, FT-NMR).....	69
4.3.3 การทดสอบค่าความเป็นกรด เลขไอโอดีนและค่าความร้อนของเมทิลเอสเทอร์ .....	72
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	73
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	73
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	74
เอกสารอ้างอิง .....	75
ภาคผนวก.....	79
ภาคผนวก ก การคำนวณหาร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยน้ำหนัก .....	80
ภาคผนวก ข การคำนวณหาขนาดของผลึกทินออกไซด์ ( $SnO_2$ ) และตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์ ( $WO_3/SnO_2$ ).....	82
ภาคผนวก ค ตารางบันทึกผลร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ในสภาวะต่างๆ.....	85
ภาคผนวก ง FT-IR สเปกตรัมของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์.....	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล .....	6
2.2 คุณสมบัติและองค์ประกอบหลักกรดไขมันหลักของน้ำมันพืชต่างๆ .....	8
2.3 สมบัติของไหลภาวะเหนือวิกฤตเปรียบเทียบกับแก๊สและของเหลว .....	15
2.4 ประเภทปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน.....	17
2.5 การเปรียบเทียบปัจจัยต่างๆในการเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์และวิวิธพันธ์.....	18
2.6 คุณสมบัติมาตรฐานของไบโอดีเซล.....	24
2.7 การเปรียบเทียบผลการใช้ไบโอดีเซล 100% (B100) และน้ำมันดีเซลซึ่งผสมด้วยไบโอดีเซล20% (B20).....	26
3.1 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา $WO_3/SnO_2$ ที่ทำการเตรียมและอุณหภูมิที่ทำการเผา.....	32
3.2 ตัวแปรในการศึกษาผลของปริมาณทั้งสเตนออกไซด์บนทินออกไซด์ที่มีผลต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์.....	37
3.3 ตัวแปรในการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ทั้งสเตนออกไซด์บนทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา .....	38
3.4 ตัวแปรในการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ทั้งสเตนออกไซด์บนทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	38
3.5 ตัวแปรในการศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ทั้งสเตนออกไซด์บนทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	38
3.6 ตัวแปรในการศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ทั้งสเตนออกไซด์บนทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	39
3.7 ตัวแปรในการศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ทั้งสเตนออกไซด์บนทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	39
3.8 ตัวแปรในการศึกษาเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการนำกลับมาใช้ใหม่ .....	39
4.1 สภาวะที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา $SnO_2$ และ $WO_3/SnO_2$ .....	44
4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุติดุกับธาตุทั้งสเตนบนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence Spectroscopy) .....	48
4.3 พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET .....	51
4.4 ตัวแปรในการศึกษาผลของปริมาณทั้งสเตนออกไซด์บนทินออกไซด์ที่มีต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์..	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.5 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ .....	57
4.6 ขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา 30wt% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub> ที่เผาด้วยอุณหภูมิต่างๆ (คำนวณจากรูปแบบ XRD).....	58
4.7 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	58
4.8 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา .....	60
4.9 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา .....	62
4.10 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา .....	63
4.11 ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อมีการนำตัวเร่งปฏิกิริยา WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub> กลับมาใช้ใหม่.....	64
4.12 หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันปาล์มและเมทิลเอสเทอร์ที่การดูดกลืนแสงที่เลขคลื่นต่างๆ.....	68
4.13 ค่าความเป็นกรด เลขไอโอดีน และค่าความร้อนของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากสถานะต่างๆ .....	72

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์.....	7
2.2 ผลปาล์มน้ำมัน.....	9
2.3 ปฏิกริยาการแตกสลายด้วยความร้อน.....	12
2.4 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน.....	12
2.5 กลไกการเกิดปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกริยากรด.....	13
2.6 กลไกการเกิดปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกริยาเบส.....	15
2.7 เฟสไดอะแกรมของของไหลเหนือภาวะวิกฤต.....	16
2.8 ขั้นตอนในการเตรียมตัวเร่งปฏิกริยาด้วยวิธีตกตะกอน.....	21
2.9 การเตรียมโดยวิธีการดูดซับและไอโซเทิร์มของการดูดซับของไอออนที่เป็นตัวเร่งปฏิกริยา.....	21
2.10 ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกริยาด้วยวิธีเอ็บซุ่ม.....	22
3.1 เครื่องการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD).....	33
3.2 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (XRF).....	33
3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	34
3.4 เครื่อง BET- Autosorb-1C Surface Area and Pore Size Analyzer.....	34
3.5 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR).....	34
3.6 เครื่อง Parr Reactor.....	35
3.7 การแยกชั้นของเมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอลในกรวยแยก.....	36
3.8 เมทิลเอสเทอร์ที่ผ่านการดูดน้ำด้วยโซเดียมซัลเฟตแอนไฮดรัส.....	37
3.9 เครื่องวิเคราะห์พลังงานความร้อน (Bomb Calorimeter).....	42
4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของทินออกไซด์ (SnO <sub>2</sub> ).....	45
4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ SnO <sub>2</sub> และ 30wt% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub> ที่อุณหภูมิการเผา 700, 800 และ 900 °C.....	46
4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ 10wt% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub> และ 30wt% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub> เผาที่อุณหภูมิ 800 °C.....	47
4.4 ลักษณะพื้นผิวของ SnO <sub>2</sub> และ WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub> ที่กำลังขยายต่างๆ.....	50
4.5 FT-IR สเปกตรัมของ SnO <sub>2</sub> และ 30wt% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub> เผาที่อุณหภูมิ 800 °C.....	52
4.6 ลักษณะพันธะที่เกิดขึ้นของ WO <sub>3</sub> กับ SnO <sub>2</sub> .....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ผลของปริมาณทั้งสแตนบนตัวรองรับทินออกไซด์ที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์.....	54
4.8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ SnO <sub>2</sub> เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา .....	54
4.9 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub> .....	55
4.10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของ SnO <sub>2</sub> , WO <sub>3</sub> และ 30wt% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub> .....	56
4.11 ผลของอุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์ที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์.....	57
4.12 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์ .....	59
4.13 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์ที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์.....	61
4.14 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์ .....	62
4.15 ผลของเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์ .....	63
4.16 ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อมีการนำตัวเร่งปฏิกิริยา WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub> กลับมาใช้ใหม่.....	65
4.17 FT-IR สเปกตรัมของน้ำมันปาล์มก่อนทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน.....	66
4.18 FT-IR สเปกตรัมของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 10wt% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub> ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 9:1 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150°C เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง.....	66
4.19 FT-IR สเปกตรัมของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 20wt% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub> ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 9:1 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150°C เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง.....	67
4.20 FT-IR สเปกตรัมของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 30wt% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub> ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 9:1 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150°C เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง.....	67
4.21 FT-IR สเปกตรัมของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 30wt% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub> ที่ถูกใช้ซ้ำครั้งที่ 1 อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 12:1 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150°C เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง.....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 FT-NMR สเปกตรัมของน้ำมันปาล์มจากเครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ .....	69
4.23 FT-NMR สเปกตรัมของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จาก 10wt% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub> ที่อัตราส่วนโดย โมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 9:1 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ทำ ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150 °C เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง .....	70
4.24 FT-NMR สเปกตรัมของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จาก 30wt% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub> ที่อัตราส่วนโดย โมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 12:1 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ทำ ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150 °C เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง .....	71



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากการเพิ่มขึ้นของประชากรอย่างรวดเร็วในประเทศที่กำลังพัฒนาทั่วโลก ส่งผลให้มีการลดลงของแหล่งสำรองเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ (Fossil fuel) และเกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมตามมา เช่น ภาวะโลกร้อน หรือความต้องการทางด้านพลังงานเพื่อใช้ในกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ เช่น การขนส่ง การผลิตสินค้าและบริการ ซึ่งมักใช้พลังงานจากแหล่งปิโตรเลียม นอกจากนี้ยังมีการใช้พลังงานจากถ่านหิน (Coal), พลังงานนิวเคลียร์ (Nuclear power), แก๊สธรรมชาติ (Natural gas), และไฟฟ้าพลังงานน้ำ (Hydroelectricity) เป็นต้น ตลอดจนปัญหาทางด้านสุขภาพของมนุษย์ที่มีความเกี่ยวข้องกับมลพิษที่เกิดจากเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ จึงทำให้มีการศึกษาและพัฒนาแหล่งพลังงานทางเลือกทดแทน (Renewable energy sources alternatives) [1]

เชื้อเพลิงชีวภาพ (Biofuel) จัดเป็นพลังงานทางเลือกหมุนเวียนที่สามารถฟื้นฟูหรือสร้างขึ้นใหม่ได้ ซึ่งไบโอดีเซล หรือ Fatty acid methyl ester (FAME) ที่ผลิตได้จากน้ำมันพืช สามารถนำมาทดแทนน้ำมันดีเซลที่ได้มาจากเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ได้ จึงเป็นทางเลือกในการแก้ปัญหาการลดลงของเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์และแก้ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากความสามารถในการหมุนเวียนมาใช้ใหม่และย่อยสลาย (Biodegradable) ได้ง่าย ไบโอดีเซลก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ), แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) ปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศน้อยมาก นอกจากนี้ไบโอดีเซลยังเป็นเชื้อเพลิงที่มีออกซิเจน (Oxygenated fuel) คือมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบมากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ การที่ไบโอดีเซลไม่มีกำมะถัน (S) จึงไม่ก่อให้เกิดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_x$ ) และทำให้ปริมาณเขม่าคาร์บอนน้อย ไม่ก่อให้เกิดการอุดตันของระบบไอเสีย ทำให้ช่วยยืดอายุการทำงานของเครื่องยนต์ได้อีกด้วย อีกหนึ่งประโยชน์ของไบโอดีเซลคือสามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal combustion engines) ได้เหมือนกับน้ำมันดีเซล โดยไม่ต้องดัดแปลงเครื่องยนต์ [2]

ในปีค.ศ.1882 ดร.รูดอล์ฟ ดีเซล (Rudolf Diesel) บิดาแห่งเครื่องยนต์ดีเซล เป็นคนแรกที่ได้ทำการทดลองใช้น้ำมันพืชในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด (Compression ignition engine) ในการทดลอง ดร.รูดอล์ฟได้ใช้น้ำมันถั่วลิสงในการทดลองกับเครื่องยนต์ แต่ในขณะนั้นราคาของน้ำมันปิโตรเลียมถูกและมีวิธีการที่เหมาะสมในการกลั่นน้ำมันดิบเพื่อให้ได้น้ำมันดีเซล น้ำมันพืชจึงไม่เป็นที่ยอมรับนัก นอกจากนี้การใช้น้ำมันพืชยังประสบปัญหาเรื่องการที่น้ำมันพืชมีความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้หัวฉีดน้ำมันเป็นฝอยได้ยาก เกิดเป็นอุปสรรคต่อการป้อนน้ำมันเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้และสันดาปไม่สมบูรณ์ อีกทั้งน้ำมันพืชมีคุณสมบัติที่ระเหยตัวกลายเป็นไอได้น้อยและช้ามากยิ่งขึ้นทำให้เกิดการจุดระเบิดได้ยากส่งผลให้เครื่องยนต์ติดยากและหลงเหลือคราบเขม่าที่เกาะที่หัวฉีด ผนังลูกสูบ แหวนและวาล์ว จากคุณสมบัติที่น้ำมันพืชมีความหนืดสูง และระเหยได้ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลนี้ทำให้เกิดความยุ่งยากเมื่อใช้น้ำมันพืชล้วนๆโดยตรงในเครื่องยนต์ แต่หลังจากปีค.ศ.1940 น้ำมันพืชได้ถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง

อีกครั้งในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 และได้มีการพัฒนาเรื่อยมาจนถึง ณ ปัจจุบันทั่วโลกประสบปัญหาด้านราคาน้ำมันปิโตรเลียมที่สูงขึ้นนับตั้งแต่ในปีค.ศ.1973 เป็นต้นมา ประกอบกับได้มีการพัฒนาและผลิตน้ำมันพืชในรูปไบโอดีเซลเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานกับเครื่องยนต์มากขึ้น ไบโอดีเซลจึงเป็นที่ยอมรับและได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางมากขึ้น [3]

กระทรวงพลังงานได้ดำเนินการส่งเสริมเชื้อเพลิงชีวภาพอย่างเป็นรูปธรรมตั้งแต่ปี พ.ศ.2547 ทั้งการอนุญาตให้ตั้งโรงงานผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ การเพิ่มสถานีบริการจำหน่ายเชื้อเพลิงชีวภาพ และประชาสัมพันธ์สร้างความเชื่อมั่นต่อเชื้อเพลิงชีวภาพ จนกระทั่งในปี พ.ศ.2551 เกิดวิกฤตการณ์พลังงานโลกทำให้ราคาน้ำมันดิบเพิ่มสูงขึ้นกว่า 150 เหรียญสหรัฐต่อบาร์เรล ส่งผลให้ความต้องการเชื้อเพลิงชีวภาพในประเทศเพิ่มขึ้นเพื่อทดแทนและลดการนำเข้าน้ำมันดิบ ทำให้มีการใช้ไบโอดีเซลเพิ่มจาก 0.80 ล้านลิตรต่อวัน เป็น 1.40 ล้านลิตรต่อวัน การใช้ไบโอดีเซลเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญอีกครั้งในปี พ.ศ.2554 เมื่อกระทรวงพลังงานได้เพิ่มสัดส่วนผสมไบโอดีเซลเป็นร้อยละ 7 ในปีพ.ศ.2557 ประเทศไทยมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลเพิ่มเป็น 10 แห่ง กำลังการผลิตรวม 4.96 ล้านลิตรต่อวัน และใช้ไบโอดีเซลเพื่อทดแทนน้ำมันดีเซลรวม 1,054.92 ล้านลิตร หรือเทียบเท่า 2.89 ล้านลิตรต่อวัน [4]

โดยทั่วไป การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับเมทานอล สามารถสังเคราะห์ได้โดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส(Alkaline catalyst) หรือตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดสูง (Strong acid catalysts) ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ นั้นมักใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ชนิดเบส (Homogeneous basic catalysts) เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) หรือแอลคอกไซด์ (Alkoxides) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด แต่อย่างไรก็ตามการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสนั้น สามารถทำให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนได้ ซึ่งจำเป็นต้องมีขั้นตอนในการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ยาก นอกจากนั้นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสยังไม่เหมาะกับน้ำมันพืชที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid หรือ FFA) และน้ำในระดับที่สูงกว่า 0.5 และ 0.1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักตามลำดับ เพราะส่งผลให้เกิดการสร้างสบู่เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ ซึ่งแยกออกจากผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลได้ยากจะทำให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้น และการเกิดเป็นกลีเซอรอลในปฏิกิริยา ส่งผลทำให้ได้ผลผลิตของไบโอดีเซลที่ได้ลดลงอีกด้วย [5]

เพื่อแก้ไขปัญหาข้างต้น การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดจึงถูกนำมาแทนที่ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดไม่มีผลกระทบจากปริมาณของกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม และตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดสามารถเร่งปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระ และปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์ได้พร้อมๆ กัน จึงประหยัดต้นทุนเพราะไม่ต้องมีการกำจัดกรดไขมันอิสระออกก่อน แต่ข้อเสียของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดคืออัตราการเกิดปฏิกิริยาจะต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส ดังนั้นจึงต้องใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันนานกว่า แต่ในทางปฏิบัติสามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้โดยดำเนินปฏิกิริยาภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงและเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม [5]

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ชนิดกรด (Homogeneous acid catalysts) เช่น กรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ถึงแม้จะสามารถเร่งปฏิกิริยากับน้ำมัน

ปาล์มราคาถูกที่มีกรดไขมันอิสระสูงได้ แต่มีข้อเสียคือปัญหาในการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ และสามารถเกิดการกัดกร่อนต่อผนังของเครื่องปฏิกรณ์ ระบบท่อและวาล์วได้ ดังนั้นนักวิจัยในระยะที่ผ่านมาจึงสนใจที่จะพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดกรด (Heterogeneous acid catalysts) เพื่อแก้ปัญหาและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่มีคุณภาพต่ำ โดยลดความซับซ้อนของขั้นตอนลง ในไม่กี่ปีที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดกรดอย่างหลากหลาย สำหรับเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน เช่น sulfated zirconia,  $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2$ ,  $\text{SO}_4^{2-}/\text{SnO}_2$ ,  $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$ , sulfonated polystyrene compounds และ tungstated zirconia เป็นต้น [5]

จากประโยชน์ของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์นั้น ทางคณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ชนิดกรดนั้นคือทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์ ( $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$ ) ซึ่งมีความแรงของกรดสูงสามารถใช้ได้ในปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ของเหลว และไม่ไวต่อสิ่งแปลกปลอมจากวัตถุดิบ เพื่อนำไปใช้ในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มกับเมทานอลผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดกรด ได้แก่ ปริมาณทั้งสแตนออกไซด์ที่เติมลงบนทินออกไซด์ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา รวมทั้งศึกษาสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์แก่การขยายกำลังการผลิตในอนาคตต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อสังเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันจากน้ำมันปาล์มและเมทานอล โดยใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ชนิดกรด
- 2) เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์ ได้แก่ ปริมาณทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาและเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนบนทินออกไซด์ ( $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$ ) ที่ปริมาณของทั้งสแตนออกไซด์ 5, 10, 15, 20, 30 และ 40wt.%
- 2) อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละของไบโอดีเซล
  1. อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 700, 800 และ 900°C
  2. ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาตั้งแต่ 1, 2, 3 และ 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
  3. อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1, 9:1, 12:1 และ 15:1
  4. อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ 120, 150, 180, 200 และ 220°C
  5. เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ 2, 4 และ 6 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3) ศึกษาลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่

1. องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray diffraction, XRD)
2. ปริมาณธาตุบนตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-Ray Fluorescence, XRF)
3. ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)
4. หมู่ฟังก์ชันและพันธะของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เครื่องเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR)
5. พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เครื่อง BET- Autosorb-1C Surface Area Analyzer
- 4) ทดสอบสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของไบโอดีเซล ได้แก่ เลขไอโอดีน และค่าความเป็นกรด
- 5) ทดสอบหาค่าพลังงานความร้อน โดยใช้เครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (Bomb Calorimeter)
- 6) โครงสร้างทางเคมีของไบโอดีเซล โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR) และเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Nuclear Magnetic Resonance Spectrophotometer, FT-NMR)

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบถึงสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสเดนออกไซด์บนทินออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน และสถานะของปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่ให้อัตราผลผลิตของไบโอดีเซลสูงสุด

### 1.5 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ไบโอดีเซล [6]

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงทดแทนทางเลือกนอกเหนือจากดีเซลที่ผลิตจากปิโตรเลียมซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่ผลิตจากแหล่งทรัพยากรหมุนเวียน เช่น น้ำมันพืชหรือไขมันจากสัตว์โดยมีคุณสมบัติการเผาไหม้เหมือนกับดีเซลจากปิโตรเลียมมากจึงสามารถใช้ทดแทนกันได้ คุณสมบัติที่สำคัญอีกอย่างของไบโอดีเซล คือ สามารถย่อยสลายได้เองตามกระบวนการทางชีวภาพในธรรมชาติ (Biodegradation) และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการใช้ไบโอดีเซลแทนการใช้น้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมจึงเป็นการช่วยลดมลภาวะในอากาศเนื่องจากไบโอดีเซลมีออกซิเจนผสมอยู่มากกว่าน้ำมันดีเซลอีกทั้งยังสามารถเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกร เพราะไบโอดีเซลผลิตมาจากน้ำมันพืชและไขมันสัตว์

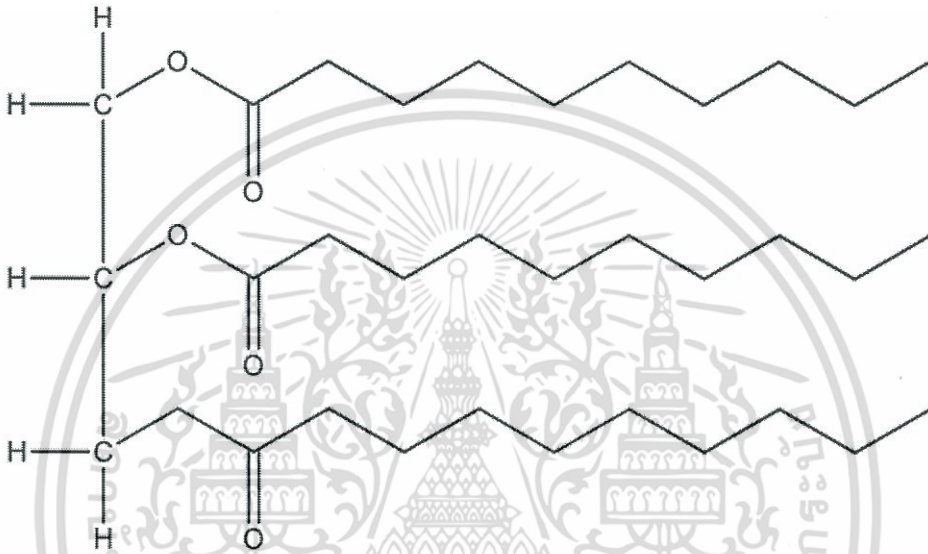
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล

Fuel Property	Diesel	Biodiesel
Fuel Standard	ASTM D975	ASTM D6751
Lower Heating Value, Btu/gal	~129,050	~118,170
Kinematic Viscosity, (40 °C)	1.3 – 4.1	4.0 – 6.0
Specific Gravity, (60 °F)	0.85	0.88
Density, lb/gal (15 °C)	7.079	7.328
Water and Sediment, Vol%	0.05 Max	0.05 Max
Carbon, wt. %	87	77
Hydrogen, wt. %	13	12
Sulfur, wt. %	0.05 Max	0.0 – 0.0024
Boiling Point, °C	180 – 340	315 – 350
Flash Point, °C	60 – 80	100 – 170
Cloud Point, °C	-18 – 5	-3 – 12
Pour Point, °C	-35 – -15	-15 – 10
Cetane number	40 – 55	48 – 65
Lubricity SLBOCLE, grams	2,000 – 5,000	>7,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันพืช [7]

โดยทั่วไปน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ส่วนมากเป็นสารประกอบประเภทไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกลีเซอรอลกับกรดไขมันที่มีคาร์บอนอะตอมตั้งแต่ 10 ถึง 30 ตัว น้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์มีกรดไขมันชนิดต่างๆ กันเป็นองค์ประกอบ โดยที่ปริมาณของกรดไขมันอยู่ในโครงสร้างถึงร้อยละ 94-96 ของน้ำหนักโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ ทำให้คุณสมบัติของน้ำมันแต่ละชนิดทั้งทางเคมีและทางกายภาพแตกต่างกันไปตามคุณสมบัติของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์

น้ำมันพืชเป็นสารประกอบเอสเทอร์มีส่วนประกอบของไตรกลีเซอไรด์ประมาณร้อยละ 98 ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกลีเซอรอลและกรดไขมันอิสระ ส่วนประกอบที่เหลือจะเป็นส่วนของไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์และกรดไขมันอิสระ ซึ่งส่วนใหญ่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในกรดไขมันระหว่าง 12 ถึง 18 ตัว จากตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวในน้ำมันพืชแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน โดยน้ำมันพืชที่มีกรดไขมันอิ่มตัวปริมาณสูงจะมีค่าไอโอดีนต่ำและค่าไอโอดีนจะสูงขึ้นตามลำดับเมื่อมีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงขึ้น น้ำมันพืชเป็นสารที่ไม่อยู่ตัวเมื่อสัมผัสกับอากาศจะถูกออกซิไดส์ได้ง่ายและเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันได้ที่อุณหภูมิสูง เมื่อเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันแล้วน้ำมันจะมีความหนืดสูงขึ้นเนื่องจากมีสารเหนียวเกิดขึ้น โดยทั่วไปค่าไอโอดีนของน้ำมันพืชจะเป็นดัชนีชี้บอกถึงปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีอยู่ในน้ำมันนั้นๆ ซึ่งบอกถึงความยากง่ายของการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันได้ ถ้าน้ำมันมีค่าเลขไอโอดีนสูงจะเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันง่าย ดังนั้นควรเลือกใช้ น้ำมันพืชที่มีค่าไอโอดีนต่ำเป็นเชื้อเพลิง เพราะจะป้องกันการเกิดสารเหนียวอันที่เกิดเนื่องมาจากปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันในเครื่องยนต์ได้ในเบื้องต้น

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติและองค์ประกอบกรดไขมันหลักของน้ำมันพืชต่างๆ

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

หมายเหตุ : ไม่พบ

\*1 กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวมีพันธะคู่ระหว่างคาร์บอน 1 แห่ง

\*2 กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวมีพันธะคู่ระหว่างคาร์บอน 2 แห่ง

\*3 กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวมีพันธะคู่ระหว่างคาร์บอน 3 แห่ง

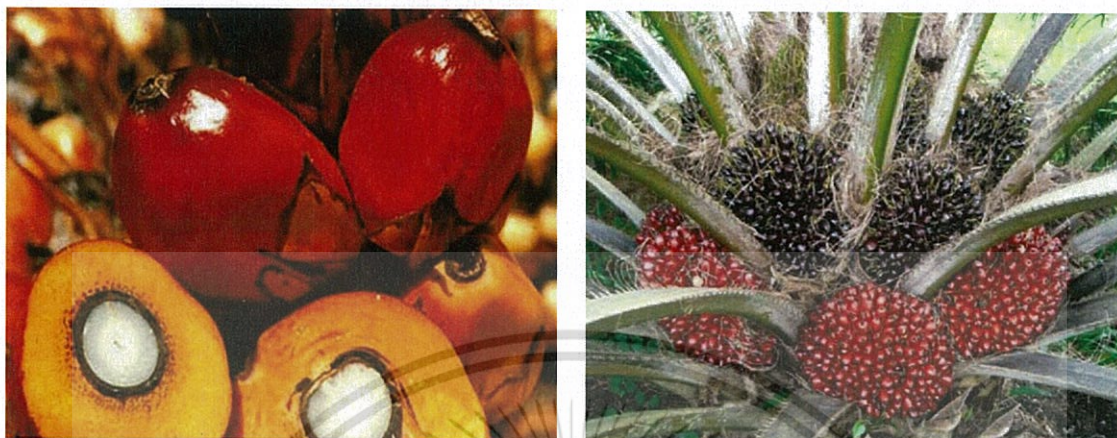
## 2.3 ปาล์มน้ำมัน [8]

ปาล์มน้ำมัน (Oil palm) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Elaeis guineensis* Jacq. พบครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ.1977 ทางตะวันตกของทวีปแอฟริกา ชาวโปรตุเกสได้นำปาล์มน้ำมันเข้ามาปลูกในทวีปเอเชียที่ประเทศอินโดนีเซียเมื่อ พ.ศ. 2391 จากนั้นจึงแพร่กระจายพันธุ์ไปยังเกาะสุมาตรา ในปีพ.ศ. 2448 มีการพบปาล์มน้ำมันพันธุ์ Dura ที่เมืองเดลีและตั้งชื่อว่าพันธุ์ Deli dura และเริ่มปลูกเป็นการค้าอย่างจริงจังบนเกาะสุมาตราตั้งแต่ปี พ.ศ. 2454 เป็นต้นมา

ประเทศไทยได้นำปาล์มน้ำมันเข้ามาปลูกเป็นปาล์มประดับเมื่อปี พ.ศ. 2472 ที่จังหวัดสงขลาและจังหวัดจันทบุรี และเริ่มปลูกเป็นการค้าเมื่อปีพ.ศ. 2511 และตั้งแต่ปี พ.ศ. 2525 เป็นต้นมาก็มีการพัฒนาขยายพื้นที่ปลูกไปอย่างรวดเร็วจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจจึงมีการวิจัยพัฒนาพันธุ์ปาล์มน้ำมันอย่างต่อเนื่อง ในการพัฒนาปรับปรุงพันธุ์ใช้ปาล์มน้ำมัน 2 ชนิด (species) คือ *Elaeis guineensis* ซึ่งให้ผลผลิตทะลายนสูง น้ำหนักผลและผลผลิตน้ำมันสูง อีกชนิดหนึ่งคือ *Elaeis Oleifera* จากอเมริกาใต้ซึ่งมีลักษณะต้นเตี้ย ต้านทานโรคตาเนา ให้กรดไขมันไม่อิ่มตัวและไอโอดีนสูง แต่ผลผลิตต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทะลายและปริมาณน้ำมันต่ำ โดยใช้การผสมข้ามระหว่างปาล์มน้ำมันทั้ง 2 ชนิดนี้ เพื่อให้ได้ปาล์มน้ำมันลูกผสมที่รวมลักษณะที่ดีของปาล์มทั้งสองชนิดไว้



รูปที่ 2.2 แสดงผลปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมัน (Oil palm) เป็นพืชน้ำมันที่นิยมใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทยในขณะนี้เนื่องจากเป็นพืชที่มีศักยภาพในการนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงสูงกว่าพืชน้ำมันชนิดอื่น คือมีต้นทุนการผลิตต่ำให้ผลผลิตต่อพื้นที่สูงโดยปาล์มน้ำมันให้ผลผลิตน้ำมันต่อไร่สูงกว่าเมล็ดเรพ ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตไบโอดีเซลในประเทศแถบยุโรปถึง 5 เท่าและสูงกว่าถั่วเหลืองที่ใช้กันมากในสหรัฐอเมริกาถึง 10 เท่าเนื่องจากปาล์มน้ำมันเป็นพืชยืนต้นจึงทนต่อผลกระทบจากภัยธรรมชาติ อีกทั้งยังสามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้นานถึง 20 ปี จึงทำให้ความต้องการน้ำมันปาล์มดิบในประเทศเพิ่มขึ้นอีกเป็นจำนวนมากในประเทศที่มีการปลูกปาล์มน้ำมันนั้น จากข้อมูลของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์การเกษตรพบว่าโดยเฉลี่ยการเพาะปลูกน้ำมันมีผลตอบแทนกำไรต่อไร่สูงถึงประมาณ 4,000 บาทต่อปี จึงมีการส่งเสริมให้เกษตรกรมีการปลูกปาล์มน้ำมันพันธุ์ดีทดแทนพืชอื่นๆ ที่มีรายได้ต่ำกว่า

รัฐได้ดำเนินการสำรวจพื้นที่เพาะปลูกปาล์มที่เหมาะสมทั้งภาคใต้และภาคอีสาน รวมทั้งมีการคัดเลือกเมล็ดพันธุ์ และให้ความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีการเพาะปลูกแก่เกษตรกร โดยพื้นที่เพาะปลูกส่วนใหญ่จะอยู่ในพื้นที่ภาคใต้ตั้งแต่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ลงไป ในปัจจุบันจังหวัดกระบี่มีพื้นที่เพาะปลูกปาล์มน้ำมันมากที่สุดในประเทศไทย คือ ประมาณร้อยละ 40 ของพื้นที่เพาะปลูกปาล์มน้ำมันทั้งประเทศ รองลงมาคือ สุราษฎร์ธานี และ ชุมพร อย่างไรก็ตามได้มีการทดลองปลูกปาล์มน้ำมันในภาคกลาง เช่น โครงการพัฒนาทุ่งรังสิต ซึ่งพบว่าสามารถให้ผลผลิตได้เมื่อสวนปาล์มมีอายุประมาณ 28 เดือน

ผลปาล์มมีส่วนให้น้ำมันสองส่วนคือเม็ดใน (kernel) และเนื้อเยื่อในเมล็ดมีสมบัติคล้ายน้ำมันมะพร้าวคือมีกรดลอริก (Lauric) สูง ส่วนน้ำมันปาล์มจากส่วนเนื้อหุ้มเมล็ดมีองค์ประกอบคล้ายน้ำมันหมู มีวิตามินเอและอีสูงกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่น ผลปาล์มสุกมีเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการดัดไขมันอิสระในตัวเองสูงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นปาล์มสุกเมื่อตัดจากต้นต้องส่งโรงงานสกัดโดยเร็ว การสกัดน้ำมันปาล์มมีหลายวิธีทั้งสกัดจากปาล์มทั้งผล (เนื้อผสมเมล็ด) สกัดเฉพาะเนื้อปาล์มและสกัดจากเมล็ดใน โดยน้ำมันที่ได้จะมีสมบัติ

และองค์ประกอบแตกต่างกัน น้ำมันจากเมล็ดในปาล์มคิดเป็นร้อยละ 44-55 ของเมล็ดปาล์มแห่ง มักนำมาใช้ทำสบู่และผลิตอาหาร เช่น มาร์การีนและเนย มีค่าไอโอดีนสูงกว่าน้ำมันมะพร้าว เพราะกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นส่วนประกอบมากกว่าและมีกรดไขมันชนิดอิ่มตัวที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น กรดคาพโรอิก (Caproic) และกรดคาพริลิก (Caprylic) น้อยกว่าน้ำมันมะพร้าว จุดหลอมเหลวสูงกว่า น้ำมันมะพร้าว 2-3 องศาเซลเซียส และเนื่องจากค่าไอโอดีนสูงกว่าน้ำมันมะพร้าวเมื่อทำ Hydrogenation จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพมากกว่าน้ำมันปาล์ม สามารถแยกออก เป็นส่วนของแข็ง เรียกว่า สเตียร์นใช้ทำเนย ส่วนที่เป็นของเหลวเรียกว่า โอเลอีนใช้บริโภคและอุตสาหกรรมสบู่

น้ำมันปาล์มมีส่วนประกอบจำนวนมากเป็นกรดไขมันอิ่มตัวโดยเฉพาะอย่างยิ่งกรดปาล์มติก (Palmitic) โอเลอีนเป็นส่วนหนึ่งของเหลวที่เหลือจากการตกผลึกของสเตียร์นซึ่งมีส่วนประกอบของกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูง เช่น กรดโอเลอิก (Oleic) และกรดลิโนเลอิก (Linoleic) น้ำมันปาล์มเป็นสารอินทรีย์ประเภท ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์จะได้เอสเทอร์ (Ester) และกลีเซอรอล (Glycerol) จากการวิเคราะห์กรดไขมันของน้ำมันปาล์มพบว่ากรดไขมันอิ่มตัว เช่น ไมริสติก (Myristic) และสเตียร์น (Stearic) รวมร้อยละ 52 ที่เหลือเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว เช่น โอเลอิก, ลิโนเลอิก และลิโนเลนิก (Linolenic)

### 2.3.1 การสกัดน้ำมันปาล์ม

ผลปาล์มน้ำมัน จะมีส่วนที่ให้น้ำมัน 2 ส่วน คือส่วนที่เป็นเนื้อของผลปาล์มซึ่งอยู่ระหว่างเปลือก กับกะลา และจากส่วนของเอ็นโดสเปิร์มซึ่งอยู่ในกะลาหรือในเมล็ดของปาล์มน้ำมัน น้ำมันจากแต่ละส่วนนี้ จะมีสมบัติบางอย่างที่แตกต่างกัน

เมื่อทะลายปาล์มน้ำมันถูกส่งเข้าไปยังโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มแบบมาตรฐาน (ซึ่งสกัดเฉพาะ น้ำมันจากเนื้อของผลปาล์ม แยกเมล็ดในไว้สกัดต่างหาก) ทะลายปาล์มจะเข้าสู่กระบวนการสกัดซึ่งมี ขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 ทำการอบทะลายปาล์มด้วยไอน้ำ (sterilization) ที่อุณหภูมิ 130–135 องศาเซลเซียส ความดัน 2.5–3 บรรยากาศ เป็นเวลา 50–75 นาที เพื่อหยุดปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดกรดไขมันอิสระในผล ปาล์มและทำให้ผลปาล์มนุ่มหลุดจากขั้วผลได้ง่าย

ขั้นที่ 2 การแยกผล (stripping) ทะลายปาล์มที่ถูกอบแล้วจะถูกส่งเข้าเครื่องแยกผลปาล์มออกจากทะลาย ทะลายเปล่าถูกแยกออกไป ส่วนผลปาล์มจะถูกย่อยด้วยเครื่องย่อยผลปาล์มให้ส่วนเปลือก และเนื้อแยกออกจากส่วนเมล็ดหรือกะลา เพื่อเข้าสู่การสกัดน้ำมัน

ขั้นที่ 3 การสกัดน้ำมัน (oil extraction) นำส่วนเปลือกและเนื้อปาล์มไปอบอีกครั้งหนึ่งที่ อุณหภูมิ 90–100 องศาเซลเซียส นาน 20–30 นาที แล้วผ่านเข้าเครื่องหีบ จะได้น้ำมันปาล์มดิบที่ยังมีน้ำ และเศษที่เป็นของแข็งปนอยู่ด้วยเล็กน้อย

ขั้นที่ 4 การทำความสะอาดน้ำมันปาล์มดิบ (clarification) น้ำมันปาล์มดิบที่ได้จากการสกัดจะ ถูกส่งเข้าถังกรองเพื่อแยกเอาน้ำและของแข็งออกก่อนถูกส่งเข้าเครื่องเหวี่ยงเพื่อทำความสะอาดและไล่น้ำ ออกอีกครั้ง จากนั้นจึงส่งเข้าถังเก็บน้ำมันเพื่อจำหน่ายหรือนำไปกลั่นเป็นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์สำหรับการ บริโภคต่อไป กากผลปาล์มที่ผ่านการหีบมาแล้วจะถูกนำมาแยกเส้นใยออกจากเมล็ดหรือกะลา นำกะลา ซึ่งยังมีเนื้อในหรือเอ็นโดสเปิร์มอยู่นี้อาบแห้งและทำความสะอาด แล้วนำเข้าเครื่องกระเทาะเพื่อแยก

กะลาออก จากนั้นนำเอนโดสเปมมาอบแห้งให้มีความชื้นไม่เกิน 7% แล้วบรรจุกระสอบรอการจำหน่ายหรือส่งไปหีบน้ำมันต่อไป

## 2.4 ปฏิบัติการใช้ในกระบวนการการสังเคราะห์ไบโอดีเซล [9]

ไบโอดีเซลที่สามารถทดแทนน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม สามารถเตรียมได้ 4 วิธี

### 2.4.1 การนำมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลโดยตรงและการผสม (Direct use and Blending)

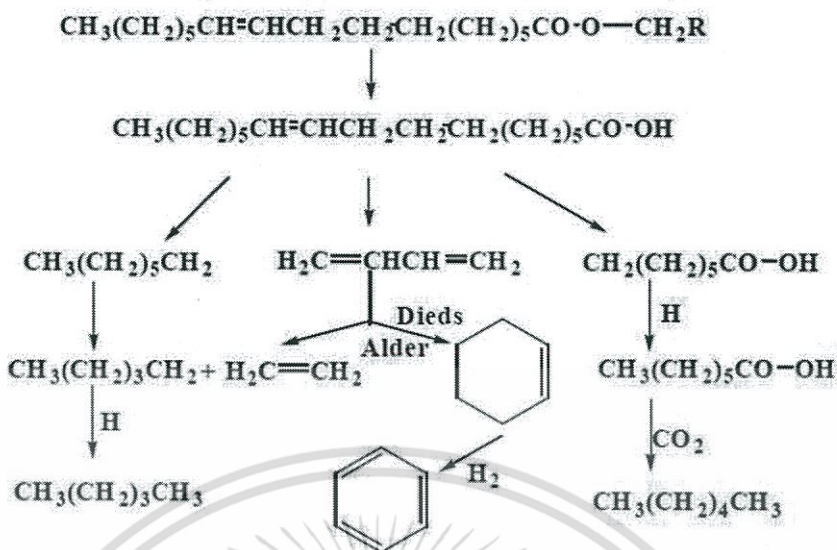
ไบโอดีเซลประเภทนี้เกิดจากการผสมกันระหว่างน้ำมันพืชกับน้ำมันปิโตรเลียมเพื่อลดความหนืดของน้ำมันพืชโดยตรง โดยไม่ต้องเสียสารเคมีอื่นเพื่อการเปลี่ยนแปลง แต่ถ้าผสมมากเกินไปอาจเกิดผลกระทบต่อเครื่องยนต์ในระยะยาว เพราะน้ำมันพืชมีส่วนประกอบของไขมันอิสระนำไปสู่ปัญหาเสื่อสภาพของน้ำมันเครื่อง ซึ่งทำให้เกิดคราบยางเหนียวจากปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างการเก็บรักษา และปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ทั้งนี้ในการนำน้ำมันพืชผสมกับน้ำมันดีเซลพบว่าอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันดีเซลต่อน้ำมันพืชที่อัตราส่วน 80:20 จะให้ผลเหมือนกรณีใช้น้ำมันดีเซลร้อยละ 100 อัตราส่วนดังกล่าวจึงเป็นที่นิยมใช้มากที่สุด

### 2.4.2 ไมโครอิมัลชัน (Microemulsion)

ไมโครอิมัลชัน คือ คอลลอยด์ที่กระจายตัวในสภาวะสมดุลโดยมีอนุภาคในคอลลอยด์ส่วนมากอยู่ในช่วง 1-150 นาโนเมตร ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งเพื่อแก้ปัญหาค่าความหนืดสูงในน้ำมันพืชให้มีความหนืดลดลง โดยใช้ควบคู่กับตัวทำละลายเช่น เมทานอล, เอทานอล และ 1-บิวทานอล ไมโครอิมัลชันที่เกิดจากเมทานอลกับน้ำมันพืชจะได้น้ำมันที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล แต่เมื่อนำมาทดสอบกับเครื่องยนต์พบว่าการสะสมตัวของคราบ (ซึ่งเป็นสารประกอบคาร์บอน) เกาะรอบๆ หัวฉีดและวาล์วของเครื่องยนต์ซึ่งเป็นข้อเสียของน้ำมันที่ผลิตโดยวิธีนี้

### 2.4.3 กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อน (Thermal Cracking or Pyrolysis)

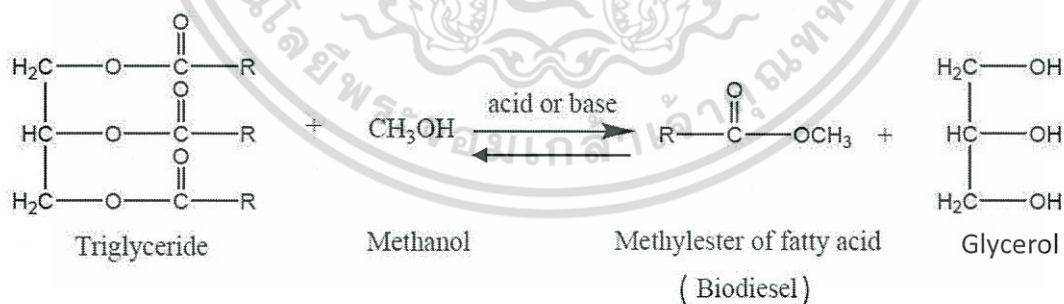
กระบวนการไพโรไลซิสเป็นการเปลี่ยนจากสารประกอบหนึ่งชนิดไปเป็นสารประกอบอื่นๆ มากกว่าหนึ่งชนิด โดยใช้ความร้อนหรือใช้ความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งนี้จะต้องจำกัดปริมาณอากาศหรือออกซิเจนที่ใช้ในกระบวนการด้วยเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการประมาณ 450–600 องศาเซลเซียส สารประกอบที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสจะถูกทำให้มีขนาดโมเลกุลที่เล็กลง ซึ่งกระบวนการนี้ยากที่จะกำหนดหรือควบคุมให้ได้ผลผลิตตามที่ต้องการ เนื่องจากความหลากหลายทางปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ วัตถุดิบที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส ได้แก่ น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ กรดไขมันธรรมชาติ (Natural Fatty Acid) และ เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty acid methyl ester)



รูปที่ 2.3 ปฏิกริยาการแตกสลายด้วยความร้อน

#### 2.4.4 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

เป็นการทำปฏิกริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์ของไขมันสัตว์หรือน้ำมันที่ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยการนำเอาน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์มาผ่านการกรองก่อนที่จะถูกนำไปทำปฏิกริยากับต่างเพื่อกำจัดไขมันอิสระ แล้วจึงผสมรวมกับ เมทานอลและ โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้สารไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันถูกเปลี่ยนเป็นสาร เอสเทอร์และกลีเซอรอล เมื่อกลีเซอรอลถูกนำออกจากน้ำมันพืชแล้วโมเลกุลที่เหลือจะมีสมบัติคล้ายกับ น้ำมันปิโตรเลียมจะต่างกันที่โมเลกุลของไบโอดีเซลเป็นกลุ่มของไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีกำมะถันหรือ องค์ประกอบที่ซับซ้อนอื่นๆ วิธีนี้ใช้เชิงพาณิชย์



รูปที่ 2.4 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

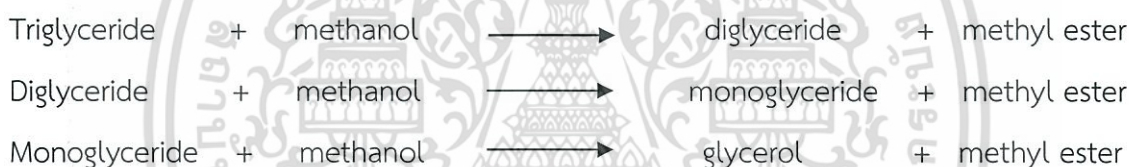
ในทางปริมาณสารสัมพันธ์ 1 โมลของไตรกลีเซอไรด์ต้องการ 3 โมลของแอลกอฮอล์ในการเกิดปฏิกริยา แต่หากใช้อัตราส่วนโมลที่สูงกว่าจะได้ผลิตภัณฑ์เอสเทอร์มากขึ้น จากปฏิกริยานี้เห็นว่า ปฏิกริยาสามารถย้อนกลับได้ การใช้แอลกอฮอล์ซึ่งก็คือ เมทานอลในปริมาณมากเกินพอจะช่วยให้ ปฏิกริยาดำเนินไปข้างหน้าทางผลิตภัณฑ์ได้ดี ทำให้ได้ปริมาณของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่ง เอสเทอร์ที่ได้นี้จะมีสมบัติใกล้เคียงกับไบโอดีเซล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นกระบวนการที่นิยมมาก เพราะวิธีไมโครอิมัลชันและวิธีการผสมน้ำมันด้วยตัวทำละลาย มักเกิดปัญหาในเรื่องประสิทธิภาพของเครื่องยนต์และเกิดคราบคาร์บอนส่วนใหญ่วิธีไฟโรไลซิสนั้นจะผลิตก๊าซโซลีนออกมามากกว่าน้ำมันดีเซลชีวภาพ นอกจากนี้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันยังให้ผลิตภัณฑ์ร่วมที่มีประโยชน์ทางการค้าคือ กลีเซอรอล

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ แต่สามารถเร่งปฏิกิริยาให้ไปข้างหน้าผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้นโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้แอลกอฮอล์ในปริมาณมากเกินพอโดยแอลกอฮอล์ที่ใช้ในปฏิกิริยาส่วนมากมักใช้เมทานอลหรือเอทานอลเป็นตัวทำปฏิกิริยา เนื่องจากราคาถูก ง่าย เป็นโมเลกุลที่มีขั้วขนาดเล็กจึงสามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วแต่ปฏิกิริยาต้องไม่มีน้ำเข้าไปเกี่ยวข้อง เพราะน้ำจะไปทำให้เกิดปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน (Saponification) ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตเอสเทอร์ลดลงและการแยกเอสเทอร์ออกจากกลีเซอรอลทำได้ยากมากขึ้น ดังนั้นการเตรียมต่างในปฏิกิริยาจะใช้วิธีละลายต่างในเมทานอลแทนน้ำ

กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันมีลำดับ 3 ขั้นตอนเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ คือ ขั้นแรกจะเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์เป็นไดกลีเซอไรด์ ตามด้วยเปลี่ยนไดกลีเซอไรด์เป็นโมโนกลีเซอไรด์ และเปลี่ยนโมโนกลีเซอไรด์เป็นกลีเซอรอลและได้เอสเทอร์ 3 โมล ในขั้นนี้คุณสมบัติของเอสเทอร์จะคล้ายน้ำมันดีเซลแสดงขั้นตอน ได้ดังนี้

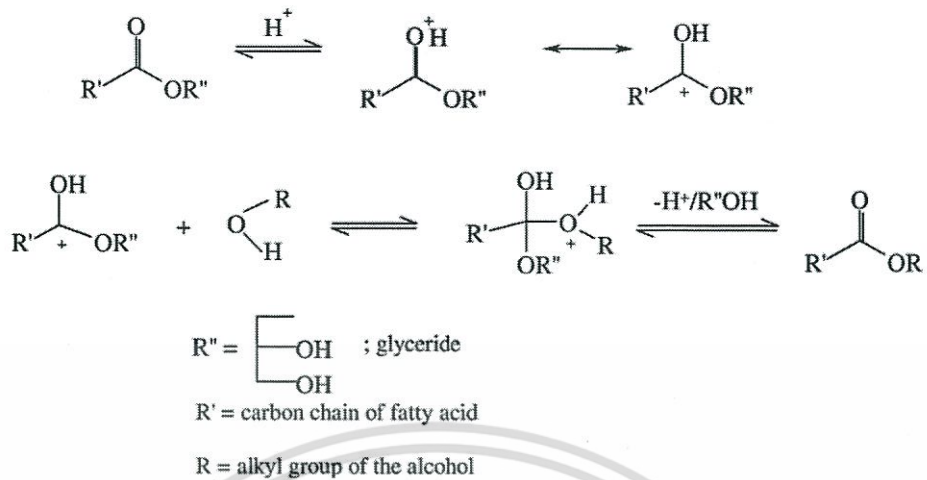


โดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่

#### 2.4.4.1 การทำปฏิกิริยาโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดมีข้อเสีย คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำมากทำให้ใช้เวลานานในการผลิตไบโอดีเซล กลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันที่ใช้กรดบรอนสเตด (Bronsted acid) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ประกอบด้วยขั้นแรก โปรตอนจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl Group) ของโมโนกลีเซอไรด์เกิดเป็นคาร์โบแคตไอออน (Carbocation) จากนั้นคาร์โบแคตไอออนจะทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์เกิดเป็นสารมัธยันตร์ลักษณะเป็นเตตระฮีดรอล (Tetrahedral Intermediate) และเมื่อกำจัดกลีเซอรอลและโปรตอนก็จะได้เอสเทอร์

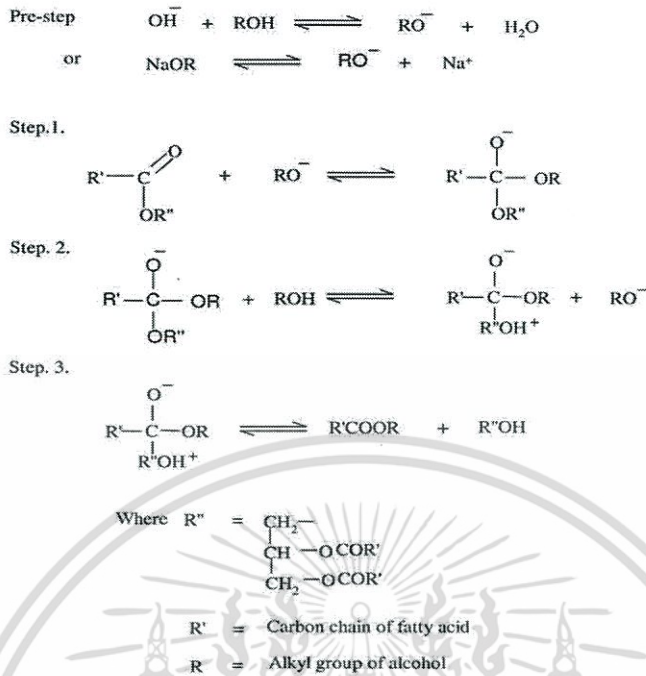
ในการผลิตไบโอดีเซลที่กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาถูกและสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยเปลี่ยนเป็นกรดไขมันอิสระให้เป็นเอสเทอร์ ซึ่งน้ำจะทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดลดลงอย่างมากทำให้เอสเทอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันลดลง กลไกการเกิดปฏิกิริยาในตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรด

#### 2.4.4.2 การทำปฏิกิริยาโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสเป็นระบบที่ได้รับความนิยมสูงสุดเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดให้ปริมาณไบโอดีเซลสูงในระยะเวลาอันสั้น กลไกของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน ที่ใช้ตัวเร่งเป็นเบสในการทำปฏิกิริยาประกอบด้วย ขั้นตอนหนึ่ง ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสจะเข้าทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์เกิดเป็นอัลคอกไซด์ (Alkoxide, RO<sup>-</sup>) และโปรโตเนต (Protonated Catalyst, BH<sup>+</sup>) จากนั้นขั้นตอนที่สอง อัลคอกไซด์จะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอนิลและไตรกลีเซอไรด์เกิดเป็นสารมัธยันตร์เตตระฮีดรอล (Tetrahedral Intermediate) ขั้นตอนที่สาม สารมัธยันตร์เตตระฮีดรอลจะเปลี่ยนไปเป็นอัลคิลเอสเทอร์และแอน-ไอออนของไตรกลีเซอไรด์ ขั้นตอนที่สี่ แอนไอออนของไตรกลีเซอไรด์จะทำปฏิกิริยากับโปรตอนเนตเกิดเป็นไตรกลีเซอไรด์แล้วให้ตัวเร่งเบสกลับคืนมา การใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นที่นิยมในการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากมีราคาถูกและเป็นตัวเร่งที่ให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เร็ว แต่ข้อจำกัดคือปฏิกิริยาจะมีความไวต่อน้ำและกรดไขมันอิสระโดยน้ำจะทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง ขณะที่กรดไขมันอิสระจะทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสทำให้เกิดปฏิกิริยาสaponification หรือเกิดสบู่ทำให้สิ้นเปลืองตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้และการเกิดสบู่ยังทำให้เกิดคอลลอยด์ ซึ่งเป็นผลให้การเพิ่มความบริสุทธิ์ให้กับไบโอดีเซลทำได้ยากขึ้น ดังนั้นก่อนที่จะนำน้ำมันพืชและตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสมาใช้เป็นวัตถุดิบจึงควรที่จะไล่ น้ำ ออกก่อน กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบส

2.4.4.3 การทำปฏิกิริยาในเหนือวิกฤตของเมทานอล

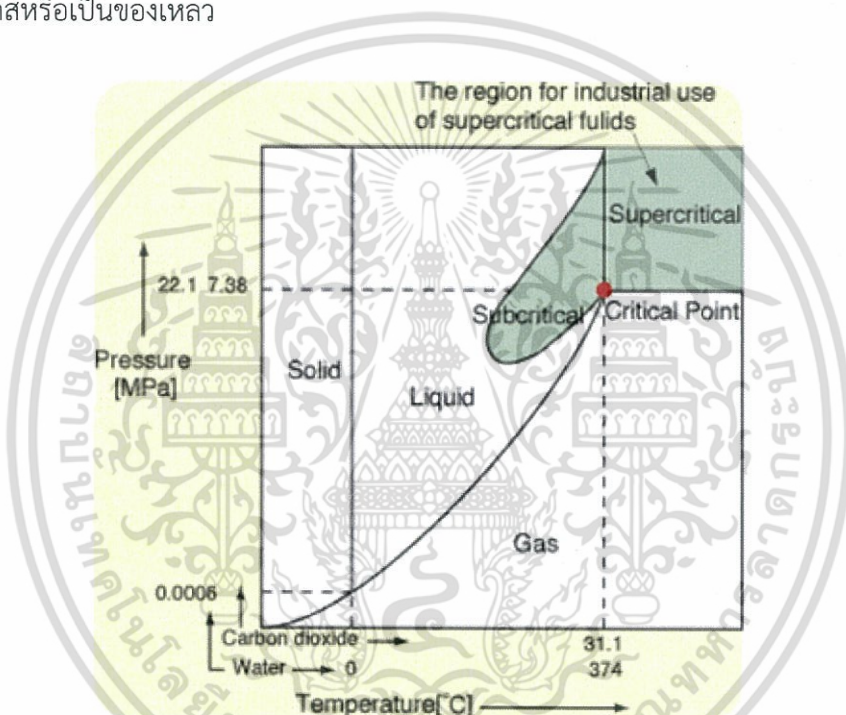
เป็นกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งวิธีนี้เป็น การนำเอา น้ำมัน วัตถุประสงค์มาทำปฏิกิริยากับเมทานอลในสภาวะเหนือวิกฤต ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อย อีกทั้งยังเป็นมิตร กับสิ่งแวดล้อม กล่าวคือไม่มีของเสียจากกระบวนการ อย่างไรก็ตามวิธีนี้จะต้องใช้อุณหภูมิและความดันใน ระดับที่ค่อนข้างสูง เพื่อให้เมทานอลอยู่ในสภาวะเหนือวิกฤต ทำให้พันธะไฮโดรเจนของเมทานอลอ่อนลง และสภาพผิวของเมทานอลลดลงทำให้เมทานอลกับน้ำมันพืชสามารถรวมเป็นเฟสเดียวกันได้

ตารางที่ 2.3 สมบัติของไหลภาวะเหนือวิกฤตเปรียบเทียบกับแก๊สและของเหลว

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

## ของไหลเหนือภาวะวิกฤต (Supercritical fluid , SCF)

ของไหลเหนือภาวะวิกฤต หมายถึงสารใดๆ ในสภาวะซึ่งจำแนกไม่ได้ว่าเป็นแก๊สหรือเป็นของเหลว เมื่อพิจารณาถึงแก๊สที่สามารถเปลี่ยนเป็นของเหลวได้มีอยู่ 2 วิธี โดยการลดอุณหภูมิหรือการเพิ่มความดัน เพื่อลดพลังงานจลน์ทำให้ระยะระหว่างโมเลกุลลดลงเกิดแรงดึงดูดระหว่างกัน ควบแน่นเป็นของเหลว แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดๆ หนึ่งโมเลกุลของแก๊สจะมีพลังงานจลน์มาก ถึงแม้ว่าจะให้ความดันเท่าไรก็ไม่สามารถทำให้แก๊สเกิดการควบแน่นเป็นของเหลวได้ อุณหภูมิสูงสุดที่แก๊สยังสามารถควบแน่นเป็นของเหลวได้ เรียกว่า อุณหภูมิวิกฤต ความดันที่จุดๆ นี้ เรียกว่า ความดันวิกฤต เพราะฉะนั้นจุดวิกฤตคือ จุดที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิวิกฤตและความดันเท่ากับความดันวิกฤตที่อุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิวิกฤต และความดันมากกว่าความดันวิกฤต เรียกว่า สภาวะเหนือวิกฤตโดยสารที่อยู่ในสภาวะนี้จะจำแนกไม่ได้ว่าเป็นแก๊สหรือเป็นของเหลว



รูปที่ 2.7 เฟสไดอะแกรมของของไหลเหนือภาวะวิกฤต

ของไหลเหนือภาวะวิกฤตมีคุณสมบัติอยู่ระหว่างแก๊สกับของเหลว จากตารางพบว่าความหนาแน่นของของไหลเหนือภาวะวิกฤตมีค่าใกล้เคียงกับของเหลว เมื่อนำมาให้เป็นตัวทำละลายโมเลกุลของสารที่ต้องการละลายจะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของของไหลภาวะเหนือวิกฤต เกิดอันตรกิริยากันเกิดการละลายได้ดี ขณะเดียวกันของไหลเหนือภาวะวิกฤตมีความหนืดและการแพร่กระจายใกล้เคียงกับแก๊ส ทำให้ความสามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างภายในของตัวถูกละลายได้ดีและด้วยคุณสมบัติเหล่านี้จึงนำของไหลเหนือภาวะวิกฤตมาใช้เป็นตัวทำละลาย

## ตารางที่ 2.4 แสดงประเภทปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน		
ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันมีตัวเร่งปฏิกิริยา		ภาวะเหนือวิกฤตของเมทานอล
กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
- ทำปฏิกิริยา 1-45 ชั่วโมง	- ทำปฏิกิริยา 1-8 ชั่วโมง - เกิดปฏิกิริยาสปอนนิฟิเคชัน	- ทำปฏิกิริยา 2-4 ชั่วโมง - ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง

### 2.4.4.4 การทำปฏิกิริยาโดยใช้เอนไซม์ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เอนไซม์ไลเปสถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการต่างๆ เช่น ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของกลีเซอรอล แอลกอฮอล์ไลซิส (Alcoholysis) และแอซิโดไลซิส (Acidolysis) ข้อดีของเอนไซม์ไลเปส คือสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก ไม่มีของเสียจากกระบวนการ ข้อเสียของการใช้เอนไซม์คือ มีราคาค่อนข้างแพง

### 2.4.4.5 การทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์

เป็นการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวในระบบ เช่น  $ZrO_2$ ,  $ZnO$ ,  $KNO_3/ZrO_2$ ,  $KNO_3/KL$  zeolite เป็นต้น ซึ่งการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้จะช่วยแก้ปัญหาการเกิดสบู่ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล เมื่อใช้เบสเป็นตัวเร่งในระบบที่มีน้ำ

## 2.5 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา [10]

### 2.5.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์เป็นตัวเร่งที่มีสถานะเดียวกับตัวทำปฏิกิริยาไม่ว่าจะเป็นแก๊สหรือของเหลว ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาในสิ่งมีชีวิตที่เร่งด้วยเอนไซม์และปฏิกิริยาในสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์มักเป็นโมเลกุลที่มีตำแหน่งสำหรับเร่งปฏิกิริยาชัดเจน ทำให้ง่ายต่อการศึกษา แต่ก็มีข้อเสียคือ มักสลายตัวหรือเสียสภาพในสถานะที่ใช้ความร้อนหรือความดันสูง และสามารถก่อให้เกิดการกัดกร่อนต่อผนังของเครื่องปฏิกรณ์ ระบบท่อและวาล์วได้

การเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์มีข้อดีหลายประการ เช่น

1. การเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์มักเกิดขึ้นได้ภายใต้สภาวะปกติ ทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำ
2. ลดปัญหาเกี่ยวกับการสลายตัวของสารผลิตภัณฑ์ (สารบางตัวอาจสลายตัวที่อุณหภูมิสูง ซึ่งการเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิไม่สูงมากนัก)
3. สามารถออกแบบตัวเร่งปฏิกิริยาให้เลือกเร่งเฉพาะปฏิกิริยาที่ต้องการได้
4. ตัวเร่งมีราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับโลหะที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ เช่น แพลทินัม (platinum) และทองคำ (gold)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สารตั้งต้นและตัวเร่งมีวัฏภาคต่างกัน ปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ส่วนใหญ่นิยมใช้ตัวเร่งที่เป็นของแข็งในการเร่งปฏิกิริยาที่มีสารตั้งต้นที่อยู่ในวัฏภาคแก๊สหรือของเหลว ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยากันที่ผิวของตัวปฏิกิริยาที่สำคัญๆ ในอุตสาหกรรมผลิตสารเคมีจะให้การเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ เช่น การสังเคราะห์แอมโมเนีย การผลิตกรดไนตริก และการผลิตตัวเร่งกำจัดไอเสีย เป็นต้น เนื่องจากสามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้นที่เหลือได้ง่ายกว่าสามารถใช้ได้ในสภาวะที่อุณหภูมิและความดันสูงได้ ตัวเร่งปฏิกิริยามีอายุใช้งานที่ยาวนานและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และยังลดปัญหาการกัดกร่อนเครื่องปฏิกรณ์และเพิ่มประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน

ตารางที่ 2.5 เป็นการเปรียบเทียบสมบัติและปัจจัยต่างๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์และวิวิธพันธุ์ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์อยู่ในวัฏภาคเดียวกับสารตั้งต้น จึงมีข้อดีคือประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาสูงและสามารถเลือกให้เร่งปฏิกิริยาที่ต้องการได้ง่ายกว่า อีกทั้งสภาวะการทดลองที่ใช้ไม่รุนแรงสามารถศึกษากลไกของปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าด้วยเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีต่างๆ และไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการแพร่ของสารตั้งต้นไปหาตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากอยู่ในวัฏภาคเดียวกัน แต่มีข้อเสียคือการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ทำได้ยากวิธีการที่ใช้ส่วนใหญ่คือการกลั่นหรือการสกัดด้วยตัวทำละลายและการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ทำได้ยากกว่าและอายุการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์นั้นสั้นกว่า

ข้อดีของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ คือ สามารถแยกสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาได้ง่าย สามารถใช้ได้ ในสภาวะที่มีอุณหภูมิและ/หรือความดันสูงได้ ตัวเร่งปฏิกิริยามีอายุการใช้งานที่ยาวนานและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่ายกว่า

ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบปัจจัยต่างๆ ในการเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์และวิวิธพันธุ์

ปัจจัยหรือตัวแปรที่สนใจ	การเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์	การเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์
กัมมันตภาพเมื่อเทียบปริมาณโลหะที่เท่ากัน	สูง	แปรค่าได้
สัดส่วนการเลือกปฏิกิริยา	สูง	แปรค่าได้
สภาวะของปฏิกิริยา	ไม่รุนแรง	รุนแรง
อายุการใช้งานของตัวเร่ง	แปรค่าได้	นาน
ความไวของตัวเร่งต่อการเกิดพอยซัน	ต่ำ	สูง
ปัญหาจากการแพร่	ไม่มี	อาจมีผล
การนำตัวเร่งกลับมาใช้งาน	แพง	ทำได้
การปรับสมบัติเชิงโมเลกุลของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการเปลี่ยนอะตอมที่เป็นองค์ประกอบ	อาจทำได้	ทำไม่ได้

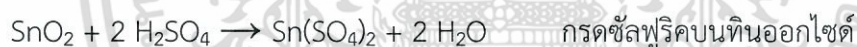
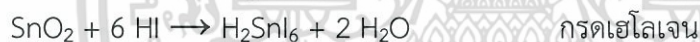
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.3 ทินออกไซด์ (Tin(IV) oxide)

ทินออกไซด์ (Tin(IV) oxide) หรือ Stannic oxide มีรูปแบบทั่วไปคือ  $\text{SnO}_2$  พบในแร่ดีบุก คุณสมบัติ คือไม่มีสี มีมวลโมเลกุล  $150.71 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$  ความหนาแน่นที่บรรยากาศ  $6.95 \text{ g}/\text{cm}^3$  จุดเดือดอยู่ที่  $1800\text{-}1900^\circ\text{C}$  และจุดหลอมเหลวสูงมากอยู่ที่  $1630^\circ\text{C}$  และมีสมบัติทางแม่เหล็กเป็นสารประกอบที่ในโมเลกุลมีทั้งประจุบวกและประจุลบ โดยทั่วไปเกิดขึ้นตามธรรมชาติไม่มีความบริสุทธิ์เนื่องจากเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับอากาศ โดยทั่วไป  $\text{SnO}_2$  จะอยู่ในรูปของ  $\text{O}=\text{Sn}=\text{O}$  และเป็นชนิด n-type และมีช่องว่างพลังงานช่องว่าง  $3.6 \text{ eV}$  เป็นออกไซด์ที่เป็นตัวกึ่งนำไฟฟ้า และเนื่องจากมันมีความโปร่งแสงและนำไฟฟ้าได้ มันจึงถูกนำมาใช้ในหลายงาน เช่น ใช้ในการเป็นตัวนำในแผงโซลาร์เซลล์, ใช้เป็นตัวรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยา, ใช้เป็นตัวตรวจจับทางเคมีที่อยู่ในรูปแบบของแข็ง และใช้ในงานอื่นอีกมากมาย โดยที่พื้นผิวของ Sn คือส่วนสำคัญ เพราะวาเลนซ์ของ Sn จะถูกรีดิวซ์จาก  $\text{Sn}^{4+}$  ไปเป็น  $\text{Sn}^{2+}$  โดยทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอะตอมที่เข้าทำปฏิกิริยา

$\text{SnO}_2$  มีพหุสัณฐานหลากหลายรูปแบบ เช่น Rutile, tetragonal, tP6 ซึ่งรูปแบบเหล่านี้จะพบได้แต่ที่พบบ่อยสุดจะอยู่ในแร่แคสสิเทอไรต์ (Cassiterite)  $\text{SnO}_2$  โดย  $\text{SnO}_2$  มีพื้นที่ผิวอยู่ประมาณ  $20 \text{ m}^2/\text{g}$  แต่ว่าขนาดของพื้นผิวก็จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา และตัวเร่งกรด หากอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาพอเหมาะ และมีการเติมตัวเร่งกรดลงไป พื้นผิวก็จะเพิ่มขึ้นทำให้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพ

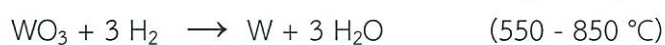
ทินออกไซด์แม้จะไม่สามารถละลายในน้ำได้เนื่องจากเป็นสารประกอบที่มีขั้ว แต่จะถูกทำละลายด้วยกรดเฮไลเจน หรือกรดซัลฟูริกบนทินออกไซด์ ภายในเวลาหลายชั่วโมง ตัวอย่างปฏิกิริยา



ประโยชน์ของทินออกไซด์สามารถใช้รวมกับวาเนเดียมในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบอะโรมาติกในการสังเคราะห์กรดคาร์บอกซิลิกและแอนไฮไดรด์

### 2.5.4 ทังสเทนออกไซด์ (Tungsten(VI) oxide) [12]

ทังสเทนออกไซด์ (Tungsten(VI) oxide) หรือเป็นที่รู้จักว่าทังสเทนไตรออกไซด์ (Tungsten trioxide) หรือทังสติกแอนไฮไดรด์ (Tungstic anhydride) มีรูปแบบทั่วไปคือ  $\text{WO}_3$  เป็นสารประกอบเคมีที่ประกอบด้วยออกซิเจนและโลหะทรานซิชันทังสเทน โดยได้มาจากสารมัธยันตร์ (Intermediate) ในกระบวนการนำกลับมาใช้ (Recovery) ของทังสเทนจากแร่ธาตุ (Minerals) ซึ่งแร่ทังสเทนจะถูกนำมาทำปฏิกิริยากับโลหะแอลคาไลน์ (Alkalies) เพื่อผลิตทังสเทนออกไซด์ และสามารถนำมาทำปฏิกิริยากับคาร์บอนหรือแก๊สไฮโดรเจน เพื่อเปลี่ยนทังสเทนออกไซด์ให้เป็นโลหะทังสเทนบริสุทธิ์ ดังในสมการ



โครงสร้างผลึกของทังสเทนออกไซด์นั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงเกิน  $740^\circ\text{C}$  จะมีโครงสร้างเป็นแบบเตตระโกนอล (Tetragonal), อุณหภูมิระหว่าง  $330$  ถึง  $740^\circ\text{C}$  มีโครงสร้างแบบออทอโรมบิก,  $17$  ถึง  $330^\circ\text{C}$  มีโครงสร้างแบบ monoclinic, และมีโครงสร้างเป็นไตรคลินิก เมื่ออุณหภูมิลดลงอยู่ระหว่าง  $-50$  ถึง  $17^\circ\text{C}$  ซึ่งโครงสร้างโดยทั่วไปเป็นแบบ monoclinic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา [13]

สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นกับกรรมวิธีที่ใช้ในการเตรียมสาร การเตรียมแต่ละครั้งต้องคำนึงสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ พื้นที่ผิว เสถียรภาพ และความทนทาน การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่

กลุ่มแรก คือ การเตรียมตัวเร่งกลุ่มออกไซด์ (Active oxide component)

กลุ่มที่สอง คือ การนำองค์ประกอบที่ไวต่อปฏิกิริยาวางบนตัวรองรับ (Deposition-produced activity component)

กลุ่มที่สาม คือ กลุ่มที่มีการเตรียมพิเศษเฉพาะตัวอย่าง

### 2.6.1 การเตรียมตัวเร่งกลุ่มออกไซด์

ตัวเร่งกลุ่มออกไซด์ในที่นี่มีความหมายรวมทั้งองค์ประกอบกัมมันต์และตัวรองรับซึ่งจะถูกเตรียมให้มีพื้นที่ผิวและความพรุน เช่น ไฮดรอกไซด์ซึ่งอาจเป็นทั้งองค์ประกอบกัมมันต์และตัวรองรับ

### 2.6.2 การเตรียมออกไซด์ผสม

ออกไซด์ผสม (Dual Oxides) คือ การรวมตัวของออกไซด์สองชนิดเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของการเร่งปฏิกิริยา วิธีที่ดีที่สุด คือ การตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) และการเตรียมเจลสองชนิดเพื่อให้ได้การกระจายตัวและมีอันตรกิริยาต่อกันสูง ตัวอย่างเช่น  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiO-Al}_2\text{O}_3$  และซีโอไลต์

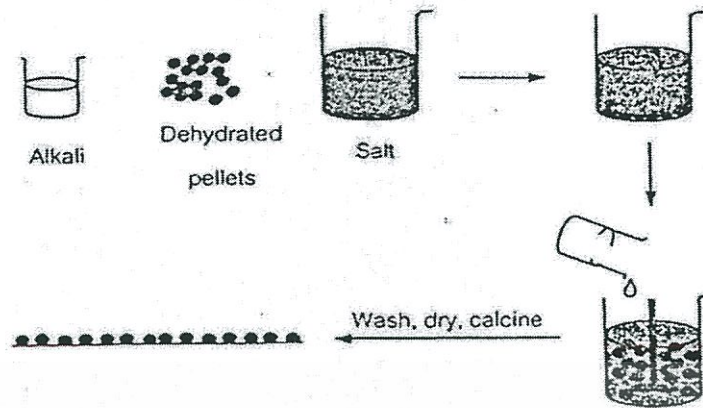
### 2.6.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการวางองค์ประกอบกัมมันต์บนตัวรองรับ

การทำให้ออกไซด์กระจายตัวบนตัวรองรับเป็นวิธีการที่นิยมมาก สามารถทำได้ 4 วิธี คือ การตกตะกอน การดูดซับ การแลกเปลี่ยนไอออน และการทำให้เอ็บซุ่ม (Impregnation) แต่ละเทคนิคมีทั้งข้อดีและข้อเสีย ซึ่งต้องพิจารณาจากการใช้ ตัวรองรับที่ใช้ อาจเป็นผงหรือก้อนเล็กๆ ในการเติมองค์ประกอบกัมมันต์ลงไปในพื้นที่ผิวหน้าด้านในตัวรองรับอาจมีข้อจำกัดเรื่องการแพร่เข้าไปในรูพรุน

**2.6.3.1 การตกตะกอน** คือ การทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างผองอนุภาคของตัวรองรับกับเกลือของสารละลายซึ่งอาจจะเป็นออกซาลेट ไนเตรตซัลเฟต หรือคลอไรด์ในตัวกลางที่เป็นเบส เช่น  $\text{NaOH}$ ,  $\text{KOH}$ ,  $\text{NH}_4\text{OH}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaHCO}_3$  ทำให้ได้ไฮดรอกไซด์หรือคาร์บอนเนตของโลหะที่ไม่ละลายน้ำ สารเหล่านี้สามารถเปลี่ยนเป็นออกไซด์โดยการให้ความร้อน

การตกตะกอนเหมาะกับการเตรียมเพื่อให้มีปริมาณโลหะ (Loading) ขององค์ประกอบกัมมันต์ประมาณ 10-20% ถ้าต้องการปริมาณที่ต่ำกว่านี้ควรพิจารณาใช้วิธีอื่น

การเตรียมทำได้โดยการเคล้ากันของผงตัวรองรับกับสารละลายเกลือตามปริมาณที่เหมาะสมกับความต้องการก่อนทำปฏิกิริยา แต่ในบางกรณีตัวรองรับอาจจะต้องดูแลอากาศในตัวรองรับเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีอากาศในรูพรุน หลังงานนั้นจึงเติมสารละลายเบสเพื่อทำให้เกิดการตกตะกอน ขั้นตอนมาคือการกรองหรือการแยก แล้วล้างกำจัดสารต่างๆ ได้แก่ สารละลายเบส ซึ่งเป็นไอออนของสารตั้งต้น และสารที่จับอยู่บนผิวหน้าที่มากเกินไปออก



รูปที่ 2.8 ขั้นตอนในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีตกตะกอน

2.6.3.2 การดูดซับ คือ การนำวัสดุที่เป็นตัวรองรับมาแช่ในสารละลายเกลือที่มีความเข้มข้นที่เหมาะสมกับการดูดซับ และการดูดซับจะให้ไอโซเทิร์ม ดังรูป 2.8 (b) การดูดซับเป็นวิธีการที่เหมาะสมเมื่อต้องการปริมาณองค์ประกอบกัมมันต์ต่ำ ผงหรืออนุภาคจะถูกนำมากำจัดน้ำและทำให้ชุ่มในสารละลายที่เหมาะสมในเวลาที่พอเหมาะ การจับแบบนี้จะสม่ำเสมอและองค์ประกอบกัมมันต์จะเข้าไปจับในรูพรุนอย่างทั่วถึงระหว่างการทำให้ชุ่ม



รูปที่ 2.9 (a) การเตรียมโดยวิธีการดูดซับ

(b) ไอโซเทิร์มของการดูดซับของไอออนที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การดูดซับจากสารละลายอาจเป็นทั้งการดูดซับไอออนบวกหรือไอออนลบ ขึ้นกับสมบัติของผิวหน้า ตัวอย่างเช่น ซีโอไลต์เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนบวกที่ดี แต่ซิลิกาเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนบวกได้ไม่ดี ส่วนอะลูมินาเป็นตัวดูดซับที่ไม่ดีทั้งสำหรับไอออนบวกและไอออนลบ แมกนีเซียมเป็นตัวดูดซับไอออนลบที่ดี และคาร์บอนมักจะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีการถ่ายโอนประจุ (Charge transfer Complex) กับการให้อิเล็กตรอน แต่ก็ดูดซับไอออนบวกได้บ้างเช่นกัน ถ้าไม่นับซีโอไลต์ซึ่งมีกลไกการดูดซับที่ต่างออกไปแล้ว ลักษณะการดูดซับเชิงไอออนิกของหมู่ที่มีความสำคัญในเชิงการเร่งปฏิกิริยา

### 2.6.3.3 การแลกเปลี่ยนไอออน

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนจะเหมือนกับการดูดซับไอออนิกต่างกันเพียงแต่มีการแลกเปลี่ยนกับไอออนเกิดขึ้นนอกเหนือจากโปรตอน ไอออนที่มีประจุต่ำ เช่น  $\text{Na}^+$  จะแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีประจุสูงกว่า เช่น  $\text{Ni}^{2+}$  และมีสมดุลเกิดขึ้นดังนี้ (S คือหมู่ฟังก์ชันใด ๆ)

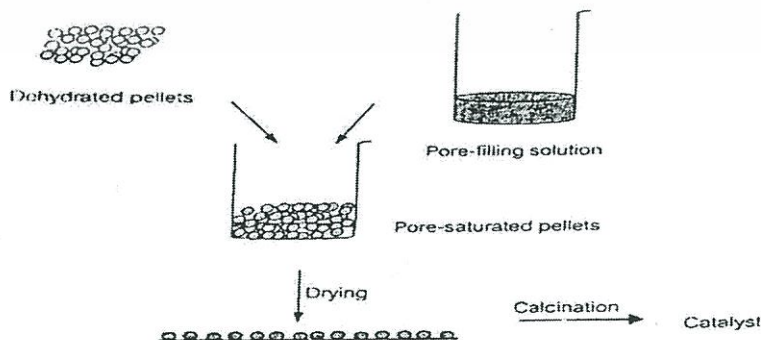


การแลกเปลี่ยนไอออนจะเกิดขึ้นได้ดี เมื่อไอออนตัวใหม่ที่เข้ามาแทนที่สามารถจับกับตัวรองรับได้แข็งแรงกว่าไอออนเดิม ส่วนใหญ่เมื่อพูดถึงการแลกเปลี่ยนไอออน เรามักจะนึกถึงการแช่ตัวรองรับลงในสารละลายของเกลือของโลหะที่ต้องการแลกเปลี่ยนไอออน แล้วรอจนได้ปริมาณการแลกเปลี่ยนที่ต้องการ ข้อดีของการแลกเปลี่ยนไอออนคือจะได้การกระจายตัวของไอออนโลหะที่เป็นเนื้อเดียว แต่การแลกเปลี่ยนมีข้อจำกัดเนื่องจากต้องการใช้เวลานาน และเมื่อการแลกเปลี่ยนอิ่มตัวแล้วจะไม่สามารถเพิ่มปริมาณไอออนได้ดี

### 2.6.3.4 การทำให้เอิบซุ่ม (Impregnation)

เทคนิคการทำให้เอิบซุ่ม เป็นเทคนิคที่ง่ายและสะดวกที่สุดเพราะเป็นการจับตัวรองรับโดยตรงจุดประสงค์คือต้องการเติมรูพรุนด้วยสารละลายของเกลือโลหะที่มีความเข้มข้นเพียงพอสำหรับค่าปริมาณโลหะที่ต้องการ สารละลายที่ใช้ต้องมีปริมาณที่จะเติมรูพรุนได้พอดี เรียกว่าค่า Incipient wetness ขั้นตอนการเตรียมคร่าว ๆ แสดงไว้ในรูปที่ 2.9 เริ่มจากการให้ความร้อนแก่ตัวรองรับหรือนำไปดูดอากาศออกด้วยสูญญากาศเพื่อกำจัดความชื้นในรูพรุน และทำให้การแพร่ของสารละลายเข้าไปในรูพรุนเกิดขึ้นได้ดีขึ้น จากนั้นหยดสารละลายในปริมาณที่พอดีที่จะเติมรูพรุนและทำให้ผิวหน้าภายนอกของตัวรองรับเปียกพอดี ลงไปบนตัวรองรับ ซึ่งปริมาณดังกล่าวสามารถคำนวณได้ก่อนการเตรียมจากปริมาตรของรูพรุนหรือทำการทดสอบก่อนโดยใช้ตัวทำละลายหยดลงบนตัวรองรับที่ทราบปริมาณแน่นอน และทำการวัดปริมาตรที่ทำให้ตัวรองรับเปียกพอดี แล้วจึงนำปริมาตรตัวทำละลายที่ได้มาใช้ในการคำนวณความเข้มข้นของสารละลายเพื่อให้ได้ปริมาณโลหะตามที่ต้องการ

การทำให้แห้งจะทำให้เกิดการตกผลึกของเกลือบนผิวหน้าของรูพรุน ขั้นตอนนี้ถ้าไม่ระวังอาจจะทำให้เกิดการกระจายตัวของสารในรูพรุนไม่สม่ำเสมอ ถ้าการทำให้แห้งช้าเกินไป จะทำให้สารละลายเคลื่อนลงไปอยู่ด้านล่างของรูพรุนเกิดการตกตะกอน ทำให้ผลึกที่ได้อยู่แต่ตอนล่างของรูพรุน ในการตรงกันข้ามถ้าแห้งเร็วเกินไปสารละลายจะติดอยู่เฉพาะตอนบนของรูพรุนทำให้ผลึกเฉพาะช่วงบนของรูพรุน การทำให้แห้งในอัตราเร็วที่เหมาะสมจะทำให้ได้ผลึกที่เท่าๆกัน



รูปที่ 2.10 ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีเอิบซุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเผาเป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพราะถ้าตัวเร่งปฏิกิริยาเจอกับความชื้นในอากาศ ผลึกในรูปอนุภาคจะละลายในน้ำที่เกิดควบแน่นได้ การเผาเป็นการเปลี่ยนเกลือโลหะให้อยู่ในรูปของโลหะหรือออกไซด์ และจะหยุดการกระจายของสารละลายได้

#### 2.6.4 การเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาให้อยู่ในรูปที่ว่องไว

ขั้นตอนสุดท้ายของการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา คือ การเปลี่ยนวัสดุที่เตรียมได้ให้เป็นอย่างประกอบกัมมันต์ วัสดุที่เตรียมได้มักอยู่ในรูปออกไซด์ ดังนั้นถ้าสารที่ต้องการคือรูปที่เป็นออกไซด์ อาจจะไม่ต้องทำการกระตุ้น แต่ถ้าต้องการในรูปโลหะจะต้องใช้ปฏิกิริยารีดักชัน และถ้าเป็นรูปซัลไฟด์ ต้องใช้ปฏิกิริยาการเติมซัลไฟด์

### 2.7 สมบัติทางด้านเชื้อเพลิงที่สำคัญของไบโอดีเซล [14]

#### 2.7.1 ค่าความร้อน (Heating value)

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

#### 2.7.2 จุดวาบไฟ (Flash Point)

จุดวาบไฟ คือ อุณหภูมิต่ำสุดที่สามารถทำให้ของเหลวกลายเป็นไอเพียงพอต่อการเริ่มต้นลุกไหม้ขึ้นเมื่อมีแหล่งจุดติดไฟแต่มีไม่เพียงพอที่จะลุกติดไฟได้อย่างต่อเนื่องจุดวาบไฟเป็นประโยชน์ในการแบ่งประเภทของสารเคมีว่าเป็นสารไวไฟ (Flammable) สารติดไฟได้ (Combustible) และสารไม่ติดไฟ (Non-combustible) ตามมาตรฐาน NFPA 30 โดยปกติแล้วอุณหภูมิจุดวาบไฟของไบโอดีเซลจะมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล แต่อย่างไรก็ตามไบโอดีเซลอาจมีจุดวาบไฟที่ต่ำกว่าปกติได้ หากผลิตภัณฑ์มีปริมาณแอลกอฮอล์จากระบวนการผลิตหลงเหลือหรือเจือปนอยู่ซึ่งควรต้องจำกัดออกเพื่อให้มีจุดวาบไฟสูงปลอดภัยในการขนส่งเชื้อเพลิง

#### 2.7.3 ค่าความเป็นกรด (Acid value)

ค่าความเป็นกรด คือ จำนวนมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเป็นกลางกับกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในน้ำมัน 1 กรัม ซึ่งเป็นค่าที่ชี้บอกถึงความเป็นกรดของน้ำมัน หากน้ำมันพืชหรือสัตว์นั้นมีคุณภาพดี กรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบอยู่ไม่หลุดออกเป็นกรดไขมันอิสระ น้ำมันนั้นๆจะมีค่าของกรดต่ำ แต่หากน้ำมันถูกทำลายด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซ์ น้ำมันนั้นๆจะมีกรดไขมันอิสระสูงขึ้นและมีค่าของกรดสูงขึ้นด้วย

#### 2.7.4 เลขไอโอดีน (Iodine value)

ค่าไอโอดีน คือ ปริมาณไอโอดีนเป็นกรัมที่ทำปฏิกิริยาพอกกับน้ำมัน 100 กรัม โดยทั่วไปแล้วค่าไอโอดีนของน้ำมันพืชหรือสัตว์เป็นชี้บอกถึงปริมาณกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวในน้ำมันนั้นๆ น้ำมันที่มีองค์ประกอบกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวสูงจะมีค่าไอโอดีนสูง ซึ่งเกิดการรวมตัวที่เป็นปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรซ์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่าน้ำมันที่มีค่าไอโอดีนต่ำกว่าถ้าใช้น้ำมันพืชที่ถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงมีค่าตัวเลขค่าไอโอดีนต่ำก็จะป้องกันการเกิดพอลิเมอร์ไรซ์ของน้ำมันพืชในเครื่องยนต์ได้ นอกจากนี้ น้ำมันพืชที่มีค่าไอโอดีนสูงจะสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในอากาศได้มาก ทำให้โครงสร้างของน้ำมันพืชเกิดการเสถียรภาพได้เป็นสารประเภทคีโตน แอลดีไฮด์ และกรดออกมาผสมอยู่ในน้ำมัน

### 2.7.5 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืด คือ ความหนืดเชิงจลศาสตร์ของน้ำมันดีเซลมีผลต่อรูปร่างของละอองน้ำมันที่ฉีดออกมาจากหัวฉีด ถ้าน้ำมันมีความหนืดเชิงจลศาสตร์สูงจะทำให้การฉีดเป็นฝอยไม่ดี ละอองน้ำมันใหญ่ การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ แต่หากน้ำมันมีความหนืดต่ำเกินไปจะทำให้ น้ำมันที่พ่นออกมาเป็นฝอยละเอียดมากแต่ไม่พุ่งไปไกลเท่าที่ควร ทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เช่นกัน เนื่องจากน้ำมันรวมตัวกับอากาศได้ไม่ดี ประสิทธิภาพด้านกำลังของเครื่องยนต์ก็จะลดลง

ตารางที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติมาตรฐานของไบโอดีเซล

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

## 2.8 ประโยชน์ของการใช้ไบโอดีเซล [9]

### 2.8.1 ประโยชน์ของการใช้ไบโอดีเซลในเครื่องยนต์

การใช้น้ำมันพืชเพื่อทดแทนน้ำมันจากซากดึกดำบรรพ์ในเครื่องยนต์ในประเทศไทย ได้รับความสนใจมาเป็นเวลานานแล้ว และเมื่อมีการประชาสัมพันธ์ เรื่องการใช้น้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ทดแทนน้ำมันดีเซลตามแนวพระราชดำริในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว พสกนิกรรวมทั้งหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชนก็ร่วมมือกันทดลองใช้อย่างกว้างขวางและหลากหลายรูปแบบ

การใช้น้ำมันพืชเพื่อทดแทนน้ำมันดีเซลนั้นสามารถทำได้หลายแนวทาง สิ่งที่ต้องคำนึงถึง คือ ต้องลดความหนืดของน้ำมันพืชให้ต่ำลงมาอยู่ในระดับเดียวกับน้ำมันดีเซล ความหนืดควรต่ำกว่า 4.2 cst ที่อุณหภูมิ 40°C นอกจากนี้ผู้ใช้ก็ควรคำนึงถึงคุณสมบัติด้านอื่นๆของน้ำมันพืชด้วย เช่น ค่าซีเทน ค่าจุดไหลเท เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8.2 ประโยชน์ของการใช้ไบโอดีเซลด้านสิ่งแวดล้อม

การใช้ไบโอดีเซลสามารถลดมลพิษทางอากาศ ซึ่งเป็นผลจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ คณะกรรมการไบโอดีเซลแห่งชาติ (National Biodiesel Board) และสำนักงานป้องกันสิ่งแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา (US Environmental Agency) ได้ทำการวิจัยและทดลองใช้น้ำมันไบโอดีเซลสูตรต่างๆ กับเครื่องยนต์ดีเซลและได้รายงานว่ามีไบโอดีเซล B100 และ B20 สามารถลดมลพิษจากการเผาไหม้ได้อย่างมีนัยสำคัญ ในส่วนกรมอุทกศาสตร์เรือกองทัพเรือก็ได้รายงานผลการทดลองใช้น้ำมันไบโอดีเซลกับเครื่องยนต์ดีเซลว่าสามารถลดควันดำได้มากกว่าร้อยละ 50 และสามารถลดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ได้ร้อยละ 20 ลดฝุ่นละอองได้ร้อยละ 39 ลดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ร้อยละ 99 นอกจากนี้การใช้ไบโอดีเซลทดแทนน้ำมันดีเซลนั้นสามารถดวงจรชีวิต (life-cycle) ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ได้ร้อยละ 78 ซึ่งเป็นผลให้ลดภาวะโลกร้อน (U.S. Department of Energy, 2004)

## 2.8.3 การใช้ไบโอดีเซลสามารถลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจกเพราะผลิตจากพืช

การใช้ไบโอดีเซลสามารถลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจกเพราะผลิตจากพืชการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ช่วยลดการนำน้ำมันที่ใช้แล้วไปประกอบอาหารซ้ำ และยังช่วยป้องกันมิให้น้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ซึ่งมีสารไดออกซินที่เป็นสารก่อมะเร็ง ไปผลิตเป็นอาหารสัตว์

## 2.8.4 ประโยชน์ของการใช้ไบโอดีเซลด้านสมรรถนะเครื่องยนต์

การผสมไบโอดีเซลในระดับร้อยละ 1-2 สามารถช่วยเพิ่มดัชนีการหล่อลื่นให้กับน้ำมันดีเซลจากผลการทดลองของสถาบันวิจัยและเทคโนโลยีของบริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน) พบว่าการเติมไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว และน้ำมันมะพร้าวในอัตราร้อยละ 0.5 สามารถเพิ่มดัชนีการหล่อลื่นได้ถึง 2 เท่า ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีขึ้นเนื่องจากในไบโอดีเซลมีออกซิเจนผสมอยู่ประมาณร้อยละ 10 ทำให้การผสมระหว่างอากาศกับน้ำมันมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และเป็นการเพิ่มอัตราส่วนปริมาตรของอากาศต่อน้ำมันได้เป็นอย่างดี จึงทำให้เผาไหม้ในกระบอกสูบเป็นไปอย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ค่าแรงบิดเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 7.5 และให้กำลังเพิ่มขึ้นร้อยละ 12 เมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล ถึงแม้ว่าค่าความร้อนของไบโอดีเซลจะต่ำกว่าน้ำมันดีเซลประมาณร้อยละ 10 แต่ข้อดีนี้ไม่มีผลกระทบต่อการใช้งานเพราะการใช้ไบโอดีเซลทำให้การเผาไหม้ดีขึ้นจึงทำให้กำลังเครื่องยนต์ไม่ลดลง

## 2.8.5 ประโยชน์ของการใช้ไบโอดีเซลด้านเศรษฐศาสตร์

การใช้ไบโอดีเซลช่วยสร้างงานในชนบทด้วยการสร้างตลาดพลังงาน ไร่รองรับผลผลิตทางการเกษตรที่เหลือจากการบริโภคการใช้ไบโอดีเซล สามารถช่วยลดการนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศได้บางส่วน ซึ่งในแต่ละปีประเทศไทยสูญเสียเงินตราต่างประเทศเพื่อนำเข้าน้ำมันดิบกว่า 300,000 ล้านบาท

## 2.8.6 ประโยชน์ของการใช้ไบโอดีเซลด้านการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงในประเทศ

ประเทศไทยมีสัดส่วนการใช้น้ำมันดีเซลสูงกว่าน้ำมันเบนซินมาก ตลาดน้ำมันดีเซลในประเทศไทยมีมูลค่ามากกว่าน้ำมันเบนซินกว่า 2 เท่า และในอนาคตมีแนวโน้มที่โรงกลั่นอาจจะผลิตน้ำมันดีเซลไม่เพียงพอต่อการใช้ภายในประเทศ ดังนั้นการใช้ไบโอดีเซลจึงช่วยลดความไม่สมดุลของการผลิตของโรงกลั่นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การผสมน้ำมันไบโอดีเซลในอัตราส่วนร้อยละ 1-2 สามารถเพิ่มความหล่อลื่นในน้ำมันดีเซลได้ โดยเฉพาะกรณีที่จะมีการลดปริมาณกำมะถันในน้ำมัน

## 2.9 ผลกระทบของไบโอดีเซลที่มีต่อเครื่องยนต์ [14]

ไบโอดีเซลช่วยหล่อลื่นแทนกำมะถัน และลดฝุ่นละอองหรือควันดำ ที่เรียกว่า particulate matter ให้ต่ำลง โดยไม่ทำให้เครื่องยนต์อุดตันเพราะเผาไหม้หมด

เนื่องจากน้ำมันไบโอดีเซลตามมาตรฐานสากลนั้น มีคุณสมบัติเทียบเคียงได้กับน้ำมันดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปิโตรเลียม ดังนั้นผลกระทบต่อเครื่องยนต์ถือได้ว่าไม่มีผลทางด้านลบ หรือในกรณีของเครื่องยนต์เก่าอาจมีความจำเป็นต้องเปลี่ยนซีลยางบางส่วนเท่านั้นเอง โดยทั่วไปการใช้ไบโอดีเซลในต่างประเทศนั้นนิยมนำไปผสมเป็นสูตรต่าง ๆ ดังนี้

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

- B5 (ไบโอดีเซล 5% : ดีเซล 95%) มีจำหน่ายทั่วไปในประเทศฝรั่งเศส โดยกว่าครึ่งหนึ่งของน้ำมันดีเซลที่จำหน่ายเป็นน้ำมันสูตร B5

- B20 (ไบโอดีเซล 20% : ดีเซล 80%) เป็นน้ำมันผสมที่คณะกรรมการไบโอดีเซลแห่งชาติ และสำนักงานป้องกันสิ่งแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา แนะนำให้ใช้ตามกฎหมายยานยนต์เชื้อเพลิงทดแทนของประเทศ ปัจจุบันนิยมใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกา

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

- B100 (ไบโอดีเซล 100%) เป็นน้ำมันไบโอดีเซล 100% ที่ใช้ในประเทศเยอรมนีและออสเตรีย โดยได้รับการรับรองจากบริษัทผู้ผลิตรถยนต์รายใหญ่ของประเทศ

ตารางที่ 2.7 แสดงการเปรียบเทียบผลการใช้ไบโอดีเซล 100% (B100) และน้ำมันดีเซลซึ่งผสมด้วยไบโอดีเซล 20% (B20)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

G.M. Maksimov และคณะ [15] ในปี ค.ศ.2000 ได้สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดกรด (Solid acid catalyst)  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$  และศึกษาถึงลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (IR), ทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray diffraction, XRD), นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Solid state  $^{117}\text{Sn}$  NMR) และ Adsorbed pyridine thermodesorption โดยตัวเร่งปฏิกิริยานั้นประกอบด้วย  $\text{SnO}_2$  ที่ปกคลุมด้วย  $\text{W(VI)}$  ที่มีการจัดตัวแบบ octahedral ในรูป heteropolyacids ซึ่งความแรงของกรด (Acidity) มีค่าสูงกว่าของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{WO}_3/\text{ZrO}_2$  นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$  ยังแสดงให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาได้สูง เมื่อใช้ในการเร่งปฏิกิริยาในวัฏภาคของเหลว

Sandra Einloft และคณะ [16] ในปี ค.ศ.2008 ได้ศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันรำข้าวกับเมทานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ เช่น กรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), tin chloride dihydrate ( $\text{SnCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), tin-2-ethylhexanoate ( $\text{Sn}(\text{C}_8\text{H}_{15}\text{O}_2)_2$ ), dibutyl tin oxide ( $(\text{C}_4\text{H}_9)_2\text{SnO}$ ) และ dibutyl tin dilaurate ( $(\text{C}_4\text{H}_9)_2\text{Sn}(\text{C}_{12}\text{H}_{23}\text{O}_2)_2$ ) ซึ่งเรียกชื่อในทางการค้าว่า DBTDL ปฏิกิริยาดำเนินไปใน Batch Reactor ขนาด 125 มิลลิลิตร ภายใต้อุณหภูมิรีฟลักซ์ (ประมาณ  $60^\circ\text{C}$ ) อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันรำข้าวต่อตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 400:100:1 จากผลการวิจัยพบว่า DBTDL เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการผลิตเมทิลเอสเทอร์ โดยให้ร้อยละผลได้สูงสุด 70% ที่เวลาของปฏิกิริยา 250 นาที

Man Kee Lam และคณะ [17] ในปี ค.ศ.2010 ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันที่มีกรดไขมันอิสระสูงให้เปลี่ยนเป็นไบโอดีเซลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาซัลเฟตทินออกไซด์บนซิลิกา ( $\text{SO}_4^{2-}/\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$ ) โดยใช้ตัวทำละลายร่วม (Co-solvent) เพื่อเพิ่มความสามารถในการละลายเข้ากันของน้ำมันและเมทานอล จากผลการวิจัยพบว่าเมื่อใช้ไบโอดีเซลเป็นตัวทำละลายร่วมร้อยละผลได้ของ Fatty acid methyl ester (FAME) สูงถึง 88.2% ขณะที่เมื่อไม่ใช้ตัวทำละลายร่วมได้ผลร้อยละผลได้ของ FAME เพียง 58% สภาวะของปฏิกิริยาที่ให้ร้อยละของ FAME สูงสุดคือเวลาของปฏิกิริยา 1.5 ชั่วโมง อุณหภูมิของปฏิกิริยา  $150^\circ\text{C}$  อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 15 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 6% โดยน้ำหนักของน้ำมัน

Man Kee Lam และคณะ [18] ในปี ค.ศ.2011 ศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันพืชใช้แล้วกับเมทานอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Sulfated tin oxide ( $\text{SO}_4^{2-}/\text{SnO}_2$ ) ซึ่งมีความเป็นกรดสูง โดยเตรียมจากวิธีทำให้ชุ่ม (Impregnation Method) นอกจากนั้นยังได้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผสมระหว่าง  $\text{SO}_4^{2-}/\text{SnO}_2$  กับ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{SO}_4^{2-}/\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$  และ  $\text{SO}_4^{2-}/\text{SnO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) จากผลการวิจัยพบว่า  $\text{SO}_4^{2-}/\text{SnO}_2\text{-SiO}_2$  ที่ปริมาณ 3 wt% ให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุด 92.3% ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยา  $150^\circ\text{C}$  อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 15 และเวลาของปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Antonio Jimenez-Lopez และคณะ [19] ในปี ค.ศ.2011 ทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดที่เป็นของแข็ง  $WO_x$  ถูกเติมบนตัวรองรับ (Support) เซอร์โคเนียมเจือ MCM-41 silica โดยเติม  $WO_3$  บนตัวรองรับตั้งแต่ 5 ถึง 25 wt.% ด้วยวิธีการเอ็บซุ่ม (Impregnation) แอมโมเนียมเมตาซังสเตต  $((NH_4)_6H_2W_{12}O_{40} \cdot 4H_2O)$  และหลังจากทำการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสแล้ว ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันดอกทานตะวันกับเมทานอลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2.5 ชั่วโมง โดยได้ผลผลิตที่เป็นไบโอดีเซลมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการเติม 15 wt.%  $WO_3$  มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงสุด (มีผลผลิต Fatty acid methyl ester หรือ FAME สูงถึง 82 wt.%) ซึ่งสามารถเร่งปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันและทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันที่ใช้แล้ว (Used oils) ได้อย่างต่อเนื่อง ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถนำมาใช้ซ้ำได้ 3 ครั้ง โดยไม่จำเป็นต้องทำการบำบัด

Wenlei Xie และคณะ [5] ในปี ค.ศ.2013 เป็นงานวิจัยที่ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน (Transesterification) จากน้ำมันถั่วเหลือง เพื่อผลิตไบโอดีเซล หรือ Fatty acid methyl ester (FAME) โดยใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์ ( $WO_3/SnO_2$ ) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดกรด และได้ทำการศึกษาอิทธิพลจากตัวแปรที่ใช้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาในสภาวะต่างๆ ที่มีผลต่อผลผลิตตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์ถูกเตรียมด้วยวิธีการเอ็บซุ่ม (Impregnation) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการเติมทั้งสแตนปริมาณ 30 wt.% และเผาที่อุณหภูมิ 1173 K จะมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาดีที่สุด สารตั้งต้นสามารถเปลี่ยนไปเป็นไบโอดีเซลได้สูงสุด (Conversion) 79.2% โดยใช้สัดส่วนโมลาร์ของเมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลืองเท่ากับ 30:1 และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 wt.% ของทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์ ซึ่งผ่านการทำปฏิกิริยา 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 453 K ตัวเร่งปฏิกิริยานั้นสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ 4 ครั้ง โดยไม่มีผลต่อการเสื่อมสภาพมากนัก (deactivation) จากการที่ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกับกรดไขมันอิสระ (Free fatty acids หรือ FFAs) ในน้ำมันและไม่วางไว้นานเกินไป ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมมานั้นมีประสิทธิภาพในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันราคาถูก

Yahaya Muhammad Sani และคณะ [18] ในปี ค.ศ.2014 ศึกษาและรวบรวมบทความทางวิชาการในปัจจุบันเกี่ยวกับการเร่งปฏิกิริยาและประโยชน์ต่างๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งชนิดกรดที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล โดยได้ศึกษารายละเอียดในวิธีการเตรียม และสภาวะต่างๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์ชนิดกรด (Homogeneous acid catalysts) ได้รับความยอมรับอย่างกว้างขวางจากการที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง อย่างไรก็ตามในการบำบัดน้ำเสียและการสูญเสียตัวเร่งปฏิกิริยาไปนั้นส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูง นำไปสู่การค้นหาทางเลือกอื่นๆ เพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้ ต่อมาการผลิตไบโอดีเซลที่ถูกเร่งด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดเบส (Heterogeneous base catalysts) ซึ่งได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเพราะสามารถลดปัญหาในการนำกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration and recycling) ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์ชนิดกรด แต่ต้นทุนในการผลิตยังคงสูงอยู่ เพราะจำเป็นต้องกลั่นวัตถุดิบ (feedstock) ก่อนที่จะนำมาทำปฏิกิริยา ซึ่งมีราคาสูงถึง 88% ของราคา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การผลิตทั้งหมด ดังนั้นจึงมีหลายงานวิจัยพยายามที่จะออกแบบและพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดแบบของแข็ง เป้าหมายเพื่อลดต้นทุนในการผลิต

ศุภกร พิบูลย์วรวงศ์และคณะ [11] ในปี ค.ศ.2016 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มและเมทานอลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดกรด คือ ซัลเฟตเตตินออกไซด์ โดยมีการนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปตรวจสอบหาโครงสร้างด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD) วิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray Fluorescence, XRF) พิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR) และดูลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาถึงตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกในการสังเคราะห์ซัลเฟตเตตินออกไซด์ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และเวลาในการทำปฏิกิริยา จากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ให้ได้ปริมาณสูงที่สุด โดยใช้ซัลเฟตเตตินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกเผาที่อุณหภูมิ 400 °C อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มเป็น 12:1 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 4 โดยเทียบกับน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 4 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 180 °C และนอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ด้านเชื้อเพลิงของไบโอดีเซล พบว่าเลขไอโอดีนและค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 สารเคมี

- 1) น้ำมันปาล์มมรกต บริษัท มรกต อินดัสตรีส์ จำกัด (มหาชน)
- 2) เมทานอล (Methanol,  $\text{CH}_3\text{OH}$ ) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Fisher Carlo Erba
- 3) ทินออกไซด์ (Tin(IV) oxide,  $\text{SnO}_2$ ) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท S.M Chemical Supplies
- 4) โซเดียมทังสเตตไดไฮเดรต (Sodium tungstate dehydrate,  $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) เกรดวิเคราะห์ จาก บริษัท ITALMAR (THAILAND)
- 5) อะซิโตน (Acetone,  $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ ) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Lab Scan
- 6) โซเดียมซัลเฟตแอนไฮไดรอส (Sodium sulphate anhydrous crystals,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
- 7) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide, KOH) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Lab Scan
- 8) โพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide, KI) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
- 9) เอทานอล (Ethanol,  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Lab Scan
- 10) ฟีนอล์ฟทาเลอิน (Phenolphthalein,  $\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$ ) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
- 11) ไดเอทิลอีเทอร์ (Diethyl ether,  $(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}$ ) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba
- 12) ไอโอดีน (Iodine,  $\text{I}_2$ ) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erbe
- 13) กรดแอซิติก (Acetic acid,  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Lab Scan
- 14) คลอโรฟอร์ม (Chloroform,  $\text{CHCl}_3$ ) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Lab Scan
- 15) โซเดียมไทโอซัลเฟต (Sodium thiosulfate,  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Lab Scan
- 16) น้ำปราศจากไอออน (Deionized water, DI)
- 17) แป้ง (Starch) ตราโบว์แดง เกรดการค้า

### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 1) เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (X-ray Diffraction Spectrophotometer, XRD) ยี่ห้อ Siemets รุ่น D8 Advance
- 2) เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (X-ray Fluorescence, XRF) ยี่ห้อ Philips รุ่น PW2004
- 3) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ LEO 1450 VP
- 4) เครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น FT-IR SPECTRUM GX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5) เครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Nuclear Magnetic Resonance Spectrophotometer, FT-NMR) ยี่ห้อ BRUKER รุ่น Advance DPX 300
- 6) เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Parr Reactor) รุ่น 4848
- 7) เครื่องวิเคราะห์พลังงานความร้อน (Bomb Calorimeter) ยี่ห้อ IKA รุ่น C2000 basic
- 8) เครื่อง BET- Autosorb-1C Surface Area and Pore Size Analyzer
- 9) Hotplate/stirrer ยี่ห้อ Fisher Scientific
- 10) เครื่องชั่งไฟฟ้า 2 และ 4 ตำแหน่ง
- 11) ขวดรูปخمพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 12) ปีกเกอร์ ขนาด 100 มิลลิลิตร
- 13) ปีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 14) ปีกเกอร์ ขนาด 600 มิลลิลิตร
- 15) กรวยแยก ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 16) ปิเปต ขนาด 10 มิลลิลิตร
- 17) กระบอกตวง ขนาด 10 มิลลิลิตร และ 50 มิลลิลิตร
- 18) แท่งแก้วคน
- 19) ซ้อนตักสาร
- 20) ขาตั้งและที่จับ
- 21) เตอบ ยี่ห้อ Memmert
- 22) เตาเผา ยี่ห้อ Chavachote
- 23) กรวยแก้ว
- 24) กระจกนาฬิกา
- 25) กระจกชยุนิเวอร์แซลอินดิเคเตอร์
- 26) ชุดกรองบุชเนอร์
- 27) กระจกฟอยด์
- 28) หลอดหยด
- 29) กระจกกรอง เบอร์ 41,42 และ 2
- 30) ขวดสเปรย์
- 31) กระบอกน้ำกลั่น
- 32) ครุชีเบล

### 3.3 วิธีการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ

- 1) การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสเดนออกไซด์บนทินออกไซด์
- 2) การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) การสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์
- 4) การทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเมทิลเอสเทอร์

### 3.3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนออกไซด์บนทินออกไซด์

1. ชั่ง  $\text{SnO}_2$  10 กรัม ใส่ลงในกระเจกนาฬิกา
2. ชั่ง  $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  0.897 กรัม ใส่ลงในน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร คนให้ละลาย จากนั้นเทใส่ขวดสเปรย์ แล้วพ่นลงไปบน  $\text{SnO}_2$  ที่เตรียมไว้
3. นำสารที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4. นำตัวเร่งปฏิกิริยาไปเผา ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5wt.%  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$
5. นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการเผา ไปเก็บในเดซิเคเตอร์ ก่อนนำไปส่งตรวจวิเคราะห์
6. ทำการทดลองซ้ำในข้อ 1-5 โดยชั่ง  $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  1.7942, 2.6913, 3.5884, 5.3825 และ 7.1767 กรัม จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณของทังสเตนออกไซด์บนทินออกไซด์เป็น 10, 15, 20, 30 และ 40wt.%  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$  ตามลำดับ โดยอุณหภูมิที่ทำการเผาของแต่ละตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$  ที่ทำการเตรียมและอุณหภูมิที่ทำการเผา

ชนิดของ $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$	อุณหภูมิที่เผา ( $^{\circ}\text{C}$ )
5wt.% $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$	800
10wt.% $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$	700
10wt.% $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$	800
10wt.% $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$	900
15wt.% $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$	800
20wt.% $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$	800
30wt.% $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$	800

### 3.3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนบนทินออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ จะถูกนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบและลักษณะความเป็นผลึก ด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD), วิเคราะห์หาร้อยละองค์ประกอบของธาตุและสารประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เครื่องเอกซ์เรย์-ฟลูออเรสเซนส์ (X-Ray Fluorescence, XRF), วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM), วิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยใช้เครื่อง BET- Autosorb-1C Surface Area Analyzer และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและพันธะบนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)



รูปที่ 3.2 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (XRF)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



รูปที่ 3.4 เครื่อง BET-Autosorb-1C Surface Area Analyzer



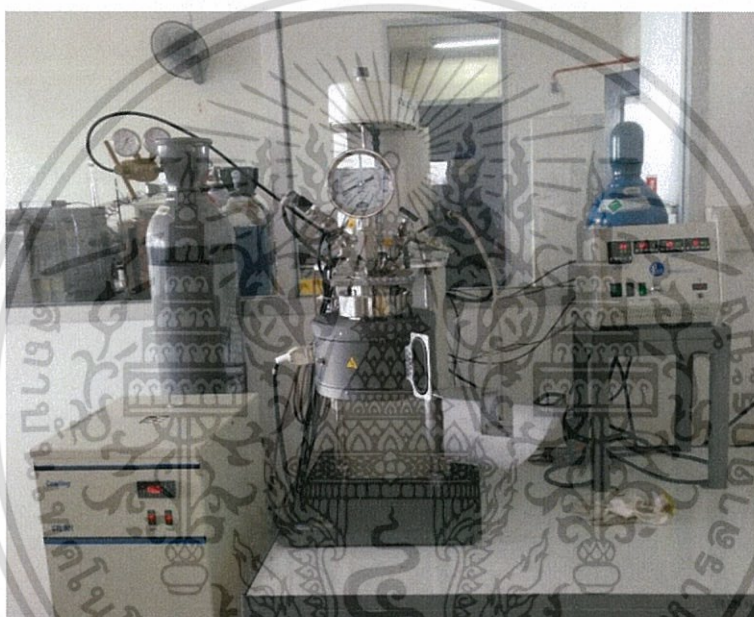
รูปที่ 3.5 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 การสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์

ในการทดลองนี้ จะทำการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของ น้ำมันปาล์มและเมทานอลโดยเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์ โดยขั้นตอนในการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ จะใช้เครื่อง Parr Reactor ในการทำปฏิกิริยา

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



รูปที่ 3.6 เครื่อง Parr Reactor

ขั้นตอนในการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ เป็นดังนี้

- 1) นำน้ำมันปาล์มประมาณ 100 กรัม เมทานอล 33.8 กรัม (อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อ น้ำมันปาล์มเป็น 9:1) และตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 800°C ปริมาณ 2 กรัม (ปริมาณ ตัวเร่งปฏิกิริยา 2wt.%) ใส่ลงในถังปฏิกรณ์ แล้วทำการประกอบถังและขันน็อตให้แน่น
- 2) เปิด Controller แล้วจึงเปิดระบบหล่อเย็น โดยตั้งค่าอุณหภูมิ 15°C เพื่อช่วยให้อุณหภูมิใน Reactor ไม่สูงเกินที่ตั้งค่าไว้
- 3) ทำการเปิดวาล์ว Gas Inlet Valve เพื่อให้บรรจุแก๊สไนโตรเจน 10 บาร์ โดยดูค่าความดันได้ ทั้งจาก Pressure Gate และ Monitor ของ Controller ที่ Pressure Display Module ว่า ความดันคงที่หรือไม่

- 4) เมื่อตรวจดูแล้วว่าไม่มีแก๊สรั่วไหล แล้วจึงตั้งค่าอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาไว้ที่  $150^{\circ}\text{C}$  และเปิด Heater
- 5) เปิด Motor แล้วทำการตั้งค่าความเร็วรอบไว้ที่ 600 รอบต่อนาที
- 6) เมื่อปฏิกิริยาดำเนินเสร็จตามเวลาที่กำหนดไว้ คือ 2 ชั่วโมง จึงทำการตั้งค่าอุณหภูมิใหม่ให้อยู่ที่  $40^{\circ}\text{C}$  เพื่อให้เครื่องทำการ Cool down ลง และปิด heater
- 7) รอจนอุณหภูมิลดลงตามที่ตั้งค่าไว้ ทำการหมุนความเร็วรอบให้ลดลงจนกลายเป็นศูนย์ ปิด Motor เปิดวาล์วเพื่อระบายแก๊สจนความดันเท่ากับศูนย์ แล้วจึงปิดสวิทช์ เพื่อปิดเครื่องปฏิกรณ์
- 8) ทำการชันน็อตแล้วปลดล๊อคถังปฏิกรณ์ หลังจากนั้นกรองของผสมแบบลดความดันเพื่อแยกตัวเร่งปฏิกิริยา
- 9) นำของเหลวที่กรองได้เทใส่ลงในกรวยแยก ปล่อยให้เกิดการแยกชั้นระหว่างชั้นเมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอล โดยชั้นเมทิลเอสเทอร์จะมีสีออกเหลืองใส หรือน้ำตาลอ่อนใส ส่วนชั้นกลีเซอรอลจะมีสีออกน้ำตาลเข้ม ดังรูปที่ 3.7

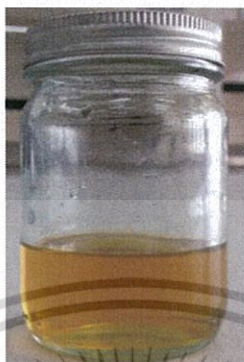


รูปที่ 3.7 แสดงการแยกชั้นของเมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอลในกรวยแยก

- 10) ไขแยกชั้นกลีเซอรอลออกไป แล้วล้างชั้นเมทิลเอสเทอร์ด้วยน้ำกลั่นจนได้ชั้นเมทิลเอสเทอร์ที่มีลักษณะขุ่นเล็กน้อยและมีสภาพเป็นกลาง โดยทดสอบด้วยกระดาษยูนิเวอร์แซลอินดิเคเตอร์
- 11) ดูดน้ำที่ปะปนกับเมทิลเอสเทอร์โดยใช้โซเดียมซัลเฟตแอนไฮดรัสจะได้เมทิลเอสเทอร์ที่ใสตามรูปที่ 3.8 จากนั้นทำการกรองแอนไฮดรัสโซเดียมซัลเฟตออกไป
- 12) นำเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ไปคำนวณหาร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ และนำไปหาค่าความเป็นกรด เลขไอโอดีน ค่าความร้อน และพิสจูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 13) สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่กรองแยกออกจากของผสม นำมาทำการล้างด้วยอะซิโตน แล้วจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$  เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง
- 14) ทำซ้ำขั้นตอนตั้งแต่ ข้อที่ 1) – 13) ตามสภาวะต่างๆตามตารางที่ 3.1–3.8



รูปที่ 3.8 เมทิลเอสเทอร์ที่ผ่านการดูน้ำด้วยโซเดียมซัลเฟตแอนไฮดรัส

ในการทดลองตามตารางที่ 3.1 จะเป็นการนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ ไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน เพื่อคัดเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุด มาทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรอื่นๆ ต่อไป ดังแสดงในตารางที่ 3.2–3.8

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรในการศึกษาผลของปริมาณทั้งสเทนออกไซด์บนทินออกไซด์ ที่มีผลต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณทั้งสเทนบนทินออกไซด์ (wt.%)	โมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ( $^{\circ}\text{C}$ )	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)
5% $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$	5	9:1	2	150	2
10% $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$	10	9:1	2	150	2
15% $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$	15	9:1	2	150	2
20% $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$	20	9:1	2	150	2
30% $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$	30	9:1	2	150	2
40% $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$	40	9:1	2	150	2
$\text{SnO}_2$	-	9:1	2	150	2
$\text{WO}_3$	-	9:1	2	150	2
ไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา	-	9:1	2	150	2

หมายเหตุ :  $\text{SnO}_2$  และ  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$  เผาที่อุณหภูมิ  $800^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรในการศึกษาผลของอุณหภูมิ ที่ใช้ในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิที่เผา (°C)	โมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)
ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจากตารางที่ 3.2	700 800 900	9 : 1	2	150	2

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรในการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน ที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิที่เผา (°C)	โมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)
ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจากตารางที่ 3.2	อุณหภูมิที่เหมาะสมจากตารางที่ 3.3	6 : 1 9 : 1 12 : 1 15 : 1	2	150	2

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรในการศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยา ที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิที่เผา (°C)	โมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)
ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจากตารางที่ 3.2	อุณหภูมิที่เหมาะสมจากตารางที่ 3.3	โมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มที่เหมาะสมจากตารางที่ 3.4	1 2 3 4	150	2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรในการศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิที่เผา (°C)	โมลของเมทานอลต่อ น้ำมันปาล์ม	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)
ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจากตารางที่ 3.2	อุณหภูมิที่เหมาะสมจากตารางที่ 3.3	โมลของเมทานอลต่อ น้ำมันปาล์มที่เหมาะสมจากตารางที่ 3.4	ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจากตารางที่ 3.5	120 150 180 200 220	2

ตารางที่ 3.7 ตัวแปรในการศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิที่เผา (°C)	โมลของเมทานอลต่อ น้ำมันปาล์ม	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)
ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจากตารางที่ 3.2	อุณหภูมิที่เหมาะสมจากตารางที่ 3.3	โมลของเมทานอลต่อ น้ำมันปาล์มที่เหมาะสมจากตารางที่ 3.4	ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจากตารางที่ 3.5	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมจากตารางที่ 3.6	2 4 6

ตารางที่ 3.8 ตัวแปรในการศึกษาเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการนำกลับมาใช้ใหม่

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิที่เผา (°C)	โมลของเมทานอลต่อ น้ำมันปาล์ม	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	จำนวนครั้งที่ทำปฏิกิริยา
ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจากตารางที่ 3.2	อุณหภูมิที่เหมาะสมจากตารางที่ 3.3	โมลของเมทานอลต่อ น้ำมันปาล์มที่เหมาะสมจากตารางที่ 3.4	ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจากตารางที่ 3.5	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมจากตารางที่ 3.6	เวลาที่เหมาะสมจากตารางที่ 3.7	1 2 3 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.4 การทดสอบสมบัติทางเชื้อเพลิงและโครงสร้างทางเคมีของเมทิลเอสเทอร์

1) ค่าความเป็นกรด (Acid value)

2) เลขไอโอดีน (Iodine value)

3) ค่าความร้อน (Heating value)

4) ศึกษาถึงลักษณะโครงสร้างทางเคมีของไบโอดีเซลโดยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด-สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform infrared Spectrophotometer, FT-IR) และเครื่องฟูเรียร์-ทรานส์ฟอร์มนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Nuclear Magnetic Resonance Spectrophotometer, FT-NMR)

#### 3.3.4.1 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (Acid value)

##### วิธีทำ

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

##### วิธีการคำนวณ

ให้  $g$  เป็นจำนวนกรัมของน้ำมันที่ใช้

ให้  $V$  เป็นจำนวนมิลลิลิตรของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต

จำนวนโมลของ KOH ที่ใช้ =  $0.01V / 1000$

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

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

ค่าความเป็นกรด =  $(0.01V) \times 56$

g

### 3.3.4.2 การวิเคราะห์หาเลขไอโอดีน (Iodine value)

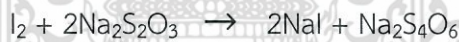
#### การเตรียมสารละลายยาน้ำไอโอดีน

ละลายไอโอดีน 13.2 กรัม ในกรดอะซิติกกลั่น 1 ลิตรนำไปอุ่นให้ร้อนเพื่อช่วยให้อิโอดีนละลายดีขึ้น เก็บสารละลายที่ได้ไว้ในขวดสีชาที่มีฝาปิดแน่น

#### วิธีทำ

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

#### 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 = จำนวนกรัมของน้ำมันที่ใช้

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

### 3.3.4.3 การวิเคราะห์หาค่าความร้อน (Heating value)

การทดสอบด้วยวิธีนี้ใช้เพื่อหาค่าความร้อนของตัวอย่างผง ของแข็งและของเหลว เช่น น้ำมัน ถ่านหิน วัสดุการเกษตร สิ่งแวดล้อมและอื่นๆ เป็นระบบ isoperibol และ dynamic มีหลักการทำงานโดยใส่ตัวอย่างลงไปในกลุ่มบอมป์เพื่อเผา จนตัวอย่างลุกไหม้ให้ความร้อนออกมา



รูปที่ 3.9 เครื่องวิเคราะห์พลังงานความร้อน (Bomb Calorimeter)

#### วิธีทำ

1. ชั่งตัวอย่างน้ำมันใส่ในถ้วยตัวอย่างประมาณ 0.5 กรัม จดบันทึกน้ำหนักที่ชั่งไว้
2. ใช้เชือกผูกกับเส้นลวดของแท่นตัวอย่าง แล้วจุ่มปลายเชือกลงในตัวอย่างน้ำมัน
3. จากนั้นนำแท่นตัวอย่างใส่ลงไปในลูกบอมป์วิเคราะห์ตัวอย่าง
4. เปิดวาล์วถังแก๊สออกซิเจน หลังจากที่ถูกอุณหภูมิของ Cooler มีค่าเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส
5. ทำการเปิดเครื่อง Bomb Calorimeter จนกราฟขึ้นบนหน้าจอ และมีข้อความขึ้นว่า "waiting OK for tests" จากนั้นกด Sample
6. ใส่น้ำหนักตัวอย่างน้ำมันที่จดบันทึกไว้ จากนั้นกด Tab ไปจนถึงช่อง Bomb cell แล้วใส่เลข 1
7. เมื่อเครื่องแสดงผลว่า Safety แล้ว จึงกด OK
8. ใส่ลูกบอมป์วิเคราะห์ตัวอย่างลงไปในเครื่อง แล้วกด Start
9. เมื่อเครื่องตรวจเสร็จ จะรายงานผลกราฟและข้อมูลพลังงานความร้อน
10. นำลูกบอมป์วิเคราะห์ตัวอย่างออก แล้วระบายความดันภายในลูกบอมป์วิเคราะห์ตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. ล้างทำความสะอาดลูกบอมบวิเคราะห์ตัวอย่างและถ้วยตัวอย่าง
12. จากนั้นทำการปิดเครื่อง Bomb Calorimeter โดย
  - 12.1 กด Maint.
  - 12.2 กด ▼ มาที่ O<sub>2</sub> fill เพื่อระบายแก๊สออกซิเจน ป้องกันการระเบิด
  - 12.3 ทำข้อ 12.1 และ 12.2 ซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อให้แน่ใจว่าแก๊สออกซิเจนได้ถูกปล่อยออกหมดแล้ว
  - 12.4 กด Maint.
  - 12.5 กด Close MC แล้วฝาจะปิดลง
  - 12.6 ปิดสวิสซ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มกับเมทานอล โดยใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการนำเสนอผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลองของงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ตอน คือ ตอนที่ 1 ศึกษาลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ ได้แก่ โครงสร้างและองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา และลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ตอนที่ 2 เป็นการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์และศึกษาถึงตัวแปรที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน ได้แก่ ปริมาณทั้งสแตนบนทินออกไซด์ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการนำกลับมาใช้ใหม่ และ ตอนที่ 3 เป็นการพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีและทดสอบสมบัติของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้

#### 4.1 การศึกษาลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา

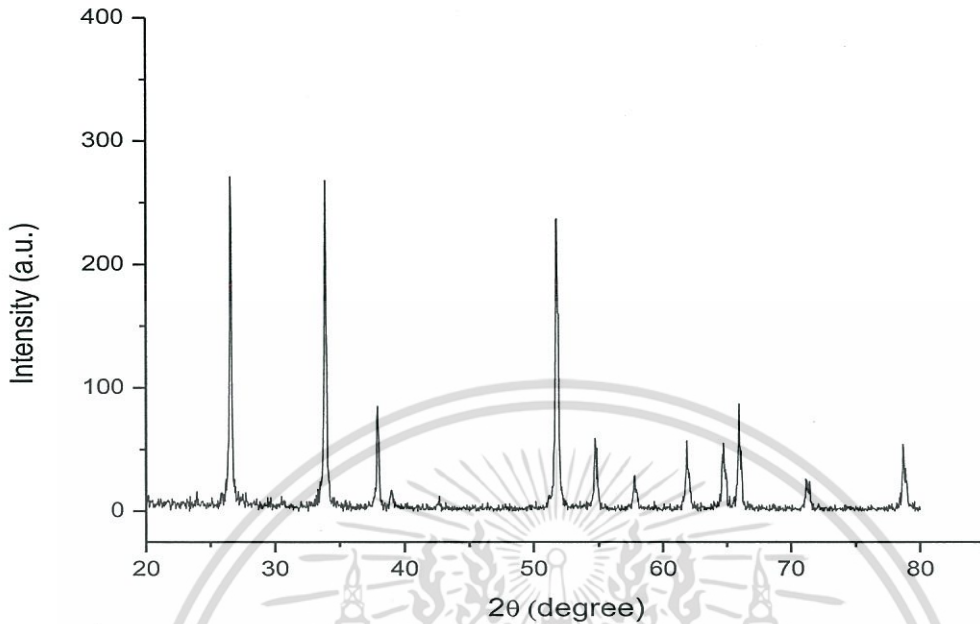
##### 4.1.1 โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ทินออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) และทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์ ( $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$ ) โดยสภาวะต่างๆ ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สภาวะที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{SnO}_2$  และ  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$

ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิที่เผา ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\text{SnO}_2$	400
30wt% $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$	700
30wt% $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$	800
30wt% $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$	900

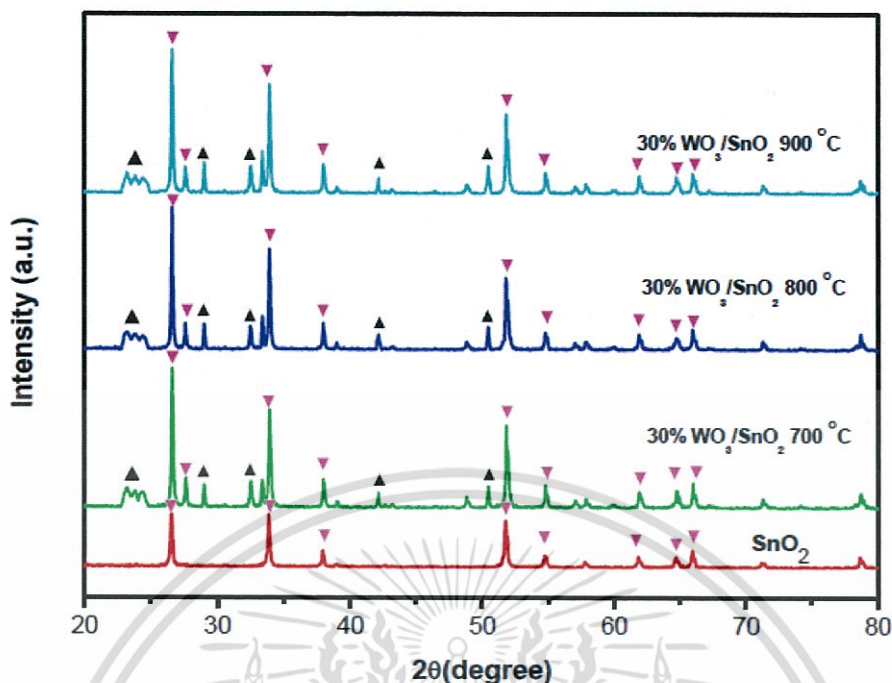
ในการศึกษาโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาทินออกไซด์ และทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์ จะใช้เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD) แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของทินออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ )

$\text{SnO}_2$  ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ  $400^\circ\text{C}$  มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ดังรูปที่ 4.1 โดยพบว่าที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $26.59^\circ$ ,  $33.88^\circ$ ,  $37.95^\circ$ ,  $51.78^\circ$ ,  $54.76^\circ$ ,  $57.85^\circ$ ,  $61.89^\circ$ ,  $64.76^\circ$  และ  $65.98^\circ$  (JCPDS database file, No.72-1147) เป็นพีคเอกลักษณ์ของ  $\text{SnO}_2$  ที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ tetragonal

เมื่อเติมทั้งสแตงลงบนทินออกไซด์ด้วยโซเดียมทังสเตตไดไฮเดรต ( $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 700, 800 และ  $900^\circ\text{C}$  เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิการเผาที่มีต่อโครงสร้างของ  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$  โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงดังรูปที่ 4.2 นอกจากนี้ยังทำการเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยา 10wt% และ 30wt%  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$  เพื่อดูความแตกต่างของรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการเติมปริมาณทั้งสแตงที่ต่างกัน ดังรูปที่ 4.3

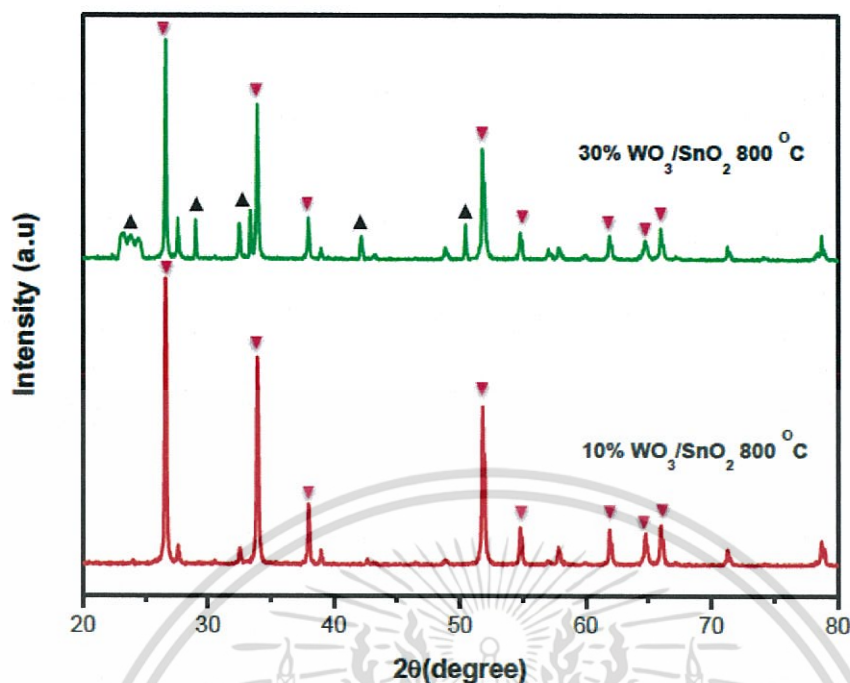


รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ SnO<sub>2</sub> และ 30wt% WO<sub>3</sub>/SnO<sub>2</sub> ที่อุณหภูมิ การเผา 700, 800 และ 900 °C

หมายเหตุ : SnO<sub>2</sub> (▼) , WO<sub>3</sub> (▲)

รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 30wt% WO<sub>3</sub>/SnO<sub>2</sub> เผาที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งพิกัดโดยรวมมีความคล้ายคลึงกัน คือพบพีก SnO<sub>2</sub> ที่มีมุม 2θ มีค่าเท่ากับ 26.59°, 33.88°, 37.95°, 51.78°, 54.76°, 57.85°, 61.89°, 64.76° และ 65.98° และพบพีก WO<sub>3</sub> ที่มีมุม 2θ มีค่าเท่ากับ 23.2°, 23.8°, 24.4°, 29.0°, 33.3°, 42.1° และ 50.4°

เมื่อเติม WO<sub>3</sub> ลงไป จะทำให้ SnO<sub>2</sub> มีความเป็นผลึกมากขึ้น สังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของ intensity ที่มีมุม 26.59°, 33.88°, 37.95° และ 51.78° ของรูปที่ 4.2 เมื่อเทียบกับรูป 4.1 ซึ่งเป็นรูปแบบ การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของทินออกไซด์ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา จะสังเกตเห็นว่า intensity ของ WO<sub>3</sub> และ SnO<sub>2</sub> ไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นไปได้ว่าการเพิ่มขึ้นของ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างความเป็นผลึกของ SnO<sub>2</sub>



รูปที่ 4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ 10wt%  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$  และ 30wt%  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$  เเผาะที่อุณหภูมิ  $800^\circ\text{C}$

หมายเหตุ :  $\text{SnO}_2$  ( $\nabla$ ) ,  $\text{WO}_3$  ( $\blacktriangle$ )

เมื่อทำการเปรียบเทียบการเติมปริมาณทั้งสแตน 10wt% และ 30wt%  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$  พบว่าที่ 10wt% ไม่พบพีคของ  $\text{WO}_3$  เกิดขึ้น และมี intensity ของ  $\text{SnO}_2$  มากกว่าของ 30wt% ในขณะที่ 30wt% นั้น พบพีคของ  $\text{WO}_3$  เกิดขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการเติมทั้งสแตนออกไซด์ที่ 10wt% นั้นเกิดการกระจายตัวของทั้งสแตนออกไซด์บนพื้นผิวของทินออกไซด์มาก จึงอาจยังอยู่ในลักษณะความเป็นอสัณฐาน (Amorphous) ไม่เกาะรวมกันเป็นผลึกมากพอที่จะสามารถตรวจพบพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (Diffraction peak) ได้

ในทางกลับกัน เมื่อเติมทั้งสแตนไปมากพอในระดับหนึ่ง ทำให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่ดีแล้วรวมกันเกิดเป็นผลึกเกิดขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Z. Zhaoyan และคณะ [21] ที่ทำการศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาะตัวรองรับทินออกไซด์ และตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$  เพื่อใช้เร่งปฏิกิริยา Catalytic Oxidation ของ 1,2-benzenedimethanol โดยใช้  $\text{H}_2\text{O}_2$  เป็น Oxidizing agent ซึ่งทางคณะพบว่า เมื่อเติมทั้งสแตนออกไซด์ไปในปริมาณที่น้อย ทั้งสแตนออกไซด์จะอยู่ในรูปอสัณฐาน ดังนั้นจึงไม่ปรากฏเห็นพีคทั้งสแตนออกไซด์ในรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ถึงแม้ในงานวิจัยนี้จะทำการเติมทั้งสแตนออกไซด์ไปในปริมาณที่สูงถึง 25wt% แต่กลับไม่พบพีคของ  $\text{WO}_3$  ขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าทั้งสแตนออกไซด์ยังสามารถไปยับยั้งการเกิดเป็นผลึกของทินออกไซด์ได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 องค์ประกอบของธาตุบนตัวเร่งปฏิกิริยา

นำตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์ที่ปริมาณทั้งสแตน 30wt% มาทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรมิเตอร์ (X-ray Fluorescence Spectrometer, XRF Spectrometer) ซึ่งปริมาณธาตุดีบุก (Sn) และธาตุทั้งสแตน (W) บนตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุดีบุกกับธาตุทั้งสแตนบนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray Fluorescence Spectroscopy)

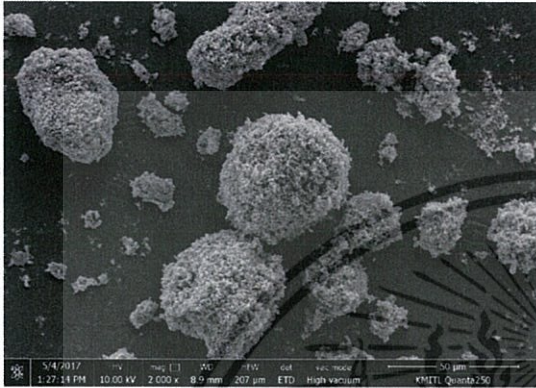
ธาตุ	ปริมาณธาตุบนตัวเร่งปฏิกิริยา (%)
ดีบุก (Sn)	81.36
ทั้งสแตน (W)	17.10

หมายเหตุ : ตัวเร่งปฏิกิริยา 30wt%  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$  เผาที่อุณหภูมิ  $800^\circ\text{C}$

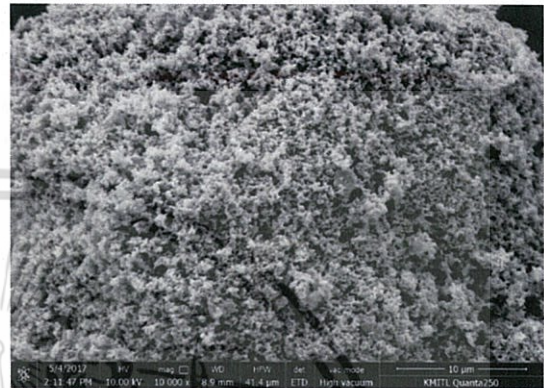
จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุบนตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์พบว่าประกอบไปด้วยธาตุดีบุกและธาตุทั้งสแตนเป็นส่วนใหญ่ โดยธาตุ W มาจากหมู่  $\text{WO}_3$  จึงสามารถพิสูจน์ได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$  มีหมู่  $\text{WO}_3$  อยู่จริง

#### 4.1.3 ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

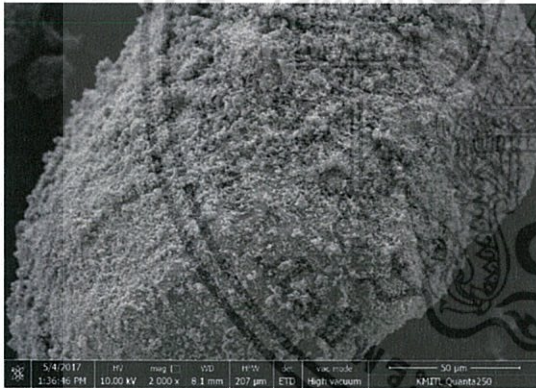
นำทินออกไซด์ และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์ก่อนทำปฏิกิริยาและหลังทำปฏิกิริยา มาทำการศึกษาลักษณะพื้นผิว โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) โดยในรูปที่ 4.4 เป็นลักษณะพื้นผิวของ  $\text{SnO}_2$  และ  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$



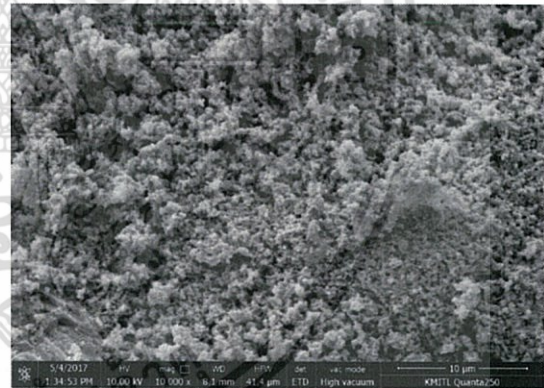
ก)  $\text{SnO}_2$  (กำลังขยาย 2,000 เท่า)



ข)  $\text{SnO}_2$  (กำลังขยาย 10,000 เท่า)



ค) 30wt%  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$   
(กำลังขยาย 2,000 เท่า)



ง) 30wt%  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$   
(กำลังขยาย 10,000 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จ) 30wt%  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$  ที่ผ่านการใช้งานแล้ว  
(กำลังขยาย 2000 เท่า)



ฉ) 30wt%  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$  ที่ผ่านการใช้งานแล้ว  
(กำลังขยาย 10,000 เท่า)

#### รูปที่ 4.4 ลักษณะพื้นผิวของ $\text{SnO}_2$ และ $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$ ที่กำลังขยายต่างๆ

จากรูปที่ 4.4 (ก) และ (ข) แสดงลักษณะพื้นผิวของ  $\text{SnO}_2$  ที่กำลังขยาย 2000 และ 10,000 เท่าตามลำดับ ซึ่งมีลักษณะขรุขระและรูปร่างไม่แน่นอน (Irregular shape) เมื่อเติม  $\text{WO}_3$  ลงบน  $\text{SnO}_2$  (รูปที่ 4.4 (ค) และ (ง))  $\text{WO}_3$  มีการกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous distribution) กับ  $\text{SnO}_2$  และมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่และมีความขรุขระมากกว่า  $\text{SnO}_2$

จากรูปที่ 4.4 (จ) และ (ฉ) แสดงลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 4 ครั้ง พบว่ามีขนาดอนุภาคเล็กลงอย่างเห็นได้ชัด และพื้นผิวมีลักษณะขรุขระน้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ยังไม่ได้ใช้งาน (รูปที่ 4.4 (ค) และ (ง)) อาจเป็นเพราะตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการเสื่อมสภาพระหว่างการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน และสังเกตได้ว่ามีสิ่งแปลกปลอมปะปนอยู่บนพื้นผิว ซึ่งอาจจะเป็นไขของน้ำมันที่หลงเหลืออยู่ แล้วไปบดบังพื้นผิวในการเกิดปฏิกิริยา ทำให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาลดลง

#### 4.1.4 พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา

นำทินออกไซด์ และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์ มาทำการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิค  $N_2$  adsorption-desorption โดยใช้เครื่อง BET- Autosorb-1C Surface Area and Pore Size Analyzer ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET

ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิที่เผา (°C)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m <sup>2</sup> /g)	ขนาดผลึก (nm)
SnO <sub>2</sub>	800	17.35	43.9871
10wt% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub>	800	10.17	49.7523
30wt% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub>	800	8.84	50.9017

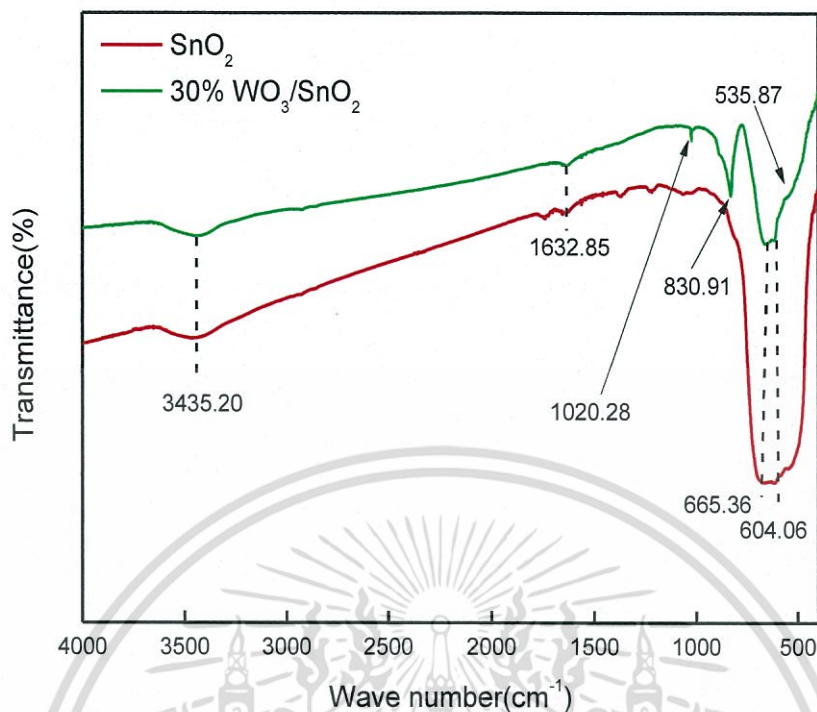
จากตารางที่ 4.3 ตัวรองรับทินออกไซด์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 17.35 m<sup>2</sup>/g เมื่อเติมทั้งสแตนออกไซด์ในปริมาณ 10wt% และ 30wt% พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะลดลงเป็น 10.17 และ 8.84 m<sup>2</sup>/g ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากการดูดซับทั้งสแตนออกไซด์ลงบนทินออกไซด์มากยิ่งขึ้น จนเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนไปบดบังพื้นผิวและรูพรุนของตัวรองรับทินออกไซด์

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในรูปที่ 4.2 และ 4.3 สามารถคำนวณขนาดผลึกได้โดยแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 (วิธีการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข.1) โดยจะเห็นว่าตัวรองรับ SnO<sub>2</sub> มีขนาดผลึกที่เล็กกว่า 10wt% WO<sub>3</sub>/SnO<sub>2</sub> และ 30wt% WO<sub>3</sub>/SnO<sub>2</sub> ซึ่ง 30wt% WO<sub>3</sub>/SnO<sub>2</sub> มีขนาดผลึกที่ใหญ่กว่า 10wt% WO<sub>3</sub>/SnO<sub>2</sub> โดยสังเกตได้ว่าขนาดผลึกจะแปรผกผันกับพื้นที่ผิวจำเพาะ

การที่ 30wt% WO<sub>3</sub>/SnO<sub>2</sub> มีขนาดผลึกใหญ่กว่าและพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า 10wt% WO<sub>3</sub>/SnO<sub>2</sub> เนื่องจากปริมาณของ WO<sub>3</sub> ที่มากกว่าจะเข้าไปดูดซับที่พื้นที่ผิวและรูพรุนของตัวรองรับ SnO<sub>2</sub> และผลึก WO<sub>3</sub> บางส่วนจะเกิดการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน ส่งผลให้ขนาดผลึกใหญ่ขึ้น และไปบดบังพื้นที่ผิว ทำให้ค่าการกระจายตัวต่ำกว่า 10wt% WO<sub>3</sub>/SnO<sub>2</sub> ดังตารางที่ ข.1 ในภาคผนวก

#### 4.1.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีของเมทิลเอสเทอร์โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR)

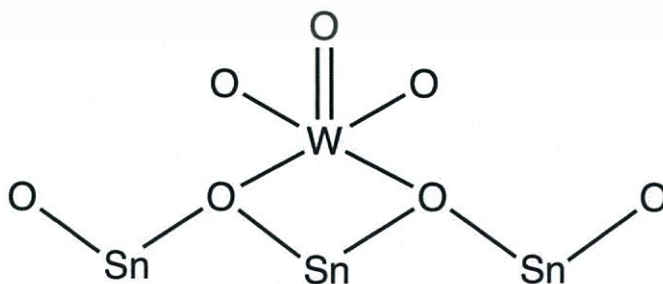
นำตัวเร่งปฏิกิริยาทินออกไซด์ และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์ มาทำการตรวจวัดด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เพื่อยืนยันถึงหมู่ฟังก์ชันทั้งสแตน



รูปที่ 4.5 FT-IR สเปกตรัมของ SnO<sub>2</sub> และ 30wt% WO<sub>3</sub>/SnO<sub>2</sub> เผาที่อุณหภูมิ 800 °C

จากรูปที่ 4.5 เป็นการเปรียบเทียบรูปแบบ FT-IR ของ SnO<sub>2</sub> กับ 30wt% WO<sub>3</sub>/SnO<sub>2</sub> พบว่าพีคที่เลขคลื่น 535.87, 604.06, 665.36, 1632.85 และ 3435.20 cm<sup>-1</sup> เป็นการสั่นของพันธะ  $\nu$ Sn-O,  $\nu$ Sn-O-Sn,  $\nu$ O-Sn-O,  $\delta$ H<sub>2</sub>O และ  $\nu$ O-H นอกจากนี้สังเกตเห็นว่าที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 30wt% WO<sub>3</sub>/SnO<sub>2</sub> พบว่าพีคที่เลขคลื่น 830.91 และ 1020.28 cm<sup>-1</sup> ซึ่งเป็นของ Symmetric W=O vibrations และ  $\nu$ O-W-O ตามลำดับ ในขณะที่ SnO<sub>2</sub> ไม่พบพีคตำแหน่งนี้ขึ้น จึงกล่าวได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์มานั้นมีหมู่ที่สแตนด์อยู่ [23-26]

จาก FT-IR สเปกตรัมของ WO<sub>3</sub>/SnO<sub>2</sub> ซึ่งพบพีคของ W=O และ O-W-O ดังนั้นลักษณะพันธะที่เกิดขึ้นของทั้งสองสแตนด์ออกไซด์กับ SnO<sub>2</sub> แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ลักษณะพันธะที่เกิดขึ้นของ WO<sub>3</sub> กับ SnO<sub>2</sub>

## 4.2 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

### 4.2.1. ผลของปริมาณทั้งสเทนออกไซด์บนตัวรองรับทินออกไซด์ที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

จากการศึกษาผลของปริมาณทั้งสเทนออกไซด์บนตัวรองรับทินออกไซด์ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ โดยเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 800 °C อัตราส่วนโดยโมล เมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 9:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 150 °C เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.7

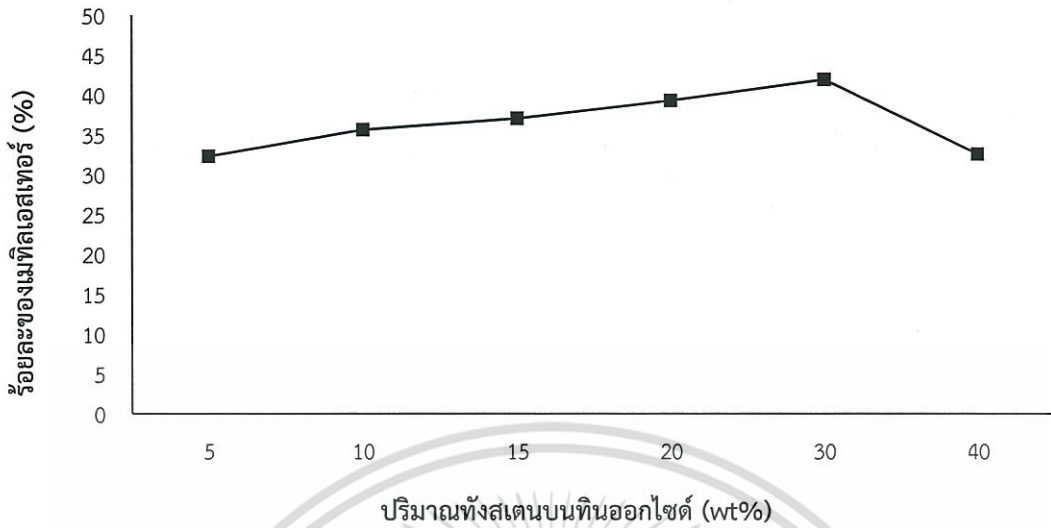
ตารางที่ 4.4 ตัวแปรในการศึกษาผลของปริมาณทั้งสเทนออกไซด์บนทินออกไซด์ที่มีต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณทั้งสเทนบนทินออกไซด์ (wt.%)	โมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ (%)
5% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub>	5	9:1	2	150	2	32.29
10% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub>	10	9:1	2	150	2	35.61
15% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub>	15	9:1	2	150	2	37.02
20% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub>	20	9:1	2	150	2	39.27
30% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub>	30	9:1	2	150	2	41.93
40% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub>	40	9:1	2	150	2	32.53
SnO <sub>2</sub>	-	9:1	2	150	2	30.74
WO <sub>3</sub>	-	9:1	2	150	2	29.33

หมายเหตุ : ตัวเร่งปฏิกิริยา WO<sub>3</sub>/SnO<sub>2</sub> เผาที่อุณหภูมิ 800 °C

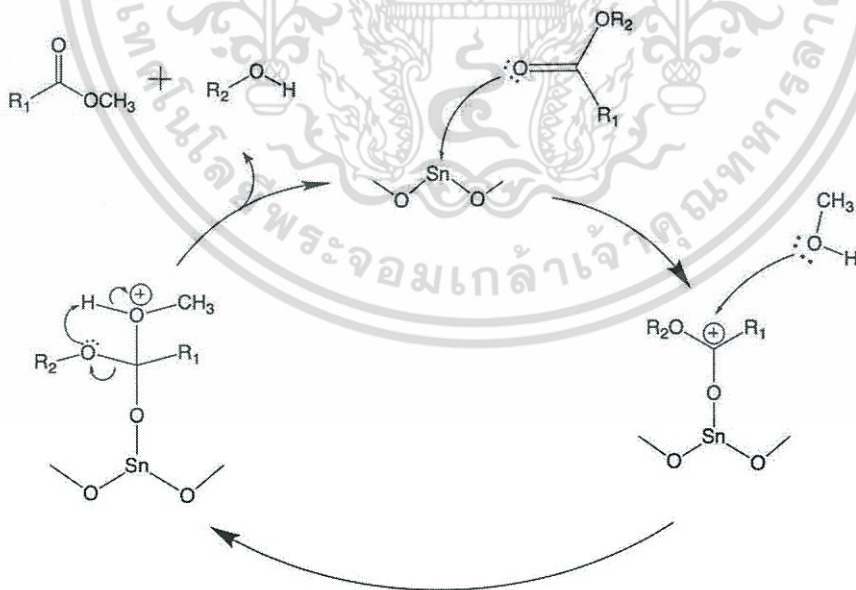
ตัวเร่งปฏิกิริยา WO<sub>3</sub> ได้จากการเผา Na<sub>2</sub>WO<sub>4</sub> เผาที่อุณหภูมิ 800 °C

และตัวเร่งปฏิกิริยา SnO<sub>2</sub> เผาที่อุณหภูมิ 800 °C



รูปที่ 4.7 ผลของปริมาณทังสเดนบนตัวรองรับทินออกไซด์ที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.4 และในรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้  $\text{SnO}_2$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เพียง 30.74  $\text{SnO}_2$  จัดเป็นโลหะออกไซด์ที่มีความเป็นกรดลิวอิส (Lewis acid) ซึ่งสามารถดึงอิเล็กตรอนจากหมู่คาร์บอนิลของไตรกลีเซอไรด์ จากนั้นเมทานอลจะเข้าทำปฏิกิริยา จนได้ผลิตภัณฑ์เป็นเมทิลเอสเทอร์ดังกลไกของปฏิกิริยาในรูปที่ 4.8

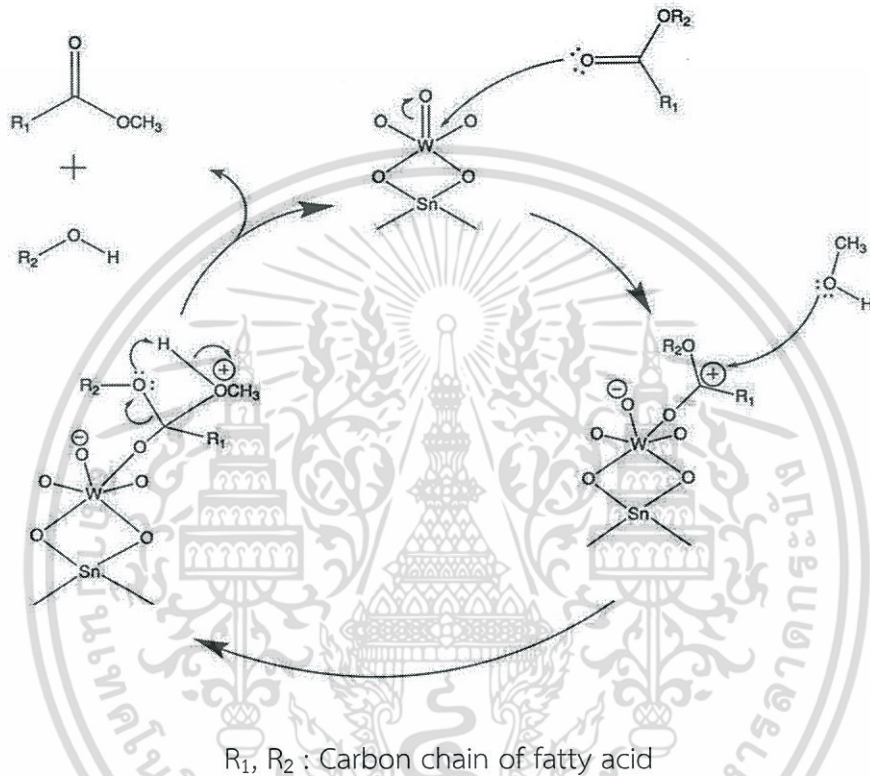


$R_1, R_2$  : Carbon chain of fatty acid

รูปที่ 4.8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้  $\text{SnO}_2$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

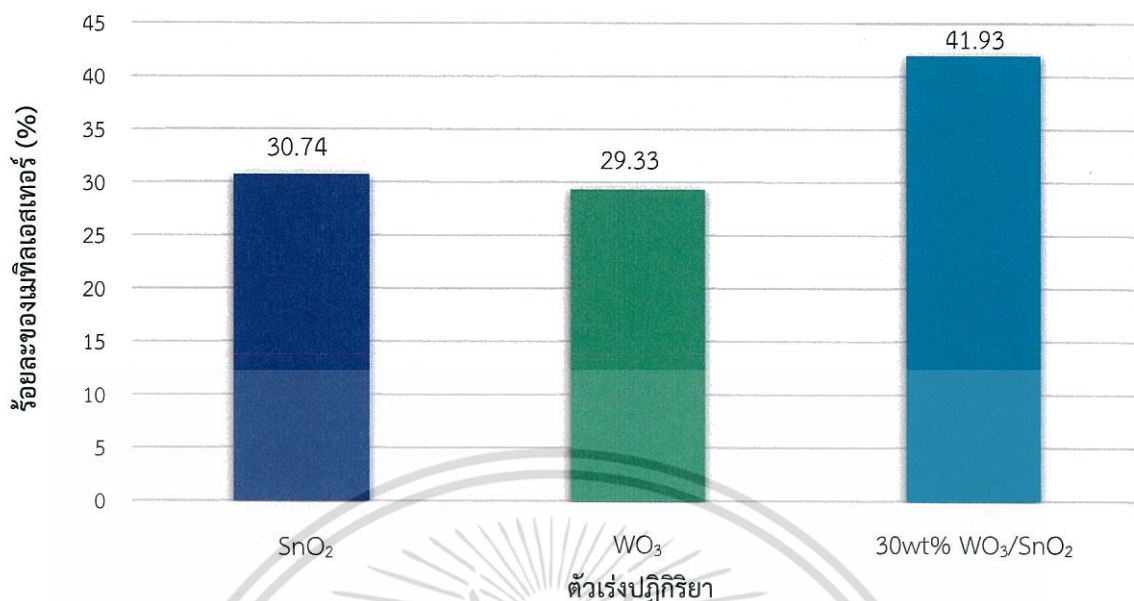
เมื่อทำการเพิ่มปริมาณทั้งสแตนบนทินออกไซด์ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 5wt% เป็น 30wt% พบว่าร้อยละของเมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.7) เนื่องจาก  $WO_3$  ที่อยู่บน  $SnO_2$  ทำหน้าที่เป็นหมู่แอ่งว (Active site) ที่จะให้โมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์เข้าทำปฏิกิริยาตั้งกลไกการเกิดปฏิกิริยาในรูปที่ 4.9 และนอกจากนั้น  $WO_3$  ยังช่วยเหนี่ยวนำให้  $SnO_2$  มีความเป็น Lewis acid ที่มากขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 4.9 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $WO_3/SnO_2$  [28]

เมื่อเพิ่มปริมาณ  $WO_3$  บน  $SnO_2$  เป็น 40wt% พบว่าร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ลดลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเติมปริมาณ  $WO_3$  บน  $SnO_2$  มากเกินไป จึงเกิดการเกาะกลุ่มรวมกันเป็นก้อนเกิดการกระจายตัวไม่ดี ทำให้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเกิดได้น้อยลง ดังนั้น  $WO_3/SnO_2$  ที่มีปริมาณ  $WO_3$  30wt% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้อัตราของเมทิลเอสเทอร์สูงสุดถึง 41.93

เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา  $WO_3/SnO_2$  กับ  $WO_3$  และ  $SnO_2$  จึงได้ทำการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ในสภาวะเดียวกัน นั่นคือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2wt% จำนวนโมลเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 9:1 อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา  $150^\circ C$  และเวลา 2 ชั่วโมง ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของ SnO<sub>2</sub>, WO<sub>3</sub> และ 30wt% WO<sub>3</sub>/SnO<sub>2</sub>

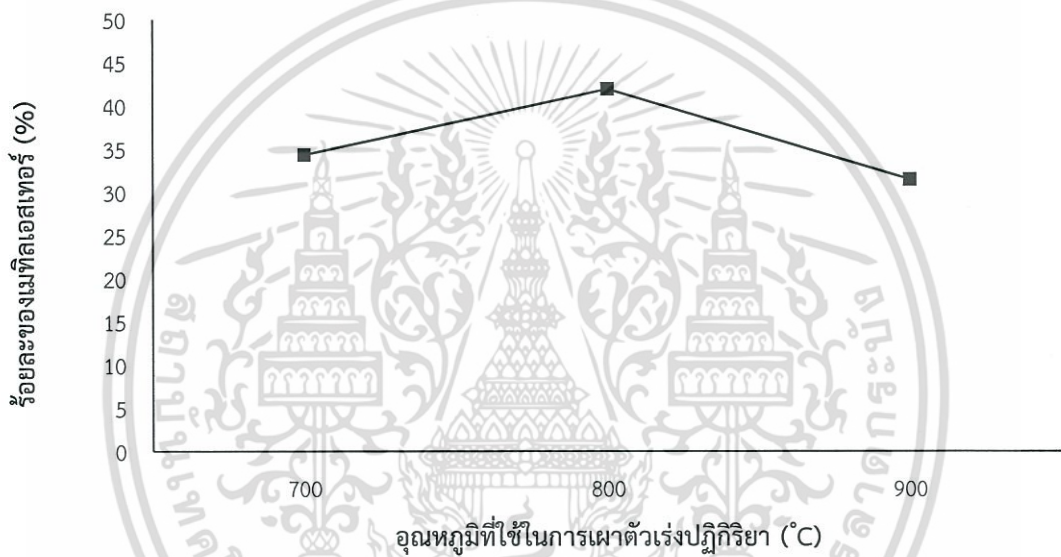
จากรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา SnO<sub>2</sub> และ WO<sub>3</sub> มีประสิทธิภาพในการให้เมทิลเอสเทอร์ได้ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อนำ WO<sub>3</sub> มา impregnated บน SnO<sub>2</sub> จะสามารถเร่งปฏิกิริยาและให้ผลร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ได้สูงขึ้นประมาณ 12% ดังนั้นการให้ตัวเร่งปฏิกิริยา WO<sub>3</sub>/SnO<sub>2</sub> จึงมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันได้ดีกว่าการใช้ SnO<sub>2</sub> หรือ WO<sub>3</sub> แต่เพียงอย่างเดียว

#### 4.2.2 ผลของอุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา WO<sub>3</sub>/SnO<sub>2</sub> ที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

ในการศึกษาผลของอุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนด์บายและที่ออกไซด์ที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ จะกำหนดอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 9:1 โดยโมล เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150 °C ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิที่เผา (°C)	โมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	อุณหภูมิในการทำการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ (%)
30wt% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub>	700	9 : 1	2	150	2	34.31
	800					41.93
	900					31.48



รูปที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์ที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.5 และในรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผา WO<sub>3</sub>/SnO<sub>2</sub> จาก 700 เป็น 800°C แล้วนำไปเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์รีฟิเคชัน พบว่าร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 34.31 เป็น 41.93 และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาเป็น 900°C จะทำให้อัตราของเมทิลเอสเทอร์ลดลงเหลือร้อยละ 31.48 ทั้งนี้ น่าจะมาจากขนาดผลึก (Crystal size) ของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งคำนวณจากรูปแบบ XRD โดยแสดงในตาราง 4.6

ตารางที่ 4.6 ขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา 30wt% WO<sub>3</sub>/SnO<sub>2</sub> ที่เผาด้วยอุณหภูมิต่างๆ (คำนวณจากรูปแบบ XRD)

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิในการเผา (°C)	ขนาดผลึกเฉลี่ย (nm)
30wt% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub>	700	54.9358
	800	50.9017
	900	56.9543

จากตารางที่ 4.6 พบว่าขนาดผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เผาที่ 900 °C มีขนาดใหญ่กว่าที่อุณหภูมิ 700 และ 800 °C จึงมีพื้นที่ผิวจำเพาะในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่าที่เผาด้วยอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ส่งผลให้การเร่งปฏิกิริยาลดลง ในทางกลับกันตัวเร่งปฏิกิริยาที่เผาที่อุณหภูมิ 800 °C มีขนาดผลึกเล็กสุดพื้นที่ผิวจำเพาะในการทำปฏิกิริยามาก จึงเร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่า ทำให้ได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุดถึงร้อยละ 41.93

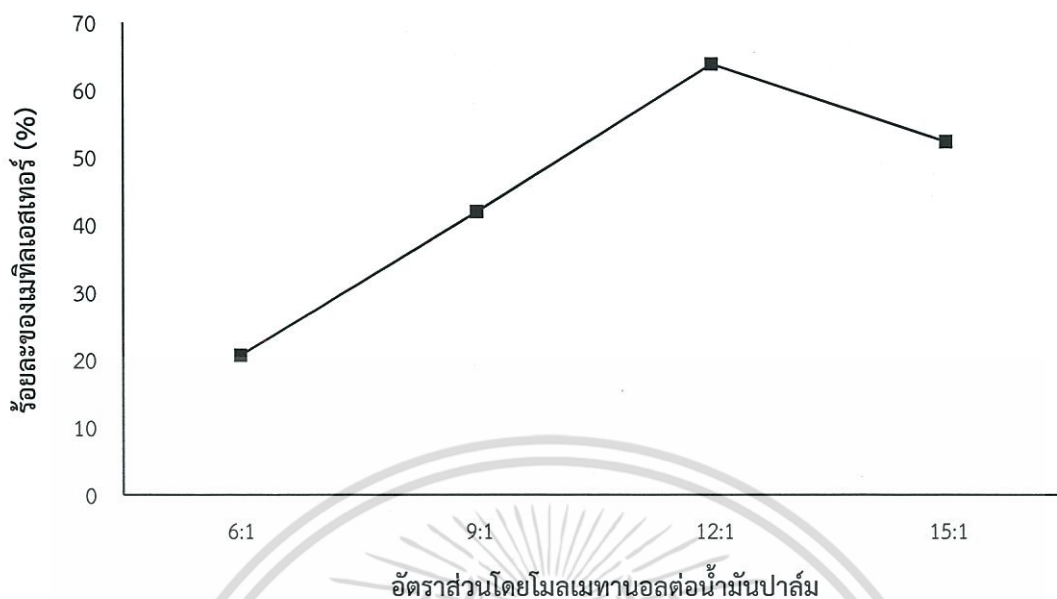
#### 4.2.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

ในการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา WO<sub>3</sub>/SnO<sub>2</sub> ที่เตรียมได้จากทั้งสแตนบนทินออกไซด์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และเผาที่ 800 °C โดยเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 150 °C ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.12

ตารางที่ 4.7 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

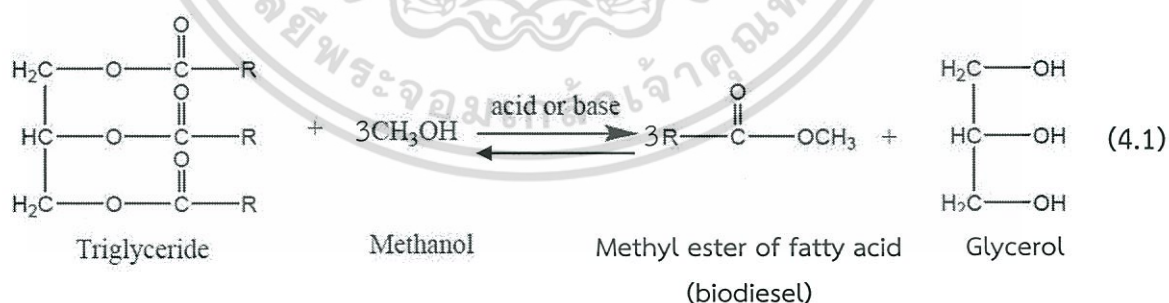
ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิที่เผา (°C)	โมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ (%)
30wt% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub>	800	6 : 1	2	150	2	20.64
		9 : 1				41.93
		12 : 1				63.80
		15 : 1				52.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์กับทินออกไซด์

จากตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มจาก 6:1 เป็น 12:1 ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นจาก 20.64 เป็น 63.80 และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 15:1 ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ลดลงเหลือ 52.28 การเพิ่มปริมาณเมทานอลที่มากเกินไปจะสามารถทำให้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้เลื่อนไปด้านของผลิตภัณฑ์ จึงส่งผลให้ได้เมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นดังสมการที่ 4.1



จากสมการที่ (4.1) จะเห็นได้ว่าจะต้องใช้เมทานอล 3 โมล ทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ 1 โมล เพื่อที่จะได้เมทิลเอสเทอร์ 3 โมล และกลีเซอรอล 1 โมล ซึ่งจากการทดลองพบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 12:1 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมทำให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงที่สุด อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มเมทานอลมากเกินไป (มากกว่า 12:1) พบว่าร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ลดลง ซึ่งอธิบายได้ว่า การเกิดเมทิลเอสเทอร์ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนย่อย เริ่มจาก triglyceride เปลี่ยนเป็น diglyceride

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามด้วยการเปลี่ยน diglyceride เป็น monoglyceride และขั้นสุดท้าย monoglyceride เปลี่ยนเป็น methyl ester ( สมการที่ 4.2) การมีปริมาณเมทานอลที่มากเกินไปจะทำให้การเปลี่ยน triglyceride เป็น monoglyceride เกิดได้ดี แต่ monoglyceride สามารถละลายเข้ากับ glycerol ได้ และเป็นผลให้เกิดปฏิกิริยา glycerolysis ซึ่งปฏิกิริยา glycerolysis เกิดขึ้นระหว่าง methyl ester ที่เกิดจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันกับ glycerol ที่เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ เกิดเป็น monoglyceride ขึ้นด้วยเหตุนี้ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล 15:1 ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์จึงลดลง



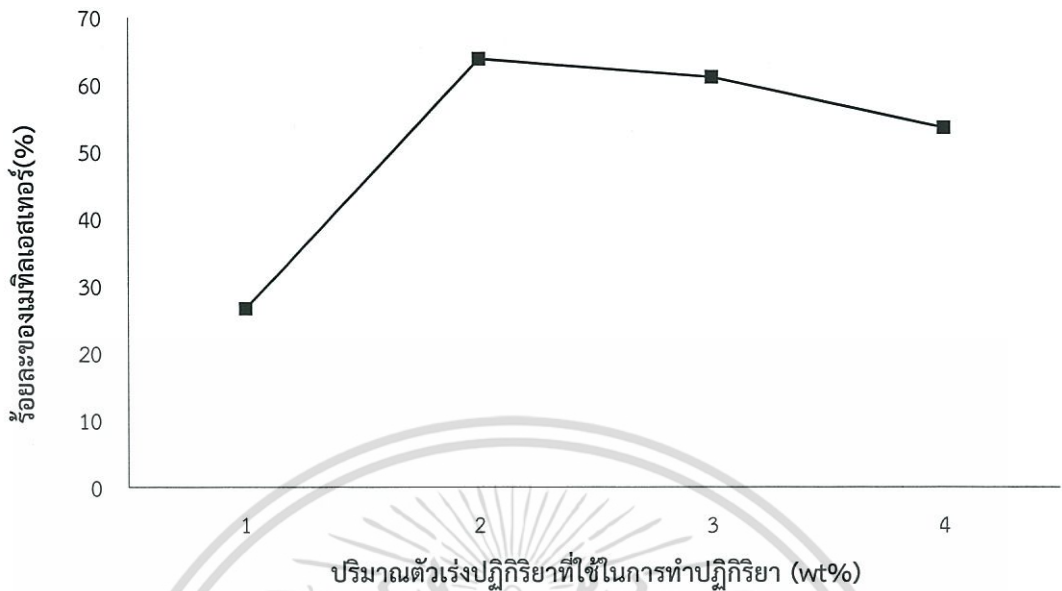
#### 4.2.4 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

ในการศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์ ที่ 30wt%  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$  เเผาที่  $800^\circ\text{C}$  อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 12:1 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา  $150^\circ\text{C}$  ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.13

ตารางที่ 4.8 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิที่เผา ( $^\circ\text{C}$ )	โมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ( $^\circ\text{C}$ )	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ (%)
30wt% $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$	800	12 : 1	1	150	2	26.62
			2			63.80
			3			61.04
			4			53.52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสเดนออกไซด์บนทินออกไซด์ที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

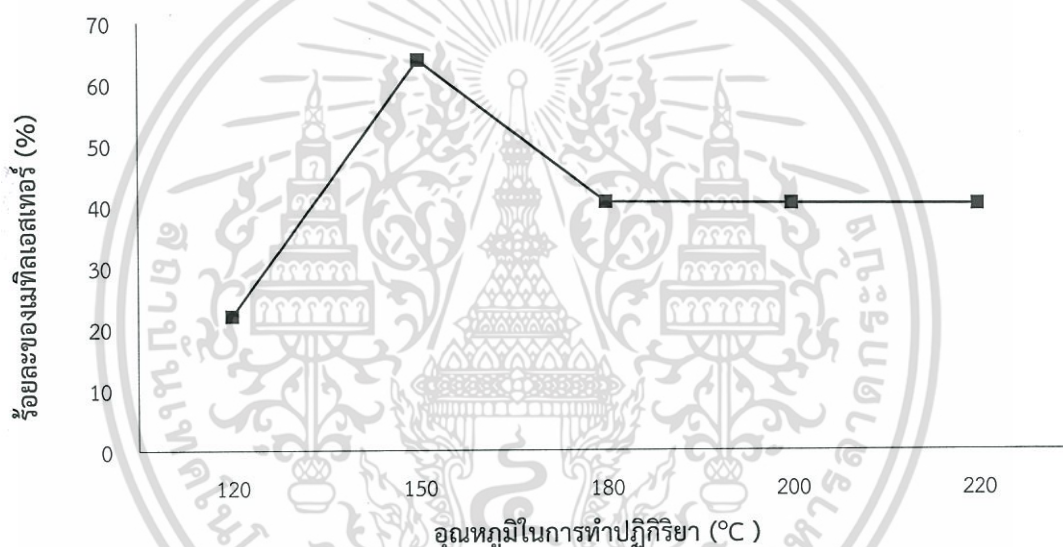
จากตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 1 เป็น 2 wt% ทำให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 26.62 เป็น 63.80 เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของการทำปฏิกิริยา และเพิ่มความเป็นกรดจึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น หลังจากเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า 2 wt% พบว่าร้อยละของเมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากเกินไป อาจทำให้เกิดของผสมในปฏิกิริยามีลักษณะหนืดขึ้น ทำให้การแพร่ของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์เข้าไปยังตำแหน่งของ active site เป็นไปได้อย่างช้าและตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณมากเกินไป อาจเกิดการเกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อนทำให้กระจายตัวในของผสมไม่ดี ดังนั้นปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจึงเกิดได้ลดลง

#### 4.2.5 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 30wt%  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$  เเผาที่อุณหภูมิ 800°C อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 12:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.14

ตารางที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิที่เผา (°C)	โมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ (%)
30wt% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub>	800	12 : 1	2	120	2	21.99
				150		63.80
				180		40.52
				200		40.26
				220		40.08



รูปที่ 4.14 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาจาก 120°C ไปที่ 150°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยการที่ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันถูกเร่งด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous acid catalyst) นั้นจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจึงได้ทำการเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา และเพิ่มความสามารถในการละลายของเมทานอลในน้ำมัน ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันกับเมทานอลมากขึ้น ส่งผลให้ได้ร้อยละของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงกว่า 150°C พบว่าร้อยละของเมทิลเอสเทอร์นั้นลดลง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิสูงเกินไป อาจเกิดการแตกตัวของน้ำมันปาล์มไปเป็นกรดไขมันอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

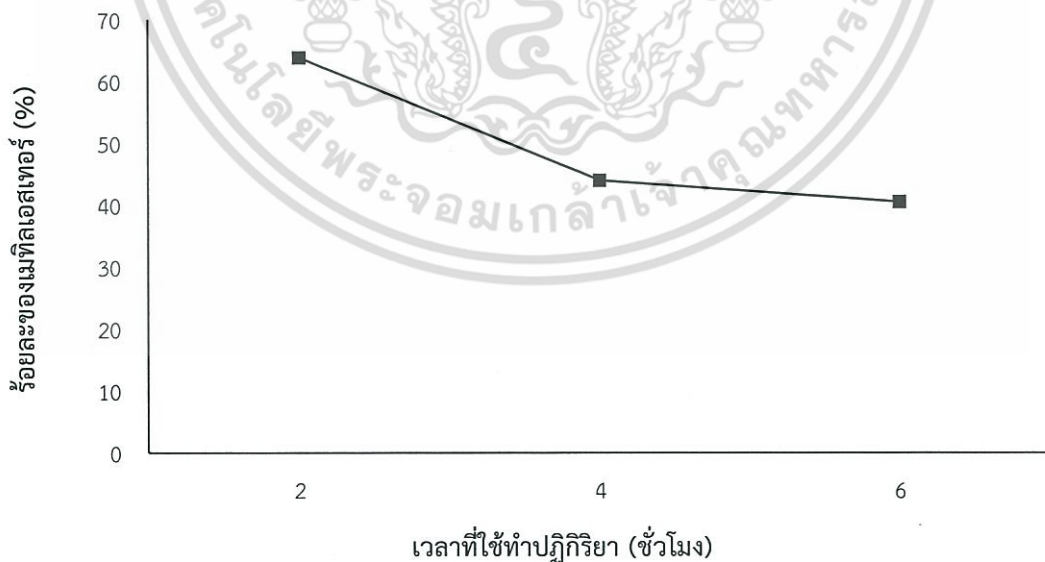
ทำให้เหลือไตรกลีเซอไรด์ที่จะไปทำปฏิกิริยากับเมทานอลน้อย ส่งผลให้ได้เมทิลเอสเทอร์ต่ำลงนั่นเอง ดังนั้นอุณหภูมิ 150°C เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $WO_3/SnO_2$  โดยให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุด 63.80

#### 4.2.6 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

จากการศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 30wt%  $WO_3/SnO_2$  เเผาที่ 800°C อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 12:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 150°C ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.15

ตารางที่ 4.10 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิที่เผา (°C)	โมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ (%)
30wt% $WO_3/SnO_2$	800	12 : 1	2	150	2	63.80
					4	43.97
					6	40.52



รูปที่ 4.15 ผลของเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

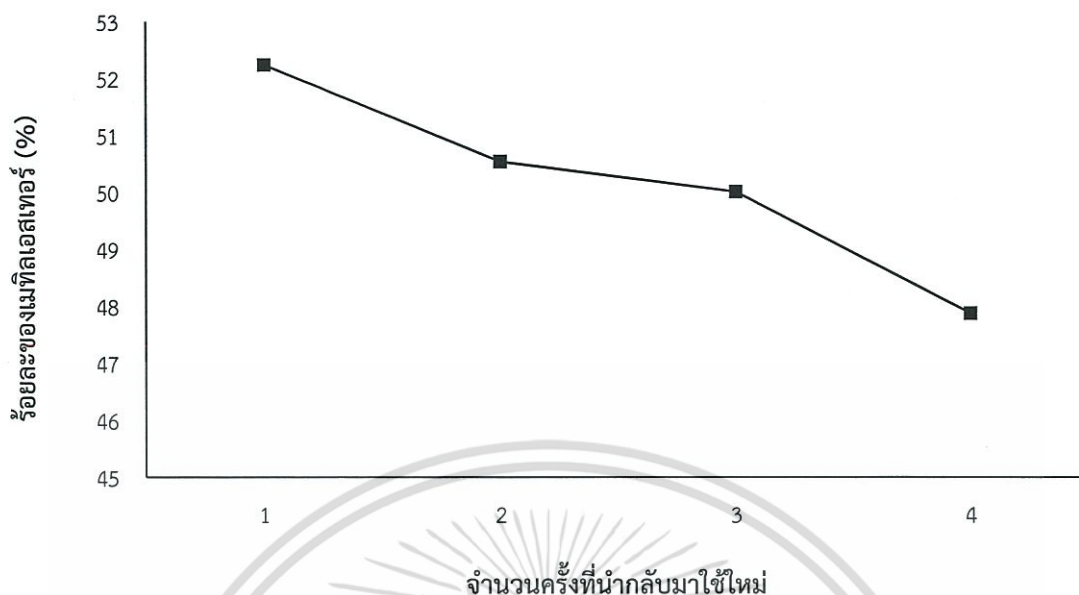
จากตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.15 พบว่าเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 2 ชั่วโมง เป็น 4 ชั่วโมง ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ลดลงจากร้อยละ 63.80 เป็น 43.97 อาจเป็นผลมาจากการใช้ เวลาในการทำปฏิกิริยานานเกินไป ทำให้เมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นเกิดผันกลับไปเป็นไตรกลีเซอไรด์ ส่งผลให้ ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ลดลง และเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยามากกว่า 4 ชั่วโมง ร้อยละของเมทิลเอส- เทอร์มีแนวโน้มคงที่ ดังนั้นเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่สุดคือ 2 ชั่วโมง ซึ่งได้ร้อยละของเมทิลเอส- เทอร์ 63.80

#### 4.2.7 การศึกษาเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการนำกลับมาใช้ใหม่

จากการศึกษาความเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาวีวิตพันธุ์ในการนำกลับมาใช้ใหม่ที่มีผลต่อ ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์ที่ผ่านการทำปฏิกิริยา แล้ว เพื่อดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้น โดยกำหนดตัวเร่งปฏิกิริยา  $WO_3/SnO_2$  ที่มีปริมาณทั้งสแตนออกไซด์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก นำไปเผาที่อุณหภูมิ  $800^\circ C$  อัตราส่วน โดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 12:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 กรัม อุณหภูมิที่ใช้ใน การทำปฏิกิริยา  $150^\circ C$  และเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการทำปฏิกิริยา แล้วจะถูกนำไปล้างด้วยอะซิโตน อบให้แห้งที่อุณหภูมิ  $150^\circ C$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และนำไปทำปฏิกิริยา ต่อไปเป็นจำนวน 4 ครั้ง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.16

ตารางที่ 4.11 ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อมีการนำตัวเร่งปฏิกิริยา  $WO_3/SnO_2$  กลับมาใช้ใหม่

ชนิดของ ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	อุณหภูมิที่ เผา ( $^\circ C$ )	โมลของ เมทานอล ต่อน้ำมันปาล์ม	ปริมาณ ตัวเร่ง ปฏิกิริยา (wt.%)	อุณหภูมิ ในการทำ ปฏิกิริยา ( $^\circ C$ )	เวลาใน การทำ ปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	จำนวน ครั้งที่ทำ ปฏิกิริยา	ร้อยละของ เมทิลเอส เทอร์ (%)
30wt% $WO_3/SnO_2$	800	12:1	2	150	2	1	52.24
						2	50.54
						3	50.01
						4	47.88



รูปที่ 4.16 ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อมีการนำตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$  กลับมาใช้ใหม่

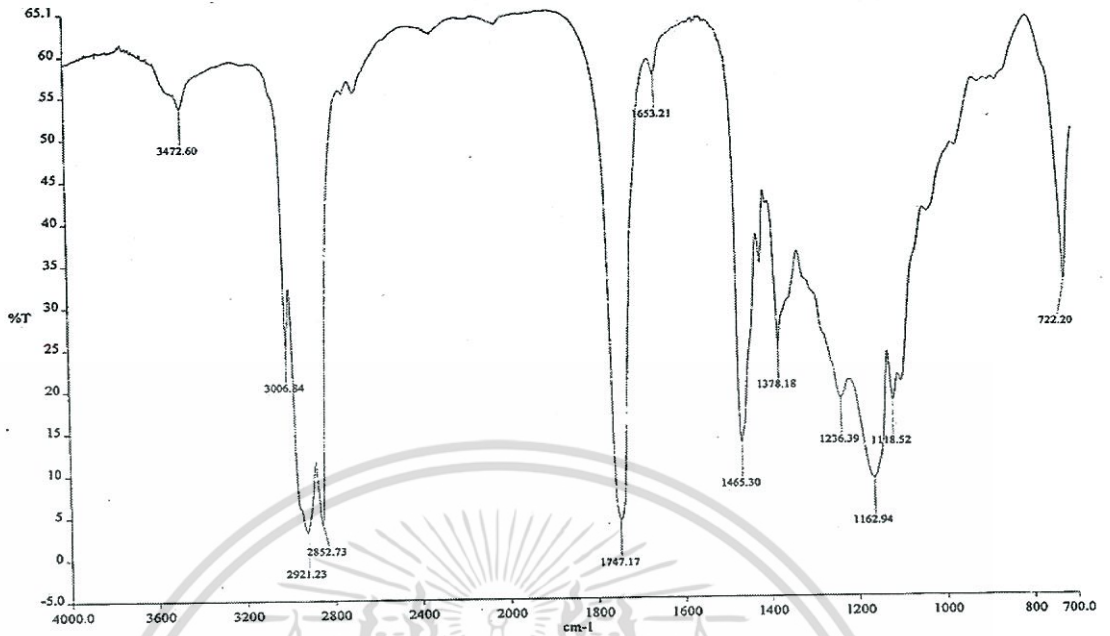
จากรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำเพิ่มขึ้นหลายๆ ครั้ง พบว่าร้อยละของเมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มต่ำลง ทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง เนื่องมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำกลับมาใช้ใหม่นั้นมีการอุดตันรูพรุนและบดบังพื้นผิวของโมเลกุลสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์แสดงดังรูปที่ 4.4 (จ) และ (ฉ) จึงทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพลง (Deactivation) ส่งผลให้การเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดเมทิลเอสเทอร์ในปฏิกิริยาครั้งต่อไปลดลง

#### 4.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีและทดสอบสมบัติของเมทิลเอสเทอร์

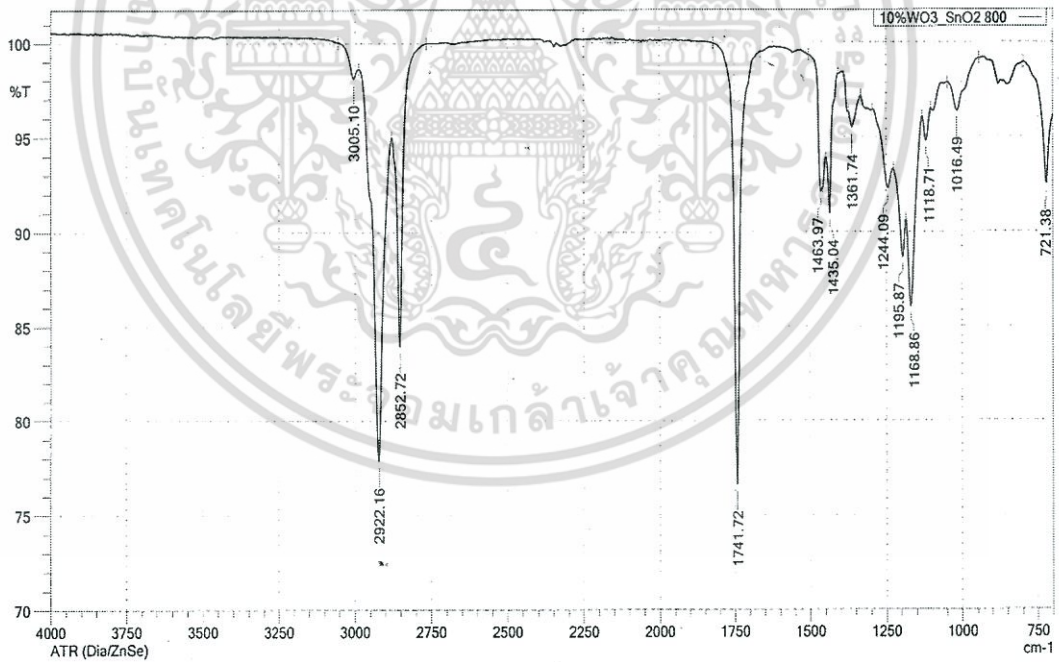
นำเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์ มาทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีของเมทิลเอสเทอร์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตเมทรี (FT-IR) และเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรโฟโตเมทรี (FT-NMR)

##### 4.3.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีของเมทิลเอสเทอร์โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR)

สเปกตรัมของน้ำมันปาล์มก่อนทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน และเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 10wt%, 20wt% และ 30wt%  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$  โดยเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ซึ่งทำการตรวจวัดด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แสดงดังรูปที่ 4.17-4.21 ตามลำดับ

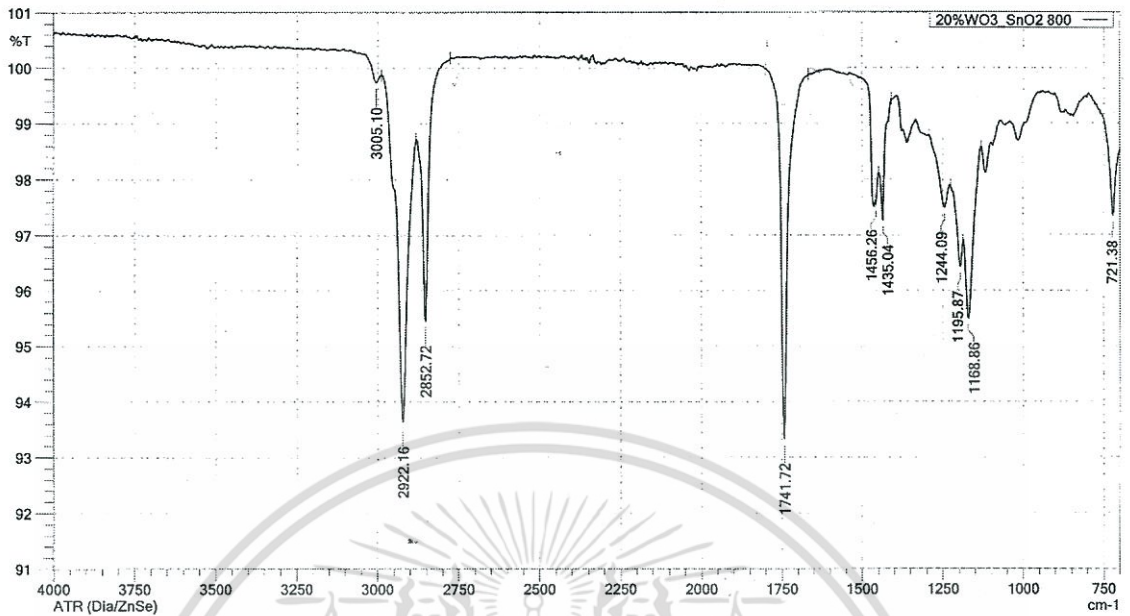


รูปที่ 4.17 FT-IR สเปกตรัมของน้ำมันปาล์มก่อนทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริไฟเคชัน

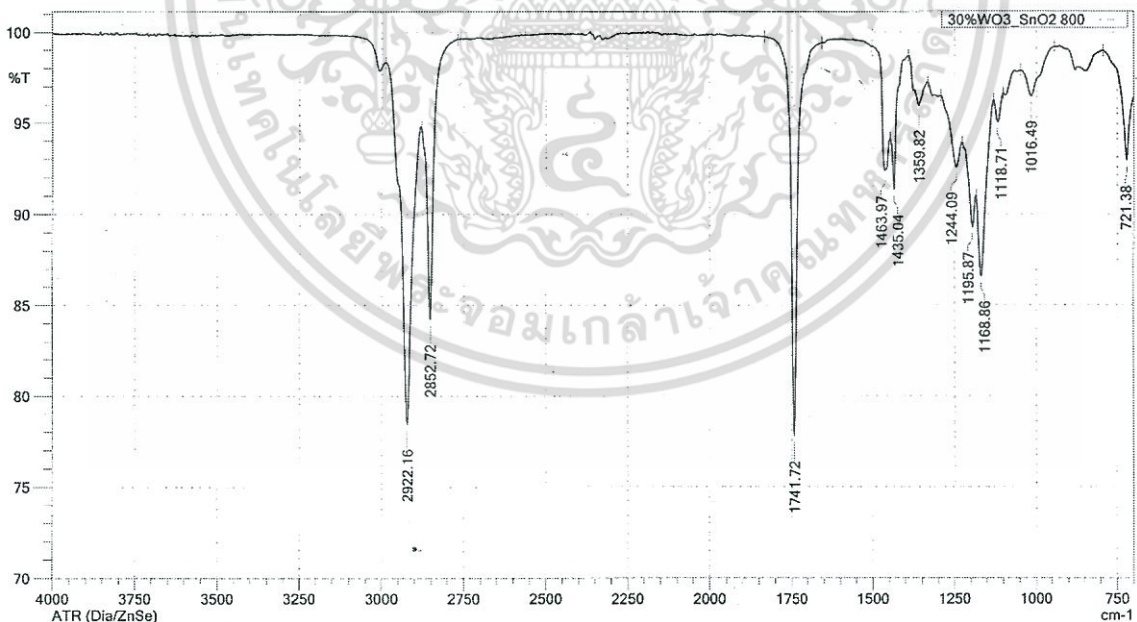


รูปที่ 4.18 FT-IR สเปกตรัมของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 10wt%  $WO_3/SnO_2$  ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 9:1 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ  $150^\circ C$  เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง

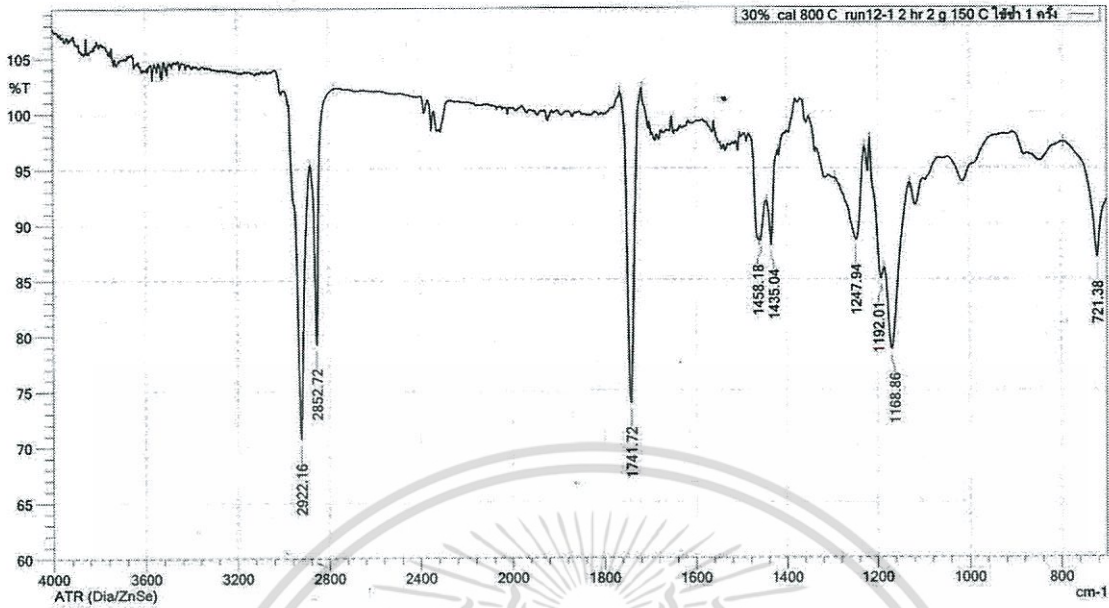
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 FT-IR สเปกตรัมของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 20wt%  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$  ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 9:1 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150°C เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 4.20 FT-IR สเปกตรัมของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 30wt%  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$  ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 9:1 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150°C เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 4.21 FT-IR สเปกตรัมของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 30wt%  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$  ที่ถูกใช้ซ้ำครั้งที่ 1 อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 12:1 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ  $150^\circ\text{C}$  เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.17-4.21 แสดงหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันปาล์มและเมทิลเอสเทอร์ที่ดูดกลืนแสงที่เลขคลื่นต่างๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 แสดงหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันปาล์มและเมทิลเอสเทอร์ที่การดูดกลืนแสงที่เลขคลื่นต่างๆ [30]

เลข	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 $\text{CH}_2$
1375	Alkane	C-H bending for $\text{CH}_3$
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)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก FT-IR สเปกตรัมของน้ำมันปาล์มและเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 10wt%, 20wt%, 30wt% และ 30wt%  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$  ที่ถูกใช้ซ้ำครั้งที่ 1 จะสังเกตได้ว่าสเปกตรัมมีลักษณะคล้ายคลึงกัน เนื่องจากน้ำมันปาล์มและเมทิลเอสเทอร์เป็นสารประเภทเอสเทอร์ ซึ่งมีหมู่คาร์บอนิลเป็นหมู่ฟังก์ชัน ดังนั้นเพื่อแยกแยะความแตกต่างระหว่างน้ำมันปาล์มและเมทิลเอสเทอร์ จึงนำเทคนิค FT-NMR มาใช้ในการวิเคราะห์

สำหรับ FT-IR สเปกตรัมของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์ที่ปริมาณทั้งสแตน 5wt%, 15wt%, 40wt%, 30wt%  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$  ที่ถูกใช้ซ้ำครั้งที่ 2 และ 3 แสดงในภาคผนวก ง.

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

น้ำมันปาล์มก่อนทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 10wt% และ 30wt%  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$  จะถูกวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งแสดง FT-NMR สเปกตรัม ดังรูปที่ 4.22-4.24 ตามลำดับ

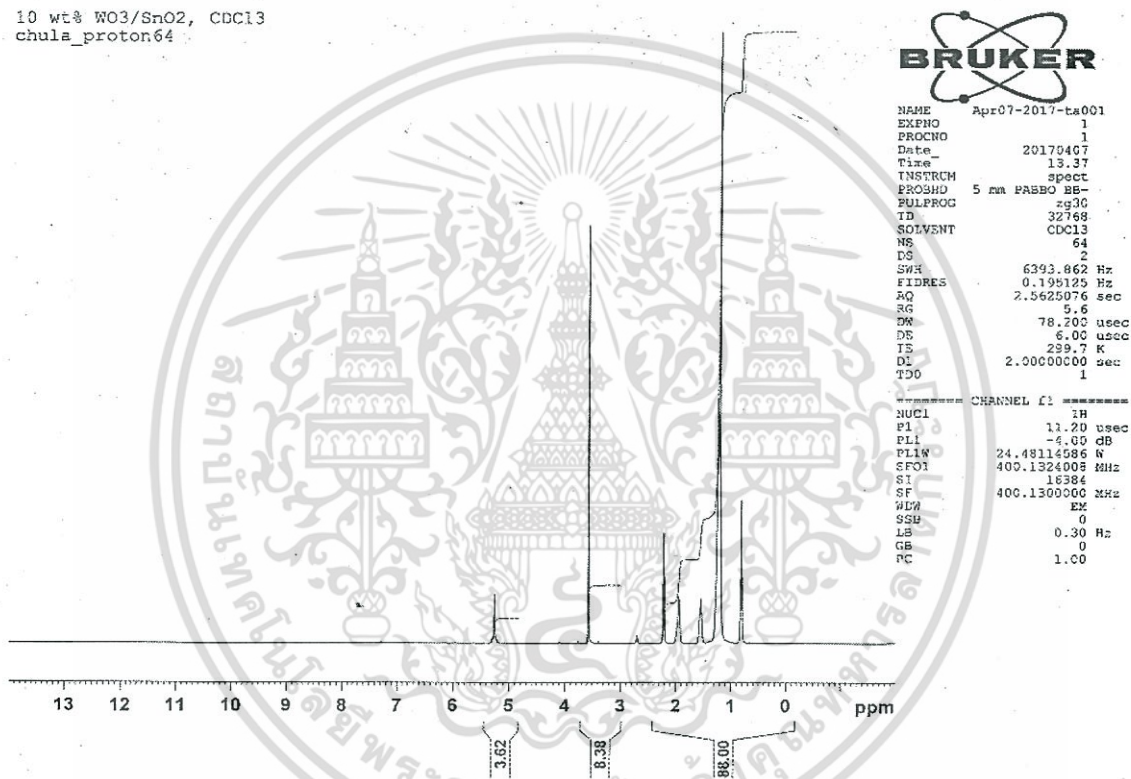


รูปที่ 4.22 FT-NMR สเปกตรัมของน้ำมันปาล์มจากเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.22 เป็น FT-IR สเปกตรัมของน้ำมันปาล์มก่อนทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน ซึ่งแสดงถึง  $^1\text{H-NMR}$  สเปกตรัมของเมทิลโปรตอน ( $\text{CH}_3\text{-C-}$ ) และเมทิลีนโปรตอน ( $\text{-C-CH}_2\text{-C-}$ ) ที่  $\delta 0.85\text{-}0.88$  และ  $1.25\text{-}1.30$  ppm, สเปกตรัมของ  $\text{-CH}_2\text{-C-COO-C-}$  ที่  $\delta 1.61$  ppm, สเปกตรัมของ  $\text{-CH}_2\text{-C=C}$  ที่  $\delta 2.01\text{-}2.05$  ppm, สเปกตรัมของ  $\text{-CH}_2\text{-COO-C-}$  ที่  $\delta 2.28\text{-}2.33$  ppm, สเปกตรัมของ  $\text{-C=C-CH}_2\text{-C=C-}$  ที่  $\delta 2.74\text{-}2.76$  ppm, สเปกตรัมของ  $\text{-CH}_2\text{-OOC-R}$  และ  $\text{-CH-OOC-R}$  ที่  $\delta 4.11\text{-}4.17$  และ  $4.27\text{-}4.32$  ppm, สเปกตรัมของ  $\text{-CH=CH-}$  ที่  $\delta 5.26\text{-}5.35$  ppm [29]

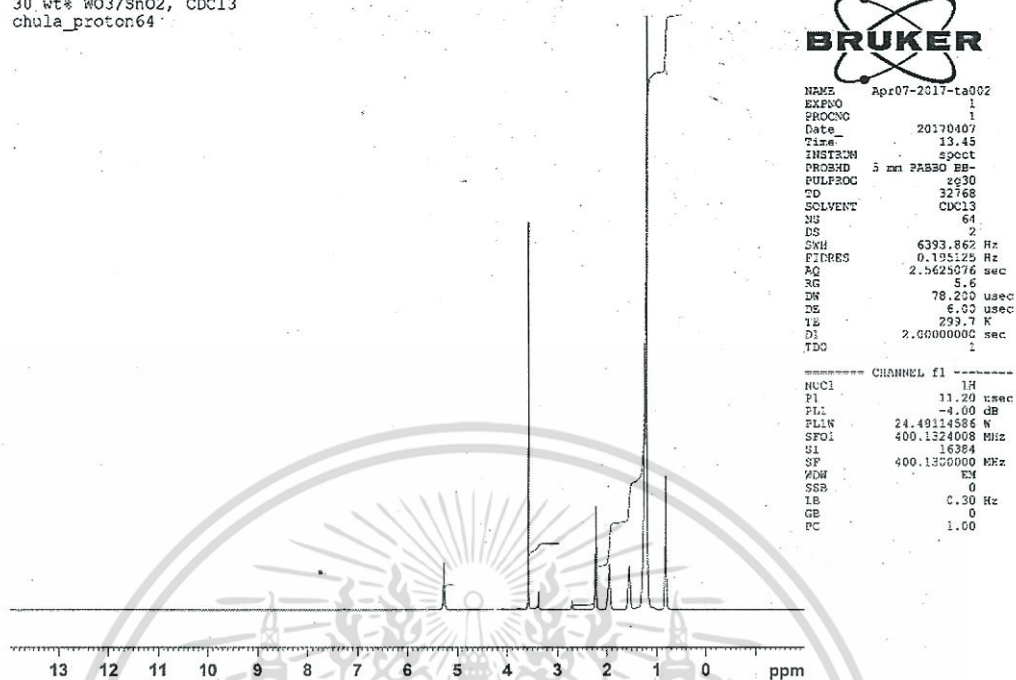
10 wt% WO<sub>3</sub>/SnO<sub>2</sub>, CDCl<sub>3</sub>  
chula\_proton64



รูปที่ 4.23 FT-NMR สเปกตรัมของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จาก 10wt% WO<sub>3</sub>/SnO<sub>2</sub> ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 9:1 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150 °C เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

30 wt% WO<sub>3</sub>/SnO<sub>2</sub>, CDCl<sub>3</sub>  
chula\_proton64



รูปที่ 4.24 FT-NMR สเปกตรัมของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จาก 30wt% WO<sub>3</sub>/SnO<sub>2</sub> ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 12:1 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150°C เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.23 และ 4.24 เมื่อนำน้ำมันปาล์มมาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันกับเมทานอล โดยใช้ 10wt% WO<sub>3</sub>/SnO<sub>2</sub> และ 30wt% WO<sub>3</sub>/SnO<sub>2</sub> เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาตามลำดับ โดยสเปกตรัมของเมทิลเอสเทอร์มีลักษณะคล้ายคลึงกัน คือพบว่าตำแหน่งโปรตอนของ -CH<sub>2</sub>-COO-R และ -CH-COO-R ในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ที่ δ4.11-4.17 และ 4.27-4.32 ppm หายไป (เทียบกับรูปที่ 4.22) เกิดเป็นตำแหน่งโปรตอนของ -R-COO-CH<sub>3</sub> ในโมเลกุลของเมทิลเอสเทอร์ขึ้นมาแทนที่ δ3.66 ppm แสดงว่าผลิตภัณฑ์จากการสังเคราะห์เป็นเมทิลเอสเทอร์จริง [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.3 การทดสอบค่าความเป็นกรด เลขไอโอดีน และค่าความร้อนของเมทิลเอสเทอร์

หลังจากทำการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์แล้ว นำเมทิลเอสเทอร์มาทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ เลขไอโอดีน ค่าความร้อนและค่าความเป็นกรด แสดงดังตารางที่ 4.13 ซึ่งผลที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานเกณฑ์ที่กฎหมายกำหนดโดยกล่าวไว้แล้วในบทที่ 2

ตารางที่ 4.13 ค่าความเป็นกรด เลขไอโอดีน และค่าความร้อนของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากสภาวะต่างๆ

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิที่เผา (°C)	อัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (°C)	ปริมาณตัวเร่งที่ใช้ (wt%)	เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ค่าความเป็นกรด (mgKOH/g)	เลขไอโอดีน (g Iodine/100g)	ค่าความร้อน (J/g)
30%WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub>	800	9:1	150	2	2	1.5649	34.7579	39883
				2	2	1.8047	37.3063	39296
				2	6	1.1756	31.9128	39480
		12:1	2	4	1.3487	35.0108	39564	
			3	2	1.7297	14.2352	38803	
			4	2	1.4444	41.4618	39614	
			200	2	1.1241	29.5189	39156	

ตามเกณฑ์มาตรฐานของไบโอดีเซลตามที่กฎหมายกำหนด ค่าความเป็นกรดต้องไม่เกิน 0.5 mgKOH/g เลขไอโอดีนต้องไม่เกิน 120 กรัมไอโอดีน/100 กรัม และค่าความร้อนอยู่ในช่วง 37520-40160 J/g จากผลการวิเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ มีค่าความเป็นกรดเกินกว่า 0.5 mgKOH/g ซึ่งเกินมาตรฐานกำหนด สาเหตุอาจเกิดจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นกรดที่แรง จึงอาจมีปริมาณกรดหลงเหลืออยู่ในเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ หรืออาจเกิดจากการที่ใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่สูงแล้วเกิดการแตกตัวของน้ำมันไปเป็นกรดไขมันอิสระจำนวนมาก ส่งผลให้ค่าความเป็นกรดมีค่าสูง

สำหรับเลขไอโอดีนของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ พบว่าส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 10-50 กรัมไอโอดีน/100 กรัม และค่าความร้อนของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้อยู่ในช่วง 38,800-40,000 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานไบโอดีเซล

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งทำการสังเคราะห์ทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์ด้วยวิธีเอ็บซุ่ม จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พูเรียทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR) เอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรมิเตอร์ (XRF) และพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิค BET จากการทดลองสรุปได้ว่า

1. เมื่อทำการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง พบว่า  $WO_3/SnO_2$  ซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 800°C เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงกว่าที่อุณหภูมิอื่น

2. เมื่อเติมทั้งสแตนลงบนทินออกไซด์ด้วยโซเดียมทั้งสเตดไฮเดรตที่ปริมาณ 5 10 15 20 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า 30wt%  $WO_3/SnO_2$  ให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงกว่าที่ปริมาณอื่น

3. สำหรับการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์ พบว่าการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณเมทานอลและอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาจะช่วยทำให้ conversion ของเมทิลเอสเทอร์มีค่าลดลง สภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม เมื่อใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ให้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์สูงสุด 63.80 ที่สภาวะการทำปฏิกิริยาโดยใช้อัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 12:1 เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150°C และจากการทดสอบคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ พบว่า เลขไอโอดีน และค่าความร้อน อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรม

4. เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์ที่ผ่านการทำปฏิกิริยาแล้ว นำกลับมาใช้ใหม่ในครั้งต่อไปจะมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาที่ลดลง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสเดนออกไซด์บนทินออกไซด์ที่เตรียมได้ หลังจากนำไปเผาแล้ว ควรเก็บรักษาในสภาวะที่ปราศจากความชื้น เนื่องจากการรวมตัวของตัวเร่งปฏิกิริยากับความชื้น จะส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสูญเสียความว่องไวในการทำปฏิกิริยา

2. ควรนำตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสเดนออกไซด์บนทินออกไซด์ไปวิเคราะห์สมบัติด้วยเทคนิคอื่นๆ เช่น ความเป็นกรดโดยเทคนิคการดูดซับและคายซับด้วยแอมโมเนีย (Temperature Program Desorption, NH<sub>3</sub>-TPD)

3. เนื่องจากร้อยละของเมทิลเอสเทอร์จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา WO<sub>3</sub>/SnO<sub>2</sub> ยังไม่สูงมากนัก ดังนั้นควรปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการเติมออกไซด์ของโลหะทรานซิชันชนิดอื่นลงไป เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

4. คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน ได้แก่ เลขไอโอดีน และค่าความร้อน อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ควรทำการทดสอบสมบัติอื่นตามมาตรฐานอุตสาหกรรม เพื่อทดสอบก่อนการนำไปใช้งานกับเครื่องยนต์ดีเซล เช่น จุดวาบไฟ จุดไหลเท และความหนืด



## เอกสารอ้างอิง

- [1] Mansir, N. , Taufiq-Yap,Y.H. , Rashid ,U. , Lokmn,I.M. Investigation of heterogeneous solid acid catalyst performance on low grade feedstocks for biodiesel production: A review. Energy Conversion and Management. 6 (2016) 100-115.
- [2] Datta , A. , Mandal,B.K. A comprehensive review of biodiesel as an alternative fuel for compression ignition engine. Renewable and Sustainable Energy Reviews 57 (2016) 799-821
- [3] Siam bioenergy.ทำไมต้องใช้ไบโอดีเซล.[Online].Available: <http://www.siam-bioenergy.com/bio65/index.php/2012-10-14-08-58-20/2012-10-14-08-58-40/94-2012-10-13-15-23-07> เข้าเมื่อวันที่ 24 ตุลาคม 2559
- [4] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.2558.แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ.2558-2579.[Online].Available: [http://www.dede.go.th/download\\_/files/AEDP2015\\_Final\\_version.pdf](http://www.dede.go.th/download_/files/AEDP2015_Final_version.pdf) เข้าเมื่อวันที่ 20 มกราคม 2560
- [5] Xie,W. ,Wang,T. Biodiesel production from soybean oil transesterification using tin oxide-supported WO<sub>3</sub> catalysts. Fuel Processing Technology 109 (2013) 150-155.
- [6] N.pipatpaiboon.2551.ประโยชน์ของการใช้ไบโอดีเซล.[Online].Available: [http://biodiesechumchon.blogspot.com/2008/08/blog-post\\_6813.html](http://biodiesechumchon.blogspot.com/2008/08/blog-post_6813.html) เข้าเมื่อวันที่ 24 ตุลาคม 2559
- [7] สถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปัมและพืชน้ำมัน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.ข้อดี-ข้อด้อยของไบโอดีเซล.[Online].Available: [http://www.biodiesel.eng.psu.ac.th/adv\\_disadv.php](http://www.biodiesel.eng.psu.ac.th/adv_disadv.php) เข้าเมื่อวันที่ 24 ตุลาคม 2559
- [8] สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ทวสส).2012. ปาล์มน้ำมัน. [Online]. Available: [http://fieldtrip.ipst.ac.th/intro\\_sub\\_content.php?content\\_id=20&content\\_folder\\_id=231](http://fieldtrip.ipst.ac.th/intro_sub_content.php?content_id=20&content_folder_id=231) เข้าเมื่อวันที่ 10 มกราคม 2560
- [9] King Mongkut's University of Technology Thonburi.2547.ประโยชน์ของการใช้ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์.[Online].Available: <http://www.green.kmutt.ac.th/news/Question.asp?GID=94> เข้าเมื่อวันที่ 24 ตุลาคม 2559

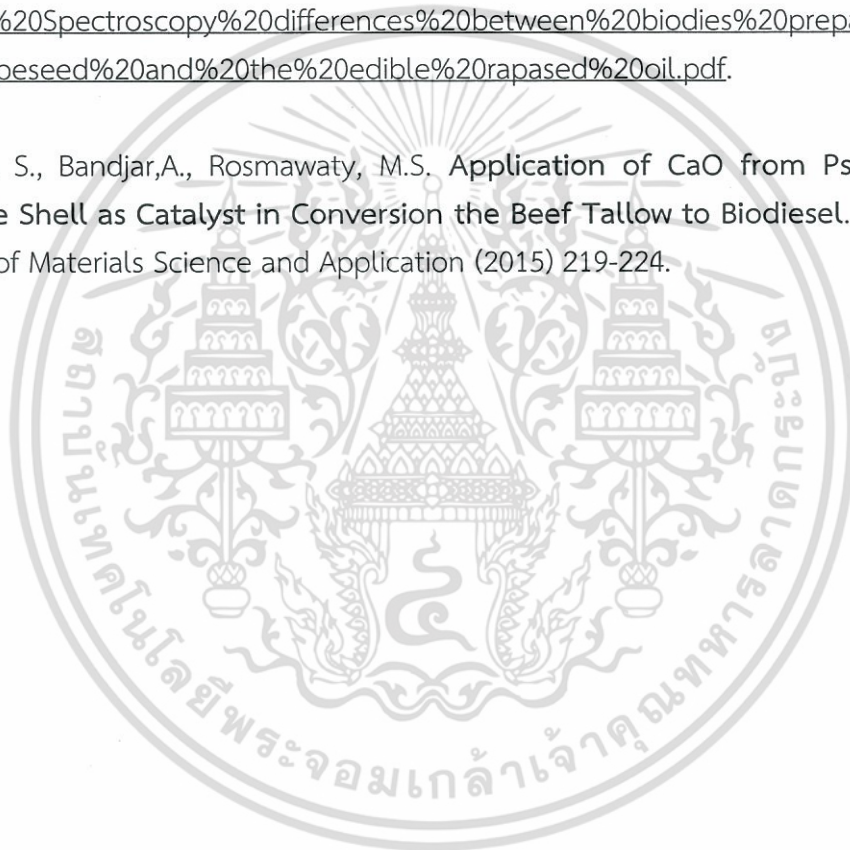
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (.สสวท).2556.การเร่งปฏิกิริยา. [Online].Available: [http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin\\_/2079-9?groupid=308](http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin_/2079-9?groupid=308) เข้าเมื่อวันที่ 24 ตุลาคม 2559
- [11] ศุภกร พิบูลย์วรพงศ์, อนุชา ทูลมณี และอุบลรัตน์ เอี่ยมวิจิตร.2558. “การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม โดยใช้ซัลเฟตทินออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดกรด”.วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [12] Wikipedia.Tungsten trioxide. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Tungsten\\_trioxide#cite\\_note-merck-3](https://en.wikipedia.org/wiki/Tungsten_trioxide#cite_note-merck-3) เข้าเมื่อวันที่ 30 มกราคม 2560
- [13] จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษณานุรักษ์. 2547. การเร่งปฏิกิริยาพื้นฐานการประยุกต์.กรุงเทพฯ. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [14] พชร พงษ์ไพบูลย์, สาวิตรี อ่อนก้านเหลือง, วาสนา จันทร, วิชุดา ชามสันเทียะ และมนัส พิลา. ผลกระทบของไบโอดีเซลที่มีต่อเครื่องยนต์. [Online].Available: <https://sites.google.com/site/biodieselphlangngnganthdthaen/11phlk-ra-thb-khxng-bi-xo-disel-thi-mi-tx-kheruxngy-nt> เข้าเมื่อวันที่ 24 ตุลาคม 2559
- [15] Maksimov,G.M.,Fedotov,M.A., Bogdanov,S.V.,Litvak,G.S., Golovin,A.V.,Likholobov,V.A. Synthesis and study of acid catalyst 30% WO<sub>3</sub>/SnO<sub>2</sub>. Journal of Molecula Catalysis A:Chemical 158 (2000) 435-438.
- [16] Sandra E., Tatiana O.M., Augusto D., Jeane D., Rosane L. Biodiesel from Rice Bran oil: Transesterification by Tin Compounds. Energy & Fuels 22 (2008) 671-674
- [17] Man K.L., Keat T.L.Accelerating transesterification reaction with biodiesel as co-solvent: A case study for solid acid sulfated tin oxide catalyst. Fuel 89 (2010) 3866-3870
- [18] Man K.L., Keat T.L.Application of Sulfated tin oxide in Transesterification of Waste Cooking Oil : An Optimization Study. Bionature (2011) 17-20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [19] Antonio, J.L, Ignacio,J.M, Jose,S.G., Pedro,M.T. Biodiesel production from sunflower oil by tungsten oxide supported on zirconium doped MCM-41 silica. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical* 335 (2011) 205-209
- [20] Yahaya,M.S., Wan Mohd,A.W.D, Abdul Aziz,A.R. Activity of solid acid catalysts for biodiesel production: A critical review. *Applied Catalysis A: General* 470 (2014) 140-161
- [21] Zhaoyan,Z. , Quanjing,Z. , Jing,D. , Xin,L., Wei-Lin,D. Effect of calcination temperature of the support and the catalyst of  $WO_3/SnO_2$  on the catalytic of 1, 2-benzenedimethanol by  $H_2O_2$ . *Applied Catalysis A: General* 482 (2014) 171-178
- [22] Alaya, M.N., Rabah, M.A. Preparation, characterization and catalytic activity of  $WO_3$  supported on sulfated tin oxide catalysts. *Arabian Journal of Chemistry* 10 (2017) S705-S718
- [23] Arpita.S. , Sudip, K.G., Panchanan, P. Investigation of the catalytic efficiency of a new mesoporous catalyst  $SnO_2/WO_3$  towards oleic acid esterification. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical* 327 (2010) 73-79
- [24] Fol l, A.M., Charles, H.W. Infrared Spectra and Characteristic Frequencies of Inorganic Ions. [Online]. Available: <http://matematicas.udea.edu.co/~carlopez/ac60068a007.pdf>.
- [25] Kim D.S., Ostromecki, M., Wachs, I.E. Surface structure of supported tungsten oxide catalysts under dehydrated conditions. *Journal of Molecule Catalysis A: chemical.* 106 (1996) 93-102.
- [26] Amalric-Popescu, D., Bozon-Verduraz, F., Infrared studies on  $SnO_2$  and  $Pd/SnO_2$ . *Catalysis Today*: 70 (2001) 139–154.
- [27] Silva, M.J., Cardoso, A.L., Heterogeneous Tin Catalysts applied to the esterification and transesterification reactions. *Journal of Catalysts.* 2013(2013) [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/510509>.

- [28] Park YM, Lee DW, Kim DK, Lee J, Lee KY. The heterogeneous catalyst system for the continuous conversion of free fatty acids in used vegetable oils for the production of biodiesel. *Catalysis Today*. 131(2008) 238-243.
- [29] NMR analysis. [Online]. Available: <http://www.rsc.org/suppdata/c5/ra/c5ra19575f/c5ra19575f1.pdf>.
- [30] Infrared Spectroscopy differences between biodiesel prepared from rapeseed and the edible rapeseed oil. [Online]. Available: <http://shimadzu.hr/sites/default/files/Infrared%20Spectroscopy%20differences%20between%20biodies%20prepared%20from%20rapeseed%20and%20the%20edible%20rapeseed%20oil.pdf>.
- [31] Wayan, S., Bandjar,A., Rosmawaty, M.S. Application of CaO from Psammotaea elongate Shell as Catalyst in Conversion the Beef Tallow to Biodiesel. *International Journal of Materials Science and Application* (2015) 219-224.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

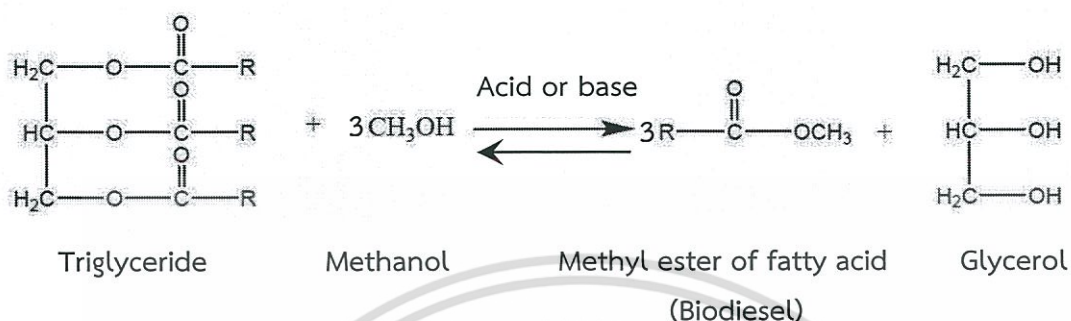


ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

### 1. การคำนวณหาร้อยละของเมทิลเอสเทอร์จากการชั่งน้ำหนัก



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

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

**ตัวอย่างการคำนวณ** ที่สภาวะการสังเคราะห์ไบโอดีเซล ใช้น้ำมันพืช 100.77 กรัม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 30%  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$  ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 9:1 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง พบว่าน้ำหนักของไบโอดีเซลมีค่าเท่ากับ 42.25 กรัม

ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ หาได้จาก

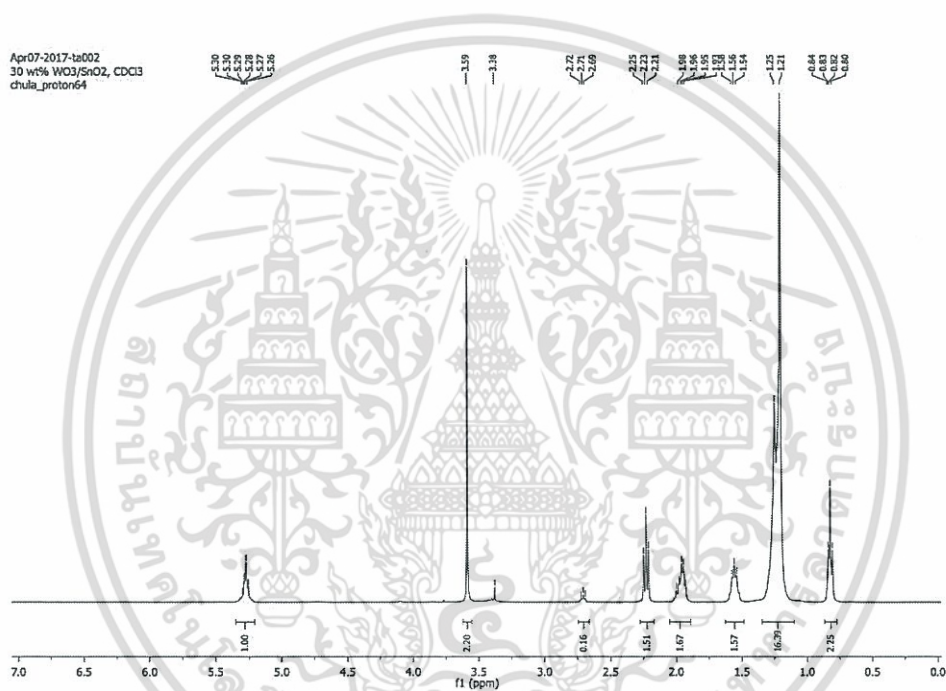
$$\text{น้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์ตามทฤษฎี} = 100.77 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้} = 42.25 \text{ กรัม}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ (\%yield)} &= (42.25/100.77) \times 100 \\
 &= 41.93
 \end{aligned}$$

## 2. การคำนวณหาร้อยละผลผลิตของเมทิลเอสเทอร์ (%yield of methyl ester) จากโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกตรัม ( $^1\text{H-NMR}$ spectrum)

ตัวอย่างการคำนวณ ที่สภาวะการสังเคราะห์ไบโอดีเซล ใช้น้ำมันพืช 100.23 กรัม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 30wt%  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$  ที่นำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 12:1 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง การคำนวณหาร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ สามารถหาได้จากไฮโดรเจนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกตรัมในรูปที่ ก.1 และสมการที่ (ก-2)



รูปที่ ก1. สเปกตรัมของน้ำมันไบโอดีเซลจากเครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรโทมิเตอร์

$$Y_{\text{ME}} = 100 \times \frac{[I_{\text{ME}}/3]}{[I_{\text{ME}}/3] + [I_{\text{TG}}/5]} \quad (\text{ก-2})$$

โดยที่  $Y_{\text{ME}}$  = ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์  
 $I_{\text{ME}}$  = ปริมาณของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการหาพื้นที่ใต้กราฟ  
 $I_{\text{TG}}$  = ปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ที่ได้จากการหาพื้นที่ใต้กราฟ

$$\text{ดังนั้น ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ } (Y_{\text{ME}}) = 100 \times \frac{[2.20/3]}{[2.20/3] + [1.67/5]} = 68.71\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

การคำนวณหาขนาดผลึกของทินออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) และตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์ ( $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$ )

สามารถคำนวณหาขนาดผลึกของทินออกไซด์และตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์จะใช้สูตรในการคำนวณจากสมการของเซอร์เรอร์ (Scherrer equation) ดังแสดงในสมการที่ (ข-1)

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

โดยที่  $D$  คือ ขนาดของผลึก  
 $K$  คือ ค่าคงที่ของเซอร์เรอร์ มีค่าเท่ากับ 0.94  
 $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ มีค่าเท่ากับ 1.5406 อังสตรอม  
 $\beta$  คือ ค่าความกว้างที่ความสูงครึ่งหนึ่งของพีค (Full Width at Half Maximum, FWHM) ของพีคในมุมเรเดียนที่  $2\theta$  (หน่วย : เรเดียน, rad)  
 $\theta$  คือ มุมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (หน่วย : องศา)

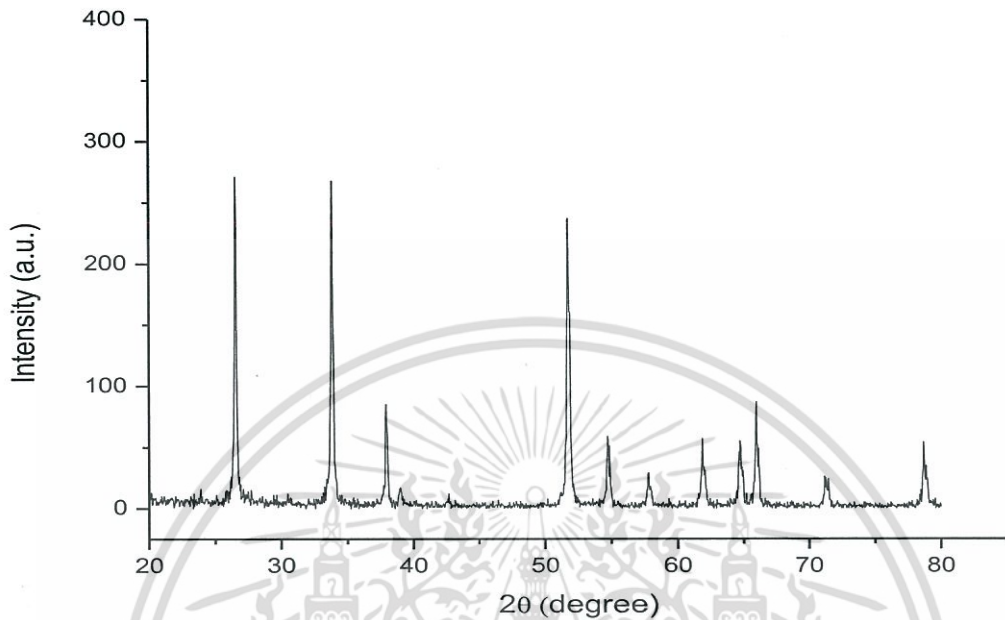
การคำนวณหาการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา

$$\text{สูตร} \quad D = \frac{96}{d}$$

โดยที่  $d$  คือ ขนาดของผลึกที่ต้องการ

## ตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณหาขนาดผลึกของทินออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) ที่สังเคราะห์ได้



รูปที่ ข.1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของทินออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ )

จากพีคแรกของรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่า ที่มุม  $2\theta = 26.591^\circ$  จะได้  $\theta = 13.2955^\circ$  โดย ค่าความกว้างที่ความสูงครึ่งหนึ่งของพีค (FWHM) มีค่าเท่ากับ  $0.1904^\circ$  และจากมุม  $180^\circ$  มีค่าเท่ากับ  $\pi$  (rad)

ถ้าหากมุม  $0.1904^\circ$  จะมีค่าเท่ากับ  $\frac{\pi \text{ (rad)} \times 0.1904^\circ}{180^\circ} = 0.0033 \text{ rad}$

จากสมการของเชอร์เรอร์

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

$$D = \frac{0.94 \times 1.5406 \text{ \AA}}{0.0033(\text{rad}) \times \cos(13.2955^\circ)}$$

$$D = 450.9237 \text{ \AA}$$

$$D = 45.0924 \text{ nm}$$

ดังนั้น ขนาดผลึกของทินออกไซด์มีค่าเท่ากับ 45.0924 นาโนเมตร

การคำนวณหาการกระจายตัวของทินออกไซด์ (SnO<sub>2</sub>)

จากสมการ

$$\begin{aligned}
 D &= \frac{96}{d} \\
 &= \frac{96}{43.9871} \\
 &= 2.1824
 \end{aligned}$$

ตารางที่ ข.1 การคำนวณหาขนาดผลึกเฉลี่ยและค่าการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ขนาดของผลึกเฉลี่ย	ค่าการกระจายตัว
SnO <sub>2</sub>	43.9871	2.1824
10wt% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub> , 700 °C	51.6005	1.8604
10wt% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub> , 800 °C	49.7523	1.9295
10wt% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub> , 900 °C	50.4278	1.9037
30wt% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub> , 700 °C	54.9358	1.7475
30wt% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub> , 800 °C	50.9017	1.8860
30wt% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub> , 900 °C	56.9543	1.6856

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค.

ตารางบันทึกผลร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ในสภาวะต่างๆ

ตารางที่ ค.1 ผลของปริมาณทั้งสแตนออกไซด์บนตัวรองรับทินออกไซด์ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณทั้งสแตนบนทินออกไซด์ (wt.%)	โมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	น้ำหนักน้ำมันที่ซังได้ (g)	น้ำหนักเมทิลเอสเทอร์ที่ซังได้ (g)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ (%)
5% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub>	5	9:1	2	150	2	100.45	32.44	32.29
10% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub>	10	9:1	2	150	2	100.32	35.73	35.61
15% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub>	15	9:1	2	150	2	100.46	37.19	37.02
20% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub>	20	9:1	2	150	2	100.44	39.44	39.27
30% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub>	30	9:1	2	150	2	100.77	42.25	41.93
40% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub>	40	9:1	2	150	2	100.06	32.55	32.53
SnO <sub>2</sub>	-	9:1	2	150	2	100.27	30.82	30.74
WO <sub>3</sub>	-	9:1	2	150	2	100.44	29.46	29.33

ตารางที่ ค.2 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิที่เผา (°C)	โมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	น้ำหนักน้ำมันที่ซังได้ (g)	น้ำหนักเมทิลเอสเทอร์ที่ซังได้ (g)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ (%)
30% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub>	700	9 : 1	2	150	2	100.39	34.44	34.31
	800	9 : 1	2	150	2	100.77	42.25	41.93
	900	9 : 1	2	150	2	100.39	31.60	31.48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เมื่อใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิที่เผา (°C)	โมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	น้ำหนักน้ำมันที่ซังได้ (g)	น้ำหนักเมทิลเอสเทอร์ที่ซังได้ (g)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ (%)
30% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub>	800	6 : 1	2	150	2	100.98	20.84	20.64
		9 : 1	2	150	2	100.77	42.25	41.93
		12 : 1	2	150	2	100.23	63.95	63.80
		15 : 1	2	150	2	100.46	52.52	52.28

ตารางที่ ค.4 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิที่เผา (°C)	โมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	น้ำหนักน้ำมันที่ซังได้ (g)	น้ำหนักเมทิลเอสเทอร์ที่ซังได้ (g)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ (%)
30% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub>	800	12 : 1	1	150	2	100.52	26.76	26.62
			2	150	2	100.23	63.95	63.80
			3	150	2	100.49	61.34	61.04
			4	150	2	100.15	53.60	53.52

ตารางที่ ค.5 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ทั้งสแตนออกไซด์บนทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิที่เผา (°C)	โมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	น้ำหนักน้ำมันที่ซังได้ (g)	น้ำหนักเมทิลเอสเทอร์ที่ซังได้ (g)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ (%)
30% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub>	800	12 : 1	2	120	2	100.30	22.06	21.99
				150	2	100.23	63.95	63.80
				180	2	100.34	40.66	40.52
				200	2	100.07	40.29	40.26
				220	2	100.50	40.28	40.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.6 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้ทั้งสแตนออกไซด์บน  
ทินออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

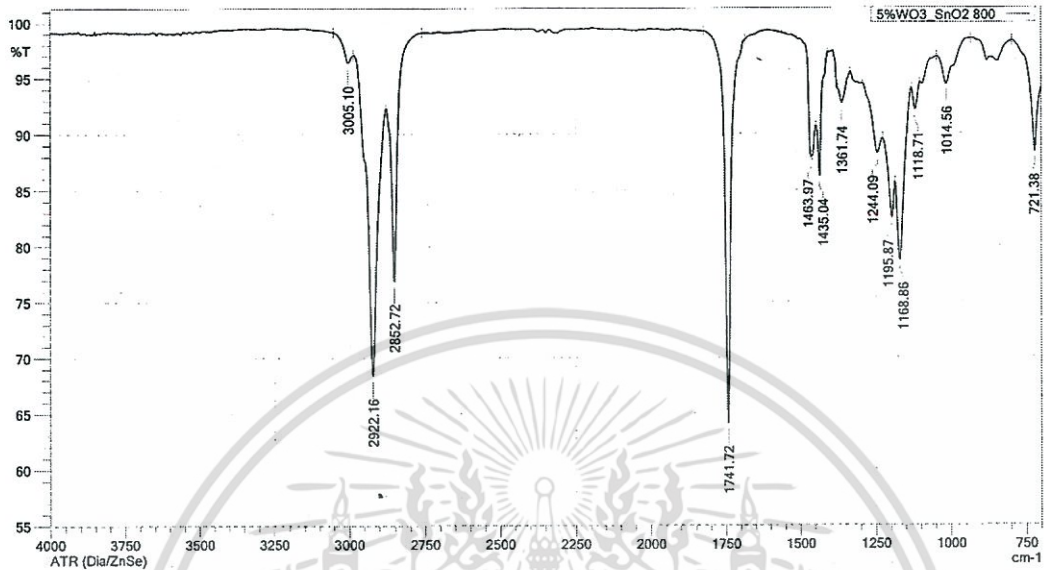
ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิที่เผา (°C)	โมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	น้ำหนักน้ำมันที่ซังได้ (g)	น้ำหนักเมทิลเอสเทอร์ที่ซังได้ (g)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ (%)
30% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub>	800	12 : 1	2	150	2	100.23	63.95	63.80
					4	100.97	44.40	43.97
					6	100.86	40.87	40.52

ตารางที่ ค.7 ตัวแปรในการศึกษาเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการนำกลับมาใช้ใหม่

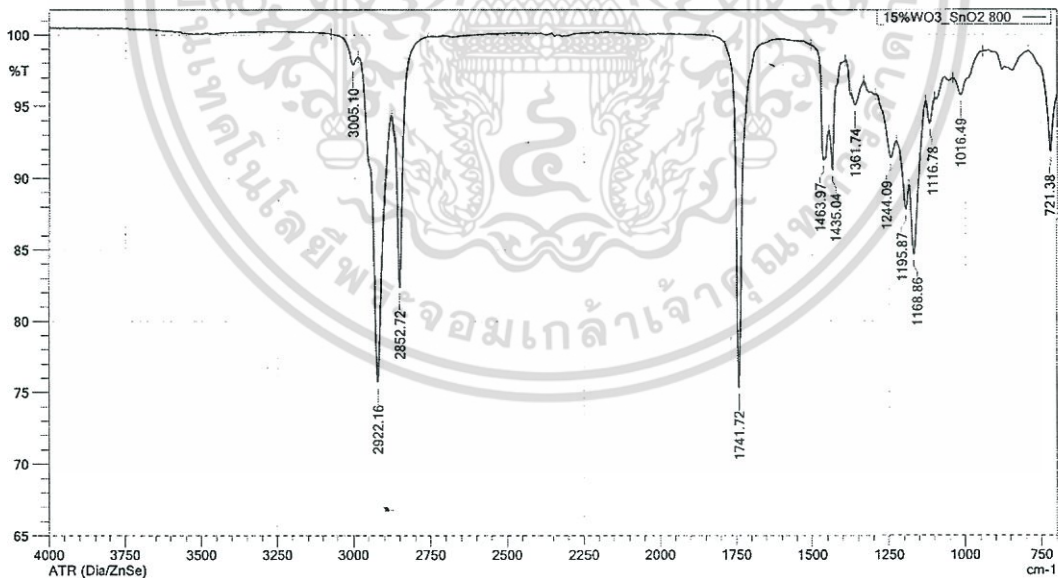
ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิที่เผา (°C)	โมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%)	อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	จำนวนครั้งที่ทำปฏิกิริยา	น้ำหนักน้ำมันที่ซังได้ (g)	น้ำหนักเมทิลเอสเทอร์ที่ซังได้ (g)	ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ (%)
30% WO <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub>	800	12:1	2	150	2	1	100.08	52.28	52.24
						2	100.30	50.69	50.54
						3	100.35	50.19	50.01
						4	100.40	48.07	47.88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

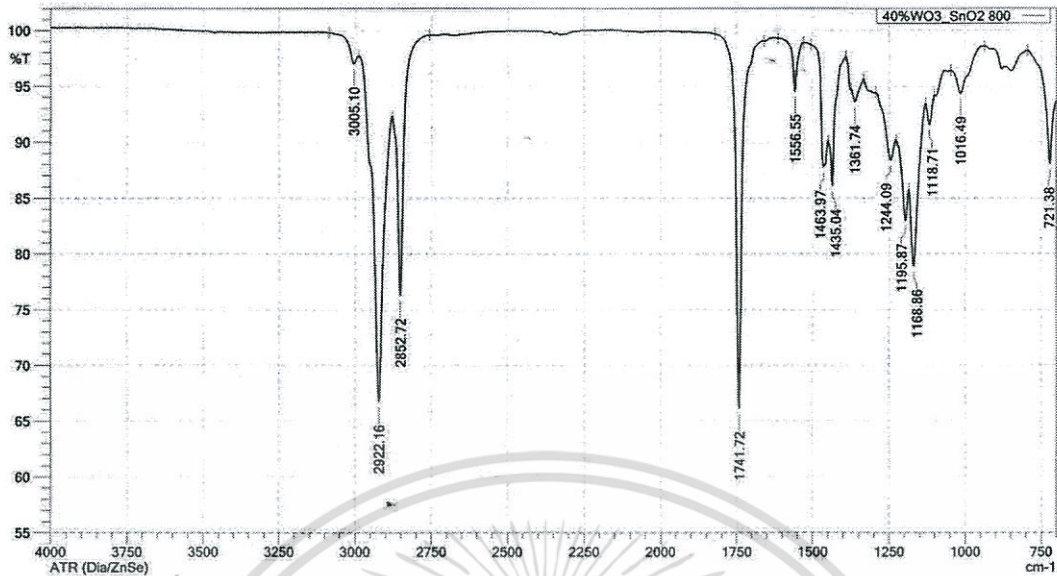
## ภาคผนวก ง.



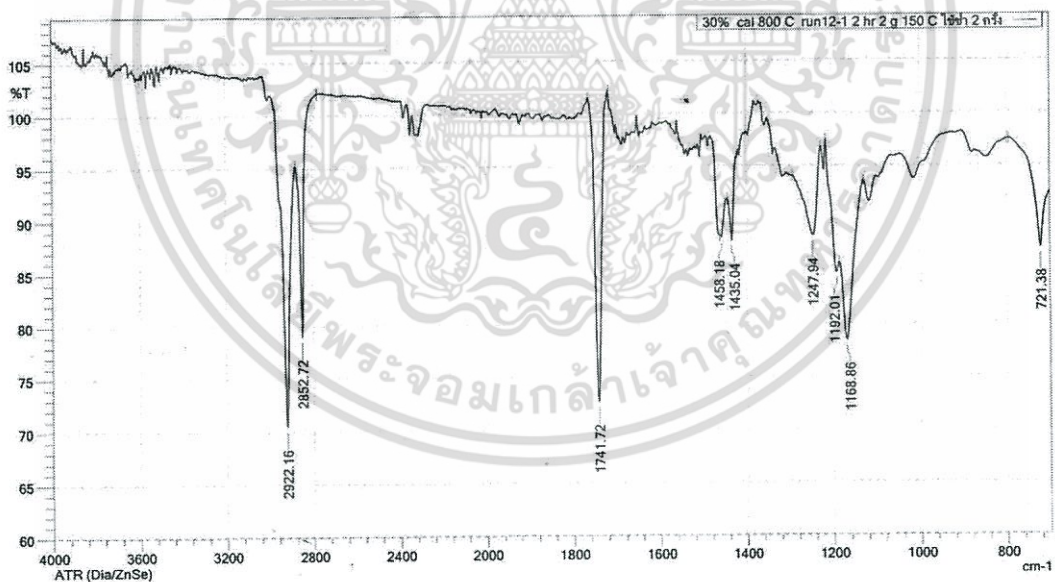
รูปที่ ง.1 FT-IR สเปกตรัมของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5wt%  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$  ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 9:1 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ  $150^\circ\text{C}$  เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง



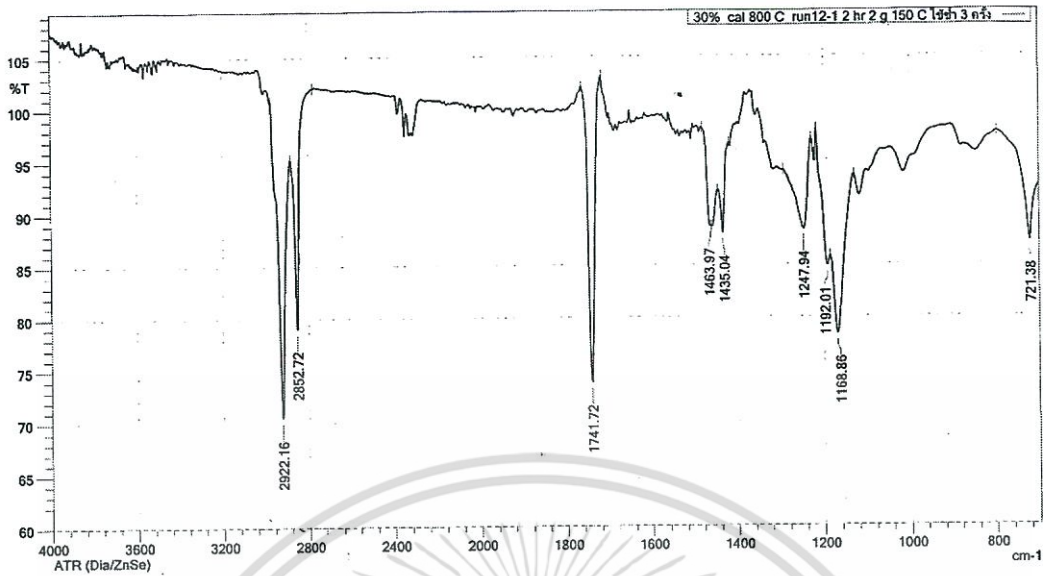
รูปที่ ง.2 FT-IR สเปกตรัมของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 15wt%  $\text{WO}_3/\text{SnO}_2$  ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 9:1 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ  $150^\circ\text{C}$  เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง



รูปที่ ง.3 FT-IR สเปกตรัมของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 40wt% WO<sub>3</sub>/SnO<sub>2</sub> ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 9:1 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150 °C เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง



รูปที่ ง.4 FT-IR สเปกตรัมของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 30wt% WO<sub>3</sub>/SnO<sub>2</sub> ถูกใช้ซ้ำครั้งที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 9:1 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150 °C เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง



รูปที่ ๓.5 FT-IR สเปกตรัมของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 30wt%  $WO_3/SnO_2$  ถูกใช้ซ้ำครั้งที่ 3 อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 9:1 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150 °C เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

