

การผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบ  
เบตนิ่งต่ออนุกรม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CONTINUOUS PRODUCTION OF BIODIESEL FROM PALM OIL USING DOLOMITE  
CATALYST IN FIXED BED REACTORS IN SERIES



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Petrochemistry and Polymer Science  
Field of Study of Petrochemistry and Polymer Science  
Faculty of Science  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2018  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มโดยใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมต์ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตติงต่อ อนุกรม
โดย	นายธนกฤต แจ่มจำรัส
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวงษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.ดวงกมล ตุงคะสมิต)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.อนวรรตน์ เกตุคง)

ชนกฤต แจ่มจรัส : การผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตติงต่อเนื่อง ( CONTINUOUS PRODUCTION OF BIODIESEL FROM PALM OIL USING DOLOMITE CATALYST IN FIXED BED REACTORS IN SERIES) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนากระบวนการผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ได้ไบโอดีเซลความบริสุทธิ์สูง ผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม และเมทานอลโดยใช้การเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตติงระดับต้นแบบ การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์จากโดโลไมต์ ใช้เทคนิคการผสมเชิงกายภาพระหว่างโดโลไมต์ที่ผ่านการเผากับตัวประสาน จากนั้นขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว แล้วทำการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง วิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy) และเทคนิคการดูดซับทางกายภาพของแก๊สไนโตรเจน จากผลการวิเคราะห์พบว่าแคลเซียมออกไซด์เป็นวัฏภาคที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยา ปัจจัยที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ ผลของการเติมเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน  $C_{10}$  (Fatty acid methyl ester,  $C_{10}$  FAME) ระยะเวลาดำเนินการในช่วง start-up ของระบบ และอุณหภูมิ การใช้น้ำมัน B100 เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์จะให้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์สูงกว่าการใช้  $C_{10}$  FAME จากการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการผลิตอย่างต่อเนื่องของไบโอดีเซลในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตติงระดับต้นแบบ คือ ระยะเวลาในการ start-up 3 ชั่วโมง อัตราการไหลของเมทานอล 22 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำมันปาล์ม 9 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 100 องศาเซลเซียส ใช้สารป้อนเข้าสู่ระบบเป็นน้ำมันปาล์มที่ไม่ผสม  $C_{10}$  FAME และใช้สารอิมัลซิไฟเออร์เป็นน้ำมัน B100 ในช่วง start-up โดยให้ผลได้เมทิลเอสเทอร์สูงถึงร้อยละ 98.4 โดยน้ำหนัก

สาขาวิชา    ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิ    ลายมือชื่อนิสิต .....

เมอร์

ปีการศึกษา   2561

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 5872136723 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORD: biodiesel, dolomite, fixed bed, palm oil, renewable energy

Tanakit Jamjumrus : CONTINUOUS PRODUCTION OF BIODIESEL FROM PALM OIL USING DOLOMITE CATALYST IN FIXED BED REACTORS IN SERIES. Advisor: Prof. THARAPONG VITIDSANT, Ph.D. Co-advisor: Assoc. Prof. Chawalit Ngamcharussrivichai, Ph.D.

This study investigated the continuous production of high purity biodiesel through heterogeneously catalyzed transesterification of palm oil with methanol in pilot-scale fixed bed reactors. The heterogeneous catalyst was prepared by physical mixing of calcined dolomite with binders, followed by formulation in an extrudate form using a single-screw extruder and calcination at 800 °C for 4 h. The catalyst obtained was characterized for its physicochemical properties by using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and N<sub>2</sub> physisorption measurement. The results indicated that CaO served as the major active phase in this reaction. The effect of operating parameters, including Fatty acid methyl ester(C<sub>10</sub>) addition, start-up time and temperature, on FAME yield was studied. Using B100 as an emulsifier gave FAME yield higher than using C<sub>10</sub> FAME. The optimum condition of biodiesel production in the pilot scale reactor was 3 hour start-up time, 22 mL/min methanol flow rate, 9 mL/min palm oil flow rate at 100 °C using palm oil without C<sub>10</sub> FAME added as feedstock and B100 as an emulsifier. This condition gave a FAME yield of ~98.4%.

Field of Study: Petrochemistry and  
Polymer Science

Academic Year: 2018

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

กราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ธารพงษ์ วิทิตสานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร. ขวลิต งามจรัสศรีวิชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาใช้เวลาให้ คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนข้อคิดเห็นต่างๆ รวมทั้งให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด จนส่งผลให้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ ดร. อนวรรตน์ เกตุคง และ อาจารย์ ดร. ดวงกมล ตุงคะสมิต กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ กรุณารับเชิญเป็นกรรมการสอบ ตลอดจนให้คำปรึกษา แนะนำ และเสนอแนะความคิดเห็นที่เป็น ประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์นี้เป็นอย่างยิ่ง และขอขอบพระคุณคณาจารย์ ภาควิชาปิโตรเคมีและ วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ และภาควิชาเคมีเทคนิค ทุกท่าน ที่คอยให้คำแนะนำ และอบรมพร้อมทั้งเสนอ ข้อคิดเห็นต่างๆในการวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ ทูสนับสนุนการวิจัยจาก ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ และศูนย์ความเป็นเลิศด้านการเร่งปฏิกิริยาสำหรับพลังงานชีวภาพและสารเคมีหมุนเวียน

ขอขอบคุณบริษัท พีแอนด์เอส โดโลโลม จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์โดโลไมต์มาให้ใช้ตลอด การทดลอง และบริษัท ไทยโออีโอเคมิคอล จำกัด (มหาชน) สำหรับการอนุเคราะห์น้ำมัน C10 FAME และน้ำมัน B100 เพื่อใช้ในการทำการทดลอง

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธारा ดร.วายุ จินดาพล และ นางสาว สุภา พรธรณ เรื่องอยู่ ที่ช่วยเหลือ และให้คำแนะนำในการทำงานวิจัยจนสามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ บุคคลากรในภาควิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ และภาควิชาเคมี เทคนิคทุกท่าน ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือ วิเคราะห์ต่างๆ รวมไปถึงกำลังใจจากเพื่อนๆ พี่ๆน้องๆ ทุกคน ทั้งในภาคและต่างภาค ที่คอยให้กำลังใจ เสมอมา

และสุดท้าย ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และพี่สาว ที่สนับสนุนด้านเงินทุน การสั่งสอน การให้คำแนะนำ และให้กำลังใจมาโดยตลอด จนสามารถสำเร็จการศึกษา

ธนภฤต แจ่มจรัส

## สารบัญ

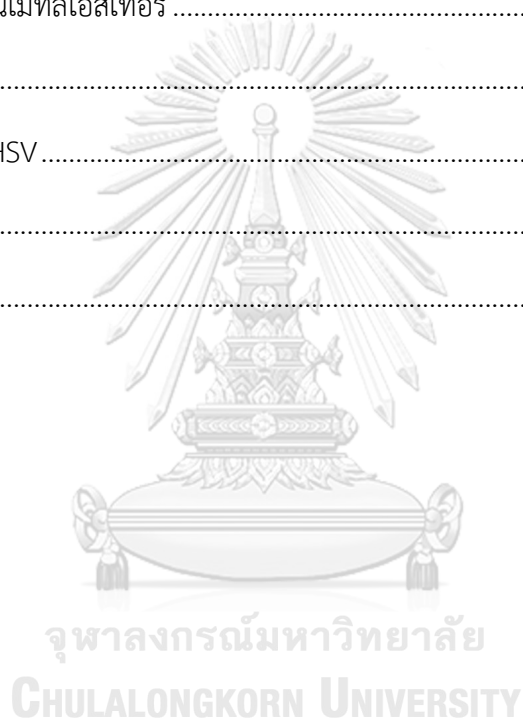
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ง
กิตติกรรมประกาศ .....	จ
สารบัญ.....	ฉ
บทนำ.....	1
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	5
2.2 ประเภทของน้ำมันเชื้อเพลิงและคุณภาพน้ำมัน .....	6
2.2.1 น้ำมันเบนซิน.....	6
2.2.1.1 ลักษณะและคุณภาพของน้ำมันเบนซิน .....	7
2.2.2 น้ำมันดีเซล.....	7
2.2.2.1 ลักษณะและคุณสมบัติของน้ำมันดีเซล .....	8
2.3 พลังงานทดแทนและพลังงานหมุนเวียน.....	8
2.4 ไบโอดีเซล .....	8
2.4.1 วิธีการผลิตไบโอดีเซล .....	9
2.4.1.1 การใช้น้ำมันพืชโดยตรง หรือการผสม .....	9
2.4.1.2 ไมโครอิมัลชัน (Microemulsion).....	9
2.4.1.3 การแตกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis).....	9
2.4.1.4 ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification) .....	10
2.4.2 พืชน้ำมันสำหรับผลิตเชื้อเพลิงไบโอดีเซล .....	12
2.4.2.1 กรดไขมันในน้ำมันพืชและไขมันสัตว์ .....	12

2.5	ปาล์มน้ำมัน .....	13
2.6	เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ .....	15
2.6.1	เทคโนโลยีการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง.....	15
2.6.2	เทคโนโลยีการผลิตแบบต่อเนื่องด้วยทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน.....	15
2.6.3	เทคโนโลยีการผลิตแบบต่อเนื่องชนิด 2 ขั้นตอน .....	15
2.7.1	ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซล .....	16
2.8	การเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน .....	21
2.8.1	ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (homogeneous catalyst) .....	21
2.8.2	ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (heterogeneous catalyst).....	21
2.8.3	เอนไซม์ .....	21
2.9	การขึ้นรูปตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์.....	22
2.8.1	กรรมวิธีการขึ้นรูปตามรูปทรง .....	22
2.10	โดโลไมต์.....	23
2.10.1	สมบัติทางกายภาพของโดโลไมต์ .....	24
2.10.2	แหล่งที่พบแร่โดโลไมต์ในประเทศไทย .....	24
2.10.3	ประโยชน์ของแร่โดโลไมต์ต่อวงการอุตสาหกรรมทั่วไป.....	24
2.11	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
วิธีดำเนินการวิจัย .....		30
3.1	วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง .....	30
3.1.1	วัตถุดิบและสารเคมีสำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา .....	30
3.1.2	วัตถุดิบและสารเคมีสำหรับการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน .....	30
3.1.3	วัตถุดิบและสารเคมีสำหรับวิเคราะห์เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล.....	30
3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	31
3.2.1	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	31



3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน .....	31
3.3 เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	32
3.3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา .....	32
3.3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์.....	33
3.4 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับต้นแบบที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล .....	34
3.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	37
3.5.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดเบสจากโดโลไมต์ธรรมชาติ.....	37
3.5.2 การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับต้นแบบ ...	38
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง .....	41
4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์.....	41
4.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์	41
4.1.2 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กราด.....	42
4.1.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและความพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการวัด การ ดูดซับและการคายแก๊สไนโตรเจน.....	43
4.2 ผลของการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งด้วยตัวเร่ง ปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ที่ผ่านการขึ้นรูป .....	44
4.2.1 ผลของการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ภาวะการทำปฏิกิริยาที่ได้จากการศึกษาในระดับ .....	45
ห้องปฏิบัติการ .....	45
4.2.2 ผลของระยะเวลาในช่วง start-up ต่อการผลิตไบโอดีเซล.....	46
4.2.3 ผลของการผลิตไบโอดีเซลโดยการทำทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันซ้ำ .....	47
4.2.4 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา .....	48
4.2.5 ผลของอัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ C <sub>10</sub> FAME ในช่วง start-up.....	49
4.2.6 ผลของอัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ C <sub>10</sub> FAME ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ.....	51
4.2.7 ผลของอิมัลซิไฟเออร์ต่อการทำปฏิกิริยา .....	53

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ .....	55
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	55
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	56
ภาคผนวก ก.....	62
การคำนวณอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลและน้ำมันปาล์ม .....	62
ภาคผนวก ข.....	63
การคำนวณปริมาณเมทิลเอสเทอร์ .....	63
ภาคผนวก ค.....	65
การคำนวณค่า WHSV .....	65
บรรณานุกรม.....	66
ประวัติผู้เขียน.....	68



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2. 1 องค์ประกอบของกรดไขมันของน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเมล็ดในปาล์ม.....	14
ตารางที่ 4. 1 พื้นที่ผิวจำเพาะและความพรุนของโพลีไมด์และตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นรูปที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดการดูดซับและการคายแก๊สไนโตรเจน.....	44
ตารางที่ 4. 2 อัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ C <sub>10</sub> FAME ในช่วง start-up.....	51
ตารางที่ 4. 3 อัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ C <sub>10</sub> FAME ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ.....	52
ตารางที่ ข. 1 ผลการวิเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC).....	64



## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2. 1 ปริมาณการใช้พลังงานคาดการณ์ตั้งแต่ปีค.ศ. 1965 -2035.....	5
รูปที่ 2. 2 อัตราส่วนการนำเข้าพลังงานต่อการผลิตพลังงานภายในประเทศปีพ.ศ. 2556 .....	6
รูปที่ 2. 3 การสลายตัวทางความร้อนของไตรกลีเซอไรด์ .....	10
รูปที่ 2. 4 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน .....	10
รูปที่ 2. 5 ขั้นตอนการเกิดปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน.....	11
รูปที่ 2. 6 ปฏิกริยาการเกิดไตรกลีเซอไรด์.....	12
รูปที่ 2. 7 รูปแบบของตัวเร่งปฏิกริยาขึ้นรูปแบบต่างๆ .....	23
รูปที่ 3. 1 เครื่องอัดขึ้นรูปแบบสกรูเดี่ยวสำหรับขึ้นรูปตัวเร่งปฏิกริยา.....	31
รูปที่ 3. 2 เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 ADVANCE .....	32
รูปที่ 3. 3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6400 .....	32
รูปที่ 3. 4 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น ASAP 2020 .....	33
รูปที่ 3. 5 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟียี่ห้อ Agilent รุ่น 7890A สำหรับการวิเคราะห์หา FAME yield .....	33
รูปที่ 3. 6 แผนภาพอย่างง่ายของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งระดับห้องปฏิบัติการสำหรับการผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่อง .....	34
รูปที่ 3. 7 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งระดับต้นแบบ (pilot-scale) สำหรับการผลิตอย่างต่อเนื่องของไบโอดีเซลความบริสุทธิ์สูง .....	35
รูปที่ 3. 8 ป้อนรีดท้อ .....	35
รูปที่ 3. 9 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller)แต่ละส่วนของคอลัมน์.....	36
รูปที่ 3. 10 ส่วนของคอลัมน์ภายในบรรจุตัวเร่งปฏิกริยา และ glass bead เพื่อช่วยในการกระจายตัวของฟองเมทานอล.....	36
รูปที่ 3. 11 ส่วนควบแน่นเมทานอล และส่วนเก็บเมทานอลเพื่อนำกลับมาใช้ซ้ำ.....	36

รูปที่ 3. 12 ส่วนเก็บผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลและกลีเซอรอล .....	37
รูปที่ 3. 13 ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา .....	38
รูปที่ 4. 1 รูปแบบ XRD ของโดโลไมต์ก่อนและหลังการเผา และตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นรูป.....	41
รูปที่ 4. 2 แสดงลักษณะสัณฐานของโดโลไมต์หลังการเผา และตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นรูปหลังการเผา ....	43
รูปที่ 4. 3 แสดงผลของการผลิตไบโอดีเซลในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับต้นแบบโดยใช้ภาวะการทำปฏิกิริยาที่ได้จากการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ .....	45
รูปที่ 4. 4 ผลของระยะเวลาในช่วง start-up ต่อ FAME yield และการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ C10 FAME.....	47
รูปที่ 4. 5 ผลของการผลิตไบโอดีเซลโดยการทำทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันซ้ำ และการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ C10 FAME .....	48
รูปที่ 4. 6 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาและการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ C10 FAME.....	49
รูปที่ 4. 7 ผลของอัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ C10 FAME ในการผลิตไบโอดีเซลและการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ C10 FAME).....	50
รูปที่ 4. 8 ผลของอัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ C10 FAME ที่ป้อนเข้าสู่ระบบในการผลิตไบโอดีเซล และการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ C10 FAME .....	52
รูปที่ 4. 9 ผลของอิมัลซิไฟเออร์ต่อการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับต้นแบบ.....	54
รูปที่ ข. 1 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการทดลอง.....	63

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ไบโอดีเซล เป็นพลังงานทางเลือกจากธรรมชาติ ผลิตได้จากชีวมวลประเภทที่มีน้ำมัน เช่น ปาล์ม ถั่วเหลือง หรือ ทานตะวัน เป็นต้น การเผาไหม้เชื้อเพลิงของน้ำมันไบโอดีเซลนั้น จะช่วยลดปัญหาในด้านมลพิษทางอากาศได้ดีกว่าน้ำมันจากปิโตรเลียม เพราะไม่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ และเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าน้ำมันดีเซลไบโอดีเซลจึงจัดว่าเป็นพลังงานทางเลือกที่นอกจากจะจัดว่าเป็นพลังงานสะอาดแล้ว ยังสามารถสร้างขึ้นใหม่ได้ตลอดเวลา

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน [1] หรือ ปฏิกิริยาแอลกอฮอล์ไลซิส (Alcoholysis) เป็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันจากชีวมวล กับ แอลกอฮอล์ และมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแอลคิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล

การออกแบบกระบวนการผลิตไบโอดีเซลนับเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งเสริมการเพิ่มกำลังการผลิตไบโอดีเซลในอุตสาหกรรม กระบวนการแบบแบตช์เป็นการผลิตไบโอดีเซลกระบวนการหนึ่งที่ได้รับคามนิยมอย่างมาก เนื่องจากดำเนินการง่ายโดยการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน สามารถผลิตได้เมทิลเอสเทอร์สูงภายใต้ภาวะการกวนแบบต่อเนื่องเพื่อให้สารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยาสัมผัสกันอย่างทั่วถึง อย่างไรก็ตาม กระบวนการนี้พบข้อจำกัดของความต้านทานการถ่ายโอนมวลสารระหว่างน้ำมันและแอลกอฮอล์ เนื่องจากสารตั้งต้นทั้งสองไม่สามารถละลายเข้ากันได้ จึงทำให้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ลดลง นอกเหนือจากปัญหาเรื่องการถ่ายโอนมวลสารแล้ว กระบวนการแบบแบตช์ยังมีข้อด้อยด้านประสิทธิภาพการผลิตต่ำ เนื่องจากการเปิด-ปิดระบบทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการผลิตและสูญเสียเวลาในการดำเนินการ หากต้องการเพิ่มกำลังการผลิตไบโอดีเซลในปริมาณมากจำเป็นต้องใช้เครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดใหญ่

เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจึงถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อลดข้อจำกัดจากระบบแบตช์เพื่อมุ่งหวังให้เกิดอัตราการผลิตที่สูง และลดการใช้พลังงานในการ start-up เครื่องปฏิกรณ์ เทคโนโลยีการผลิตแบบต่อเนื่องนี้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ให้ได้ปริมาณที่สูงขึ้นต่อวัน และมีคุณภาพสม่ำเสมอมากกว่าแบบไม่ต่อเนื่อง

การพัฒนากระบวนการผลิตให้มีปริมาณการผลิตต่อวันที่สูงขึ้น จำเป็นต้องเพิ่มขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ให้อยู่ในระดับต้นแบบ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการผลิตเมื่อทำการขยายขนาดการผลิต

ที่ใหญ่ขึ้นในระดับต้นแบบ การพัฒนาระบบจากห้องปฏิบัติการสู่ระดับต้นแบบนี้ สามารถสร้างประโยชน์ในด้านการเป็นต้นแบบของโมเดลการผลิตสู่ระดับอุตสาหกรรมที่ใหญ่ขึ้น

ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งแบบเอกพันธ์และแบบวิวิธพันธ์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ชนิดแอลคาไลน์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในเชิงพาณิชย์มากที่สุด เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เนื่องจากมีราคาถูก สามารถเกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็ว แต่มีข้อจำกัดคือ ตัวเร่งชนิดนี้สามารถแยกออกจากผลิตภัณฑ์ได้ยาก ทำให้เกิดน้ำเสียในการบำบัดจำนวนมาก รวมไปถึงอาจเกิดปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน หากวัตถุดิบที่นำมาใช้มีปริมาณกรดไขมันอิสระมาก ซึ่งส่งผลให้ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ลดลง [2] ในปัจจุบันจึงเริ่มมีการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์มาใช้ในการผลิตมากขึ้น เพราะสามารถแยกออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย และลดการปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบ สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ดีและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สามารถเตรียมได้จากวัสดุในธรรมชาติ เช่น เปลือกไข่ เปลือกหอย หินปูน และโดโลไมต์ธรรมชาติ เป็นต้น โดยจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ พบว่า โดโลไมต์ ซึ่งเป็นแร่จำพวกคาร์บอเนต เมื่อเกิดการเผาจะได้สารประกอบออกไซด์ของแคลเซียมและแมกนีเซียม ซึ่งมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาได้ดี และมีอัตราการใช้ซ้ำได้มากกว่าสารประกอบออกไซด์ปกติ ราคาถูก สามารถหาได้ง่ายในประเทศไทย [3] ผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ชนิดเบสจากโดโลไมต์ธรรมชาติ ซึ่งสามารถแยกออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย และใช้โดโลไมต์เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมผ่านกระบวนการผสมทางกายภาพและอัดขึ้นรูป จากนั้นนำมาร่อนผ่านตะแกรงเพื่อคัดขนาด (Sieve) ให้มีขนาดตามที่ต้องการก่อนจะนำมาใช้ในการทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งในระดับต้นแบบ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาการขึ้นรูปตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ชนิดเบสจากโดโลไมต์ธรรมชาติสำหรับการผลิตไบโอดีเซล

1.2.2 ศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการต่อการผลิตอย่างต่อเนื่องของไบโอดีเซล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับต้นแบบ และหาภาวะเหมาะสมที่ใช้สำหรับการผลิตอย่างต่อเนื่องของไบโอดีเซล ให้ได้ผลได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์มากกว่า 96.5 %

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ทดสอบระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง

1.3.2 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ชนิดเบสจากโดโลไมต์ธรรมชาติโดยใช้วิธีการผสมเชิงกายภาพ

1.3.3 ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลและกลีเซอรอลความบริสุทธิ์สูงผ่านการเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง

1.3.4 วิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลความบริสุทธิ์สูงที่ได้ จากงานวิจัยเทียบกับผลิตภัณฑ์ทางการค้า

## 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย (โดยละเอียด)

1.4.1 ศึกษาค้นคว้าทฤษฎี งานวิจัยและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมและการขึ้นรูปตัวเร่งปฏิกิริยาจากโคลโลไมต์ธรรมชาติ และการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งระดับต้นแบบในการผลิต

1.4.2 ประกอบและทดสอบระบบการผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งระดับต้นแบบ โดยทดสอบการประกอบส่วนต่างๆของเครื่องปฏิกรณ์ ทดสอบระบบการป้อนสารเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ ระบบการให้ความร้อน การตรวจวัดอุณหภูมิ และระบบการควบแน่น

1.4.3 ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจากโคลโลไมต์ธรรมชาติ โดยการผสมเชิงกายภาพ และทำการอัดขึ้นรูปตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว (Single screw extruder) จากนั้นนำมาร่อนผ่านตะแกรงเพื่อคัดขนาด (Sieve) ให้มีขนาดในช่วง 5-6 มิลลิเมตร

1.4.4 ศึกษาสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ที่เตรียมขึ้นโดยใช้เทคนิควิเคราะห์ต่างๆ ได้แก่

1. วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา (X-ray diffraction: XRD)
2. วิเคราะห์สัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy: SEM)
3. วิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการวัดการดูดซับและการคายแก๊สไนโตรเจน ( $N_2$  adsorption-desorption measurement)

1.4.5 ศึกษาการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคลโลไมต์ธรรมชาติที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการทดลอง ใช้สารตั้งต้นในการผลิตเป็นน้ำมันปาล์มและเมทานอล ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งระดับต้นแบบ โดยศึกษาปัจจัยในการทดลองดังนี้

1. การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ภาวะการทำปฏิกิริยาที่ได้จากการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ
2. ระยะเวลาดำเนินการในช่วง Start-up ของระบบ
3. การผลิตไบโอดีเซลโดยการทำทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันซ้ำ
4. อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา
5. อัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ  $C_{10}$  FAME ในช่วงเวลาการ start-up



6. อัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ C<sub>10</sub> FAME ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ
7. ชนิดของอิมัลซิไฟเออร์ต่อการทำปฏิกิริยา
- 1.4.6 วิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี
- 1.4.7 วิเคราะห์ สรุปลผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่องโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพลีเมตในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับต้นแบบ

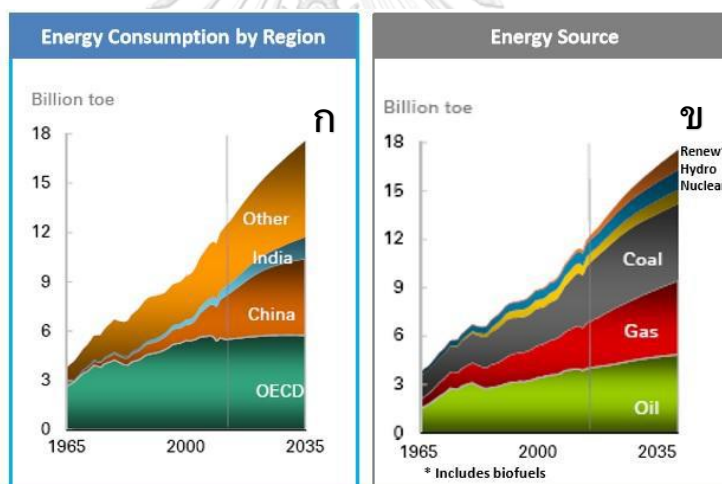


## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แนวคิดและทฤษฎี

ในปัจจุบันเศรษฐกิจโลกและปริมาณน้ำมันสำรองของพลังงานมีการลดลงอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้สถานการณ์ของราคาพลังงานโลกมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ อีกทั้งความต้องการพลังงานโดยเฉพาะในกลุ่มประเทศที่ไม่เป็นสมาชิกองค์การเพื่อความร่วมมือทางเศรษฐกิจและการพัฒนา (Non-OECD หรือ Non-Organisation for Economic Co-operation and Development) ได้เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 2.1 (ก) และจากรูปที่ 2.1 (ข) จะเห็นว่าแหล่งพลังงานหมุนเวียนซึ่งเป็นพลังงานที่มีความยั่งยืน (Sustainable Energy) และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Eco-friendly) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว

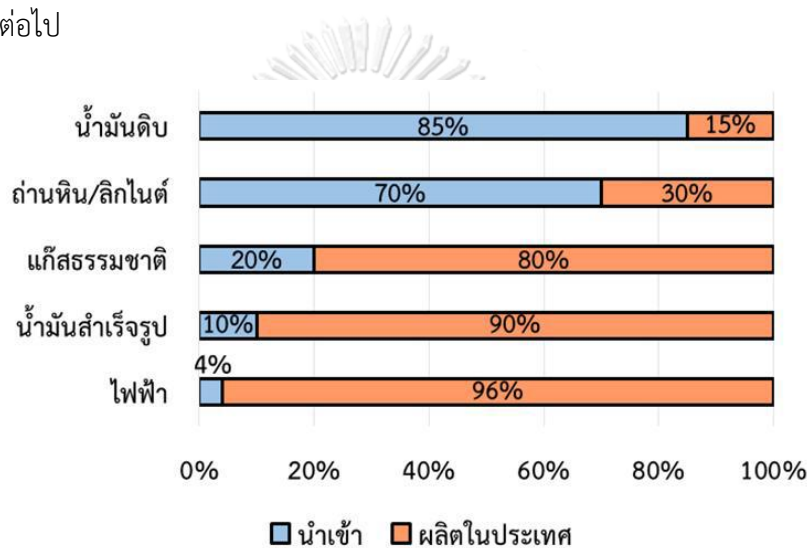


รูปที่ 2. 1 ปริมาณการใช้พลังงานคาดการณ์ตั้งแต่ปีค.ศ. 1965 -2035 (ก) การใช้พลังงานตามแหล่งทางภูมิศาสตร์(ข) [21]

ประเทศไทยจัดว่าเป็นประเทศที่นำเข้าพลังงานสุทธิ พลังงานน้ำมันดิบและถ่านหิน/ลิกไนต์ มีปริมาณการนำเข้าสูงกว่าพลังงานที่ผลิตภายในประเทศมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ดังนั้นการคิดค้นกระบวนการผลิตและการพัฒนาพลังงานทดแทน จะสามารถช่วยลดการพึ่งพาและการนำเข้าเชื้อเพลิงปิโตรเลียมตลอดจนสามารถกระจายความเสี่ยงในการจัดหาเชื้อเพลิงได้ โดยปัจจุบันประเทศไทยจัดเป็นประเทศที่มีศักยภาพในการผลิตพลังงานทดแทน เช่น การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากพืช น้ำมัน อาทิเช่น ปาล์มน้ำมัน ทานตะวัน ถั่วเหลือง และมะพร้าว เป็นต้น โดยสามารถช่วยลดต้นทุนใน

การผลิต อีกทั้งยังเป็นการส่งเสริมและสร้างเสถียรภาพให้กับผลผลิตทางการเกษตรอีกด้วย นอกจากนี้ในการผลิตไบโอดีเซลยังได้กลีเซอรอลซึ่งเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยา โดยกลีเซอรอลนับว่าเป็นสารที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นการนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เสริมความงาม ผลิตภัณฑ์อาหารและยา เป็นต้น

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงมุ่งศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มโดยใช้โพลีไมต์ที่สามารถพบได้ง่ายในประเทศไทยและมีราคาถูก เป็นวัตถุดิบหลักในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา โดยได้ทำการศึกษาและทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งในระดับต้นแบบ โดยมุ่งหวังให้เกิดประโยชน์ในด้านการเพิ่มกำลังการผลิต และสามารถพัฒนาระบบการผลิตไปสู่ระดับอุตสาหกรรมต่อไป



รูปที่ 2. 2 อัตราส่วนการนำเข้าพลังงานต่อการผลิตพลังงานภายในประเทศปีพ.ศ. 2556

## 2.2 ประเภทของน้ำมันเชื้อเพลิงและคุณภาพน้ำมัน

ผลิตภัณฑ์น้ำมันเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการกลั่นจากปิโตรเลียม มีด้วยกันมากมายหลายชนิด โดยสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้กับอุตสาหกรรมหลายๆด้าน โดยปัจจุบันคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้สัมพันธ์กับเครื่องยนต์ที่กำลังพัฒนาเช่นเดียวกัน ซึ่งจะขอยกตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน มีด้วยกัน 2 ชนิด คือ น้ำมันเบนซินและน้ำมันดีเซล [4]

### 2.2.1 น้ำมันเบนซิน

น้ำมันเบนซิน เป็นน้ำมันที่ได้จากการปรับแต่งคุณภาพจากการผลิตน้ำมันโดยตรง โดยทั่วไปน้ำมันเบนซินจะถูกนำมาผสมกับสารเพิ่มคุณภาพ เพื่อให้เหมาะกับการใช้งานในด้านต่างๆโดยเฉพาะ เช่น นำมาผสมกับสารเพิ่มค่าออกเทน ผสมกับสารต้านการรวมตัวกับอากาศ ผสมกับสารป้องกันการ

เกิดสนิมในท่อน้ำมัน เป็นต้น จึงเหมาะที่จะนำมาใช้กับยานพาหนะ เช่น รถยนต์ รถจักรยานยนต์ หรือ เครื่องยนต์ทั่วไป

### 2.2.1.1 ลักษณะและคุณภาพของน้ำมันเบนซิน

1. ค่าออกเทน เป็นค่าที่แสดงความต้านทานการจุดระเบิดก่อนเวลาที่กำหนดในเครื่องยนต์เบนซิน หรือ เป็นตัวเลขแสดงความต้านทานการน็อคของน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์เบนซิน โดยการน็อคจะส่งผลให้เครื่องยนต์อ่อนกำลังลง อย่างไรก็ตาม ในเครื่องยนต์แต่ละชนิดจะมีค่าออกเทนไม่เท่ากัน ซึ่งขึ้นอยู่กับการออกแบบของบริษัทผู้ผลิตเครื่องยนต์

2. ปริมาณตะกั่ว ปัจจุบันได้เลิกการเติมตะกั่วลงไปน้ำมันแล้ว แต่อาจเกิดการเจือปนหลงเหลือจากน้ำมันดิบ หรือในขั้นตอนการผลิต โดยตะกั่วที่เจือปนนั้นจัดว่าเป็นสารก่อมลพิษในท่อไอเสีย และส่งผลร้ายต่อร่างกายเป็นอย่างมาก จึงต้องมีการควบคุมปริมาณตะกั่วในน้ำมันให้ไม่เกินข้อกำหนด

3. ปริมาณกำมะถัน เมื่อกำมะถันในน้ำมันถูกเผาไหม้จะก่อให้เกิดการกัดกร่อนเครื่องยนต์ให้สึกหรอ นอกจากนี้ยังทำให้เครื่องยนต์สกปรก และก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ

4. ปริมาณฟอสฟอรัส ฟอสฟอรัสมักจะปนมาจากกระบวนการผลิต โดยสามารถทำให้เครื่องกรองไอได้รับความเสียหายได้

5. เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เป็นค่าที่บ่งถึงความสามารถของน้ำมันที่จะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วให้ยางเหนียวออกมา ซึ่งส่งผลต่อห้องเผาไหม้ และการเก็บน้ำมันสำรอง

### 2.2.2 น้ำมันดีเซล

น้ำมันดีเซลเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่ง ที่ได้จากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม โดยมีช่วงจุดเดือดและความชื้นสูงกว่าน้ำมันเบนซิน ในเครื่องยนต์ดีเซล มีลักษณะการทำงานที่แตกต่างจากเครื่องยนต์เบนซิน โดยการจุดระเบิดในเครื่องยนต์ดีเซล จะใช้ความร้อนที่เกิดจากการอัดอากาศปริมาณสูงในกระบอกสูบ แล้วฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปให้เกิดการเผาไหม้ ซึ่งไม่ใช่แบบระบบการจุดระเบิดจากหัวเทียนเหมือนในเครื่องยนต์เบนซิน

ดังนั้นการเติมน้ำมันจึงมีความจำเป็นที่จะต้องเติมให้ถูกชนิดให้เหมาะสมกับเครื่องยนต์ที่ใช้ โดยช่องเติมน้ำมันควรมีป้ายบอกให้ชัดเจนว่าให้บริการน้ำมันชนิดใด เพื่อลดการเกิดปัญหาและสร้างความเสียหายแก่รถยนต์

ความอันตรายของน้ำมันดีเซล คล้ายคลึงกับน้ำมันเบนซิน เพียงแต่ในกรณีของน้ำมันดีเซลนั้น จะไม่มีสารประกอบตะกั่ว แต่ในน้ำมันดีเซลยังมีสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งผิวหนังได้หากได้รับการสัมผัสโดยตรงเป็นเวลานาน โดยสารดังกล่าว คือ PCA (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon) ดังนั้นหลังการสัมผัสน้ำมันดีเซล จึงต้องมีการล้างมืออย่างสะอาดทุกครั้ง

### 2.2.2.1 ลักษณะและคุณสมบัติของน้ำมันดีเซล

1. การติดไฟ น้ำมันดีเซลมีความสามารถในการติดเครื่องยนต์ที่อุณหภูมิต่ำ และสามารถป้องกันการน็อคของเครื่องยนต์ระหว่างการเผาไหม้ โดยแสดงออกในรูปของดัชนีซีเทน (cetane number) โดยมีค่าซีเทนสูงพอที่จะทำให้เครื่องยนต์ไม่น็อคได้

2. ความสะอาด เป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของน้ำมันดีเซล โดยความสะอาดจะส่งผลต่อการเกิดตะกอน น้ำ หรือเขม่าควัน เนื่องจากในระบบน้ำมันดีเซลจะต้องใช้ปั้มน้ำมันและหัวฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงเพื่อช่วยในการเผาไหม้

3. การกระจายตัวเป็นฝอย ความหนืดจะส่งผลต่อการกระจายตัวเป็นฝอยของน้ำมันดีเซล โดย น้ำมันดีเซลที่มีความหนืดพอดีจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการกระจายตัวเป็นฝอย ซึ่งลดการเกิดการอุดตันในระบบหัวฉีดน้ำมัน และล่อลื่นเครื่องยนต์

4. อัตราการระเหยตัว สามารถบ่งบอกถึงจุดเดือด จุดวาบไฟ จุดติดไฟของน้ำมันดีเซล

### 2.3 พลังงานทดแทนและพลังงานหมุนเวียน

พลังงานทดแทน (Alternative Energy) แบ่งได้เป็น 2 ประเภท [21,22] ได้แก่

1. พลังงานทดแทนชนิดใช้แล้วหมดไป (Non-Renewable Alternative Energy) คือ พลังงานที่ได้จากทรัพยากรธรรมชาติที่ไม่สามารถนำมาใช้หมุนเวียนหรือเกิดขึ้นใหม่ได้ในระยะเวลาจำกัด และไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม เช่น พลังงานจากหินน้ำมัน (Oil Shale) ทราชน้ำมัน (Tar Sand) และพลังงานนิวเคลียร์(Nuclear)

2. พลังงานทดแทนชนิดหมุนเวียน (Renewable Energy) คือ พลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานธรรมชาติที่ใช้แล้วสามารถเกิดขึ้นใหม่ด้วยกระบวนการ หรือวัฏจักรตามธรรมชาติในช่วงระยะเวลาจำกัด พลังงานทดแทนชนิดนี้จึงไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานจากขยะ และพลังงานจากชีวมวล เช่นไบโอดีเซล เป็นต้น

### 2.4 ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล จัดว่าเป็นพลังงานทดแทนชนิดหมุนเวียน ซึ่งสามารถผลิตได้จากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ ผ่านกระบวนการทางเคมีเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างไขมันหรือน้ำมันให้เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมัน โดยนำมาทดลองใช้ในเครื่องยนต์เป็นผลสำเร็จครั้งแรก โดย "รูดอล์ฟ ดีเซล" (Rudolf C. Diesel: 1858-1913) ซึ่งเป็นวิศวกรชาวเยอรมัน โดยปัจจุบันมีการใช้เชิงพาณิชย์จากไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซล ไม่ว่าจะเป็น รถบรรทุก เครื่องยนต์หนัก รถยนต์ดีเซลทั่วไป รวมไปถึงเครื่องยนต์คอมมอนเรล ในหลายๆประเทศทั่วโลก

### 2.4.1 วิธีการผลิตไบโอดีเซล

ในปัจจุบันการผลิตไบโอดีเซล มีการพัฒนาวิธีการผลิตเพื่อปรับปรุงคุณภาพของไบโอดีเซลให้ดียิ่งขึ้นต่าง ๆ มากมาย โดยวิธีการผลิตมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การใช้น้ำมันพืชโดยตรง หรือการผสมการแตกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis) การทำไมโครอิมัลชัน (Microemulsion) และการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification) [5-8] ซึ่งในงานวิจัยนี้จะผลิตไบโอดีเซลผ่านการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เนื่องจากเป็นวิธีการที่ได้ไบโอดีเซลที่มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด ส่วนวิธีการอื่นๆ ในการผลิตไบโอดีเซล มีดังนี้ เช่น

#### 2.4.1.1 การใช้น้ำมันพืชโดยตรง หรือการผสม

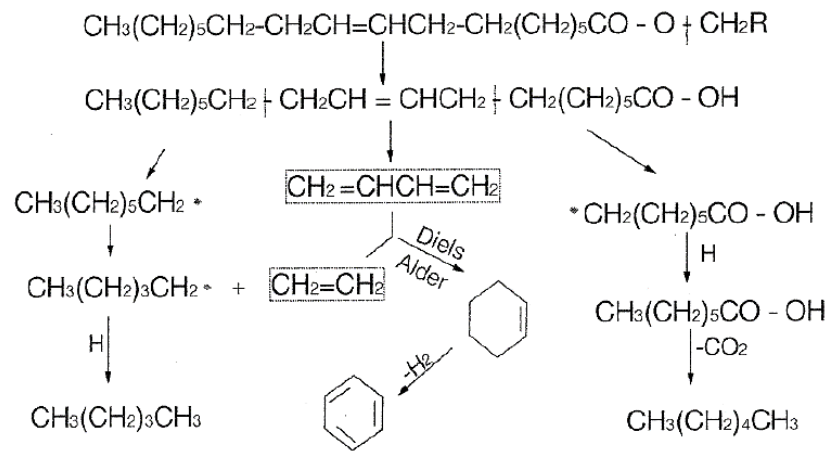
การใช้น้ำมันพืชมาใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงสามารถนำมาใช้งานได้ ในกรณีที่มีการปรับแต่งเครื่องยนต์ให้มีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้งาน เนื่องจากน้ำมันพืชมีความหนืดสูงกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล การฉีดน้ำมันเป็นฝอยทำได้ยากกว่า ซึ่งอาจก่อให้เกิดการสันดาปที่ไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้การระเหยเป็นไอของน้ำมันพืชทำได้ยากกว่าในน้ำมันดีเซล ทำให้การจุดระเบิดทำได้ยาก ดังนั้นการนำน้ำมันพืชมาใช้โดยตรงจึงต้องมีการคำนึงถึงผลเสียซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายแก่เครื่องยนต์ได้ ดังนั้นจึงมีการคิดค้นโดยการนำน้ำมันพืชมาผสมกับน้ำมันดีเซล เช่น การผสมน้ำมันปาล์มกับน้ำมันดีเซล น้ำมันมะพร้าวกับน้ำมันดีเซล เป็นต้น โดยวิธีนี้ถือว่าเป็นวิธีที่ใช้ต้นทุนต่ำที่สุด

#### 2.4.1.2 ไมโครอิมัลชัน (Microemulsion)

ไมโครอิมัลชัน มุ่งเน้นการแก้ปัญหาเรื่องความหนืดของน้ำมันพืช โดยการนำมาผสมด้วยตัวทำละลาย ไมโครอิมัลชันนิยามได้ว่าเป็นการผสมสาร 2 ชนิดที่ไม่ผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันให้สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้โดยการใช้สารลดแรงตึงผิวเป็นตัวผสม ทำให้อนุภาคแขวนลอยที่ได้มีขนาดเล็กมากอยู่ในช่วง 1 ถึง 150 นาโนเมตร ซึ่งเมื่อมองด้วยตาเปล่าจะเห็นเป็นเนื้อเดียวกัน

#### 2.4.1.3 การแตกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis)

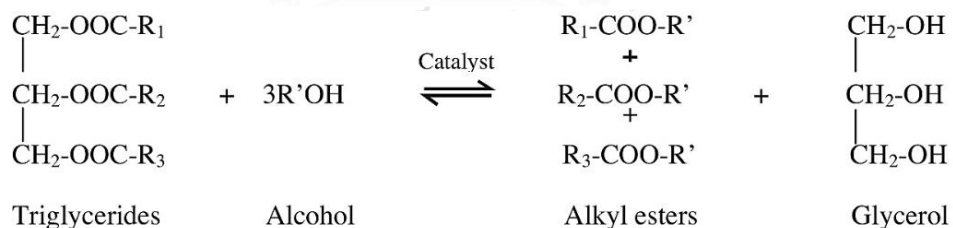
การแตกสลายด้วยความร้อนหรือไพโรไลซิส เป็นการเปลี่ยนสารชนิดหนึ่งไปเป็นสารอีกชนิดหนึ่งโดยใช้วิธีการแตกตัวทางความร้อนโดยปราศจากอากาศและออกซิเจน ได้เป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก โดยใช้วัตถุดิบจากน้ำมันพืช ไขมันสัตว์ กรดไขมันธรรมชาติและเมทิลเอสเทอร์ โดยกระบวนการนี้ดำเนินการได้ง่าย ไม่ก่อให้เกิดของเสีย และปราศจากมลพิษ จัดว่าเป็นวิธีที่ได้ผลดีเมื่อเทียบกับการสลายตัวด้วยวิธีอื่นๆ โดยการสลายตัวทางความร้อนของไตรกลีเซอไรด์ แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2. 3 การสลายตัวทางความร้อนของไตรกลีเซอไรด์ [6]

#### 2.4.1.4 ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification)

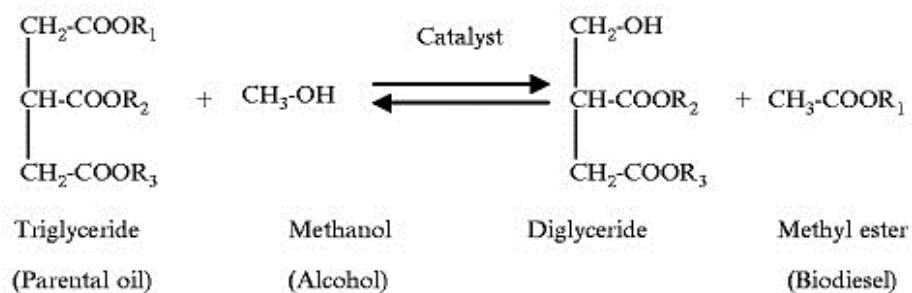
ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน เป็นกระบวนการเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลทางเคมีของไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันพืช หรือไขมันสัตว์ โดยการทำปฏิกิริยากันกับแอลกอฮอล์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพังก์ หรือวีริฟังก์ที่มีสมบัติเป็นเบส เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ หรือสารประกอบออกไซด์ของโลหะอัลคาไลน์อื่นๆ ได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นไบโอดีเซลหรืออัลคิลเอสเทอร์ (Alkyl Ester) และมีกลีเซอรอลเป็นสารพลอยได้ (By-Product) ซึ่งจะถูกแยกออกจากผลิตภัณฑ์เพื่อทำให้ไบโอดีเซลมีความบริสุทธิ์มากขึ้น การเกิดปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 2.4



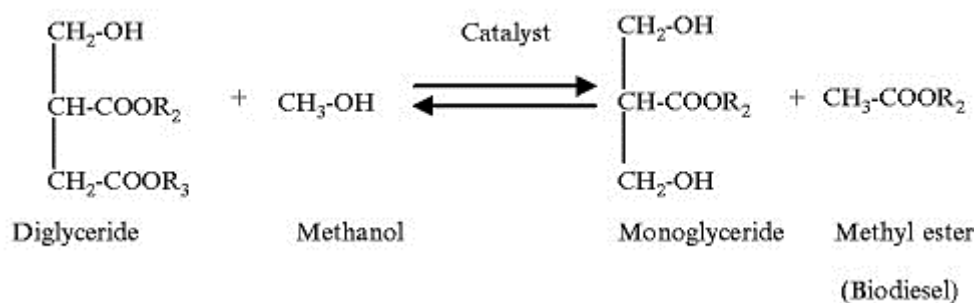
รูปที่ 2. 4 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน [7]

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน จะเกิดเป็นขั้นตอน โดยมีด้วยกัน 3 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยในขั้นตอนแรก น้ำมันพืชหรือไตรกลีเซอไรด์จะทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ โดยในที่นี้คือเมทานอล เกิดเป็นไตรกลีเซอไรด์และเมทิลเอสเทอร์ จากนั้น ไตรกลีเซอไรด์จะทำปฏิกิริยาต่อกับเมทานอล เกิดเป็น โมโนกลีเซอไรด์และเมทิลเอสเทอร์ และสุดท้ายโมโนกลีเซอไรด์ที่เหลือจะทำปฏิกิริยากับเมทานอล เกิดเป็นเมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล

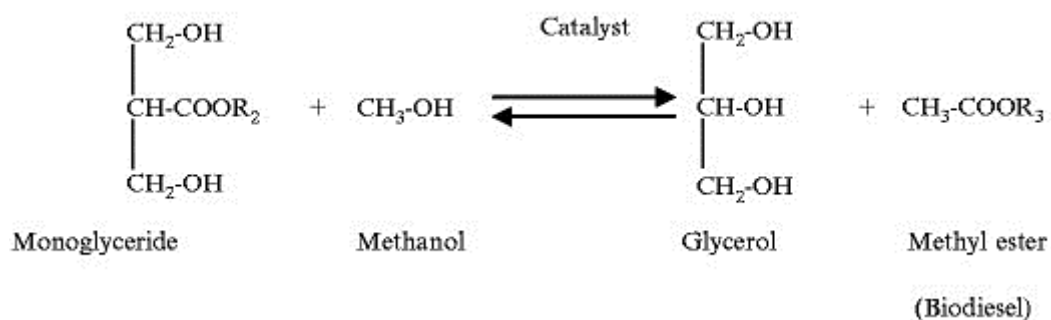
## ขั้นตอนที่ 1



## ขั้นตอนที่ 2



## ขั้นตอนที่ 3

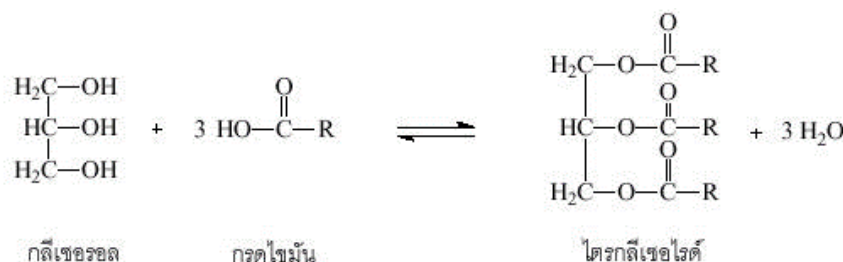


รูปที่ 2. 5 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน [8]



## 2.4.2 พืชน้ำมันสำหรับผลิตเชื้อเพลิงไบโอดีเซล

พืชน้ำมันเป็นชื่อใช้เรียกพืชที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบอยู่ภายใน เช่น อยู่ในผล เปลือก หรือในเมล็ด พืชน้ำมันที่นิยมนำมาผลิตเป็นน้ำมันไบโอดีเซลได้ในปัจจุบัน มีเมล็ดทานตะวัน มะพร้าว และปาล์มน้ำมัน เป็นต้น โดยมีองค์ประกอบหลักเป็นสารจำพวกไตรกลีเซอไรด์ ที่เกิดจากการรวมตัวของกรดไขมัน 3 โมเลกุล เกาะติดกับโมเลกุล ของกลีเซอรอล 1 โมเลกุล ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2. 6 ปฏิกิริยาการเกิดไตรกลีเซอไรด์ [7]

### 2.4.2.1 กรดไขมันในน้ำมันพืชและไขมันสัตว์

องค์ประกอบหลักของน้ำมันพืช คือ กรดไขมัน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆด้วยกัน คือ กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated Fatty Acid) และกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated Fatty Acid) ในปริมาณสัดส่วนของกรดทั้งสองชนิดจะแตกต่างกัน ทำให้คุณสมบัติของน้ำมันพืชแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ซึ่งกรดไขมันที่พบในน้ำมันพืชส่วนมากจะเป็นกรดไขมันแบบไม่อิ่มตัว โดยมีจำนวนคาร์บอนเป็นเลขคู่เสมอในโมเลกุล ซึ่งมีความยาวตั้งแต่ 12 ถึง 24 โมเลกุล แต่ที่พบบ่อย คือจำนวนคาร์บอน 16 และ 18 โดยในธรรมชาติจะพบกรดไขมันในรูปอิสระในปริมาณเพียงเล็กน้อย ส่วนใหญ่จะพบในรูปเอซิลกลีเซอรอล (Acylglycerol) หรือไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ซึ่งเกิดจากการรวมตัวของกรดไขมันกับกลีเซอรอล โดยที่กลีเซอรอลเป็นสารพวกแอลกอฮอล์ ที่มีหมู่ฟังก์ชัน  $-\text{OH}$  จำนวน 3 หมู่ ถ้ากรดไขมันเพียงหนึ่งโมเลกุลทำปฏิกิริยากับ หมู่  $-\text{OH}$  ของกลีเซอรอล จะเรียกว่า โมโนกลีเซอไรด์ (Monoglyceride) ถ้ากรดไขมันสองโมเลกุลทำปฏิกิริยา จะได้ไดกลีเซอไรด์ (Diglyceride) และถ้ากรดไขมันสามโมเลกุลทำปฏิกิริยา จะได้ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride)

กรดไขมันในน้ำมันพืชส่วนใหญ่มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนในช่วง 10 ถึง 20 อะตอม โดยกรดไขมันจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. กรดไขมันอิ่มตัว คือกรดไขมันที่ไม่มีพันธะคู่ในโครงสร้างโมเลกุล
2. กรดไขมันไม่อิ่มตัว คือกรดไขมันที่มีพันธะคู่ในโครงสร้างโมเลกุล แบ่งออกได้ 2 ประเภท ได้แก่ กรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่ในโมเลกุล 1 พันธะ (monounsaturated fatty acid) และกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่ในโมเลกุลตั้งแต่ 2 พันธะขึ้นไป (polyunsaturated fatty acids) กรด

ไขมันทั้งชนิดอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสัญลักษณ์ได้ ตัวอย่างเช่น กรดโอเลอิกเขียนในรูปสัญลักษณ์ C18:1 หมายถึง กรดโอเลอิกเป็นกรดไขมันที่ประกอบไปด้วย คาร์บอน 18 อะตอม และมีพันธะคู่ในโมเลกุล 1 พันธะ [9] โดยน้ำมันพืชแต่ละชนิดจะมีองค์ประกอบของกรดไขมันที่แตกต่างกันออกไป

## 2.5 ปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมัน (Palm Oil) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ คือ *Elaeis guineensis* Jacq. เมื่อผลปาล์ม น้ำมันสุกและเหมาะสมกับการเก็บเกี่ยวจะมีสีส้ม ประเทศไทยปลูกปาล์มน้ำมันเพื่อใช้บริโภคเป็นหลัก การนำเข้าและส่งออกน้ำมันปาล์มอยู่ในรูปของน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันที่ผ่านกรรมวิธีเติมไฮโดรเจน น้ำมันปาล์มประกอบด้วยกรดไขมันชนิดอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวชนิดต่างๆ เช่นเดียวกับองค์ประกอบในน้ำมันพืชชนิดอื่น โดยปาล์มน้ำมันจะมีลักษณะพิเศษ ดังนี้ [10, 11]

1. เป็นพืชที่สามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมในประเทศไทยได้ดี
2. เป็นพืชที่ให้ผลผลิตน้ำมันต่อหน่วยพื้นที่สูงที่สุดและราคาถูกกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพืชชนิดอื่น ๆ
3. เป็นพืชที่ให้พลังงานที่จำเป็นต่อการบริโภคในชีวิตประจำวัน
4. วัสดุพลอยได้จากปาล์มในหลายส่วน สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้
5. สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตทะลายได้ตลอดทั้งปี และมีอายุการเก็บเกี่ยวมากกว่า 25 ปี จึงจึงสามารถสร้างได้ตลอดทั้งปี
6. เป็นพืชที่ทนทานต่อการเกิดภัยธรรมชาติ เช่น กรณีเกิดไฟไหม้สวน ปาล์มน้ำมันสามารถฟื้นสภาพกลับมาเจริญเติบโตและให้ผลผลิตได้ใหม่
7. สามารถนำมาผลิตเป็นพลังงานทดแทนได้ในอนาคต

และน้ำมันปาล์มสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามที่อยู่ของน้ำมันในผลปาล์ม ดังนี้

1. น้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil) เป็นน้ำมันที่สกัดได้จากเปลือกหุ้มภายนอกของปาล์ม น้ำมัน (Mesocarp) มีลักษณะเป็นของเหลวหนืดสีส้มเนื่องจากมีเบต้าแคโรทีน (Beta-carotene) ซึ่งถูกกำจัดโดยการนำไปต้มจนกระทั่งสีส้มหายไป น้ำมันปาล์มดิบมีกรดไขมันอิ่มตัวเป็นองค์ประกอบในปริมาณมากจึงมีลักษณะกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิห้อง
2. น้ำมันจากเมล็ดปาล์ม (Crude Palm Kernel Oil) เป็นน้ำมันที่สกัดได้จากเนื้อในของเมล็ดผลปาล์ม (Palm Kernel) มีน้ำ ไขมันร้อยละ 44 - 48 โดยน้ำหนัก มีองค์ประกอบของกรดไขมันอิ่มตัวชนิดทรานส์เป็นจำนวนมาก และมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวปริมาณน้อย สามารถแยกส่วนที่เป็น

ของแข็งออกจากของเหลวได้ด้วยการกรองและบีบอัดด้วยความดัน ส่วนที่เป็นของแข็งเรียกว่า สเตียรีน (Stearin) ใช้ทำเนย ส่วนที่เป็นของเหลว เรียกว่า โอลีน (Olein) ใช้บริโภคและทำสบู่

ปาล์มน้ำมันนั้นเหมาะแก่การเพาะปลูกในพื้นที่ที่มีสภาพอากาศร้อนชื้นและมีฝนตกชุก ส่งผลให้ปาล์มน้ำมันเติบโตได้ดีและให้ผลผลิตค่อนข้างสูง โดยประเทศไทยจัดเป็นหนึ่งในประเทศที่อยู่ในบริเวณที่เหมาะสมแก่การเพาะปลูกปาล์มน้ำมัน เนื่องจากมีสภาพภูมิอากาศร้อนจึงปลูกกันมากทางภาคใต้และชายฝั่งทะเล ด้านตะวันออกของอ่าวไทย นอกจากนี้ประเทศไทยยังมีพื้นที่เพาะปลูกปาล์มน้ำมันมากเป็นอันดับ 3 ของโลก รองจากอินโดนีเซียและมาเลเซีย น้ำมันปาล์มและน้ำมันเมล็ดในปาล์มมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2 โดยในการผลิตไบโอดีเซลสามารถใช้น้ำมันที่ได้จากทุกส่วนของปาล์มน้ำมันมาเป็นวัตถุดิบ เช่น น้ำมันปาล์มดิบ น้ำมันเมล็ดในปาล์ม น้ำมันปาล์มโอเลอิน และปาล์มสเตียรีน เป็นต้น

**ตารางที่ 2.1** องค์ประกอบของกรดไขมันของน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเมล็ดในปาล์ม [12]

กรดไขมัน	น้ำมันปาล์มดิบ	น้ำมันเมล็ดในปาล์ม
กรดไขมันอิ่มตัว	50%	82%
C6:0	-	0.1-0.5
C8:0	-	3.4-5.9
C10:0	-	3.3-4.4
C12:0	0.1-0.4	46.3-51.1
C14:0	1.0-1.4	14.3-16.8
C16:0	40.9-47.5	6.5-8.9
C18:0	3.8-4.8	1.6-2.6
C20:0	0-0.8	-
กรดไขมันไม่อิ่มตัว	50%	18%
C16:1	0-0.6	-
C18:1	36.4-41.2	13.2-16.4
C18:2	9.2-11.6	2.2-3.4
C18:3	0-0.5	-
อื่นๆ	-	tr-0.9

## 2.6 เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์

ปัจจุบัน มีการผลิตไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ด้วยกันมีการผลิตอยู่ 3 กระบวนการหลัก ได้แก่ เทคโนโลยีการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง เทคโนโลยีการผลิตแบบต่อเนื่องด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน และเทคโนโลยีการผลิตแบบต่อเนื่องชนิด 2 ขั้นตอนที่ใช้ทั้งปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันและทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันควบคู่กันไป [13, 14]

### 2.6.1 เทคโนโลยีการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง

เทคโนโลยีการผลิตแบบนี้ เป็นการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง นิยมใช้กระบวนการแบบแบตช์ (batch process) ซึ่งเป็นระบบการผลิตไบโอดีเซลที่ง่าย โดยการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน ภายในบรรจุไปด้วยน้ำมัน แอลกอฮอล์และตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้มักเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เนื่องจากสามารถเร่งปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว ข้อดีของเทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลแบบไม่ต่อเนื่อง คือ ราคาถูก แต่คุณภาพของผลิตภัณฑ์อาจมีความไม่สม่ำเสมอและมีกำลังการผลิตต่อครั้งไม่มากนัก

### 2.6.2 เทคโนโลยีการผลิตแบบต่อเนื่องด้วยทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจะถูกพัฒนามาจากระบบแบตช์ เพื่อมุ่งหวังให้เกิดอัตราการผลิตที่สูง และลดการใช้พลังงานในการ start-up เครื่องปฏิกรณ์ โดยเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ จะมีลักษณะแบบถังกวนต่อเรียงกัน (continuous stirred tank reactors: CSTR) สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสม่ำเสมอมากกว่าแบบไม่ต่อเนื่อง แต่มีการลงทุนสูงกว่า

### 2.6.3 เทคโนโลยีการผลิตแบบต่อเนื่องชนิด 2 ขั้นตอน

เทคโนโลยีการผลิตแบบต่อเนื่องชนิด 2 ขั้นตอน เหมาะสำหรับน้ำมันที่มีค่ากรดไขมันอิสระสูง โดยขั้นตอนแรกเป็นกำจัดกรดไขมันอิสระออกก่อน ผ่านปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยในปฏิกิริยานี้มีน้ำเกิดขึ้นเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม จึงจำเป็นต้องกำจัดน้ำออกก่อนแล้วจึงใช้กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน เป็นขั้นตอนที่สอง ดังนั้น การเลือกเทคโนโลยีในการผลิตไบโอดีเซลจะต้องพิจารณาถึงหลายปัจจัย ไม่ว่าจะเป็นชนิดและประเภทของวัตถุดิบ ขั้นตอนการทำให้ไบโอดีเซลมีความบริสุทธิ์และได้ปริมาณสูง มีคุณภาพสม่ำเสมอ รวมถึงการใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำด้วย

## 2.7 เปรียบเทียบสมบัติของเชื้อเพลิงดีเซลกับไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากน้ำมันพืชที่ผ่านกระบวนการทางเคมีจะมีคุณสมบัติหลายประการใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล แต่อย่างไรก็ตาม ไบโอดีเซลและน้ำมันดีเซลมีองค์ประกอบและโครงสร้างที่แตกต่างกัน ทำให้สมบัติบางประการของไบโอดีเซลแตกต่างจากน้ำมันดีเซล โดยสามารถเปรียบเทียบการใช้ไบโอดีเซลและน้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง [10] [15] ดังนี้

1. เป็นเชื้อเพลิงสะอาดและปลอดภัยโดยพบว่าก๊าซไอเสียจากน้ำมันไบโอดีเซลมีอันตรายน้อยกว่าน้ำมันดีเซลโดยผ่านการทดสอบจาก US-EPA
2. สามารถใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลรอบสูงหรือรอบต่ำได้เลยโดยไม่ต้องปรับแต่งเครื่องยนต์ การใช้งานไบโอดีเซลใช้ได้เหมือนกับน้ำมันดีเซลและสามารถยืดอายุการใช้งานของเครื่องยนต์ดีเซลเพราะไบโอดีเซลมีสารหล่อลื่นที่ดีกว่าน้ำมันดีเซล
3. ปลอดภัยในการจัดเก็บและขนส่งเพราะไบโอดีเซลมีจุดวาบไฟ (flash point) สูงกว่าน้ำมันดีเซลและลุกติดไฟได้ยากกว่าในบรรยากาศ
4. การเผาไหม้ของน้ำมันไบโอดีเซลสมบูรณ์กว่าการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซลจึงช่วยลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้และฝุ่น
5. เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกที่สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบภายในประเทศและเป็นพลังงานทดแทนที่สามารถนำมาใช้งานโดยนำมาผสม (blends) กับน้ำมันดีเซลหรือใช้โดยตรงโดยไม่ผสมกับน้ำมันดีเซล
6. ไบโอดีเซลปราศจากกำมะถันและอะโรมาติกเป็นองค์ประกอบ เมื่อเผาไหม้จึงไม่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ

### 2.7.1 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซล

ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. ๒๕๕๘ เทียบกับมาตรฐานสากล มาตรฐาน ASTM D6751 เป็นหลัก [16,17] แสดงดังนี้

2.7.1.1 เมทิลเอสเทอร์ (Methyl ester) ใช้ระบุความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล ตามข้อกำหนดของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ กรมธุรกิจพลังงาน ให้ทดสอบตาม EN 14103 ซึ่งตรวจวัดโดยใช้เทคนิคโครมาโตกราฟี และผลที่ได้ต้องให้ค่าไม่ต่ำกว่า 96.5 wt% ส่วนในการทดสอบตามมาตรฐานไบโอดีเซล (B100) ASTM D6751 ไม่ระบุให้มีการทดสอบ

2.7.1.2 ความหนาแน่น (Density) ใช้ระบุสมบัติเบื้องต้นทางกายภาพของไบโอดีเซลในการทดสอบมีหลายวิธี อย่างไรก็ตามในข้อกำหนดของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ กรมธุรกิจพลังงาน ให้ทดสอบตามวิธี ASTM D1298 ซึ่งผลที่ได้ต้องให้ค่าไม่ต่ำกว่า 860 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและไม่สูงกว่า 900 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่ 150°C ส่วนมาตรฐานไบโอดีเซล (B100) ASTM D6751 ไม่ระบุให้มีการทดสอบ การวัดค่าความหนาแน่นหรือค่าความถ่วงจำเพาะนี้ ทำการวัดค่าโดยใช้อุปกรณ์วัดความถ่วงจำเพาะ

2.7.1.3 ความหนืดจลน์ (Kinematic viscosity) ความหนืดในน้ำมันมีความสำคัญมากในการใช้งานในเครื่องยนต์ เพราะเป็นตัวบอกลถึงความสามารถในการต้านทานการไหล และบอกถึงคุณสมบัติในการหล่อลื่นพื้นผิว ในการทดสอบมีหลายวิธีแต่ที่ระบุในข้อกำหนดของไบโอดีเซล

ประเภทเมทิลเอสเทอร์ กรมธุรกิจพลังงาน และมาตรฐานไบโอดีเซล (B100) ASTM D6751 คือใช้วิธีตาม ASTM D445 ซึ่งผลที่ได้ต้องให้ค่าในช่วง 3.5-5.0 (เซนติสโตกส์, cSt) อุณหภูมิ 40°C และ ให้ผลในช่วง 1.9-6.0 สำหรับ ข้อกำหนดของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ กรมธุรกิจพลังงาน และมาตรฐานไบโอดีเซล (B100) ASTM D6751 ตามลำดับ ในน้ำมันที่มีความหนืดสูงเกินไป จะส่งผลให้การจ่ายน้ำมันเข้าจุดระเบิดในห้องเผาไหม้กระจายตัวไม่ดี มีผลต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยตรง ทำให้เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เกิดเขม่า อีกทั้งยังสิ้นเปลืองน้ำมัน

2.7.1.4 จุดวาบไฟ (Flash point) คือ อุณหภูมิต่ำสุดที่เชื้อเพลิงเกิดการระเหย มีจำนวนเพียงพอที่จะลุกติดไฟได้วูบหนึ่ง แล้วดับ เมื่อมีเปลวไฟผ่านเข้ามา ในการทดสอบมีหลายวิธีแต่ที่ระบุในข้อกำหนดของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ กรมธุรกิจพลังงาน และมาตรฐานไบโอดีเซล (B100) ASTM D6751 คือใช้วิธีตาม ASTM D93 (Pensky – Martens closed cup tester ซึ่งผลที่ได้ต้องให้ค่าไม่ต่ำกว่า 120°C และ 130°C สำหรับข้อกำหนดของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ กรมธุรกิจพลังงาน และมาตรฐานไบโอดีเซล (B100) ASTM D6751 ตามลำดับ

2.7.1.5 กำมะถัน (Sulfur) ปริมาณกำมะถันในน้ำมัน มีความจำเป็นอย่างมากในการตรวจวัดเนื่องจากกำมะถันมีผลให้เกิดการกัดกร่อนของชิ้นส่วนภายในเครื่องยนต์ โดยออกไซด์ของกำมะถันที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ จะกลายเป็นกรดกัดกร่อนโลหะได้ เกิดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ เกิดเขม่าจับในห้องเผาไหม้ ในการทดสอบมีหลายวิธีแต่ที่ระบุในข้อกำหนดของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ กรมธุรกิจพลังงาน ให้ทดสอบตามวิธี ASTM D2622 ซึ่งผลที่ได้ต้องให้ค่าไม่เกิน 0.0010 wt% ส่วนในการทดสอบตามมาตรฐานไบโอดีเซล (B100) ASTM D6751 ให้ทดสอบตามวิธี ASTM D5453 ซึ่งผลที่ได้ต้องให้ค่าไม่เกิน 0.0015 wt%

2.7.1.6 กากถ่าน (Carbon residue) คือ กากที่เหลือจากการเผาไหม้ในที่อับอากาศ ปริมาณกากคาร์บอนสูงเป็นสิ่งไม่พึงประสงค์ในเชื้อเพลิง เพราะมีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดเขม่าตกค้าง (deposit) และไอเสียมีควันดำมาก ในการทดสอบมีหลายวิธีแต่ที่ระบุในข้อกำหนดของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ กรมธุรกิจพลังงาน ให้ทดสอบตาม ASTM D4530 ซึ่งผลที่ได้ต้องให้ค่าไม่สูงกว่า 0.30 wt% (ทดสอบจากร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น) ส่วนในการทดสอบตามมาตรฐานไบโอดีเซล (B100) ASTM D6751 ให้ทดสอบตามวิธี ASTM D4530 (เป็นการทดสอบจากน้ำมันไบโอดีเซลที่ไม่ผ่านการกลั่น) ซึ่งผลที่ได้ต้องให้ค่าไม่เกิน 0.05 wt% ตามลำดับ

2.7.1.7 จำนวนซีเทน (Cetane number) คือพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพในการจุดติดไฟ (ignition) ของเครื่องยนต์ดีเซล จำนวนซีเทนที่สูงช่วยให้การสตาร์ทเครื่องยนต์ได้ง่าย ทั้งยังช่วยลดควันขาวที่เกิดขึ้นอีกด้วย โดยหลักการจำนวนซีเทนจะสัมพันธ์กับเวลาหน่วงการจุดติดไฟ (ignition delay time) (คือเวลาที่เชื้อเพลิงฉีดผ่านเข้าสู่ห้องเผาไหม้จนถึงจุดติดไฟ) เมื่อจำนวน ซีเทนสูงเวลาหน่วงการจุดติดไฟจะมีค่าสั้น ในการทดสอบจำนวนซีเทนมีหลายวิธีแต่ที่ระบุในข้อกำหนด

ของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ กรมธุรกิจพลังงาน และ มาตรฐานไบโอดีเซล (B100) ASTM D6751 ให้ทดสอบตามวิธี ASTM D613 ซึ่งผลที่ได้ต้องให้ค่าไม่ต่ำกว่าเลข 51 และ ให้ค่าไม่ต่ำกว่าเลข 47 สำหรับข้อกำหนดของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ กรมธุรกิจพลังงาน และ มาตรฐานไบโอดีเซล (B100) ASTM D6751 ตามลำดับ

2.7.1.8 เถ้าซัลเฟต (Sulfate ash) การทดสอบเพื่อหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในส่วนของอัลคาไลไนท์ไบโอดีเซล และเถ้าของสารประกอบอื่นๆที่สามารถทำให้เกิดการอุดตันในระบบจ่ายน้ำมันเข้าสู่ห้องเผาไหม้ นอกจากนั้นเถ้าซัลเฟตในปริมาณสูงยังส่งผลให้เกิดการสึกกร่อนของเครื่องยนต์ เนื่องจากการขัดสีอีกด้วย ในการทดสอบทั้งตามข้อกำหนดของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ กรมธุรกิจพลังงาน และ มาตรฐานไบโอดีเซล (B100) ASTM D6751 ใช้วิธี ASTM D874 ซึ่งผลที่ได้ต้องให้ค่าไม่ต่ำกว่า 0.02 wt%

2.7.1.9 น้ำ (Water) คือ การตรวจหาน้ำอิสระที่อยู่ในน้ำมัน เพราะการมีน้ำปริมาณสูงเกินไปจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องยนต์ และอายุการใช้งาน นอกจากนั้นน้ำยังเป็นแหล่งเพาะจุลินทรีย์ทำให้เกิดกรดและนำไปสู่การกัดกร่อนและอุดตันระบบกรองน้ำมัน ในการทดสอบมีหลายวิธี แต่ที่ระบุในข้อกำหนดของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ กรมธุรกิจพลังงานและมาตรฐานไบโอดีเซล (B100) ASTM D6751 ให้ทดสอบตามวิธี ASTM D2709 ซึ่งต้องให้ค่าไม่เกิน 0.050 wt% และให้ค่าไม่เกิน 0.050 Vol% สำหรับค่าตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน และมาตรฐาน ASTM D6751 ตามลำดับ

2.7.1.10 สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด (Total contaminate) ในข้อกำหนดของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ กรมธุรกิจพลังงาน ให้ทดสอบตามวิธี ASTM D5452 ซึ่งต้องให้ค่าไม่เกิน 0.0024 wt% ส่วนมาตรฐาน ASTM D6751 ไม่ระบุให้ทดสอบ

2.7.1.11 การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper strip corrosion) การทดสอบการกัดกร่อนของน้ำมัน จะทดสอบโดยใช้แท่งทองแดงขัดเงามาแช่ในน้ำมัน ตามความดันและอุณหภูมิที่กำหนดจากนั้นจึงนำมาเปรียบเทียบกับสีมาตรฐาน (copper strip corrosion standard) ในการทดสอบที่ระบุในข้อกำหนดของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ กรมธุรกิจพลังงาน และมาตรฐานไบโอดีเซล (B100) ASTM D6751 ให้ทดสอบตามวิธี ASTM D130 ซึ่งผลที่ได้ต้องให้ค่าไม่เกินเลข 1 และให้ค่าไม่เกินเลข 3 สำหรับข้อกำหนดของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ กรมธุรกิจพลังงาน และ มาตรฐานไบโอดีเซล (B100) ASTM D6751 ตามลำดับ โดยน้ำมันที่ดีไม่ควรจะมีสารที่ทำปฏิกิริยากับชิ้นส่วนในเครื่องจักร เครื่องยนต์ ที่เป็นทองแดง หรือโลหะผสม โดยตามมาตรฐาน ASTM D130 กำหนดให้ แผ่นทองแดงหลังแช่ในน้ำมันเป็นดังนี้ เลข 1 : มัวเล็กน้อย (slight tarnish) เลข 2 : มัวปานกลาง (middle tarnish) เลข 3 : มัวมาก (dark tarnish) และ เลข 4 : กัดกร่อน (corrosion)

2.7.1.12 เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation stability) เป็นการทดสอบผลิตภัณฑ์น้ำมันเพื่อดูแนวโน้มการรวมตัวกับออกซิเจน ว่าสามารถเกิดขึ้นได้ ช้า-เร็วเพียงใด ในการทดสอบมีหลายวิธี อย่างไรก็ตามในข้อกำหนดของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ กรมธุรกิจพลังงาน ให้ทดสอบตามวิธี EN 14112 ซึ่งผลจากการวัดค่าการนำไฟฟ้าต้องไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ที่เวลาทดสอบไม่ต่ำกว่า 6 ชั่วโมงที่อุณหภูมิทดสอบ 110°C ส่วนมาตรฐาน ASTM D6751 ไม่ระบุให้ทดสอบ

2.7.1.13 ค่าความเป็นกรด (Acid value) ในไบโอดีเซลใช้บ่งชี้ถึงกรดไขมันอิสระที่ทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ หรือการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด หรือมีข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการล้างไบโอดีเซลที่มีการเติมกรดช่วยปรับพีเอชให้เป็นกลาง การมีค่าความเป็นกรดในน้ำมันสูงเกินไปส่งผลให้อายุการใช้งานของระบบจ่ายน้ำมันและเครื่องยนต์สั้นลง ทั้งข้อกำหนดของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ กรมธุรกิจพลังงาน และมาตรฐาน ASTM D6751 กำหนดวิธีทดสอบตาม ASTM D664 ซึ่งผลที่ได้ต้องให้ค่าไม่สูงกว่า 0.5 mg KOH/g สำหรับข้อกำหนดไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ กรมธุรกิจพลังงาน และให้ค่าไม่สูงกว่า 0.8 mg KOH/g สำหรับ มาตรฐาน ASTM D6751 ตามลำดับ

2.7.1.14 ค่าไอโอดีน (Iodine value) ในข้อกำหนดไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ กรมธุรกิจพลังงาน ให้ทดสอบตามวิธี EN 14111 ซึ่งผลจากการวัดค่าต้องไม่สูง 120 กรัม ไอโอดีนต่อ 100 กรัม น้ำมัน ส่วนมาตรฐานไบโอดีเซล (B100) ASTM D6751 ไม่ระบุให้มีการทดสอบ

2.7.1.15 กรดลิโนลินิกเอสเทอร์ (Linolenic acid methyl ester contents) เป็นการทดสอบหาปริมาณกรดลิโนลินิกเอสเทอร์ในไบโอดีเซล ในข้อกำหนดไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ กรมธุรกิจพลังงานให้ทดสอบตามวิธี EN 14103 ซึ่งตรวจวัดโดยใช้เทคนิคโครมาโตกราฟี ผลทดสอบต้องมีกรดลิโนลินิกเอสเทอร์ในไบโอดีเซลไม่สูงกว่า 12.0 wt% ส่วนในมาตรฐานไบโอดีเซล (B100) ASTM D6751 ไม่ระบุให้มีการทดสอบ

2.7.1.16 เมทานอล (Methanol content) เป็นการทดสอบหาปริมาณเมทานอลในไบโอดีเซล ในข้อกำหนดไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ กรมธุรกิจพลังงาน ให้ทดสอบตามวิธี EN 14110 ซึ่งตรวจวัดโดยให้ความร้อนกับไบโอดีเซลในภาชนะปิดที่ 80°C จากนั้นเก็บก๊าซตัวอย่างฉีดเข้าเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี ผลทดสอบต้องมีเมทานอลในไบโอดีเซลไม่สูงกว่า 0.20 wt% ส่วนในมาตรฐานไบโอดีเซล (B100) ASTM D6751 ไม่ระบุให้มีการทดสอบ

2.7.1.17 โมโนกลีเซอไรด์ (Monoglyceride) ในข้อกำหนดไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ กรมธุรกิจพลังงาน ให้ทดสอบตามวิธี EN 14105 ซึ่งตรวจวัดโดยใช้เทคนิคโครมาโตกราฟี ผลทดสอบต้องมีโมโนกลีเซอไรด์ไม่สูงกว่า 0.80 wt% ส่วนในมาตรฐานไบโอดีเซล (B100) ASTM D6751 ไม่ระบุให้มีการทดสอบ



2.7.1.18 ไคกลีเซอไรด์ (Diglyceride) ในข้อกำหนดไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอ์ กรมธุรกิจพลังงาน ให้ทดสอบตามวิธี EN 14105 ซึ่งตรวจวัดโดยใช้เทคนิคโครมาโตกราฟี ผลทดสอบต้องมีไคกลีเซอไรด์ไม่สูงกว่า 0.20 wt% ส่วนในมาตรฐานไบโอดีเซล (B100) ASTM D6751 ไม่ระบุให้มีการทดสอบ

2.7.1.19 ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ในข้อกำหนดไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอ์ กรมธุรกิจพลังงาน ให้ทดสอบตามวิธี EN 14105 ซึ่งตรวจวัดโดยใช้เทคนิคโครมาโตกราฟี ผลทดสอบต้องมีไตรกลีเซอไรด์ไม่สูงกว่า 0.20 wt% ส่วนในมาตรฐานไบโอดีเซล (B100) ASTM D6751 ไม่ระบุให้มีการทดสอบ ค่าสูงเกินไปอาจส่งผลให้เกิดการอุดตันที่ระบบกรองน้ำมัน อีกทั้งการมีกลีเซอรินสูงเกินไปยังส่งผลให้การเผาไหม้ไบโอดีเซลจะเกิดสารพิษปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมในปริมาณที่อาจก่อให้เกิดอันตราย วิธีการตรวจวัดกลีเซอรินมีหลายวิธีแต่ที่ระบุในข้อกำหนดไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอ์ กรมธุรกิจพลังงาน ให้ทดสอบตามวิธี EN 14105 ซึ่งตรวจวัดโดยใช้เทคนิคก๊าซโครมาโตกราฟี และ ผลที่ได้ต้องให้ค่าไม่สูงกว่า 0.02 wt% ส่วนมาตรฐานไบโอดีเซล (B100) ตามมาตรฐาน ASTM D6751 ให้ทดสอบตามวิธี ASTM D6584 ซึ่งผลที่ได้ต้องให้ค่าไม่เกิน 0.02 wt% เช่นกัน

2.7.1.20 กลีเซอรินทั้งหมด (total glycerin) ใช้ระบุถึงกลีเซอรินทั้งหมดที่แยกไม่หมดในไบโอดีเซล ซึ่งประกอบด้วยกลีเซอรินอิสระ โมโนกลีเซอไรด์ ไคกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ ในการทดสอบมีหลายวิธีแต่ที่ระบุในข้อกำหนดไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอ์ กรมธุรกิจพลังงาน ให้

ทดสอบตามวิธี EN 14105 ซึ่งผลที่ได้ต้องให้ค่าไม่สูงกว่า 0.25 wt% ส่วนมาตรฐานไบโอดีเซล (B100) ตาม ASTM D6751 ให้ทดสอบตามวิธี ASTM D6584 ซึ่งผลที่ได้ต้องให้ค่าไม่เกิน 0.24 wt% ทั้งมาตรฐาน EN 14105 และ ASTM D6584 เป็นการทดสอบกลีเซอรินอิสระ กลีเซอรินทั้งหมด โมโนกลีเซอริน ไคกลีเซอริน และไตรกลีเซอรินโดยใช้เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี

2.7.1.21 โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโปแตสเซียม) (sodium and potassium content) ตามข้อกำหนดไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอ์ กรมธุรกิจพลังงาน ให้ทดสอบตามวิธี EN 14108 สำหรับการวัดโซเดียม และ EN 14109 สำหรับการวัดโปแตสเซียม ซึ่งตรวจวัดโดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรเมทรี ผลทดสอบต้องมีโซเดียมรวมกับโปแตสเซียมไม่สูงกว่า 5.0 mg/kg และการตรวจวัดโลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม) ให้ทดสอบตามวิธี prEN 14538 ต้องมีค่าไม่สูงกว่า 5.0 mg/kg ส่วนในมาตรฐานไบโอดีเซล (B100) ASTM D6751 ไม่ระบุให้มีการทดสอบ

2.7.1.22 ฟอสฟอรัส (Phosphorus) เป็นสารที่สามารถลดประสิทธิภาพของคะตะไลติกคอนเวอร์เตอร์ (คืออุปกรณ์ที่ติดตั้ง เพื่อบำบัดไอเสียให้มีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ให้ลดลง) ตามข้อกำหนดไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอ์ กรมธุรกิจพลังงาน และตามมาตรฐาน

ไบโอดีเซล (B100) ASTM D6751 ให้ทดสอบตามวิธี ASTM D4951 ซึ่งผลที่ได้ต้องให้ค่าไม่สูงกว่า 0.001 wt%

2.7.1.23 สารเติมแต่ง (Additive) เป็นสารที่เติมผสมในไบโอดีเซลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ ช่วยชะล้างและทำความสะอาดเครื่องยนต์ หรืออื่นๆ ไม่มีการระบุวิธีทดสอบที่ชัดเจนแต่ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดี กรมธุรกิจพลังงาน

## 2.8 การเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันมีด้วยกันหลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีชนิดกรด-เบส หรือเอนไซม์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.8.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (homogeneous catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในวัฏภาคเดียวกับสารตั้งต้น มีข้อดีคือประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาสูง และสามารถเลือกให้เร่งปฏิกิริยาที่ต้องการได้ง่าย แต่มีข้อจำกัดคือ การแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์แยกออกได้ยาก และมีอายุการใช้งานที่สั้นกว่าแบบวิวิธพันธ์

### 2.8.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (heterogeneous catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์นี้ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในวัฏภาคที่แตกต่างกับสารตั้งต้นที่นำมาทำปฏิกิริยา โดยมีข้อดีคือสามารถทำการทดลองที่อุณหภูมิสูงได้ และสามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ได้ง่าย รวมถึงมีอายุการใช้งานที่นานกว่า โดยทั่วไปตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลมี 2 ชนิด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ชนิดกรดและเบส ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ชนิดเบสยังคงเป็นที่นิยมในการนำมาเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เนื่องจากสามารถเร่งปฏิกิริยาได้เร็วกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ชนิดเบสที่นิยมใช้ในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เช่น แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เป็นต้น

### 2.8.3 เอนไซม์

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยการใช้เอนไซม์ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชีวภาพเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี ปัญหาจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดและเบสนอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้ว พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยากรดและเบสใช้พลังงานสูง และมีแนวโน้มเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม ในขณะที่การเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยการใช้เอนไซม์เป็นวิธีการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและใช้พลังงานน้อยกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิห้อง กรดไขมันอิสระในน้ำมันไม่มีผลกระทบต่อเอนไซม์ กลีเซอรอลซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงจากปฏิกิริยามีความบริสุทธิ์สูงและสามารถแยกออกจากไบโอดีเซลได้ง่าย ตัวเร่งปฏิกิริยาชีวภาพนับเป็นกระบวนการใหม่ที่น่าสนใจในการนำมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซล ตัวเร่ง

ปฏิกิริยาชีวภาพที่ใช้คือไลเปส (lipase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ชนิดหนึ่งที่พบได้ในแบคทีเรีย รา และยีสต์ การใช้เอนไซม์ไลเปสจะต้องผ่านการตรึงอยู่บนตัวรองรับซึ่งเป็นวัสดุแข็งและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยที่ยังรักษาความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาได้เหมือนเดิม แต่เอนไซม์ไลเปส ไม่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันระหว่างน้ำมันและเมทานอล เนื่องจากเมทานอล จะทำให้โปรตีนในเอนไซม์เสื่อมสภาพ นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาชีวภาพยังมีราคาสูง จึงทำให้การใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาชีวภาพยังไม่เป็นที่แพร่หลายในอุตสาหกรรม [18]

ถึงแม้ว่าในปัจจุบัน กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจะนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ชนิด เบส เนื่องจากสามารถเร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่า เกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วกว่า ใช้เวลาน้อย และใช้ภาวะในการทำปฏิกิริยาต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้สามารถเจือปนในผลิตภัณฑ์ ซึ่งต้องมีขั้นตอนเพิ่มมากขึ้น ในการกำจัดเอาตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ ซึ่งต้องสิ้นเปลืองน้ำในปริมาณมาก ก่อให้เกิดน้ำเสียจากกระบวนการล้างตัวเร่งปฏิกิริยา นับเป็นขั้นตอนที่เพิ่มค่าใช้จ่ายในการผลิตไบโอดีเซล ดังนั้น ตัวเร่งปฏิกิริยาวีรพันธุ์ชนิดเบสจึงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่น่าสนใจที่จะนำมาพัฒนาและศึกษาเพื่อใช้ในการผลิตไบโอดีเซลในอุตสาหกรรมแทนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้มีข้อจำกัด คือ มีความว่องไวน้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ เนื่องจากมีข้อจำกัดเรื่อง การถ่ายโอนมวลสาร (mass transfer limitation) ของโมเลกุลกลีเซอไรด์และแอลกอฮอล์มายังพื้นผิว ของตัวเร่ง และการเร่งปฏิกิริยาแบบวีรพันธุ์ต้องใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อ น้ำมันสูงกว่าการเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ [19] แต่อย่างไรก็ตาม จุดเด่นของตัวเร่งปฏิกิริยาวีรพันธุ์ชนิดนี้ คือ สามารถนำกลับมาใช้ได้หลายครั้ง ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลได้

## 2.9 การขึ้นรูปตัวเร่งปฏิกิริยาวีรพันธุ์

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ส่วนมากจะมีลักษณะเป็นผง ซึ่งไม่เหมาะสมสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง เนื่องจากจะเกิดการอุดตันของท่อภายในเครื่องปฏิกรณ์ได้ จึงต้องมีการขึ้นรูปตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีขนาด รูปทรงที่เหมาะสม ก่อนนำไปใช้งาน โดยส่วนมากการขึ้นรูปจะใช้วิธีการอัดอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าด้วยกัน ในบางครั้งอาจเติมตัวประสานเพื่อให้เม็ดของตัวเร่งปฏิกิริยาคงตัว เสริมความแข็งแรง และไม่แตกหัก ดังนั้นการขึ้นรูป จึงส่งผลให้พื้นที่ผิว ความพรุน ความหนาแน่น และปริมาณตาแหน่งกัมมันต์ของตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงไป [19]

### 2.8.1 กรรมวิธีการขึ้นรูปตามรูปทรง

กรรมวิธีการขึ้นรูปจำแนกตามรูปทรง สามารถจำแนกออกเป็น 5 แบบ ได้แก่

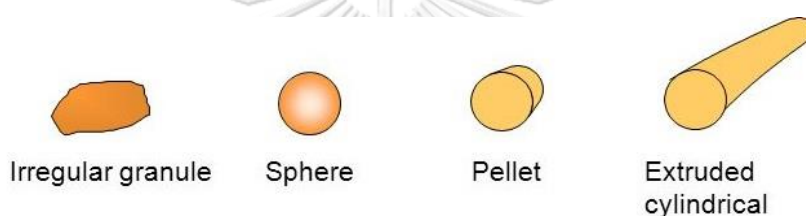
1. เม็ด (pallets) เป็นการอัดผงตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เครื่องอัดความดันสูง ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเม็ดมีขนาดสม่ำเสมอและแข็งแรงมาก

2. แท่ง (extrudate) เตรียมจากการอัดรีดเป็นเส้นของส่วนผสมเปียก (paste) ของตัวเร่งปฏิกิริยา และตัดให้มีขนาดตามต้องการ ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบแท่งจะมีความแข็งต่ำแต่มีความพรุนสูงกว่าแบบเม็ด เนื่องจากความดันที่กดอัดต่ำกว่า

3. ทรงกลม (spheres) เตรียมได้หลายวิธี เช่น การหยดเจลของวัสดุผ่านน้ำมัน การคลึงส่วนผสมเปียกจากการอัดรีดด้วยสภาพหมุนเพื่อให้ได้เป็นทรงกลม เป็นต้น

4. แกรนูล (granules) เตรียมโดยการบดตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรง เพื่อคัดขนาด (sieve) ให้ได้ขนาดอนุภาคตามต้องการ

5. รวงผึ้ง (monolith) นิยมใช้ในการกำจัดมลพิษทางอากาศ เช่น ท่อไอเสีย รถยนต์ ใช้วัสดุจากพวกเซรามิกทนความร้อนสูง ภายในมีช่องขนาดเล็กจำนวนมากมีลักษณะคล้ายรังผึ้ง เตรียมโดยใช้วิธีการเคลือบล้าง (washcoating) ตัวรองรับและโลหะกัมมันต์ภายในช่องเหล่านั้น



รูปที่ 2. 7 รูปแบบของตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นรูปแบบต่างๆ [20]

## 2.10 โดโลไมต์

โดโลไมต์ [ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ] เป็นแร่หรือหินตะกอนที่ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ( $\text{MgCO}_3$ ) เป็นส่วนใหญ่ มีลักษณะวาวคล้ายแก้วหรือไข่มุก สีขาว ชมพู ขาวอมเขียว เทา เนื้อของโดโลไมต์มีทั้งแบบโปร่งใสและโปร่งแสง โดยโดโลไมต์มีลักษณะคล้ายคลึงกับหินปูนมาก ยากที่จะแยกได้ด้วยตาเปล่า แต่สามารถใช้เทคนิคการหยดกรดเจือจาง เช่น ไฮโดรคลอริก เพราะโดโลไมต์ไม่ทำปฏิกิริยากับกรดเจือจางรุนแรง โดโลไมต์ส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการทุติยภูมิที่ทำให้อนุกรมแมกนีเซียมสามารถเข้าไปแทนที่อนุกรมแคลเซียมในโครงสร้างเดิมของแร่ได้ แหล่งโดโลไมต์ในประเทศไทยมักพบที่จังหวัดกาญจนบุรี จังหวัดสุราษฎร์ธานี จังหวัดนครศรีธรรมราช และจังหวัดอื่น ๆ ได้แก่ จังหวัดแพร่ ชลบุรี จันทบุรีและสงขลา ประโยชน์ โดโลไมต์เป็นสินแร่หลักของโลหะแมกนีเซียม หรือใช้ประโยชน์โดยตรงเป็นหินก่อสร้างหรือหินประดับ หรือนำมาบดย่อยผ่านกรรมวิธีการผลิตเพื่อแปรรูปให้เป็นผลิตภัณฑ์อื่น เช่นนำมาใช้ผสมเป็นเครื่องปั้นดินเผาหรือใช้ทำวัสดุทนไฟ เต้าเผาซีเมนต์ และเตาอื่น ๆ ใช้แก้ไขสภาพดินเป็นกรด และใช้ในอุตสาหกรรมแก้วและกระจก การใช้โดโลไมต์ผสมในเนื้อดินในงานเซรามิก มีจุดประสงค์เพื่อลดจุด

หลอมตัวของวัตถุดิบ แต่โดยทั่วไปมักใช้ในปริมาณน้อย และใช้เป็นส่วนผสมของน้ำยาเคลือบมากกว่า ในเนื้อดิน โดโลไมต์มีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบ rhombohedral [23]

### 2.10.1 สมบัติทางกายภาพของโดโลไมต์

โดโลไมต์มักพบในรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนผิวหน้าผลึกมักจะโค้ง บางครั้งอาจพบเป็นเม็ดหยายๆ ไปจนกระทั่งเม็ดเล็กๆ เกาะกันแน่น โครงสร้างผลึกมีได้ตั้งแต่เป็นรูปผลึกไปจนถึงอสัณฐาน สีของโดโลไมต์มีตั้งแต่ ไม่มีสี สีขาว สีชมพู สีเขียว สีเทา สีน้ำตาล ไปจนกระทั่งสีดำ มีลักษณะมันวาว คล้ายแก้วหรือในบางครั้งคล้ายไข่มุก มีลักษณะโปร่งแสง ความแข็งประมาณ 3.5 ถึง 4 ค่าความ ถ่วงจำเพาะ 2.85 เนื้อแร่มีทั้งโปร่งใสและโปร่งแสง ส่วนประกอบของโดโลไมต์ตามทฤษฎีนั้นจะมี แคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 54 และแมกนีเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 46 หรือแมกนีเซียมออกไซด์ ร้อยละ 21.7 แคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 30.4 และคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 47.9 [24]

### 2.10.2 แหล่งที่พบแร่โดโลไมต์ในประเทศไทย

ในประเทศไทย โดโลไมต์มักเกิดอยู่ใกล้เคียงภูเขาหินปูนเกิดเป็นชั้นหินปูนโดโลไมต์ (Dolomitic limestone) หรือพบในสายแร่ตะกั่ว หรือสายแร่สังกะสีที่ตัดผ่านหินปูน แร่โดโลไมต์พบได้ในหลายจังหวัดของประเทศ [24] เช่น

จังหวัดกาญจนบุรี อำเภอทองผาภูมิ อำเภอไทรโยค อำเภอท่าม่วง อำเภอเมือง  
จังหวัดชลบุรี เกาะสีชัง  
จังหวัดสงขลา เขารักเกียรติ อำเภอรัตภูมิ  
จังหวัดสุราษฎร์ธานี อำเภอดอนสัก  
จังหวัดเพชรบูรณ์ อำเภอวิเชียรบุรี

### 2.10.3 ประโยชน์ของแร่โดโลไมต์ต่อวงการอุตสาหกรรมทั่วไป

1. ใช้ในอุตสาหกรรมกระจกแก้ว
2. ใช้ในธุรกิจก่อสร้าง ทำปูนซีเมนต์ กระจกเบี่ยง
3. ทำวัสดุทนไฟ เช่น บุเตาถลุงเหล็ก
4. ใช้ประโยชน์ในกระบวนการทำกระดาษ
5. ใส่ในบ่อกัก ช่วยด้านการเปลี่ยนค่าพีเอชในน้ำ ช่วยให้กึ่งลอกคราบเร็ว
6. ทำเครื่องปั้นดินเผา ตุ๊กตาเซรามิก

## 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Gandia และคณะ [1] ได้ศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์โซเดียมไฮดรอกไซด์บนตัวรองรับอะลูมินา และตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบเอกพันธุ์มาเปรียบเทียบกับ ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันดอกทานตะวัน ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 323 เคลวิน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันระหว่างช่วง 6:1 ถึง 48:1 จากผลการทดลองพบว่า เมื่ออัตราส่วนโมลระหว่างเมทานอลกับน้ำมันเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นทั้งในตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์และวิวิธพันธุ์ โดยที่ค่าการเปลี่ยน (Conversion) ร้อยละ 82 เท่ากันทั้งในสองตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งแบบเอกพันธุ์จะใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.23 โดยน้ำหนัก เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ ต้องใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 24:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนัก เวลาในการทำปฏิกิริยา 7 ชั่วโมง 30 นาที จากผลการทดลอง พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ต้องใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน และเวลาในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าในตัวเร่งแบบเอกพันธุ์

Xie และคณะ [25] ทำการศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลือง โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ผสมกับโลหะแอลคาไลน์เอิร์ธ ที่ได้จากสารละลายแอลคาไลน์เอิร์ธไนเตรต ได้แก่ สตรอนเทียมไนเตรต ( $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ ) แบเรียมไนเตรต ( $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ ) แมกนีเซียมไนเตรต ( $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ ) และแคลเซียมไนเตรต ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) ด้วยวิธีอิมเพรกเนชัน ทำปฏิกิริยาในขวดก้นกลมขนาด 100 มิลลิลิตร ที่ต่อกับเครื่องควบแน่นและแท่นปั่นกวนแม่เหล็ก ภายในขวดก้นกลมบรรจุด้วยน้ำมันถั่วเหลือง 10 กรัม เมทานอล และตัวเร่งปฏิกิริยา จากการทดลองพบว่า  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2/\text{ZnO}$  สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ดีที่สุด ที่สภาวะการทำปฏิกิริยาโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 12:1 ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 ชั่วโมง ให้ค่าการเปลี่ยนสูงถึงร้อยละ 94.7 และคณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยการเติมตัวทำละลายร่วมในปฏิกิริยา ได้แก่ เตตระไฮโดรฟูแรน ไดมethylซัลโฟ และนอร์มอลเฮกเซน เพื่อช่วยเพิ่มการเข้ากันระหว่างน้ำมันถั่วเหลืองและเมทานอลโดยผสมตัวทำละลายร่วมปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงในขวดก้นกลม จากนั้นทดลองโดยใช้ภาวการณ์ทำปฏิกิริยาข้างต้น ผลการทดลองพบว่าเตตระไฮโดรฟูแรนเป็นตัวทำละลายร่วมที่ดีที่สุด โดยให้ค่าการเปลี่ยนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 96.8

Promarak และคณะ [26] ทำการผลิตไบโอดีเซลโดยการใช้เปลือกหอยขมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับการใช้ตัวทำละลายร่วม ได้แก่ อะซิโตน 1-โพรพานอล 2-โพรพานอล เตตระไฮโดรฟูแรน เอทานอล และเอทิลีนไกลคอล ดำเนินการโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์ที่ประกอบด้วย ขวดสามคอต่อกับเครื่องควบแน่นและเทอร์โมคัปเปิล ภายในบรรจุด้วยเมทานอลและน้ำมันปาล์ม อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 12:1 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ

800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และตัวทำละลายร่วมร้อยละ 10 โดยปริมาตร อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าการเร่งปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันร่วมกับการใช้ตัวทำละลายร่วมเตตระไฮโดรฟูแรนให้ผลได้เมทิลเอสเทอร์สูงสุดโดยเรียงลำดับจาก เตตระไฮโดรฟูแรน>1-โพรพานอล>2-โพรพานอล> อะซิโตน>เอทานอล>เอทิลีนไกลคอล ตามลำดับ จากค่าร้อยละเมทิลเอสเทอร์พบว่า เมื่อความเข้มข้นของตัวทำละลายเพิ่มขึ้นทำให้ได้ผลได้เมทิลเอสเทอร์ลดลง เนื่องจากตัวทำละลายที่มีขั้วสูงจะละลาย ได้ดีในเมทานอลแต่ละละลายได้ไม่ดีในน้ำมัน ทำให้สารผสมเข้ากันได้ไม่ดี นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่า ร้อยละเมทิลเอสเทอร์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันในกรณีที่ไม่มีเติมตัวทำละลายร่วมกับการ เติมตัวทำละลายร่วมเตตระไฮโดรฟูแรน พบว่าผลได้เมทิลเอสเทอร์จากการใช้เตตระไฮโดรฟูแรนเป็น ตัวทำละลายร่วมสูงถึงร้อยละ 95.9 ในขณะที่กรณีที่ไม่มีเติมตัวทำละลายมีผลได้เมทิลเอสเทอร์เพียง ร้อยละ 63.49 เท่านั้น

Chen และคณะ [27] ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มด้วยคลื่นอัลตราโซนิคส์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากเปลือกไข่นกกระจอกเทศ โดยศึกษาการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ซึ่งประกอบด้วยขวดสามคอที่เชื่อมต่อกับเครื่องควบแน่นและเทอร์โมมิเตอร์ ภายในขวดสามคอประกอบด้วยน้ำมันปาล์ม 30 กรัม อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 3:1 ถึง 15:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 ถึง 10 โดยน้ำหนัก เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ถึง 3 ชั่วโมง ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างระบบที่ใช้การปั่นกววนและใช้คลื่นอัลตราโซนิคส์ จากผลการทดลองพบว่าการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ในระบบการใช้คลื่นอัลตราโซนิคส์ ให้ผลได้เมทิลเอสเทอร์สูงกว่าระบบแบบปั่นกววน โดยมีผลได้เมทิลเอสเทอร์ร้อยละ 92.7 ภายใต้ภาวะการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 9:1 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง

Ngamcharussrivichai และคณะ [28] ศึกษาความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์จากหินโดโลไมต์ธรรมชาติเทียบกับเปลือกหอยเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการเผาโดโลไมต์และเปลือกหอยที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราความร้อน 3 องศาเซลเซียสต่ออนาที ทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ที่ประกอบด้วยขวดสามคอเชื่อมต่อกับเครื่องควบแน่น แทนปั่นกววนแม่เหล็กและเทอร์โมมิเตอร์ ภายในเครื่องปฏิกรณ์บรรจุด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 0.6 กรัม น้ำมันปาล์ม 10 กรัม อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 30:1 ภายใต้ภาวะการทำปฏิกิริยาอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่าโดโลไมต์และแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยให้ผลได้เมทิลเอสเทอร์สูงถึงร้อยละ 98.6 และ 99.1 ตามลำดับ ถึงแม้ว่าผลได้เมทิล

เอสเทอร์ที่ได้จากการเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์จะมีค่าต่ำกว่าแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอย แต่โดโลไมต์มีความสามารถในการนำมาใช้ซ้ำสูงกว่าแคลเซียมออกไซด์ โดยร้อยละเมทิลเอสเทอร์ของโดโลไมต์หลังจากการใช้ซ้ำมีค่าสูงกว่าร้อยละ 90 ในขณะที่ร้อยละเมทิลเอสเทอร์จากการเร่งปฏิกิริยาด้วยแคลเซียมออกไซด์ลดลงอย่างรวดเร็วเหลือเพียงร้อยละ 75 เท่านั้น

Han และคณะ [29] ศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบแก๊ส-ของเหลว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา KF/CaO กระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องประกอบด้วยเครื่องปฏิกรณ์ที่ต่อกันเป็นแบบอนุกรม 3 เครื่องต่อกัน โดยเครื่องปฏิกรณ์แต่ละเครื่องประกอบด้วย 3 ส่วนแบ่งเป็นส่วนบน ส่วนกลางและส่วนล่าง ส่วนบนเป็นส่วที่ใช้ในการควบแน่นไอเมทานอล ส่วนกลางเป็นส่วนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร ยาว 65 เซนติเมตร ภายในบรรจุด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนล่างเป็นส่วที่ใช้ในการแยกกลีเซอรอล น้ำมันเมล็ดเรพและเมทานอลถูกป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ด้วยรูปแบบการไหลแบบสวนทาง โดยเมทานอลถูกป้อนในส่วนล่างแล้วกลายเป็นไอไหลผ่านเบตตัวเร่งปฏิกิริยาสวนทางกับน้ำมันเมล็ดเรพที่ถูกป้อนจากทางด้านบน อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 30:1 จากการทดลองพบว่า ภาวะที่เหมาะสมได้แก่การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ที่ความสูงเบต 50 เซนติเมตร ได้ผลได้เมทิล เอสเทอร์สูงถึงร้อยละ 93.7

Taufiq-Yap และคณะ [30] ทำการศึกษาการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดโลหะออกไซด์ผสม Ca-Mg เทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาออกไซด์ธรรมดาในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันต้นสบู่ดำในเครื่องปฏิกรณ์ความดันสูง ผลการทดลองพบว่า ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของโลหะออกไซด์ผสม Ca-Mg ผลได้เมทิลเอสเทอร์สูงถึงร้อยละ 90 เมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ผสม Ca-Mg ให้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ต่ำกว่าแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 6 และเมื่อทดสอบความสามารถในการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด พบว่าความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของแคลเซียมออกไซด์ลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของโลหะออกไซด์ผสม Ca-Mg ลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

Idem, R.O และคณะ(31) ศึกษาการแตกโมเลกุลของน้ำมันคาโนลาด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และ H-ZSM5 ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องชนิดเบตนิ่งขนาดเล็กภายใต้ความดันบรรยากาศ ภาวะที่ทำปฏิกิริยา คือ ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2 กรัม และความเร็วเชิงสเปซ 12.1 ชั่วโมง<sup>-1</sup> ภาวะเหมาะสมเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ คือ ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 500 องศาเซลเซียสได้ค่าการแปลงผันของสารตั้งต้น 95.7% ปริมาณแก๊ส 56.2 wt% ผลิตภัณฑ์ของเหลว 37.2 wt% กากน้ำมันหนัก 4.3 wt% และของแข็ง 2.2 wt% สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์คือ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ได้ค่าการแปลงผันของสารตั้งต้น 56.3% ปริมาณแก๊ส 19.8 wt% ผลิตภัณฑ์ของเหลว 36.8



wt% กากน้ำมันหนัก 33.7 wt% และของแข็ง 8.0 wt% ส่วนตัวเร่ง ปฏิริยา H-ZSM5 คือ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ได้ค่าการแปลงผันของสารตั้งต้น 83.6% ปริมาณของแก๊ส 23.2 wt% ผลิตภัณฑ์ของเหลว 49.6 wt% กากน้ำมันหนัก 16.4 wt% และของแข็ง 10.7 wt% สรุปได้ว่าตัวเร่ง ปฏิริยาแคลเซียมออกไซด์สามารถแตกโมเลกุลของน้ำมันคาโนลาได้ดีที่สุด เนื่องจากปฏิริยาดีคาร์บอกซิเลชันเป็นปฏิริยาดูดความร้อน (Endothermic) เมื่ออุณหภูมิการทำปฏิริยาสูงขึ้น ปฏิริยาดีคาร์บอกซิเลชันจึงเกิดได้ดีขึ้นและควบคู่กับการแตกโมเลกุลด้วยความร้อนจึงได้ค่าการแปลงผันของสารตั้งต้นสูงสุด

Son และ Kusakabe [32] ศึกษาการเร่งปฏิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของน้ำมันดอกทานตะวันในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตหยด (trickle-bed reactor) โดยใช้ตัวเร่งปฏิริยาแคลเซียมออกไซด์ โดยเครื่องปฏิกรณ์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร น้ำมันดอกทานตะวันและเมทานอลถูกป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ด้วยปั๊มลูกสูบแบบเข็ม (syringe pump) มีรูปแบบการไหลแบบสวนทางระหว่างเมทานอลที่ถูกป้อนทางด้านล่างแล้วกลายเป็นไอน้ำผ่านเบต ตัวเร่งปฏิริยากับน้ำมันดอกทานตะวันที่เหลือจากทางด้านบน ไอน้ำของเมทานอลที่เหลือจากการทำ ปฏิริยาจะถูกควบแน่นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ จากการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตหยด ภาวะที่เหมาะสมได้แก่การทำปฏิริยาที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเมทานอล 4 มิลลิลิตรต่อ ชั่วโมง อัตราการไหลน้ำมันดอกทานตะวัน 4.1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และความสูงเบต 12.5 เซนติเมตร ได้ผลได้เมทิลเอสเทอร์สูงถึงร้อยละ 98

Ngamcharussrivichai และคณะ [33] ได้ทำการศึกษาผลของการเตรียมและขึ้นรูปโพลีเมตต์เพื่อนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดเบสสำหรับการผลิตไบโอดีเซล การเตรียมตัวเร่งปฏิริยาใช้วิธีการผสมเชิงกายภาพ โดยนำโพลีเมตต์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ผสมกับองค์ประกอบที่เพิ่มความเข้ากันได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ และองค์ประกอบที่เพิ่มความแข็ง ได้แก่ อะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) และโซเดียมอะลูมิเนต ( $NaAlO_2$ ) จากนั้นเติมน้ำกลั่นและกวนผสมจนได้ของผสมเป็ยกที่มีเนื้อเรียบเนียน ก่อนนำไปขึ้นรูปเป็นสายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องอัดรีดด้วยมือ (Manual extruder) นำไปอบแห้งแล้วตัดตัวเร่งให้มีความยาวประมาณ 5 มิลลิเมตร ตัวเร่งปฏิริยาที่เตรียมได้สามารถเร่งปฏิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของน้ำมันปาล์มและเมทานอลแบบต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลที่ได้มีผลได้เมทิลเอสเทอร์ในช่วงร้อยละ 92 ถึง 96

Ruengyoo [34] ได้ทำการศึกษาและพัฒนากระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง โดยใช้ตัวเร่งปฏิริยาแบบวิวิธพันธุ์ชนิดเบสจากโพลีเมตต์ธรรมชาติ โดยทำการเตรียมและขึ้นรูปผ่านเครื่องอัดรีดด้วยมือ ตัวเร่งปฏิริยาที่ได้มีลักษณะแบบแท่ง มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ความยาวประมาณ 5 มิลลิเมตร โดยนำมาทำปฏิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน ระหว่างน้ำมันปาล์ม กับ

เมทานอล ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง เพื่อผลิตไบโอดีเซลและกลีเซอรอลความบริสุทธิ์สูงได้แบบต่อเนื่อง และทำการศึกษาปัจจัยต่างๆในการทดลอง เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตอย่างต่อเนื่องของไบโอดีเซลและกลีเซอรอลความบริสุทธิ์สูงด้วยกระบวนการที่ได้พัฒนาขึ้น พบว่าจากการทดลองวิจัย ภาวะที่เหมาะสมในการทดลอง คือ อัตราการไหลของเมทานอล 2.2 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำมันปาล์ม 0.9 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 100 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ 130 กรัม WHSV 0.42 มิลลิลิตร/กรัม. ชั่วโมง โดยให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ เท่ากับ 92.3 โดยน้ำหนัก

Bournay และคณะ [35] ได้คิดค้นและพัฒนาระบบในการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ที่มีชื่อว่ากระบวนการ Esterfip-H ซึ่งกระบวนการนี้ ถือได้ว่าเป็นกระบวนการแรกที่สามารถผลิตไบโอดีเซล และถูกนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ในระบบการเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ ระบบเครื่องปฏิกรณ์ประกอบด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง 2 ตัว ภายในบรรจุด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ผสมของซิงค์และอะลูมิเนียม ( $ZnAl_2O_4$ ) สารตั้งต้นที่ใช้ในงานวิจัย คือ น้ำมันพืชและเมทานอลจะถูกป้อนแยกกันเข้าทางด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ โดยผลิตภัณฑ์ที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ตัวแรก (R1) ยังมีความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ไม่ตรงตามมาตรฐาน จึงต้องนำมาผ่านเครื่องปฏิกรณ์ตัวที่สอง (R2) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอีกครั้ง ระหว่างเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองตัวมีอุปกรณ์แยกกลีเซอรอลออก เพื่อช่วยขับสมดุลของปฏิกิริยาให้ดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้น โดยผลจากการทดลอง พบว่าไบโอดีเซลและกลีเซอรอลที่ผลิตได้จากกระบวนการมีความบริสุทธิ์สูงกว่าร้อยละ 98

จากงานวิจัยของ Ruengyoo [34] ซึ่งได้พัฒนากระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์จากโตโลไมต์ โดยไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีความบริสุทธิ์ ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ เท่ากับ 92.3 โดยน้ำหนัก ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนากระบวนการผลิตจากระดับห้องปฏิบัติการไปเป็นระดับต้นแบบ ซึ่งมีขนาดใหญ่ขึ้น และมุ่งหวังให้เกิดอัตราการผลิตต่อวันที่สูงขึ้น และศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลความบริสุทธิ์สูงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งระดับต้นแบบ ให้ได้ตามเกณฑ์มาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงานที่กำหนด คือ ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ 96.5 โดยน้ำหนัก

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนากระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งระดับต้นแบบ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ โดยทำการศึกษาก่อนขั้นรูปตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ ชนิดเบสจากโดโลไมต์ธรรมชาติผสมกับสารประกอบแมกนีเซียม แคลเซียมและอะลูมิเนียม สำหรับการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของน้ำมันปาล์มกับเมทานอล ศึกษาสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา และตัวแปรดำเนินการสำหรับการผลิตไบโอดีเซล

#### 3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 วัตถุดิบและสารเคมีสำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

1. โดโลไมต์เกรดการค้าจากบริษัท พีแอนด์เอส โดโลไลม์ จำกัด
2. แมกนีเซียมออกไซด์ (magnesium oxide light pure, pharma grade C, Panreac)
3. แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , AR grade, QRëC)
4. อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ , Laboratory Hi-media)
5. โซเดียมอะลูมิเนต ( $\text{NaAlO}_2$ , SIGMA-ALDRICH)
6. น้ำกลั่น

##### 3.1.2 วัตถุดิบและสารเคมีสำหรับการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน

1. น้ำมันปาล์มโอเลอินจากเนื้อปาล์มผ่านกรรมวิธี ตราโอเลอิน ผลิตโดยบริษัทโอเลอิน จำกัด
2.  $\text{C}_{10}$  FAME จากบริษัทไทยโอเลโอเคมีคอล จำกัด
3. เมทานอล (Methanol, commercial grade, Zen point)
4. โซเดียมซัลเฟตแอนไฮดรัส ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , 99%, AR grade, QRëC)
5. น้ำมัน B100 จากบริษัทไทยโอเลโอเคมีคอล จำกัด (มหาชน)

##### 3.1.3 วัตถุดิบและสารเคมีสำหรับวิเคราะห์เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล

1. เมทิลเฮปตะเดคาโนเอต ( $\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$ , 99.5%, Synthesis grade, Fluka)
2. นอร์มอลเฮปเทน ( $\text{n-C}_7\text{H}_{16}$ , 99.8%, AR grade, Riedel-deHaën)

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

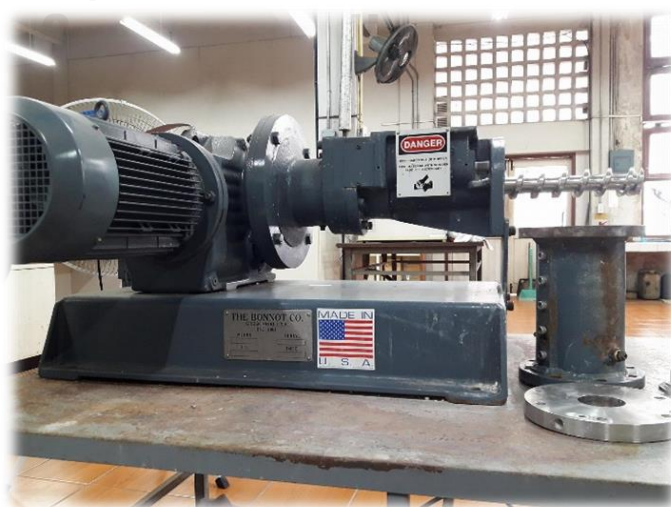
#### 3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

1. ช้อนตักสาร (spatula)
2. โถดูดความชื้น (desiccator)
3. ถ้วยกระเบื้องทนความร้อน (crucible)
4. เครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง
5. เตาเผาความร้อนสูง (muffle furnace) ยี่ห้อ CARBOLITE รุ่น CWF 1100
6. เครื่องอัดขึ้นรูปตัวเร่งปฏิกิริยา แบบสกรูเดี่ยว ประกอบด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว และแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป แสดงใน รูปที่ 3.1

#### 3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน

1. หลอดหยด (dropper)
2. ปีกเกอร์ (beaker) ขนาด 250, 500, 1000 มิลลิลิตร
3. ขวดฝาเกลียว
4. ไซริงค์ฟิลเตอร์ (syringe filter)
5. กระบอกฉีดยา (syringe)
6. ตู้อบไฟฟ้า (oven)
7. เครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge)
8. เครื่องระเหยแบบหมุน (rotary evaporation)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3. 1 เครื่องอัดขึ้นรูปแบบสกรูเดี่ยวสำหรับขึ้นรูปตัวเร่งปฏิกิริยา

### 3.3 เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย

#### 3.3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

##### 1. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-ray diffractometer)

เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 ADVANCE สำหรับใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นรูปก่อนและหลังการทำปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ความเร็วสแกน (scan speed) 0.2 องศาต่อนาที มุมที่ใช้ในการทดสอบตั้งแต่ 10 ถึง 80 องศา



รูปที่ 3. 2 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 ADVANCE

##### 2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6400 ใช้ในการวิเคราะห์สัณฐาน (morphology) ของตัวเร่งปฏิกิริยาและโพลีเมอร์ธรรมชาติ โดยใช้กำลังขยายตั้งแต่ 1,500 ถึง 20,000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3. 3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6400

#### 4. เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน (Surface area and porosity analyzer)

รูปที่ 3.4 แสดงเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น ASAP 2020 ที่ใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นรูป ด้วยเทคนิคการวัดการดูดซับและการคายแก๊สไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ  $-195.82$  องศาเซลเซียส โดยอาศัยหลักการวิธีของบีอีที (Brunauer-Emmett-Teller: BET) ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกไล่แก๊ส (degassed) ที่อุณหภูมิ  $300$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา  $1$  ชั่วโมง ก่อนทำการวิเคราะห์



รูปที่ 3. 4 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น ASAP 2020

#### 3.3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์

รูปที่ 3.5 แสดงเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatograph) ยี่ห้อ Agilent รุ่น 7890A สำหรับการวิเคราะห์หา FAME yield ใช้คอลัมน์แบบ capillary column ชนิด DB-WAX มีความยาว  $30$  เมตร ระบบการฉีดเป็นแบบอัตโนมัติ

ผลิตภัณฑ์ที่เก็บได้นำไปวิเคราะห์หาร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ (FAME yield) ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีตามวิธีมาตรฐาน EN 14103 โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี Agilent รุ่น 7890A (รูป 3.4) และใช้เมทิลเฮปตะเดคาโนเอต (methyl heptadecanoate) เป็นสารมาตรฐาน



รูปที่ 3. 5 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟียี่ห้อ Agilent รุ่น 7890A สำหรับการวิเคราะห์หา FAME yield

### 3.4 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งระดับต้นแบบที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

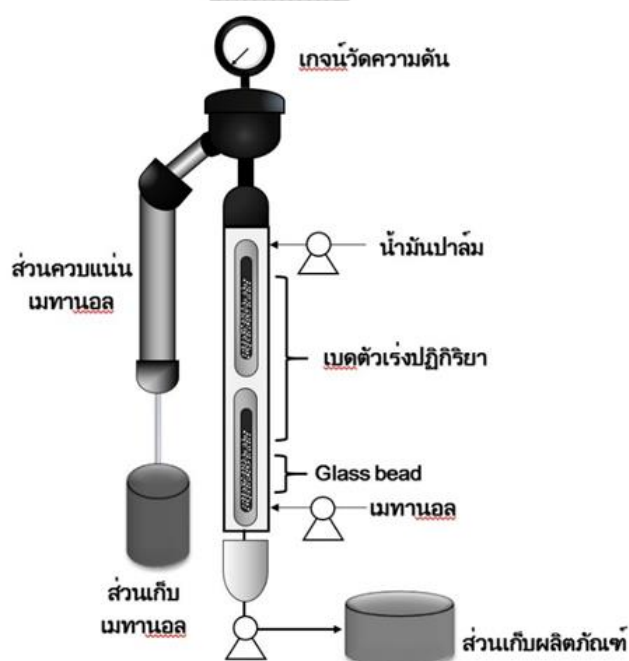
รูปที่ 3.6 แสดงแผนภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งในระดับต้นแบบ ที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่องโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ โดยส่วนประกอบต่างๆของเครื่องปฏิกรณ์มีดังนี้

- ส่วนของคอลัมน์ มีความสูง 90 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 6 เซนติเมตร ใช้สำหรับบรรจุ glass bead และตัวเร่งปฏิกิริยา

- ส่วนป้อนสาร การป้อนสารเข้าสู่ระบบจะใช้มิเตอร์ริงปั๊ม (Metering pump) และปั๊มรีดท่อ (Peristaltic pump) ในการควบคุมปริมาณอัตราไหลของสารเข้าสู่ระบบ โดยปั๊มส่วนจ่ายเมทานอลจะอยู่บริเวณช่วงล่างของคอลัมน์ ปั๊มส่วนจ่ายน้ำมันปาล์มจะอยู่ช่วงบนของคอลัมน์ และปั๊มส่วนตีผลิตภัณฑ์จะอยู่ส่วนล่างสุดของคอลัมน์

- ส่วนควบแน่น อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบแน่นไอของเมทานอลให้กลายมาเป็นของเหลว จะใช้คอนเดนเซอร์เชื่อมต่อเข้ากับส่วนบนของคอลัมน์ และมีเกจวัดความดันเพื่อสังเกตค่าความดันไอของเมทานอล ไอของเมทานอลจะระเหยขึ้นไปผ่านเข้าสู่คอนเดนเซอร์ และจะเกิดการควบแน่นตกลงมาสู่ถังเก็บเมทานอลด้านล่าง ซึ่งเมทานอลในส่วนนี้จะถูกเก็บและนำไปใช้ซ้ำ

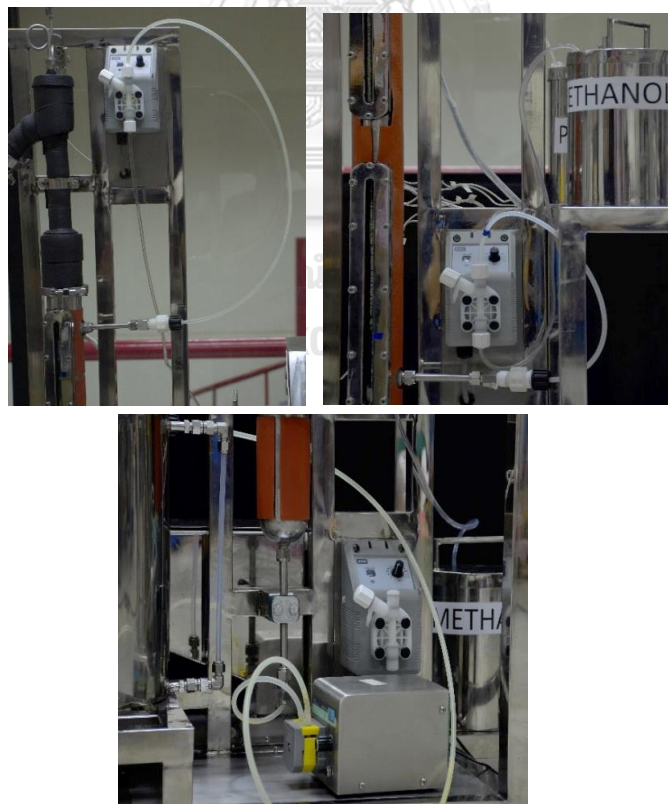
- ส่วนถังเก็บผลิตภัณฑ์ เป็นถังขนาด 15 ลิตร เชื่อมต่อกับปั๊มตีผลิตภัณฑ์ด้านล่าง เพื่อเก็บผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผลิต



รูปที่ 3. 6 แผนภาพอย่างง่ายของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งระดับห้องปฏิบัติการสำหรับการผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 3. 7 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งระดับต้นแบบ (pilot-scale) สำหรับการผลิตอย่างต่อเนื่องของ  
ไบโอดีเซลความบริสุทธิ์สูง

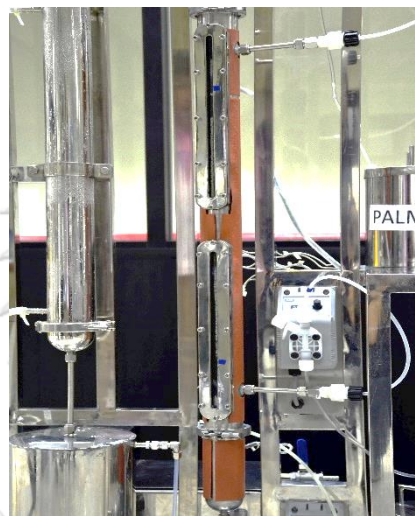


รูปที่ 3. 8 ปัมมรีดท่อ: (ภาพซ้าย) สำหรับส่วนป้อนน้ำมันปาล์ม; (ภาพขวา) สำหรับส่วนป้อนเมทานอล  
(ภาพกลาง) สำหรับส่วนดูดผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้เข้าสู่ถังเก็บ

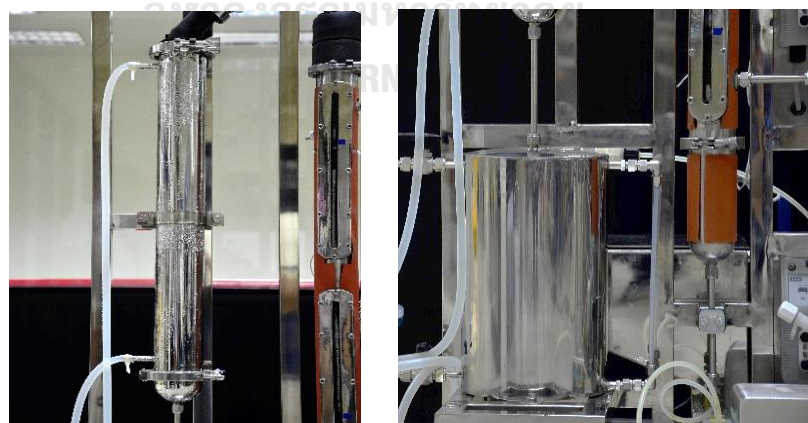




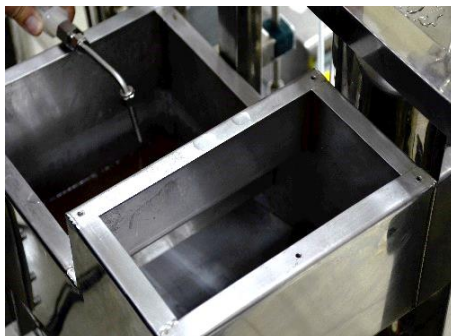
รูปที่ 3. 9 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) แต่ละส่วนของคอลัมน์



รูปที่ 3. 10 ส่วนของคอลัมน์ภายในบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา และ glass bead เพื่อช่วยในการกระจายตัวของฟองเมทานอล



รูปที่ 3. 11 ส่วนควบแน่นเมทานอล และส่วนเก็บเมทานอลเพื่อนำกลับมาใช้ซ้ำ



รูปที่ 3. 12 ส่วนเก็บผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลและกลีเซอรอล

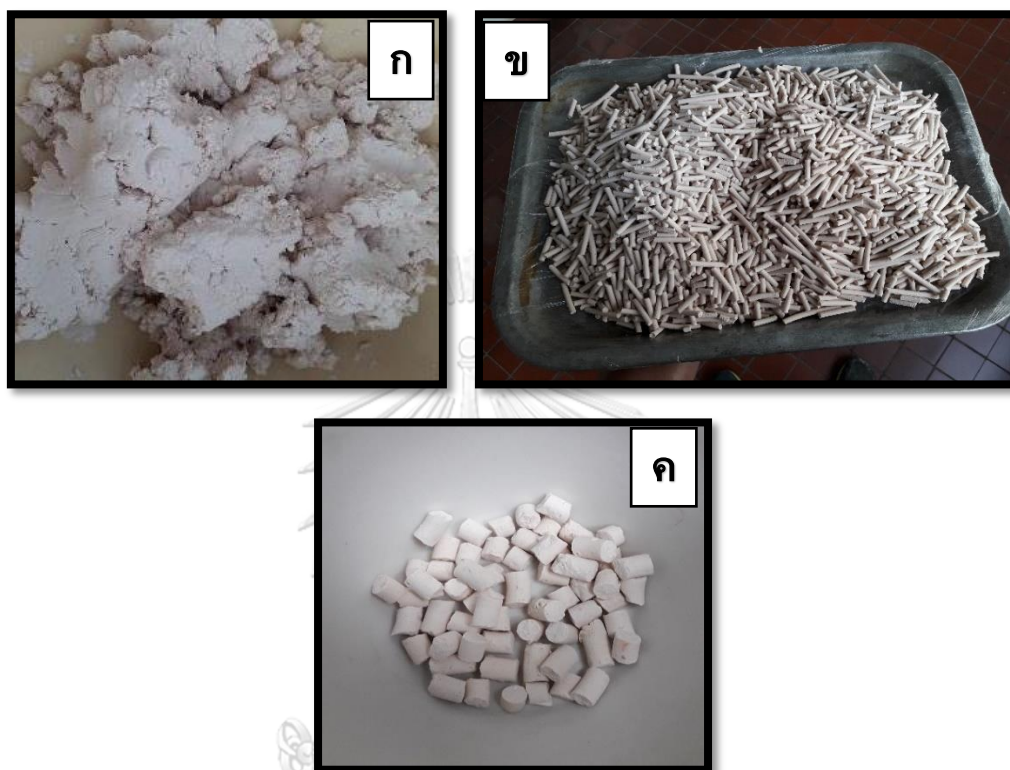
### 3.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

#### 3.5.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดเบสจากโดโลไมต์ธรรมชาติ

ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดเบสที่ใช้ทำปฏิกิริยาในงานวิจัยนี้ สามารถเตรียมได้โดยการใช้วิธีการผสมเชิงกายภาพ และทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว โดยมีขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ดังต่อไปนี้

1. เผา (calcination) โดโลไมต์ธรรมชาติในเตาเผาอุณหภูมิสูงที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
2. ผสมสารประกอบแมกนีเซียม แคลเซียมและอะลูมิเนียม ที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาลงในโดโลไมต์ที่ผ่านการเผาจากข้อ 1 แล้วทำการกวนผสมให้เข้ากันอย่างทั่วถึง
3. ค่อยๆเติมน้ำกลั่นลงในของผสมที่ได้จากข้อ 2 พร้อมทั้งกวนผสมให้เข้ากันจนเป็นเนื้อเรียบเนียน มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.13 (ก) โดยปริมาณตัวทำละลายที่ใช้ขึ้นกับอัตราส่วนของผสมที่เติมลงไป
4. ตักตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการกวนผสมจนเป็นเนื้อเรียบเนียนลงในช่องอัดขึ้นรูปในเครื่องเพื่อขึ้นรูปตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นแบบแท่ง (extrudate) ที่ถูกอัดผ่าน หนาได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.12 (ข)
5. นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกอัดขึ้นรูปแล้วจากข้อ 4 ไปอบในเตาอบไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อระเหยน้ำและทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาคงรูป
6. นำตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นรูปที่ผ่านการอบจากข้อ 5 มาตัดให้มีมีความยาวประมาณ 5 มิลลิเมตร ทำการกรองผงของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เกิดจากการตัดด้วยตะแกรง จากนั้นนำเม็ดตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นรูปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 มิลลิเมตร ความยาวประมาณ 5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.12 (ค) มาชั่งน้ำหนักให้ได้ 1300 กรัม

7. เผาเม็ดตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นรูปที่ได้จากการตัดในข้อ 6 ด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูงที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำเม็ดตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นรูปที่ได้ไปใช้ในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันต่อไป



รูปที่ 3. 13 ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา (ก) กวนผสมจนเป็นเนื้อเรียบเนียน (ข) ผ่านเครื่องอัดรีดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูหน้าใด 3.5 มิลลิเมตร และ (ค) ตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นรูปที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 มิลลิเมตร ความยาวประมาณ 5 มิลลิเมตร

3.5.2 การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งระดับต้นแบบ การศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลผ่านการเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งระดับต้นแบบ โดยปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่

- ผลของการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ภาวะการทำปฏิกิริยาที่ได้จากการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ
- ผลของการเพิ่มเวลาดำเนินการในช่วง Start-up ของระบบ
- ผลของการผลิตไบโอดีเซลโดยการทำทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันซ้ำ

- ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา
- ผลของอัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ C<sub>10</sub> FAME ในช่วงเวลาการ start-up
- ผลของอัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ C<sub>10</sub> FAME ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ
- ผลของอิมัลซิไฟเออร์ต่อการทำปฏิกิริยา

ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง มีดังนี้

1. ชั่งน้ำมันปาล์ม และ C<sub>10</sub> FAME มาอย่างละ 600 กรัม เทผสมลงในขวดฝาเกลียว แล้วกวนผสมให้เข้ากัน
2. นำเม็ดตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการเผาจากหัวข้อที่ 3.5.1 เทลงในของผสมน้ำมันปาล์มและ C<sub>10</sub> FAME เพื่อป้องกันการสัมผัสกันระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยากับอากาศ
3. เทเม็ดตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นรูปในของผสมระหว่างน้ำมันปาล์มและ C<sub>10</sub> FAME ลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับต้นแบบ
4. เริ่มต้นปฏิกิริยา (start-up) ด้วยเมทานอลที่ถูกป้อนเข้าทางด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยปราศจากการป้อนน้ำมันปาล์มและการบ่มสารออกจากเครื่องปฏิกรณ์
5. หลังจากการเริ่มต้นปฏิกิริยาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เริ่มทำการป้อนน้ำมันปาล์มเข้าทางด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์พร้อมกับการบ่มสารออกจากเครื่องปฏิกรณ์ทางด้านล่างเพื่อเข้าสู่ระบบการทำปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง โดยปรับอัตราการไหลขาเข้าและขาออกให้เท่ากัน
6. เริ่มเก็บผลิตภัณฑ์หลังจากการเริ่มต้นปฏิกิริยาด้วยเมทานอลเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ลงในขวดเก็บตัวอย่างปริมาตร 20 มิลลิลิตร ทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 2 ชั่วโมง เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
7. เทผลิตภัณฑ์ที่เก็บได้ลงในหลอดปั่นเหวี่ยงเพื่อทำการแยกตัวเร่งปฏิกิริยา เมทิลเอสเทอร์ และ กลีเซอรอลออกจากกันด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง ยี่ห้อ KUBOTA รุ่น KC-25 ที่ความเร็วรอบเบอร์ 5 เป็นเวลา 15 นาที
8. นำส่วนเมทิลเอสเทอร์ไประเหยเมทานอลด้วยเครื่องระเหยแบบหมุนที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

9. เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากข้อ 8 ลงในหลอดปั่นเหวี่ยง เติมน้ำกลั่นปริมาตรเป็นสองเท่าของปริมาตรเมทิลเอสเทอร์ ปิดฝาให้สนิทแล้วเขย่าให้เข้ากัน จากนั้นปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบเบอร์ 5 เป็นเวลา 15 นาที น้ำจะถูกแยกอยู่ชั้นล่างและเมทิลเอสเทอร์อยู่ชั้นบน โดยเมทิลเอสเทอร์ที่ได้หลังจากการล้างจะมีสีเหลืองใส

10. กำจัดน้ำที่อาจปนเปื้อนมากับเมทิลเอสเทอร์ โดยการดูดเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการแยกชั้นจากข้อ 9 ใส่ลงในหลอดทดลอง เติมนโซเดียมซัลเฟตแอนไฮไดรส์ ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , 99%) ลงไปคนผสมให้ทั่วแล้วตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน จากนั้นนำเมทิลเอสเทอร์ที่ได้มารองด้วยไซริงค์ฟิลเตอร์ เพื่อกำจัดโซเดียมซัลเฟตแอนไฮไดรส์ที่อาจปนเปื้อนมากับเมทิลเอสเทอร์

11. นำสารตัวอย่างไปวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีตามวิธีมาตรฐาน EN 14103

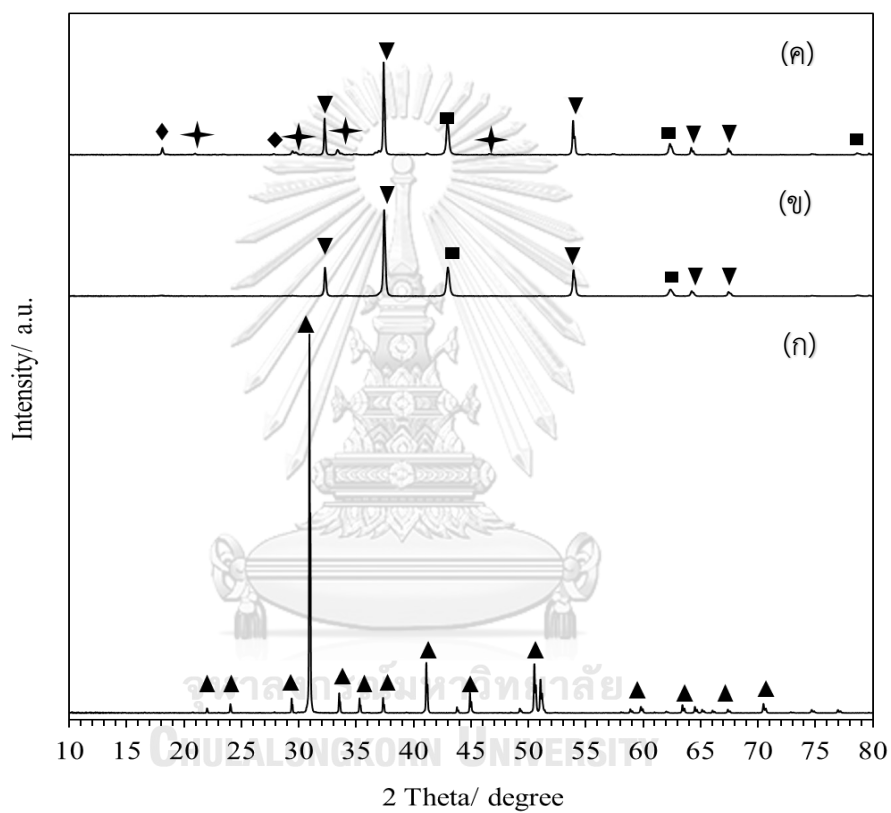


## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

##### 4.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์



**รูปที่ 4. 1** รูปแบบ XRD ของ (ก) โดโลไมต์ธรรมชาติ (ข) โดโลไมต์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (ค) ตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นรูปที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (สัญลักษณ์: ▲ =  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ; ◆ =  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ; ▼ =  $\text{CaO}$ ; ■ =  $\text{MgO}$ ; และ ✦ =  $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ )

รูปที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของโดโลไมต์ธรรมชาติ ก่อนและหลังการเผา และตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นรูปที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง รูปที่ 4.1 (ก) แสดงรูปแบบ XRD ของโดโลไมต์ธรรมชาติซึ่งงานวิจัยนี้ใช้เป็นวัสดุหลักในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา จากรูปพบว่า XRD แสดงพีคของสารประกอบคาร์บอเนตผสมของโดโลไมต์ ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ )

ในขณะที่ โดโลไมต์ธรรมชาติหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (รูปที่ 4.1 (ข)) ปรากฏพีคของ CaO และ MgO ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาดีคาร์บอเนชัน (decarbonation) ของ CaCO<sub>3</sub> และ MgCO<sub>3</sub> ไปเป็นโลหะออกไซด์ ดังสมการที่ (4.1) และ (4.2) โดยแคลเซียมออกไซด์เป็นเฟสที่ว่องไวต่อการเร่งปฏิกิริยา (active phase) ซึ่งอีกส่วนหนึ่งสามารถเกิดได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) ซึ่งเป็นสารเคมีที่เติมลงไปในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่า XRD ปรากฏพีคของ CaO และ MgO และพีค Ca(OH)<sub>2</sub> ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของ CaO เมื่อสัมผัสกับความชื้นในอากาศ (สมการที่ 4.3) และพีคของ Calcium aluminate (Ca<sub>12</sub>Al<sub>14</sub>O<sub>33</sub>) ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง CaO และ Aluminium hydroxide (Al(OH)<sub>3</sub>) ดังสมการที่ (4.4) เป็นสารจำพวกซีเมนต์ ไม่ว่องไวต่อการเร่งปฏิกิริยา แต่มีคุณสมบัติช่วยเพิ่มความแข็งแรงเชิงกลให้กับตัวเร่งปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาดีคาร์บอเนชันของ CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>

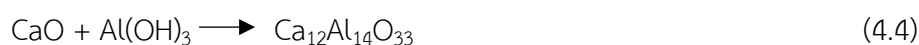


ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ Ca(OH)<sub>2</sub>

800°



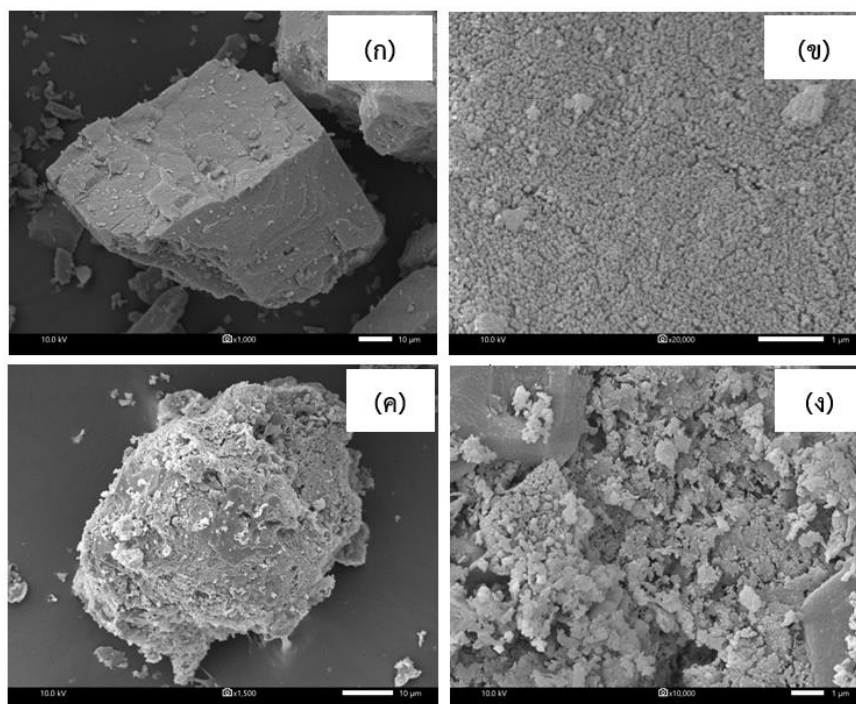
ปฏิกิริยาระหว่าง CaO และ Aluminium hydroxide



#### 4.1.2 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่าย SEM ของโดโลไมต์และตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นรูปที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าโดโลไมต์ที่ผ่านการเผา (รูปที่ 4.2 (ก) และ (ข)) มีลักษณะเป็นก้อนผลึกขนาดใหญ่ พื้นผิวเรียบ และมีรูพรุนซึ่งเกิดจากการสูญเสียคาร์บอนไดออกไซด์จากปฏิกิริยาดีคาร์บอเนชันของโดโลไมต์ ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นรูปหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (รูปที่ 4.2 (ค) และ (ง)) พบว่าพื้นผิวมีความขรุขระมากกว่า ซึ่ง

เกิดจากการมีสารประกอบที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยามาปกคลุมบริเวณพื้นผิวของโดโลไมต์ โดยผลึกของสารที่ปกคลุมบนพื้นผิวของผลึกโดโลไมต์มีรูปร่างแตกต่างกัน โดยมีลักษณะเป็นก้อน และเป็นผลึกที่มีลักษณะเป็นเกล็ดขนาดเล็ก กระจายตัวเป็นกลุ่มๆอยู่บนพื้นผิวของโดโลไมต์



**รูปที่ 4. 2** แสดงลักษณะสัณฐานของ (ก) โดโลไมต์ (กำลังขยาย 1,000 เท่า) (ข) โดโลไมต์ (กำลังขยาย 20,000 เท่า) (ค) ตัวเร่งปฏิกิริยาขั้นรูป (กำลังขยาย 1,500 เท่า) (ง) ตัวเร่งปฏิกิริยาขั้นรูป (กำลังขยาย 10,000 เท่า) โดยผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

#### 4.1.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและความพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการวัด การดูดซับและการคายแก๊สไนโตรเจน

ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดและปริมาตรรูพรุนของโดโลไมต์และตัวเร่งปฏิกิริยาขั้นรูป หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค Brunauer, Emmett และ Teller (BET Method) แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าโดโลไมต์มีพื้นที่ผิว 14.4 ตารางเมตรต่อกรัม ขนาดรูพรุนเฉลี่ย 53.31 อังสตรอม และปริมาตรรูพรุนเฉลี่ย 0.027 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาขั้นรูปหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง มีพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุนเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนเฉลี่ยมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับภาพจาก SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยาขั้นรูป ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ค และ ง) โดยพบว่ามีการรวมตัวกันของอนุภาคจากสาร



ตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนพื้นผิวของโดโลไมต์ จากการเติมสารประกอบเหล่านี้ลงไป จะส่งผลให้เกิด dilution effect โดยสารประกอบต่างๆจะไปเจือจางปริมาณของโดโลไมต์ ซึ่งเมื่อเกิดการเผาแล้ว ส่งผลให้ ขนาดรูพรุนเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนเฉลี่ยมีค่าลดลง

**ตารางที่ 4. 1** พื้นที่ผิวจำเพาะและความพรุนของโดโลไมต์และตัวเร่งปฏิกิริยาขั้นรูปที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดการดูดซับและการคายแก๊สไนโตรเจน

ตัวอย่าง	พื้นที่ผิวป้อนที่ (ตารางเมตรต่อกรัม)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (อังสตรอม)	ปริมาตรรูพรุนเฉลี่ย (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)
โดโลไมต์ <sup>ก</sup>	14.4	53.31	0.027
ตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้นรูป <sup>ข</sup>	9.5	44.59	0.014

ก โดโลไมต์ธรรมชาติที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ข ตัวเร่งปฏิกิริยาขั้นรูปที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

#### 4.2 ผลของการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ที่ผ่านการขั้นรูป

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งด้วยกัน 6 ปัจจัย ได้แก่

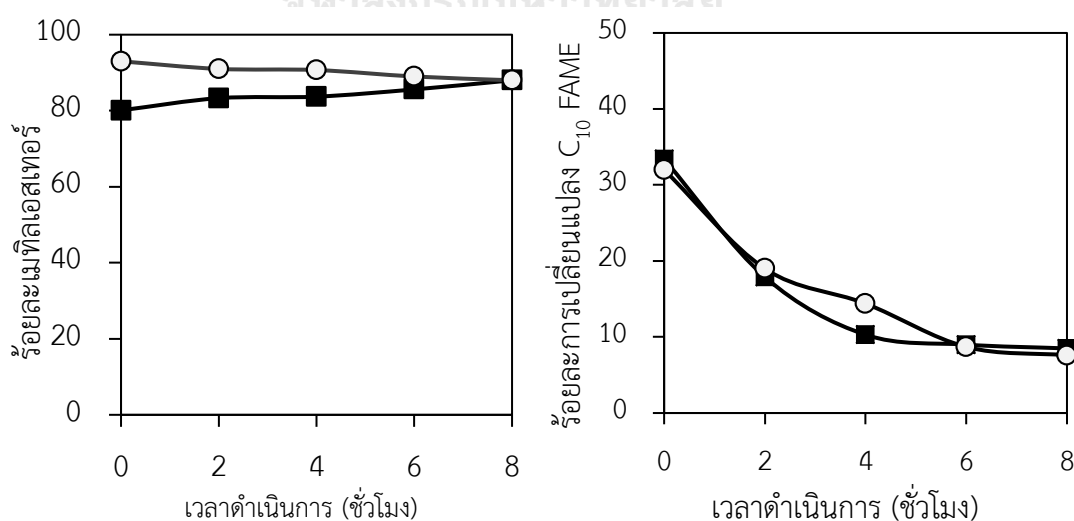
1. การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ภาวะการทำปฏิกิริยาที่ได้จากการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ
2. ระยะเวลาดำเนินการในช่วง Start-up ของระบบ
3. การผลิตไบโอดีเซลโดยการทำทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันซ้ำ
4. อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา
5. อัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ C<sub>10</sub> FAME ในช่วงเวลาการ start-up
6. อัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ C<sub>10</sub> FAME ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ
7. ชนิดของอิมัลซิไฟเออร์ต่อการทำปฏิกิริยา

#### 4.2.1 ผลของการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ภาวะการทำปฏิกิริยาที่ได้จากการศึกษาในระดับ

##### ห้องปฏิบัติการ

การทดลองนี้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งระดับต้นแบบที่พัฒนาขึ้น โดยใช้อัตราการไหลของเมทานอล 13.4 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำมันปาล์ม 9 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 100 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1300 กรัม และ WHSV 0.42 มิลลิลิตร/กรัม-ชั่วโมง ช่วง start-up ใช้อัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ C<sub>10</sub> FAME เท่ากับ 50: 50 โดยน้ำหนัก เวลาดำเนินการในช่วง start-up 2 ชั่วโมง และใช้สารป้อนที่เป็นน้ำมันปาล์มผสมกับ C<sub>10</sub> FAME ในอัตราส่วน 90:10 โดยน้ำหนัก จาก **Error! Reference source not found.**

4.3 พบว่า แนวโน้มของ FAME yield ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาแตกต่างจากการผลิตไบโอดีเซลในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งระดับห้องปฏิบัติการ กล่าวคือ FAME yield ที่ได้จากการผลิตในระดับห้องปฏิบัติการมีค่า 93% ที่เวลาเริ่มต้น และค่อยๆ ลดลงเป็น 87% ที่ 8 ชั่วโมง ในขณะที่การผลิตในระดับต้นแบบ FAME yield ที่ได้ อยู่ที่ 80.1% ที่เวลาเริ่มต้น และเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เป็น 88.0% ที่เวลา 8 ชั่วโมง จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า FAME yield ที่ได้ในชั่วโมงเริ่มต้นจากระดับต้นแบบมีค่าต่ำกว่าจากระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งน่าจะเกิดจากขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ extrudate ที่ใช้ในระดัต้นแบบมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลทำให้มีช่องว่างภายในเครื่องปฏิกรณ์มากขึ้น ซึ่งไปลดการสัมผัสกันระหว่างสารตั้งต้นและพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา จึงส่งผลให้การปฏิกิริยาเกิดได้ช้ากว่าในช่วงแรก



**รูปที่ 4.3** แสดงผลของการผลิตไบโอดีเซลในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งระดับต้นแบบโดยใช้ภาวะการทำปฏิกิริยาที่ได้จากการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ ภาวะปฏิกิริยา: ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1300

กรัม; อัตราการไหลของน้ำมันปาล์ม 9 มิลลิลิตรต่อนาที; อัตราการไหลของเมทานอล 13.4 มิลลิลิตรต่อนาที; อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส; WHSV 0.42 มิลลิลิตร/กรัม-ชั่วโมง

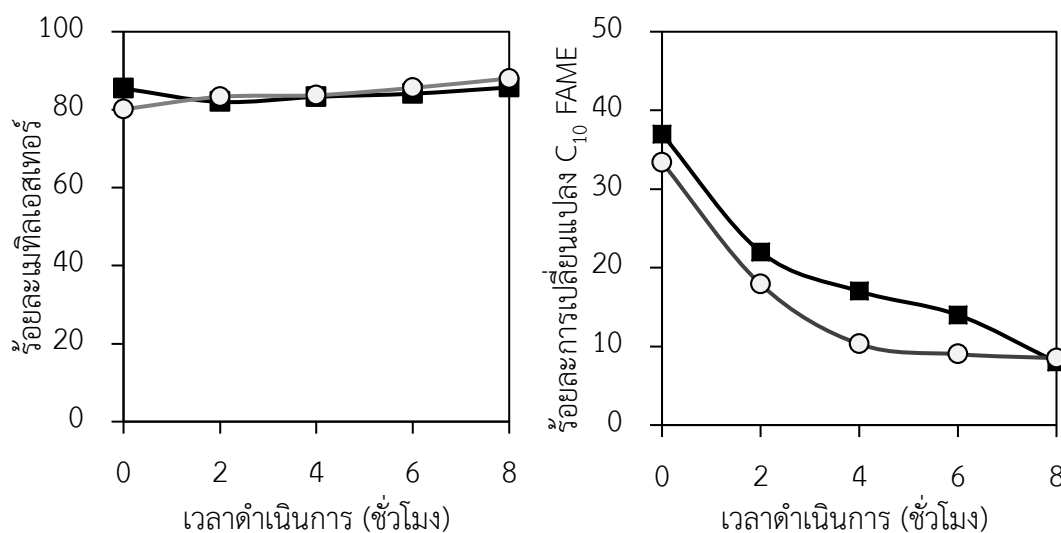
อย่างไรก็ตามเมื่อระยะเวลาดำเนินการมากขึ้น การจัดเรียงตัวกันของตัวเร่งปฏิกิริยาจะค่อยๆ ชยับตัวและจัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นมากขึ้น ช่องว่างระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์ลดลง ส่งผลให้การสัมผัสกันระหว่างสารตั้งต้นและพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น การเกิดปฏิกิริยาจึงเกิดได้มากขึ้น FAME yield ที่ได้จึงค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาดำเนินการ

เมื่อพิจารณาร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่ลดลงในช่วงชั่วโมงที่ 0 ถึง 4 ในระดับห้องปฏิบัติการเทียบกับร้อยละ  $C_{10}$  FAME ในระบบพบว่า มีการลดลงของร้อยละ  $C_{10}$  FAME ในช่วงชั่วโมงที่ 0 ถึง 4 เช่นเดียวกัน โดยการลดลงของ  $C_{10}$  FAME ส่งผลให้ความไม่เข้ากันของเมทานอลและน้ำมันปาล์มเพิ่มสูงขึ้น เพราะ  $C_{10}$  FAME เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ซึ่งช่วยเพิ่มการเข้ากันได้ระหว่างเมทานอลและน้ำมันปาล์ม [4] จากการลดลงนี้ส่งผลให้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์มีค่าลดลง อย่างไรก็ตาม ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 4 เป็นต้นไป กลับมีค่าค่อนข้างคงที่แม้ว่าจะมีการลดลงของร้อยละ  $C_{10}$  FAME ในระบบ เนื่องจากเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้จะทำหน้าที่เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ ช่วยลดความต้านทานการถ่ายโอนมวลสารแทน  $C_{10}$  FAME ที่สูญเสียไป แต่ในทางกลับกัน ในระบบต้นแบบ FAME yield ที่ได้กลับมีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาดำเนินการ ซึ่งน่าจะเป็นไปตามข้อสันนิษฐานดังที่ได้กล่าวด้านบนว่า การเกิดปฏิกิริยาในระดับต้นแบบจะค่อยๆเกิดได้ดีขึ้น เพราะเกิดการสัมผัสกันของสารตั้งต้นมากขึ้น ส่งผลให้ FAME yield ที่ได้มีค่าสูงขึ้น ถึงแม้ว่า  $C_{10}$  FAME ซึ่งเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ในระบบจะมีค่าลดลงก็ตาม

#### 4.2.2 ผลของระยะเวลาในช่วง start-up ต่อการผลิตไบโอดีเซล

จากงานวิจัยของ Ruengyoo S. (2016) [34] พบว่าการเพิ่มระยะเวลาในช่วง start-up จากการผลิตไบโอดีเซลและกลีเซอรอลความบริสุทธิ์สูงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งระดับห้องปฏิบัติการสามารถเพิ่ม FAME yield ได้ การทดลองนี้จึงศึกษาผลของช่วงเวลา start-up ต่อการผลิตไบโอดีเซลในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งระดับต้นแบบ โดยการเพิ่มเวลาในช่วง start-up จาก 2 ชั่วโมง เป็น 3 ชั่วโมง ภาวะทำปฏิกิริยาอัตราการไหลของน้ำมันปาล์ม 9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของเมทานอล 22 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1300 กรัมในของผสมน้ำมันปาล์มและ  $C_{10}$  FAME ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.4 จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มระยะเวลาในช่วง start-up ส่งผลให้ FAME yield ที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรก โดย FAME yield ที่ได้เท่ากับ 85.4% ที่ชั่วโมงที่ 0 ซึ่งมีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองโดยใช้เวลาในช่วง start-up ที่ 2 ชั่วโมง เนื่องจาก FAME ที่ผลิตขึ้นในช่วง start-up มีปริมาณมากขึ้น จึงทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ในระบบและลดความต้านทานการถ่ายโอนมวลสารระหว่างวัฏภาค โดยที่เวลา 8 ชั่วโมงจะได้ FAME yield เท่ากับ 85.7%

คณะผู้วิจัยจึงเลือกระยะเวลาในช่วง start-up ที่ 3 ชั่วโมง เป็นภาวะเหมาะสมสำหรับการผลิตไบโอดีเซลในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งระดับต้นแบบ

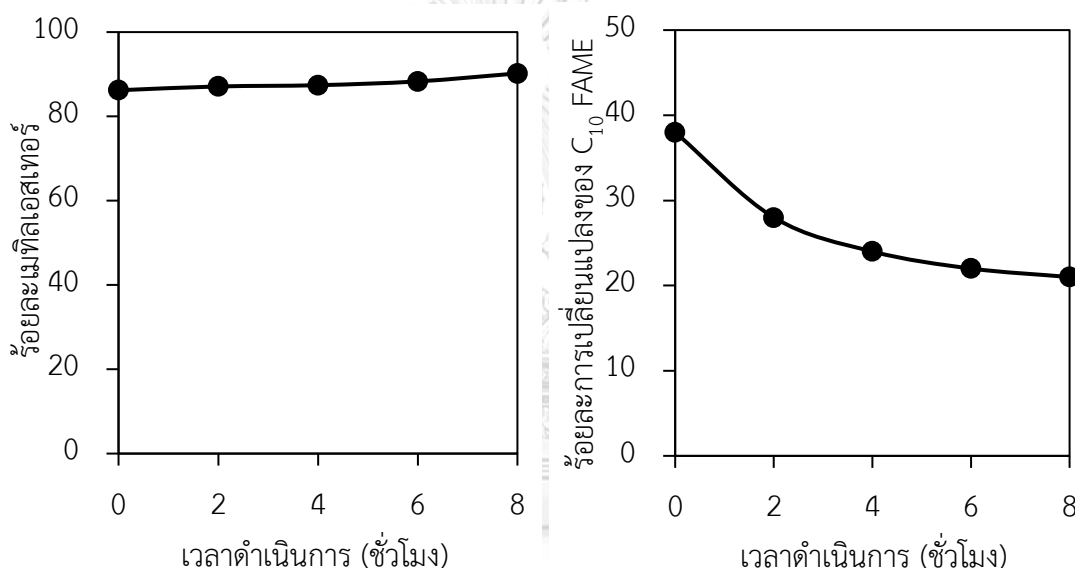


**รูปที่ 4.4** ผลของระยะเวลาในช่วง start-up ต่อ FAME yield และการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ C<sub>10</sub> FAME ภาวะปฏิบัติการ: ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1300 กรัม; อัตราการไหลของน้ำมันปาล์ม 9 มิลลิลิตรต่อนาที; อัตราการไหลของเมทานอล 13.4 มิลลิลิตรต่อนาที; อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส; WHSV 0.42 มิลลิลิตร/กรัม-ชั่วโมง (สัญลักษณ์: ○ = 2 ชั่วโมง; ■ = 3 ชั่วโมง)

#### 4.2.3 ผลของการผลิตไบโอดีเซลโดยการทำทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันซ้ำ

จากผลการศึกษาข้างต้นพบว่า FAME yield ที่ได้จากระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งระดับต้นแบบยังคงค่อนข้างต่ำ การทดลองนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลที่มี FAME yield เฉลี่ยที่ 84% มาทำทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันซ้ำในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งระดับต้นแบบ ซึ่งแนวความคิดนี้คล้ายคลึงกับเทคโนโลยีในการผลิตไบโอดีเซลและกลีเซอรอลบริสุทธิ์สูงในปัจจุบันโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง 2 ตัวต่ออนุกรม หรือที่เรียกว่ากระบวนการ Esterflip-H ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยการนำผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากเครื่องปฏิกรณ์ที่ 1 บ่อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ที่ 2 เพื่อทำปฏิกิริยาซ้ำ โดย FAME yield ที่ได้จะมีค่าสูงขึ้น เพราะการเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้น จะส่งผลให้กลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่เกิดปฏิกิริยาเป็น FAME ในปริมาณเพิ่มขึ้น ตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยภาวะในการทำทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันซ้ำในการทดลองนี้เหมือนกับการผลิตไบโอดีเซลในขั้นแรก คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1300 กรัม อัตราการไหลของน้ำมันปาล์ม 9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของเมทานอล 13.4 มิลลิลิตรต่อนาที น้ำมันปาล์มและ C<sub>10</sub> FAME ในอัตราส่วน 50: 50 สำหรับขั้นตอนการ start-up และ WHSV 0.42 มิลลิลิตร/กรัม-ชั่วโมง รูปที่ 4.5 แสดง FAME yield

และการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ  $C_{10}$  FAME จากการผลิตไบโอดีเซลผ่านการทำทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันซ้ำ พบว่า FAME yield ที่ผลิตได้มีค่าเพิ่มจาก 85.2 % ที่ชั่วโมงดำเนินการที่ 0 และเป็น 90.2% ที่ชั่วโมงดำเนินการที่ 8 จากผลการทดลองแสดงว่ากลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในไบโอดีเซลจากขั้นตอนแรกยังสามารถเกิดปฏิกิริยาได้อีก ส่งผลให้การเปิดปฏิกิริยาเกิดได้สูงขึ้นเรื่อยๆ FAME yield ที่ได้จึงค่อยๆ เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ด้วยขนาดตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ extrudate ที่ใหญ่ขึ้นและการมีช่องว่างระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์มากขึ้น ส่งผลให้การสัมผัสกันระหว่างสารตั้งต้นและพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ดีเท่าที่ควร การเกิดปฏิกิริยาจึงเกิดได้ช้ากว่าเมื่อเทียบกับระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งในระดับห้องปฏิบัติการ

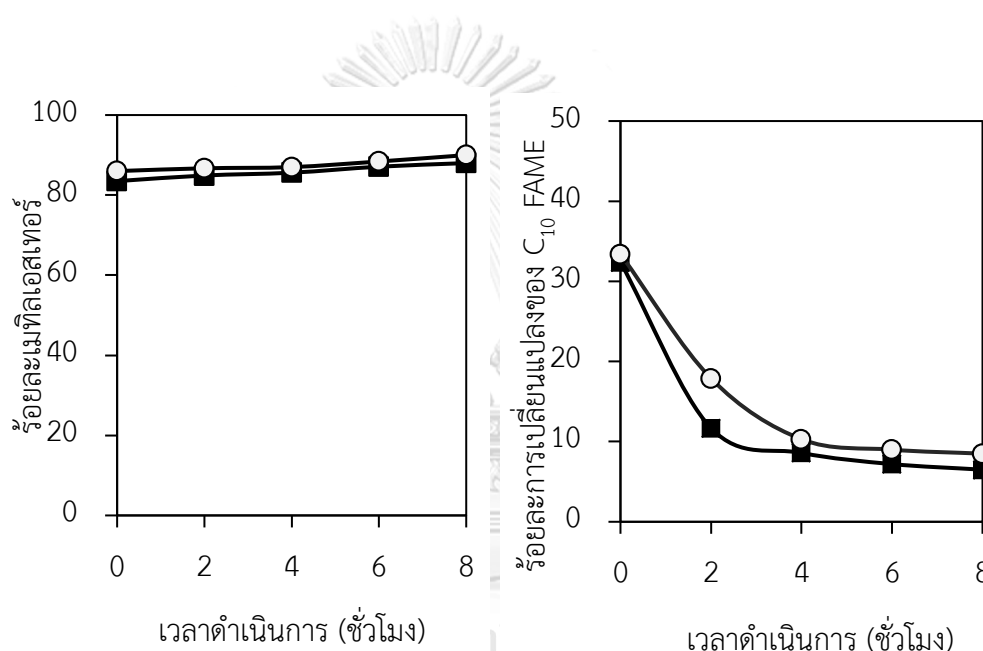


**รูปที่ 4.5** ผลของการผลิตไบโอดีเซลโดยการทำทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันซ้ำ และการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ  $C_{10}$  FAME ภาวะปฏิกิริยา: ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1300 กรัม; อัตราการไหลของน้ำมันปาล์ม 9 มิลลิลิตรต่อนาที; อัตราการไหลของเมทานอล 13.4 มิลลิลิตรต่อนาที; อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส; WHSV 0.42 มิลลิลิตร/กรัม-ชั่วโมง

#### 4.2.4 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

การศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละเมทิลเอสเทอร์ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 80 และ 100 องศาเซลเซียส ภาวะทำปฏิกิริยาอัตราการไหลของน้ำมันปาล์ม 9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของเมทานอล 22 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1300 กรัมในของผสมน้ำมันปาล์มและ  $C_{10}$  FAME ในอัตราส่วน 50: 50 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.6 จากผลการทดลองพบว่า ร้อยละเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ การเกิดปฏิกิริยาจะเกิดได้รวดเร็ว

มากขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 80 จากผลการทดลองให้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่ 83.5% และค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นเป็น 88% ในชั่วโมงดำเนินการที่ 8 ในขณะที่อุณหภูมิ 100 จะให้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่ 86% และค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นเป็น 90.2% ในชั่วโมงที่ 8 นอกจากนี้ เมื่ออุณหภูมิในการทดลองสูงขึ้น จะทำให้เกิดความปั่นป่วนของไอจากเมทานอลภายในระบบ ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเกิดได้ทั่วทั้งเบดในเครื่องปฏิกรณ์ และทำให้น้ำมันปาล์มและเมทานอลเกิดการเข้ากันได้ดี การเกิดปฏิกิริยาจึงเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาร้อยละเมทิลเอสเทอร์ในช่วงชั่วโมง ที่ 0 ถึง 8 เปรียบเทียบกับการลดลงของร้อยละ  $C_{10}$  FAME ในระบบ จะเห็นว่าการลดลงของร้อยละ  $C_{10}$  FAME ในระบบไม่ส่งผลให้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ต่ำลง ดังสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้ก่อนหน้านี้



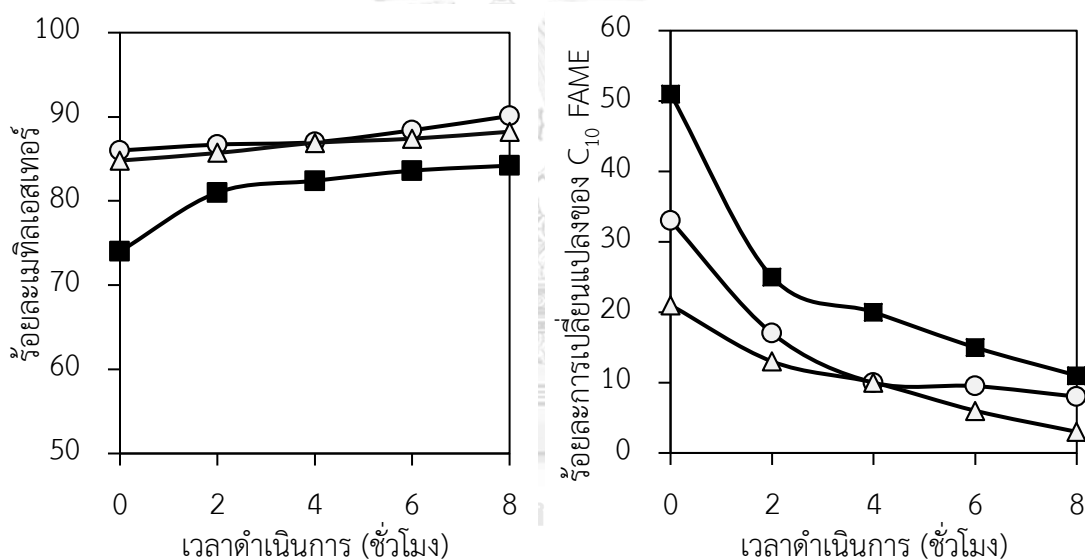
**รูปที่ 4. 6** ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาและการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ  $C_{10}$  FAME ภาวะปฏิกิริยา: ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1300 กรัม; อัตราการไหลของน้ำมันปาล์ม 9 มิลลิลิตรต่อนาที; อัตราการไหลของเมทานอล 13.4 มิลลิลิตรต่อนาที; WHSV 0.42 มิลลิลิตร/กรัม-ชั่วโมง (สัญลักษณ์: ■ = อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และ ○ = อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส)

จากผลการทดลองดังกล่าว จึงเลือกใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับต้นแบบ เพื่อศึกษาปัจจัยอื่นๆต่อไป

#### 4.2.5 ผลของอัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ $C_{10}$ FAME ในช่วง start-up

แม้ว่าการเพิ่มระยะเวลาในช่วง start-up จะส่งผลให้การผลิตไบโอดีเซลมีเสถียรภาพสูงขึ้น แต่ก็ทำให้สิ้นเปลืองเวลาในช่วงเดินเครื่องการผลิตมากขึ้นเช่นกัน การทดลองนี้จึงสนใจศึกษาการปรับ

ปริมาณ  $C_{10}$  FAME ในช่วง start-up ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์เพื่อลดความต้านทานการถ่ายโอนมวลสารของสารตั้งต้นในระบบ โดยปรับอัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ  $C_{10}$  FAME ในช่วง start-up จากอัตราส่วน 50: 50 เป็น 30: 70 และ 70: 30 ภาวะทำปฏิกิริยาอัตราการไหลของน้ำมันปาล์ม 9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของเมทานอล 22 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิในการทดลอง 100 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1300 กรัม รูปที่ 4.7 แสดงผลของการปรับปริมาณ  $C_{10}$  FAME ในช่วงเวลา start-up พบว่าการเพิ่มปริมาณ  $C_{10}$  FAME มากขึ้นในอัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ  $C_{10}$  FAME 30: 70 กลับทำให้ FAME yield ที่ได้มีค่าต่ำลงอย่างมาก ซึ่งสันนิษฐานว่าน่าจะเป็นผลจาก dilution effect กล่าวคือ ปริมาณ  $C_{10}$  FAME ที่มากขึ้นไปเจือจางความเข้มข้นของสารตั้งต้น ส่งผลให้การสัมผัสกันระหว่างโมเลกุลของสารตั้งต้นกับพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง



**รูปที่ 4.7** ผลของอัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ  $C_{10}$  FAME ในการผลิตไบโอดีเซลและการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ  $C_{10}$  FAME ภาวะปฏิกิริยา: ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1300 กรัม; อัตราการไหลของน้ำมันปาล์ม 9 มิลลิลิตรต่อนาที; อัตราการไหลของเมทานอล 13.4 มิลลิลิตรต่อนาที; อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส; WHSV 0.42 มิลลิลิตร/กรัม-ชั่วโมง (สัญลักษณ์: ■ = อัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ  $C_{10}$  FAME เท่ากับ 30: 70, Δ = อัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ  $C_{10}$  FAME เท่ากับ 70: 30 และ O = อัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ  $C_{10}$  FAME เท่ากับ 50: 50)

**ตารางที่ 4. 2** อัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ C<sub>10</sub> FAME ในช่วง start-up

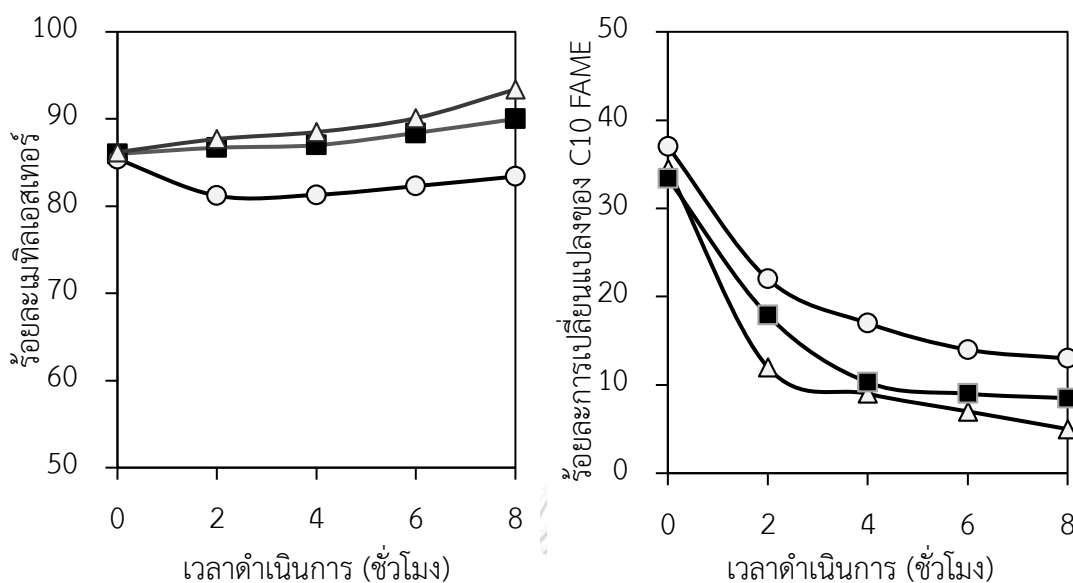
อัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ C <sub>10</sub> FAME	ร้อยละเมทิลเอสเทอร์
อัตราส่วน 30: 70	84.2
อัตราส่วน 50: 50	90.1
อัตราส่วน 70: 30	88.2

ในขณะที่การปรับลดปริมาณของ C<sub>10</sub> FAME ในอัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ C<sub>10</sub> FAME ที่ 70: 30 กลับมีค่า FAME yield ที่สูงขึ้นกว่าในกรณีการเพิ่มปริมาณ C<sub>10</sub> FAME ซึ่งจากผลการทดลองสอดคล้องกับข้อสันนิษฐานที่ว่า การเพิ่มปริมาณ C<sub>10</sub> FAME ในขั้นตอนการ start-up จะส่งผลให้ FAME yield ที่ได้มีค่าต่ำลงเพราะเกิด dilution effect แต่ FAME yield ที่ได้ยังมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับอัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ C<sub>10</sub> FAME ที่อัตราส่วน 50: 50 กล่าวคือ แม้การลด C<sub>10</sub> FAME จะช่วยลดการเกิดปัญหา dilution effect แต่การมีปริมาณ C<sub>10</sub> FAME ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ที่น้อยเกินไป จะส่งผลให้เกิดความต้านทานระหว่างเมทานอลและน้ำมันปาล์ม FAME yield ที่ได้จึงมีค่าต่ำกว่า จากผลการทดลองดังกล่าว จึงเลือกใช้อัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ C<sub>10</sub> FAME ที่อัตราส่วน 50: 50 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับต้นแบบ เพื่อศึกษาปัจจัยอื่นๆต่อไป

#### 4.2.6 ผลของอัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ C<sub>10</sub> FAME ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ

จากผลการทดลองที่ผ่านมา พบว่าปริมาณของ C<sub>10</sub> FAME ที่มากขึ้นในระบบมีแนวโน้มที่จะส่งผลให้เกิด dilution effect ซึ่งทำให้ FAME yield ที่ได้มีค่าลดลง การทดลองนี้จึงศึกษาการปรับปริมาณอัตราส่วนของสารผสมที่ป้อนเข้าสู่ระบบ โดยทำการศึกษาด้วยกัน 3 ส่วน คือการป้อนน้ำมันปาล์มโดยไม่ผสม C<sub>10</sub> FAME เข้าสู่ระบบ, การป้อนสารผสมของน้ำมันปาล์มและ C<sub>10</sub> FAME ในอัตราส่วน 90: 10 และ การป้อนสารผสมของน้ำมันปาล์มและ C<sub>10</sub> FAME ในอัตราส่วน 70: 30 ภาวะทำปฏิกิริยาอัตราการไหลของน้ำมันปาล์ม 9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของเมทานอล 22 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิในการทดลอง 100 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1300 กรัม และช่วง start-up ใช้อัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ C<sub>10</sub> FAME 50: 50 โดยน้ำหนัก





**รูปที่ 4. 8** ผลของอัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ C10 FAME ที่ป้อนเข้าสู่ระบบในการผลิตไบโอดีเซล และการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ C10 FAME ภาวะปฏิบัติการ: ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1300 กรัม; อัตราการไหลของน้ำมันปาล์ม 9 มิลลิลิตรต่อนาที; อัตราการไหลของเมทานอล 13.4 มิลลิลิตรต่อนาที; อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส; WHSV 0.42 มิลลิลิตร/กรัม-ชั่วโมง (สัญลักษณ์: Δ = น้ำมันปาล์ม, ■ = อัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ C<sub>10</sub> FAME เท่ากับ 90: 10 และ ○ = อัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ C<sub>10</sub> FAME เท่ากับ 70: 30)

**ตารางที่ 4. 3** อัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ C<sub>10</sub> FAME ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ

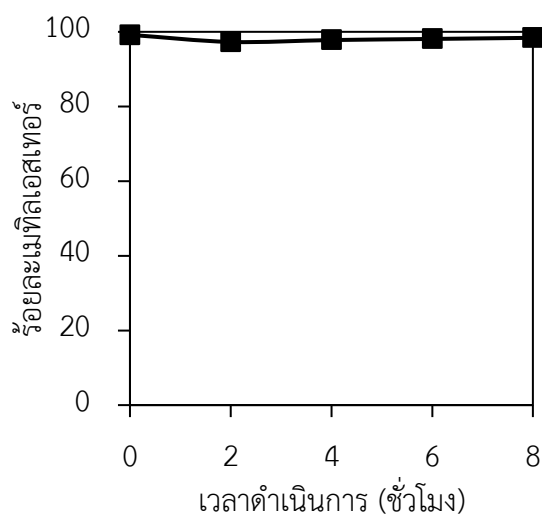
อัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ C <sub>10</sub> FAME	ร้อยละเมทิลเอสเทอร์
น้ำมันปาล์มไม่ผสม	93.4
อัตราส่วน 90: 10	90
อัตราส่วน 70: 30	83.4

รูปที่ 4.8 แสดงผลของอัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ C<sub>10</sub> FAME ที่ป้อนเข้าสู่ระบบในการผลิตไบโอดีเซล พบว่าผลจากการทดลองสอดคล้องกับข้อสันนิษฐานจากการทดลองที่ผ่านมา กล่าวคือ เมื่อเพิ่มปริมาณ C<sub>10</sub> FAME เข้าสู่ระบบ จะเกิด dilution effect โดย C<sub>10</sub> FAME จะไปเจือจางทำให้ลดการสัมผัสกันของสารตั้งต้นบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา อันเนื่องมาจากขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในระบบต้นแบบ มีขนาดใหญ่ ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ ส่งผลให้มีโอกาสที่เมทานอลซึ่งใช้เป็นสารตั้งต้น จะสัมผัสกับ C<sub>10</sub> FAME มากกว่าน้ำมันปาล์ม ทำให้การเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ไม่ดี FAME yield ที่ได้จากรatio ของน้ำมันปาล์มต่อ C<sub>10</sub> FAME ที่ 70: 30

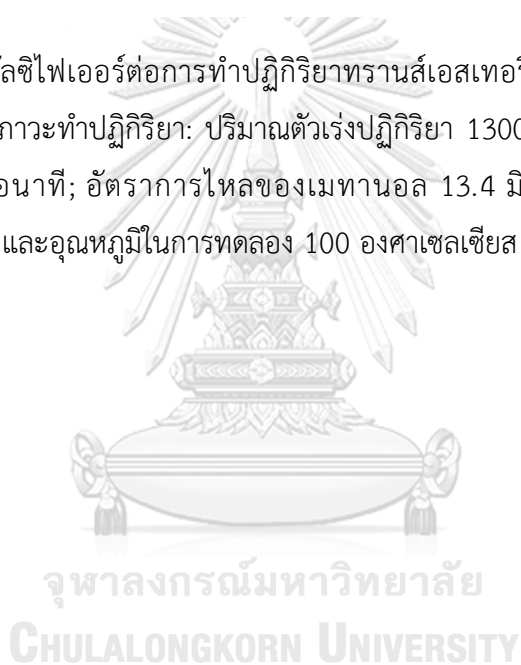
จึงมีร้อยละเมทิลเอสเทอร์ต่ำสุดที่ 83.4% ในชั่วโมงที่ 8 ในขณะที่อัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อ C<sub>10</sub> FAME ที่ 90: 10 จะมีค่าร้อยละเมทิลเอสเทอร์สูงขึ้นที่ 90% ในชั่วโมงที่ 8 และในส่วนของป้อนน้ำมันปาล์มโดยไม่ผสม C<sub>10</sub> เข้าสู่ระบบเลย จะให้ค่าร้อยละเมทิลเอสเทอร์สูงสุด อยู่ที่ 93.4% จากผลการทดลองดังกล่าว จึงเลือกใช้อัตราส่วนของน้ำมันปาล์มโดยไม่ผสม C<sub>10</sub> FAME ในการป้อนเข้าสู่ระบบในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับต้นแบบ เพื่อศึกษาปัจจัยอื่นๆต่อไป

#### 4.2.7 ผลของอิมัลซิไฟเออร์ต่อการทำปฏิกิริยา

จากการทดลองที่ผ่านมา พบว่าปัญหาของการผลิตไบโอดีเซลในระดับต้นแบบ เมื่อเทียบกับการผลิตในระดับห้องปฏิบัติการ มีความแตกต่างในร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่ได้เมื่อเริ่มต้นที่ชั่วโมงที่ 0 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าในระดับห้องปฏิบัติการ เนื่องจากมีข้อจำกัดในเรื่องของขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ซึ่งส่งผลทำให้เกิดช่องว่างระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดการสัมผัสกันน้อยของสารตั้งต้นบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา อีกทั้งยังก่อให้เกิดความดันสูญเสีย (Pressure drop) ซึ่งส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรกเกิดได้มีดี หากพิจารณาให้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ในช่วงเริ่มต้นใกล้เคียงกับในระดับห้องปฏิบัติการ อาจต้องใช้เวลาในการดำเนินการค่อนข้างนาน การทดลองนี้จึงได้ใช้น้ำมัน B100 ซึ่งมีร้อยละเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 100% ลงไปแทน C<sub>10</sub> FAME ในขั้นตอน start-up เพื่อเพิ่มร้อยละเมทิลเอสเทอร์ในช่วงแรก โดยการทดลองจะเติมน้ำมัน B100 ลงไป 1200 กรัม ในขั้นตอน start-up โดยไม่เติม C<sub>10</sub> FAME หรือน้ำมันปาล์มลงไปผสม และทำการป้อนเมทานอลเข้าไปในระบบ เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นจึงจะเริ่มทำการป้อนน้ำมันปาล์มเข้าสู่ระบบ ภาวะทำปฏิกิริยาอัตราการไหลของน้ำมันปาล์ม 9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของเมทานอล 22 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิในการทดลอง 100 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1300 กรัม ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่า ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่ได้เมื่อเริ่มต้น เท่ากับ 99.2% และลดลงเล็กน้อยที่ชั่วโมงที่ 2 เนื่องจากการลดลงของน้ำมัน B100 จากระบบ พร้อมกับการป้อนน้ำมันปาล์มเข้ามาในระบบ และเมื่อผ่านชั่วโมงที่ 2 เป็นต้นไป ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จะคงที่ แม้ว่าน้ำมัน B100 ในระบบจะลดลงก็ตาม เป็นไปตามพฤติกรรมในระบบต้นแบบ ซึ่งเมื่อเวลาดำเนินการผ่านไประยะหนึ่ง ตัวเร่งปฏิกิริยาจะค่อยๆขยับเข้ามาชิดกัน ทำให้การจัดเรียงตัวหนาแน่นขึ้น ช่องว่างระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง การเกิดปฏิกิริยาจึงค่อยๆดีขึ้น และมีเสถียรภาพ โดยร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ในชั่วโมงที่ 8 เท่ากับ 98.4% จากผลการทดลองนี้ สามารถมองได้ว่าการผลิตไบโอดีเซลในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับโรงงานต้นแบบนั้นสามารถผลิตไบโอดีเซลได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีเสถียรภาพ โดยให้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่ 98.4%



**รูปที่ 4. 9** ผลของอิมัลซิไฟเออร์ต่อการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งระดับต้นแบบ ภาวะทำปฏิกิริยา: ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1300 กรัม; อัตราการไหลของน้ำมันปาล์ม 9 มิลลิลิตรต่อนาที; อัตราการไหลของเมทานอล 13.4 มิลลิลิตรต่อนาที; WHSV 0.42 มิลลิลิตร/กรัม-ชั่วโมง และอุณหภูมิในการทดลอง 100 องศาเซลเซียส



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการเตรียมและขึ้นรูปตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดเบสจากโพลีเมตธีลธรรมชาติ สำหรับการผลิตไบโอดีเซล การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา และการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการต่างๆที่ส่งผลต่อการผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งระดับต้นแบบ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพลีเมตธีล สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 โพลีเมตธีลธรรมชาติที่ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์สำหรับการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันในงานวิจัยนี้ สามารถเตรียมได้ง่ายโดยใช้วิธีการผสมเชิงกายภาพ และทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว

5.1.2 C<sub>10</sub> FAME ซึ่งเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์เมื่อนำมาผสมกับน้ำมันปาล์มในช่วง start-up ด้วยเมทานอล สามารถเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างน้ำมันปาล์มและเมทานอล แต่ในระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบต้นแบบ การเพิ่มปริมาณของ C<sub>10</sub> FAME ที่ผสมกับน้ำมันปาล์มก่อนป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ จะส่งผลให้เกิด dilution effect ซึ่งไปเจือจางสารตั้งต้นไตรกลีเซอไรด์ ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ไม่ดี

5.1.3 ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่องโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพลีเมตธีล ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งระดับต้นแบบ คือ อัตราการไหลของเมทานอล 22 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำมันปาล์ม 9 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 100 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1300 กรัม WHSV 0.42 มิลลิลิตร/กรัม-ชั่วโมง อัตราส่วนของน้ำมันปาล์มและ C<sub>10</sub> FAME ในขั้นตอน start-up 50: 50 ระยะเวลาในการ start-up 3 ชั่วโมง และใช้สารป้อนเข้าสู่ระบบเป็นน้ำมันปาล์มที่ไม่ผสม C<sub>10</sub> FAME โดยจะให้เมทิลเอสเทอร์สูงถึงร้อยละ 93.4 โดยน้ำหนัก

5.1.4 การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง จะทำให้เกิดความปั่นป่วนภายในระบบ ทำให้การเกิดปฏิกิริยาเกิดได้ทั่วทั้งเบต ส่งผลให้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์สูงขึ้น

5.1.5 การใช้ B100 เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์แทน C<sub>10</sub> FAME สามารถส่งเสริมให้เกิดการเข้ากันได้อย่างรวดเร็วระหว่างน้ำมันปาล์มและเมทานอลบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยให้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์สูงถึงร้อยละ 98.4%

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การนำโคโลไมต์ธรรมชาติที่ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาในแต่ละครั้ง ควรมาจากแหล่งเดียวกัน เพื่อให้ได้สมบัติของตัวเร่งไม่เปลี่ยนแปลง

5.2.2 น้ำมันปาล์ม ซึ่งใช้เป็นสารตั้งต้นควรใช้ตลอดเดียวกัน เพื่อลดความแตกต่างของคุณภาพ น้ำมัน

5.2.3 สามารถผลิตร้อยละเมทิลเอสเทอร์ได้มาตรฐานตามเกณฑ์ของกรมธุรกิจพลังงาน คือ เมทิลเอสเทอร์สูงกว่าร้อยละ 96.5 โดยน้ำหนัก แต่ยังมีข้อจำกัดในการทำปฏิกิริยา โดยการนำน้ำมัน B100 มาใช้ในการ start-up ซึ่งค่อนข้างสิ้นเปลือง และต้องแก้ไขปรับปรุงระบบให้สามารถผลิตไบโอดีเซลความบริสุทธิ์สูงได้โดยไม่พึ่งพาสารอิมัลซิไฟเออร์

5.2.4 แก้ไขเรื่องการอุดตันภายในเบตของเครื่องปฏิกรณ์เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาดเล็ก เพื่อลดช่องว่างซึ่งเป็นปัญหาสำคัญต่อประสิทธิภาพในการผลิตไบโอดีเซล

5.2.5 เพิ่มระยะเวลาในการผลิตไบโอดีเซลให้นานขึ้น เพื่อดูแลแนวโน้มของร้อยละเมทิลเอสเทอร์ และเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

## บรรณานุกรม

- [1] Arzamendi G, Campo I, Arguinarena E, Sánchez M, Montes M, Gandía L. Synthesis of biodiesel with heterogeneous NaOH/alumina catalysts: comparison with homogeneous NaOH. *Chemical Engineering Journal*. 2007;134(1):123-30
- [2] มีจันทร์ ว. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ธรรมชาติสำหรับทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของน้ำมันพืช. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2550.
- [3] Jindapon W, Jaiyen S, Ngamcharussrivichai C. Seashell-derived mixed compounds of Ca, Zn and Al as active and stable catalysts for the transesterification of palm oil with methanol to biodiesel. *Energy conversion and management*. 2016;122:535-43.
- [4] Jindapon W, Kuchonthara P, Ngamcharussrivichai C. Biodiesel production over Ca, Zn, and Al mixed compounds in fixed-bed reactor: Effects of premixing catalyst extrudates with methanol, oil, and fatty acid methyl esters. *Fuel Processing Technology*. 2016;148:67-75.
- [5] Avhad M, Marchetti J. A review on recent advancement in catalytic materials for biodiesel production. *Renewable Sustainable Energy Reviews*. 2015;50:696-718.
- [6] Boro J, Deka D, Thakur AJ. A review on solid oxide derived from waste shells as catalyst for biodiesel production. *Renewable Sustainable Energy Reviews*. 2012;16(1):904-10.
- [7] Demirbas A. Progress and recent trends in biodiesel fuels. *Energy conversion and management*. 2009;50(1):14-34.
- [8] Ma F, Hanna MA. Biodiesel production: a review. *Bioresource Technology* 70. *Energy conversion and management*. 1999.
- [9] Tan C-H, Ghazali HM, Kuntom A, Tan C-P, Ariffin AA. Extraction and physicochemical properties of low free fatty acid crude palm oil. *Food Chemistry*. 2009;113(2):645-50.
- [10] บุรณสิงห์ ฌ. ผลผลิตทางการเกษตรเพื่อการผลิตไฟฟ้า 2558 Available from: [http://libraly2.parliament.go.th/giventake/content\\_nrcinf/nrc2557-article73.pdf](http://libraly2.parliament.go.th/giventake/content_nrcinf/nrc2557-article73.pdf).

- [11] การแปรรูปปาล์มน้ำมัน [Online]. Available from: <http://www.arda.or.th/kasetinfo/south/palm/used/01-02.php> [18 พฤศจิกายน 2558]
- [12] วิษณีย์ ออมทรัพย์สิน. การแปรรูปปาล์มน้ำมัน. ในกรมวิชาการเกษตร, บรรณาธิการ. ปาล์ม น้ำมัน, 128-146. [Online], [Available from: <http://www.doa.go.th/palmsurat/images/e-book/compressed.pdf>] [2559, กรกฎาคม 27].
- [13] กรมธุรกิจพลังงาน. การศึกษาดูงานเกี่ยวกับการผลิตและผลผลิตจากไบโอดีเซล ตามแผนจัดการความรู้ประจำปีงบประมาณ 2553. Available from: [http://www.doeb.go.th/kmv2/news/cause\\_biodesel.pdf](http://www.doeb.go.th/kmv2/news/cause_biodesel.pdf) [2559, กรกฎาคม 26].
- [14] พิสมัย เจนวนิชปัญญกุล และลลิตา อตันโถ. รอบรู้เรื่องราวไบโอดีเซล. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.), 2549.
- [15] Singh S, Singh D. Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: a review. *Renewable sustainable energy reviews*. 2010;14(1):200-16.
- [16] นคร ทิพยาวงศ์, เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. 2553, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.
- [17] กรมธุรกิจพลังงาน. กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2556 ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 130 ตอนพิเศษ 158 ง, 15-19.
- [18] Ranganathan SV, Narasimhan SL, Muthukumar K. An overview of enzymatic production of biodiesel. *Bioresource technology*. 2008;99(10):3975-81.
- [19] Jindapon W, Ngamcharussrivichai C. Heterogeneously catalyzed transesterification of palm oil with methanol to produce biodiesel over calcined dolomite: The role of magnesium oxide. *Energy conversion and management*. 2018;171:1311-21.
- [20] Afandizadeh S, Foumeny E. Design of packed bed reactors: guides to catalyst shape, size, and loading selection. *Applied thermal engineering*. 2001;21(6):669-82.
- [21] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. พลังงานทดแทน. Available from: <http://www.dede.go.th/>.
- [22] Correia LM, de Sousa Campelo N, Novaes DS, Cavalcante CL, Cecilia JA, Rodríguez-Castellón E, Vieira RS. Characterization and application of dolomite as catalytic precursor for canola and sunflower oils for biodiesel production. *Chemical Engineering Journal*. 2015;269:35-43.

- [23] Geoscience News and Information. Dolomite. [Online], Available from : <http://www.geology.com/rocks/dolomite.shtml> [2559, สิงหาคม 27].
- [24] บริษัท ภัทรกานต์ เทรดิ่ง จำกัด. แร่โดโลไมต์. [Online], Available from : <http://www.pattarakan.com/product.php?id=5> [2559, สิงหาคม 27].
- [25] Yang Z, Xie W. Soybean oil transesterification over zinc oxide modified with alkali earth metals. *Fuel processing technology*. 2007;88(6):631-8.
- [26] Roschat W, Siritanon T, Kaewpuang T, Yoosuk B, Promarak V. Economical and green biodiesel production process using river snail shells-derived heterogeneous catalyst and co-solvent method. *Bioresource technology*. 2016;209:343-50.
- [27] Chen G, Shan R, Shi J, Yan B. Ultrasonic-assisted production of biodiesel from transesterification of palm oil over ostrich eggshell-derived CaO catalysts. *Bioresource technology*. 2014;171:428-32.
- [28] Jaiyen S, Naree T, Ngamcharussrivichai C. Comparative study of natural dolomitic rock and waste mixed seashells as heterogeneous catalysts for the methanolysis of palm oil to biodiesel. *Renewable energy*. 2015;74:433-40.
- [29] Hu S, Wen L, Wang Y, Zheng X, Han H. Gas-liquid countercurrent integration process for continuous biodiesel production using a microporous solid base KF/CaO as catalyst. *Bioresource technology*. 2012;123:413-8.
- [30] Taufiq-Yap Y, Lee H, Yunus R, Juan J. Transesterification of non-edible *Jatropha curcas* oil to biodiesel using binary Ca-Mg mixed oxide catalyst: effect of stoichiometric composition. *Chemical Engineering Journal*. 2011;178:342-7.
- [31] Idem R, Katikaneni S, Bakhshi N. Catalytic conversion of canola oil to fuels and chemicals: roles of catalyst acidity, basicity and shape selectivity on product distribution. *Fuel Processing Technology*. vol. 5, 1988:101 – 125.
- [32] Son SM, Kusakabe K. Transesterification of sunflower oil in a countercurrent trickle-bed reactor packed with a CaO catalyst. *Chemical Engineering Processing: Process Intensification*. 2011;50(7):650-4.
- [33] Ngamcharussrivichai C, Meechan W, Ketcong A, Kangwansaichon K, Butnark S. Preparation of heterogeneous catalysts from limestone for transesterification of vegetable oils—Effects of binder addition. *Journal of Industrial Engineering Chemistry*. 2011;17(3):587-95.



- [34] Ruengyoo S. Continuous production of biodiesel and high-purity glycerol using dolomite catalyst. Master's Thesis. Department of Chemical Technology. Faculty of Science. Chulalongkorn University, 2016.
- [35] Bournay L, Casanave D, Delfort B, Hillion G, Chodorge J. New heterogeneous process for biodiesel production: a way to improve the quality and the value of the crude glycerin produced by biodiesel plants. *Catalysis Today*. 2005;106(1-4):190-2.





## ภาคผนวก ก

## การคำนวณอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลและน้ำมันปาล์ม

ตัวอย่างการคำนวณอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลและน้ำมันปาล์ม

มวลโมเลกุลของน้ำมันปาล์ม	847 กรัมต่อโมล
ความหนาแน่นของน้ำมันปาล์ม	0.9 กรัมต่อมิลลิลิตร

มวลโมเลกุลของเมทานอล	32.04 กรัมต่อโมล
ความหนาแน่นของเมทานอล	0.79 กรัมต่อมิลลิลิตร

อัตราการไหลของเมทานอล 1.34 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลน้ำมันปาล์ม 0.9 มิลลิลิตรต่อนาที

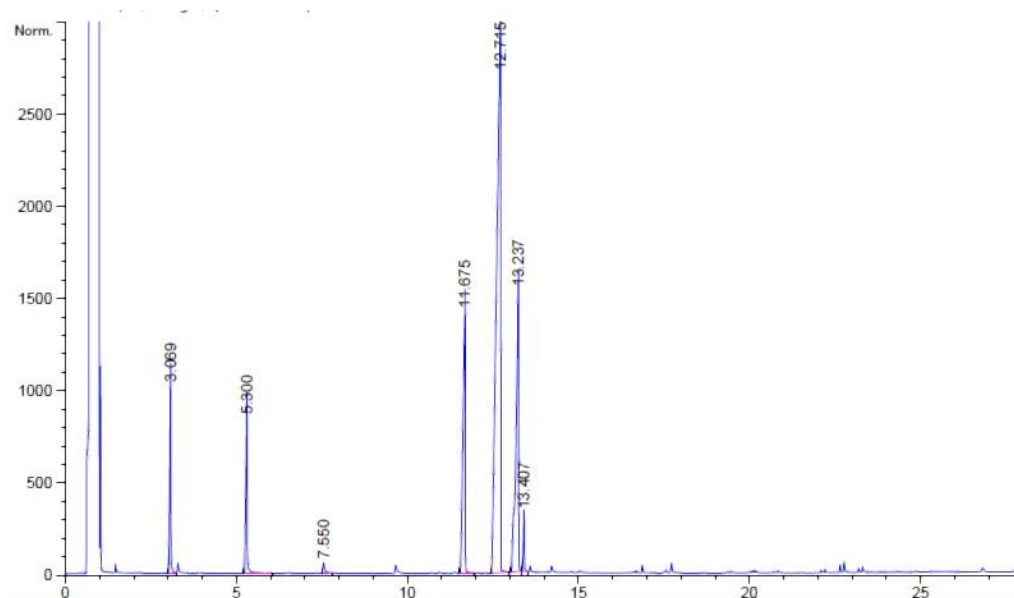
$$\text{โมลของน้ำมันปาล์ม คิดเป็น } \frac{0.9 \times 0.9}{847} = 0.000956 \text{ โมล}$$

$$\text{โมลของเมทานอล คิดเป็น } \frac{1.34 \times 0.79}{32.04} = 0.03304 \text{ โมล}$$

ดังนั้น อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม เท่ากับ 0.03304 : 0.000956

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย หรือ 34.5 : 1  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

**ภาคผนวก ข**  
**การคำนวณปริมาณเมทิลเอสเทอร์**



รูปที่ ข. 1 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการทดลอง

**ข.1 สมการคำนวณปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)**

$$\text{ร้อยละเมทิลเอสเทอร์} = \frac{\text{ผลรวมพื้นที่ของเมทิลเอสเทอร์} \times \text{น้ำหนักสารมาตรฐาน} \times 100}{\text{พื้นที่ของสารมาตรฐาน} \times \text{น้ำหนักสารตัวอย่างที่ปราศจาก C}_{10}\text{FAME}}$$

$$\text{น้ำหนัก C}_{10}\text{ FAME ในสารตัวอย่าง} = \frac{\text{พื้นที่ของ C}_{10}\text{ FAME} \times \text{น้ำหนักสารมาตรฐาน}}{\text{พื้นที่ของสารมาตรฐาน}}$$

$$\text{น้ำหนักสารตัวอย่างที่ปราศจาก C}_{10}\text{ FAME} = \text{น้ำหนักสารตัวอย่าง} - \text{น้ำหนัก C}_{10}\text{ FAME}$$

**ข.2 สมการคำนวณปริมาณ C<sub>10</sub> FAME (ร้อยละโดยน้ำหนัก)**

$$\text{ร้อยละ C}_{10}\text{ FAME} = \frac{\text{พื้นที่ของ C}_{10}\text{ FAME} \times \text{น้ำหนักสารมาตรฐาน} \times 100}{\text{พื้นที่ของสารมาตรฐาน} \times \text{น้ำหนักสารตัวอย่าง}}$$

## ตัวอย่างการคำนวณ

## ตารางที่ ข. 1 ผลการวิเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (GC)

เวลา (นาที)	พื้นที่ใต้กราฟ
3.06	71200
5.3	41721
11.675	361542
12.715	1012720
13.23	393185
13.4	80076

ที่เวลา 3.06 นาที ปรากฏพีคของ C<sub>10</sub>

ที่เวลา 5.3 นาที ปรากฏพีคของ C<sub>12</sub>

ที่เวลา 11.675 นาที ปรากฏพีคของสารมาตรฐาน C<sub>16</sub>

ที่เวลา 12.715 นาที ปรากฏพีคของ (C<sub>17</sub>)

ที่เวลา 13.23 นาที ปรากฏพีคของ C<sub>18:0</sub> , C<sub>18:1</sub>

ที่เวลา 13.4 นาที ปรากฏพีคของ C<sub>18:2</sub>

น้ำหนักของสารตัวอย่าง 0.0447 กรัม

น้ำหนักของสารมาตรฐาน (C<sub>17</sub>) 0.0448 กรัม

$$\text{น้ำหนัก C}_{10} \text{ FAME ในสารตัวอย่าง} = \frac{(71200+41721) \times 0.0448}{1012720} = 0.005$$

น้ำหนักสารตัวอย่างที่ปราศจาก C<sub>10</sub> FAME = 0.0447 – 0.005 = 0.0397 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละเมทิลเอสเทอร์} &= \frac{(361542 + 393185+80076) \times 0.0448 \times 100}{1012720 \times 0.0397} \\ &= 93.02 \end{aligned}$$

$$\text{ร้อยละ C}_{10} \text{ FAME} = \frac{(71200+41721) \times 0.0448 \times 100}{1012720 \times 0.0447} = 11.18$$

### ภาคผนวก ค

#### การคำนวณค่า WHSV

##### การคำนวณค่า WHSV

$$\text{WHSV} = \frac{\text{อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำมันปาล์ม}}{\text{น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา}}$$

##### ตัวอย่างการคำนวณ

กำหนดอัตราการไหลของน้ำมันปาล์ม 0.9 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 130 กรัม

$$\begin{aligned} \text{WHSV} &= \frac{0.9 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที} \times 60 \text{ นาที}}{\text{น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา } 130 \text{ กรัม} \times 1 \text{ ชั่วโมง}} \\ &= 0.42 \text{ มิลลิลิตร/กรัม-ชั่วโมง} \end{aligned}$$

## บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ชนกฤต แจ่มจรัส
วัน เดือน ปี เกิด	17 สิงหาคม 2530
สถานที่เกิด	นครปฐม
วุฒิการศึกษา	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต
ที่อยู่ปัจจุบัน	88/301 หมู่บ้านวราภรณ์ สายไหม เขต สายไหม แขวง สายไหม กรุงเทพฯ 10220
ผลงานตีพิมพ์	งานประชุมวิชาการ The 25th PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers and The 10th Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology” (PPC & PETROMAT Symposium 2019)