

การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าเปลือกหอย  
บนตัวรองรับซิลิกาเถ้าแกลบข้าว



ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน  
มหาวิทยาลัยแม่โจ้  
พ.ศ. 2564

การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าเปลือกหอย  
บนตัวรองรับซีลิกาเถ้าแกลบข้าว



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน  
สำนักบริหารและพัฒนานิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้  
พ.ศ. 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าเปลือกหอย  
บนตัวรองรับซิลิกาเถ้าแกลบข้าว

หญิง ชูศรี

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(อาจารย์ ดร.ภคมน ปินตานา)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รจพรณ นิรัฐศิลป์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชดาภรณ์ ปันทธรส)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ ไชยชนะ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)

รองอธิการบดี ปฏิบัติการแทน

อธิการบดี มหาวิทยาลัยแม่โจ้

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

ชื่อเรื่อง	การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าเปลือกหอย บนตัวรองรับซิลิกาเถ้าแกลบข้าว
ชื่อผู้เขียน	นางสาวหญิง ชุศรี
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	อาจารย์ ดร.ภคมน ปินตานา

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์จากเถ้าเปลือกหอยขม (River Snail Shell Ash: RSSA) ที่มีการใช้วัสดุรองรับจากเถ้าแกลบข้าว (Rice Husk Ash: RHA) โดยในการศึกษาได้ทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาและวัสดุรองรับด้วยการนำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูง 900 °C เป็นเวลา 4 h ก่อนทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ (RSSA/RHA) ด้วยวิธีการเคลือบฝังแบบเปียก (Wet impregnation) ซึ่งมีการศึกษาอัตราการผสมของ RSSA:RHA ที่ 30:70 50:50 และ 70:30 จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ไปใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วที่มีการศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการผลิต ได้แก่ อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1-9:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1-3%wt ระยะเวลาการผลิต 1-2 h ภายใต้การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60-65 °C และมีการกวนผสมอย่างต่อเนื่อง 300-500 rpm ผลจากการวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าหอยขมบนวัสดุรองรับเถ้าแกลบข้าวด้วยเทคนิค XRF และ SEM พบว่าอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA:RHA ที่ 70:30 มีปริมาณ CaO และ SiO<sub>2</sub> สูงถึง 71.96 และ 13.77%wt ตามลำดับ และมีอนุภาคที่มีพื้นผิวขรุขระ ขนาดเล็กในระดับไมครอน มีหลากหลายรูปร่าง เช่น แบบทรงกลม หรือมีบางส่วนเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน ซึ่งเมื่อนำไปผลิตไบโอดีเซลสามารถทำให้เกิดผลผลิตสูงถึง 94.16%wt ที่อัตราส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt และระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 2 h โดยไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีค่าคุณสมบัติอยู่ในช่วงมาตรฐานตามกรมธุรกิจพลังงานกำหนด ได้แก่ ค่า pH เท่ากับ 7, ค่าความเป็นกรด 0.365 mg KOH/g oil, ความหนาแน่น 880 kg/m<sup>3</sup>, ความหนืด 4.759 cSt, จุดวาบไฟ 176 °C, จุดติดไฟ 186 °C, จุดชุ่น 10 °C และจุดไหลเท 7 °C จากนั้นเมื่อทำการขยายการผลิตไปสู่ระดับเครื่องต้นแบบและนำไปโอดีเซลที่ได้ไปทดสอบการใช้งานในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กด้วยความเร็วรอบเครื่องยนต์ 900-2,200 rpm พบว่าค่าแรงบิด กำลังเบรก อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และประสิทธิภาพความร้อนเบรกที่เกิดขึ้น มีค่า 0.903-1.523 kg/h, 9.72-13.84 Nm, 0.854-2.781 kW, 0.46-1.30 kg/kWh, 18.95-53.28

MJ/kWh และ 6.76-19.00% ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มสัมพันธ์กับรอบของเครื่องยนต์เป็นไปในลักษณะเดียวกับการใช้ไบโอดีเซลลูกผสมและน้ำมันดีเซลฐานที่มีขายตามท้องตลาด เนื่องจากน้ำมันที่ผลิตได้มีค่าความร้อนสูง 41.09 MJ/kg และจากการวิเคราะห์ค่าทางเศรษฐศาสตร์พบว่าไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางธรรมชาติ 70%wt RSSA/RHA มีต้นทุนการผลิตเท่ากับ 25.99 Baht/L ซึ่งถือเป็นต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลในระดับต่ำ จึงเห็นได้ว่าการผลิตไบโอดีเซลจากการใช้วัสดุทางธรรมชาติที่สังเคราะห์ขึ้นได้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถลดต้นทุนการผลิต อีกทั้งยังลดการใช้สารเคมีและลดการก่อเกิดน้ำเสียในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลได้อีกด้วย

คำสำคัญ : ไบโอดีเซล, น้ำมันใช้แล้ว, ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์, ตัวเร่งปฏิกิริยาบดตัวรองรับ



<b>Title</b>	BIODIESEL PRODUCTION BY USING SHELL ASH CATALYST ON SUPPORTED SILICA FROM RICE HUSK ASH
<b>Author</b>	Miss Ying Chusree
<b>Degree</b>	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
<b>Advisory Committee Chairperson</b>	Dr. Pakamon Pintana

### ABSTRACT

This research aimed to synthesize natural heterogeneous catalysts from river snail shell ash (RSSA) loaded on supporting material from rice husk ash (RHA). RSSA and RHA were prepared by calcination process at 900 °C for 4 h and formed to the supported catalysts (RSSA/RHA) using wet impregnation method with different mixing ratios of RSSA:RHA at 30:70 50:50 and 70:30. After that, the catalysts were used in biodiesel production from used vegetable oil that carried out on a laboratory-scale with the concentration of catalysts at 1-3%wt, methanol to oil molar ratio at 3:1-9:1, reaction time for 1-2 h under the same reaction temperature at 60-65 °C and continuous mixing at 300-500 rpm. The results from chemical and physical properties analysis of the catalyst which impregnated on the supporting material by using XRF and SEM techniques showed that RSSA: RHA at 70:30 had the high composition of CaO and SiO<sub>2</sub> at 71.96 and 13.77%wt, respectively. Moreover, the morphology analysis results showed that their rough surface particles were small at micron level and had various particle shapes such as spheres. Some of the particles were aggregated together. In the part of biodiesel production, the results indicated that using 70%wt RSSA/RHA at the proper conditions that consisted of MeOH/Oil molar ratio at 3:1, 1%wt of catalyst concentration, and 2 h of reaction time could give a high biodiesel yield at 94.16%wt with good properties (pH at 7, 0.365 mg KOH/g oil of acid value, 880 kg/m<sup>3</sup> of density, viscosity at 4.759 cSt, 176 °C of flash point, 186 °C of fire point, 10 °C of cloud point and pour point at 7 °C) which

were qualified according to Thailand's biodiesel quality standard that issued by the Department of Energy Business, Ministry of Energy, Thailand. After the pilot scale, the obtained biodiesel was tested with a small diesel engine. The results exhibited that the engine performances comprised with torque, brake power, fuel consumption, specific fuel consumption, and specific energy consumption when using the biodiesel, had values in the range of 0.903-1.523 kg/h, 9.72-13.84 Nm, 0.854-2.781 kW, 0.46-1.30 kg/kWh, 18.95-53.28 MJ/kWh and 6.76-19.00%, respectively. These results showed that it had the same trends with hybrid biodiesels and commercial hybrid diesel fuels since the fuel had a high combustion value at 41.09 MJ/kg. Finally, from the economic analysis, the production cost of the biodiesel produced by using 70%wt RSSA/RHA as catalyst had a low price at 21.28 Baht/L. Therefore, this catalyst type from the natural source could effectively support a low-cost biodiesel producing process.

Keywords : Biodiesel, Used cooking oil, Heterogeneous catalyst, Supported catalyst

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับการสนับสนุน ความช่วยเหลือ การชี้แนะแนวทาง และความร่วมมือเป็นอย่างดีจากบุคคลหลายท่าน ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. ภคมน ปินตานา อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก พร้อมทั้ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รจพรรณ นิรัฐศิลป์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัชดาภรณ์ ปันทะรส อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ การชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหา ตลอดจนกำลังใจในการดำเนินงานวิจัยจนแล้วเสร็จเสมอมา พร้อมทั้งความกรุณาในการช่วยตรวจทานและแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. หทัยทิพย์ สินธูยา ประธานกรรมการสอบ ที่ให้คำปรึกษา ชี้แนะ และตรวจทานความถูกต้องและความสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้วิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ตลอดจนบุคคลากรจากทั้งวิทยาลัยพลังงานทดแทนและบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้ความร่วมมือและช่วยเหลือผู้วิจัยในด้านเอกสารและการดำเนินการต่าง ๆ มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ และสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ในการก่อเกิดความรู้และการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณทุนสนับสนุน “โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปีการศึกษา 2560” จากวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ “โครงการพัฒนาหน่วยวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาเพื่อการสร้างนวัตกรรมด้านการเกษตร ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561” จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้ รวมไปถึงขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนการทำวิจัย “ทุนพัฒนาเส้นทางอาชีพนักวิจัยและนวัตกรรม ประเภททุนพัฒนาบัณฑิตศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2563” จากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่มอบทุนสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยในการศึกษาครั้งนี้

ขอขอบพระคุณครอบครัวจากทางบ้าน ครอบครัวจากทางแม่บ้าน พี่น้อง และบุคคลอันเป็นที่รักทั้งหลาย ตลอดจนทุกท่านที่มีส่วนในการช่วยเหลือ ผลักดัน โอบอุ้ม และให้กำลังใจเสมอมา จึงทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์และมีคุณค่าทางใจแก่ผู้วิจัยเป็นที่สุด

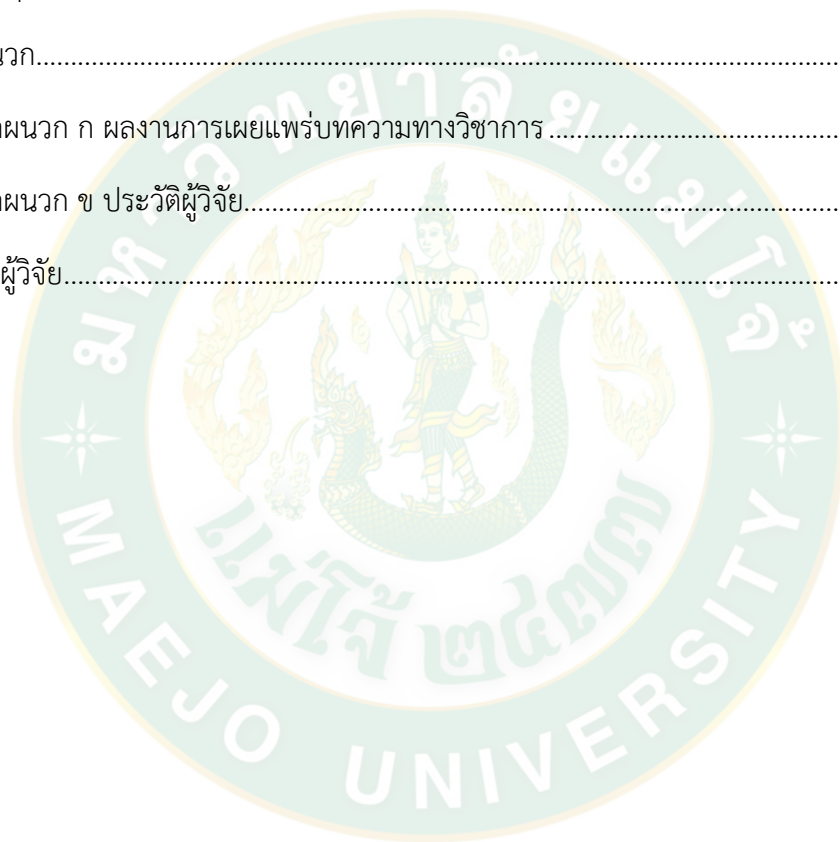
## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ .....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
ที่มาและความสำคัญ .....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	4
ขอบเขตการศึกษา .....	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	5
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี .....	6
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
1. นิยามของไบโอดีเซล.....	6
2. เทคนิคการผลิตไบโอดีเซล .....	6
3. ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน .....	8
4. วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	10
5. ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน .....	13
6. ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าเปลือกหอย .....	15
7. วัสดุรองรับจากเถ้าแกลบข้าว .....	17
8. เทคนิคการเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	18

9. เทคนิคการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนวัสดุรองรับ.....	20
10. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับด้วยเทคนิคการเคลือบฝังแบบเปียก.....	23
11. กลไกการผลิตไบโอดีเซลที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทต่าง ๆ.....	24
12. ประโยชน์ของไบโอดีเซล.....	30
13. มาตรฐานคุณสมบัติของไบโอดีเซล.....	32
14. การทดสอบการใช้งานไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซล.....	34
15. การวิเคราะห์ค่าทางเศรษฐศาสตร์.....	37
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	40
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	50
ภาพรวมการวิจัย.....	50
การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาและการวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติ.....	52
1. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเอ้าลอยคม.....	52
2. การเตรียมวัสดุรองรับเอ้ากลบข้าว.....	53
3. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเอ้าลอยคมบนตัวรองรับเอ้ากลบข้าว.....	54
การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์.....	55
1. การผลิตไบโอดีเซลในระดับห้องปฏิบัติการ.....	56
2. การผลิตไบโอดีเซลในระดับเครื่องต้นแบบ.....	58
การวัดค่าคุณสมบัติของเชื้อเพลิง.....	59
การทดสอบการใช้งานไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก.....	59
บทที่ 4 ผลและการอภิปรายผลการทดลอง.....	62
ผลและวิเคราะห์ผลคุณสมบัติของน้ำมันวัตถุดิบ.....	62
ผลและวิเคราะห์ผลคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาและวัสดุรองรับ.....	63
1. ตัวเร่งปฏิกิริยาเอ้าลอยคม (RSSA).....	63
2. วัสดุรองรับเอ้ากลบข้าว (RHA).....	67

3. ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าหอยขมบนตัวรองรับเถ้าแกลบข้าว (RSSA/RHA) .....	72
ผลและวิเคราะห์ผลด้านร้อยละผลผลิตไบโอดีเซล .....	76
1. การใช้ปริมาณเมทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA และ RSSA/RHA ที่แตกต่างกัน .....	77
2. การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA/RHA ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่างกัน .....	81
3. การเปรียบเทียบการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA และ 70%wt RSSA/RHA .....	82
4. การใช้ 70%wt RSSA/RHA ในการผลิตที่มีระยะเวลาแตกต่างกัน .....	84
ผลและวิเคราะห์ผลคุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ .....	85
1. ค่าพีเอชของไบโอดีเซล .....	86
2. ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซล .....	87
3. ค่าความหนาแน่นของไบโอดีเซล .....	88
4. ค่าความหนืดของไบโอดีเซล .....	90
5. ค่าจุดวาบไฟและจุดติดไฟของไบโอดีเซล .....	92
6. ค่าจุดขุ่นและจุดไหลเทของไบโอดีเซล .....	94
7. สรุปปัจจัยการผลิตที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล .....	97
ผลและวิเคราะห์ผลการผลิตไบโอดีเซลในเครื่องต้นแบบ .....	98
ผลและวิเคราะห์ผลการใช้งานน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก .....	99
1. คุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบ .....	99
2. ค่าสมรรถนะเครื่องยนต์ด้านอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง .....	101
3. ค่าสมรรถนะเครื่องยนต์ด้านแรงบิด .....	102
4. ค่าสมรรถนะเครื่องยนต์ด้านกำลังเบรค .....	103
5. ค่าสมรรถนะเครื่องยนต์ด้านอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ .....	103
6. ค่าสมรรถนะเครื่องยนต์ด้านอัตราสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ .....	105
7. ค่าสมรรถนะเครื่องยนต์ด้านประสิทธิภาพความร้อนเบรค .....	106
ผลและวิเคราะห์ผลด้านเศรษฐศาสตร์ .....	107

1. การวิเคราะห์ต้นทุนผันแปรการผลิตไปโอดีเซล.....	107
2. การวิเคราะห์ต้นทุนคงที่การผลิตไปโอดีเซล.....	111
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	113
สรุปผลงานวิจัย.....	113
ข้อเสนอแนะ.....	114
บรรณานุกรม.....	116
ภาคผนวก.....	125
ภาคผนวก ก ผลงานการเผยแพร่บทความทางวิชาการ.....	126
ภาคผนวก ข ประวัติผู้วิจัย.....	135
ประวัติผู้วิจัย.....	136



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 เป้าหมายการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพในปี พ.ศ. 2579 .....	2
ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของถั่วเปลือกหอย.....	16
ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของถั่วแกลบข้าว.....	18
ตารางที่ 4 มาตรฐานไบโอดีเซล ASTM D-6751 และ EN 14214.....	32
ตารางที่ 5 ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2556 ...	33
ตารางที่ 6 รายละเอียดคุณสมบัติของเครื่องยนต์ดีเซล All Power รุ่น 186F/E .....	61
ตารางที่ 7 สมบัติของน้ำมันปาล์มโอเลอินที่ไม่ผ่านและผ่านการทอดมันฝรั่ง .....	62
ตารางที่ 8 องค์ประกอบของหอยขมที่ยังไม่ผ่านและผ่านการแคลไชน์ที่ 900 °C.....	66
ตารางที่ 9 ร้อยละสารประกอบของถั่วแกลบข้าว .....	71
ตารางที่ 10 ร้อยละสารประกอบของถั่วหอยขมบนตัวรองรับถั่วแกลบข้าว .....	76
ตารางที่ 11 สรุปปัจจัยการผลิตที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล .....	97
ตารางที่ 12 ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้และไบโอดีเซลที่ผลิตได้ .....	98
ตารางที่ 13 คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ในเครื่องต้น.....	98
ตารางที่ 14 รายละเอียดน้ำมันที่ใช้ทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ .....	99
ตารางที่ 15 ค่าคุณสมบัติน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบ .....	100
ตารางที่ 16 รายละเอียดต้นทุนผันแปรการผลิตไบโอดีเซล .....	110
ตารางที่ 17 รายละเอียดต้นทุนคงที่การผลิตไบโอดีเซล .....	111

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 ปริมาณการใช้พลังงานขั้นต้นในปี พ.ศ. 2556-2560.....	1
ภาพที่ 2 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล .....	6
ภาพที่ 3 การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดอินทรีย์ในน้ำมันวัตถุดิบ.....	7
ภาพที่ 4 การเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันวัตถุดิบ .....	8
ภาพที่ 5 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	9
ภาพที่ 6 ภาพรวมการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	9
ภาพที่ 7 การเกิดปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันหรือปฏิกิริยาการเกิดสบู่.....	10
ภาพที่ 8 วิธีการเพิ่มพื้นที่ผิวโลหะหรือออกไซด์ของโลหะต่อหน่วยน้ำหนัก.....	19
ภาพที่ 9 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ .....	24
ภาพที่ 10 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจากการใช้ NaOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	25
ภาพที่ 11 โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์.....	26
ภาพที่ 12 กลไกแสดงการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์.....	26
ภาพที่ 13 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์.....	27
ภาพที่ 14 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจากการใช้ CaO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	28
ภาพที่ 15 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจาก CaO ของตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ.....	29
ภาพที่ 16 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันจาก SiO <sub>2</sub> ของตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ .....	29
ภาพที่ 17 วงจร CO <sub>2</sub> อย่างง่ายของไบโอดีเซลและเชื้อเพลิงฟอสซิลในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน.....	31
ภาพที่ 18 แผนผังการดำเนินงานวิจัย .....	51
ภาพที่ 19 เปลือกหอยขมที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว .....	52
ภาพที่ 20 ลักษณะของเถ้าหอยขมที่ผ่านการแคลไซน์ .....	53

ภาพที่ 21 การนำแกลบข้าวมาเผาด้วยเตาชีวมวลความร้อนสูง .....	53
ภาพที่ 22 แถ้แกลบข้าวที่ได้จากการแคลไซน์ .....	54
ภาพที่ 23 สารจากการเคลือบฝังแบบเปียก .....	54
ภาพที่ 24 สารผสมระหว่าง RSSA และ RHA ที่ผ่านการอบไล่ความชื้น .....	55
ภาพที่ 25 แถ้หอยขมบนตัวรองรับแถ้แกลบข้าวที่ผ่านการแคลไซน์แล้ว .....	55
ภาพที่ 26 การผลิตไบโอดีเซลในระดับห้องปฏิบัติการ .....	56
ภาพที่ 27 การแยกชั้นของสารที่ได้จากการทำปฏิกิริยา.....	57
ภาพที่ 28 ลักษณะของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้.....	57
ภาพที่ 29 เครื่องต้นแบบการผลิตไบโอดีเซลที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ .....	58
ภาพที่ 30 ชุดทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์.....	60
ภาพที่ 31 เครื่องยนต์ดีเซลการเกษตรรอกเนกประสงค์ยี่ห้อ All Power รุ่น 186F/E.....	60
ภาพที่ 32 น้ำมันใช้แล้วจากการทอดมันฝรั่งของกลุ่มเกษตรกรเจดีย์แม่ครัว.....	62
ภาพที่ 33 ลักษณะหอยขมที่ยังไม่ผ่านและผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 °C .....	64
ภาพที่ 34 ลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยาของหอยขมที่ยังไม่ผ่านการแคลไซน์.....	64
ภาพที่ 35 ลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยาของหอยขมที่ผ่านการแคลไซน์ 900 °C แล้ว.....	65
ภาพที่ 36 ลักษณะแกลบข้าวและแถ้แกลบข้าว .....	67
ภาพที่ 37 ลักษณะแถ้แกลบข้าวที่ไม่ผ่านและผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700-900 °C.....	67
ภาพที่ 38 ลักษณะโครงสร้างของแถ้แกลบข้าวที่ถูกเผาด้วยเตาชีวมวลความร้อนสูง .....	68
ภาพที่ 39 ลักษณะโครงสร้างของแถ้แกลบข้าวที่ไม่ผ่านและผ่านการแคลไซน์ที่ 900 °C.....	69
ภาพที่ 40 ลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยาของแถ้แกลบข้าวที่แคลไซน์ด้วยอุณหภูมิต่างกัน .....	70
ภาพที่ 41 ลักษณะภายนอกของแถ้ต่าง ๆ.....	72
ภาพที่ 42 ลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยาของแถ้ต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 5,000x.....	73
ภาพที่ 43 ลักษณะโครงสร้าง 50%wt RSSA/RHA ที่ไม่มีและมีการแคลไซน์หลังการเตรียมสาร .....	74
ภาพที่ 44 ลักษณะของ RSSA/RHA ที่อัตราส่วนความเข้มข้นของ RSSA:RHA ต่างกัน .....	74

ภาพที่ 45	โครงสร้างสัณฐานวิทยาของ RSSA/RHA ที่ความเข้มข้นของ RSSA:RHA ต่างกัน.....	75
ภาพที่ 46	ผลผลิตไบโอดีเซลกับอัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมันที่แตกต่างกัน.....	78
ภาพที่ 47	ผลผลิตไบโอดีเซลกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน.....	80
ภาพที่ 48	ผลผลิตไบโอดีเซลที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA/RHA ความเข้มข้นต่างกัน.....	81
ภาพที่ 49	ความสัมพันธ์ของผลผลิตกับชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณการใช้ 1%wt.....	82
ภาพที่ 50	ผลผลิตไบโอดีเซลกับชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการใช้อัตราส่วนโมลเมทานอล 3:1.....	83
ภาพที่ 51	ผลผลิตไบโอดีเซลที่มีการใช้ระยะเวลาและอัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมันแตกต่างกัน.....	84
ภาพที่ 52	ผลผลิตไบโอดีเซลที่มีการใช้ระยะเวลาและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแตกต่างกัน.....	85
ภาพที่ 53	ค่า pH ของไบโอดีเซลที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกัน.....	86
ภาพที่ 54	ค่า pH ของไบโอดีเซลจากการใช้ 70%wt RSSA/RHA ระยะเวลาต่างกัน.....	87
ภาพที่ 55	ความเป็นกรดของไบโอดีเซลที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกัน.....	88
ภาพที่ 56	ความเป็นกรดของไบโอดีเซลจากการใช้ 70%wt RSSA/RHA ที่ระยะเวลาต่างกัน.....	88
ภาพที่ 57	ความหนาแน่นของไบโอดีเซลจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกัน.....	89
ภาพที่ 58	ความหนาแน่นของไบโอดีเซลที่ใช้ 70%wt RSSA/RHA ในเวลาทำปฏิกิริยาต่างกัน.....	90
ภาพที่ 59	ความหนืดของไบโอดีเซลจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกัน.....	91
ภาพที่ 60	ความหนืดของไบโอดีเซลจากการใช้ 70%wt RSSA/RHA ที่เวลาทำปฏิกิริยาต่างกัน.....	92
ภาพที่ 61	จุดวาบไฟของไบโอดีเซลจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกัน.....	93
ภาพที่ 62	จุดวาบไฟของไบโอดีเซลจากการใช้ 70%wt RSSA/RHA ที่เวลาทำปฏิกิริยาต่างกัน.....	93
ภาพที่ 63	จุดติดไฟของไบโอดีเซลจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกัน.....	94
ภาพที่ 64	จุดติดไฟของไบโอดีเซลจากการใช้ 70%wt RSSA/RHA ที่เวลาทำปฏิกิริยาต่างกัน.....	94
ภาพที่ 65	จุดขุ่นของไบโอดีเซลจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกัน.....	95
ภาพที่ 66	จุดไหลเทของไบโอดีเซลจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกัน.....	96
ภาพที่ 67	จุดขุ่นของไบโอดีเซลจากการใช้ 70%wt RSSA/RHA ที่เวลาการทำปฏิกิริยาต่างกัน.....	96
ภาพที่ 68	จุดไหลเทของไบโอดีเซลจากการใช้ 70%wt RSSA/RHA ที่เวลาการทำปฏิกิริยาต่างกัน.....	97

ภาพที่ 69 น้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ ..... 100

ภาพที่ 70 ความสัมพันธ์ของอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและความเร็วรอบ..... 101

ภาพที่ 71 ความสัมพันธ์ของแรงบิดและความเร็วรอบ ..... 102

ภาพที่ 72 ความสัมพันธ์ของกำลังเบรกและความเร็วรอบ ..... 103

ภาพที่ 73 ความสัมพันธ์ของอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะและความเร็วรอบ..... 104

ภาพที่ 74 ความสัมพันธ์ของอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและความเร็วรอบ ..... 105

ภาพที่ 75 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพความร้อนเบรกและความเร็วรอบ..... 106

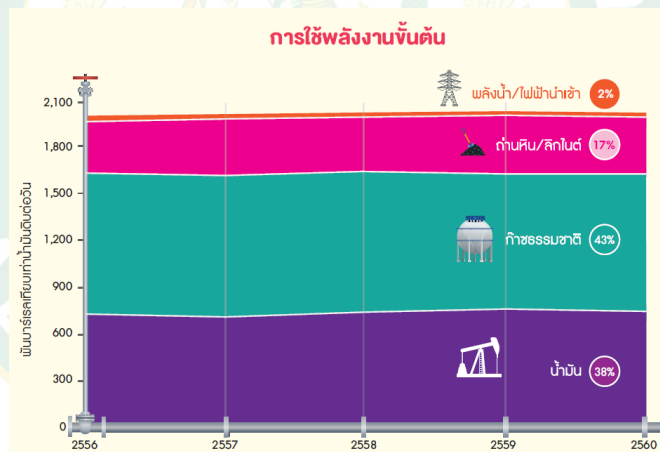


# บทที่ 1

## บทนำ

### ที่มาและความสำคัญ

การบริโภคพลังงานทั่วโลกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปี เนื่องจากประชากรมีจำนวนมากขึ้น โดยในปี พ.ศ. 2560 ประเทศไทยมีการบริโภคพลังงานมากกว่าปี พ.ศ. 2559 อยู่ 1.1% ส่วนใหญ่เป็นพลังงานในรูปของก๊าซธรรมชาติ 43% รองลงมาคือน้ำมัน 38% และอื่น ๆ อีก 19% (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2561) ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยพลังงานเหล่านี้ผลิตหรือสังเคราะห์มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่เป็นแหล่งพลังงานใช้แล้วหมดไปเป็นส่วนใหญ่ จึงก่อให้เกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ โดยเฉพาะการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ที่ก่อให้เกิดปัญหาภาวะเรือนกระจกหรือภาวะโลกร้อน (Greenhouse effect)



ภาพที่ 1 ปริมาณการใช้พลังงานขั้นต้นในปี พ.ศ. 2556-2560

ที่มา: (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2561)

เมื่อพิจารณาเพิ่มเติมในส่วน of ข้อมูลสถิติการใช้พลังงานในปี พ.ศ. 2560 พบว่าภาคอุตสาหกรรม ภาคขนส่ง และภาคเศรษฐกิจอื่น ๆ มีการปล่อย CO<sub>2</sub> เพิ่มขึ้นจากปีก่อน ซึ่งน้ำมันสำเร็จรูปก่อให้เกิดการปล่อย CO<sub>2</sub> มากที่สุด 39% ของทุกภาคส่วน (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2561) รวมไปถึงเมื่อทำการวิเคราะห์ในด้านมูลค่าการใช้พลังงานของปี พ.ศ. 2560 พบว่ามี

ค่าเพิ่มขึ้นจากปีก่อน 6.7% ซึ่งเป็นมูลค่าการใช้น้ำมันสำเร็จรูปมากถึง 58% โดยจัดเป็นการใช้น้ำมันดีเซล 50% ของมูลค่าการใช้้ำมันสำเร็จรูปทั้งหมด เนื่องจากมีปริมาณการนำเข้าสูงกว่าการส่งออก เมื่อคิดเปรียบเทียบสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นจะพบว่ามีการนำเข้าสูงกว่าปีก่อน 12% (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2561) ภาครัฐจึงได้จัดทำแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (Alternative Energy Development Plan 2015: AEDP2015) ในช่วงปี พ.ศ. 2558-2579 เพื่อตอบสนองต่อปริมาณความต้องการพลังงาน เพิ่มสัดส่วนพลังงานหมุนเวียนภายในประเทศ และพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชน รวมไปถึงการคำนึงถึงต้นทุนพลังงานที่มีความเหมาะสมและไม่เป็นอุปสรรคต่อการพัฒนาทางเศรษฐกิจและสังคมของประเทศไทยในระยะยาว

การใช้พลังงานทดแทนที่มีการส่งเสริมและพัฒนาจากภาครัฐ ส่วนใหญ่ถูกใช้งานในรูปของพลังงานความร้อนมากที่สุด 60% ของการใช้พลังงานทดแทนทั้งหมด รองลงมา คือ เชื้อเพลิงชีวภาพและไฟฟ้า (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2558) ในที่นี้จึงขอกกล่าวถึงในด้านของเชื้อเพลิงชีวภาพ เนื่องจากต้องการตอบสนองต่อการแก้ปัญหาความต้องการการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของประเทศไทย ไม่ว่าจะเป็นด้านการเพิ่มการผลิตภายในประเทศซึ่งมาจากแหล่งพลังงานที่ยั่งยืน พร้อมทั้งลดการก่อกมลภาวะ และสรรหาแนวทางการลดต้นทุนการผลิต ซึ่งจากที่ได้กล่าวไปจะพบว่าน้ำมันดีเซลมีมูลค่าพลังงานสูงสุดในหมวดพลังงานจากน้ำมันสำเร็จรูปและก่อให้เกิดการปล่อย CO<sub>2</sub> สูง จึงมีความจำเป็นที่จะต้องจัดหาเชื้อเพลิงชนิดอื่นที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมาใช้ทดแทน ซึ่งพบว่าหากการผลิตไบโอดีเซล (Biodiesel) มีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้การใช้น้ำมันดิบมีปริมาณลดลง โดยจากการศึกษาพบว่าการใช้ไบโอดีเซลในประเทศไทยมีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในปี พ.ศ. 2554 เนื่องจากมีการเพิ่มสัดส่วนการผสมไบโอดีเซลในน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วน 3% และ 5% และในปี พ.ศ. 2557 ได้เพิ่มสัดส่วนเป็น 7% (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2558) จนในที่สุดได้มีการตั้งเป้าหมายให้มีการผลิตไบโอดีเซลในปี พ.ศ. 2579 ปริมาณ 14x10<sup>6</sup> L/d ดังแสดงในตารางที่ 1

**ตารางที่ 1** เป้าหมายการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพในปี พ.ศ. 2579

ประเภทเชื้อเพลิง	สถานภาพ ณ สิ้นปี 2557		เป้าหมาย 2579	
	x10 <sup>6</sup> L/d	ktoe	x10 <sup>6</sup> L/d	ktoe
1. ไบโอดีเซล	2.89	909.28	14.00	4,404.82
2. เอทานอล	3.21	872.88	11.30	2,103.50
3. น้ำมันไพโรไลซิส			0.53	170.87
4. ก๊าซไบโอมีเทนอัด (Ton/d)			4,800.00	2,023.24
5. เชื้อเพลิงทางเลือกอื่น*				10.00

ประเภทเชื้อเพลิง	สถานภาพ ณ สิ้นปี 2557		เป้าหมาย 2579	
	x10 <sup>6</sup> L/d	ktoe	x10 <sup>6</sup> L/d	ktoe
รวม (ktoe)		1,782.16		8,712.43
ความต้องการเชื้อเพลิงในภาคขนส่งทั้งประเทศ		26,801.00		34,798.00
สัดส่วนผลิตเชื้อเพลิงพลังงานทดแทน ภาคขนส่ง (%)		6.65		25.04

หมายเหตุ: \*อาทิ Bio-oil, ไฮโดรเจน เป็นต้น

ที่มา: (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2558)

ไบโอดีเซลเป็นผลผลิตประเภทเอสเทอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) ของไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ที่มีการทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ และมีตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยลดระยะเวลาในการผลิต โดยแอลกอฮอล์ที่นิยมใช้จะเป็นเมทิลแอลกอฮอล์หรือเมทานอล (Methyl alcohol/Methanol) เนื่องจากมีราคาต่ำกว่าเอทิลแอลกอฮอล์หรือเอทานอล (Ethyl alcohol/Ethanol) และไม่คาบเกี่ยวกับส่วนแอลกอฮอล์ที่ใช้บริโภค ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst) ชนิดเบสไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซลสูงและให้ผลผลิตในปริมาณมาก แต่อย่างไรก็ตามการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนี้ยังประสบปัญหาด้านการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง เช่น การเกิดสบู่หรือปฏิกิริยาสะปอนิฟิเคชัน (Saponification) ในกระบวนการผลิต อีกทั้งยังประสบปัญหาด้านการสะสมตัวของสารในผลิตภัณฑ์ที่ได้ จึงต้องมีการใช้น้ำอุ่นหรือน้ำสะอาดล้างกำจัดเพื่อให้ได้ไบโอดีเซลที่มีความบริสุทธิ์มากขึ้น ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านต้นทุนและปัญหาการก่อเกิดน้ำเสียในกระบวนการผลิต ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาอื่น ๆ เกิดขึ้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ซึ่งจากการศึกษาบทความวิจัยหลายเรื่องพบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalyst) สามารถแก้ไขปัญหานี้ได้ เพราะตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ไม่สามารถละลายผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์สามารถแยกออกจากผลผลิตได้ง่าย ไม่ต้องใช้น้ำอุ่นล้างจึงไม่ก่อให้เกิดน้ำเสีย ลดต้นทุนการผลิต และยังสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยานี้ไปใช้ซ้ำได้อีกด้วย (Guan-Yi et al., 2015)

ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เพราะมีอายุการเก็บรักษานาน มีความเป็นด่างสูง มีสภาวะการทำปฏิกิริยาปานกลาง และมีราคาต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ชนิดเบส และเมื่อทำการเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ชนิดกรดพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้มีข้อดีมากกว่า เนื่องจากให้อัตราการ

เกิดปฏิกิริยาสูงกว่า และใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่ำกว่า (Gumba et al., 2016) มากไปกว่านั้น ยังพบว่า CaO สามารถสังเคราะห์ได้จากวัสดุธรรมชาติหรือวัสดุเหลือทิ้ง เช่น เปลือกไข่ เปลือกหอย และเถ้าไม้ต่าง ๆ หรือกระดูกสัตว์มาใช้งาน แต่การใช้ CaO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล ยังประสบปัญหาหรือมีข้อจำกัดด้านพื้นที่ผิว อีกทั้ง CaO บริสุทธิ์จะกลายเป็นเจลได้ง่ายเมื่อถูกผสม เข้ากับเมทานอล ส่งผลต่อการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา จึงเกิดการแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีการใช้ตัว รองรับเข้ามาช่วยเพิ่มความเสถียรและประสิทธิภาพในการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา CaO (Thiangtrong, 2015) โดยการใช้ซิลิกอนไดออกไซด์หรือที่รู้จักกันโดยทั่วไปในชื่อของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นวัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดี ไม่ว่าจะเป็น เป็นเสถียรภาพทางความร้อน การมีพื้นที่ผิวสูง และโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่ที่เป็นเอกลักษณ์ จึงทำให้มี การศึกษาการผลิตตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ  $\text{SiO}_2$  เป็นจำนวนมาก (Lani et al., 2017) โดยใน งานวิจัยของ Lani et al. (2017) มีการศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ลูกผสม (Hybrid heterogeneous catalyst) จากวัสดุเหลือทิ้งระหว่างแกลบข้าว (Rice husk) และเปลือกไข่ (Egg shell) เนื่องจากเปลือกไข่และแกลบข้าวเมื่อผ่านการเผาจะเกิดการสลายตัวของสารประกอบ เดิมกลายเป็น CaO และ  $\text{SiO}_2$  เป็นองค์ประกอบสูงตามลำดับ จึงนำมาสังเคราะห์เป็นตัวเร่ง CaO บน ตัวรองรับ  $\text{SiO}_2$  โดยใช้วิธีการเคลือบฝังแบบเปียก (Wet impregnation) ผลการศึกษาพบว่าตัวเร่ง ปฏิกิริยาบนตัวรองรับที่สังเคราะห์ได้ มีประสิทธิภาพในการผลิตไบโอดีเซลสูงกว่าการใช้ CaO เพียง อย่างเดียว

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์บนวัสดุ รองรับ ด้วยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO จากเถ้าเปลือกหอย (Shell ash) บนตัวรองรับ  $\text{SiO}_2$  จากเถ้า แกลบข้าว (Rice husk ash) ด้วยวิธีการเคลือบฝังแบบเปียก เพื่อใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล จากน้ำมันพืชใช้แล้วผ่านกระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน โดยวัตถุประสงค์เหล่านี้สามารถ หาได้ง่ายจากชุมชน เป็นการสรรหาและพัฒนาวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล เพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุ เหลือทิ้งและนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ลดการใช้สารเคมี และลดต้นทุนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งไบโ อดีเซลที่ผลิตได้จะถูกนำไปตรวจสอบค่าคุณสมบัติและทดสอบการใช้งานในเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตร ขนาดเล็ก ซึ่งจะมีการวิเคราะห์ค่าสมรรถนะของเครื่องยนต์ เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและ ประกอบการตัดสินใจใช้งานจริงในอนาคต

### วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการสังเคราะห์และประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าเปลือกหอยบนตัว รองรับซิลิกาเถ้าแกลบข้าว

2. เพื่อศึกษาการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน
3. เพื่อศึกษาการใช้ไบโอดีเซลที่ผลิตได้กับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก
4. เพื่อวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ในการผลิตไบโอดีเซลโดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเก่าเปลือกหอยบนตัวรองรับเก่ากลบข้าว

### ขอบเขตการศึกษา

1. สังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเก่าเปลือกหอย (Shell ash) และซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) จากเก่ากลบข้าว
2. เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา CaO จากเก่าเปลือกหอย และ SiO<sub>2</sub> จากเก่ากลบข้าว โดยศึกษาสัดส่วนโดยมวลของการผสมเก่าชีวมวลและเก่ากลบข้าว พร้อมทั้งอุณหภูมิในการแคลไซน์
3. ผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจากน้ำมันใช้แล้ว (Used cooking oil) โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต คือ อัตราส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และเวลาในการทำปฏิกิริยา ซึ่งมีอุณหภูมิในการผลิต 60-65 °C
4. ขยายสเกลการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เครื่องต้นแบบการผลิตไบโอดีเซลสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิธีพ่นรั้งขนาดการผลิต 20 L เพื่อใช้ทดสอบไบโอดีเซลที่ผลิตได้กับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดไม่เกิน 20 HP
5. การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ในส่วนของต้นทุนและจุดคุ้มทุน

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำวัสดุเหลือทิ้งมาเพิ่มคุณค่าด้วยการใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ลดการใช้สารเคมี และลดราคาต้นทุนการผลิตไบโอดีเซล
2. สามารถพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีประสิทธิภาพในการผลิตไบโอดีเซล ทั้งการลดขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ การก่อเกิดน้ำเสีย และสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาวนใช้ซ้ำใหม่ได้
3. สามารถนำไบโอดีเซลที่ผลิตได้ไปใช้ได้จริงในชุมชน เป็นแนวทางในการศึกษาและประกอบการตัดสินใจในอนาคตได้

## บทที่ 2

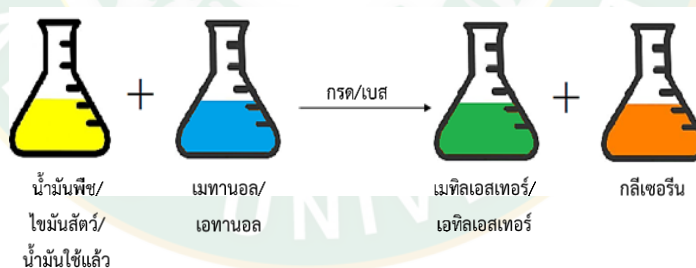
### หลักการและทฤษฎี

#### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษางานวิจัยเรื่องการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าเปลือกหอยบนตัวรองรับซิลิกาเถ้าแกลบข้าวมีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

#### 1. นิยามของไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่ถูกพัฒนาเพื่อใช้ทดแทนน้ำมันดีเซล สามารถผลิตได้จากแหล่งวัตถุดิบหมุนเวียนหรือใช้แล้วไม่หมดไป ในส่วนของงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงไบโอดีเซลที่อยู่ในรูปของสารเอสเทอร์ (Ester) ตามมาตรฐาน ASTM หรือ American Society for Testing and Materials ซึ่งสามารถผลิตได้จากการนำน้ำมันพืช (Lipid) ไขมันสัตว์ (Fat) มาเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติให้มีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล ผ่านกระบวนการทำปฏิกิริยาเคมี “ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน” ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารเอสเทอร์ และได้กลีเซอริน (Glycerin) เป็นผลพลอยได้ ดังแสดงในภาพที่ 2



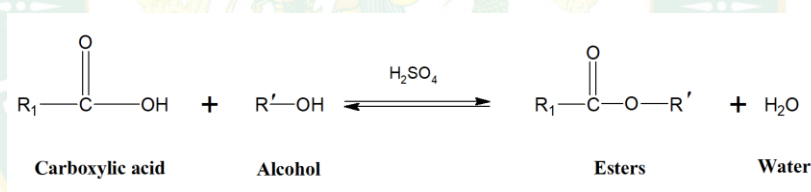
ภาพที่ 2 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล

#### 2. เทคนิคการผลิตไบโอดีเซล

การผลิตไบโอดีเซลสามารถผลิตผ่านกระบวนการที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Reaction) หรือไม่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-Catalytic Reaction) ก็ได้ แต่การผลิตที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้ไขมันวัตถุดิบเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นเมทิลเอสเทอร์ (Methyl ester) หรือ

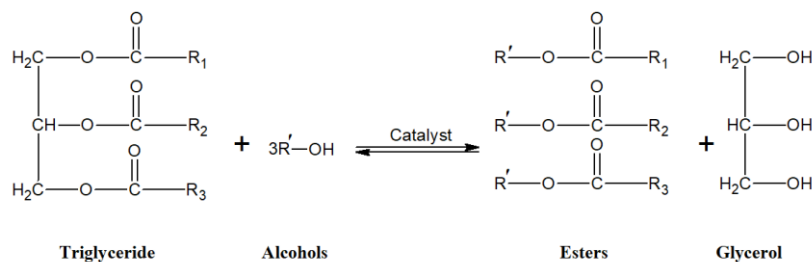
เอทิลเอสเทอร์ (Ethyl ester) ของกรดไขมันภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิและความดันในการเกิดปฏิกิริยาต่ำได้เร็วขึ้น แต่ในกรณีผลิตไบโอดีเซลแบบไม่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องให้ความร้อนและความดันสูงถึง 250–400 °C และ 35–60 MPa ตามลำดับ (อัจฉรา อิมคำ พุฒคำ และอภิพงษ์ พุฒคำ, 2557) ดังนั้นในหัวข้อเทคนิคการผลิตไบโอดีเซลนี้ จะเป็นเทคนิคการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทางเคมีที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 รูปแบบ ได้แก่ ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน และปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน (Two steps production) หรือการทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่มีการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เหมาะสำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันวัตถุดิบที่มีค่าความเป็นกรดสูง ซึ่งสารผลิตภัณฑ์ประเภทเอสเทอร์สามารถเตรียมผ่านปฏิกิริยาระหว่างกรดอินทรีย์ในน้ำมันวัตถุดิบกับแอลกอฮอล์ โดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งส่วนใหญ่นิยมใช้กรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) สำหรับการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดอินทรีย์กับแอลกอฮอล์จะเกิดขึ้นโดยที่หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของกรดอินทรีย์ และไฮโดรเจน (-H) จากแอลกอฮอล์รวมตัวกันกลายเป็นน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 3 และบางส่วนรวมตัวกันเป็นสารเอสเทอร์ (นพพร แสงอาทิตย์, 2559)



ภาพที่ 3 การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของกรดอินทรีย์ในน้ำมันวัตถุดิบ

2.2 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันวัตถุดิบกับแอลกอฮอล์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารเอสเทอร์และผลพลอยได้เป็นกลีเซอริน ดังแสดงในภาพที่ 4 (Faruque et al., 2020) โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยลดระยะเวลาการผลิต ซึ่งจะเป็นกรดหรือเบสก็ได้ แต่ที่นิยมใช้จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส เพราะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่าการใช้กรด อีกทั้งยังให้ผลผลิตในปริมาณที่สูงกว่า ซึ่งจะกล่าวถึงกระบวนการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันอย่างละเอียดในหัวข้อถัดไป



#### ภาพที่ 4 การเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันวัตถุดิบ

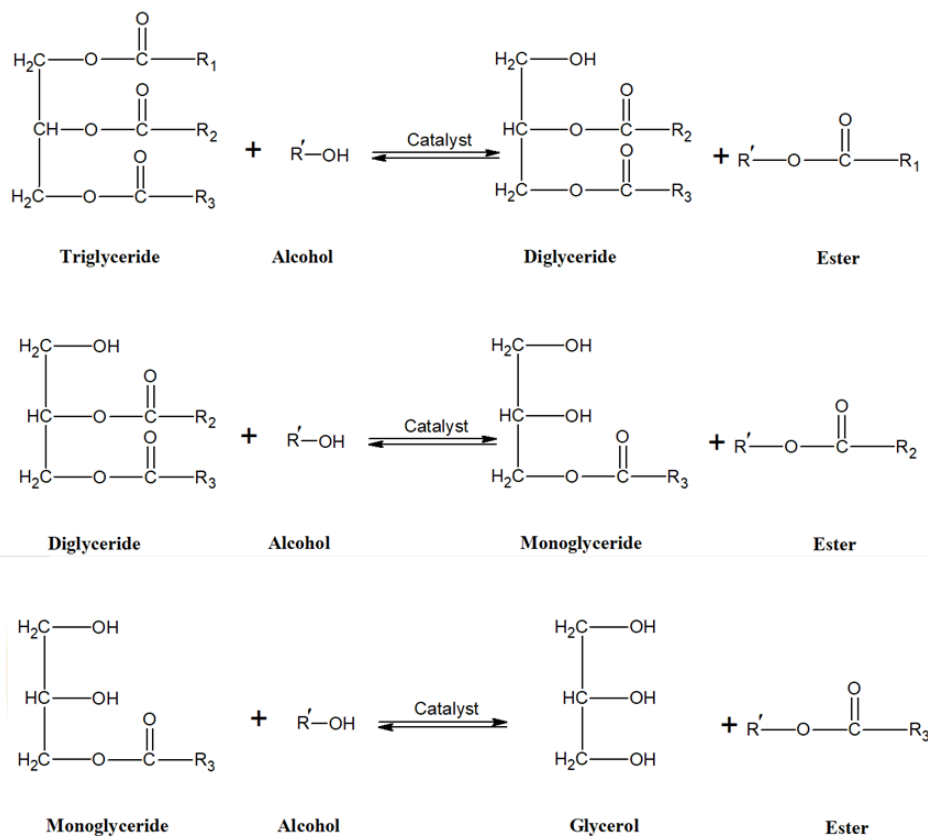
2.3 ปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอนจะมีการใช้ทั้งกระบวนการเอสเทอร์ริฟิเคชันและทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันร่วมกัน โดยการเลือกปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลสามารถพิจารณาได้จากปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid: FFA) ในน้ำมันตั้งต้นที่จะนำมาผลิตเป็นไบโอดีเซล เนื่องจากต้องการเลี่ยงปฏิกิริยาการเกิดสบู่ที่ส่งผลให้ผลผลิตมีปริมาณลดลง ซึ่งเมื่อ FFA ในน้ำมันตั้งต้นมีค่ามากกว่า 2.5% จะใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันในการผลิต หรือใช้เป็นปฏิกิริยาเพื่อปรับสภาพ (Pretreatment) น้ำมันตั้งต้นให้มีปริมาณ FFA ต่ำกว่า 2.5% แล้วจึงนำมาผลิตไบโอดีเซลต่อด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน (อัจฉรา อิมคำ พุฒคำ และอภิพงษ์ พุฒคำ, 2557)

### 3. ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายหมู่เอสเทอร์ บางครั้งนิยมเรียกว่า “ปฏิกิริยาแอลกอฮอล์ไลซิส (Alcoholysis)” ที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางเพื่อใช้ปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงจากไตรกลีเซอไรด์ให้ดีขึ้น โดยเฉพาะการลดค่าความหนืด ส่วนใหญ่จะใช้แอลกอฮอล์ที่มีสายโซ่คาร์บอนสั้น (Short chain alcohol) ในการทำปฏิกิริยา ซึ่งเมทานอลได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เพราะมีข้อได้เปรียบเชิงพาณิชย์สูง คือ มีราคาถูกกว่าแอลกอฮอล์ชนิดอื่น อีกทั้งมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่เหมาะสมกว่า ทั้งในด้านการเป็นแอลกอฮอล์ที่มีสายโซ่คาร์บอนสั้นที่สุด และเป็นของเหลวที่มีขั้วสูง ซึ่งจะช่วยเพิ่มอัตราการทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ได้มากที่สุด

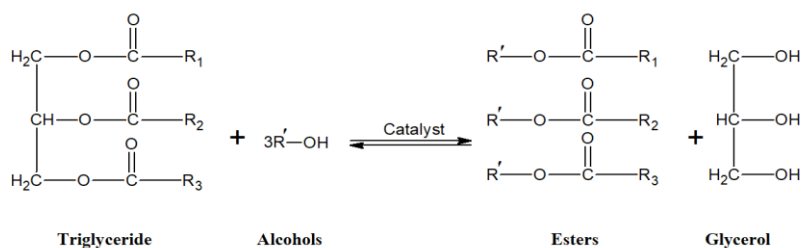
ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่สามารถผันกลับได้ โดยมีกระบวนการเกิด 3 ขั้นตอน ดังแสดงในภาพที่ 5 ได้แก่ 1) ไตรกลีเซอไรด์เปลี่ยนเป็นไดกลีเซอไรด์ (Diglyceride) 2) ไดกลีเซอไรด์เปลี่ยนเป็นโมโนกลีเซอไรด์ (Monoglyceride) และ 3) โมโนกลีเซอไรด์เปลี่ยนเป็นกลีเซอริน ซึ่งแต่ละขั้นตอนจะมีการใช้เมทานอล 1 mol ดังนั้นเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไปทางขวาหรือได้ผลผลิตเป็น

เอสเทอร์สูงขึ้น จะต้องมีการเพิ่มปริมาณเมทานอลให้มากขึ้นพอในการเข้าทำปฏิกิริยา (Faruque et al., 2020) โดยภาพรวมของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 6



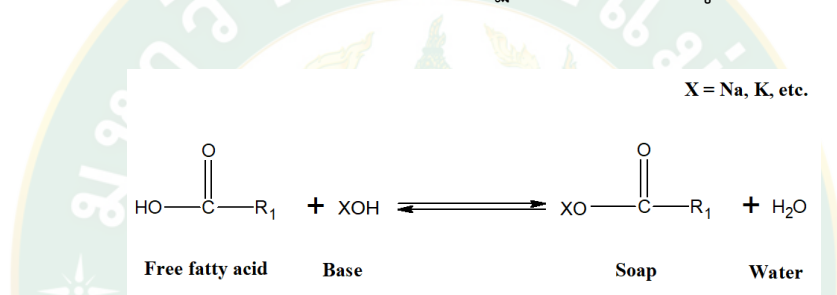
ภาพที่ 5 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

#### Overall reaction



ภาพที่ 6 ภาพรวมการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันสามารถเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาได้ ด้วยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น เบส กรด หรือเอนไซม์ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาเบส เนื่องจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดใช้เวลาในการผลิตไบโอดีเซลนานกว่า และต้องใช้แอลกอฮอล์ในอัตราส่วนสูง แต่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสยังมีข้อจำกัดในการทำปฏิกิริยา คือ ถ้ามีน้ำและกรดไขมันอิสระปนอยู่ในระบบมาก จะทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงได้ เช่น การเกิดสบู่หรือปฏิกิริยาสะปอนิฟิเคชัน ดังแสดงในภาพที่ 7 ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของกรดไขมันอิสระและตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส (Faruque et al., 2020) ส่งผลให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลง จึงทำให้ไบโอดีเซลที่ได้มีปริมาณน้อยลงตามไปด้วย นอกจากนี้ยังส่งผลต่อคุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ได้ ซึ่งจะมีค่าความหนืดสูงขึ้น ทำให้น้ำมันมีลักษณะเป็นเจล ยากต่อการแยกไบโอดีเซลออกจากกลีเซอริน จึงได้ว่าหากมีการเพิ่มปริมาณของเบสมากเกินไปก็จะทำให้น้ำมันเกิดปฏิกิริยากลายเป็นสบู่มากขึ้น



ภาพที่ 7 การเกิดปฏิกิริยาสะปอนิฟิเคชันหรือปฏิกิริยาการเกิดสบู่

#### 4. วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจะมีวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลอยู่ 3 ส่วน ได้แก่ น้ำมันวัตถุดิบ แอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

##### 4.1 น้ำมันวัตถุดิบ

น้ำมันหรือไขมันตั้งต้นเป็นวัตถุดิบประเภทไตรกลีเซอไรด์ซึ่งจะถูกเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติให้กลายเป็นสารประเภทเอสเทอร์หรือไบโอดีเซลผ่านกระบวนการของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยน้ำมันที่ใช้จะเป็นน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ก็ได้ เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันเมล็ดเรพ น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันมะพร้าว น้ำมันเมล็ดทานตะวัน เป็นต้น ซึ่งสำหรับประเทศไทยจะใช้น้ำมันปาล์มดิบ เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตไบโอดีเซล เพราะปาล์มน้ำมันให้ปริมาณน้ำมันต่อไร่ที่สูงกว่าพืชน้ำมันชนิดอื่น แต่ปาล์มน้ำมันยังเป็นที่ได้รับความนิยมสูงในการผลิตน้ำมันพืชที่ใช้ในการประกอบอาหาร ดังนั้นแล้วจึงมีการสรรหาหรือศึกษาพืชน้ำมันชนิดอื่น ๆ เพิ่มเติม เพื่อใช้ประกอบหรือใช้ทดแทนน้ำมันวัตถุดิบนี้ ซึ่งอยู่ในลักษณะของน้ำมันที่ไม่สามารถบริโภคได้ (Non-edible oil) ไม่ว่าจะเป็นน้ำมันสบู่

ดำ (*Jatropha curcas*) หรือน้ำมันมะเขายาหิน (*Vernicia montana* Lour.) เป็นต้น แต่ในปัจจุบันยังพบว่าพืชเหล่านี้มีการเพาะปลูกในปริมาณน้อย และให้ผลผลิตน้ำมันค่อนข้างต่ำ อีกทั้งด้วยความต้องการลดมูลค่ากระบวนการผลิต รวมไปถึงการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จึงมีการนำน้ำมันใช้แล้ว (Waste cooking oil) ที่ได้จากการนำน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ไปประกอบอาหารมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล โดยจากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าน้ำมันใช้แล้วถูกนำมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซลอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีศักยภาพในการผลิต ให้ผลผลิตไบโอดีเซลสูง (อัจฉรา อิมคำ พุฒคำ และอภิพงษ์ พุฒคำ, 2557) ซึ่งในการนำน้ำมันใช้แล้วมาใช้ประโยชน์ผ่านกระบวนการวิจัยเป็นการส่งเสริมการกำจัดขยะอย่างถูกวิธี เพิ่มมูลค่าสิ่งเหลือทิ้ง ลดการก่อมลพิษที่เกิดจากการกำจัดน้ำมันเหลือทิ้งอย่างไม่ถูกสุขลักษณะ และเป็นการรณรงค์ไม่ให้มีการนำน้ำมันใช้แล้วไปใช้ซ้ำในการประกอบอาหารในครัวเรือนหรือเพื่อค้าขายแต่อย่างใด (นันทิรา หงษ์ศรีสุวรรณ , 2560) จึงเห็นได้ว่าการนำน้ำมันใช้แล้วมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล นอกจากจะให้ปริมาณผลผลิตสูง ยังสามารถช่วยลดการสะสมตัวของสารพิษ เป็นการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมไปในตัว

#### 4.2 แอลกอฮอล์

แอลกอฮอล์ที่นิยมใช้ในการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันมีอยู่ 2 ชนิด คือ เอทิลแอลกอฮอล์หรือเอทานอล มีสูตรเคมี คือ  $C_2H_5OH$  ผลิตได้จากการหมักพืชผลทางการเกษตร เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด เป็นต้น มีคุณสมบัติเป็นของเหลวใสไม่มีสี ระเหยได้ มีความไวไฟสูง และสามารถละลายน้ำได้ อีกทั้งเป็นแอลกอฮอล์ที่สามารถบริโภคได้ (Edible alcohol) จึงนิยมนำมาผลิตเป็นเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ ได้แก่ เหล้า ไวน์ และเบียร์ หรือใช้เป็นยาสำหรับเช็ดทำความสะอาดแผล ผลิตเครื่องสำอาง และใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิง เป็นต้น ส่วนแอลกอฮอล์อีกหนึ่งชนิดคือเมทิลแอลกอฮอล์หรือเมทานอล จัดเป็นแอลกอฮอล์ที่บริโภคไม่ได้ (Non-edible alcohol) มีสูตรเคมี คือ  $CH_3OH$  และมีคุณสมบัติเป็นของเหลวใส สามารถระเหยได้ง่าย เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการกลั่นทางปิโตรเคมี จึงนิยมใช้เป็นตัวทำละลายในอุตสาหกรรมการทำเฟอร์นิเจอร์ เช่น สีทาไม้ น้ำมันเคลือบเงา ยาลอกสี รวมไปถึงใช้เป็นเชื้อเพลิงในธรรมชาติ โดยแอลกอฮอล์ชนิดนี้มีความเป็นพิษต่อร่างกายค่อนข้างสูง เนื่องจากสามารถดูดซึมได้ทางผิวหนังและลมหายใจได้ ทำให้ผู้ที่สูดดมเข้าไปเกิดการระคายเคืองต่อทางเดินหายใจและเยื่อปอด อาจทำให้เกิดอาการหลอดลมอักเสบ หรือทำให้เยื่อปอดอักเสบได้ แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าประเทศไทยจะสามารถผลิตเอทานอลเองได้ แต่ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลนิยมใช้เมทานอลมากกว่า เนื่องจากมีราคาต่ำ และไม่คาบเกี่ยวกับอุตสาหกรรมอาหาร อีกทั้งยังมีข้อมูลทางเทคนิคที่เหนือกว่าเอทานอล ไม่ว่าจะเป็นด้านกาทำให้เกิดปฏิกิริยาที่เร็วกว่าและให้ผลผลิตที่มากกว่า

### 4.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา

การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์จำเป็นต้องมีตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อลดระยะเวลาการผลิต โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันแบ่งเป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ ด้วยกัน ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ และตัวเร่งปฏิกิริยาเอนไซม์ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.3.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์

ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกันหรือมีวัฏภาคเดียวกันกับสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีทั้งชนิดที่เป็นกรดและเบส โดยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดที่นิยมจะเป็น  $H_2SO_4$  เนื่องจากมีราคาถูกและหาง่าย สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ดีที่อุณหภูมิไม่สูงมากและใช้ความดันต่ำ ให้ผลผลิตสูงและใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่สมบูรณ์น้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น แต่เมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสพบว่าเมื่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาช้ากว่า ในอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส เนื่องจากมีข้อดีด้านการลดระยะเวลาการผลิตลงได้มากกว่า โดยนิยมใช้ NaOH และ KOH แต่อย่างไรก็ตามการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสจำเป็นต้องใช้น้ำมันตั้งต้นที่มีค่ากรดไขมันอิสระไม่เกิน 2.5%-3% (หญิง ชูศรี, 2559) และไม่มีน้ำหรือมีน้ำเป็นองค์ประกอบน้อยที่สุด เนื่องจากการมี FFA และน้ำในน้ำมันปริมาณสูง จะทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียง เช่น การเกิดสบู่ ส่งผลให้ผลผลิตที่ได้มีค่าลดลง จึงจำเป็นต้องนำน้ำมันตั้งต้นไปกำจัดน้ำและลดปริมาณกรดลงก่อนด้วยการใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน กล่าวคือ หากน้ำมันชนิดนั้นมีปริมาณกรดสูงควรใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด แต่ไม่ว่าอย่างไรการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ในการผลิตไบโอดีเซล ถึงแม้จะให้ผลผลิตสูงแต่ยังประสบปัญหาด้านผลผลิตไบโอดีเซลที่ไม่บริสุทธิ์ เนื่องจากการปนเปื้อนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ละลายอยู่ในผลิตภัณฑ์ ดังนั้นในกระบวนการผลิตจำเป็นต้องมีการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้ออกจากผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากสิ้นสุดปฏิกิริยา ด้วยการใช้น้ำกลั่นหรือน้ำสะอาดล้างเพื่อให้ได้ไบโอดีเซลที่มีคุณสมบัติเป็นกลางหรือมีความบริสุทธิ์มากขึ้น แต่การใช้น้ำล้างส่งผลให้มีปัญหาด้านน้ำเสียและเกิดความยุ่งยากในการผลิต รวมไปถึงทำให้ต้นทุนการผลิตมีค่าสูงขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการแก้ไขปัญหาหรือมีการศึกษาค้นคว้าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นเพื่อใช้ประกอบหรือใช้ทดแทนตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้

#### 4.3.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกันหรือมีวัฏภาคต่างกับสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์ ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้การทำปฏิกิริยาเกิดช้ากว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ เพราะการกระจายตัวเพื่อเข้าทำปฏิกิริยาเกิดได้ไม่ดีเท่า แต่มีข้อดีที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก ไม่ว่าจะเป็น 1) สามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้ 2) สามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย 3) ไม่จำเป็นต้องล้างแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ จึงไม่ทำให้เกิดน้ำเสีย และ 4) เกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันได้ในสภาวะความดันและอุณหภูมิที่ไม่สูงมาก

ข้อเด่นเหล่านี้จึงส่งผลให้การผลิตไบโอดีเซลมีต้นทุนลดต่ำลงเนื่องจากสามารถนำมาใช้ใหม่ได้หลายครั้งและให้ผลผลิตไบโอดีเซลที่บริสุทธิ์กว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์มักอยู่ในรูปของโลหะออกไซด์ (Metal oxide) โดยที่นิยมใช้กันมากที่สุดจะเป็น CaO เพราะมีประสิทธิภาพสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น ในปัจจุบันมีการศึกษาการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO จากชีวมวลหรือวัสดุเหลือใช้ ส่งผลให้การผลิตไบโอดีเซลมีต้นทุนต่ำลง เนื่องจากมีการใช้วัสดุในการทำปฏิกิริยาที่มีราคาถูก ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ในหัวข้อถัดไป

#### 4.3.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอนไซม์

ตัวเร่งปฏิกิริยาเอนไซม์ (Enzymatic catalyst) เป็นเอนไซม์จำพวกไฮโดรไลติก (Hydrolytic Enzyme) เช่น เอนไซม์ลิเพส (Lipase enzyme) ผลิตได้จากจุลินทรีย์และพืช ข้อดีของการใช้เอนไซม์ในการผลิตไบโอดีเซล คือ สามารถใช้กับน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่มี FFA ได้ในช่วงกว้างตั้งแต่ 0.5–80% โดยไม่ต้องมีกระบวนการปรับปรุงคุณภาพเบื้องต้นของน้ำมันวัตถุดิบเพื่อลดปริมาณ FFA เหมือนตัวเร่งปฏิกิริยาแบบอื่น แต่อย่างไรก็ตามตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ยังอยู่ในขั้นตอนการทดลองเพื่อให้ได้ผลดีในห้องปฏิบัติการ ยังไม่มีการนำไปใช้ในการผลิตทางอุตสาหกรรมจริง เพราะมีราคาต้นทุนการผลิตสูงและให้ปริมาณผลผลิตน้อย (60–78%) มากไปกว่านั้นยังใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสอีกด้วย (อัจฉรา อิมคำ พุฒคำ และอภิพงษ์ พุฒคำ, 2557)

### 5. ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันมีดังต่อไปนี้

#### 5.1 ผลของความชื้นและกรดไขมันอิสระ

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส NaOH หรือ KOH จะต้องระมัดระวังเรื่องน้ำมันหรือกลีเซอรไรต์ที่ใช้ รวมไปถึงแอลกอฮอล์ ซึ่งจะต้องไม่มีน้ำและกรดไขมันอิสระในปริมาณที่สูงเกินไปหรือไม่ควรมีเลย เพราะน้ำและกรดไขมันอิสระจะทำให้เกิดสบู่  $\nu\omega$  เป็นปฏิกิริยาข้างเคียงที่เรียกกันว่า “ปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน” ในระหว่างการทำปฏิกิริยาได้ โดยสบู่ที่เกิดขึ้นจะไปลดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลง นอกจากนั้นยังส่งผลต่อคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซล คือ ทำให้ค่าความหนืดสูงขึ้น น้ำมันจะมีลักษณะเป็นเจล และยากต่อการแยกไบโอดีเซลออกจากกลีเซอริน ดังนั้นในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา น้ำมันวัตถุดิบที่ใช้ควรมีค่าความเป็นกรด (Acid value) ไม่เกิน 4 mg/g KOH ซึ่งสำหรับน้ำมันตั้งต้นที่มีค่าความเป็นกรดสูงควรนำไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หรือไม่ก็

ควรนำไปทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อลดค่าความเป็นกรดลงก่อน ซึ่งกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชัน จะมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด เมื่อค่าความเป็นกรดลดลงจึงสามารถนำน้ำมันดังกล่าวไปเป็น วัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันต่อไปได้ (หญิง ชูศรี, 2559)

### 5.2 ผลของอัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน

อัตราส่วนโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันเป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมากต่อการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ ดังนั้นจะต้องมีการใช้ปริมาณ แอลกอฮอล์ในปริมาณที่มากกว่าทางทฤษฎีกำหนด เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดไปทางขวาหรือได้ ผลิตภัณฑ์มากขึ้น ซึ่งตามทฤษฎีหรือสมการเคมีของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันกำหนดสัดส่วน ของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในปฏิกิริยา คือ 3 โมลของแอลกอฮอล์ต่อ 1 โมลของน้ำมันหรือไตรกลีเซอไรด์ ดังนั้นการใช้อัตราส่วนที่มากขึ้นก็จะทำให้ได้เอสเทอร์หรือไบโอดีเซลมากขึ้นเช่นกัน แต่ถ้ามากเกินไป จะทำให้ไม่สามารถแยกผลิตภัณฑ์กับแอลกอฮอล์จากกันได้ รวมทั้งอาจทำให้สิ้นเปลืองเสียเปล่า ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสม ซึ่งโดยทั่วไปจากการศึกษา ในหลาย ๆ งานพบว่าที่อัตราส่วนโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันที่ 6:1 เป็นค่าที่ทำให้เกิดผลผลิตไบโอดีเซลสูงที่สุดและค่านักใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมอีกด้วย (หญิง ชูศรี, 2559)

### 5.3 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแบ่งได้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส กรด หรือเอนไซม์ ซึ่งพบว่าสำหรับ กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่มีการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเร็วกว่า การใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่หากน้ำมันตั้งต้นมีน้ำหรือกรดไขมันอิสระเป็นองค์ประกอบที่สูงเกิน กำหนด ควรเปลี่ยนไปใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดในการทำปฏิกิริยา เพราะการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบส ในน้ำมันดังกล่าวจะก่อให้เกิดสบู่ซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์หลักลดลง และในส่วนของ การใช้เอนไซม์เป็น ตัวเร่งปฏิกิริยา ถึงแม้จะมีข้อดีด้านความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันได้โดยไม่ต้องมีการปรับลดค่ากรดก็ตาม แต่พบว่ายังคงมีราคาค่อนข้างสูง และถูกใช้เพียงในระดับ ห้องปฏิบัติการเท่านั้น ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเบสจึงเป็นที่นิยมใช้โดยทั่วไปและในระดับอุตสาหกรรม ทั้งนี้เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสที่มีความเข้มข้น 0.5-1 wt% จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ (Yield) ประมาณ 94-99% แต่ก็ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการทดลองที่แตกต่างกัน (หญิง ชูศรี, 2559) จึงต้องมีการค้นหา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม ซึ่งส่วนใหญ่พบว่าการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเบสไม่ได้เป็นการ ช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดมากขึ้นเสมอไป แต่อาจเพิ่มค่าใช้จ่ายในขั้นตอนของการล้างเอาตัวเร่งปฏิกิริยา เบสออกจากผลิตภัณฑ์ในกรณีของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีงานวิจัย หลากหลายงานที่ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ เพราะสามารถ แก้ไขปัญหาด้านการล้างแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์เพราะสามารถแยกออกจากผลผลิตได้ ง่ายกว่าและไม่ก่อให้เกิดน้ำเสีย

#### 5.4 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา

ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาส่งผลต่ออัตราการเกิดผลผลิตไบโอดีเซลโดยตรง หากมีการใช้ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาสั้นเกินไป จะส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์และได้ผลผลิตปริมาณน้อยกว่าที่ควร ดังนั้นจึงต้องมีการให้ระยะเวลาในการผลิตไบโอดีเซลที่เพียงพอ เพื่อให้ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์เอสเทอร์สูงขึ้น ซึ่งในการศึกษาจะต้องมีการหาระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการผลิตไบโอดีเซลที่มีเงื่อนไขแตกต่างกัน โดยการพิจารณาระยะเวลาที่ใช้จะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิในกระบวนการผลิต เนื่องจากอุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามถ้าเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาให้เพียงพอ ปฏิกิริยาก็คงเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ภายใต้อุณหภูมิห้อง แต่อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาโดยทั่วไปจะใช้อุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับจุดเดือดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ เช่น ถ้าเป็นเมทานอลอุณหภูมิที่ใช้ คือ 60-70 °C ที่ความดันบรรยากาศ (โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา)

#### 5.5 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

การเลือกใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเป็นสิ่งสำคัญอีกอย่างหนึ่ง ถ้าหากปล่อยให้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเกิดที่อุณหภูมิห้องก็สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ แต่จะต้องมีการใช้ระยะเวลาค่อนข้างนาน ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล หากไม่ใช้การทำปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ไบโอดีเซลในสภาวะวิกฤตจะนิยมใช้อุณหภูมิที่ไม่สูงเกินกว่าจุดเดือดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ เช่น เมทานอลมีจุดเดือด 64.7 °C ดังนั้นในการให้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาจะต้องไม่เกิน 64.7 °C ทั้งนี้ควรทำปฏิกิริยาในระบบปิดด้วยเพื่อป้องกันแอลกอฮอล์ระเหยออกจากระบบ ซึ่งอาจทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ต่ำกว่าที่ควรได้

#### 5.6 ผลของอัตราการกวนผสม

อัตราการกวนผสมนับเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญมากเช่นกัน เพราะการมีอัตราการกวนผสมสารที่มากพอจะช่วยคลุกเคล้าหรือเพิ่มพลังงานจลน์ให้แก่สารในการทำปฏิกิริยา ซึ่งจะช่วยให้โมเลกุลของสารสัมผัสกันมากขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ขึ้นกว่าการไม่มีการกวนผสม ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย อีกทั้งยังสามารถช่วยลดระยะเวลาในการผลิตลงได้

### 6. ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าเปลือกหอย

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิธีนี้ได้รับรับการยอมรับว่าสามารถลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลได้ ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ามีหลากหลายงานวิจัยที่มุ่งพัฒนาสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนี้ขึ้นมาเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลแทนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ เพื่อให้กระบวนการผลิตไบโอดีเซลมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น และมีราคาต้นทุน

ลดต่ำลง และเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าวจึงได้มีการศึกษาการนำวัสดุเหลือทิ้งหรือของเสียมาสังเคราะห์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (Talha and Sulaiman, 2016)

โลหะออกไซด์ของธาตุหมู่อัลคาไลน์เอิร์ท (Alkaline earth) เช่น MgO CaO หรือ SrO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา โดยพบว่า CaO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความใกล้เคียงกับธรรมชาติมากที่สุด เนื่องจากสามารถพบเห็นได้ทั่วไปในธรรมชาติในรูปแบบของ  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) หรือ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ซึ่งวัสดุที่มีสารประกอบเหล่านี้เป็นองค์ประกอบหลักสามารถที่จะนำมาสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ได้ โดยสำหรับในด้านการหาวัตถุดิบทดแทนแล้ว การสังเคราะห์ CaO จากแหล่งของเสียหรือของเหลือทิ้ง ยกตัวอย่างเช่น เปลือกไข่ (Eggshell) เปลือกหอย (Mollusk shell) กระดูก (Bone) และเถ้าไม้ (Wood ash) เป็นทั้งการสรรหาตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพในการผลิตไบโอดีเซลและยังเป็นการกำจัดของเสียไปในตัวอีกด้วย ซึ่งสามารถลดราคาการกำจัดของเสียในรูปแบบปกติได้ (Talha and Sulaiman, 2016) อีกทั้งยังเพิ่มมูลค่าให้ของเสียเหล่านั้นด้วยการนำมาใช้ประโยชน์

ในธรรมชาติพบวัสดุหลายชนิดที่มีส่วนประกอบหลักเป็น  $\text{CaCO}_3$  ซึ่งนอกเหนือจากเปลือกไข่ยังมีรายงานถึงแหล่งอื่น ๆ ที่มีองค์ประกอบหลักเป็น  $\text{CaCO}_3$  ในปริมาณสูง ซึ่งก็คือเปลือกหอยที่มีสารประกอบเป็น  $\text{CaCO}_3$  มากถึง 95-99% และมีโปรตีนเป็นสารเชื่อมต่อประมาณ 0.1-5.0%wt โดยเปลือกหอยจะมีชั้นฉนวนแคลเซียม (Prismatic layer) ซึ่งเป็นชั้นที่แข็งแรงที่สุดที่ประกอบด้วยสารประกอบแคลเซียมที่ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแคลไซต์ (สุภกร บัญยีน และคณะ, 2558) โดย  $\text{CaCO}_3$  นี้สามารถเปลี่ยนไปเป็น CaO ได้เมื่อเผาแคลไซน์เช่นเดียวกับเปลือกไข่ ดังนั้นจึงมีการศึกษาการนำเถ้าเปลือกหอยไปใช้เร่งปฏิกิริยาทรานเอสเตอริฟิเคชันของเพื่อผลิตไบโอดีเซล ทั้งนี้จะยกตัวอย่างองค์ประกอบของเถ้าหอย 3 ชนิด ที่ผ่านการแคลไซน์ที่  $1,000\text{ }^\circ\text{C}$  ได้แก่ หอยแมลงภู่ (Mussel shell) หอยแครง (Cockle shell) และหอยเชลล์หรือหอยพัด (Scallop shell) ดังแสดงในตารางที่ 2

**ตารางที่ 2** องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าเปลือกหอย

องค์ประกอบ	ความเข้มข้น (%wt)		
	หอยแมลงภู่	หอยแครง	หอยพัด
CaO	98.367	99.170	97.529
Na <sub>2</sub> O	0.937	0.438	0.565
SO <sub>3</sub>	0.293	0.117	1.568
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.163	0.096	0.204
SrO	0.158	0.132	0.107

องค์ประกอบ	ความเข้มข้น (%wt)		
	หอยแมลงภู่	หอยแครง	หอยพัด
ZrO <sub>2</sub>	0.046	-	0.027
Cl	0.037	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0.026	-
รวม	100.000	100.000	100.000

ที่มา : (Buasri et al., 2013)

## 7. วัสดุรองรับจากเถ้าแกลบข้าว

สมบัติสำคัญของตัวรองรับหรือวัสดุรองรับคือการใช้พื้นที่ผิวสูงและมีโครงสร้างรูพรุน แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งานด้วย เนื่องจากในการใช้ตัวรองรับในการผลิตตัวเร่งปฏิกิริยา กำหนดให้ตัวรองรับนั้นมีพื้นที่ผิวสูง ซึ่งหมายถึงการมีรูพรุนขนาดเล็ก แต่ไม่ใช่ขนาดที่เล็กเกินไปจนทำให้เกิดการอุดตันของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยควรมีรูพรุนและการกระจายของรูพรุนที่พอเหมาะต่อขนาดและปริมาณของสารตัวเร่งปฏิกิริยา และในส่วนเพิ่มเติมพบว่าตัวรองรับควรมีสมบัติด้านมีความเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยา คือ ไม่เกิดการทำปฏิกิริยากับสารตัวเร่งปฏิกิริยา มีความแข็งแรงเชิงกล กล่าวคือทนทานต่อการขูดขีดและการบีบอัด มีเสถียรภาพทางกายภาพและทางเคมีที่ดี ทนต่อสภาวะต่าง ๆ ในระหว่างการทำปฏิกิริยาและในช่วงของการเปลี่ยนเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ และมีราคาถูก เพื่อให้ต้นทุนการผลิตตัวเร่งปฏิกิริยายังคงมีราคาต่ำ (กวิศ ตั้งพลสินธนา, 2553)

จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาพบว่าวัสดุรองรับจำพวก SiO<sub>2</sub> และอะลูมิเนียมออกไซด์ หรืออะลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) สามารถสังเคราะห์ได้จากวัสดุทางธรรมชาติ ซึ่งจากการศึกษาจะพบว่าพบโดยส่วนมากสังเคราะห์มาจากเถ้าแกลบข้าว เถ้าลอยที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหิน เถ้าชานอ้อย และอื่น ๆ เนื่องจากมีองค์ประกอบประเภท SiO<sub>2</sub> และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> สูง ให้วัสดุที่มีรูพรุน และพื้นที่ผิวมาก จึงเหมาะในการนำมาใช้เป็นวัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งพบว่าเถ้าแกลบข้าวได้รับความนิยมน้อยกว่าหลาย เพราะเป็นวัสดุดิบที่ได้จากอาหารหลักของมนุษย์กว่าพันล้านคน โดย 20%wt ของข้าวเปลือกคือเมล็ดข้าว ส่วนที่เหลือเป็นแกลบที่มีหน้าที่ห่อหุ้มเมล็ด โดยแกลบข้าวมีค่าความร้อนประมาณ 16.3 MJ/kg มีสารระเหยเป็นองค์ประกอบ 74% และมีองค์ประกอบเถ้า 20% (Buta and Balasubramanian, 2017) ในประเทศไทยเองก็เป็นหนึ่งในประเทศที่มีการผลิตข้าวขนาดใหญ่ ซึ่งจะให้ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงเป็นแกลบข้าวที่มีการนำไปใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงต้มน้ำในอุตสาหกรรมแล้วได้ของเสียออกมาในรูปของเถ้าแกลบข้าว จึงเป็นเรื่องจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้อง

การกำจัดของเสียอย่างถูกวิธี เพื่อหลีกเลี่ยงการก่อเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีการนำเถ้าแกลบข้าวไปใช้ให้เกิดประโยชน์ในส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ผลิต SiO<sub>2</sub> บริสุทธิ์ เนื่องจากเถ้าแกลบข้าวมีองค์ประกอบหลักเป็น SiO<sub>2</sub> ประมาณ 87-99% และมีเกลืออนินทรีย์อีกเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 3 จึงเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่มีราคาถูกในการนำมาผลิตเป็น SiO<sub>2</sub> (Thiangtrong, 2015) และได้รับความเชื่อถือในการนำมาเป็นวัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูง เพียงพอต่อการแพร่กระจายเข้าไปของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นการใช้เถ้าแกลบข้าวเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถลดต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซล ลดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม ลดค่าใช้จ่ายด้านการกำจัดของเสีย และเป็นการเพิ่มรายได้ให้แก่เกษตรกร

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบข้าว

สารประกอบ	อ้างอิง	Bhardwaj et al.	Gomes et al.	Van et al.
SiO <sub>2</sub>		92.810	86.000	87.400
Na <sub>2</sub> O		2.658	0.050	0.040
Al <sub>2</sub> O		-	5.120	0.400
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		1.071	0.480	-
K <sub>2</sub> O		1.021	1.820	3.300
CaO		0.417	1.260	0.900
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0.312	1.120	0.300
MgO		0.212	0.480	0.600
SO <sub>3</sub>		0.132	2.790	3.390
TiO <sub>2</sub>		0.112	0.170	-
อื่น ๆ		1.255	0.710	3.580
รวม		100.000	100.000	100.000

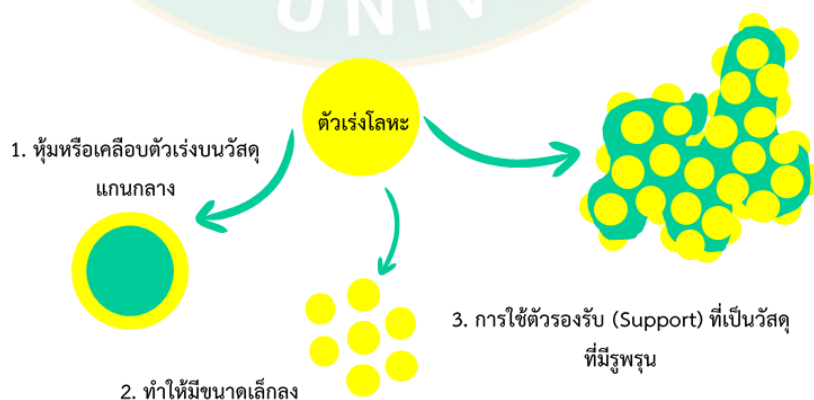
ที่มา: (Hossain et al., 2018)

## 8. เทคนิคการเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการศึกษางานวิจัยพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดเบส CaO ได้รับความนิยมน้อยอย่างมากในการนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากมีศักยภาพในการผลิต สามารถนำมาใช้ซ้ำได้หลายครั้ง มีความแข็งแรงเสถียรค่อนข้างสูง ใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาปานกลาง และใช้

ความดันในการทำปฏิกิริยาที่สภาวะปกติได้ (Lani et al., 2017) แต่อย่างไรก็ตามในขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันจะมี  $\text{Ca}^{2+}$  บางส่วนหลุดออกจาก  $\text{CaO}$  ส่งผลให้มีสภาพการเร่งปฏิกิริยาลดลง และยังมีข้อจำกัดด้านพื้นที่ผิวที่ค่อนข้างเล็ก อีกทั้งการใช้  $\text{CaO}$  บริสุทธิ์จะกลายเป็นเจลได้ง่ายเมื่อถูกผสมเข้ากับเมทานอล จึงต้องมีการรวม  $\text{CaO}$  เข้ากับวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูง เช่น  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ซีโอไลต์ หรือ  $\text{SiO}_2$  (Lani et al., 2017) เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ซึ่งจะช่วยเพิ่มความเสถียรและประสิทธิภาพในการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{CaO}$  (Thiangtrong, 2015)

ในการเกิดปฏิกิริยาที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโลหะหรือโลหะออกไซด์ จะเริ่มจากสารตั้งต้นอย่างน้อย 1 ชนิดเกิดการดูดซับ (Adsorption) บนพื้นผิว (Surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยา การดูดซับนี้จะเกิดที่ตำแหน่งที่เป็นอะตอมไอออนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่บนพื้นผิวที่เรียกว่าตำแหน่งกัมมันต์ (Active sites) กลายเป็นสารมัธยันต์ ก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยาต่อไปเป็นผลิตภัณฑ์อย่างจำเพาะเจาะจง (Selectivity) ซึ่งการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดเฉพาะบนพื้นผิวชั้นนอกสุด เพราะสารตั้งต้นสามารถเข้าถึงได้ อะตอมหรือไอออนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ชั้นล่างลงไปไม่ได้ใช้ประโยชน์ใด ๆ ในการทำปฏิกิริยา เพราะสารตั้งต้นไม่สามารถซึมผ่านโลหะได้ โดยเมื่อทำการพิจารณาจะพบว่ามีเพียงผลึกโลหะหรือออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยาด้านบนสุดเท่านั้นที่ถูกใช้งาน ซึ่งเมื่อเทียบกับจำนวนอะตอมหรือไอออนของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะทั้งหมดที่มีอยู่ จะพบว่ามีความ "พื้นที่ผิวโลหะหรือออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อหน่วยน้ำหนัก" ต่ำมาก หากสารเร่งปฏิกิริยานั้นเป็นสารที่มีราคาแพงก็จะเป็นการสิ้นเปลืองมาก เพราะมีอะตอมหรือไอออนเพียงส่วนน้อยที่สามารถใช้งานได้ ดังนั้นเพื่อหาทางใช้งานตัวเร่งปฏิกิริยาให้คุ้มค่าที่สุดที่สุด จึงต้องหาทางเพิ่มพื้นที่ผิวโลหะหรือออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อหน่วยน้ำหนักให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยสามารถทำได้ 3 วิธี ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 วิธีการเพิ่มพื้นที่ผิวโลหะหรือออกไซด์ของโลหะต่อหน่วยน้ำหนัก

จากภาพที่ 8 สามารถอธิบายวิธีการเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อหน่วยน้ำหนักได้ว่า วิธีที่ 1 เป็นการหุ้มหรือเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาบนวัสดุแกนกลาง วิธีการนี้ทำให้ลดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ลง แต่ไม่ได้เพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับให้สารตั้งต้นทำปฏิกิริยา วิธีที่ 2 เป็นการทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดเล็กลง ทำให้มีค่าพื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตรสูงกว่า ยิ่งทำให้เล็กลงได้มากเท่าใด ก็จะทำให้ได้ค่าพื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตรเพิ่มมากขึ้นเท่านั้น แต่ถึงแม้ว่าจะทำให้สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้แล้วก็ตาม แต่ในการใช้งานพบว่าสำหรับกรณีของเบดนิ่งหรือ Fixed-bed ยิ่งสารตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดเล็กก็จะทำให้สารตั้งต้นที่เป็นก๊าซหรือของเหลวไหลผ่านชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ยาก เพราะมีค่าความดันลด (Pressure drop) ที่สูง และถ้าเป็นการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงด้วยแล้ว ยังมีขนาดเล็กมากเท่าใด โอกาสที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านั้นจะหลอมรวมกันกลายเป็นก้อนก็จะยิ่งง่ายขึ้นไปอีก และวิธีที่ 3 เป็นการใช้ตัวรองรับ (Supporting material) ที่เป็นวัสดุมีรูพรุน ทำให้มีพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อหน่วยปริมาตรสูงขึ้น เกิดตัวเร่งปฏิกิริยาขนาดเล็กเกาะกระจายอยู่บนพื้นผิวของตัวรองรับนั้น วิธีการนี้สามารถทำให้เกิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดอนุภาคเล็กมากถึงในระดับนาโนเมตร กระจายตัวอยู่บนพื้นผิวของตัวรองรับ ทำให้ค่าพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อหน่วยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีค่าสูง และไม่ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาดเล็กนี้อยู่ติดกัน เป็นการป้องกันหรือลดโอกาสไม่ให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนใหญ่ขึ้นที่อุณหภูมิสูงได้

จากที่ได้อธิบายไปจะเห็นได้ว่าวิธีที่ 3 เป็นทางออกที่ดีที่สุดในการเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาเอกสารทางวิชาการเพิ่มเติมในส่วนของการเตรียมตัวเร่งบนตัวรองรับที่มีลักษณะเป็นอนุภาคพื้นผิวสูง มีโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่ และมีเสถียรภาพทางความร้อน ซึ่งจะมีวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนวัสดุรองรับหลากหลายวิธีดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

## 9. เทคนิคการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนวัสดุรองรับ

สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาล้วนขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมหรือวิธีการสังเคราะห์ ซึ่งแต่ละครั้งที่ทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นมา จะต้องมีการคำนึงถึงพื้นที่ผิว เสถียรภาพ และความทนทาน ซึ่งเป็นสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งพบว่าจะมีบริเวณเร่งปฏิกิริยาหรือตำแหน่งกัมมันต์ที่ยังคงมีข้อจำกัดด้านพื้นที่ผิว จึงต้องมีการเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการรวมเข้ากับวัสดุที่มีรูพรุน เพื่อให้มีพื้นที่ผิวมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ตำแหน่งกัมมันต์มีมากขึ้น ส่งผลให้การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้ในกระบวนการผลิตไปโอดีเซลมีประสิทธิภาพมากขึ้นตามไปด้วย (สุรศิษฐ์ ตีสวัสดิ์, 2556)

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับสามารถเตรียมได้หลายวิธี ได้แก่ วิธีการเคลือบฝัง (Impregnation) หรือวิธีอิมเพกเนชัน วิธีการทำให้เปียกชุ่ม และสามารถเรียกอีกได้ว่าวิธีการเอ็บชุ่ม วิธีการตกตะกอน (Precipitation) วิธีการคลุกเคล้า (Kneading) วิธีแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) และวิธีโซลเจล (Sol-gel) ซึ่งจะมีรายละเอียดคร่าว ๆ ดังต่อไปนี้

9.1 วิธีการเคลือบฝังแบบเปียก เป็นวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก ซึ่งจะใช้วิธีการนำตัวรองรับลงแช่ในสารละลายที่มีส่วนประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสามารถแบ่งวิธีย่อยได้ 5 วิธี คือ

9.1.1 วิธีการดูดซับทำได้โดยการเลือกตัวรองรับที่สามารถดูดซับสารตัวเร่งปฏิกิริยาได้ ซึ่งจะต้องมีการตรวจสอบว่าสามารถดูดซับไอออนของโลหะได้มากน้อยเพียงใด หลังจากนั้นจึงทำการดูดซับภายใต้สภาวะที่มีการดูดซับต่ำกว่าการดูดซับอิมตัว กล่าวคือ มีปริมาณตัวรองรับในสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่มากกว่าว่า เพื่อให้มั่นใจว่าปริมาณของสารตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมดจะถูกดูดซับ ก็จะเข้าสู่สภาวะการดูดซับสมดุล (Equilibrium adsorption) จึงทำการกรองเอาส่วนที่เกินออก

9.1.2 วิธีการดูดซึม (Pore filling) เป็นวิธีการเตรียมที่จะต้องมีการตรวจวัดค่าปริมาตรของรูพรุนของตัวรองรับก่อน จึงเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับด้วยการเติมสารละลายที่มีส่วนประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาตรที่เท่ากับปริมาตรของรูพรุนตัวรองรับที่วัดได้ เพื่อให้สารละลายถูกดูดซึมเข้าไปในรูพรุนของตัวรองรับ

9.1.3 วิธีการทำให้เปียกชุ่ม (Incipient wetness) เป็นวิธีการเตรียมเหมือนวิธีดูดซึมเพียงแต่มีข้อแตกต่างด้านการทำให้ตัวรองรับนั้นเปียกชุ่มสารละลายที่มีส่วนประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา ไปพร้อม ๆ กับการวัดปริมาตรรูพรุนของตัวรองรับ คือ จะมีการหยดสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยาจากบิวเรตลงบนพื้นผิวของตัวรองรับไปเรื่อย ๆ พร้อมทั้งทำการกวนผสมตัวรองรับที่กำลังเปียกชุ่มนั้น จนกระทั่งมีการเปียกอย่างทั่วถึง

9.1.4 วิธีการระเหยจนแห้ง (Evaporation to dryness) เป็นวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการแช่ตัวรองรับในสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการนำสารที่ได้ไปให้ความร้อน ซึ่งจะมีการทำการกวนผสมสารไปพร้อม ๆ กัน เพื่อให้ตัวทำละลายถูกระเหยด้วยความร้อนออกจากสาร เหลือเพียงแค่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ติดอยู่บนตัวรองรับ

9.1.5 วิธีการฉีดพ่น (Spraying) วิธีการนี้ทำได้ด้วยการใส่ตัวรองรับเข้าไปในเครื่องระเหย ซึ่งจะมีการฉีดพ่นสารละลายลงบนตัวรองรับนั้น และทำการกวนผสมไปพร้อม ๆ กันกับการระบายก๊าซออกจากเครื่องระเหย เพื่ออบสารให้แห้ง

จากวิธีการต่าง ๆ ที่กล่าวมาจะเห็นว่าวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการเคลือบฝังแบบเปียกสามารถทำได้ง่าย ไม่ซับซ้อน และสามารถควบคุมปริมาณสารได้ แต่หากมีสารผสมที่ไม่ต้องการ

ปะปนอยู่จะไม่สามารถถูกกำจัดออกจากสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ เพราะเมื่อทำการอบหรือเผาจะทำให้สิ่งเจือปนเหล่านี้หลงเหลืออยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลกระทบต่อลักษณะการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับที่ได้ (สุรศิษฏ์ ดีสวัสดิ์, 2556)

## 9.2 วิธีการตกตะกอน

วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีนี้ทำให้สารตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดเล็กและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบนตัวรองรับ ซึ่งวิธีการตกตะกอนจะแบ่งออกเป็น 2 วิธีย่อย ได้แก่ การตกตะกอนร่วม และการตกตะกอนพอกพูนบนตัวรองรับ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

9.2.1 วิธีการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) เป็นการนำเอาสารละลายที่มีองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 ชนิด หรือมากกว่า 1 ชนิดขึ้นไป มาผสมเข้ากับสารละลายที่มีส่วนประกอบของตัวรองรับอยู่ หลังจากนั้นทำการเติมสารก่อการตกตะกอน (Precipitant) ลงไป แล้วทำการล้าง อบ ขึ้นรูป และเผาตะกอนนั้นต่อไป

9.2.2 วิธีการตกตะกอนและพอกพูนบนตัวรองรับ (Deposition-precipitation) สามารถทำได้โดยมีการเติมตัวรองรับ (อาจมีลักษณะเป็นเม็ดหรือผง) ลงในสารละลายที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ ซึ่งจะมีการกวนผสมไปพร้อม ๆ กันกับการเติมสารก่อการตกตะกอน โดยสารตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดการตกตะกอนและพอกพูนบนตัวรองรับ จากนั้นจะทำการล้างเอาสารก่อการตกตะกอนออก แล้วทำการอบและเผาต่อไป

## 9.3 วิธีการคลุกเคล้า

เป็นวิธีการเตรียมสารตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับที่เริ่มจากการตกตะกอนของส่วนประกอบที่จะใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (อาจมากกว่า 1 ชนิด) ก่อน จากนั้นจึงเติมตัวรองรับที่มีลักษณะเป็นผงผสมลงไปกับตะกอนดังกล่าว ซึ่งอาจจะมีการเติมสารช่วยการยึดเหนี่ยวลงไปด้วย จากนั้นทำการคลุกเคล้า

## 9.4 วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน

วิธีการนี้จะต้องใช้ตัวรองรับที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกหรือแคทไอออน (Cation) เช่น ซีโอไลต์ (Zeolite)  $\text{SiO}_2$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  หรือเรซิน (Resin) ที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ และถ่านกัมมันต์ (Charcoal) ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) เป็นต้น การเตรียมสารวิธีนี้มีข้อดีคือทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีการกระจายตัวบนตัวรองรับได้สูง เนื่องจากแคทไอออนของโลหะจะหยุดนิ่งอยู่บนตัวรองรับนั้น ซึ่งปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่กระจายตัวบนตัวรองรับขึ้นอยู่กับปริมาณของแคทไอออนของตัวรองรับนั้นสามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับแคทไอออนของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นได้ วิธีนี้เหมาะกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม (Pt) และแพลเลเดียม (Pd) เป็นต้น (สุรศิษฏ์ ดีสวัสดิ์, 2556)

### 9.5 วิธีโซลเจล

โซล (Sol) คือ การกระจายอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กประมาณ 0.1-1  $\mu\text{m}$  หรือที่เรียกว่า คอลลอยด์ (Colloid) ลงในของเหลวที่มีการเคลื่อนที่ของอนุภาคแบบบราวน์เนียนเท่านั้น ส่วนเจล (Gel) คือ ลักษณะของของแข็งและของเหลวที่กระจายตัวเข้าหากัน แสดงให้เห็นว่าของเหลวมีการแทรกตัวอยู่ในโครงสร้างของของแข็ง โดยกระบวนการนี้เริ่มจากการทำให้อนุภาคคอลลอยด์กระจายตัวของเหลว (การเกิดโซล) จากนั้นทำการตกตะกอนของโซลเพื่อทำการเคลือบลงบนตัวรองรับต่อการอัดพิมพ์ แชน์ หรือกวน ซึ่งอนุภาคโซลจะถูกทำให้เกิดปฏิกิริยาจากการเตรียมพอลิเมอร์ผ่านกระบวนการกำจัดองค์ประกอบบางตัว เพื่อให้เกิดความเสถียรและเกิดเจลในลักษณะที่เป็นโครงร่างตาข่าย และในขั้นสุดท้ายจะมีการใช้ความร้อนในการบำบัดโดยทำการไพโรไลส์ยังคงเหลือส่วนที่เป็นสารประกอบอินทรีย์หรืออนินทรีย์ และเกิดเป็นรูปร่างที่ไม่แน่นอนหรือเป็นผลึกที่ผ่านการเคลือบแล้ว วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับด้วยวิธีนี้มีข้อดีคือช่วยให้สารตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวรองรับเกาะกันได้ดี ส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้เร่งปฏิกิริยาได้ดีและป้องกันการเกิดการรวมตัวกันของการใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเดี่ยว (กวิศ ตั้งพูลสินธนา, 2553)

หลังจากเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับด้วยวิธีต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว จะต้องมีการปรับปรุงสารที่เตรียมได้ซึ่งมีขั้นตอนหลังการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ 3 วิธี ดังนี้

1) การอบแห้ง (Drying) เป็นการระเหยเอาตัวทำละลายออกจากสารที่เตรียมได้จนหมดสามารถใช้ควบคุมการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ ซึ่งควรทำการอบแห้งอย่างค่อยเป็นค่อยไป ใช้อุณหภูมิไม่สูงมาก เพื่อระเหยตัวทำละลายออกไปเท่านั้น

2) การเผาแคลไซน์เป็นการเปลี่ยนองค์ประกอบของสารตัวเร่งปฏิกิริยาให้อยู่ในรูปของสารประเภทออกไซด์ และทำการเผาสารประกอบที่ตกค้างอยู่หลังการอบแห้งให้หมดไป ซึ่งสิ่งที่ต้องระวังในการเผา คือ อุณหภูมิที่ใช้

3) การรีดิวซ์ (Reduction) เป็นการเปลี่ยนโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาจากสารประเภทออกไซด์ให้เป็นโลหะ ซึ่งนิยมใช้ก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) ในการรีดิวซ์ ซึ่งอุณหภูมิและเวลาที่ใช้นั้นขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการใช้อุณหภูมิต่ำจะช่วยลดการหลอมตัวและทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีพื้นที่ผิวของโลหะมากที่สุด

## 10. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับด้วยเทคนิคการเคลือบฝูแบบเปียก

การใช้  $\text{SiO}_2$  เป็นตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นที่นิยมอย่างมาก เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดี ไม่ว่าจะเป็นเสถียรภาพทางความร้อน การมีพื้นที่ผิวสูง และโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่ที่เป็นเอกลักษณ์ จึงทำให้มีการศึกษาการผลิตตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ  $\text{SiO}_2$  เป็นจำนวนมาก (Lani et al., 2017) ใน

งานวิจัยนี้จึงสนใจเพิ่มประสิทธิภาพของ CaO โดยการใช้ตัวรองรับ SiO<sub>2</sub> ซึ่งจะใช้วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการเคลือบฝังแบบเปียก ซึ่งเริ่มจากการทำให้ตัวรองรับดูดซับสารละลายเกลือโลหะที่ต้องการเอาไว้ก่อน (เลือกใช้เกลือที่ละลายในตัวทำละลายที่ใช้ได้ และเมื่อนำเกลือดังกล่าวไปเผาเกลือที่เตรียมได้จะต้องสลายตัวเป็นสารประกอบโลหะออกไซด์ ด้วยเหตุนี้เกลือที่นิยมใช้จึงมักเป็นเกลือไนเตรต (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) และเกลือของสารอินทรีย์ ส่วนเกลือพวกคลอไรด์ (Cl<sup>-</sup>) ซัลเฟต (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) ฯลฯ ไม่นำมาใช้กัน เพราะมันมีส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้)

หลังจากที่ทำให้ตัวรองรับดูดซับสารละลายเกลือโลหะเอาไว้แล้ว ก็ให้นำเอาตัวรองรับที่ผ่านการเคลือบฝังแล้วมาทำให้แห้ง เมื่อตัวทำละลายระเหยออกไปก็จะเหลือผลิตภัณฑ์กระจายเกาะอยู่บนผิวตัวรองรับ จากนั้นจึงนำตัวรองรับที่ผ่านการเคลือบฝังและอบแห้งแล้วไปทำการเผาที่อุณหภูมิสูงหรือการแคลไซน์ ดังแสดงในภาพที่ 9 เพื่อเปลี่ยนให้เกลือที่ตกผลึกบนพื้นผิวตัวรองรับสลายตัวกลายเป็นสารประกอบโลหะออกไซด์ (จะเผาที่อุณหภูมิเท่าใดขึ้นอยู่กับชนิดของเกลือที่เลือกใช้ ถ้าใช้เกลือสารอินทรีย์ก็ต้องเผาในบรรยากาศที่มีออกซิเจน เพราะจำเป็นต้องใช้ออกซิเจนในการสลายส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ให้กลายเป็น CO<sub>2</sub> และไอน้ำ (H<sub>2</sub>O) แต่ถ้าเป็นเกลือไนเตรตก็ไม่จำเป็นต้องมีออกซิเจน)



ภาพที่ 9 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ

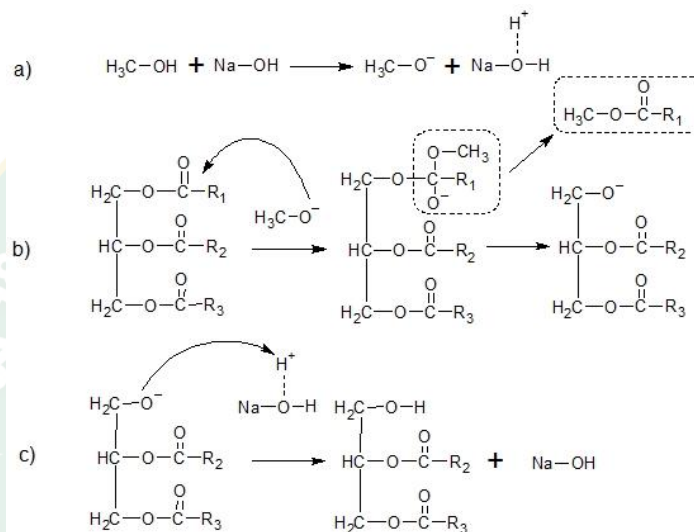
## 11. กลไกการผลิตไบโอดีเซลที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทต่าง ๆ

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกันจะมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาในระหว่างกระบวนการผลิตแตกต่างกัน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 11.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซลที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพันธ์

กลไกการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพันธ์หรือตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียว ในที่นี้จะยกตัวอย่างในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส NaOH ใน

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งในขั้นตอนแรกจะเริ่มจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา NaOH กับแอลกอฮอล์ชนิดเมทานอล โดย NaOH จะทำหน้าที่เป็นตัวรับโปรตอนจากเมทานอลดังภาพที่ 10 (a) เกิดเป็นสารเมทอกไซด์ที่กลายเป็นสารนิวคลีโอไฟล์เข้าจับกับหมู่คาร์บอนิลของไตรกลีเซอไรด์ในขั้นตอนที่สอง ซึ่งจะอยู่ในรูปของสารเตตระฮีดรัลอินเตอร์มีเดียต (Tetrahedral intermediate) และเกิดปฏิกิริยาต่อเป็นสารไบโอดีเซลในรูปของเมทิลเอสเทอร์ และไตรกลีเซอไรด์แอนไอออน (นพพร แสงอาทิตย์, 2559) ดังภาพที่ 10 (b)



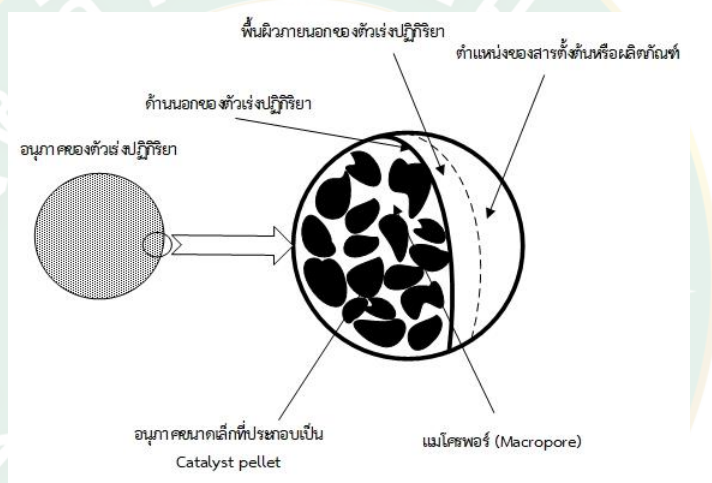
ภาพที่ 10 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจากการใช้ NaOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ขั้นตอนที่สาม ไตรกลีเซอไรด์แอนไอออนจากขั้นตอนที่สองจะดึง  $\text{H}^+$  จาก KOH เกิดเป็นสารหมู่ไฮดรอกซิลของกลีเซอริน และกลายเป็นโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ดังภาพที่ 10 (c) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาต่อไปตลอดจนปฏิกิริยาเกิดขึ้นสมบูรณ์ได้ไบโอดีเซลและกลีเซอรินในที่สุด

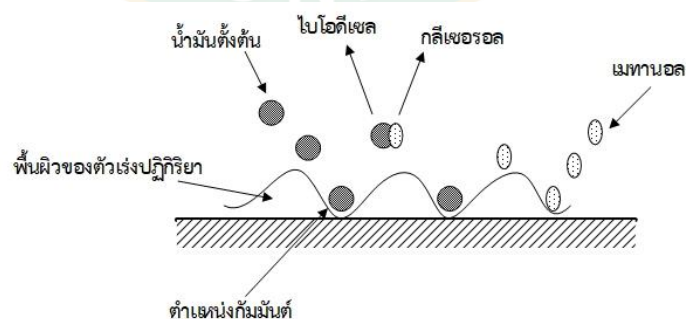
### 11.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซลที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์

กระบวนการของการเร่งปฏิกิริยาที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์ซึ่งเป็นวัสดุที่มีรูพรุน ดังแสดงในภาพที่ 11 ซึ่งมีกลไกการเร่งปฏิกิริยาแสดงอย่างง่ายดังภาพที่ 12 จะมีพฤติกรรมการทำงานเริ่มจากขั้นตอนการถ่ายเทมวลสารจากภายนอก (External mass transfer) ของสารตั้งต้นที่มีสถานะเป็นของไหล (Bulk fluid) แพร่ไปยังพื้นผิวภายนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นเกิดการถ่ายเทมวลสารจากภายใน (Internal mass transfer) ของสารตั้งต้นจากบริเวณผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาหรือปากของรูพรุนเข้าไปยังพื้นผิวภายในรูพรุนบริเวณใกล้เคียง ซึ่งรูพรุนดังกล่าวมีขนาดและรูปร่างที่ไม่แน่นอน ทำให้มีการชนกันระหว่างโมเลกุลของสารตั้งต้น หรือการชนกันของโมเลกุลของสารตั้งต้นกับ

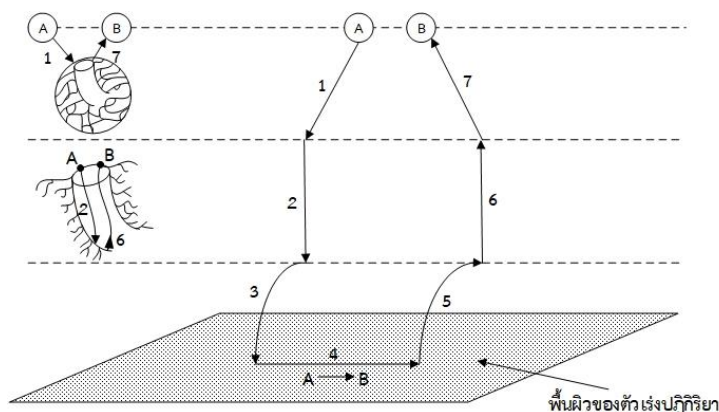
ผนังของรูพรุนในระหว่างการแพร่ครั้งนี้ โดยทั้งขั้นตอนแรกและขั้นตอนที่สองจะยังไม่มี การเปลี่ยนแปลงทางเคมีเกิดขึ้น จนกระทั่งเมื่อมีการดูดซับสารตั้งต้นบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาบริเวณ ตำแหน่งกัมมันต์ จะทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลของสารตั้งต้นกับบริเวณตำแหน่งกัมมันต์นั้น โดยจะเรียกโมเลกุลของสารนี้ว่าตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) และเรียกตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งว่าตัวดูดซับ (Adsorbent) จากนั้นโมเลกุลของสารตั้งต้นที่ถูกดูดซับจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารตั้งต้น โมเลกุลอื่นที่ถูกดูดซับในตำแหน่งข้างเคียง หรือทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารตั้งต้นอื่นที่มาจากวัฏ ภาคก้ำช จนเกิดเป็นสารใหม่ แล้วหลุดออกจากบริเวณผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นการ เปลี่ยนแปลงทางเคมีขั้นสุดท้าย (นิธิ นิธิวัฒนเลิศ, 2554) ดังแสดงในภาพที่ 12 ซึ่งจะมีขั้นตอน รายละเอียดแสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 11 โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์



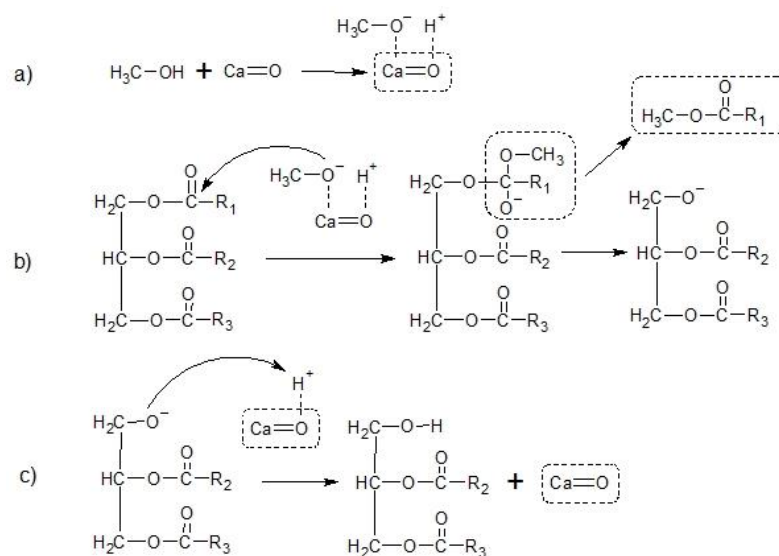
ภาพที่ 12 กลไกแสดงการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์



ภาพที่ 13 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

ภาพที่ 13 ภาพที่ 13 เป็นกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่มีรายละเอียดดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น ซึ่งหมายเลข 1-7 เป็นการอธิบายขั้นตอนที่เกิดขึ้นในการเร่งปฏิกิริยา ประกอบด้วย 1) การถ่ายเทมวลสารของสารตั้งต้นจากภายนอกไปยังพื้นผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา 2) การถ่ายเทมวลสารของสารตั้งต้นจากพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังพื้นผิวภายในที่เป็นรูพรุน 3) การดูดซับของสารตั้งต้นบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นบนบริเวณตำแหน่งกัมมันต์ 4) การเกิดปฏิกิริยาบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา 5) การคายออกของผลิตภัณฑ์จากพื้นผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา 6) การแพร่ของผลิตภัณฑ์จากภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังบริเวณปากของรูพรุนที่พื้นผิวภายนอก และ 7) การถ่ายเทมวลสารภายนอกของผลิตภัณฑ์จากพื้นผิวภายนอกไปยังของไหล (นิธิ นิธิวัฒน์เลิศ, 2554)

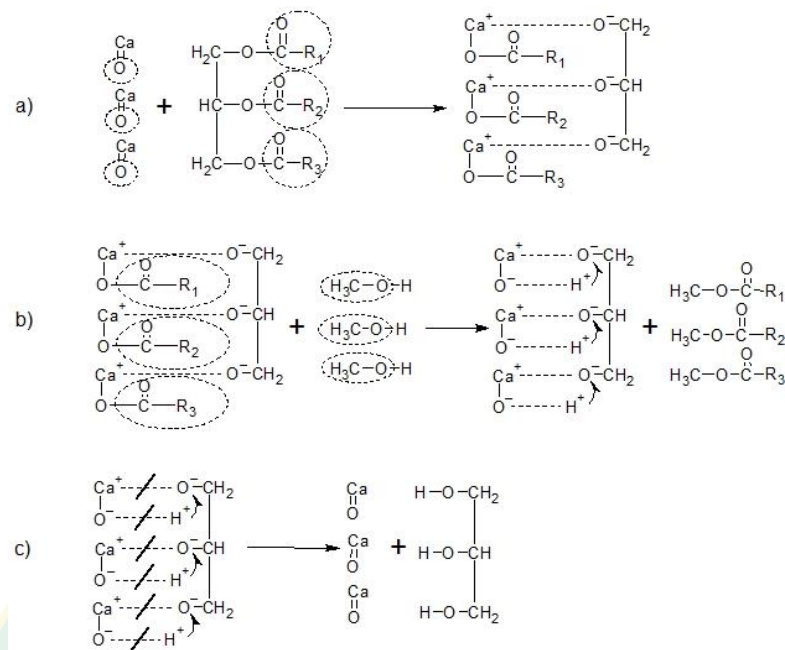
การผลิตไบโอดีเซลที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสมชนิดเบส จะยกตัวอย่างในส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ชนิด  $\text{CaO}$  ซึ่งในระหว่างกระบวนการผลิตมีลำดับการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเริ่มต้นจากการที่ตำแหน่งเบสบนพื้นผิวของ  $\text{CaO}$  ดึงโปรตอนจากเมทานอลจนทำให้เกิดเป็นสารแคลเซียมเมทอกไซด์แอนไอออนดังภาพที่ 14 (a) จากนั้นจะเข้าทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งหมู่คาร์บอนิลในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ เกิดเป็นสารไม่เสถียรเมทอกไซด์คาร์บอนิลอินเตอร์มีเดียต และเกิดปฏิกิริยาต่อไปได้ไบโอดีเซลและไตรกลีเซอไรด์แอนไอออน ดังภาพที่ 14 (b) ซึ่งจะดึง  $\text{H}^+$  จาก  $\text{CaO}$  มา เกิดเป็นสารหมู่ไฮดรอกซิลของกลีเซอริน เป็นโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ที่จะเกิดปฏิกิริยาต่อกับกลไกเติมจนเกิดไบโอดีเซล กลีเซอริน และได้ตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปของแข็งออกมา (นพพร แสงอาทิตย์, 2559) ดังแสดงในภาพที่ 14 (c)



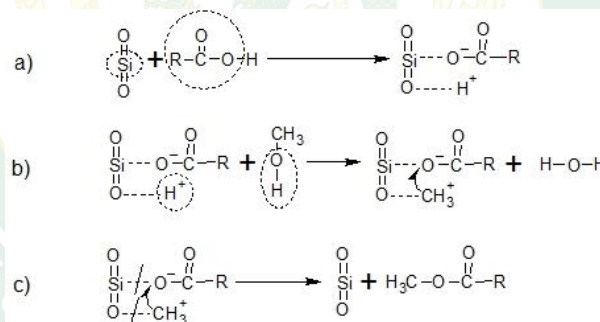
ภาพที่ 14 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจากการใช้ CaO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

### 11.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซลที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ

กลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมีในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ ในกรณีการใช้ CaO บน  $\text{SiO}_2$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่ามีการเกิดปฏิกิริยา 2 ชนิดพร้อมกัน บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าว ดังแสดงในภาพที่ 15 และภาพที่ 16 ที่เป็นกลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจากการเร่งปฏิกิริยาด้วย CaO และเป็นกลไกการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันจากการเร่งปฏิกิริยาด้วย  $\text{SiO}_2$  ตามลำดับ ซึ่งในส่วนของการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน จะเริ่มจากการที่ CaO เข้าทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอนิลของไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมัน ในขั้นตอนที่ 1 (ภาพที่ 15 (a)) จากนั้นเมทานอลในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจะเข้าไปตัดพันธะระหว่างสารดังกล่าวจึงทำให้ในขั้นตอนที่ 2 (ภาพที่ 15 (b)) สารเมทอกไซด์ของเมทานอลเข้าไปแทนที่ตำแหน่ง O ของตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อสร้างไบโอดีเซล จึงส่งผลให้มีไบโอดีเซลถูกปลดปล่อยออกมาโดยตรงจากพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นในขั้นตอนที่ 3 (ภาพที่ 15 (c)) สารที่เหลืออยู่จะถูกตัดหรือถูกแทรกด้วย H แทนที่พันธะที่เกิดขึ้นระหว่าง Ca กับ  $\text{CH}_2$  เกิดเป็นกลีเซอริน และถูกคายออกมาจากพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาในที่สุด (Putra et al., 2018)



ภาพที่ 15 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจาก CaO ของตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ



ภาพที่ 16 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันจาก SiO<sub>2</sub> ของตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ

ในขณะเดียวกันกับการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันพบว่าส่วนของ SiO<sub>2</sub> ของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเข้าจับกับกรดไขมันอิสระของน้ำมัน ซึ่งมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเริ่มจากหมู่คาร์บอกซิลและ H ของกรดไขมันในขั้นตอนที่ 1 (ภาพที่ 16 (a)) เข้าทำปฏิกิริยากับ Si และ O จากนั้นในขั้นตอนที่ 2 (ภาพที่ 16 (b)) หมู่ไฮดรอกซิลของเมทานอลจะเข้าไปแทนที่ตำแหน่ง O ของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้เกิดน้ำขึ้นในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งน้ำนี้จะถูกปล่อยออกมาจากพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยในขั้นตอนที่ 3 (ภาพที่ 16 (c)) พบว่า CH<sub>3</sub> ของสารที่เหลืออยู่จะเข้าร่วมตัวกับ O เพื่อสร้างไบโอดีเซลเช่นกัน (Putra et al., 2018)

จากที่ได้กล่าวไปจึงสามารถกล่าวได้ว่าการใช้วัสดุรองรับชนิดที่มี  $\text{SiO}_2$  เป็นองค์ประกอบสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ เพราะมีความคงทนต่อน้ำและกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในน้ำมันตั้งต้น สามารถเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อลดค่ากรดไขมันอิสระลงได้ เนื่องจาก  $\text{SiO}_2$  มีสมบัติความเป็นกรดจึงทำให้เกิดกระบวนการของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลต่อจากการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันภายใต้การเร่งปฏิกิริยาของ  $\text{CaO}$  (Lani et al., 2019)

## 12. ประโยชน์ของไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่ผลิตจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน (Renewable resource) ได้รับการยอมรับว่าสามารถใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลที่เป็นเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากแหล่งพลังงานฟอสซิลที่มีแนวโน้มจะหมดไปในอนาคต โดยการนำไบโอดีเซลมาใช้แทนหรือผสมกับน้ำมันดีเซลมีข้อดีหรือประโยชน์ดังนี้

1) ไบโอดีเซลเป็นพลังงานที่ไม่มีวันหมดสิ้น สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้เพราะผลิตจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน ไม่ว่าจะเป็นสารอินทรีย์ประเภทน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ สิ่งเหล่านี้สามารถปลูกทดแทน ปลูกซ้ำ และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ กล่าวคือ สามารถปลูกพืชที่ใช้ผลิตไบโอดีเซลเพิ่มได้เมื่อมีความต้องการใช้พืชดังกล่าวเป็นแหล่งวัตถุดิบ จึงเห็นได้ว่าน้ำมันไบโอดีเซลมีศักยภาพในการใช้ทดแทนเชื้อเพลิงจากฟอสซิลได้

2) การใช้ไบโอดีเซลทำให้เกิดผลประหยัดมากกว่าการใช้น้ำมันดีเซล เพราะสามารถผลิตได้ในระดับสเกลที่เล็กกว่า และยังมีวัตถุดิบที่ราคาต่ำกว่าอีกด้วย

3) เป็นการสนับสนุนเกษตรกร เพราะทำให้ระบบการเกษตรมีการขยายกว้างขึ้นเมื่อมีความต้องการพืชน้ำมันที่เพาะปลูกเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล จะทำให้เกษตรกรมีรายได้เพิ่มมากขึ้น และเนื่องจากวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลเป็นพืชที่สามารถปลูกหมุนเวียนได้จึงทำให้เกษตรกรมีรายได้ที่ยั่งยืน

4) มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งจากการศึกษาของห้องปฏิบัติการพลังงานทดแทนแห่งชาติของสหรัฐอเมริกา (US National Renewable Energy Laboratory) พบว่าไบโอดีเซลมีส่วนช่วยให้สิ่งแวดล้อมมีสภาพดีขึ้น เช่น การปลดปล่อย  $\text{CO}_2$  ลดลง และไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพด้านใดในอนาคต

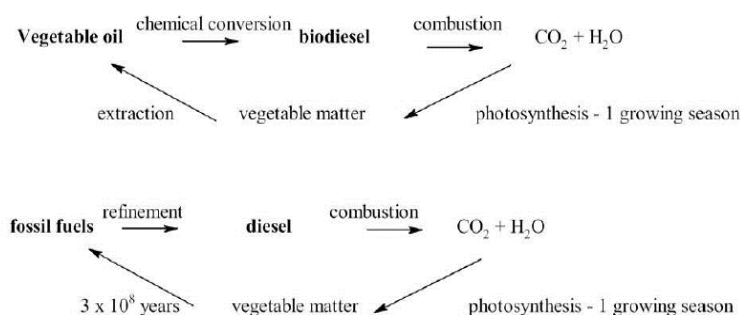
5) ไบโอดีเซลผลิตได้ไม่ยาก เนื่องจากมีการศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีจนทำให้การผลิตไบโอดีเซลง่ายขึ้น สามารถทำได้ไม่ยาก

6) ช่วยลดการใช้ น้ำมันดิบ เพราะน้ำมันไบโอดีเซลถูกผลิตขึ้นมาเพื่อใช้ทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงจากฟอสซิล จึงทำให้การใช้ น้ำมันดิบมีปริมาณลดลง ลดการพึ่งพาทรัพยากรดังกล่าวซึ่งมีอยู่อย่างจำกัด

7) ส่งผลดีต่อเครื่องยนต์ เนื่องจากน้ำมันไบโอดีเซลสามารถหล่อลื่นเครื่องยนต์ได้ดีกว่าการใช้ น้ำมันดีเซล ซึ่งลดการกระชากและการสึกหรอของเครื่องยนต์ และยังปลดปล่อยมลพิษในปริมาณที่น้อยกว่า

8) เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกที่มีความสมบูรณ์แบบ เนื่องจากสามารถใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลได้ โดยไม่ต้องมีการปรับแต่งเครื่องยนต์แต่อย่างใด ซึ่งโดยส่วนมากยานพาหนะส่วนใหญ่ที่ใช้ก๊าซธรรมชาติ (Natural gas) โพรเพน (Propane) หรือเอทานอล จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงหรือปรับปรุงเครื่องยนต์ให้สามารถใช้เชื้อเพลิงทางเลือกได้ และจะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้อีกเมื่อมีการใช้พลังงานใหม่ ซึ่งต่างจากการใช้ไบโอดีเซล

9) น้ำมันดีเซลมีราคาแพงและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งแหล่งวัตถุดิบที่มีอยู่ค่อนข้างจำกัด แต่ไบโอดีเซลเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกที่ผลิตมาจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ จึงทำให้พลังงานทางเลือกนี้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มากไปกว่านั้นน้ำมันไบโอดีเซลยังสามารถย่อยสลายได้ง่าย มีวงจรชีวิตสั้น ไม่ยืนยาวนานเท่าเชื้อเพลิงฟอสซิล ดังแสดงในภาพที่ 17 อีกทั้งไม่เป็นพิษ มีค่าออกซิเจนสูง ไม่มีกำมะถัน มีความหล่อลื่นสูงกว่าน้ำมันดีเซล และในการเผาไหม้จะมีการปล่อยมลพิษในอัตราที่ต่ำกว่าการใช้ น้ำมันดีเซล



ภาพที่ 17 วงจร CO<sub>2</sub> อย่างง่ายของไบโอดีเซลและเชื้อเพลิงฟอสซิลในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน

ที่มา: (Adipah, 2019)

### 13. มาตรฐานคุณสมบัติของไบโอดีเซล

เพื่อหาทางเลือกหรือทางออกในการผลิตเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันจากเชื้อเพลิงฟอสซิล หลายประเทศจึงได้มีการปรับตัวและหันมาผลิตไบโอดีเซลใช้ทดแทนน้ำมันดีเซล ดังนั้นเพื่อสร้างไบโอดีเซลที่มีคุณภาพและสามารถใช้อย่างมีประสิทธิภาพในเครื่องยนต์ จึงต้องมีการสร้างมาตรฐานขึ้นมาเพื่อกำกับการผลิตไบโอดีเซลดังกล่าว ซึ่งแต่ละประเทศล้วนมีมาตรฐานเป็นของตัวเอง อย่างเช่นประเทศไทยที่มีมาตรฐานซึ่งกำกับโดยกรมธุรกิจพลังงาน แต่มาตรฐานที่เป็นสากลจะแบ่งเป็นมาตรฐานไบโอดีเซล ASTM (American Society for Testing and Materials) และ EN (European Standard) ซึ่งจะขอยกตัวอย่างในส่วนของ ASTM D-6751 และ EN 14214 ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 มาตรฐานไบโอดีเซล ASTM D-6751 และ EN 14214

คุณสมบัติ	มาตรฐาน	ASTM D-6751	EN 14214
1. องค์กรประกอบเอสเทอร์ (%)		>96.5	>96.5
2. ความหนืดที่ 40 °C (mm <sup>2</sup> /s)		1.9-6.0	3.50-5.00
3. ความชื้น (%wt)		<0.05	<0.05
4. จุดวาบไฟ (°C)		>120	>120
5. เลขซีเทน		>47	>51
6. ความเป็นกรด (mg KOH/g)		≤0.5	<0.5
7. ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )		860-894	860-900
8. ความคงตัวต่อออกซิเจนที่ 110 °C (h)		>3	>6

ที่มา : (Che et al., 2018)

สำหรับมาตรฐานไบโอดีเซลของประเทศไทยจะถูกกำหนดโดยกรมธุรกิจพลังงานซึ่งมีข้อกำหนดคุณสมบัติของไบโอดีเซลตามกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2556 ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2556

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	วิธีทดสอบ*	
1.	เมทิลเอสเทอร์ (Methyl ester, %wt)	ไม่ต่ำกว่า	96.5	EN 14103
2.	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 °C (Density at °C, kg/m <sup>3</sup> )	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	860 900	ASTM D 1298
3.	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 °C (Viscosity at 40 °C, cSt)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	3.5 5.0	ASTM D445
4.	จุดวาบไฟ (Flash point, °C)	ไม่ต่ำกว่า	120	ASTM D 93
5.	กำมะถัน (Sulphur, %wt)	ไม่สูงกว่า	0.0010	ASTM D 2622
6.	กากถ่านจาก 10% ของส่วนที่เหลือจากการกลั่น (Carbon residue on 10% distillation residue, %wt)	ไม่สูงกว่า	0.30	ASTM D 4530
7.	จำนวนซีเทน (Cetane number)	ไม่ต่ำกว่า	51	ASTM D 613
8.	เถ้าซัลเฟต (Sulphated ash, %wt)	ไม่สูงกว่า	0.02	ASTM D 874
9.	น้ำ (Water, mg/kg)	ไม่สูงกว่า	500	EN ISO 12937
10.	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด (Total contamination, mg/kg)	ไม่สูงกว่า	24	EN 12660
11.	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper strip corrosion)	ไม่สูงกว่า	หมายเลข 1	ASTM D 130
12.	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 °C (Oxidation stability at 110 °C, h)	ไม่ต่ำกว่า	10	EN 15751
13.	ค่าความเป็นกรด (Acid value, mg KOH/g)	ไม่สูงกว่า	0.5	ASTM D 664
14.	ค่าไอโอดีน (Iodine value, g Iodine/100 g)	ไม่สูงกว่า	120	EN 14111
15.	กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ (Linolenic acid methyl ester, %wt)	ไม่สูงกว่า	12.0	EN 14103
16.	เมทานอล (Methanol, %wt)	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14110
17.	โมนอกลิเซอไรด์ (Monoglyceride, %wt)	ไม่สูงกว่า	0.70	EN 14105
18.	ไดกลีเซอไรด์ (Diglyceride, %wt)	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
19.	ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride, %wt)	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
20.	กลีเซอรินอิสระ (Free glycerin, %wt)	ไม่สูงกว่า	0.02	EN 14105
21.	กลีเซอรินทั้งหมด (Total glycerin, %wt)	ไม่สูงกว่า	0.25	EN 14105

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	วิธีทดสอบ*	
22.	โลหะกลุ่ม 1 โซเดียมและโพแทสเซียม (Group I metals (Na+K), mg/kg)	ไม่สูงกว่า	5.0	EN 14538
	โลหะกลุ่ม 2 แคลเซียมและแมกนีเซียม (Group II metals (Ca+Mg), mg/kg)	ไม่สูงกว่า	5.0	EN 14538
23.	ฟอสฟอรัส (Phosphorus, %wt)	ไม่สูงกว่า	5.0	EN 14107
24.	จุดขุ่น (Cloud point, °C)		รายงาน**	
25.	จุดอุดตันการไหลที่อุณหภูมิต่ำ (Cold flow plugging point : CFPP, °C)		รายงาน**	
26.	สารเติมแต่ง #ถ้ามี (Additives #If any)	ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดี		

หมายถึง \* วิธีทดสอบอาจใช้วิธีอื่นที่เทียบเท่าก็ได้ แต่ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดในรายละเอียด

\*\* ให้ผู้ค้าน้ำมันรายงานต่ออธิบดีเป็นรายไตรมาส ภายในวันที่ 15 ของเดือนถัดจากเดือนสุดท้ายของไตรมาสนั้น

ที่มา: (ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน, 2556)

#### 14. การทดสอบการใช้งานไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซล

ในการผลิตเชื้อเพลิงไบโอดีเซลเพื่อใช้ทดแทนหรือใช้ร่วมกับน้ำมันดีเซลจำเป็นต้องมีการทดสอบการใช้งานในเครื่องยนต์เพื่อวัดค่าสมรรถนะต่าง ๆ เปรียบเทียบกับการใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงในการขับเคลื่อน ซึ่งผลการศึกษาค่าจะทำให้ทราบว่าน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้หรือไม่ โดยมีค่าการประเมินสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลซึ่งประกอบไปด้วย ค่าแรงบิดเครื่องยนต์ กำลังเบรก อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์ ซึ่งมีรายละเอียดและวิธีการคำนวณดังนี้

##### 14.1 แรงบิดเครื่องยนต์

แรงบิดเครื่องยนต์ (Torque, T) คือ แรงหมุนข้อเพลลาภายในเครื่องยนต์ ซึ่งจะส่งกำลังของเครื่องยนต์ไปหมุนเกียร์ ล้อ เพลลาช่วงล่าง ให้รถเคลื่อนที่ไปได้ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 ดังนี้

$$T = F \times r$$

สมการที่ 1

โดย T คือ แรงบิดที่วัดได้จากเพลลาเครื่องยนต์ (Nm)

$r$  คือ รัศมีของน้ำหนักโหลด (m)

$F$  คือ แรงที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลกคูณด้วยน้ำหนักของโหลด ( $N$ ) สามารถคำนวณได้ตั้งสมการที่ 2 คือ

$$F = W \times g \quad \text{สมการที่ 2}$$

โดย  $W$  คือ น้ำหนักของโหลด (kg)

$g$  คือ ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $9.81 \text{ m/s}^2$

#### 14.2 กำลังเบรกเครื่องยนต์

กำลังเบรก (Brake Power,  $P$ ) คือ กำลังของเครื่องยนต์ที่วัดได้จากเพลาค้อเหวี่ยงโดยตรง และเป็นกำลังที่นำไปใช้งาน ซึ่งเป็นกำลังที่เหลือจากการเอาชนะความฝืดหรือความเสียดทานต่าง ๆ เครื่องมือที่ใช้ในการวัดหากำลังเบรกเรียกว่า “ไดนาโมมิเตอร์” โดยจะวัดออกมาในรูปของแรงบิดและรอบการหมุนของเครื่องยนต์ แล้วจึงนำค่าของแรงบิดที่ได้ไปคำนวณหากำลังเบรกอีกครั้งหนึ่ง สำหรับกำลังเบรกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3 ดังนี้

$$P = 2\pi TN \quad \text{สมการที่ 3}$$

โดย  $P$  คือ กำลังเบรก (kW)

$T$  คือ แรงบิดเครื่องยนต์ (kNm)

$N$  คือ จำนวนรอบของเครื่องยนต์ (s)

#### 14.3 อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง

อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel consumption,  $FC$ ) จะเป็นสิ่งที่ช่วยชี้ให้เห็นถึงสมรรถนะของเครื่องยนต์แต่ละเครื่องได้ การเปรียบเทียบความสามารถการผลิตกำลังส่งออกของเครื่องยนต์ที่ได้จากเชื้อเพลิงจำนวนหนึ่ง ความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงได้ถูกกำหนดให้เป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ต่อช่วงเวลาหนึ่ง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4 ดังนี้

$$FC = \frac{m}{t} \quad \text{สมการที่ 4}$$

เมื่อ  $FC$  คือ อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (kg/h)

m คือ ปริมาณเชื้อเพลิง (kg)

t คือ เวลาที่เชื้อเพลิงถูกใช้ไป (h)

#### 14.4 อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะ

อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific fuel consumption, SFC) หมายถึง อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงต่อกำลังที่เครื่องยนต์ผลิตได้ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 5 ดังนี้

$$SFC = \frac{FC}{P}$$

สมการที่ 5

โดย SFC คือ อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะ (kg/kWh)

FC คือ อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (kg/h)

P คือ กำลังเบรคเครื่องยนต์ (kW)

#### 14.5 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) หมายถึง ค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อหน่วยการผลิตหรือกำลังที่ได้ เป็นค่าที่แสดงถึงความสิ้นเปลืองของพลังงานที่ใส่เข้าไป ซึ่งถ้าเครื่องยนต์มีกำลังมาก ความสิ้นเปลืองดังกล่าวก็จะมีค่าน้อย สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 6 ดังนี้

$$SEC = \frac{FC \times HV}{P}$$

สมการที่ 6

โดย SEC คือ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kWh)

FC คือ อัตราความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (kg/h)

HV คือ Heating value เป็นค่าความร้อนของน้ำมันเชื้อเพลิง (MJ/kg)

P คือ กำลังเบรคเครื่องยนต์ (kW)

#### 14.6 ประสิทธิภาพความร้อนของเครื่องยนต์

ประสิทธิภาพความร้อน (Thermal efficiency) จะเป็นตัวชี้ให้ทราบว่าเครื่องยนต์มีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานความร้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงให้เป็นพลังงานกลได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งจะเป็นค่าของกำลังที่ได้ต่อค่าพลังงานที่ใส่เข้าไป โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 7 ดังนี้

$$\eta_{th} = \frac{P}{FC \times HV} \times 100\%$$

สมการที่ 7

โดย  $\eta_{th}$  คือ ประสิทธิภาพความร้อนของเครื่องยนต์ (%)  
 P คือ กำลังเบรคเครื่องยนต์ (kW)  
 FC คือ อัตราความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (kg/s)  
 HV คือ ค่าความร้อนของน้ำมันเชื้อเพลิง (MJ/kg)

#### 15. การวิเคราะห์ค่าทางเศรษฐศาสตร์

สำหรับการวิเคราะห์ค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษางานวิจัยเรื่องการผลิตไบโอดีเซล โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าเปลือกหอยบนตัวรองรับซิลิกาเถ้าแกลบข้าว จะเป็นไปในด้านของการศึกษาต้นทุนและจุดคุ้มทุน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ต้นทุนมีนิยามแตกต่างกัน 2 รูปแบบ ซึ่งต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ (Economic cost) มีความแตกต่างกับต้นทุนทางบัญชี (Accounting cost) เนื่องจากต้นทุนทางบัญชีสามารถวัดค่าที่ใช้จ่ายไปให้อยู่ในรูปของตัวเงินได้เพียงอย่างเดียว หรือเรียกได้ว่าเป็นต้นทุนที่เห็นแจ้งชัด (Explicit cost) แต่สำหรับต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ จะเป็นค่าที่รวมไปถึงค่าใช้จ่ายที่เสียไปในรูปแบบที่สามารถวัดเป็นตัวเงินได้และวัดเป็นตัวเงินไม่ได้ กล่าวคือจะมีทั้งต้นทุนที่เห็นแจ้งชัดและต้นทุนที่เห็นไม่แจ้งชัด (Implicit cost) ในต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ โดยสามารถเรียกต้นทุนที่มองไม่เห็นนี้ได้ว่า “ต้นทุนค่าเสียโอกาส (Opportunity cost)” ซึ่งเป็นต้นทุนอีกตัวหนึ่งที่ต้องมีการประเมิน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าต้นทุนทางบัญชีจะมีค่าน้อยกว่าต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์เนื่องจากว่ามีเพียงแค่ต้นทุนที่เห็นได้แจ้งชัดเท่านั้น แต่จะมีผลด้านกำไรที่สูงกว่ากำไรทางเศรษฐศาสตร์

ต้นทุนหมายถึงมูลค่าของทรัพยากร ปัจจัยการผลิต หรือค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้ในการดำเนินงาน และการจัดการในการประกอบกิจการใด ๆ ก็ตาม ซึ่งในทางเศรษฐศาสตร์นั้นต้นทุนจะเกิดขึ้นจากการที่มีการใช้ทรัพยากรในการจัดกิจกรรมใดกิจกรรมหนึ่ง โดยไม่สามารถนำทรัพยากรนั้น ๆ มาใช้ในกิจกรรมอื่น ๆ ได้ จึงทำให้เกิดการสูญเสียมูลค่าของการผลิตกิจกรรมที่เป็นทางเลือกอื่นไป ซึ่งมูลค่าการสูญเสียดังกล่าวเรียกว่าค่าเสียโอกาส แต่ในทางบัญชีแล้วต้นทุนจะหมายถึงมูลค่าทรัพยากรที่ถูกตีค่าเป็นตัวเลขหรือตัวเงิน เช่น วัตถุดิบหรือวัสดุต่าง ๆ รวมทั้งค่าใช้จ่ายที่หน่วยงานต้องจ่ายไปเพื่อให้ได้มาซึ่งทรัพยากรที่ใช้ในการผลิต เช่น ค่าจ้างงานในรูปแบบของค่าตอบแทนหรือเงินเดือน เป็นต้น ซึ่งต้นทุนสามารถจำแนกประเภทได้ดังนี้

1) ต้นทุนคงที่ (Fixed cost) คือ ต้นทุนที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณการผลิตที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาหนึ่ง แต่ต้นทุนคงที่ต่อหน่วยจะลดลงเมื่อปริมาณการผลิตเพิ่มขึ้น ต้นทุนคงที่นี้มักจะถูกจัดสรรให้แผนกต่าง ๆ ด้วยวิธีจัดสรรตามที่ผู้บริหารกำหนด และการควบคุมต้นทุนคงที่นี้จะอยู่ในความรับผิดชอบของผู้บริหารส่วนกลาง (ศิริวรรณ ว่องวีรวิฑูมิ, 2553) ซึ่งต้นทุนคงที่สามารถแยกประเภทได้ดังนี้

1.1) ต้นทุนคงที่ระยะยาว (Committed fixed cost) จะอยู่ในรูปแบบของค่าเสื่อมราคา ค่าเช่า ค่าประกันภัยทรัพย์สิน ภาษีทรัพย์สินประจำ และเงินเดือน หรือสวัสดิการของผู้บริหารระดับสูง โดยต้นทุนเหล่านี้จะเกิดขึ้นเนื่องจากการวางแผนระยะยาวที่เกี่ยวกับการลงทุน การผลิต และการตลาด ซึ่งจะไม่มีการลดลงเมื่อมีนิตการหยุดงานหรือหยุดการผลิต (ศิริวรรณ ว่องวีรวิฑูมิ, 2553)

1.2) ต้นทุนคงที่ระยะสั้น (Discretionary fixed cost) จะเกิดขึ้นจากการตัดสินใจของผู้บริหารเป็นครั้งคราว ดังนั้นต้นทุนประเภทนี้จะอยู่คงที่เฉพาะช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งเท่านั้น โดยปกติต้นทุนคงที่ประเภทนี้ จะเกิดจากการตั้งโครงการและงบประมาณของผู้บริหารเป็นรายปี โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนส่วนนี้กับปริมาณการผลิตไม่มีความสัมพันธ์กัน ยกตัวอย่างได้แก่ ค่าโฆษณา ค่าใช้จ่ายในการค้นคว้าวิจัย ค่าใช้จ่ายในการอบรม เป็นต้น (ศิริวรรณ ว่องวีรวิฑูมิ, 2553)

2) ต้นทุนแปรได้ (Variable cost) เป็นต้นทุนที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณการผลิตในอัตราเส้นตรง ซึ่งต้นทุนแปรได้ต่อหน่วยจะคงที่ทุกระดับการผลิต แต่ต้นทุนแปรได้จะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณการผลิต ดังนั้นการคำนวณต้นทุนแปรได้ที่เกิดขึ้นในแต่ละแผนกจึงควรคำนวณอย่างถูกต้อง ซึ่งการควบคุมต้นทุนแปรได้จะอยู่ในความรับผิดชอบของหัวหน้าแผนก (ศิริวรรณ ว่องวีรวิฑูมิ, 2553) โดยต้นทุนแปรได้สามารถแยกประเภทได้อีกดังนี้

2.1) ต้นทุนแปรได้โดยตรง (Direct variable cost) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับต้นทุนวัตถุดิบ ค่าแรงกับปริมาณการผลิต เมื่อปริมาณการผลิตเพิ่มสูงขึ้น ต้นทุนวัตถุดิบและค่าแรงก็จะเพิ่มขึ้นในอัตราเดียวกัน และเมื่อปริมาณการผลิตลดลงจะส่งผลให้ต้นทุนวัตถุดิบและค่าแรงลดลงตามไปด้วย (ศิริวรรณ ว่องวีรวิฑูมิ, 2553)

2.2) ต้นทุนแปรได้ทางอ้อม (Indirect variable cost) จะแปรตามปริมาณการผลิต ถึงแม้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในการผลิตและผลิตภัณฑ์จะเห็นได้ไม่ชัดเจนก็ตาม ซึ่งตัวอย่างของต้นทุนแปรได้ทางอ้อมได้แก่ ต้นทุนค่าน้ำมันหล่อลื่น ค่าวัสดุในการซ่อมแซม ค่าน้ำประปา และค่าไฟฟ้า เป็นต้น โดยต้นทุนแปรได้ทางอ้อมเหล่านี้อาจจะไม่แปรตามปริมาณการผลิตในอัตราส่วนเดียวกัน ทั้งนี้เพราะกิจการต้องใช้ต้นทุนแปรได้ทางอ้อมนี้จำนวนหนึ่งเพื่อเตรียมการผลิตแม้ว่าไม่ได้มีการผลิตเกิดขึ้นเลยในกิจการ (ศิริวรรณ ว่องวีรุฒิ, 2553)

3) ต้นทุนค่าเสียโอกาส (Opportunity cost) คือมูลค่าหรือประโยชน์ของผลตอบแทนจากกิจกรรมที่สูญเสียโอกาสไปในการนำสินทรัพย์ไปเลือกใช้ในการเลือกทำกิจกรรมอย่างใดอย่างหนึ่ง

จากที่กล่าวไปทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า ต้นทุนทางบัญชีรวมคือต้นทุนที่ประกอบด้วยต้นทุนคงที่รวม (Total Fixed Cost, TFC) และต้นทุนแปรผันรวม (Total Variable Cost, TVC) และในส่วนของต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์รวมคือต้นทุนที่ประกอบด้วยต้นทุนคงที่รวม ต้นทุนแปรผันรวม รวมกับต้นทุนค่าเสียโอกาสรวม (Total Opportunity Cost, TOC)

จุดคุ้มทุน (Break-Even Point, BEP) หมายถึง ระดับการดำเนินงานที่ทำให้กิจการมียอดขายรวมเท่ากับต้นทุนรวมพอดีหรือทำให้มีกำไรเท่ากับศูนย์ ทั้งนี้การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน (Breakeven analysis) เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนคงที่ ต้นทุนแปรผัน ราคา และปริมาณ ซึ่งการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนจะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุน ปริมาณ และกำไร กล่าวคือหากต้นทุนรวมสูง ส่งผลให้จุดคุ้มทุนสูง ซึ่งจะทำให้กำไรต่ำ โดยจุดคุ้มทุนมีความสำคัญต่อผู้ประกอบการในด้านการวางแผนการผลิต หากผู้ประกอบการสามารถควบคุมต้นทุนรวมได้ ก็จะสามารถควบคุมจุดคุ้มทุนและกำไรได้ ซึ่งจุดคุ้มทุนยังมีความสำคัญต่อการตัดสินใจของผู้ประกอบการอีกด้วย เพราะสถานการณ์แวดล้อมทางธุรกิจในปัจจุบันมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา จึงทำให้การตัดสินใจระยะสั้นมีความจำเป็นและสำคัญอย่างยิ่ง ดังนั้นการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนจะช่วยให้ผู้ประกอบการมีข้อมูลเพื่อใช้ในการวางแผนการควบคุมต้นทุน วางแผนการขายหรือวางแผนกำไร ตลอดจนใช้เป็นข้อมูลในการตัดสินใจระยะสั้นเกี่ยวกับการดำเนินงานต่าง ๆ ได้แก่ การรับคำสั่งซื้อใหม่ การกำหนดราคาขาย การส่งเสริมการขาย การจ้างพนักงานขายเพิ่ม ตลอดจนสามารถใช้ในการประเมินผลการปฏิบัติงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ (ศิริวรรณ ว่องวีรุฒิ, 2553) ซึ่งวิธีการคำนวณหากำไรส่วนเกินต่อหน่วย ปริมาณ และรายได้ ณ จุดคุ้ม จะมีวิธีการคำนวณดังสมการที่ 8-11 และในส่วนเพิ่มเติมจะมีการคิดระยะเวลาคืนทุน (Payback Period: PB) ซึ่งหมายถึง ระยะเวลาของการลงทุนที่ยอดขายรวมเท่ากับต้นทุนรวมพอดีหรือทำให้มีกำไรเท่ากับศูนย์ กล่าวได้ว่าการลงทุนไม่มีกำไรและไม่ขาดทุนนั่นเอง ระยะเวลาคืนทุนเป็นเครื่องมือในการประเมินความเป็นไปได้ของการลงทุนอย่างง่ายและไม่ซับซ้อน เป็นการประเมินคร่าว ๆ และรวดเร็ว ซึ่งสามารถคำนวณได้ด้วยการใช้สมการที่ 11

กำไรส่วนเกินต่อหน่วย (บาท) = ราคาขายต่อหน่วย - ต้นทุนผันแปรต่อหน่วย สมการที่ 8

จุดคุ้มทุน (หน่วย) = ต้นทุนคงที่ / กำไรส่วนเกินต่อหน่วย สมการที่ 9

จุดคุ้มทุน (บาท) = จุดคุ้มทุน (หน่วย) × ราคาขายต่อหน่วย สมการที่ 10

ระยะเวลาคืนทุน (ปี) = ต้นทุนคงที่ / (กำไรส่วนเกินต่อหน่วย × ปริมาณหน่วยที่ผลิตได้ต่อปี)  
สมการที่ 11

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษางานวิจัยเรื่องการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าเปลือกหอยบนตัวรองรับซิลิกาเถ้าแกลบข้าวมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

Venkata and Subramanyam (2016) ประเมินผลกระทบทางสุขภาพจากการบริโภคน้ำมันพืชที่ผ่านการให้ความร้อนซ้ำหลายครั้ง โดยใช้หนูทดลอง (Wistar rat) ทดสอบในการประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้น ผลการศึกษาพบว่าน้ำมันใช้แล้ว (Repeatedly heated cooking oil : RHCO) มีสารเปอร์ออกไซด์สูงกว่าน้ำมันที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน (Unheated/singly heated oil) ส่วนในด้านการตรวจทางจุลพยาธิวิทยาพบที่เกิดความเสียหายอย่างมีนัยสำคัญในส่วนของลำไส้เล็กส่วนกลาง (Jejunum) ลำไส้ใหญ่ (Colon) และตับ (Liver) ของสัตว์ทดลองที่มีการบริโภคน้ำมันที่ผ่านการทอดซ้ำ 3 ครั้ง และพบอีกว่าปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระในรูปของเอนไซม์มีการเปลี่ยนแปลงเพื่อตอบสนองต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้น ส่วนการวิเคราะห์ตัวอย่างเลือดพบว่าระดับน้ำตาล (Glucose) ครีเอตินิน (Creatinine) และคอเลสเตอรอล (Cholesterol) มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเมื่อโปรตีนและอัลบูมิน (Albumin) ในน้ำมันทอดซ้ำลดลง แต่ตัวแปรทางโลหิตวิทยาไม่มีผลนัยสำคัญทางสถิติระหว่างกลุ่มตัวอย่างและกลุ่มทดลอง แต่อย่างไรก็ตามสามารถสรุปได้ว่าน้ำมันทอดซ้ำก่อให้เกิดการสร้างอนุมูลอิสระและทำให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพ

Gumba et al. (2016) ศึกษาวิจัยที่เกี่ยวกับการผลิตไบโอดีเซลที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในด้านของการใช้วัตถุดิบ ตัวเร่งปฏิกิริยา และเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิต ผลการศึกษาพบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบกันระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์และตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์สามารถตอบโจทย์เรื่องของเศรษฐศาสตร์ได้มากกว่า เพราะสามารถแยกเอาตัวเร่งปฏิกิริยาออกได้ง่ายในขั้นตอนการทำผลผลิตให้บริสุทธิ์ ส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์สูง อีกทั้งยังสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำได้ จึงลดต้นทุนการผลิตและลดปัญหาการก่อเกิดอันตรายต่อ

สิ่งแวดล้อมได้ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้มากที่สุด คือ CaO เพราะมีอายุการเก็บรักษานาน มีความเป็นต่างสูง มีสภาวะการทำปฏิกิริยาดี และมีราคาต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ชนิดอื่น และเมื่อทำการเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ชนิดเบสและกรดพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสมีข้อดีมากกว่า เนื่องจากให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่า และใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่ำกว่า แต่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ชนิดเบสยังมีข้อจำกัดด้านการเสื่อมสภาพได้ง่ายเมื่อมีการใช้น้ำมันตั้งต้นที่มีค่ากรดไขมันอิสระและน้ำเป็นองค์ประกอบสูง อีกทั้งเมื่อสัมผัสกับอากาศจะทำให้สารตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้เกิดการเสื่อมสภาพได้ง่าย

Mohadesi et al. (2014) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกโลหะออกไซด์ของธาตุหมู่ 2 (Alkaline earth) ที่สังเคราะห์ขึ้นจากวิธีโซลเจล ซึ่งได้แก่ CaO MgO และ BaO ฉาบ (Doping) ลงบน SiO<sub>2</sub> และจะถูกนำไปแคลไซน์ต่อที่อุณหภูมิ 650 °C เป็นเวลา 3 h โดยมีการศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่าง CaO/SiO<sub>2</sub>, MgO/SiO<sub>2</sub> และ BaO/SiO<sub>2</sub> ที่ความเข้มข้น 40 60 และ 80% จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ไปพิจารณาลักษณะทางกายภาพด้วยเทคนิค XRD และทำการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันข้าวโพดผสมด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่มีการใช้อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 16:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 6%wt อุณหภูมิ 60 °C กวนผสมสาร 600 rpm เป็นเวลา 8 h ผลการศึกษาพบว่าการใช้ตัวเร่ง CaO/SiO<sub>2</sub> MgO/SiO<sub>2</sub> และ BaO/SiO<sub>2</sub> ที่ความเข้มข้น 60% ทำให้ได้เกิดผลผลิตไบโอดีเซลและเมทิลเอสเทอร์สูงสุด โดยการใช้ตัวเร่ง CaO/SiO<sub>2</sub> ทำให้เกิดผลผลิตไบโอดีเซลและเมทิลเอสเทอร์สูงที่สุด รองลงมาคือ MgO/SiO<sub>2</sub> และ BaO/SiO<sub>2</sub> ตามลำดับ และผลผลิตที่ได้มีค่าความหนาแน่น ความหนืด จุดไหลเท และจุดขุ่นมัวอยู่ในช่วงมาตรฐาน ASTM D6751

Moradi et al. (2015) ศึกษาเปรียบเทียบการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ 2 ชนิด ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้ว โดยสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยแมลงภู่ และตะกอนของน้ำปราศจากแร่ธาตุ (Demineralized (DM) water) โดยทำการเผาแคลไซน์เปลือกหอยแมลงภู่ที่ 1,050 °C 2 h ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา DM water จะเผาแคลไซน์ตะกอนที่ 800 900 และ 1,000 °C เป็นเวลา 2 h จากนั้นนำไปศึกษาคุณสมบัติด้วยเทคนิค XRD และ XRF ผลพบว่าเปลือกหอยแมลงภู่มี่ Ca ประมาณ 70% ส่วนตะกอน DM water ที่ผ่านการแคลไซน์ 900 °C มี Ca และ Mg เป็นองค์ประกอบ 60% ซึ่งหลังจากนำตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้ไปใช้ในการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอน ได้แก่ การใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อลดค่ากรดของน้ำมันตั้งต้นลงก่อน โดยใช้ H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 5%wt อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 18:1 ที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 5 h ผลปรากฏว่าได้น้ำมันใช้แล้วมีค่ากรดลดลงเหลือ 0.49 mg KOH/g ซึ่งสามารถนำไปผลิตไบโอดีเซลต่อด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่มีการศึกษาปัจจัยด้านอุณหภูมิ 328-348 K และเวลา 1-8 h พบว่าการใช้อุณหภูมิ 348

K เป็นเวลา 8 h และมีการผสมสาร 350 rpm ก่อให้เกิดผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุด โดยในส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเปลือกหอยแมลงภู่อัตราส่วน 12%wt ภายใต้การใช้อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 24:1 ได้ผลผลิต 83% ส่วนตัวเร่งจากตะกอน DM water ปริมาณ 9.08%wt ภายใต้การใช้อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 22.5:1 ได้ผลผลิต 84% และเมื่อมีการนำไปใช้ซ้ำ 5 ครั้ง พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจากตะกอน DM water มี Ca และ Mg เหลือมากถึง 58% ขณะที่เปลือกหอยแมลงภู่อัตราส่วน Ca เหลือเพียง 28% เท่านั้น

ซิ่นสุมน ยิ้มถิ่น และคณะ (2559) ศึกษาการผลิตและตรวจสอบคุณภาพของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากวัสดุเหลือทิ้ง 2 ชนิด คือ เปลือกหอยแครงและกระดูกหมู ที่ถูกนำไปแคลไซน์ 900 °C 6 h พร้อมทั้งศึกษาการสึกหรอของเครื่องยนต์ที่มีการใช้น้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้ ผลการวิเคราะห์สมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค AAS และ XRD พบว่าเปลือกหอยแครงที่ผ่านการแคลไซน์มีปริมาณ CaO 98.04% ส่วนกระดูกหมูมี CaO เพียง 52.25% โดยหลังจากนำไปผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอน เพื่อลดค่ากรดของน้ำมันใช้แล้วด้วยการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันก่อน ภายใต้เงื่อนไขการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 65-70 °C เป็นเวลา 4-6 h ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 5%wt ของ FFA และใช้เมทานอล 15%wt ของน้ำมันตั้งต้น ผลพบว่าน้ำมันตั้งต้นมีค่า FFA เหลืออยู่เพียง 0.7030% ซึ่งสามารถนำไปผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันต่อได้ ภายใต้การใช้อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 18:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3%wt ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60±5 °C และมีการกวนผสม 500 rpm เป็นเวลา 6 h ผลพบว่าไบโอดีเซลที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาเปลือกหอยแครงมีปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากกระดูกหมู 72.29% และ 50.53% ตามลำดับ และยังรวมไปถึงค่าความหนืด จุดวาบไฟ ความเป็นกรด ค่าความร้อน และจุดไหลเท ที่ยังมีคุณภาพสูงกว่าอีกด้วย และในส่วนของผลการวิเคราะห์การใช้น้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากน้ำมันใช้แล้ว 100% เทียบกับการใช้น้ำมันดีเซล ปรากฏว่าการใช้น้ำมัน B100 ในเครื่องยนต์มีอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันมากกว่าการใช้น้ำมันดีเซล 0.620 และ 0.597 L/h ตามลำดับ โดยในส่วนของผลการสึกหรอมีค่าใกล้เคียงกับเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลมาตรฐาน

Yen-Ping et al. (2018) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วโดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่ เพื่อแก้ปัญหาต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลและเพื่อเพิ่มราคาให้กับวัสดุเหลือทิ้งทั้งในส่วนของน้ำมันใช้แล้วและเปลือกไข่ ซึ่งจะนำเปลือกไข่ไปแคลไซน์ที่ 1,000 °C 2 h ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค XRD FTIR และ BET พบว่าเปลือกไข่หลังแคลไซน์มีความเป็นเบสเพิ่มสูงขึ้นเป็น 12.62 มีความเป็น CaO (เดิมเป็น CaCO<sub>3</sub>) มากขึ้น โดยมีองค์ประกอบ Ca ประมาณ 66.77% และเมื่อนำไปใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลภายใต้เงื่อนไขการทำปฏิกิริยาที่มีการใช้เวลา 120-210 °C อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 7:1-11:1 อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา

ด้วยเตาอบไมโครเวฟ 45-85 °C และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3-7%wt พบว่าการใช้เวลาทำปฏิกิริยา 120 min อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1 อุณหภูมิ 65 °C และปริมาณตัวเร่ง 5%wt ทำให้เกิดผลผลิตไบโอดีเซลสูงถึง 87.8%

Kaewdang et al. (2017) ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลด้วยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO จากเปลือกหอยขมที่ผ่านการแคลไซน์ 800 °C 4 h พบว่าจากการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค XRD XRF และ SEM ทำให้ทราบว่าตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีองค์ประกอบหลักเป็น CaO ซึ่งเมื่อนำไปใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากใช้น้ำมันใช้ ภายใต้สภาวะการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1-3%wt อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 9:1 และ 12:1 เวลา 1-3 h และอุณหภูมิ 65 °C พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวีริชันชนิดนี้ไม่ก่อให้เกิดน้ำเสีย เพราะสามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดผลผลิต 92.5% คือ การใช้อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมันที่ 9:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3%wt และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 h โดยไบโอดีเซลที่ได้มีค่ามาตรฐานอยู่ในช่วงที่กรมธุรกิจพลังงานของประเทศไทยกำหนด

Nabora et al. (2019) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดนาโบลาลัม (*Parinari curatellifolia* seeds oil) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าเปลือกฝักมะขาม (*Tamarindus Indica* fruit shell ash) ที่ถูกแคลไซน์ 800 °C 3 h ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค TGA, BET, XRD, SEM, XRF และ Hammett indicator พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีค่าความเป็นเบสสูง มีลักษณะพื้นผิวเป็นรูพรุนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 nm และมีองค์ประกอบเป็น CaO KO และ MgO สูง โดยเมื่อนำไปผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่มีการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา ได้แก่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1-6%wt อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1, 6:1, 9:1 และ 12:1 เวลาการทำปฏิกิริยา 1-4 h อุณหภูมิ 60 °C และมีการกวนผสมสาร 3,000 rpm พบว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน และเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมอยู่ที่ 5%wt 9:1 และ 2 h เนื่องจากก่อให้เกิดผลผลิตไบโอดีเซลสูงถึง 96.2% ซึ่งเมื่อนำไปทดสอบค่าความเป็นกรด ความหนืด จุดวาบไฟ จุดไหลเท และจุดขุ่นมัว จะอยู่ในช่วงมาตรฐาน ASTM D6751 และในส่วนของการศึกษาการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าสามารถใช้ซ้ำได้อีก 4 ครั้ง จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีประสิทธิภาพในการผลิตไบโอดีเซล สามารถแยกออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย ราคาต่ำ และเตรียมได้ไม่ยาก

Singharun and Nirunsin (2017) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าขี้มวล 2 ชนิด ได้แก่ เถ้ากาบมะพร้าว (Coconut ash) และเถ้าไม้ลำไย (Longan ash) ที่ถูกแคลไซน์ด้วยอุณหภูมิ 300 600 และ 900 °C เป็นเวลา 4 h จากนั้นนำไปวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและการกระจายพลังงานด้วยเทคนิค SEM และ EDS และในส่วน

การศึกษาการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจะมีการศึกษาอัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1-12:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้า 1%wt ใช้อุณหภูมิและเวลาการทำปฏิกิริยา 60 °C และ 1 h ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า การแคลไซน์เถ้าที่อุณหภูมิ 900 °C ทั้งในเถ้ากาบมะพร้าวและเถ้าไม้ลำไย ทำให้เกิดผลผลิตไบโอดีเซลสูงที่สุดที่อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1 ซึ่งการใช้เถ้ากาบมะพร้าวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาก่อให้เกิดผลผลิตสูงถึง 98.57% ซึ่งมีคุณสมบัติความเป็นเมทิลเอสเทอร์ 97% และมีคุณสมบัติอื่น ๆ เช่น ความหนืด ความหนาแน่น และค่าความเป็นกรด อยู่ในช่วงเกณฑ์มาตรฐาน EN และ ASTM อีกด้วย

ปิยรัตน์ศิริ พันธุ์จันทร์ (2556) สังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร 6 ชนิด ได้แก่ ไม้ลำไย (*Dimocarpus longan*) ขนุน (*Artocarpus heterophyllus*) มะขาม (*Tamarindus indica*) เต็ง (*Shorea obtuse*) ถ่าน และขี้เถ้าผสม ซึ่งถูกเผาด้วยเตาเผาโบราณหรือเตาอังโล่ (อุณหภูมิการเผาเฉลี่ย 600 °C (สุรเชษฐ์ วรศรี, 2558)) จนไม่ถูกเผาจนหมดเหลือแต่เศษขี้เถ้า ซึ่งจะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ร่วมกับ EDS นอกจากนั้นยังศึกษาสภาวะต่าง ๆ ของการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ได้แก่ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโมลแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ผลการศึกษาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าแต่ละชนิดมีค่า pH ใกล้เคียงกับ KOH โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าไม้ลำไย ทั้งในส่วนของการไบโอดีเซลชนิดเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ซึ่งมีค่า 92% และ 89% ตามลำดับ ภายใต้สภาวะการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 g เมทานอลหรือเอทานอล 40 ml ต่อน้ำมัน 10 g หรือคิดเป็นอัตราส่วนโมลต่อน้ำมัน 100:1 ที่อุณหภูมิ 60 °C เวลา 60 min ซึ่งไบโอดีเซลที่ได้มีค่ามาตรฐานผ่านเกณฑ์ ASTM และ EN

พัชยาภรณ์ สิงห์รัญ (2561) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าชีวมวล ได้แก่ เถ้ากาบมะพร้าว เถ้าไม้ลำไย และเถ้าแกลบข้าว ที่มีแคลไซน์ด้วยอุณหภูมิ 300 600 และ 900 °C เป็นเวลา 4 h ซึ่งจะถูกนำไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยาและการกระจายพลังงานด้วยเทคนิค SEM และ XRD ตามลำดับ จากนั้นทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่มีการศึกษาเงื่อนไขการผลิตด้านปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 2 และ 3%wt และอัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1 6:1 9:1 และ 12:1 โดยมีอุณหภูมิและเวลาการทำปฏิกิริยา 60 °C และ 1 h ตามลำดับ ผลการศึกษาลักษณะของเถ้าทั้ง 3 ชนิด พบว่าเมื่อมีการให้อุณหภูมิแคลไซน์เพิ่มสูงขึ้น เถ้ากาบมะพร้าวและเถ้าไม้ลำไยจะมีองค์ประกอบเป็น Ca มากขึ้น ในขณะที่เถ้าแกลบข้าวมีองค์ประกอบเป็น Si มากกว่า และเมื่อนำมาผลิตไบโอดีเซลพบว่าการใช้เถ้ากาบมะพร้าวและเถ้าไม้ลำไยที่ผ่านการแคลไซน์ 900 °C ทำให้เกิดผลผลิตสูงที่สุด 98.57% และ

95.32% ตามลำดับ ภายใต้เงื่อนไขอัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt ซึ่งเมื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติค่าความเป็นกรด ค่าความหนาแน่น ค่าความหนืด จุดวาบไฟ ค่าความร้อน และปริมาณเมทิลเอสเทอร์ พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงมาตรฐาน ASTM และ EN มีเพียงแค่ถ้า แกลบข้าวเท่านั้นที่ให้ผลผลิตต่ำมาก และไม่เพียงพอต่อการทดสอบคุณสมบัติ ในส่วนเพิ่มเติมจะมีการทดสอบใช้งานไบโอดีเซลที่ผลิตได้กับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก ผลพบว่าการใช้ไบโอดีเซลทำให้เครื่องยนต์มีค่าแรงบิด กำลังเบรก แรงม้า และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูงกว่าการใช้ B5 และดีเซล มีเพียงแค่ค่าอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเท่านั้นที่มีค่าต่ำกว่า จึงสรุปได้ว่าไบโอดีเซลที่ผลิตได้สามารถใช้งานกับเครื่องยนต์ดีเซลได้จริง

อัจฉรา อิ่มคำ พุฒคำ และอภิพงษ์ พุฒคำ (2557) จัดทำบทความปริทัศน์การสังเคราะห์และคุณลักษณะของ CaO ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ได้รับความนิยมนำมาใช้ผลิตไบโอดีเซลอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถผลิตได้จากวัสดุธรรมชาติและของเสียจากอุตสาหกรรม สามารถหาได้ง่าย และราคาไม่สูงมาก นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติความเป็นต่างสูง ให้ผลผลิตไบโอดีเซลประมาณ 80-98% แต่สามารถละลายในแอลกอฮอล์ได้น้อยเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มอัลคาไลน์เอิร์ธด้วยกัน จึงสามารถแยกออกมาจากผลิตภัณฑ์ได้ง่ายกว่า แต่อย่างไรก็ตามความเร็วในการทำปฏิกิริยาด้วยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานี้ยังช้ากว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ จึงต้องมีการเพิ่มประสิทธิภาพของ CaO ด้วยการสังเคราะห์ให้มีพื้นที่ผิวและความแรงของเบสเพิ่มขึ้น รวมทั้งทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กกลงเพื่อใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยพบว่าการให้ความร้อน 800 °C ทำให้ CaO มีบริเวณเร่งที่มีความเป็นเบสโดยรวม (Total basic site) และมีพื้นที่ผิวเพิ่มสูงขึ้น ช่วยให้เกิดผลผลิตในปริมาณใกล้เคียงกับการผลิตไบโอดีเซลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์

Uprety et al. (2016) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (Refined Bleached and Deodorized palm oil, RBD palm oil) ด้วยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ CaO และ CaO บนตัวรองรับ  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เปรียบเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ NaOH ในการศึกษา จะมีการเตรียม CaO ด้วยการแคลไซน์ 600 °C 4 h ส่วนการเตรียมตัวเร่ง CaO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> จะใช้วิธีการเตรียมแบบเคลือบฝัง ซึ่งมีการแคลไซน์อีกครั้งที่ 718 °C 5 h ผลจากการนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล พบว่าการใช้ CaO (ปริมาณตัวเร่ง 9%wt อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 12:1 อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 60 °C เวลา 2 h) ให้ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ 96.75% และกลีเซอริน 92.73% ซึ่งมีความบริสุทธิ์ของสารน้อยกว่าการใช้ CaO/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (ปริมาณตัวเร่ง 9%wt อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 15:1 อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 60 °C 3 h) ที่ให้ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ 97.66% และกลีเซอริน 96.36% ซึ่งไบโอดีเซลที่ได้จากทั้งสองส่วนมีค่าคุณสมบัติอยู่ในช่วงมาตรฐาน

EN และ ASTM และจากผลดังกล่าวทำให้ทราบว่า การใช้  $\text{CaO}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  มีความเหมาะสมในการนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมได้ เพราะสามารถเพิ่มกำไรจากการทำให้ผลผลิตมีความบริสุทธิ์สูงขึ้น

Guan-Yi Chen et al. (2015) ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสจากเปลือกไข่และแกลบข้าว ซึ่งจะใช้แกลบข้าวที่ผ่านการแคลไซน์  $400\text{-}800\text{ }^{\circ}\text{C}$  4 h เป็นวัสดุรองรับ (Support) และใช้เถ้าเปลือกไข่ที่ถูกแคลไซน์ด้วยอุณหภูมิ  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  4 h จากนั้นทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนวัสดุรองรับด้วยวิธีการเคลือบฝูแบบเปียก ที่มีการศึกษาปริมาณเถ้าเปลือกไข่ที่โดปลงบนเถ้าแกลบข้าว 20-50%wt และอุณหภูมิที่ใช้ในการแคลไซน์หลังผ่านการโดปลงแล้ว  $600\text{-}1,000\text{ }^{\circ}\text{C}$  4 h จากนั้นนำไปใช้ศึกษาการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจากน้ำมันปาล์มที่มีการศึกษาปัจจัยการผลิต คือ เวลาทำปฏิกิริยา 0.5-5 h อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1-15:1 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3-8%wt โดยในที่สุดท้ายจะเป็นการศึกษาการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการปรับสภาพแกลบข้าว ปริมาณเถ้าเปลือกไข่ที่โดปลงบนเถ้าแกลบข้าว และอุณหภูมิแคลไซน์ที่ใช้หลังเคลือบฝู มีค่าที่เหมาะสม คือ  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 30%wt และ  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ ส่วนผลของปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ประกอบไปด้วยเวลาการทำปฏิกิริยา อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา มีค่าที่เหมาะสม คือ 4 h, 9:1 และ 7%wt ตามลำดับ ซึ่งทำให้เกิดผลผลิตไบโอดีเซลสูงถึง 91.5% สามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำได้อีก 8 ครั้ง โดยยังคงให้ผลผลิตสูงถึง 80%

Lani et al. (2017) พัฒนาและศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์บนตัวรองรับจากวัสดุเหลือทิ้ง ได้แก่ การใช้เปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการแคลไซน์  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  6 h และแกลบข้าวที่ถูกเผาแคลไซน์  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  4 h มาสังเคราะห์ผ่านวิธีเคลือบฝูแบบเปียกที่มีการเผาแคลไซน์อีกครั้งที่  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  3 h เพื่อเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{CaO}$  บนตัวรองรับ  $\text{SiO}_2$  ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้ว ที่มีการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิต ได้แก่ ปริมาณวัสดุรองรับที่ใช้ในการเคลือบฝู 0-10%wt ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล 0-5%wt อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 5:1-25:1 รวมไปถึงระยะเวลา 30-150 min และอุณหภูมิ  $40\text{-}80\text{ }^{\circ}\text{C}$  ผลการศึกษาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับที่สังเคราะห์ได้มีประสิทธิภาพในการผลิตไบโอดีเซลสูงกว่าการใช้  $\text{CaO}$  เพียงอย่างเดียว ซึ่งมีค่าผลผลิตอยู่ที่ 87.5% และ 57% ตามลำดับ เกิดขึ้นภายใต้ปัจจัยที่เหมาะสม ได้แก่ ปริมาณเถ้าแกลบข้าวที่ใช้ในการเคลือบฝู ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน ระยะเวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 3%wt, 3%wt, 15:1, 90 min และ  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ

Thiangtrong (2015) ทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{CaO}$  ที่รองรับด้วย  $\text{SiO}_2$  ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ ) จากเถ้าแกลบ ด้วยวิธีการเตรียมแบบอิมเพกเนชันหรือวิธีฝูเคลือบ เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเบสใน

การผลิตไบโอดีเซลผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม ซึ่งในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  จะมีการศึกษาอัตราส่วนระหว่าง  $\text{CaO}$  ที่ 10 20 30 และ 40% ต่อ  $\text{SiO}_2$  5% พร้อมทั้งอุณหภูมิการแคลไซน์ 500 700 และ 900 °C เป็นเวลา 3 h จากนั้นจะมีการศึกษาคุณสมบัติด้วยเทคนิค XRF XRD FTIR และ BET ผลพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วนการผสมของ  $\text{CaO}:\text{SiO}_2$  30%:5% และถูกเผาแคลไซน์ด้วยอุณหภูมิ 700 °C เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล ภายใต้การค้นหาสภาวะที่เหมาะสมของการทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1-15:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1-5%wt และเวลา 1-5 h ที่อุณหภูมิ 65 °C ผลพบว่าที่อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1 ปริมาณตัวเร่ง 3%wt และเวลา 3 h ทำให้เกิดผลผลิตไบโอดีเซล 98.36% ซึ่งมีค่ากรดและค่าเมทิลเอสเทอร์อยู่ในช่วงมาตรฐาน ASTM และ EN มากไปกว่านั้นยังมีการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ซ้ำที่พบว่าหลังการใช้ซ้ำ 4 ครั้ง ยังคงให้ผลผลิต 85.79% และเมื่อทำการเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับชนิดอื่น  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้มีประสิทธิภาพสูงกว่า  $\text{CaO}/\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  ที่ให้ผลผลิตเพียง 87.18%

Buta and Balasubramanian (2017) ศึกษาการใช้แกลบข้าวเป็นวัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{NaOH}$  และ  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  ผ่านวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเคลือบฝังที่มีการศึกษาอุณหภูมิในการแคลไซน์หลังเคลือบฝังที่ 400-550 °C จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพด้วยเทคนิค FTIR XRD DTA/TGA XRF และ SEM และนำไปใช้ในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันน้ำมันถั่วเหลืองภายใต้การศึกษาสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1-3%wt อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1-30:1 อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 45-75 °C และเวลาการทำปฏิกิริยา 30-300 min ผลการศึกษาพบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  มีสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดผลผลิตไบโอดีเซล 96.7% ด้วยการใช้อุณหภูมิการแคลไซน์ในการเคลือบฝัง 500 °C ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3%wt อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 12:1 อุณหภูมิ 60 °C และเวลาที่ใช้ 150 min ส่วน  $\text{Li}_2\text{SiO}_3$  จะมีสภาวะที่เหมาะสมที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4%wt อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมันที่ 21:1 อุณหภูมิ 65 °C และเวลา 180 min ซึ่งทำให้เกิดผลผลิตไบโอดีเซลสูงถึง 99.4%

Che et al. (2018) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{CaO}$  บนตัวรองรับแก้วแกลบข้าวที่ผ่านการแคลไซน์ 700 °C ภายใต้การเผาไหม้แบบไพโรไลติก (Pyrolytic) หรือการเผาไหม้ในสภาวะไร้อากาศ ผ่านกระบวนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนวัสดุรองรับด้วยวิธีการเคลือบฝังแบบเปียกที่มีการศึกษาอุณหภูมิในการแคลไซน์ 600-800 °C และอัตราส่วนของ  $\text{CaO}$  บริสุทธิ์ต่อแก้วแกลบข้าว 20% 30% และ 40% จากนั้นนำไปผลิตไบโอดีเซลที่มีการศึกษาสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1-11:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 4-10%wt และ

เวลาในการทำปฏิกิริยา 30-240 min ที่อุณหภูมิ 65 °C ผลการศึกษาพบว่าการใช้ CaO บริสุทธิ์ในสัดส่วน 30% ต่อถั่วแกลบข้าวที่มีอุณหภูมิแคลโซไนในกระบวนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ 700 °C ภายใต้สภาวะการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันต่าง ๆ ได้แก่ อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 8%wt และเวลาการทำปฏิกิริยา 180 min ทำให้เกิดผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุด 93.4% และเมื่อมีการศึกษาการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าสามารถใช้ซ้ำได้ถึง 10 ครั้ง ซึ่งยังคงให้ผลผลิตไม่ต่ำกว่า 85% โดยไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีค่าอยู่ในช่วงมาตรฐาน ASTM D6751 และ EN 14214 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงแสดงให้เห็นแล้วว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีตัวรองรับสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ให้มีเสถียรภาพสูงขึ้นได้ เนื่องจากทำให้เกิดพันธะระหว่าง Ca-O-Si บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งช่วยลดการสูญเสีย  $Ca^{2+}$  ลงได้

Youssef et al. (2019) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วและศึกษาผลของการใช้น้ำมันไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบ โดยในขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลจะใช้ NaOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ภายใต้การใช้อุณหภูมิการผลิต 45-60 °C ระยะเวลา 2 h ผลพบว่าสามารถผลิตไบโอดีเซลได้สูงสุด 78% ซึ่งเมื่อนำไปผสมกับดีเซลในรูปแบบ B0, B10, B20 และ B30 พบว่าน้ำมันเชื้อเพลิงที่เตรียมได้ล้วนมีค่าคุณสมบัติอยู่ในช่วงมาตรฐานของ EN และ ASTM เช่น ค่าความหนาแน่นและจุดวาบไฟที่อยู่ในช่วง 837.3-836.8 kg/m<sup>3</sup> และ 58-64 °C ตามลำดับ และยังมีค่าเลขซีเทน 53.2-53.4 สูงกว่ากำหนดในมาตรฐาน EN ISO 4265 แต่ในส่วนขององค์ประกอบน้ำในน้ำมันพบว่ามีส่วนผสมของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นจะทำให้มีปริมาณน้ำปนเปื้อนสูง ดังนั้นเพื่อป้องกันการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์และป้องกันอุปกรณ์ถูกกัดกร่อน จึงกำหนดให้มีส่วนผสมไบโอดีเซลสูงสุดเพียง 30% ซึ่งผลการศึกษาการใช้ซ้ำน้ำมันแต่ละรูปแบบในเครื่องยนต์พบว่าการใช้ไบโอดีเซลในอัตราส่วนที่สูงขึ้น ทำให้แรงบิดและกำลังของเครื่องยนต์มีค่าลดลง แต่สามารถลดการปล่อยก๊าซไอเสียลงได้ เนื่องจากมีปริมาณ O<sub>2</sub> สูง จึงเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ แต่ถ้ามีการผสมในอัตราส่วนที่มากเกินไปจะก่อให้เกิดก๊าซไอเสียสูงกว่าได้ เพราะน้ำมันนั้นมีค่าความหนืดสูงขึ้น

Abed et al. (2018) ศึกษาการใช้ไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันที่ผ่านการประกอบอาหารแล้วในเครื่องยนต์ดีเซล โดยในการศึกษาจะผลิตน้ำมันจากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันภายใต้เงื่อนไขการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 65 °C ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา NaOH 1%wt อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 และระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 1.5 h จากนั้นเมื่อได้ไบโอดีเซลจะนำไปผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนการผสม 10% 20% และ 30% (B10, B20 และ B30) ซึ่งเมื่อทำการวัดค่าคุณสมบัติของน้ำมันผสมพบว่ามีค่าเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM ใกล้เคียงกับคุณสมบัติของดีเซล และในส่วนของการทดสอบการใช้งานในเครื่องยนต์ดีเซลพบว่าที่การใช้ภาระโหลดแตกต่างกัน ตั้งแต่ 0 ถึงภาระโหลดเต็มกำลัง (0, 1, 2, 3, 4 และ 5 kW) พบว่าการใช้ไบโอดีเซลผสมในอัตราส่วนที่สูงขึ้น ทำ

ให้ค่าประสิทธิภาพความร้อนของเครื่องยนต์มีค่าลดต่ำลง ส่วนการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงพบว่ามีแนวโน้มสิ้นเปลืองสูงขึ้น และในส่วนของ การวัดการปล่อยก๊าซไอเสียพบว่าการใช้ไบโอดีเซลทำให้เกิด  $\text{CO}_2$  และ  $\text{NO}_x$  สูงกว่า แต่มีการปลดปล่อย CO คาร์บอนดำ และ HC ต่ำกว่าการใช้ดีเซลซึ่งมาจากแหล่งเชื้อเพลิงฟอสซิล



### บทที่ 3

## วิธีดำเนินงานวิจัย

### ภาพรวมการวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยเรื่องการผลิตไบโอดีเซลที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าเปลือกหอยบนตัวรองรับซิลิกาเถ้าแกลบข้าว มีกระบวนการเบื้องต้นเริ่มจากการศึกษางานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง จากนั้นทำการจัดทำโครงร่างวิทยานิพนธ์เพื่อระบุที่มา วัตถุประสงค์ ประโยชน์ ขอบเขตการศึกษา ตลอดจนขั้นตอนวิธีดำเนินการวิจัย ซึ่งการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำการปรับสภาพเปลือกหอยขมและเถ้าแกลบข้าวด้วยการนำไปเผาแคลไซน์ก่อน จากนั้นนำวัสดุทั้ง 2 ส่วน ไปสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าหอยขมบนตัวรองรับซิลิกาเถ้าแกลบข้าวด้วยวิธีการเคลือบฝังแบบเปียก เมื่อได้ตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วจะถูกนำไปศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ด้วยการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของวัสดุในระดับจุลภาคด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscope) และชนิดและปริมาณของธาตุและสารประกอบด้วยเทคนิค XRF (X-Ray Fluorescence Spectrometry)

ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วด้วยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ ซึ่งแบ่งเป็นการศึกษาการผลิตในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อค้นหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา ได้แก่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 2 และ 3%wt อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1 6:1 และ 9:1 อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 60-65 °C ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 1 และ 2 h โดยมีการกวนผสมอย่างต่อเนื่อง 300-500 rpm จากนั้นเมื่อได้เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดจะทำการขยายสเกลการผลิตไปสู่ระดับเครื่องต้นแบบ ซึ่งเป็นเครื่องผลิตไบโอดีเซลที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิถีพินธุ์ ขนาดการผลิต 20 L เพื่อนำน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้ไปใช้ทดสอบการใช้งานในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดไม่เกิน 20 HP โดยจะทำการวิเคราะห์ค่าสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่เกิดจากการใช้ไบโอดีเซลที่ผลิตได้ เปรียบเทียบกับน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลตามท้องตลาด

ในส่วนสุดท้ายจะทำการวิเคราะห์ค่าทางเศรษฐศาสตร์ในด้านต้นทุนและจุดคุ้มทุนของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าชีวมวลที่สังเคราะห์ขึ้น จากนั้นทำการรวบรวมข้อมูล จัดทำเอกสารเผยแพร่งานวิจัย ตลอดจนเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์ ซึ่งจากขั้นตอนที่ได้กล่าวมาข้างต้น สามารถแสดงภาพรวมงานวิจัยดังภาพที่ 18



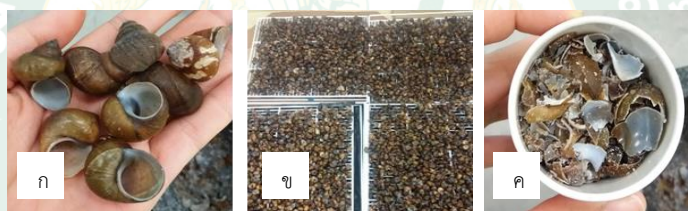
## การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาและการวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติ

ในขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าหอยขม (RSSA) 2. การเตรียมวัสดุรองรับเถ้ากลบข้าว (RHA) และ 3. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าหอยขมบนวัสดุรองรับเถ้ากลบข้าว (RSSA/RHA) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 1. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าหอยขม

ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าหอยขม (RSSA) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ล้างเปลือกหอยขมด้วยน้ำสะอาด เพื่อกำจัดเศษต่าง ๆ ออกจากเปลือกหอยขมนั้น หลังจากนั้นนำไปตากให้แห้งด้วยแสงแดดเป็นเวลา 15 h จากนั้นบดเปลือกหอยขมอย่างหยาบก่อนนำเข้าเตาเผาในขั้นตอนต่อไป ดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 เปลือกหอยขมที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว

ก) เปลือกหอยขมที่ล้างแล้ว ข) การตากเปลือกหอยขมโดย และ ค) เปลือกหอยขมบดหยาบ

2. นำหอยขมที่ได้ไปเผาแคลไซน์ 900 °C เป็นเวลา 4 h เพื่อทำการสลายตัวของสารดั้งเดิมให้เหลือเพียงสารประกอบออกไซด์เป็นหลัก

3. หลังแคลไซน์เสร็จให้นำเถ้าหอยขมที่ได้ออกมาบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรง เพื่อให้ได้วัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาในลักษณะผงเถ้าละเอียด ดังแสดงในภาพที่ 20 นำไปอบไล่ความชื้นในเตาอบอีกครั้งที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 1 h ก่อนจะเก็บใส่ภาชนะบรรจุ ซึ่งจะถูกเก็บไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อป้องกันอากาศเข้า



ภาพที่ 20 ลักษณะของเถ้าหอยขมที่ผ่านการแคลไซน์

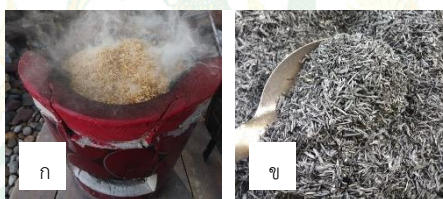
ก) เถ้าหยาบหลังแคลไซน์ ข) เถ้าละเอียดที่ถูกบดและกรอง และ ค) เถ้าหอยขมในภาชนะบรรจุ

## 2. การเตรียมวัสดุรองรับเถ้าแกลบข้าว

สำหรับการเตรียมวัสดุรองรับจากเถ้าแกลบข้าว (RHA) มีลำดับขั้นตอนการเตรียมดังนี้

1. เตรียมเถ้าแกลบข้าวด้วยการนำแกลบข้าวไปเผาด้วยเตาชีวมวลความร้อนสูง ดังแสดงใน

ภาพที่ 21



ภาพที่ 21 การนำแกลบข้าวมาเผาด้วยเตาชีวมวลความร้อนสูง

- ก) การเผาแกลบข้าว และ ข) เถ้าแกลบข้าวที่ได้จากการเผาด้วยเตาชีวมวลความร้อนสูง

2. นำเถ้าที่ได้ไปผึ่งแดดให้แห้งด้วยการตากแดดเป็นเวลา 15 h จากนั้นนำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 4 h

3. หลังแคลไซน์เสร็จให้นำเถ้าแกลบข้าว (ภาพที่ 22 ก) ออกมาบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงเพื่อให้ได้วัสดุรองรับในลักษณะผงเถ้าละเอียด (ภาพที่ 22 ข) จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นในเตาอบอีกครั้งที่อุณหภูมิ อบที่ 105 °C เป็นเวลา 1 h ก่อนเก็บใส่ภาชนะบรรจุให้ ซึ่งจะถูเก็บไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อป้องกันอากาศเข้า



ภาพที่ 22 เถ้ากลบข้าวที่ได้จากการแคลไซน์

ก) กลบข้าวที่ผ่านการแคลไซน์ และ ข) ผงเถ้ากลบข้าวบดละเอียดหลังผ่านการแคลไซน์

4. ทำการเตรียมวัสดุรองรับ RHA อีกครั้งด้วยวิธีการเดิม แต่เปลี่ยนไปแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 และ 900 °C เป็นเวลา 4 h แทนการเผาแคลไซน์ที่ 700 °C

### 3. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าหอยขมบนตัวรองรับเถ้ากลบข้าว

เมื่อเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA และวัสดุรองรับ RHA เรียบร้อยแล้ว จะเข้าสู่กระบวนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนวัสดุรองรับผ่านวิธีการเคลือบฝัแบบเปียก ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. นำเถ้าหอยขมผสมลงในน้ำปราศจากไอออน ซึ่งจะได้สารในรูปของ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (Che et al., 2018) จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C โดยมีการกวนผสมอย่างต่อเนื่อง 300-500 rpm ประมาณ 5 min

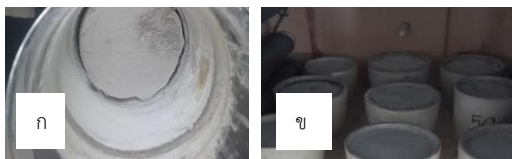
2. ทำการเทเถ้ากลบข้าวตามลงไป จับเวลาการเคลือบฝัแบบเปียกประมาณ 4 h แล้วนำสารที่ได้ดังแสดงในภาพที่ 23 (ก) ไปอบที่ 105 °C เป็นเวลา 10 h (ภาพที่ 23 (ข))



ภาพที่ 23 สารจากการเคลือบฝัแบบเปียก

ก) ลักษณะสารที่ได้จากการเคลือบฝัแบบเปียก และ ข) การนำสารที่ได้ไปอบไล่ความชื้น

3. เมื่อไล่ความชื้นออกจากสารเรียบร้อยแล้ว (ภาพที่ 24 (ก)) ให้นำไปแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 4 h (ภาพที่ 24 (ข))



**ภาพที่ 24** สารผสมระหว่าง RSSA และ RHA ที่ผ่านการอบไล่ความชื้น  
ก) ลักษณะสารที่ถูกไล่ความชื้นแล้ว และ ข) การนำสารไปเผาแคลไซน์ด้วยเตาเผาไฟฟ้า

4. หลังแคลไซน์เสร็จให้นำเถ้าหอยขมบนตัวรองรับเถ้าแกลบข้าวที่ได้ (ภาพที่ 25 ก)) ออกมาบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรง เพื่อให้ได้วัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับในลักษณะผงเถ้าละเอียด ดังแสดงในภาพที่ 25 (ข) จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นในเตาอบอีกครั้งที่อุณหภูมิ อบที่ 105 °C เป็นเวลา 1 h ก่อนเก็บใส่ภาชนะบรรจุ ซึ่งจะถูกไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อป้องกันอากาศเข้า



**ภาพที่ 25** เถ้าหอยขมบนตัวรองรับเถ้าแกลบข้าวที่ผ่านการแคลไซน์แล้ว  
ก) เถ้า RSSA/RHA ที่ผ่านการแคลไซน์แล้ว และ ข) ผงเถ้า RSSA/RHA ละเอียด

5. เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA/RHA ด้วยสัดส่วนโดยมวลของการผสมเถ้าหอยขมต่อเถ้าแกลบข้าวที่ 50:50 และ 30:70 ด้วยวิธีการเติมกับการเตรียม RSSA/RHA ที่สัดส่วนการผสม RSSA:RHA 70:30

เมื่อทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งในส่วนของ RSSA และ RSSA/RHA เสร็จเรียบร้อยแล้ว จะนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ไปตรวจสอบค่าคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีด้วยการใช้เทคนิค SEM และ XRF เพื่อวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยาและปริมาณองค์ประกอบตามลำดับ

### การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

สำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ในหัวข้อนี้ จะแบ่งเป็นขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลในระดับห้องปฏิบัติการและในระดับเครื่องต้นแบบ ดังนี้

## 1. การผลิตไบโอดีเซลในระดับห้องปฏิบัติการ

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ผ่านการทอดมันฝรั่งภายใต้กระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่มีการเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเร่งชนิดปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ที่สังเคราะห์ขึ้นได้จากวัสดุธรรมชาติ ระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA และ RSSA/RHA ในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีรายละเอียดดังขั้นตอนต่อไปนี้

1. ทำการเตรียมวัสดุอุปกรณ์ในการผลิตไบโอดีเซลให้พร้อม ทั้งในส่วนของอุปกรณ์เครื่องแก้ว และในส่วนของสารตั้งต้น ซึ่งในส่วนของน้ำมันวัตถุดิบจะต้องมีการนำไปกรองแยกเศษวัสดุต่าง ๆ ออกจากน้ำมันก่อน จากนั้นนำน้ำมันดังกล่าวไปต้มไล่ความชื้นที่ 105 °C นาน 15 min

2. นำน้ำมันที่ผ่านการปรับสภาพแล้วไปให้ความร้อน 60-65 °C และกวนผสมอย่างต่อเนื่อง ประมาณ 300-500 rpm เพื่อรอทำปฏิกิริยากับสารผสมระหว่างเมทานอลกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่จะเตรียมในขั้นตอนถัดไป

3. ชั่งตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA ปริมาณ 1%wt ของน้ำมัน และชั่งสารเมทานอลด้วยการใช้อัตราส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 3:1 จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาผสมลงไปเมทานอลให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยการใช้เวลาการเขย่าผสมสารประมาณ 10-15 min

4. นำสารที่เตรียมได้จากข้อ 3. ค่อย ๆ เทผสมลงในน้ำมันตั้งต้นที่ให้ความร้อนและกวนผสมอยู่ จากนั้นทำการจับเวลาการทำปฏิกิริยาประมาณ 1 h ดังแสดงในภาพที่ 26



ภาพที่ 26 การผลิตไบโอดีเซลในระดับห้องปฏิบัติการ

5. หลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จสิ้น (ตามกำหนดระยะเวลาการทำปฏิกิริยา) ให้ทำการนำสารผสมที่ได้เทลงในกรวยแยกสารเพื่อรอให้สารแยกชั้นกันระหว่างไบโอดีเซล กลีเซอรอล และตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในภาพที่ 27 ซึ่งเมื่อมีการแยกชั้นอย่างสมบูรณ์แล้วให้ทำการแยกสารเหล่านั้นออกจากกันด้วยการไขกลีเซอรอลและตัวเร่งปฏิกิริยาออกก่อน ตามด้วยการไขไบโอดีเซลที่ได้ลงบีกเกอร์เพื่อจะนำไปปรับสภาพด้วยการกรองและให้ความร้อนต่อไป



ภาพที่ 27 การแยกชั้นของสารที่ได้จากการทำปฏิกิริยา

6. นำไบโอดีเซลที่ได้จากขั้นตอนที่ 5. ไปกรองแยกเศษตัวเร่งปฏิกิริยาหรือเศษอื่น ๆ ที่ตกค้างด้วยการใช้กระดาษกรองดังแสดงในภาพที่ 28 (ก) จากนั้นนำไปให้ความร้อนเพื่อไล่ความชื้น อุณหภูมิ 105 °C นาน 15 min เนื่องจากในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับจะเกิดกลไกการผลิตไบโอดีเซลที่มีปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเกิดขึ้น ดังที่ได้กล่าวไปในบทที่ 2 ส่วนของทฤษฎี ส่งผลให้มีน้ำเกิดขึ้นในกระบวนการ จึงจำเป็นต้องมีการต้มไล่ น้ำหรือเมทานอลที่ยังตกค้างออกไป (Putra et al., 2018) (Lani et al, 2019) ดังแสดงในภาพที่ 28 (ข) ซึ่งไบโอดีเซลที่ได้จะมีลักษณะแสดงดังภาพที่ 28 (ค)



ภาพที่ 28 ลักษณะของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้

ก) การกรองแยกสารตกค้าง ข) การต้มไล่ความชื้น และ ค) ลักษณะของไบโอดีเซลที่ผลิตได้

7. ซึ่งปริมาณสารไบโอดีเซลที่ได้เพื่อนำไปคำนวณค่าร้อยละผลผลิต ซึ่งจะใช้เป็นนิยามของร้อยละผลผลิตไบโอดีเซล (%Yield) ที่ถูกกล่าวถึงในบทที่ 4 และ 5 สามารถคำนวณค่าด้วยการใช้สมการที่ 12 จากนั้นจัดเก็บไบโอดีเซลดังกล่าวไว้ในภาชนะบรรจุเพื่อนำไปตรวจวัดค่าคุณสมบัติต่อไป

$$\% \text{Yield biodiesel} = \frac{\text{Biodiesel} \times 100}{a} \quad \text{สมการที่ 12}$$

เมื่อ %Yield biodiesel คือ ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซล (%)  
Biodiesel คือ น้ำหนักไบโอดีเซลที่ผลิตได้ในการผลิตครั้งนั้น (g)

8. ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลด้วยการเปลี่ยนไปใช้เงื่อนไขการผลิตอื่น ๆ ได้แก่ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA และ RSSA/RHA (ประกอบด้วย 30%wt RSSA/RHA, 50%wt RSSA/RHA และ 70%wt RSSA/RHA) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 2 และ 3%wt อัตราส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 3:1 6:1 และ 9:1 รวมถึงระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 1 และ 2 h

## 2. การผลิตไบโอดีเซลในระดับเครื่องต้นแบบ

การผลิตไบโอดีเซลในระดับเครื่องต้นแบบเป็นการนำผลการศึกษามากจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในระดับห้องปฏิบัติการ มาขยายผลสู่การผลิตในระดับที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งจะทำการผลิตผ่านเครื่องผลิตไบโอดีเซลที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ ดังแสดงในภาพที่ 29 ภายใต้เงื่อนไขการผลิตจากค่าสภาวะที่เหมาะสมอันเป็นข้อสรุปจากการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลในระดับห้องปฏิบัติการที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA และ RSSA/RHA เพื่อนำไบโอดีเซลที่ได้ไปทดสอบการใช้งานจริงในเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตรขนาดเล็ก ซึ่งมีรายละเอียดการผลิตดังต่อไปนี้



ภาพที่ 29 เครื่องต้นแบบการผลิตไบโอดีเซลที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

1. ชั่งน้ำมันตั้งตันที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว เทลงถังพักหรือถังเก็บน้ำมันตั้งตัน ดังแสดงในภาพที่ 29 จากนั้นทำการปั้มน้ำมันขึ้นไปยังถังทำปฏิกิริยาเพื่อรอทำปฏิกิริยา พร้อมทั้งทำการให้ความร้อนอุณหภูมิ 60 °C
2. ชั่งตัวเร่งปฏิกิริยาและเมทานอล เทลงไปในถังผสม ดังแสดงในภาพที่ 29 เพื่อผสมสารตัวเร่งปฏิกิริยากับเมทานอลให้เป็นเนื้อเดียวกันก่อนนำไปทำปฏิกิริยากับน้ำมันตั้งตันในช็อก่อนหน้า โดยทำการผสมด้วยการกวนสารผ่านใบกวนสารอย่างต่อเนื่อง
3. เมื่อทำการกวนผสมเสร็จตั้งชั้นตอนที่ 2 แล้ว ให้ปล่อยสารผสมดังกล่าวลงถังในการทำปฏิกิริยา ดังแสดงในภาพที่ 29 จับเวลาการทำปฏิกิริยาตามที่กำหนด
4. เมื่อทำปฏิกิริยาครบตามกำหนดเวลา ให้เปิดก๊อกด้านล่างถังทำปฏิกิริยาเพื่อให้ออกของผสมที่ได้จากการทำปฏิกิริยาไปยังถังแยกชั้นของสาร ดังแสดงในภาพที่ 29
5. ทำการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาและกลีเซอรินออกจากไบโอดีเซล ด้วยการไขผ่านท่อปล่อยสารด้านล่างถังแยกสาร ดังแสดงในภาพที่ 29
6. ทำการปล่อยชั้นสารไบโอดีเซลเข้าสู่ถังเก็บไบโอดีเซล ดังแสดงในภาพที่ 29 ซึ่งหากมีชั้นเมทานอลส่วนเกินให้ปล่อยออกผ่านท่อปล่อยสารใต้ถังพักสาร และในส่วนของไบโอดีเซลที่เก็บไว้ในถังเก็บ สามารถให้ความร้อนเพื่อไล่ความชื้นกับไบโอดีเซลได้ โดยตั้งอุณหภูมิประมาณ 110 °C เป็นเวลาประมาณ 15 min

### การวัดค่าคุณสมบัติของเชื้อเพลิง

การวัดค่าคุณสมบัติของน้ำมันตั้งตันและน้ำมันเชื้อเพลิงไบโอดีเซลที่ผลิตได้ จะถูกนำไปวัดค่าคุณสมบัติที่ประกอบด้วย 1) การวัดค่า pH 2) การวัดค่าความเป็นกรดตามมาตรฐาน ASTM D664 3) การวัดค่าความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM D1298 4) การวัดค่าความหนืดตามมาตรฐาน ASTM D445 5) การวัดค่าจุดวาบไฟ-จุดติดไฟ ตามมาตรฐาน ASTM D93 5) การวัดค่าจุดชุ่น-จุดไหลเทตามมาตรฐาน ASTM D97 และ 6) การวัดค่าความร้อนของเชื้อเพลิงตามมาตรฐาน ASTM D4809

### การทดสอบการใช้งานไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก

นอกเหนือจากการวัดผลด้านร้อยละผลผลิตและคุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ สิ่งที่เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ใช้บ่งบอกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงนั้นสามารถนำไปใช้งานได้จริงหรือไม่ คือการทดสอบใช้งานเบื้องต้นในเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตรขนาดเล็ก ซึ่งจะมีการวัดค่าสมรรถนะของเครื่องยนต์ ประกอบไปด้วย อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel consumption) แรงบิด

(Torque) กำลังเบรก (Brake power) อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific fuel consumption) อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption) และ ประสิทธิภาพความร้อน (Thermal efficiency) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบการใช้งานดังกล่าว ในชุดทดสอบที่ประกอบไปด้วยเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กชนิดหนึ่งสูบที่มีห้องเผาไหม้โดยตรงบนแท่นทดสอบไดนาโมมิเตอร์ ดังแสดงในภาพที่ 30



ภาพที่ 30 ชุดทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์

เครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กที่ใช้ในการศึกษาการใช้งานไบโอดีเซลด้วยการวัดค่าสมรรถนะทางเครื่องยนต์ที่เกิดขึ้น คือ เครื่องยนต์ดีเซลการเกษตรรอกประมงคีย์ห้อย All Power รุ่น 186F/E ดังแสดงในภาพที่ 31 เป็นเครื่องยนต์ที่มีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 6 ซึ่งมีหนึ่งสูบ ทำงาน 4 จังหวะ กำลังการผลิต 7.75 HP หรือ 5.7 kW เป็นเครื่องยนต์หัวฉีดที่มีการระบายความร้อนด้วยอากาศ



ภาพที่ 31 เครื่องยนต์ดีเซลการเกษตรรอกประมงคีย์ห้อย All Power รุ่น 186F/E

**ตารางที่ 6** รายละเอียดคุณสมบัติของเครื่องยนต์ดีเซล All Power รุ่น 186F/E

รายละเอียดคุณสมบัติเครื่องยนต์	ค่าคุณสมบัติ
1. ชนิดของเครื่องยนต์	เครื่องยนต์ดีเซล
2. จำนวนลูกสูบ	หนึ่ง
3. จังหวะการทำงานของลูกสูบ	4 จังหวะ
4. ชนิดของระบบจ่ายน้ำมัน	จ่ายน้ำมันด้วยระบบหัวฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้โดยตรง
5. ระบบระบายความร้อน	ระบายความร้อนด้วยอากาศ
6. พิกัดกำลัง	7.75 HP หรือ 5.7 kW
7. กำลังสูงสุด	8.57 HP หรือ 6.3 kW
8. ประเภทเชื้อเพลิงที่ใช้	น้ำมันดีเซลหมุนเร็ว
9. รอบเครื่องยนต์	3,000/3,600 rpm
10. อัตราส่วนการอัด	19:01

สำหรับวิธีการทดสอบจะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ทำการอุ่นเครื่องยนต์ก่อนทำการทดสอบ ด้วยการติดเครื่องยนต์แล้วปล่อยให้เครื่องยนต์เดินรอบเบาจนเครื่องยนต์อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบ
2. เริ่มทำการทดสอบด้วยการปรับร้อยละภาระโหลดของเครื่องยนต์ ด้วยการกำหนดและตั้งค่าใช้งานในรูปของความถี่ (Hz) หรือค่าความเร็วรอบของเครื่องยนต์ให้อยู่ที่ 900 rpm
3. บันทึกผลค่าน้ำมันเชื้อเพลิงและเวลาที่ใช้ไป พร้อมทั้งค่าความเร็วรอบ กำลังเครื่องยนต์ และค่าโหลดเซลล์เฉลี่ยเกิดขึ้น เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณค่าสมรรถนะเครื่องยนต์ด้วยการใช้สมการคำนวณตั้งหัวข้อทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของเรื่องการทดสอบการใช้งานไปโอดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซลในบทที่ 2 หลักการและทฤษฎี
4. ทำการทดสอบตามขั้นตอนที่ 2. และ 3. อีกครั้ง ด้วยการเปลี่ยนค่าความเร็วรอบไปที่ 1,200 1,500 1,700 2,000 และ 2,200 rpm ตามลำดับ จากนั้นทำการทดสอบด้วยวิธีการเดียวกันกับการทดสอบการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ

## บทที่ 4

### ผลและการอภิปรายผลการทดลอง

#### ผลและวิเคราะห์ผลคุณสมบัติของน้ำมันวัตถุดิบ

น้ำมันใช้แล้วในงานวิจัยนี้เป็นน้ำมันปาล์มโอเลอินที่ผ่านการทอดมันฝรั่งแผ่นทอดกรอบของกลุ่มเกษตรกรเจดีย์แม่ครัว อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ ดังแสดงในภาพที่ 32 จะถูกตรวจวัดค่าคุณสมบัติที่ประกอบด้วยค่าพีเอช ค่ากรดไขมันอิสระ ค่าความเป็นกรด ค่าความหนาแน่น ค่าความหนืด และค่าความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 7 ซึ่งเป็นค่าคุณสมบัติของน้ำมันที่ผ่านการทอดมันฝรั่งเปรียบเทียบกับน้ำมันปาล์มโอเลอินตรามรกดที่ยังไม่ผ่านการประกอบอาหาร



ภาพที่ 32 น้ำมันใช้แล้วจากการทอดมันฝรั่งของกลุ่มเกษตรกรเจดีย์แม่ครัว

ตารางที่ 7 สมบัติของน้ำมันปาล์มโอเลอินที่ไม่ผ่านและผ่านการทอดมันฝรั่ง

ชนิดของน้ำมัน	ร้อยละกรดไขมันอิสระ (%FFA, %)	ค่าความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	ค่าความหนืด (cSt)	ค่าความเป็นกรด (mg KOH/g oil)
1. น้ำมันปาล์มโอเลอินตรามรกด	0.301	915	44.786	0.625
2. น้ำมันที่ผ่านการทอดมันฝรั่ง	0.569	920	52.363	1.148

จากตารางแสดงให้เห็นว่าน้ำมันปาล์มที่ผ่านการประกอบอาหารที่มีการใช้ความร้อนสูงเป็นระยะเวลานาน มีการเสื่อมสภาพลง (นันทิรา หงษ์ศรีสุวรรณ, 2560) ส่งผลให้ค่าร้อยละกรดไขมันอิสระ ค่าความหนาแน่น ค่าความหนืด และค่าความเป็นกรดสูงขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบกับน้ำมันที่ยังไม่ผ่านการประกอบอาหาร แต่ไม่ว่าอย่างไรก็ตาม เมื่อทำการพิจารณาความเป็นไปได้ของการนำน้ำมันใช้แล้วนี้ไปผลิตไบโอดีเซล พบว่าน้ำมันที่ผ่านการทอดมันฝรั่งมีค่าร้อยละกรดไขมันอิสระอยู่

ในช่วงที่ยอมรับได้ คือ น้อยกว่า 3%wt (อธิยา คงเซ็น และคณะ, 2557) (ศุภกฤษณ์ งามเมือง และคณะ, 2560) สอดคล้องกับงานวิจัยของภัทรติกรณ์ รัชศักดิ์ศรี และสมชาย พัวจินดาเนตร (2555) ที่มีการศึกษาปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันปาล์มใช้แล้ว โดยพบว่ามีค่า %FFA อยู่ในช่วง 0.427-1.435%wt จึงสรุปได้ว่าน้ำมันปาล์มที่ผ่านการทอดมันฝรั่งแล้ว สามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันได้โดยตรง โดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนหรือกระบวนการลดค่าความเป็นกรดลงก่อน ซึ่งจากการวิจัยของภัทรติกรณ์ รัชศักดิ์ศรี และสมชาย พัวจินดาเนตร (2555) พบว่าเมื่อนำน้ำมันวัตถุดิบที่มีค่ากรดไขมันอิสระแตกต่างกันไปผลิตไบโอดีเซล น้ำมันที่มีค่ากรดสูงทำให้เกิดไบโอดีเซลที่มีร้อยละผลผลิตและองค์ประกอบความเป็นเมทิลเอสเทอร์ (%FAME, Fatty Acid Methyl Ester) ลดลง

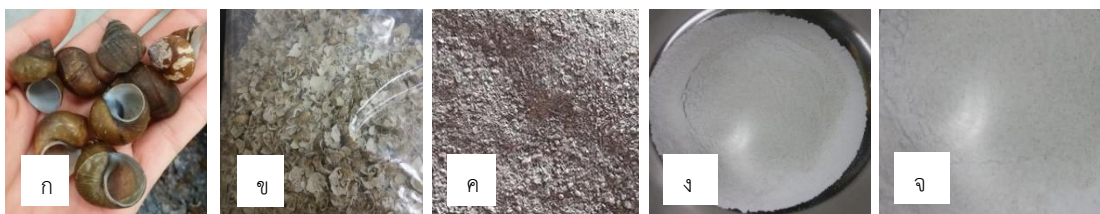
### ผลและวิเคราะห์ผลคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาและวัสดุรองรับ

งานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาจากวัสดุธรรมชาติที่มีลักษณะความเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวีวิธพันธุ์ชนิดที่มี CaO เป็นองค์ประกอบหลัก และมีการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ด้วยการประยุกต์ใช้วัสดุทางธรรมชาติที่มีคุณสมบัติเป็นตัวรองรับหรือตัวสนับสนุน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซล ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่สังเคราะห์ขึ้นได้จากวัสดุธรรมชาติ ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าหอยขม (RSSA) วัสดุรองรับเถ้าแกลบข้าว (RHA) ตลอดจนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการนำเถ้าหอยขมไปใช้งานร่วมกับเถ้าแกลบข้าวที่เป็นวัสดุรองรับ (RSSA/RHA) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 1. ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าหอยขม (RSSA)

ตัวเร่งปฏิกิริยาวีวิธพันธุ์ชนิดเบสที่ได้จากการสังเคราะห์เปลือกหอยขมผ่านกระบวนการแคลไซน์ เมื่อทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพเบื้องต้นพบว่าเถ้าหอยขมที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นผงละเอียด สีขาวเทา ดังแสดงในภาพที่ 33 (ง) และ (จ) เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะของเปลือกหอยขมที่ยังไม่ผ่านการแคลไซน์ ซึ่งวัสดุจะมีสีเข้ม ดังแสดงในภาพที่ 33 (ก) และ (ข) เมื่อทำการบดเป็นผงจะได้เป็นผงหยาบ สีน้ำตาลอ่อนปนขาวเล็กน้อย มีผงสีดำขนาดเล็กผสมกระจายตัวอยู่ในผงนั้น ดังแสดงในภาพที่ 33 (ค) แต่เมื่อได้รับความร้อนจากการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 °C ทำให้สารอินทรีย์ที่สะสมอยู่ในเปลือกหอยขมเกิดการสลายตัวไปเป็นสารอินทรีย์ประเภทสารประกอบออกไซด์ เถ้าที่ได้จึงมีสีขาวและมีความละเอียดมากยิ่งขึ้น สอดคล้อง

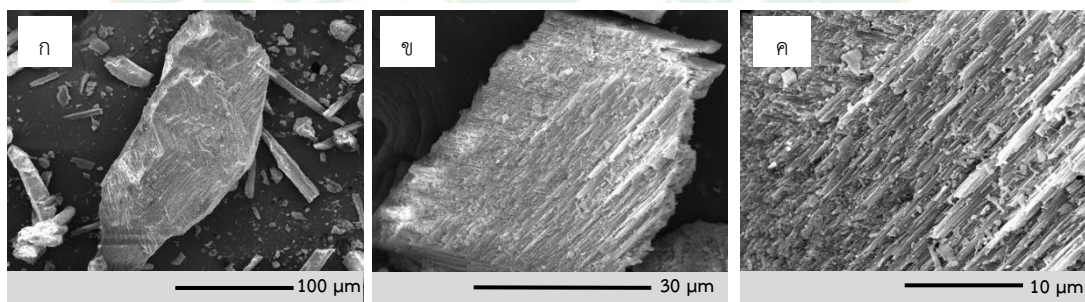
กับังงานวิจัยของศศิประภา แก้วแดง (2560) ที่พบว่าเมื่อมีการแคลไซน์หอยขมจาก 700-900 °C จะทำให้เถ้ามีสีขาวและละเอียดมากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มค่าอุณหภูมิการเผา



ภาพที่ 33 ลักษณะหอยขมที่ยังไม่ผ่านและผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 °C

ก) เปลือกหอยขม ข) และ ค) เปลือกหอยบดและละเอียด ง) และ จ) เถ้าละเอียดหลังแคลไซน์

สมบัติทางกายภาพในด้านลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยาของเปลือกหอยขมที่ยังไม่ผ่านและผ่านการแคลไซน์แล้ว จากการตรวจวัดด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยายต่าง ๆ พบว่าเปลือกหอยขมที่ยังไม่ผ่านการเผาแคลไซน์ มีลักษณะอนุภาคดังแสดงในภาพที่ 34 ซึ่งมีอนุภาคเป็นรูปผลึกทรงเหลี่ยมต่าง ๆ หลากหลายรูปแบบ พื้นผิวขรุขระ หน้าสัมผัสเป็นรูปทรงแท่งหรือกระบอกกระจายตัวอย่างหนาแน่น และมีความแข็งแรง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคประมาณ  $17.30 \pm 0.59 \mu\text{m}$

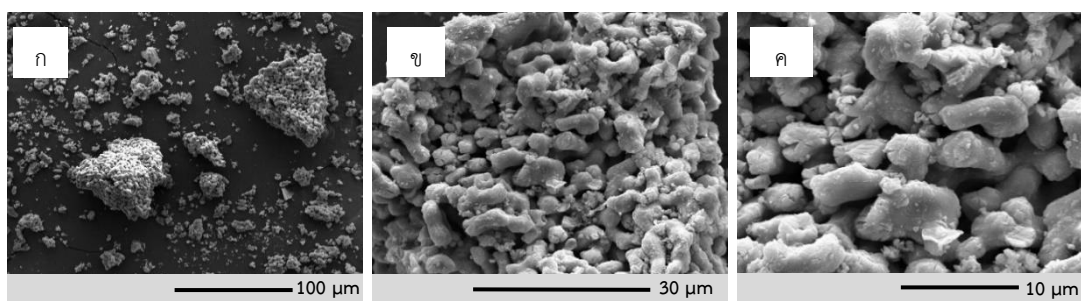


ภาพที่ 34 ลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยาของหอยขมที่ยังไม่ผ่านการแคลไซน์

ที่กำลังขยาย ก) 1,000x ข) 5,000x และ ค) 10,000

ในส่วนของคุณลักษณะอนุภาคของเปลือกหอยขมที่ผ่านการแคลไซน์ 900 °C เป็นเวลา 4 h สามารถแสดงดังภาพที่ 35 ซึ่งพบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบกับลักษณะเปลือกหอยขมก่อนเผาอนุภาคที่ได้มีขนาดเล็กลงจากเดิม คือ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคประมาณ  $9.31 \pm 0.24 \mu\text{m}$  มีค่าใกล้เคียงกับผลการศึกษานาโนอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือก

หอยแมลงภู๋ หอยแครง และเปลือกหอยขม ในงานของ Handiyanto et al. (2017) Nor Hazurina et al. (2013) และ Kaewdaeng and Nirunsin (2019) ตามลำดับ



ภาพที่ 35 ลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยาของหอยขมที่ผ่านการแคลไซน์ 900 °C แล้ว  
ที่กำลังขยาย ก) 1,000x ข) 5,000x และ ค) 10,000x

การที่อนุภาคมีขนาดเล็กลง ส่งผลให้พื้นที่ผิวมีค่าเพิ่มสูงขึ้น จากการตรวจสอบพบว่าลักษณะโครงสร้างของเปลือกหอยขมที่ผ่านการแคลไซน์แล้ว มีอนุภาคทรงกลม พื้นผิวขรุขระ มีรูพรุนทั่วบริเวณผิวหน้า เกิดจากการสลายตัวของ  $\text{CO}_2$  จากสารประกอบ  $\text{CaCO}_3$  ที่ถูกให้ความร้อนสูงในขั้นตอนการแคลไซน์ เหลือเป็นสารประกอบ  $\text{CaO}$  ส่งผลให้โครงสร้างของอนุภาคมีความขรุขระและมีรูพรุนเพิ่มขึ้น และยังมีบางส่วนรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน แต่อนุภาคมีความเปราะและแตกหักได้ง่ายขึ้น ทำให้สามารถบดละเอียดได้ง่ายกว่าเปลือกหอยขมที่ยังไม่ผ่านการแคลไซน์ ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าลักษณะของเปลือกหอยขมในภาพที่ 35 (ข) และ (ค) ที่สังเคราะห์ได้ในงานวิจัยนี้ มีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{CaO}$  ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ เปลือกหอยแมลงภู๋ เปลือกหอยแครง เปลือกหอยพัด และเปลือกหอยขม จากผลงานวิจัยของ Niju et al. (2014) Buasri et al. (2013) และ Kaewdaeng and Nirunsin (2019) ตามลำดับ ซึ่งมีลักษณะอนุภาคของวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความขรุขระและมีรูพรุนสูง

ในส่วนของผลด้านสมบัติทางเคมีของเปลือกหอยขมที่ยังไม่ผ่านและผ่านการแคลไซน์ ด้วยการตรวจวัดค่าผ่านเทคนิค XRF สามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 8 ซึ่งพบว่าเมื่อยังไม่ทำการแคลไซน์เปลือกหอยจะมีค่าองค์ประกอบ  $\text{CaO}$  49.1042% แต่เมื่อมีการให้ความร้อนด้วยการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 °C แล้ว จะมีองค์ประกอบ  $\text{CaO}$  เพิ่มสูงขึ้นประมาณ 86.9536% เนื่องจากเมื่อมีการให้ความร้อนสูงแก่เปลือกหอยขม จะเกิดการสลายตัวของ  $\text{CaCO}_3$  เป็น  $\text{CaO}$  จึงทำให้ปริมาณ  $\text{CaO}$  มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันพบว่าปริมาณ  $\text{CO}_2$  ลดลง เนื่องจากเมื่อ  $\text{CaCO}_3$  เกิดการสลายตัวจะปล่อยหรือมีการให้  $\text{CO}_2$  ออกมา

ตารางที่ 8 องค์ประกอบของหอยขมที่ยังไม่ผ่านและผ่านการแคลไซน์ที่ 900 °C

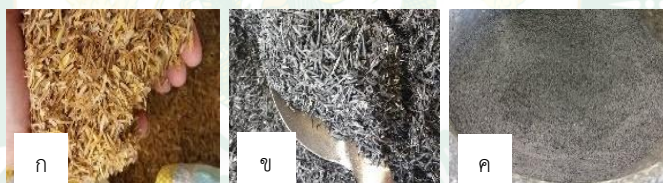
ชนิดของสารประกอบ	เปลือกหอยขม	
	ไม่แคลไซน์	แคลไซน์แล้ว
CO <sub>2</sub>	45.2329	12.3279
Na <sub>2</sub> O	0.1512	0.1287
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.7096	0.0567
SiO <sub>2</sub>	1.6866	0.1731
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.2418	0.0447
SO <sub>3</sub>	0.1055	0.0502
K <sub>2</sub> O	0.0798	0.0198
CaO	49.1042	86.9536
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.1838	0.1732
SrO	0.0394	0.0723
MgO	0.1291	N/A
MnO	0.3143	N/A
ZnO	0.0221	N/A
รวม	100.0000	100.0000

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าเปลือกหอยขมหรือ RSSA ที่สังเคราะห์ได้ มีองค์ประกอบ CaO สูง และอยู่ในช่วงค่า CaO ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้จากวัสดุทางธรรมชาติอื่น ๆ ได้แก่ เปลือกไข่ เปลือกหอยเซอริ้ (Golden apple snail shell) เปลือกหอยตลับ (*Meretrix venus* shell) เปลือกหอยจู้บแจง (Obtuse horn shell) เปลือกกุ้ง (Shrimp shell) เปลือกหอยแครง (*Anadara granosa* shell) และเปลือกหอยลาย (*Paphia undulata* shell) ของผลการศึกษาในงานวิจัยของ Hadiyanto et al. (2016) ที่มีค่า CaO เป็นองค์ประกอบมากกว่า 85%

จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลได้ เนื่องจากมีผลสนับสนุนด้านค่าองค์ประกอบ CaO สูง รวมไปถึงมีลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาที่มีอนุภาคขนาดเล็ก บ่งบอกถึงพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีตำแหน่งกัมมันต์ (Active site) หรือบริเวณเร่งปฏิกิริยาสูง ส่งผลให้ตัวเร่งมีความว่องไว (Catalyst activity) ในอัตราสูงขึ้นไปเปรียบเทียบับลักษณะของวัสดุที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า จึงส่งผลให้สามารถทำให้เกิดไบโอดีเซลที่มีปริมาณผลผลิตสูงได้

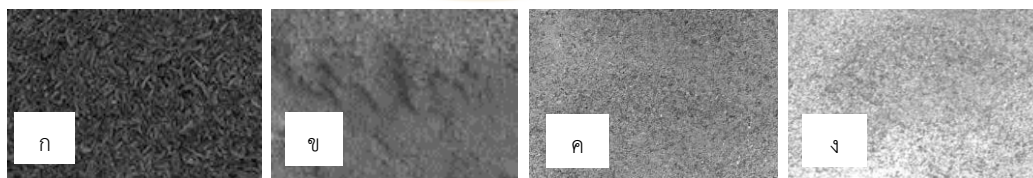
## 2. วัสดุรองรับเถ้าแกลบข้าว (RHA)

เถ้าแกลบข้าวประกอบด้วย  $\text{SiO}_2$  เป็นส่วนใหญ่ จึงนิยมนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิต  $\text{SiO}_2$  ที่มีความบริสุทธิ์สูง (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557) สามารถใช้ปรับปรุงคุณภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ เพราะ  $\text{SiO}_2$  เป็นสารประกอบที่ได้รับความเชื่อถือในการนำมาเป็นวัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูง และเป็นพื้นที่ผิวที่เพียงพอต่อการแพร่กระจายเข้าไปของวัสดุที่มีความเป็นโลหะ (Thiangtrong, 2015) ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของเถ้าแกลบข้าวที่ไม่ผ่าน (มีเพียงการให้ความร้อนผ่านการเผาด้วยการใช้เตาเผาชีวมวลความร้อนสูงเท่านั้น) และผ่านการแคลไซน์ด้วยอุณหภูมิ 700 800 และ 900 °C เป็นเวลา 4 h พบว่าลักษณะทางกายภาพเบื้องต้นของเถ้าแกลบข้าวที่ไม่ผ่านและผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูง มีลักษณะแสดงดังภาพที่ 36 ซึ่งพบว่าเถ้าแกลบข้าวที่เผาด้วยเตาชีวมวลความร้อนสูง เมื่อทำการบดเป็นผงจะเป็นเถ้าหยาบสีดำ แต่เมื่อมีการแคลไซน์ด้วยอุณหภูมิ 700-900 °C สีของเถ้าจะมีความขาวเพิ่มมากขึ้น และมีความละเอียดของเถ้าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในภาพที่ 37 พบว่าสีเถ้าที่ได้จากการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 800 และ 900 °C มีสีเทาเข้มไปจนถึงเทาอ่อนตามลำดับ



ภาพที่ 36 ลักษณะแกลบข้าวและเถ้าแกลบข้าว

ก) แกลบข้าว ข) เผาด้วยเตาชีวมวลความร้อนสูง และ ค) เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 °C

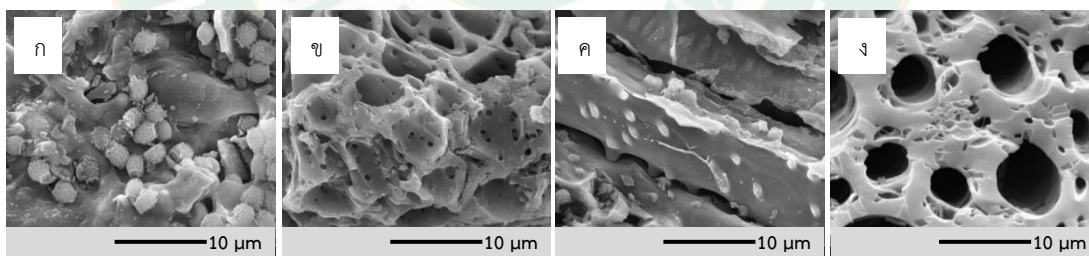


ภาพที่ 37 ลักษณะเถ้าแกลบข้าวที่ไม่ผ่านและผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700-900 °C

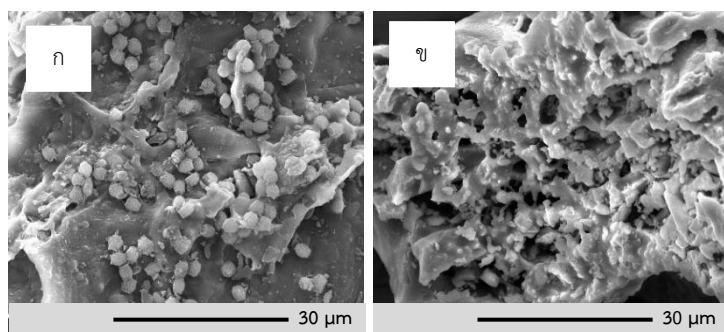
ก) เผาด้วยเตาชีวมวล ข) แคลไซน์ 700 °C ค) แคลไซน์ 800 °C และ ง) แคลไซน์ 900 °C

ลักษณะทางกายภาพเบื้องต้นของถั่วแกลบข้าวที่กล่าวไป เกิดจากการสลายตัวขององค์ประกอบในถั่วแกลบข้าว ซึ่งมีความสมบูรณ์มากขึ้นเมื่อมีการเผาแคลไซน์ด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้น สำหรับถั่วแกลบข้าวที่ยังไม่ผ่านการแคลไซน์ (ให้ความร้อนซ้ำที่อุณหภูมิสูง) ถูกเผาภายใต้การใช้เตาชีวมวลความร้อนสูง ไม่มีการให้ความร้อนอย่างทั่วถึง การเผาไหม้ดังกล่าวจึงเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ เพราะเป็นความร้อนที่ไม่เพียงพอต่อการทำให้สารประกอบเดิมของถั่วแกลบข้าว เปลี่ยนเป็นสารประกอบใหม่ ดังนั้นแล้วเมื่อมีการให้ความร้อนซ้ำด้วยการแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูง จึงทำให้ถั่วแกลบข้าวมีการสลายตัวของสารประกอบเดิมเป็นสารประกอบประเภทออกไซด์สูงขึ้น ลักษณะถั่วที่ได้จึงมีสี ความแข็งแรง และความละเอียดของผงถั่วแตกต่างกันดังที่ได้กล่าวไป

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของถั่วแกลบข้าวที่มีการเผาทั้ง 2 แบบ ด้วยเทคนิค SEM พบว่าโครงสร้างของถั่วแกลบข้าวที่เผาด้วยเตาชีวมวลความร้อนสูงมีผลดังแสดงในภาพที่ 38 ซึ่งลักษณะพื้นผิวอนุภาคของถั่วแกลบข้าวมีความขรุขระ มีหลุมทรงกลมและเหลี่ยม หรือรูปทรงที่ไร้รูปร่างกระจายอยู่บนพื้นผิวที่ขรุขระเหล่านั้น รวมไปถึงการมีโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่ ดังแสดงในภาพที่ 38 (ง) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาด้านลักษณะโครงสร้างของถั่วแกลบข้าวในงานวิจัยของ Saputra et al. (2017) และเมื่อมีการนำถั่วแกลบข้าวไปให้ความร้อนซ้ำด้วยการแคลไซน์ ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างวัสดุที่มีรูพรุนเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 39 (ข) เป็นผลจากการสลายตัวของสารประกอบเดิมที่มีโอกาสเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการให้ความร้อนสูงดังที่ได้กล่าวไป



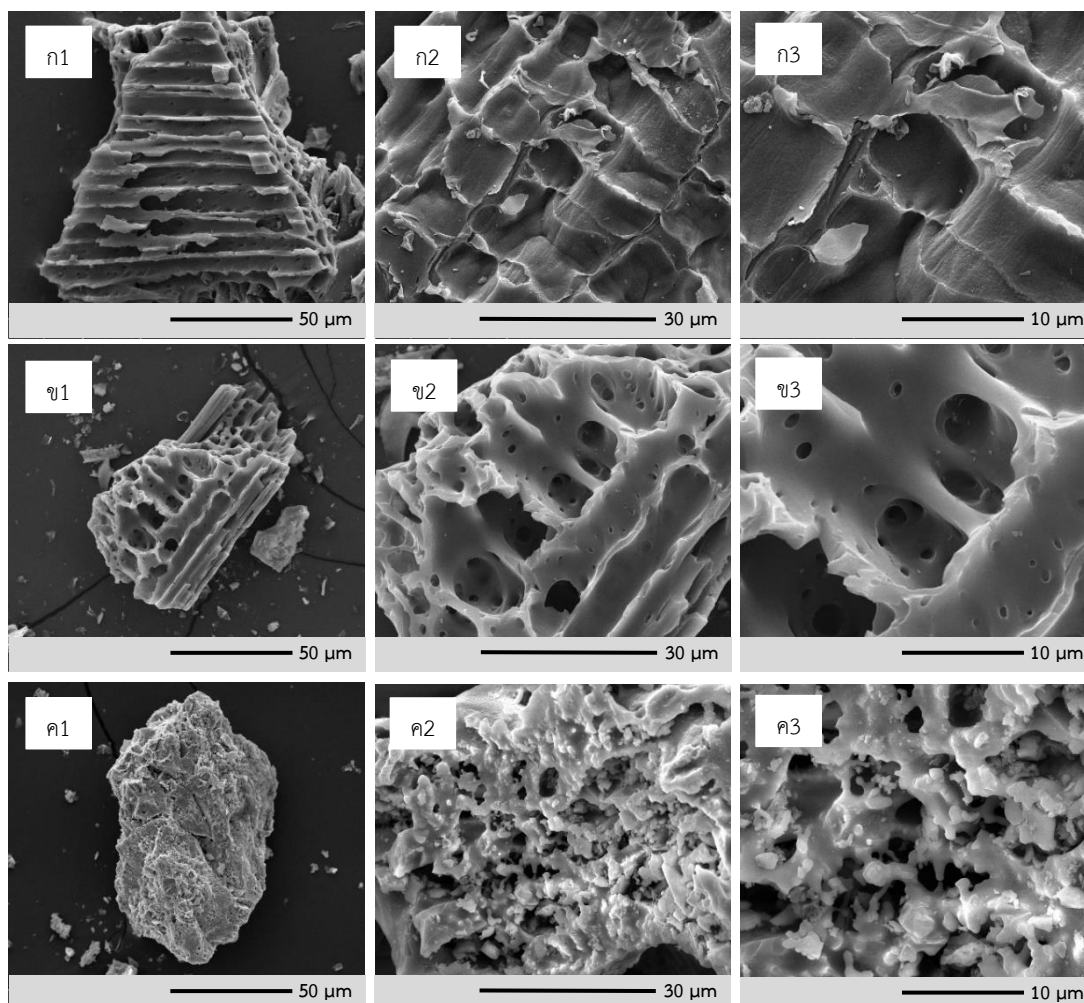
ภาพที่ 38 ลักษณะโครงสร้างของถั่วแกลบข้าวที่ถูกเผาด้วยเตาชีวมวลความร้อนสูง  
(ก-ง) ลักษณะถั่วแกลบข้าวที่ผ่านการเผาด้วยเตาชีวมวลความร้อนสูงที่กำลังขยาย 10,000x



**ภาพที่ 39** ลักษณะโครงสร้างของเปลือกไข่ขาวที่ไม่ผ่านและผ่านการแคลไซน์ที่ 900 °C ที่กำลังขยาย 5,000x (ก) ยังไม่ผ่านการแคลไซน์ และ (ข) ผ่านการแคลไซน์แล้ว

จากภาพที่ 38 และภาพที่ 39 พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคและรูพรุนของเปลือกไข่ขาวที่มีการเผาซ้ำด้วยการแคลไซน์ มีขนาดอนุภาคลดลงจากก่อนเผา ซึ่งก่อนเผามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคประมาณ  $68.30 \pm 1.85 \mu\text{m}$  และหลังการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 °C มีค่าอยู่ที่  $17.69 \pm 0.90 \mu\text{m}$  (Sompech et al., 2016) และหลังการเผาแคลไซน์ซ้ำพบว่าวัสดุมีความเป็นรูพรุนเพิ่มสูงขึ้น โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนมีค่าประมาณ  $2.76 \pm 0.07 \mu\text{m}$  เป็นผลมาจากการสลายตัวของสารประกอบ  $\text{CaCO}_3$  เช่นกัน

สำหรับผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของเปลือกไข่ขาวที่มีการให้อุณหภูมิในการแคลไซน์ 700 800 และ 900 °C เป็นเวลา 4 h ด้วยเทคนิค SEM สามารถแสดงผลดังภาพที่ 40 อธิบายได้ว่าเมื่อมีการให้อุณหภูมิในการแคลไซน์เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้วัสดุรองรับที่สังเคราะห์ได้มีขนาดอนุภาคลดลง  $44.83 \pm 4.24$ ,  $57.19 \pm 1.42$  และ  $17.69 \pm 0.90 \mu\text{m}$  ตามลำดับ ซึ่งขนาดอนุภาคมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวในลักษณะแปรผกผัน คือ ก่อให้เกิดพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาสูงขึ้น และเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิในการเผาซ้ำด้วยการแคลไซน์ ส่งผลให้รูพรุนที่เกิดขึ้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดต่ำลง แต่มีความหนาแน่นของรูพรุนกระจายทั่วอนุภาคมากขึ้น (Che et al., 2018) (พัชยาภรณ์ สิงห์รัญ, 2561) (Watthanachai et al., 2018) (Vinukumar et al., 2016) (Buta and Balasubramanian, 2017)



ภาพที่ 40 ลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยาของถ่านกลบข้าวที่แคลไซน์ด้วยอุณหภูมิต่างกัน

ก1-ก3 : 700 °C, ข1-ข3 : 800 °C และ ค1-ค3 : 900 °C เป็นเวลา 4 h

ภายใต้กำลังขยาย 2,000x 5,000x และ 10,000x ตามลำดับ

จากการทบทวนวรรณกรรมเพิ่มเติมด้านการใช้อุณหภูมิสูงขึ้นในการเผาแคลไซน์ พบว่าการเผาที่อยู่ในช่วงประมาณ 700-900 °C เป็นช่วงอุณหภูมิการเผาที่ส่งผลให้สารมีลักษณะโครงสร้างและองค์ประกอบที่ส่งผลให้เกิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีลักษณะที่สามารถเร่งปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซลได้ดี เพราะการใช้อุณหภูมิในช่วงนี้ทำให้วัสดุมีพื้นที่ผิวและค่าความเป็นเบสเพิ่มสูงขึ้น แต่การใช้อุณหภูมิที่สูงมากขึ้น ไม่ได้ส่งผลให้วัสดุมีสมบัติเหมาะสมในการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือวัสดุรองรับเสมอไป เพราะจะทำให้พื้นที่ผิวมีค่าลดลง เนื่องจากการเผาด้วยอุณหภูมินั้นก่อให้เกิดอนุภาคของสารรวมกันเป็นรูปผลึก (Ho et al., 2012) (Guan-Yi et al., 2015) (Che et al., 2018)

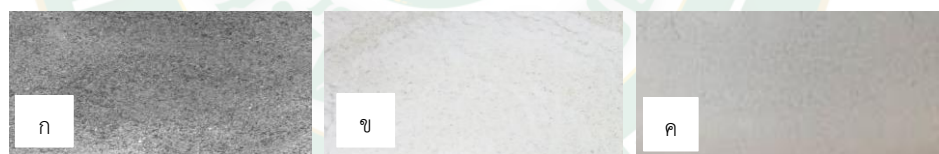
สำหรับผลด้านการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีด้วยเทคนิค XRF สามารถแสดงผลการตรวจสอบค่าองค์ประกอบของแก้วเคลือบข้าวได้ดังแสดงในตารางที่ 9 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการใช้อุณหภูมิในการแคลไซน์เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้วัสดุที่ได้มีองค์ประกอบ  $\text{SiO}_2$  เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย เป็นผลจากการสลายตัวของ  $\text{CO}_2$  ที่มีปริมาณลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิการแคลไซน์เพิ่มขึ้น โดยแก้วเคลือบข้าวที่ไม่ผ่าน (ให้ความร้อนด้วยเตาซีวมวลความร้อนสูง) และผ่านการแคลไซน์ซ้ำที่อุณหภูมิ 700 800 และ 900 °C มีค่าองค์ประกอบ  $\text{SiO}_2$  เท่ากับ 15.8488, 40.8680, 67.6831 และ 87.7405% ตามลำดับ มีค่าใกล้เคียงกับผลองค์ประกอบของแก้วเคลือบข้าวของงานวิจัย Guan-Yi et al. (2015) และ Buta and Balasubramanian (2017) ดังนั้นในงานวิจัยจึงเลือกใช้แก้วเคลือบข้าวที่มีการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นวัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าหอยขมที่สังเคราะห์ขึ้นได้ เนื่องจากมีค่า  $\text{SiO}_2$  สูงที่สุด

ตารางที่ 9 ร้อยละสารประกอบของแก้วเคลือบข้าว

ชนิดของสารประกอบ	ปริมาณสารประกอบของแก้วเคลือบข้าว (%wt)			
	เผาด้วยเตาซีวมวล	แคลไซน์ 700 °C	แคลไซน์ 800 °C	แคลไซน์ 900 °C
$\text{CO}_2$	82.8511	56.3637	26.8857	5.0578
$\text{Na}_2\text{O}$	N/A	0.0657	0.1827	0.5916
$\text{MgO}$	0.1557	0.3692	0.5782	0.6566
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.0322	0.0607	0.1275	0.2521
$\text{SiO}_2$	15.8488	40.8680	67.6831	87.7405
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.4031	0.8673	1.6356	2.1571
$\text{SO}_3$	0.0547	0.0889	0.1537	0.1607
$\text{K}_2\text{O}$	0.3943	0.8128	1.5408	2.0275
$\text{CaO}$	0.1980	0.3567	0.8445	0.8223
$\text{MnO}$	0.0264	0.0620	0.1238	0.1803
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.0194	0.0014	0.2282	0.3263
$\text{ZnO}$	0.0023	0.0084	0.0078	0.0156
$\text{Rb}_2\text{O}$	0.0013	0.0043	0.0083	0.0116
Cl	0.0127	0.0155	N/A	N/A
$\text{CuO}$	N/A	0.0537	N/A	N/A
$\text{SrO}$	N/A	0.0017	N/A	N/A
รวม	100.000	100.0000	100.0000	100.0000

### 3. ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าหอยขมบนตัวรองรับเถ้าแกลบข้าว (RSSA/RHA)

จากความต้องการการแก้ปัญหาด้านการสูญเสียไอออน  $\text{Ca}^{2+}$  บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา วิวิธพันธุ์ชนิด CaO ขณะทำปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซล และความต้องการในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ด้วยการเพิ่มพื้นที่ผิว งานวิจัยนี้ได้ใช้เถ้าแกลบข้าวมาเป็นวัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าหอยขมที่มีองค์ประกอบหลักเป็น CaO ซึ่งในหัวข้อนี้เป็นผลและการวิเคราะห์ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าหอยขมบนตัวรองรับเถ้าแกลบข้าว (RSSA/RHA) ที่ผลิตได้จากการใช้เทคนิคการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนวัสดุรองรับด้วยวิธีการเคลือบฝูแบบเปียก โดยใช้วัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าหอยขมและตัวรองรับเถ้าแกลบข้าวที่มีการสังเคราะห์ขึ้นจากการเผาแคลไซน์ที่  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 h เท่ากัน มาเคลือบฝูแบบเปียกด้วยการใช้น้ำปราศจากไอออน (DI water) เป็นตัวกลางในกระบวนการเคลือบฝู จากนั้นนำสารผสมที่ได้ไปอบไล่ความชื้นและให้ความร้อนสูงที่อุณหภูมิ  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  เพื่อให้ได้สารตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับใช้ในการผลิตไบโอดีเซล ผลทางกายภาพพบว่าเถ้าที่ได้จากการผลิตตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าหอยขมบนตัวรองรับเถ้าแกลบข้าว มีลักษณะเป็นผงเถ้าสีขาวเทา ดังแสดงในภาพที่ 41 (ค) ซึ่งเป็นผลจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าหอยขมและวัสดุรองรับเถ้าแกลบข้าวที่มีผงสีขาวและเทาเป็นวัสดุตั้งต้น (ภาพที่ 41 (ก) และ (ข)) สามารถสัมผัสถึงความละเอียดของผงเถ้า RSSA/RHA ที่มีมากกว่าวัสดุตั้งต้นที่ใช้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

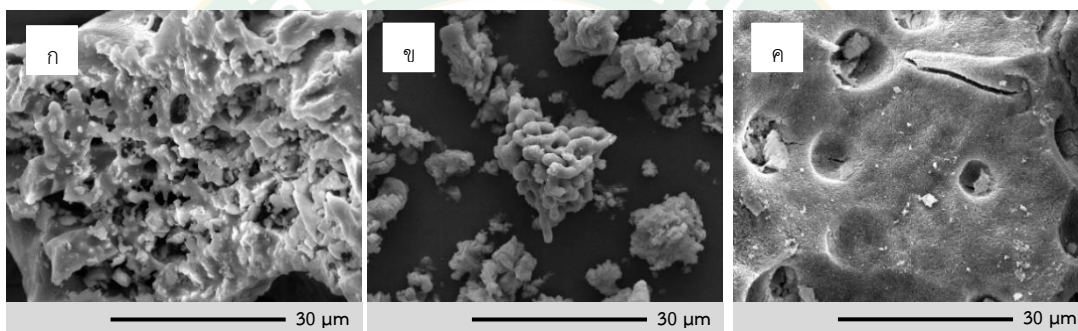


ภาพที่ 41 ลักษณะภายนอกของเถ้าต่าง ๆ

ก) RHA แคลไซน์  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  ข) RSSA แคลไซน์  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ ค) RSSA/RHA แคลไซน์  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$

ลักษณะโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA/RHA มีลักษณะแตกต่างจากผลด้าน SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA และ RHA ดังแสดงในภาพที่ 42 ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของ RHA RSSA และ RSSA/RHA ตามลำดับ ผลพบว่า RSSA/RHA ที่สังเคราะห์ได้ มีการเคลือบตัวของ RSSA อยู่บนพื้นผิวและรูพรุนของ RHA (Thiangtrong, 2015) (Guan-Yi et al., 2015) (Uprety et al., 2016) (Che et al., 2018) ดังปรากฏในภาพที่ 42 (ค) ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมสามารถอ้างอิงเหตุผลผลการเคลือบตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาบนวัสดุรองรับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Guan-Yi et al. (2015) และ Che et al. (2018) เนื่องจากมีผลภาพถ่าย SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยาบนวัสดุรองรับ

คล้ายกันกับตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA/RHA ที่สังเคราะห์ได้ (ภาพที่ 42 (ค)) โดย Guan-Yi et al. (2015) ได้ทำการตรวจสอบธาตุบนตำแหน่งพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับด้วยเทคนิค EDS ผลพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีการปลดปล่อยตัวของ Ca จากเก้าเปลือกไขบนพื้นผิวของตัวรองรับเก้ากลบข้าว และยังพบองค์ประกอบ Si กระจายรวมกันกับ Ca บนพื้นผิวนั้นเช่นกัน และในส่วนของงานวิจัยของ Che et al. (2018) ได้มีการศึกษาลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ทางการค้าบนตัวรองรับเก้ากลบข้าวเช่นกัน ผลการศึกษาจากการใช้เทคนิค EDS พบว่าพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยามีองค์ประกอบ Ca O และ Si เป็นส่วนใหญ่ จึงสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับนั้นมีการปกคลุมตัวของสารตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับเช่นกัน เพราะปรากฏธาตุองค์ประกอบของวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวรองรับกระจายทั่วพื้นผิวที่ทำการทดสอบ

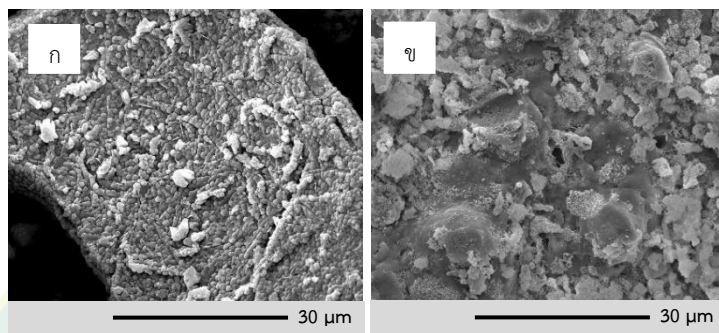


ภาพที่ 42 ลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยาของเก้าต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 5,000x

ก) RHA แคลไซน์ 900 °C ข) RSSA แคลไซน์ 900 °C และ ค) 70%wt RSSA/RHA แคลไซน์ 900 °C

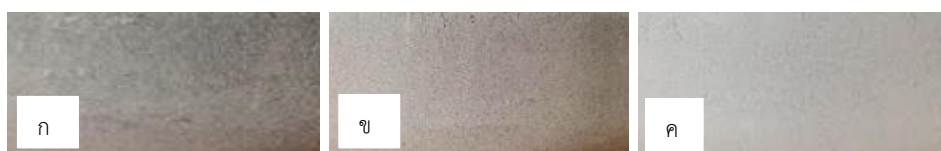
ในการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพของสารตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA/RHA ในระดับอนุภาค มีการเปรียบเทียบความจำเป็นในการแคลไซน์หรือให้ความร้อนหลังกระบวนการเคลือบฝังแบบเปียก ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA/RHA ที่ไม่มีและมีการให้ความร้อนหลังการเคลือบฝังแบบเปียก ดังแสดงในภาพที่ 43 ทำให้เห็นถึงความแตกต่างของพื้นผิวที่ได้ ซึ่งเมื่อไม่มีการให้ความร้อนหลังการเคลือบฝังแบบเปียกจะทำให้ RSSA/RHA ที่ได้มีพื้นผิวขรุขระที่เต็มไปด้วยอนุภาคทรงกลมของ RSSA ที่กระจายตัวอยู่บนวัสดุ RHA แต่การเรียงตัวนี้ไม่ละเอียดหรือมีความติดแน่นบนพื้นผิว RHA น้อยกว่า RSSA/RHA ที่ได้รับความร้อนสูงหลังการเคลือบฝังแบบเปียก ซึ่งภาพที่ 43 (ข) เห็นได้ว่าอนุภาคของ RSSA กระจายตัวอยู่ทั่วพื้นผิวของ RHA อย่างหนาแน่นและมีอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าหรือละเอียดกว่า (Guan-Yi et al., 2015) ดังนั้นจากข้อมูลและผลการวิเคราะห์ข้างต้นนี้ จึงทำให้ทราบว่า การให้ความร้อนสูงเพื่อสลาย  $\text{Ca(OH)}_2$  หลังจากการเอิมชุ่มแบบเปียกมีความสำคัญที่ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาบนวัสดุรองรับที่เตรียมขึ้นได้มีการสร้างตัวเป็นสารได

แคลเซียมซิลิเกต ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ) ซึ่งมีการเรียงตัวกันของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{CaO}$  บนวัสดุรองรับ  $\text{SiO}_2$  ที่มีรูพรุนได้อย่างละเอียดและค่อนข้างหนาแน่นมากกว่า ส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA/RHA เกิดการหลุดตัวของ  $\text{Ca}^{2+}$  ได้ยากขึ้น จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาได้ดีขึ้น (Hadiyanto et al., 2016) (Helwani et al., 2017)



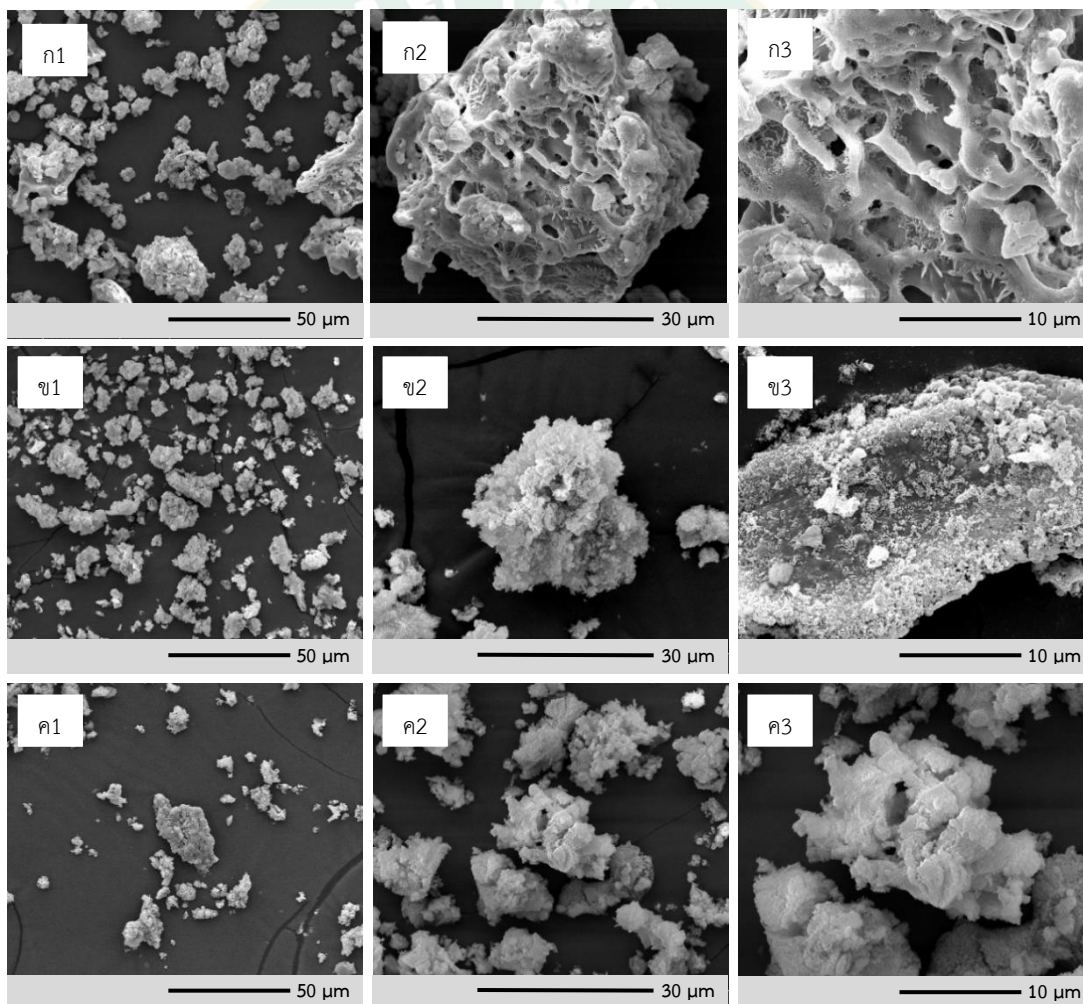
**ภาพที่ 43** ลักษณะโครงสร้าง 50%wt RSSA/RHA ที่ไม่มีและมีการแคลไซน์หลังการเตรียมสาร  
ก) 50%wt RSSA/RHA ไม่แคลไซน์ และ ข) 50%wt RSSA/RHA แคลไซน์ 900 °C 4 h

เมื่อได้ทราบถึงความสำคัญของขั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA/RHA แล้ว สิ่งสำคัญอีกหนึ่งอย่างที่ทำการศึกษาในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA/RHA นี้ คือ อัตราส่วนความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{CaO}$  จากเถ้าหอยขมต่อความเข้มข้นของปริมาณวัสดุรองรับ  $\text{SiO}_2$  เถ้าแกลบข้าว ซึ่งขอบเขตงานวิจัยกำหนดให้มีการศึกษาการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA/RHA ที่ความเข้มข้นของเถ้าหอยขม 30 50 และ 70%wt ตามลำดับ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพพบว่า เถ้าที่เตรียมได้จากอัตราส่วนต่าง ๆ มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเทาขาวที่มีความสว่างหรือขาวมากขึ้นตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 44 เป็นผลมาจากการใช้ปริมาณของเถ้าแกลบข้าวที่มีค่าสูงไปต่ำ ในอัตราส่วนการผสมของตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าหอยขมต่อตัวรองรับเถ้าแกลบข้าว 30 50 และ 70%wt จึงทำให้ผงเถ้า RSSA/RHA ที่ได้มีความเข้มของสีเทาแตกต่างกัน



**ภาพที่ 44** ลักษณะของ RSSA/RHA ที่อัตราส่วนความเข้มข้นของ RSSA:RHA ต่างกัน  
ก) 30%wt ข) 50%wt และ ค) 70%wt

ในส่วนของการศึกษาสมบัติทางกายภาพด้วยเทคนิค SEM ที่ให้ข้อมูลลักษณะโครงสร้างที่ละเอียดกว่า พบว่าการใช้ RSSA ต่อ RHA ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ทำให้เกิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความแตกต่างกันของลักษณะพื้นผิว ดังแสดงในภาพที่ 45 ซึ่งเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้น 30%wt วัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้จะมีรูพรุนสูง เพราะมีความเข้มข้นของเถ้าหอยขมต่ำ จึงทำให้อนุภาคของ CaO จากเถ้าหอยขมเข้าไปปกคลุมพื้นผิวและรูพรุนของ RHA ได้ไม่มากเท่าที่อัตราส่วนความเข้มข้นอื่น ๆ จึงคงเหลือลักษณะพื้นผิวที่มีรูพรุนสูงกว่า โดยจากภาพที่ 45 (ข1-ข3 และ ค1-ค3) ชี้ให้เห็นว่าการใช้ความเข้มข้นของเถ้าหอยขมสูงขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยามีลักษณะพื้นผิวที่มีการปกคลุมตัวของเถ้าหอยขมหนาแน่นเพิ่มขึ้น แต่มีค่ารูพรุนลดต่ำลงตาม (Guan-Yi et al., 2015)



ภาพที่ 45 โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของ RSSA/RHA ที่ความเข้มข้นของ RSSA:RHA ต่างกัน

ก1-ก3 : 30%wt, ข1-ข3 : 50%wt และ ค1-ค3 : 70%wt

ภายใต้กำลังขยาย 2,000x 5,000x และ 10,000x ตามลำดับ

เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA/RHA ที่มีความเข้มข้นของเถ้าหอยขมต่อเถ้าแกลบข้าว 30 50 และ 70%wt จะได้ข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 10 ซึ่งเป็นผลปริมาณสารประกอบของ RSSA/RHA ผลพบว่าเมื่อมีการใช้เถ้าหอยขมในอัตราส่วนเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้มีองค์ประกอบเป็น CaO เพิ่มขึ้น ซึ่งที่ความเข้มข้น RSSA:RHA 30 50 และ 70%wt มีค่า CaO เท่ากับ 32.4145 44.3340 และ 71.9634% ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาในส่วนขององค์ประกอบ SiO<sub>2</sub> พบว่ามีค่าลดต่ำลง เพราะเมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนค่าความเข้มข้นของเถ้าหอยขมมากขึ้น เถ้าแกลบข้าวจะถูกใช้น้อยลง SiO<sub>2</sub> จึงมีความเข้มข้นลดลงตามไปด้วย (Guan-Yi et al., 2015) (Thiangtrong, 2015)

ตารางที่ 10 ร้อยละสารประกอบของเถ้าหอยขมบนตัวรองรับเถ้าแกลบข้าว

ชนิดของสารประกอบ	ปริมาณสารประกอบธาตุของ RSSA/RHA (%wt)		
	30%wt	50%wt	70%wt
CO <sub>2</sub>	6.5620	26.8135	13.2703
Na <sub>2</sub> O	0.1106	N/A	N/A
MgO	0.4784	0.2292	0.1215
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.1226	0.0833	0.0651
SiO <sub>2</sub>	56.9163	26.7619	13.4724
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.7549	0.7088	0.4053
SO <sub>3</sub>	0.1458	0.0831	0.0903
K <sub>2</sub> O	1.1078	0.6423	0.2759
CaO	32.4145	44.3340	71.9634
MnO	0.1571	0.1024	0.0941
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.1804	0.1893	0.1782
ZnO	0.0164	0.0148	N/A
Rb <sub>2</sub> O	0.0076	0.0060	N/A
SrO	0.0254	0.0315	0.0584
รวม	100.0000	100.0000	100.0000

### ผลและวิเคราะห์ผลด้านร้อยละผลผลิตไบโอดีเซล

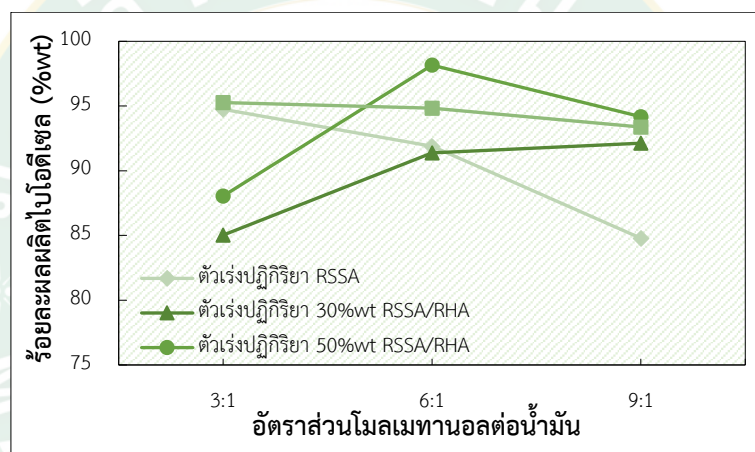
ผลการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลในหัวข้อนี้ เป็นผลของการผลิตไบโอดีเซลในระดับห้องปฏิบัติการที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าหอยขม (RSSA) และตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้า

หอยขมบนตัวรองรับเถ้าแกลบข้าว (RSSA/RHA) ภายใต้การศึกษาปริมาณผลผลิตไบโอดีเซล (จากการทบทวนงานวิจัยพบว่าควรมีค่าผลผลิตด้านไบโอดีเซลสูงกว่า 80%wt (Mecher et al., 2006) ในขณะที่ค่าร้อยละองค์ประกอบด้านเมทิลเอสเทอร์ควรมีค่าไม่ต่ำกว่า 96.50%wt (ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน, 2556)) ด้วยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกัน ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA ตัวเร่งปฏิกิริยา 30% RSSA/RHA 50%wt RSSA/RHA และ 70%wt RSSA/RHA ที่ได้จากการใช้ปัจจัยการผลิตต่าง ๆ ได้แก่ ผลการใช้อัตราส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1 6:1 และ 9:1 ผลการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 2 และ 3%wt ผลด้านการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA/RHA ที่มีอัตราส่วนความเข้มข้นของ RSSA:RHA แตกต่างกัน 30 50 และ 70%wt และผลด้านระยะเวลาการผลิต 1 และ 2 h ภายใต้สภาวะเดียวกัน คือ มีอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 60-65 °C ที่ความดันบรรยากาศ และสารจะถูกกวนผสมอย่างต่อเนื่องที่ความเร็วรอบ 300-500 rpm ซึ่งในผลการศึกษาที่กำหนดค่าผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้เป็นค่าร้อยละผลได้ของน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากการทำปฏิกิริยา ทั้งนี้สำหรับเงื่อนไขการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากเถ้าแกลบข้าว (RHA) จะไม่ทำการทดสอบ เนื่องจากผลจากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าการใช้เถ้าแกลบข้าวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลก่อให้เกิดผลผลิตไบโอดีเซลต่ำเหมาะแก่การนำใช้ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นในเชิงสนับสนุนพื้นที่ผิว เพราะมีคุณสมบัติเป็นตัวดูดซับจากการมีองค์ประกอบ Si เป็นหลัก (พชยาภรณ์ สิงห์ธัญ, 2561) ในส่วนของงานวิจัย Marinkovic et al. (2014) พบว่า การใช้วัสดุรองรับประเภท  $Al_2O_3$  ไม่ก่อให้เกิดผลผลิตด้านความเป็นเมทิลเอสเทอร์ (%FAME) เนื่องจากไม่เกิดการเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน รวมไปถึงจากการศึกษาผลการวิจัยของ Young and Sung (2019) พบว่า การใช้ RHA ในการผลิตไบโอดีเซลในสถานะของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อให้เกิดผลผลิตไบโอดีเซลต่ำมาก ไม่เหมาะกับการนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล

### 1. การใช้ปริมาณเมทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA และ RSSA/RHA ที่แตกต่างกัน

ผลด้านร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลที่มีความสัมพันธ์กับปัจจัยการใช้ปริมาณเมทานอลในรูปของอัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1 6:1 และ 9:1 จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA และ RSSA/RHA ที่มีอัตราการผลิต RSSA:RHA แตกต่างกัน ปริมาณ 1%wt ภายใต้เงื่อนไขการผลิตเดียวกัน คือ มีอุณหภูมิทำปฏิกิริยา 60-65 °C กวนผสมสารอย่างต่อเนื่อง 300-500 rpm และมีระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 1 h ผลพบว่าปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้มีค่าแสดงดังภาพที่ 46 ซึ่งพบว่าไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากการใช้ RSSA เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีร้อยละผลผลิตลดลง เมื่อมีการใช้ปริมาณเมทานอลเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมันที่ 3:1 มีผลผลิตสูงสุด 94.75%wt สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Wadood and Marwa (2015) และ Sahar et al. (2018) และใน

ส่วนของการผลิตไบโอดีเซลที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 30 50 และ 70%wt RSSA/RHA พบว่ามีเพียงการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 70%wt RSSA/RHA เท่านั้น ที่ก่อให้เกิดผลผลิตที่มีแนวโน้มเดียวกันกับ RSSA โดยที่อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1 ก่อให้เกิดผลผลิตสูงสุด 95.27%wt แต่ในส่วนที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 30%wt RSSA/RHA พบว่าที่เมื่อมีการใช้ปริมาณเมทานอลเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้การผลิตไบโอดีเซลมีร้อยละผลผลิตเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tshizanga (2015) โดยที่อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1 ส่งผลให้เกิดร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลสูงถึง 92.13%wt และ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 50%wt RSSA/RHA ส่งผลแนวโน้มการผลิตในรูปแบบเดียวกัน คือ เมื่อมีการใช้ปริมาณเมทานอลเพิ่มขึ้น ผลผลิตที่ได้จะมีค่าสูงตามไปด้วย ยกเว้นที่อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมันที่ 6:1 ที่มีผลผลิตสูงสุด 98.16%wt



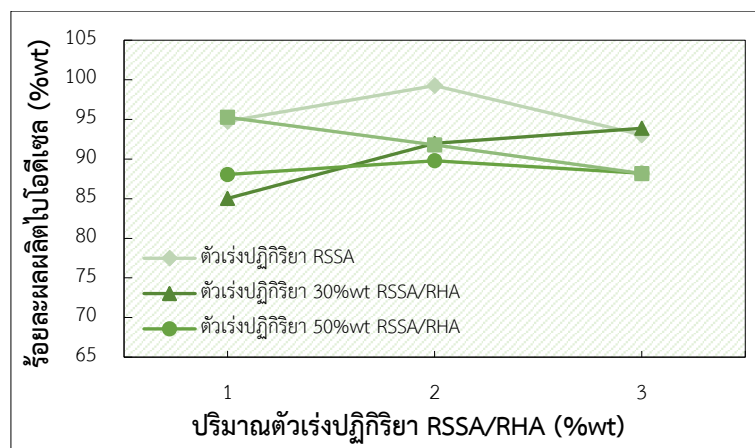
ภาพที่ 46 ผลผลิตไบโอดีเซลกับอัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมันที่แตกต่างกัน

ผลการศึกษาที่กล่าวไปข้างต้น ชี้ให้เห็นว่าการผลิตไบโอดีเซลจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ RSSA และ RSSA/RHA มีค่าร้อยละผลผลิตอยู่ในช่วงที่มากกว่า 80%wt ใกล้เคียงกับผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้จากการใช้ CaO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการศึกษาของ Singh et al. (2011) แต่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 4 รูปแบบ ได้แก่ RSSA, 30%wt RSSA/RHA, 50%wt RSSA/RHA และ 70%wt RSSA/RHA มีแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตไบโอดีเซลกับอัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมันแตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นแล้วว่าถึงแม้ตามทฤษฎีการผลิตไบโอดีเซลกำหนดให้มีการใช้ปริมาณเมทานอลในอัตราส่วนโมลต่อน้ำมัน 3:1 แต่จากการปฏิบัติการทดสอบจริงพบว่าการใช้ปริมาณเมทานอลเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดสมบูรณ์มากขึ้น (Singh et al., 2011) โดยที่อัตราส่วนโมล 6:1-9:1 มักจะก่อให้เกิดผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุด (Verma and Sharma, 2016) แต่ไม่ว่าอย่างไรก็ตามการใช้อัตราส่วนโมลเมทานอลที่มากเกินไป ไม่ก่อให้เกิดผลผลิตที่มีค่าเพิ่มขึ้นเสมอไป (Wei et al., 2009)

เนื่องจากการใช้เมทานอลปริมาณที่มากเกินไป เป็นหนึ่งปัจจัยที่ก่อให้เกิดการลดลงของผลผลิตได้ เพราะกลีเซอรินจากกระบวนการผลิตจะมีการละลายผสมอยู่ในเมทานอลส่วนเกินนี้ ส่งผลให้การทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดไบโอดีเซลถูกขัดขวาง ผลผลิตที่ได้จึงมีค่าลดต่ำลง (Widayat et al., 2017) อีกทั้งอาจเกิดการย้อนกลับของปฏิกิริยาได้ ซึ่งเมื่อปฏิกิริยาได้เข้าสู่ภาวะสมดุลแล้ว การเพิ่มปริมาณเมทานอลมากขึ้นจะไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาในส่วนที่เป็นประโยชน์ เพราะอาจก่อให้เกิดความยุ่งยากในการแยกกลีเซอรินออกจากผลิตภัณฑ์ ทำให้การกลั่นเมทานอลกลับมาใช้งานกลายเป็นสิ่งที่ยุ่งยากมากขึ้น รวมไปถึงทำให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มสูงขึ้นโดยเปล่าประโยชน์ ดังนั้นการศึกษาปริมาณเมทานอลที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจึงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยหลักที่สำคัญต่อการผลิตไบโอดีเซลที่มีการใช้วัตถุดิบแตกต่างกัน

จากภาพเดียวกันจะเห็นได้อีกว่าเมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA/RHA ทั้ง 3 อัตราส่วน ก่อให้เกิดผลผลิตไบโอดีเซลที่มีแนวโน้มสูงกว่าการใช้ RSSA เพียงอย่างเดียว โดยเฉพาะที่อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 และ 9:1 เนื่องจาก RSSA/RHA มีพื้นที่ผิวหรือตำแหน่งกัมมันต์สูงกว่า RSSA ที่เป็นผลเนื่องมาจากการใช้วัสดุรองรับแล้วเคลือบข้าว จึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์มากกว่าการใช้ RSSA ซึ่งในการเลือกเงื่อนไขอัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมันที่เหมาะสม ถึงแม้การใช้ 50%wt RSSA/RHA ที่อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 จะให้ผลผลิตสูงที่สุด 98.16%wt แต่เมื่อคำนึงถึงความต้องการในลดต้นทุนการผลิต พบว่าการใช้อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมันที่ 3:1 สามารถให้ร้อยละผลผลิตสูง 93.47 และ 89.51%wt เมื่อมีการใช้ RSSA และ 70%wt RSSA/RHA ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือกใช้อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมันที่ 3:1 เป็นปริมาณเมทานอลที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล

สำหรับผลผลิตไบโอดีเซลที่มีความสัมพันธ์กับปัจจัยการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA และ RSSA/RHA ปริมาณ 1 2 และ 3%wt ภายใต้เงื่อนไขการผลิตที่มีการใช้อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1 อุณหภูมิ 60-65 °C อัตราการกวนผสมสาร 300-500 rpm ที่เวลาการทำปฏิกิริยา 1 h มีผลผลิตไบโอดีเซลดังแสดงในภาพที่ 47 ซึ่งการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA มีผลผลิตสูงกว่า 90%wt โดยที่ใช้ RSSA ปริมาณ 2%wt ก่อให้เกิดไบโอดีเซลสูงสุด 99.27%wt สอดคล้องกับผลการศึกษารายงานของ Birla et al. (2012) และ Young and Sung (2019) ส่วนผลการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA/RHA พบว่าเมื่อมีการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 30%wt RSSA/RHA เพิ่มขึ้น จะก่อให้เกิดผลผลิตไบโอดีเซลเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย แต่ในส่วนของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 50%wt RSSA/RHA ให้ผลผลิตสูงที่สุด 89.78%wt ที่ปริมาณการใช้ 2%wt และในการใช้ 70%wt RSSA/RHA เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่เพิ่มขึ้น พบว่าไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีค่าลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tshizanga (2015) ซึ่งที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt ผลผลิตสูงที่สุด 95.27%wt



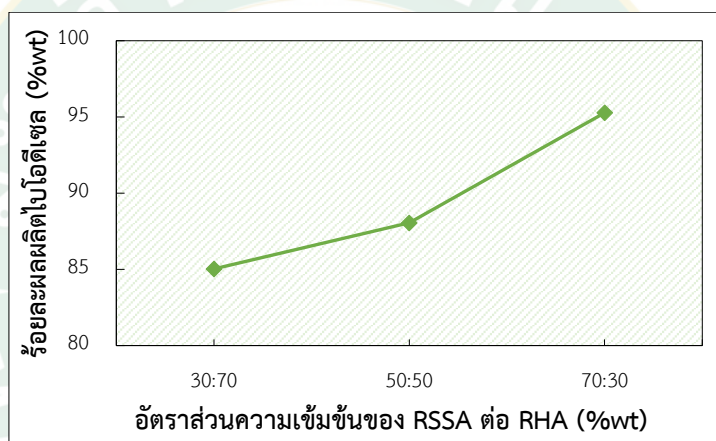
ภาพที่ 47 ผลผลิตไบโอดีเซลกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน

จากผลที่ได้กล่าวไปข้างต้น พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้มีแนวโน้มหลากหลายรูปแบบ จึงเห็นได้ว่าการค้นหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในแต่ละกระบวนการการผลิตไบโอดีเซลเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง เพราะการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่ต่ำไป ส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่กระบวนการผลิตต้องการมีปริมาณไม่เพียงพอที่จะเข้าไปช่วยลดพลังงานก่อกัมมันต์ลงได้ต่ำพอที่จะเกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ภายใต้เงื่อนไขการผลิตต่าง ๆ จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าต่ำกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่เหมาะสม อีกทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวอาจสูญเสียไปกับการถูกแย่งไปทำปฏิกิริยาการสร้างสบู่ออกไซด์ของน้ำมันวัตถุดิบ มากไปกว่านั้นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณมากขึ้น ไม่ได้เป็นการเพิ่มค่าร้อยละผลผลิตเสมอไป (Guan-Yi et al., 2015) เพราะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีปริมาณมากเกินไปเกินความต้องการของกระบวนการผลิต สารส่วนเกินเหล่านี้จึงเข้าทำปฏิกิริยาข้างเคียงกับกรดไขมันในวัตถุดิบ ทำให้สารตั้งต้นเกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ประเภทสบู่มากขึ้น ไบโอดีเซลที่ควรจะมีปริมาณสูงจึงลดต่ำลง (Ghadge and Raheman, 2006) (Hadiyanto et al., 2016)

ในการเลือกปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไบโอดีเซลในงานวิจัยนี้ ที่มีการใช้ RSSA และ RSSA/RHA เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 1%wt เป็นค่าที่เหมาะสม เนื่องจากให้ผลิตภัณฑ์สูงสุดเมื่อมีการใช้ RSSA และ 70%wt RSSA/RHA ในกระบวนการผลิต โดย 70%wt RSSA/RHA มีค่าเฉลี่ยร้อยละผลผลิตเท่ากับ 91.74%wt รองลงมาคือค่าร้อยละผลผลิตจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 30%wt RSSA/RHA และ 50%wt RSSA/RHA ที่มีค่า 90.30 และ 88.68%wt ตามลำดับ มากไปกว่านั้นพบว่าข้อดีของการเลือกใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยานี้ สามารถลดต้นทุนการผลิตลงได้ เพราะมีการใช้ปริมาณสารตั้งต้นลดลง และช่วยลดของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตได้อีกด้วย

## 2. การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA/RHA ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่างกัน

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าหอยขมบนตัวรองรับเถ้ากลบข้าวที่มีความเข้มข้นของอัตราการผลิตผสมของ RSSA ต่อ RHA แตกต่างกันได้แก่ 30:50 50:50 และ 70:30 ภายใต้เงื่อนไขการผลิตที่มีการใช้อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt เวลา 1 h อุณหภูมิ 60-65 °C และมีการกวนผสมที่ 300-500 rpm พบว่าก่อให้เกิดผลผลิตไบโอดีเซลดังแสดงในภาพที่ 48 ซึ่งการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 70%wt RSSA/RHA สามารถผลิตไบโอดีเซลได้สูงสุดที่ 95.27%wt รองลงมาคือ 50%wt RSSA/RHA และ 30%wt RSSA/RHA ที่มีค่าร้อยละผลผลิตเท่ากับ 88.05 และ 85.03%wt ตามลำดับ



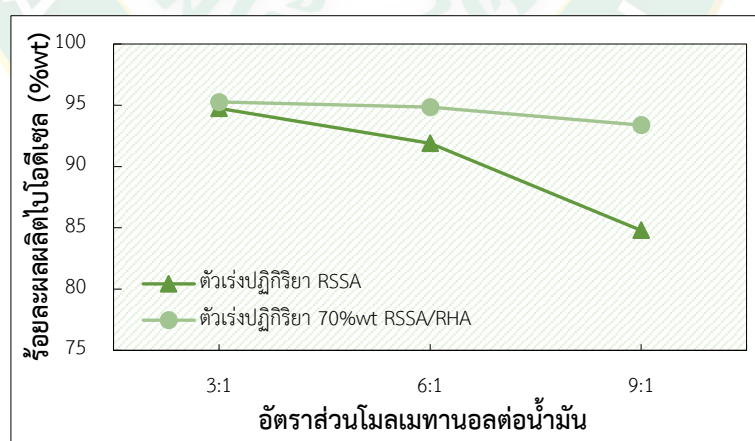
ภาพที่ 48 ผลผลิตไบโอดีเซลที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA/RHA ความเข้มข้นต่างกัน

ผลที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับที่มีการใช้อัตราส่วนความเข้มข้นของ RSSA:RHA มากขึ้น ทำให้ไบโอดีเซลที่ได้มีค่าร้อยละผลผลิตเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย เพราะตัวเร่งปฏิกิริยา 70%wt RSSA/RHA มีความเข้มข้นของเถ้าหอยขมมากที่สุด โดยเถ้าหอยขมเป็นแหล่งของสารประกอบ CaO ที่มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซล จึงทำให้เกิดร้อยละผลผลิตสูงที่สุดเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA/RHA อื่น ๆ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lani et al. (2017) และในอีกแง่หนึ่งสามารถกล่าวได้ว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 50%wt RSSA/RHA และ 30%wt RSSA/RHA ให้ผลผลิตต่ำกว่า 70%wt RSSA/RHA เพราะมีค่าความเข้มข้นของสารประกอบ SiO<sub>2</sub> สูงขึ้นตามลำดับ โดยสาร SiO<sub>2</sub> มีความเป็นกรดสูงและมีคุณสมบัติเป็นวัสดุรองรับ หากมีปริมาณมากไป ไม่ได้ช่วยเร่งปฏิกิริยาการผลิตให้เกิดขึ้นสมบูรณ์มากขึ้นกว่าการใช้ในปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งควรใช้เพื่อสนับสนุนด้านการเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับตัวเร่งปฏิกิริยา CaO มากกว่า ดังนั้นในงานวิจัยที่มีการศึกษา

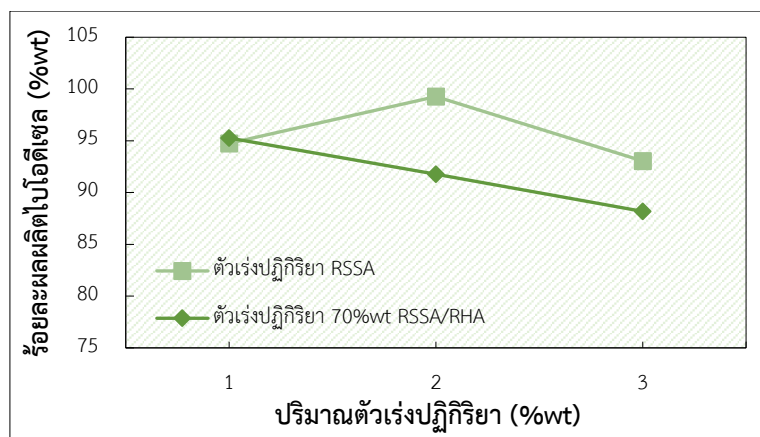
การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าหอยขมบนวัสดุรองรับ  $\text{SiO}_2$  จากเถ้าแกลบข้าว จึงเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 70%wt RSSA/RHA ในการนำไปศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว เพื่อเปรียบเทียบค่าอื่น ๆ และเพื่อใช้ในการผลิตในระดับเครื่องต้นแบบ

### 3. การเปรียบเทียบการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA และ 70%wt RSSA/RHA

จากผลและวิเคราะห์ผลในหัวข้อก่อนหน้า เป็นผลปัจจัยการใช้ปริมาณเมทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันภายใต้การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA และ RSSA/RHA รวมไปถึงผลปัจจัยใช้อัตราส่วนผสม RSSA:RHA ที่แตกต่างกันของตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA/RHA ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้ว จะนำผลดังกล่าวมาทำการเปรียบเทียบกันระหว่างค่าร้อยละผลผลิตที่เกิดขึ้นจากการใช้ RSSA และ 70%wt RSSA/RHA ในหัวข้อนี้ เพื่อแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวีวทัศน์แบบเดี่ยวและแบบที่มีวัสดุรองรับช่วยเพิ่มพื้นที่ผิว ผลการเปรียบเทียบจะเป็นค่าร้อยละผลผลิตที่เกิดขึ้นเมื่อมีการใช้อัตราส่วนโมลเมทานอลแตกต่างกัน จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA และ 70%wt RSSA/RHA ปริมาณ 1%wt ดังแสดงในภาพที่ 49 และเป็นผลผลิตที่ได้จากการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแตกต่างกัน ภายใต้การใช้อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมันคงที่ที่ 3:1 ดังแสดงในภาพที่ 50 ซึ่งทั้งสองส่วนมีเงื่อนไขการทำปฏิกิริยาอื่น ๆ เหมือนกัน คือ ใช้เวลา 1 h อุณหภูมิ 60-65 °C และมีการกวนผสมที่ 300-500 rpm



ภาพที่ 49 ความสัมพันธ์ของผลผลิตกับชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณการใช้ 1%wt



ภาพที่ 50 ผลผลิตไบโอดีเซลกับชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการใช้อัตราส่วนโมลเมทานอล 3:1

ผลในภาพที่ 49 แสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA และ 70%wt RSSA/RHA มีแนวโน้มผลผลิตไบโอดีเซลในรูปแบบเดียวกัน คือ เมื่อมีการเพิ่มการใช้ปริมาณเมทานอลเพิ่มขึ้น ผลผลิตจะมีค่าต่ำลง ซึ่งการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 70%wt RSSA/RHA สามารถเพิ่มปริมาณผลผลิตที่มีค่ามากกว่าการใช้ RSSA เพียงอย่างเดียวได้อย่างชัดเจนที่ 95.27, 94.84 และ 93.38%wt สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Lani et al. (2017) เนื่องจากสามารถก่อให้เกิดปฏิกิริยาการผลิตที่สมบูรณ์มากขึ้น เมื่อมีค่าตำแหน่งกัมมันต์สูงขึ้นจากการใช้วัสดุรองรับ

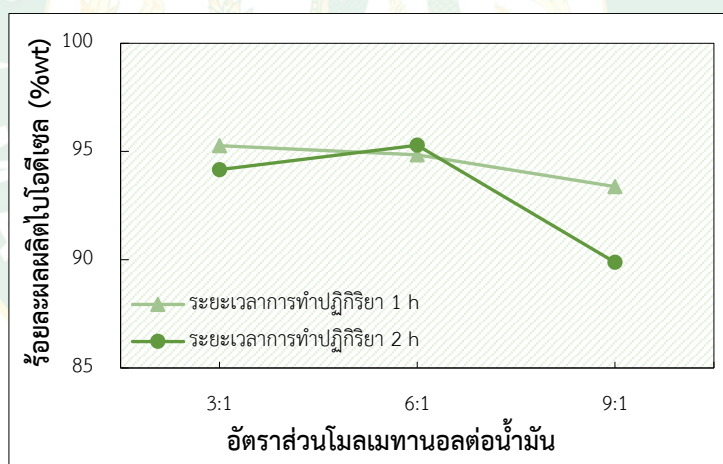
ในส่วนของการวิเคราะห์ในส่วนของผลการผลิตไบโอดีเซลที่เกิดจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA และ 70%wt RSSA/RHA ปริมาณแตกต่างกันดังภาพที่ 50 พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 70%wt RSSA/RHA สามารถเพิ่มผลผลิตไบโอดีเซลให้สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA ที่ปริมาณการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 95.27%wt โดยในส่วนอื่น ๆ ยังพบว่าแนวโน้มผลผลิตที่ได้ยังมีค่าต่ำกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA เนื่องจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA ที่มากขึ้น จะมีปริมาณ CaO สูงขึ้น ทำให้เกิดผลผลิตสูงสุด 99.27%wt ที่ปริมาณการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2%wt แต่เมื่อใช้ RSSA และ 70%wt RSSA/RHA ในปริมาณที่สูงเกินกว่าค่าที่ให้ผลผลิตไบโอดีเซลสูงที่สุด พบว่าผลผลิตต่ำลง เนื่องจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากเกินไป อาจก่อให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงเข้าขัดขวางกระบวนการการก่อให้เกิดไบโอดีเซลได้ (Ghadge and Raheman, 2006) (Hadiyanto et al., 2016)

เมื่อคำนึงถึงความต้องการในการลดต้นทุนการผลิตลง พบว่าการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 1%wt และอัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1 ยังพบว่าค่าผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้จากการใช้ 70%wt RSSA/RHA มีค่าสูงกว่าการใช้ RSSA เพียงอย่างเดียว ดังนั้นในงานวิจัยที่มีการศึกษาการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้าหอยขมบนวัสดุรองรับ  $\text{SiO}_2$  จากถ้ำกลบข้าวเปรียบเทียบกับการใช้

ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าหอยขมแบบเดี่ยว จึงเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 70%wt RSSA/RHA ในการนำไปศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว เพื่อเปรียบเทียบกับค่าอื่น ๆ และเพื่อใช้ในการผลิตในระดับเครื่องต้นแบบต่อไป

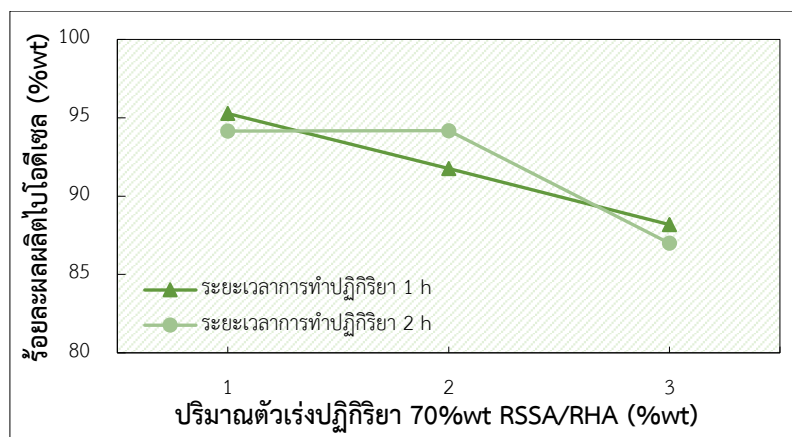
#### 4. การใช้ 70%wt RSSA/RHA ในการผลิตที่มีระยะเวลาแตกต่างกัน

ในส่วนของผลและวิเคราะห์ผลในหัวข้อนี้เป็นผลด้านร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลที่มีความสัมพันธ์กับปัจจัยการใช้ระยะเวลาการผลิตที่แตกต่างกัน 1 และ 2 h ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 70%wt RSSA/RHA ภายใต้เงื่อนไขการทำปฏิกิริยาอื่น ๆ ที่มีอุณหภูมิ 60-65 °C และมีการกวนผสมที่ 300-500 rpm เหมือนกัน โดยมีผลค่าร้อยละผลผลิตที่ได้จากการใช้อัตราส่วนโมลเมทานอลแตกต่างกัน ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 70%wt RSSA/RHA 1%wt ดังแสดงในภาพที่ 51 และเป็นผลผลิตที่ได้จากการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแตกต่างกัน ภายใต้การใช้อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมันคงที่ 3:1 ดังแสดงในภาพที่ 52



ภาพที่ 51 ผลผลิตไบโอดีเซลที่มีการใช้ระยะเวลาและอัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมันแตกต่างกัน

จากภาพที่ 51 พบว่าการผลิตไบโอดีเซลจากตัวเร่งปฏิกิริยา 70%wt RSSA/RHA ที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 2 h สามารถเพิ่มผลผลิตไบโอดีเซลให้สูงขึ้นได้ เมื่อเปรียบเทียบกับจากการใช้ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเพียง 1 h ในกรณีที่มีการใช้ปริมาณเมทานอลที่อัตราส่วนโมล 6:1 เท่านั้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 95.29%wt และจากภาพที่ 52 พบว่าการใช้ระยะเวลาการผลิต 2 h สามารถเพิ่มผลผลิตได้อย่างชัดเจนในกรณีที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณ 2%wt ซึ่งมีค่าเท่ากับ 94.18%wt



ภาพที่ 52 ผลผลิตไบโอดีเซลที่มีการใช้ระยะเวลาและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแตกต่างกัน

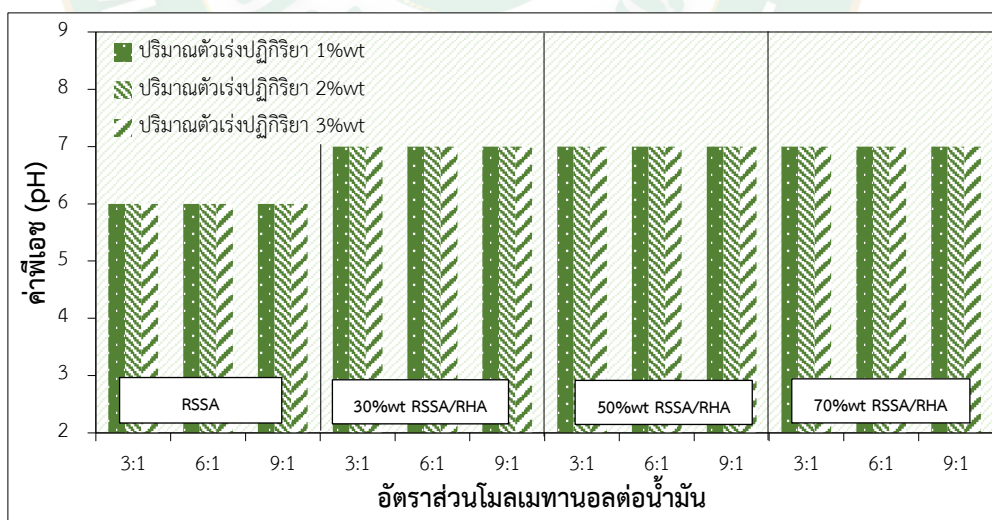
เมื่อทำการพิจารณาผลของค่าผลิตภัณฑ์ที่ได้พบว่าเป็นผลมาจากความสมบูรณ์ของการเกิดปฏิกิริยาที่มีมากขึ้น เนื่องจากการใช้ระยะเวลาการผลิตเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สามารถเพิ่มค่าผลผลิตที่ต้องการได้ (Guan-Yi et al., 2015) (Dalibor et al., 2015) เพราะสารตั้งต้นต้องการระยะเวลาที่เหมาะสมในการเข้าทำปฏิกิริยา หากมีระยะเวลาการผลิตสั้นเกินไป ผลผลิตที่ได้จะมีค่าต่ำลงเนื่องจากปฏิกิริยาเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ (Lukic et al., 2009) โดยสำหรับในกรณีของการใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 h ในการศึกษาครั้งนี้ เกิดผลผลิตที่มีค่าสูงขึ้นจากการทำปฏิกิริยา 1 h เล็กน้อย จึงสรุปได้ว่าการใช้เวลาการทำปฏิกิริยาที่ 1 h เป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 70%wt RSSA/RHA แต่ทั้งนี้ยังต้องทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมในส่วนของคุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากการใช้ระยะเวลาการผลิตแตกต่างกัน เพื่อตรวจสอบหาค่าระยะเวลาการผลิตที่เหมาะสมอีกครั้งต่อไป

#### ผลและวิเคราะห์ผลคุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตได้

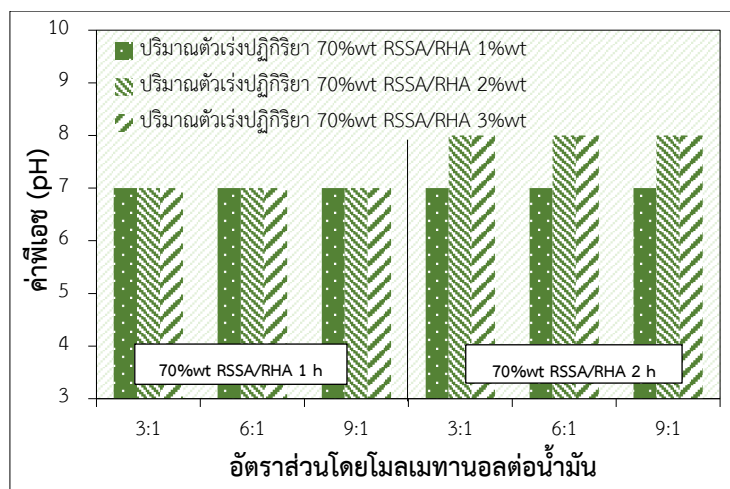
ไบโอดีเซลที่ผลิตได้จะถูกนำไปวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ อันประกอบไปด้วยค่าพีเอช (pH) ค่าความเป็นกรด ความหนาแน่น (Density) ความหนืด (Viscosity) จุดวาบไฟ-จุดติดไฟ (Flash point & Fire point) และจุดขุ่นมัว-จุดไหลเท (Cloud point & Pour point) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

## 1. ค่าพีเอชของไบโอดีเซล

สำหรับผลคุณสมบัติด้านค่า pH ของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ เป็นการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดเบสเบื้องต้นของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ ซึ่งจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA และ RSSA/RHA ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว ภายใต้การใช้ระยะเวลาการผลิต 1 h มีอุณหภูมิ 60-65 °C และมีการกวนผสมที่ 300-500 rpm เหมือนกัน จะได้ผลการผลิตที่มีค่า pH แสดงในภาพที่ 53 เห็นได้ว่าไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA ให้ผลผลิตที่มีค่า pH ประมาณ 6 และในส่วนของ การใช้ RSSA/RHA ที่มีความเข้มข้นของเถ้าหอยขม 30 50 และ 70%wt ให้ผลผลิตที่มีค่า pH เท่ากับ 7 สอดคล้องกับงานวิจัยของศศิประภา แก้วแดง (2560) ซึ่งถือได้น้ำมันเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีค่าส่วนใหญ่เป็นกลาง มีความเป็นกรดอ่อนและเบสอ่อนเล็กน้อย ไม่เป็นอันตรายต่อการใช้งานในเครื่องยนต์ดีเซล โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ในส่วนที่มีการใช้ระยะเวลาการผลิตแตกต่างกันในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 70%wt RSSA/RHA ดังแสดงในภาพที่ 54 พบว่าที่ระยะเวลาการผลิต 2 h ให้ผลผลิตที่มีค่า pH ประมาณ 8 จากที่กล่าวมาทั้งหมด เป็นผลจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีค่าความเป็นเบสหรือบริเวณเร่งเบสสูงขึ้น ทำให้ค่า pH ที่ได้มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเมื่อมีการใช้ 70%wt RSSA/RHA ที่ระยะเวลาการผลิต 2 h ผลผลิตที่ได้มีค่า pH เท่ากับ 8 เป็นส่วนใหญ่ เพิ่มขึ้นตามความแรงเบสของตัวเร่งปฏิกิริยานั้น (พิชยาภรณ์ สิงห์รัญ, 2561)



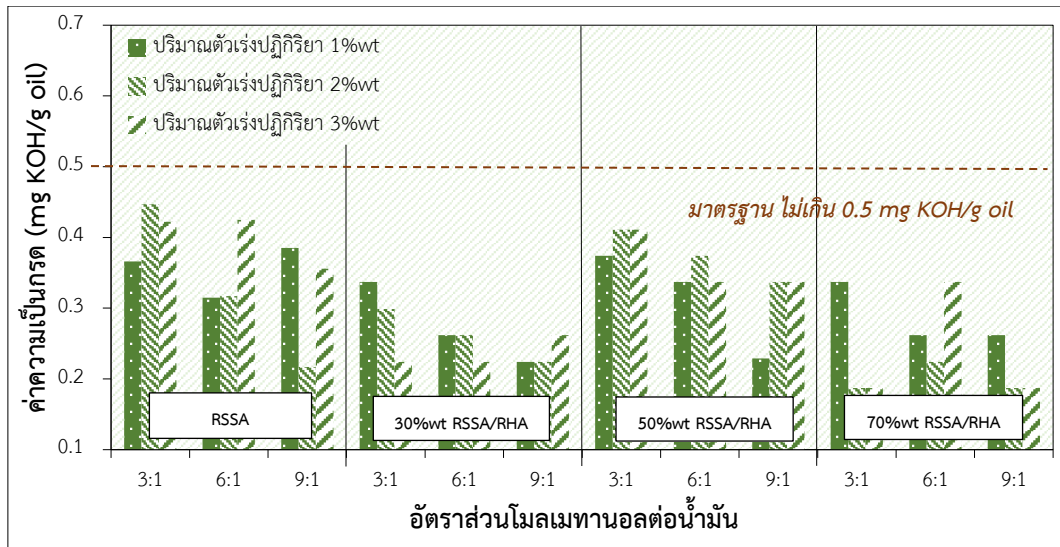
ภาพที่ 53 ค่า pH ของไบโอดีเซลที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกัน



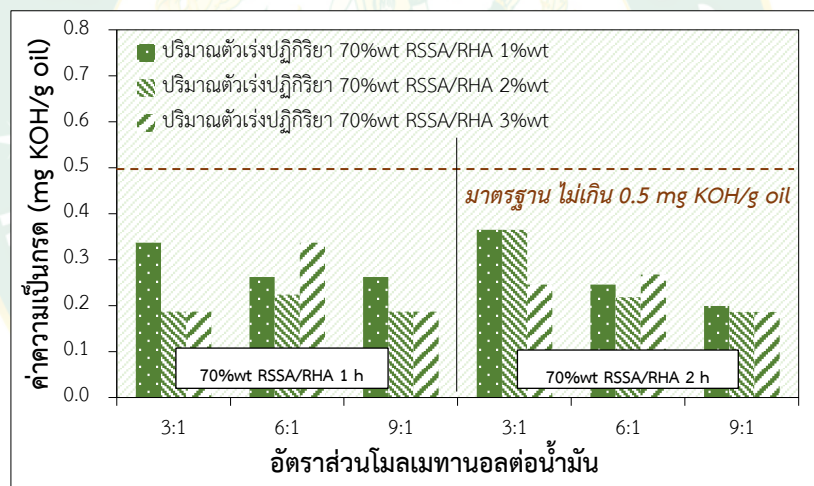
ภาพที่ 54 ค่า pH ของไบโอดีเซลจากการใช้ 70%wt RSSA/RHA ระยะเวลาต่างกัน

## 2. ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซล

กรมธุรกิจพลังงานกำหนดค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลด้วยมาตรฐาน ASTM D664 ซึ่งควรมีค่าไม่เกิน 0.5 mg KOH/g oil เพราะเมื่อนำน้ำมันที่มีค่าความเป็นกรดสูงไปใช้งานในเครื่องยนต์ จะส่งผลให้ชิ้นส่วนอุปกรณ์เกิดการเสียหายจากการสึกหรอที่ถูกกัดกร่อนทำลายด้วยกรดนั้น จากการวิเคราะห์พบว่าค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีค่าแสดงดังภาพที่ 55 ซึ่งค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลจากการใช้ RSSA และ RSSA/RHA ภายใต้เงื่อนไขการผลิตที่มีระยะเวลา 1 h มีค่าความเป็นกรดอยู่ในช่วงมาตรฐาน คือ ต่ำกว่า 0.5 mg KOH/g oil สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yasar (2019) และ Ho et al. (2014) โดยมีแนวโน้มค่าความเป็นกรดลดลงเมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA/RHA โดยการใช้ 70%wt RSSA/RHA เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะให้ผลผลิตที่มีค่าความเป็นกรดต่ำที่สุดในช่วง 0.187-0.337 mg KOH/g oil จึงสามารถกล่าวได้ว่าการใช้วัสดุรองรับสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไบโอดีเซลได้ เพราะน้ำมันที่ได้ที่มีค่าความเป็นกรดผ่านเกณฑ์กว่ามาตรฐาน เพราะค่าความเป็นกรดสามารถลดลงได้เมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีค่าความเป็นด่างหรือบริเวณเร่งเบสสูงขึ้น จากนั้นเมื่อทดสอบการใช้ระยะเวลาที่แตกต่างกันในกระบวนการผลิตที่มีการใช้ 70%wt RSSA/RHA เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่ามีค่าผลผลิตดังแสดงในภาพที่ 56 ซึ่งค่าความเป็นกรดที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก อยู่ในช่วงมาตรฐานตามที่กรมธุรกิจพลังงานกำหนด



ภาพที่ 55 ความเป็นกรดของไบโอดีเซลที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกัน

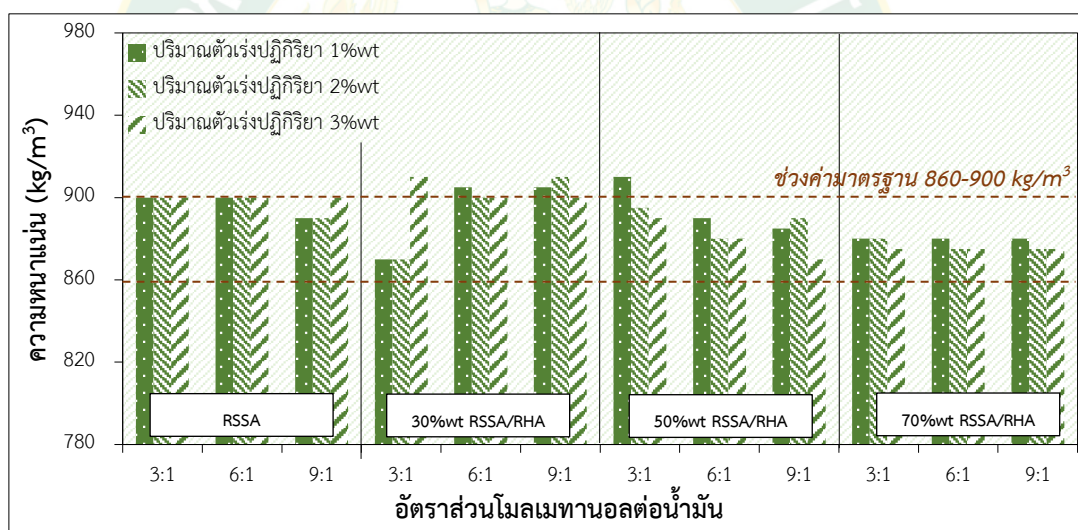


ภาพที่ 56 ความเป็นกรดของไบโอดีเซลจากการใช้ 70%wt RSSA/RHA ที่ระยะเวลาต่างกัน

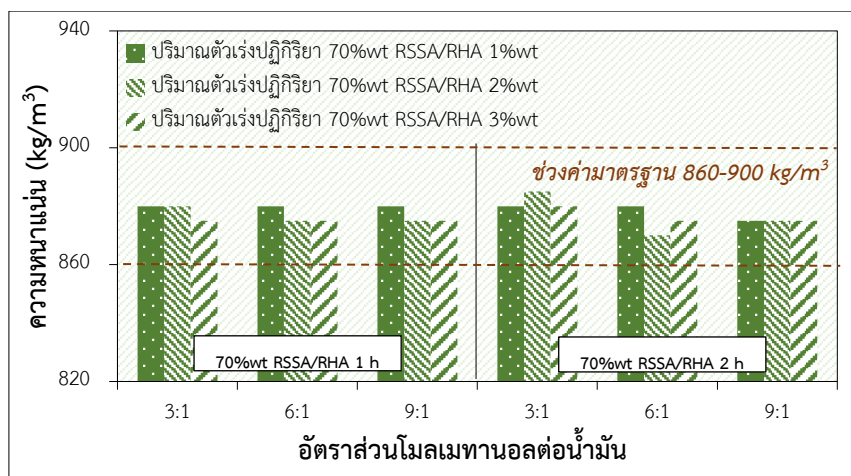
### 3. ค่าความหนาแน่นของไบโอดีเซล

ค่าความหนาแน่นของไบโอดีเซลมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์ผลการนำไบโอดีเซลไปใช้งานในเครื่องยนต์ดีเซลจริง เนื่องจากมีผลโดยตรงกับระบบหัวฉีดในเครื่องยนต์ หากน้ำมันมีค่าความหนาแน่นสูงเกินค่ามาตรฐานที่กรมธุรกิจพลังงานกำหนดด้วยมาตรฐานทดสอบ ASTM D1298 ซึ่งควรมีค่าอยู่ในช่วง 860-900 kg/m<sup>3</sup> จะทำให้น้ำมันถูกฉีดเป็นฝอยได้ยาก มีลักษณะหยดที่ใหญ่เกินไป

ส่งผลให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ จำเป็นต้องมีการตรวจสอบคุณสมบัตินี้ก่อนนำไปใช้งานจริง โดยสำหรับการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ RSSA และ RSSA/RHA พบว่าค่าความหนาแน่นที่ได้จากผลผลิตทั้งหมดดังแสดงในภาพที่ 57 มีค่าในช่วงมาตรฐาน ใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ Yasar (2019) Ho et al. (2014) และ Che et al. (2018) ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบแนวโน้มค่าความหนาแน่นที่ได้ เห็นได้ว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA/RHA สามารถช่วยลดค่าความหนาแน่นของผลผลิตลงได้ เนื่องจากก่อให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์มากขึ้น เพราะมีตำแหน่งกัมมันต์เพียงพอมากกว่าการใช้ RSSA ในระยะเวลาการผลิตเดียวกัน มากไปกว่านั้นเมื่อพิจารณาระยะเวลาการผลิต 1 และ 2 h ของกระบวนการที่มีการใช้ 70%wt RSSA/RHA จะให้ผลผลิตที่มีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วงมาตรฐานทุกค่าดังแสดงในภาพที่ 58 ซึ่งการใช้เวลาเพิ่มขึ้นไม่ได้ทำให้ไบโอดีเซลมีความหนาแน่นลดลงมากนัก อาจเพราะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ใน 1 และ 2 h ทำให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ไม่ต่างกันในด้านคุณสมบัติค่าความหนาแน่นที่ได้



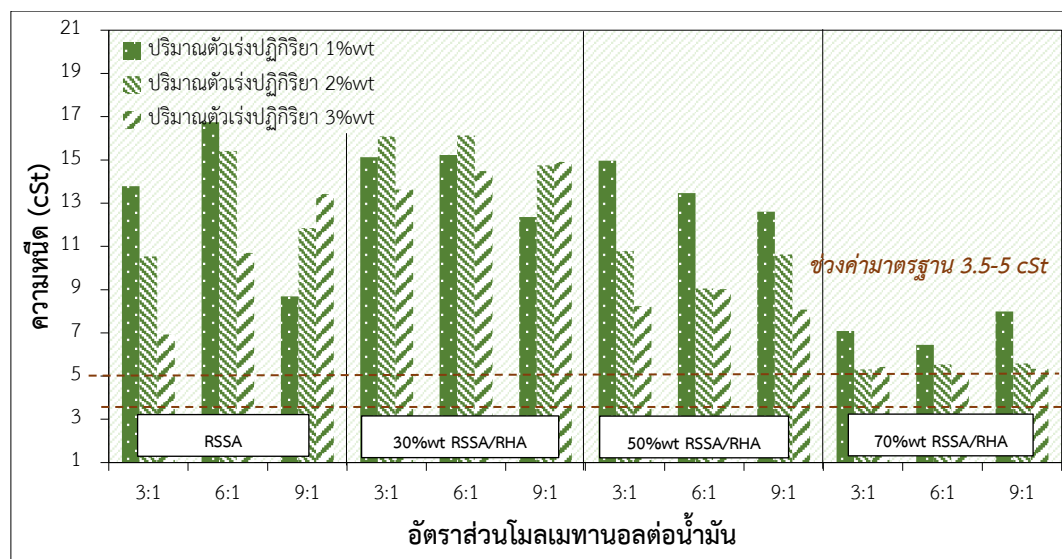
ภาพที่ 57 ความหนาแน่นของไบโอดีเซลจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกัน



ภาพที่ 58 ความหนาแน่นของไบโอดีเซลที่ใช้ 70%wt RSSA/RHA ในเวลาทำปฏิกิริยาต่างกัน

#### 4. ค่าความหนืดของไบโอดีเซล

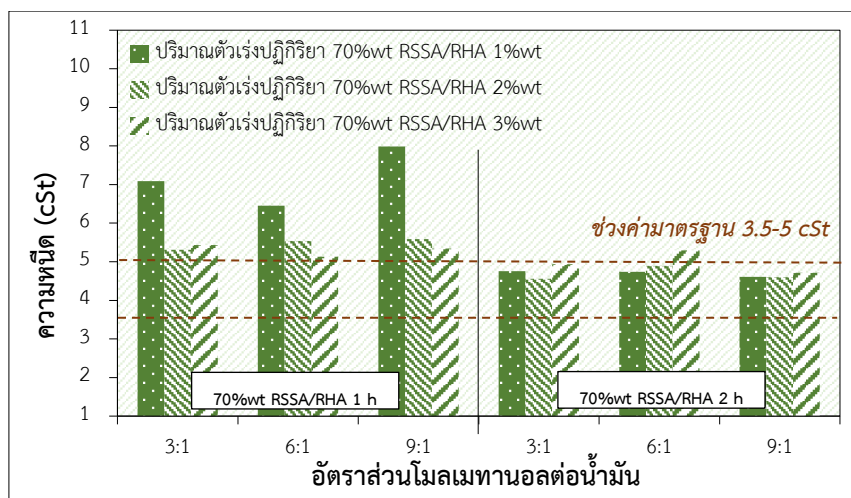
สำหรับผลค่าความหนืดของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ จะวิเคราะห์ตรวจสอบด้วยการใช้มาตรฐานทดสอบ ASTM D445 ตามที่กรมธุรกิจพลังงานกำหนด ซึ่งไบโอดีเซลที่ผลิตได้ควรมีค่าความหนืดที่อุณหภูมิการทดสอบ 40 °C อยู่ในช่วง 3.5-5.0 cSt เนื่องจากหากมีค่าสูงเกินกว่ากำหนด จะส่งผลกระทบต่อการใช้งานในเครื่องยนต์อันเป็นผลโดยตรงกับระบบหัวฉีด กล่าวคือ ถ้าน้ำมันมีค่าความหนืดสูงเกินค่ามาตรฐาน น้ำมันจะยากต่อการถูกฉีดเป็นฝอย ทำให้น้ำมันที่ได้มีลักษณะหยดที่ใหญ่เกินไปกว่าที่จะเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์ ก่อเกิดการปล่อยมลพิษออกมาจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์นี้ มากไปกว่านั้นอาจอุดตันในระบบเครื่องยนต์ได้ ส่งผลเสียต่อเครื่องยนต์ จึงจำเป็นต้องตรวจสอบคุณสมบัติก่อนนำไปใช้งานจริง โดยสำหรับการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ RSSA และ RSSA/RHA พบว่าค่าความหนืดที่ได้จากผลผลิตที่เกิดขึ้นสามารถแสดงดังภาพที่ 59 ซึ่งพบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA ให้ผลผลิตไบโอดีเซลที่มีความหนืดสูงเกินกว่าค่ามาตรฐาน อยู่ในช่วง 6.925-16.738 cSt แต่เมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภท RSSA/RHA ทำให้ไบโอดีเซลที่ได้มีค่าความหนืดลดต่ำลงตามความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาถ้าหอยขมบนตัวรองรับ SiO<sub>2</sub> ถ้าแลกเปลี่ยนที่มีค่าเพิ่มขึ้น โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 70%wt RSSA/RHA ให้ผลผลิตที่มีค่าความหนืดต่ำที่สุด แต่ยังคงเป็นค่าที่เกินมาตรฐานอยู่เล็กน้อย เมื่อทำการผลิตไบโอดีเซลภายใต้ระยะเวลา 1 h เท่ากัน



ภาพที่ 59 ความหนืดของไบโอดีเซลจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกัน

การลดลงของค่าความหนืดในผลิตภัณฑ์ดังกล่าว เกิดขึ้นจากการใช้ชนิดและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกัน เพราะเมื่อมีการใช้วัสดุรองรับในการเพิ่มพื้นที่ผิวหรือสิ่งยึดเกาะแก่ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้าหอยขม ส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีการดำเนินงานที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมากยิ่งขึ้น เพราะการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิธีพ่นแบบเดี่ยวมีพื้นที่ผิวหรือตำแหน่งกัมมันต์ไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา อีกทั้งยังมีการหลุดของ  $Ca^{+}$  ในระหว่างกระบวนการผลิต ปฏิกิริยาที่ดำเนินการอยู่จึงเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ผลผลิตที่ได้จึงมีค่าร้อยละสูงแต่มีค่าคุณสมบัติความหนืดไม่ผ่านตามมาตรฐานกำหนด ซึ่งค่าความหนืดเป็นคุณสมบัติสำคัญที่ใช้ประกอบการตัดสินใจการเลือกใช้เชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลเป็นหลัก แต่เมื่อมีการใช้วัสดุรองรับในตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ถ้าหอยขมมีพื้นที่ผิวและมีตำแหน่งกัมมันต์เพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งมีการยึดเกาะของ  $Ca^{+}$  ได้ดีกว่าเดิม จึงทำให้การผลิตไบโอดีเซลมีการเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์มากขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีค่าความหนืดลดลง สอดคล้องกับการศึกษาของ Che et al. (2018)

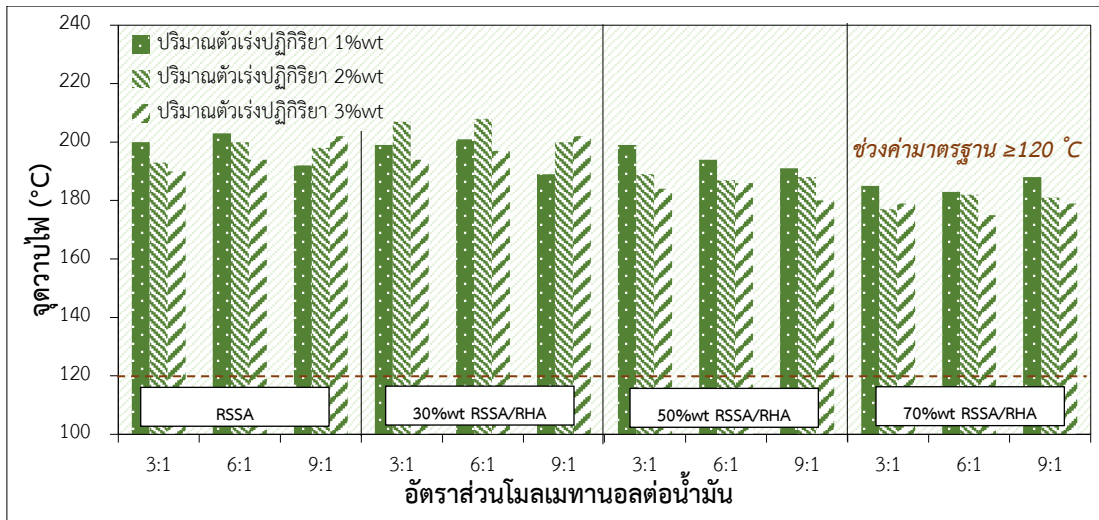
เมื่อทำการศึกษาการเพิ่มระยะเวลาการผลิตที่มีการใช้ 70%wt RSSA/RHA เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ผลการเปรียบเทียบค่าความหนืดของผลิตภัณฑ์ดังภาพที่ 60 ซึ่งแสดงให้เห็นแล้วว่าเมื่อมีการใช้ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 2 h ค่าความหนืดของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีค่าอยู่ในช่วงมาตรฐานเป็นส่วนใหญ่ (4.563-5.292 cSt) สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Ho et al. (2014) และ Uprety et al. (2016) เพราะการใช้ระยะเวลาการผลิตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้สมบูรณ์หรือเข้าสู่สมดุลได้มากกว่าเดิม (Guan-Yi et al., 2015) (Dalibor et al., 2015)



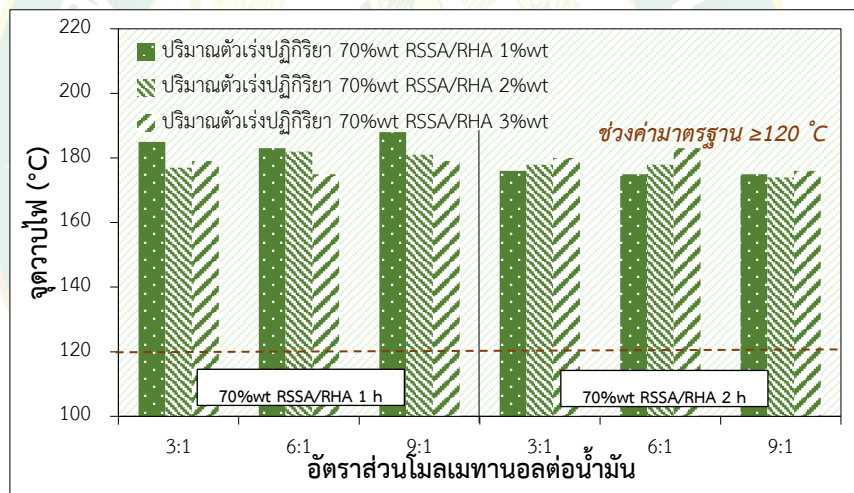
ภาพที่ 60 ความหนืดของไบโอดีเซลจากการใช้ 70%wt RSSA/RHA ที่เวลาทำปฏิกิริยาต่างกัน

### 5. ค่าจุดวาบไฟและจุดติดไฟของไบโอดีเซล

จุดวาบไฟของน้ำมันเชื้อเพลิงไบโอดีเซล เป็นการวิเคราะห์จุดต่ำสุดของอุณหภูมิที่เชื้อเพลิงไบโอดีเซลเกิดระเหยและสามารถติดไฟได้เมื่อมีเชื้อไฟเข้ามาจุด คุณสมบัติข้อนี้มีผลต่อความปลอดภัยในการจัดเก็บน้ำมันเชื้อเพลิง โดยกรมธุรกิจพลังงานกำหนดค่าจุดวาบไฟของไบโอดีเซลด้วยการใช้มาตรฐานทดสอบ ASTM D93 ซึ่งควรมีค่าไม่ต่ำกว่า 120 °C จากการวิเคราะห์ค่าจุดวาบไฟของไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA และ RSSA/RHA ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 1 h มีผลแสดงดังภาพที่ 61 พบว่าจุดวาบไฟของผลผลิตทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วง 174-208 °C ใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ Buasri et al. (2013) และ Uprety et al. (2016) และเป็นไปตามมาตรฐานที่กรมธุรกิจพลังงานกำหนด เพราะมีค่าสูงกว่า 120 °C แสดงให้เห็นถึงความปลอดภัยในการจัดเก็บเชื้อเพลิงนี้ โดยเมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA/RHA จะทำให้ผลผลิตมีค่าจุดวาบไฟต่ำลง โดยเฉพาะการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 70%wt RSSA/RHA เป็นผลมาจากความชื้นสูงของน้ำมันที่ผลิตได้ เพราะน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีความใสมากกว่าจะมีจุดวาบไฟต่ำกว่าน้ำมันที่มีความชื้นสูง ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยา 70%wt RSSA/RHA ให้น้ำมันที่มีความใสมากที่สุด รองลงมาคือ 50%wt RSSA/RHA, 30%wt RSSA/RHA และ RSSA ตามลำดับ มากไปกว่านั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าจุดวาบไฟของผลผลิตที่ได้จากการใช้ระยะต่างกันพบว่าจุดวาบไฟมีค่าลดต่ำลง ดังแสดงในภาพที่ 62 เนื่องจากการใช้ระยะเวลาเพิ่มขึ้นเกิดการทำให้ปฏิกิริยาสมบูรณ์มากกว่าเดิม (Guan-Yi et al., 2015) (Dalibor et al., 2015) ไบโอดีเซลที่ได้จึงมีความใสมากขึ้น จุดวาบไฟจึงมีค่าลดต่ำลงกว่าการใช้ระยะเวลาการผลิต 1 h

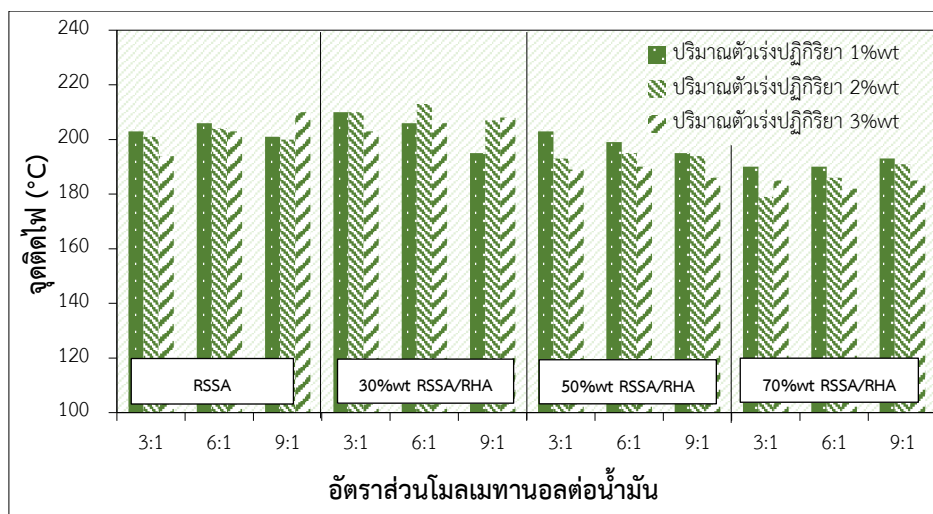


ภาพที่ 61 จุดวาบไฟของไบโอดีเซลจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกัน

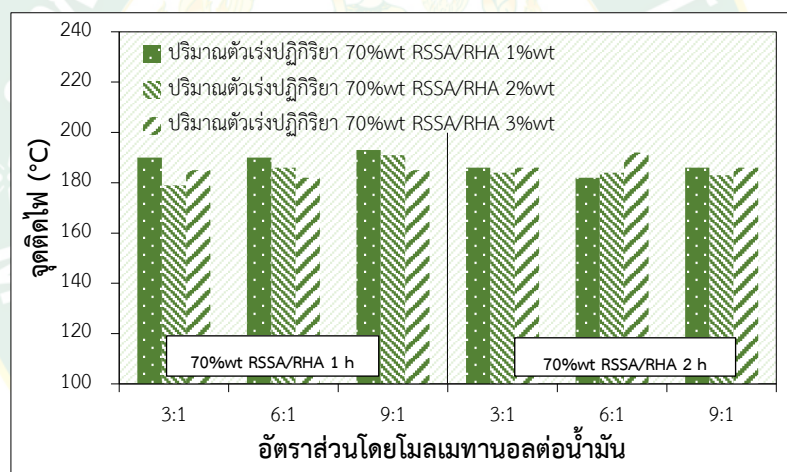


ภาพที่ 62 จุดวาบไฟของไบโอดีเซลจากการใช้ 70%wt RSSA/RHA ที่เวลาทำปฏิกิริยาต่างกัน

ในส่วนของคุณสมบัติที่เป็นคุณสมบัติที่ถูกรวบรวมไว้เพื่อบ่งบอกถึงความปลอดภัยในการจัดเก็บสำรองน้ำมันเชื้อเพลิงแต่ละชนิดเช่นกันกับจุดวาบไฟ มีค่าแนวโน้มเดียวกับจุดวาบไฟ ดังแสดงในภาพที่ 63 และภาพที่ 64 แต่มีค่าเพิ่มขึ้นจากประมาณ 3-5 °C ซึ่งน้ำมันไบโอดีเซลที่นำมาทดสอบมีค่าจุดติดไฟอยู่ที่ 182-210 °C ซึ่งถือเป็นค่าจุดติดไฟที่สูง บ่งบอกถึงความสามารถในการถูกเก็บไว้บนดินได้อย่างปลอดภัย และยังคงถูกขนส่งด้วยความปลอดภัยเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อมีค่าสูงมากเกินไปจะส่งผลให้รถสตาร์ทติดยาก



ภาพที่ 63 จุดติดไฟของไบโอดีเซลจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกัน



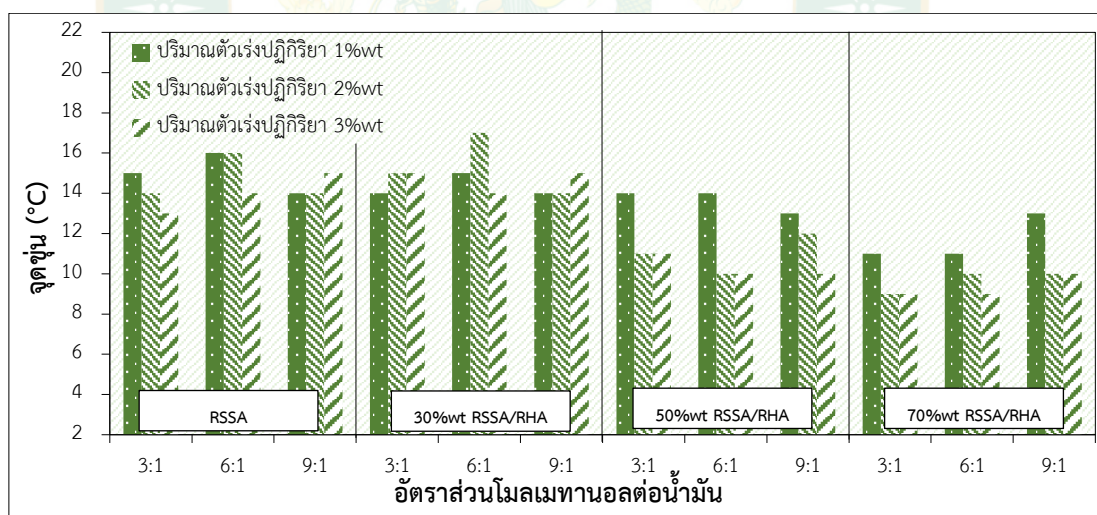
ภาพที่ 64 จุดติดไฟของไบโอดีเซลจากการใช้ 70%wt RSSA/RHA ที่เวลาทำปฏิกิริยาต่างกัน

## 6. ค่าจุดชุ่นและจุดไหลเทของไบโอดีเซล

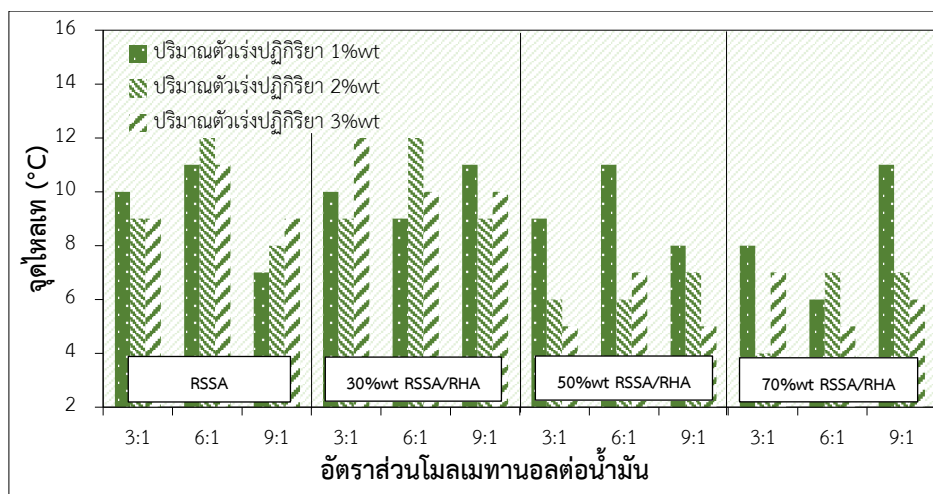
จุดชุ่นและจุดไหลเทเป็นคุณสมบัติอีกหนึ่งอย่างที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของน้ำมัน กรมธุรกิจพลังงานกำหนดให้มีการรายงานค่าที่ได้ตามประกาศกระทรวงด้านค่าคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้ ซึ่งควรมีค่าไม่สูงมากเพื่อทำให้ไบโอดีเซลสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากอาจเกิดการอุดตันในเครื่องยนต์เมื่อมีการใช้ในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ เกิดปัญหาการสตาร์ทเครื่องในภาวะอากาศเย็น เพราะทำให้มอเตอร์ไม่ทำงาน อีกทั้งทำให้เชื้อเพลิงมีความหนืดสูงขึ้นจนน้ำมันที่ใช้กลายเป็น

ของแข็ง แต่ปัญหาเหล่านี้สามารถแก้ไขได้ด้วยการเติมสารเติมแต่ง (Additive) ลงไป เพื่อเพิ่มความสามารถในการไหลของไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่ำได้

คุณสมบัติด้านจุดขุ่นและจุดไหลเทของไบโอดีเซลสามารถใช้มาตรฐาน ASTM D97 ในการทดสอบ ซึ่งจุดขุ่นเป็นจุดที่มีอุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันเริ่มขุ่น และจุดไหลเทคือจุดที่อุณหภูมิต่ำสุดที่ทำให้ของเหลวยังมีสภาพเป็นของไหลอยู่ได้ ผลการทดสอบการตรวจวัดค่าจุดขุ่นและจุดไหลเทของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ ภายใต้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 h มีค่าแสดงดังภาพที่ 65 และภาพที่ 66 ซึ่งพบว่าเมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA/RHA จะทำให้ผลผลิตที่ได้มีค่าจุดขุ่นและจุดไหลเทต่ำลง โดยเฉพาะการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 70%wt RSSA/RHA เป็นผลมาจากความขุ่นใสของน้ำมัน เช่นเดียวกับเหตุผลของจุดวาบไฟและจุดติดไฟที่กล่าวไปในหัวข้อก่อนหน้า ซึ่งน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีความใสมากกว่า จะมีค่าจุดขุ่นและจุดไหลเทต่ำกว่าน้ำมันที่มีความขุ่นสูง โดยจากการทดสอบพบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 70%wt RSSA/RHA ก่อให้เกิดไบโอดีเซลที่มีความใสมากที่สุด รองลงมาคือตัวเร่งปฏิกิริยา 50%wt RSSA/RHA, 30%wt RSSA/RHA และ RSSA ตามลำดับ ส่งผลให้จุดขุ่นมีค่าอยู่ในช่วง 9-17 °C และจุดไหลเทมีค่าอยู่ที่ 4-12 °C ตามลำดับ สอดคล้องกับผลการศึกษาของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ของ Buasri et al. (2013) และ Chinglenthoba et al. (2019)

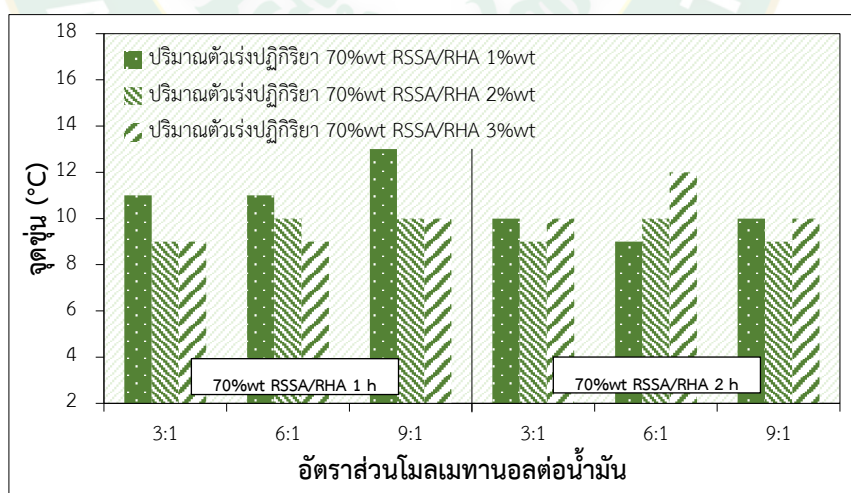


ภาพที่ 65 จุดขุ่นของไบโอดีเซลจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกัน

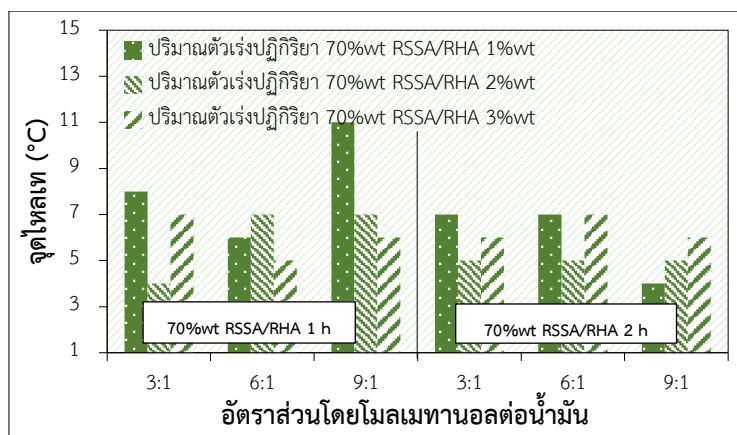


ภาพที่ 66 จุดไหลเทของไบโอดีเซลจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกัน

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าจุดขุ่นและจุดไหลเทของผลผลิตที่ได้ภายใต้การศึกษาด้านระยะเวลาการผลิตในกระบวนการผลิตที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 70%wt RSSA/RHA พบว่าเมื่อมีการใช้เวลาการทำปฏิกิริยามากขึ้น ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้สมบูรณ์มากกว่าเดิม (Guan-Yi et al., 2015) (Dalibor et al., 2015) ส่งผลให้ไบโอดีเซลที่ได้มีความใสมากขึ้น จุดขุ่นและจุดไหลเทที่ได้จึงมีค่าลดต่ำลงกว่าการใช้ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่ 1 h ดังแสดงผลในภาพที่ 67 และภาพที่ 68



ภาพที่ 67 จุดขุ่นของไบโอดีเซลจากการใช้ 70%wt RSSA/RHA ที่เวลาการทำปฏิกิริยาต่างกัน



ภาพที่ 68 จุดไหลเทของโพลีบูตีลจากการใช้ 70%wt RSSA/RHA ที่เวลาการทำปฏิกิริยาต่างกัน

## 7. สรุปปัจจัยการผลิตที่เหมาะสมในการผลิตโพลีบูตีล

จากผลปัจจัยการผลิตที่เหมาะสมเบื้องต้นที่มีการใช้ร้อยละผลผลิตเป็นเกณฑ์กำหนด ยังมีความไม่แน่ชัดอยู่มาก เนื่องจากผลผลิตที่มีปริมาณสูงไม่ได้เป็นผลผลิตที่มีคุณสมบัติเชิงเพลิงที่ดีเสมอไป ดังนั้นจึงต้องมีการนำผลด้านค่าคุณสมบัติโพลีบูตีลที่ผลิตได้มาวิเคราะห์ตัดสินข้อสรุปด้านปัจจัยการผลิตที่เหมาะสมในการผลิตโพลีบูตีลในการศึกษาครั้งนี้ ผลพบว่าการผลิตโพลีบูตีลที่มีการใช้ 1) อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1 6:1 และ 9:1 2) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 2 และ 3%wt 3) ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 1 และ 2 h 4) ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA/RHA ที่ 30:70 50:50 และ 70:30 และ 5) ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่าง RSSA และ 70%wt RSSA สามารถแสดงข้อสรุปดังตารางที่ 11 ซึ่งเป็นข้อสรุปปัจจัยการผลิตที่เหมาะสมในการผลิตโพลีบูตีลจากการใช้ร้อยละผลผลิตและค่าคุณสมบัติของโพลีบูตีลที่วัดได้เป็นเกณฑ์กำหนด

ตารางที่ 11 สรุปปัจจัยการผลิตที่เหมาะสมในการผลิตโพลีบูตีล

เงื่อนไขการผลิต	ค่าที่เหมาะสม
1. อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน	3:1
2. ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	1%wt
3. ระยะเวลาการผลิต	2 h
4. ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA/RHA	70%wt RSSA/RHA
5. ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	70%wt RSSA/RHA

### ผลและวิเคราะห์ผลการผลิตไบโอดีเซลในเครื่องต้นแบบ

การผลิตไบโอดีเซลในระดับเครื่องต้นแบบ ถูกกำหนดเงื่อนไขการผลิตด้วยการใช้เงื่อนไขที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์ผลด้านร้อยละผลผลิตและคุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ ได้แก่ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด 70%wt RSSA/RHA ปริมาณ 1%wt อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 h ภายใต้การให้ความร้อน 60-65 °C และกวนผสมอย่างต่อเนื่อง ซึ่งผลผลิตที่ได้จากการใช้น้ำมันตั้งต้น 12 kg แสดงดังตารางที่ 12 ที่มีค่าปริมาณวัตถุดิบที่ใช้และไบโอดีเซลที่ผลิตได้ ผลพบว่าการผลิตไบโอดีเซลในเครื่องต้นแบบ มีผลผลิตไบโอดีเซลเกิดขึ้น 11.22 kg คิดเป็นร้อยละผลผลิต 93.46%wt โดยเมื่อนำน้ำมันดังกล่าวไปวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติจะได้ผลแสดงในตารางที่ 13 ซึ่งเป็นค่าคุณสมบัติที่อยู่ในช่วงมาตรฐานตามที่กรมธุรกิจพลังงานกำหนด และในส่วนเพิ่มเติมจะเห็นว่าไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีค่าความร้อนสูง 41.09 MJ/kg ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าช่วงค่าความร้อนของไบโอดีเซลโดยทั่วไปมีค่าอยู่ที่ 34-37 MJ/kg

**ตารางที่ 12** ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้และไบโอดีเซลที่ผลิตได้

ชนิดของวัตถุดิบ/ผลิตภัณฑ์	ปริมาณสาร (kg)
1. น้ำมันตั้งต้น	12
2. ตัวเร่งปฏิกิริยา 70%wt RSSA/RHA ที่ 2%wt	0.24
3. เมทานอลที่อัตราส่วนโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1	4.55
4. น้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้	11.22

**ตารางที่ 13** คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ในเครื่องต้น

คุณสมบัติ	มาตรฐานทดสอบ	ค่ามาตรฐาน	ค่าที่วัดได้
1. ค่า pH	-	-	7
2. ค่าความเป็นกรด (mg KOH/g oil)	ASTM D664	น้อยกว่า 0.5	0.365
3. ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	ASTM D1298	860-900	880
4. ความหนืด (cSt, mm <sup>2</sup> /s)	ASTM D445	3.5-5.0	4.563
5. จุดวาบไฟ (°C)	ASTM D93	มากกว่า 120	182
6. จุดติดไฟ (°C)	ASTM D93	-	187
7. จุดขุ่นมัว (°C)	ASTM D97	-	12
8. จุดไหลเท (°C)	ASTM D97	-	8
9. ค่าความร้อน (MJ/kg)	ASTM D4809	-	41.09

## ผลและวิเคราะห์ผลการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก

การวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ นอกเหนือไปจากการวัดค่าคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันเหล่านั้นแล้ว สิ่งสำคัญที่จำเป็นต่อการบ่งบอกถึงความเป็นไปได้ในการนำเชื้อเพลิงดังกล่าวมาใช้ทดแทนน้ำมันฟอสซิลดีเซล คือ การศึกษาทดสอบการใช้งานเชื้อเพลิงนั้นกับเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในระดับเครื่องต้นแบบ 20 L ไปศึกษาการใช้งานในเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตรขนาดเล็ก เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงดีเซลที่ใช้ทั่วไปในท้องตลาด โดยมีผลและวิเคราะห์ผลการศึกษาดังต่อไปนี้

### 1. คุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบ

ในการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก กำหนดให้มีการทดสอบด้วยการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง 3 รูปแบบ คือ 1) การใช้น้ำมันไบโอดีเซลแบบเดี่ยว 100% คือ ไม่มีการผสมกับเชื้อเพลิงอื่น ๆ กำหนดด้วยสัญลักษณ์ BOB100 2) การใช้น้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้ผสมกับน้ำมันดีเซลตามท้องตลาดที่มีการใช้อัตราส่วนการผสมในรูปแบบของ B10 และ B20 ซึ่งกำหนดให้แสดงสัญลักษณ์เป็น BOB10 และ BOB20 ตามลำดับ และ 3) การใช้น้ำมันดีเซลตามท้องตลาดที่ประกอบด้วยน้ำมันดีเซล B7, B10 และ B20 ซึ่งกำหนดสัญลักษณ์เป็น DB7, DB10 และ DB20 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ารายละเอียดแสดงดังตารางที่ 14 และตัวอย่างน้ำมันที่ใช้ทดสอบแสดงดังในภาพที่ 69 ซึ่งมีคุณสมบัติต่าง ๆ ของเชื้อเพลิงทดสอบแสดงดังตารางที่ 15

ตารางที่ 14 รายละเอียดน้ำมันที่ใช้ทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์

ชื่อกำหนดและรายละเอียด	อัตราการผสม	เป็นดีเซลตาม	เป็นไบโอดีเซลที่
	ไบโอดีเซล : ดีเซล	ท้องตลาด	ผลิตได้
DB7 (ดีเซลฐาน)	7 : 93	/	-
DB10	10 : 90	/	-
DB20	20 : 80	/	-
BOB10	10 : 90	/	/
BOB20	20 : 80	/	/
BOB100	100 : 0	-	/



ภาพที่ 69 น้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์

ตารางที่ 15 ค่าคุณสมบัติน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบ

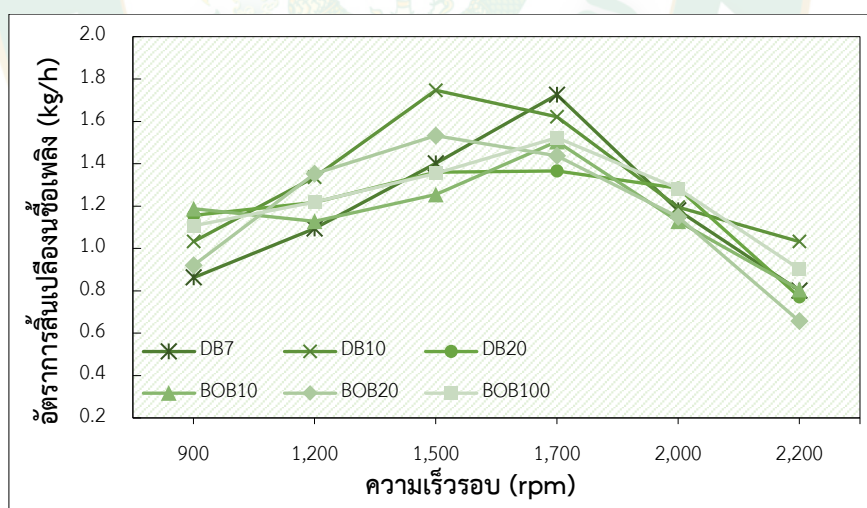
ชนิดเชื้อเพลิง	คุณสมบัติ								
	ค่าความเป็นกรด (mg KOH/g oil)	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	ความหนืด (cSt, mm <sup>2</sup> /s)	ค่าความร้อน (MJ/kg)	จุดวาบไฟ (°C)	จุดติดไฟ (°C)	จุดขุ่นมัว (°C)	จุดไหลเท (°C)	
	N/A	ASTM D664	ASTM D1298	ASTM D445	ASTM D4809	ASTM D93	ASTM D93	ASTM D97	ASTM D97
DB7	5	0.111	810	3.043	42.50	77	80	3	-3
DB10	6	0.216	820	3.400	39.31	98	103	6	-2
DB20	7	0.304	835	3.539	37.92	118	120	11	2
BOB10	7	0.298	815	3.642	40.09	109	112	4	-3
BOB20	6	0.312	830	3.984	38.65	122	125	5	-2
BOB100	7	0.365	880	4.563	41.09	182	187	12	8

จากตารางที่ 15 พบว่าน้ำมัน BOB100 มีคุณสมบัติด้านค่าความเป็นกรด ความหนาแน่น ความหนืด จุดวาบไฟ-จุดติดไฟ จุดขุ่นมัว-จุดไหลเท สูงกว่าน้ำมันชนิดอื่น ๆ เนื่องจากเป็นไบโอดีเซล 100% แต่คุณสมบัติที่ตรวจสอบได้ล้วนอยู่ในช่วงมาตรฐานที่กรมธุรกิจพลังงานกำหนดทุกตัว สอดคล้องกับการศึกษาของ Youssef et al. (2019) ซึ่งถึงแม้จะมีค่าดังกล่าวในลักษณะสูงกว่าน้ำมันชนิดอื่น แต่มีค่าความร้อนค่อนข้างสูงเป็นอันดับสองรองจากน้ำมันดีเซลมาตรฐาน DB7 โดยในการพิจารณาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ พบว่าการนำ BOB100 ที่ผลิตได้ไปผสมกับน้ำมันดีเซลมาตรฐาน DB7 ที่มีไบโอดีเซลผสมอยู่แล้ว 7%wt ให้เกิดเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง BOB10 และ BOB20 เพื่อทำการเปรียบเทียบผลที่ได้กับน้ำมันดีเซลที่วางขายตามท้องตลาดทั่วไปที่มีไบโอดีเซลผสมอยู่แล้ว 10 และ 20%wt (DB10 และ DB20) ทำให้คุณสมบัติต่าง ๆ จากเดิมที่ปรากฏใน BOB100 มีค่าลดต่ำลงเมื่อมีการผสมกับน้ำมันดีเซลดังกล่าว โดยจะพบว่าคุณสมบัติของน้ำมันดีเซลที่ผสมเองและที่ขาย

ในเชิงพาณิชย์มีค่าคุณสมบัติใกล้เคียงกัน ซึ่งในส่วนของค่าความร้อนของเชื้อเพลิงจะพบว่าการผสมน้ำมันขึ้นเองมีค่าความร้อนสูงกว่าเชื้อเพลิงไปโอดีเซล B10 และ B20 เมื่อเปรียบเทียบกัน

## 2. ค่าสมรรถนะเครื่องยนต์ด้านอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

สำหรับผลด้านอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ได้จากการทดสอบที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 900 1,200 1,500 1,700 2,000 และ 2,200 แสดงผลได้ดังภาพที่ 70 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ทดสอบ ผลพบว่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มความเร็วรอบของเครื่องยนต์จาก 900 ถึง 1,700 rpm เนื่องจากเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น เชื้อเพลิงถูกฉีดหรือจ่ายเข้าสู่กระบอกสูบมากขึ้น เพราะที่ความเร็วรอบเพิ่มขึ้น ระบบมีแรงเสียดทานสูง จึงต้องมีการฉีดจ่ายเชื้อเพลิงในอัตราส่วนสูงขึ้น เพื่อเอาชนะแรงเสียดทานนั้น (อัคมพงศ์ สถาวรินทุ และไกรสร รวยป้อม, 2563) จนเมื่อจุดหนึ่งค่าเชื้อเพลิงที่ถูกจ่ายจะกลับมามีค่าลดลง เพราะที่ความเร็วรอบสูง ณ จุดนั้น วัฏจักรการทำงานจะมีระยะเวลาสั้นลง ลิ้นไอดีเปิดน้อย อากาศถูกประจุเข้ากระบอกสูบลดลง อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจึงลดลงด้วย (เสนีย์ พันโยธา และเนรมิตร กระแสร์ลม, 2554)



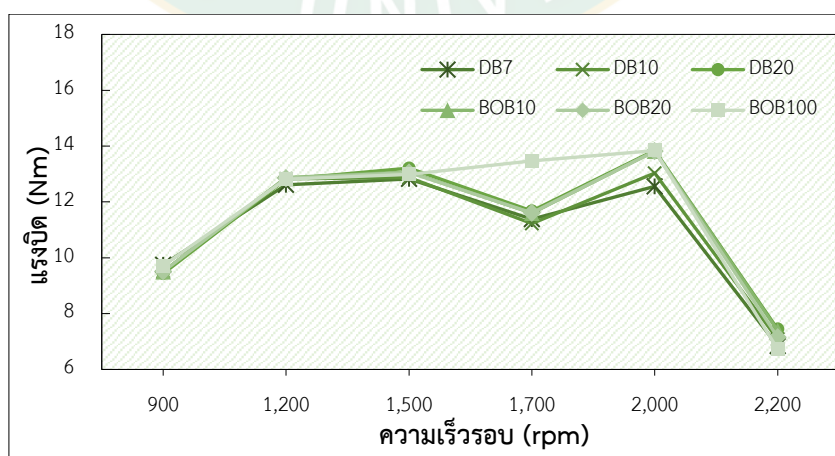
ภาพที่ 70 ความสัมพันธ์ของอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและความเร็วรอบ

ในการทดสอบนี้พบว่าการเพิ่มรอบของเครื่องยนต์ให้สูงเกินกว่า 1,700 rpm ส่งผลให้แนวโน้มอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงในเชื้อเพลิงทุกรูปแบบมีค่าลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Waidee (2019) ซึ่งเมื่อทำการเลือกพิจารณาแค่ในส่วนของความเร็วรอบเครื่องยนต์ 900 ถึง 1,500

rpm พบว่าน้ำมัน DB7 มีค่าอัตราการสูญเสียน้ำมันเชื้อเพลิงต่ำกว่าการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่นที่มีการผสมไบโอดีเซลในปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้น เพราะการผสมไบโอดีเซลลงไปในส่วนที่มากขึ้นจะทำให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงมีค่าลดต่ำลง จึงก่อให้เกิดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงในปริมาณที่สูงกว่า โดยสำหรับไบโอดีเซลที่ผลิตได้ (BOB100) มีค่าอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงในช่วง 0.903-1.523 kg/h เมื่อมีการใช้ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ทดสอบที่ 900-2,200 rpm

### 3. ค่าสมรรถนะเครื่องยนต์ด้านแรงบิด

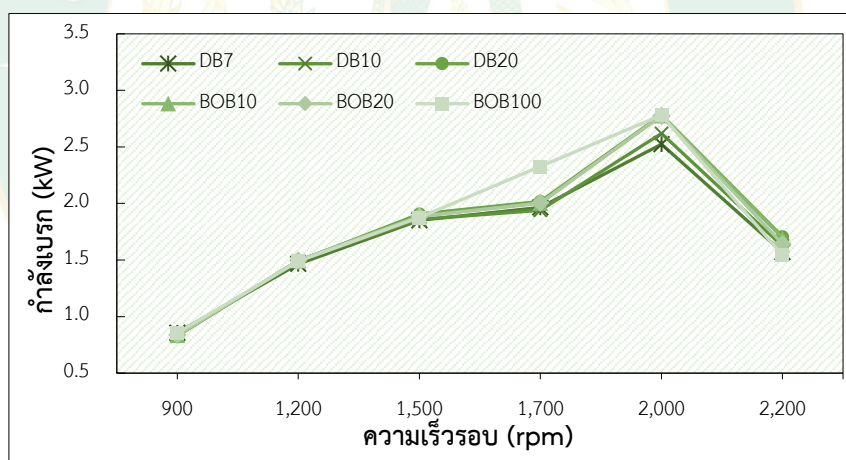
ผลด้านแรงบิดที่ได้จากการทดสอบที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 900 1,200 1,500 1,700 2,000 และ 2,200 แสดงผลได้ดังภาพที่ 71 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ทดสอบ ผลพบว่าแรงบิดจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มความเร็วรอบของเครื่องยนต์ โดยที่ 900 ถึง 1,500 rpm แรงบิดมีค่าเพิ่มขึ้น เพราะต้องใช้แรงเพื่อเอาชนะแรงเสียดทานที่มีค่ามากขึ้นตามความเร็วรอบนั้น ๆ (อัคมพงศ์ สถาวรินทุ และไกรสร รวยป้อม, 2563) จากนั้นเมื่อมีการเพิ่มความเร็วยุโรปไปที่ 1,700 rpm จะทำให้แรงบิดที่วัดค่าได้มีค่าลดต่ำลง เพราะที่ความเร็วรอบที่สูงขึ้นจนถึงค่าหนึ่ง แรงเสียดทานจะมีผลต่อแรงบิดน้อยลง ซึ่งพบว่าที่ความเร็วรอบ 2,000 rpm เกิดแรงบิดสูงสุดในน้ำมันเชื้อเพลิงทุกรูปแบบ ยกเว้นในกรณีค่าแรงบิดที่ได้จากการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง BOB100 แต่เมื่อมีการเพิ่มรอบของเครื่องยนต์ให้สูงเกินกว่านั้น แนวโน้มของค่าแรงบิดในเชื้อเพลิงทุกรูปแบบจะมีค่าลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด สอดคล้องกับงานวิจัยของพัชยาภรณ์ สิงห์ธัญ (2561) และ Ong et al. (2014) ซึ่งสำหรับไบโอดีเซลที่ผลิตได้ (BOB100) เมื่อนำไปทดสอบเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบ 900-2,200 rpm พบว่ามีค่าแรงบิดอยู่ในช่วง 9.72-13.84 Nm



ภาพที่ 71 ความสัมพันธ์ของแรงบิดและความเร็วรอบ

#### 4. ค่าสมรรถนะเครื่องยนต์ด้านกำลังเบรก

สำหรับผลด้านกำลังเบรกที่ได้จากการทดสอบเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบ 900 1,200 1,500 1,700 2,000 และ 2,200 แสดงผลได้ดังภาพที่ 72 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเบรกเครื่องยนต์และความเร็วรอบของเครื่องยนต์ทดสอบ ผลพบว่าผลค่ากำลังเบรกที่ได้มีค่าแปรผันตรงกับแรงบิด (คุณานนต ศักดิ์กำปง และเกียรติพิลา ตั้งใจจิต, 2556) ที่กล่าวไปในหัวข้อที่ 3. ซึ่งที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 900-2,000 rpm กำลังเบรกที่ทำการตรวจสอบได้จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบที่มีค่าสูงขึ้น โดยที่ความเร็วรอบ 2,000 rpm ค่ากำลังเบรกในน้ำมันเชื้อเพลิงทุกประเภทจะมีค่าสูงสุดตามค่าแรงบิดที่มีค่าสูงสุด ณ จุดนี้เช่นเดียวกัน แต่เมื่อให้เครื่องยนต์มีความเร็วรอบในการทดสอบสูงกว่า 2,000 rpm กำลังเบรกที่ได้จะมีค่าลดต่ำลงในเชื้อเพลิงทุกรูปแบบอย่างรวดเร็ว สอดคล้องกับงานวิจัยของพิชยาภรณ์ สิงห์ธัญ (2561) และ Waidee (2019) โดยสำหรับไบโอดีเซลที่ผลิตได้ (BOB100) จะมีค่ากำลังเบรกในช่วง 0.854-2.781 kW เมื่อมีการใช้ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ทดสอบที่ 900-2,200 rpm

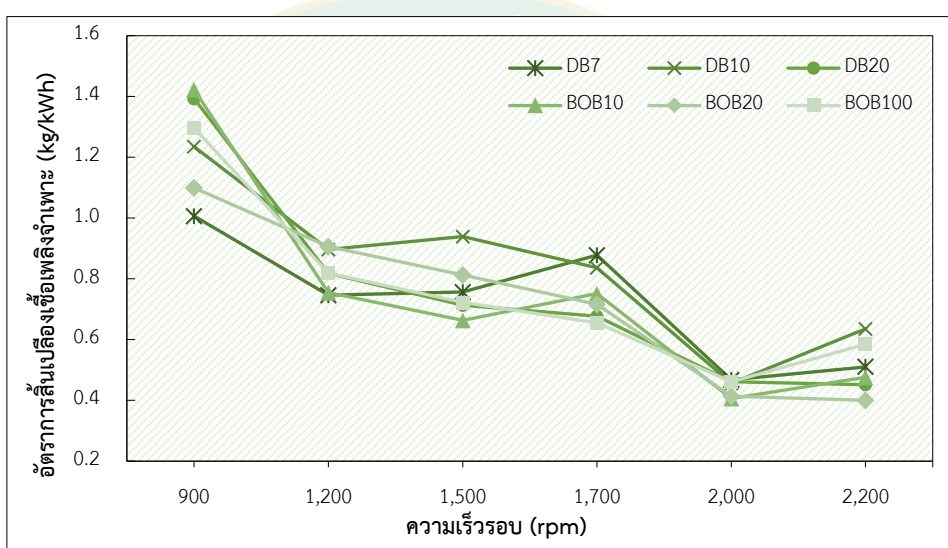


ภาพที่ 72 ความสัมพันธ์ของกำลังเบรกและความเร็วรอบ

#### 5. ค่าสมรรถนะเครื่องยนต์ด้านอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ

สำหรับผลด้านอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะที่ได้จากการทดสอบเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบ 900 1,200 1,500 1,700 2,000 และ 2,200 แสดงผลได้ดังภาพที่ 73 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ทดสอบ ผลพบว่าที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 900 rpm อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของทุกเชื้อเพลิง

จะมีค่าสูงที่สุด โดยจะเป็นผลที่ขึ้นอยู่กับค่าแรงบิดของเครื่องยนต์ที่ทำการทดสอบด้วย เพราะเมื่อพิจารณาจากกราฟข้อมูลในภาพที่ 97 พบว่าที่ความเร็วรอบ 900 rpm มีค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะสูงสุด เป็นผลเนื่องจากที่ความเร็วรอบเดียวกันนี้ ค่าแรงบิดมีค่าต่ำ ซึ่งแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้นตามค่าความเร็วรอบจะส่งผลให้มีการฉีดเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น รวมไปถึงที่ค่าความเร็วรอบต่ำจะมีระยะเวลาของวัฏจักรการทำงานนานกว่าความเร็วรอบอื่น ทำให้มีการสูญเสียพลังงานรูปแบบความร้อนไปกับผนังลูกสูบ ส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ ณ จุดนี้ มีค่าสูงสุด (เสนีย์ พันโยธา และเนรมิตร กระแสร์ลม, 2554)



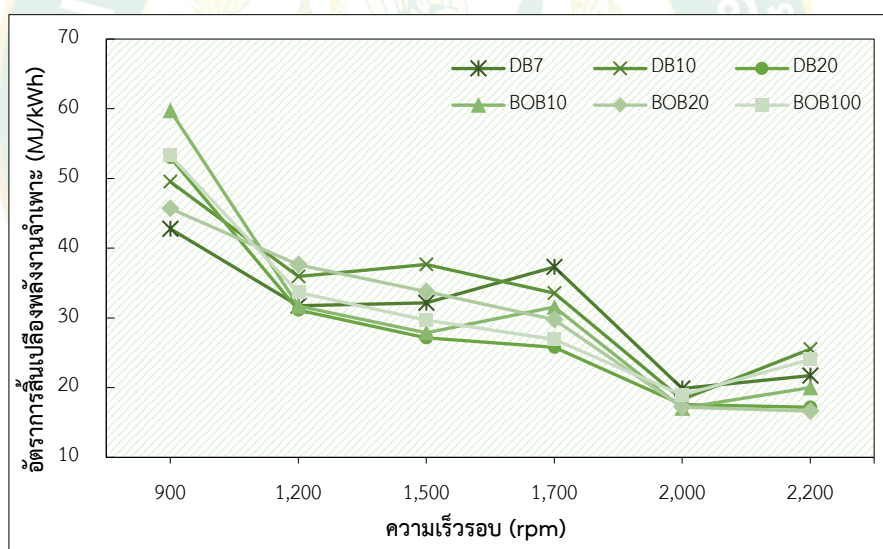
ภาพที่ 73 ความสัมพันธ์ของอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะและความเร็วรอบ

น้ำมัน DB7 มีค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะต่ำที่สุด กล่าวคือ มีการใช้ปริมาณน้ำมันต่ำที่สุดในการก่อให้เกิดพลังงาน 1 kWh สอดคล้องกับค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่มีค่าสูงสุด แตกต่างจากน้ำมันชนิดอื่นที่มีส่วนผสมไบโอดีเซลสูงกว่า ซึ่งส่งผลให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงมีค่าต่ำกว่า จึงมีการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงในการสร้างพลังงานในหน่วยเดียวกันสูงกว่า DB7 จากนั้นเมื่อมีการเพิ่มความเร็วยรอบของเครื่องยนต์ทดสอบในการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทุกรูปแบบจะมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะลดต่ำลง สอดคล้องกับงานวิจัยของพัชยาภรณ์ สิงห์ธัญ (2561) Waidee (2019) Ong et al. (2014) และ Syed Aalam (2019) เพราะเมื่อความเร็วรอบสูงขึ้น แรงบิดจะสูงขึ้นเพื่อเอาชนะแรงเสียดทานนั้น การฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปลดน้อยลงตามวัฏจักรที่มีระยะเวลาสั้นลง อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะจึงมีค่าต่ำ (เสนีย์ พันโยธา และเนรมิตร กระแสร์ลม, 2554) ซึ่งจะต่ำมากที่สุดที่ความเร็วรอบ 2,000 rpm ตรงกันข้ามกับค่าแรงบิดที่มีค่าสูงสุดที่จุดความเร็วรอบนี้ ซึ่ง

สำหรับไบโอดีเซลที่ผลิตได้ (BOB100) เมื่อมีการใช้ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ทดสอบที่ 900-2,200 rpm จะมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะในช่วง 0.46-1.30 kg/kWh

## 6. ค่าสมรรถนะเครื่องยนต์ด้านอัตราสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

สำหรับผลด้านอัตราสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ได้จากการทดสอบเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบ 900 1,200 1,500 1,700 2,000 และ 2,200 แสดงผลได้ดังภาพที่ 74 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ทดสอบ ผลพบว่าที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 900 rpm อัตราสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของทุกเชื้อเพลิงจะมีค่าสูงที่สุดเช่นเดียวกับอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะที่ได้กล่าวถึงไปในหัวข้อก่อนหน้า ซึ่งเป็นผลมาจากค่าแรงบิดของเครื่องยนต์ โดยผลพบว่าที่ความเร็วรอบต่ำ จะมีการสูญเสียพลังงานความร้อนไปทางผนังกระบอกสูบในระยะเริ่มต้น อัตราสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ณ จุดนี้ จึงมีค่าสูงที่สุด



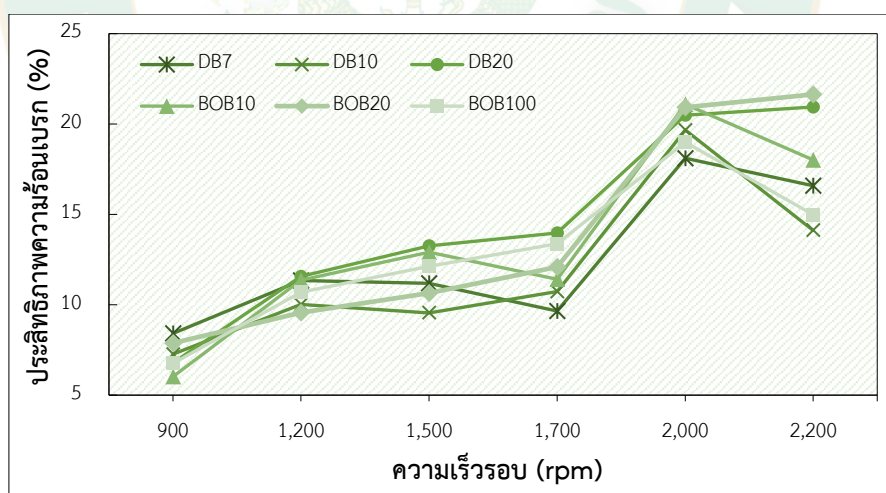
ภาพที่ 74 ความสัมพันธ์ของอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและความเร็วรอบ

จากนั้นเมื่อมีการเพิ่มความเร็วรอบของเครื่องยนต์ทดสอบในการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทุกรูปแบบ จะมีอัตราสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดต่ำลง เนื่องจากที่ความเร็วรอบสูงขึ้น ระยะเวลาการทำงานต่อหนึ่งวัฏจักรจะมีระยะเวลาสั้นลง มีการอัดอากาศเข้าได้น้อย เพราะลิ้นไอดีเปิดสั้นลง ส่งผลให้มีการใช้พลังงานจำเพาะในอัตราที่ต่ำลง ซึ่งจะพบว่าที่ค่าความเร็วรอบ 2,000 rpm จะมีค่าต่ำสุด (เสนีย์ พันโยธา และเนรมิตร กระแสร์ลม, 2554) สอดคล้องกับงานวิจัยของ ซึ่งสำหรับไบโอดีเซลที่ผลิตได้

(BOB100) เมื่อมีการใช้ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ทดสอบที่ 900-2,200 rpm จะมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในช่วง 18.95-53.28 MJ/kWh

## 7. ค่าสมรรถนะเครื่องยนต์ด้านประสิทธิภาพความร้อนเบรก

สำหรับผลด้านประสิทธิภาพความร้อนเบรกที่ได้จากการทดสอบเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบ 900 1,200 1,500 1,700 2,000 และ 2,200 แสดงผลได้ดังภาพที่ 75 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพความร้อนเบรกและความเร็วรอบของเครื่องยนต์ทดสอบ ผลพบว่าการเพิ่มความเร็วรอบเครื่องยนต์ให้สูงขึ้นจาก 900-2,000 rpm สอดคล้องกับงานวิจัยของ Waidee (2019) Ong et al. (2014) และ Syed Aalam (2019) จะทำให้ค่าประสิทธิภาพความร้อนเบรกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นและลดต่ำลงที่ความเร็วรอบ 2,200 rpm เนื่องมาจากเมื่อความเร็วรอบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ค่าประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นตามค่าแรงบิดของเครื่องยนต์ ซึ่งพบว่าที่ค่าความเร็วรอบ 2,000 rpm มีค่าประสิทธิภาพสูงสุด เป็นจุดเดียวกับที่มีค่าแรงบิดสูงสุด (อัครพงษ์ สถาวรินทุ และไกรสร รวยป้อม, 2563) ซึ่งสำหรับไบโอดีเซลที่ผลิตได้ (BOB100) เมื่อมีการใช้ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ทดสอบที่ 900-2,200 rpm จะมีค่าประสิทธิภาพความร้อนเบรกในช่วง 6.76-19.00%



ภาพที่ 75 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพความร้อนเบรกและความเร็วรอบ

## ผลและวิเคราะห์ผลด้านเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ผลด้านเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มที่ผ่านการทอดมันฝรั่งโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าหอยขมบนวัสดุรองรับเถ้ากลบข้าว จะทำการวิเคราะห์ค่าในส่วนของต้นทุน จุดคุ้มทุน และระยะเวลาคืนทุนของการผลิตไบโอดีเซลในเครื่องต้นแบบการผลิตไบโอดีเซลขนาดการผลิต 20 L ซึ่งเริ่มตั้งแต่การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจนถึงการสิ้นสุดของกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยไบโอดีเซลที่นำมาวิเคราะห์ค่าทางเศรษฐศาสตร์จะเป็นไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากการศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด อันได้แก่ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 70%wt RSSA/RHA ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt โดยมีอัตราส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1 ระยะเวลาการผลิต 2 h ภายใต้อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 60-65 °C และมีการกวนผสมอย่างต่อเนื่องที่ 300-500 rpm ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 1. การวิเคราะห์ต้นทุนผันแปรการผลิตไบโอดีเซล

สำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนผันแปรในการผลิตไบโอดีเซลในครั้งนี้ จะแบ่งต้นทุนผันแปร 3 ส่วน ได้แก่ 1) ต้นทุนผันแปรด้านวัตถุดิบ 2) ต้นทุนผันแปรด้านพลังงานไฟฟ้า 3) ต้นทุนผันแปรรวม และ 4) ต้นทุนผันแปรต่อหน่วย ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### ➤ ต้นทุนผันแปรด้านวัตถุดิบ

1. น้ำมันพืชใช้แล้วที่เป็นน้ำมันวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล 1 ครั้ง ใช้ 20 L หรือ 18.40 kg ซึ่งน้ำมันใช้แล้ว 18 L มีราคาประมาณ 100 Baht จึงได้ว่าในการผลิต 1 ครั้ง มีต้นทุนเท่ากับ 111.20 Baht
2. เปลือกหอยขมเป็นวัสดุที่ใช้ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่สามารถเก็บรวบรวมได้จากฟาร์มหอยขม จึงไม่มีค่าใช้จ่ายในส่วนนี้
3. เถ้ากลบข้าวเป็นวัสดุที่ใช้ในการสังเคราะห์ปฏิกิริยา ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่สามารถรวบรวมได้จากชุมชน จึงไม่มีค่าใช้จ่ายในส่วนนี้
4. เมทานอล 20 L หรือ 16 kg ราคา 498 Baht ซึ่งในการผลิตไบโอดีเซล 1 ครั้งใช้ 6.36 kg คิดเป็นราคาเท่ากับ 197.99 Baht
5. น้ำปราศจากไอออน 20 L ราคา 450 Baht ซึ่งในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ 1 ครั้งใช้ 3,350 ml เพื่อให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาประมาณ 500 g คิดเป็นราคารวม 75.38 Baht โดยหากคิดราคาการเอาไปใช้ในการผลิตไบโอดีเซล 1 ครั้ง จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงครั้งละ 184 g จึง

ได้ว่าใช้น้ำปราศจากไอออนในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล 1 ครั้ง ทำให้เกิดต้นทุนเท่ากับ 27.60 Baht

ดังนั้นในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว 1 ครั้ง จากการใช้น้ำมันตั้งต้น 20 L จะมีต้นทุนในการผลิตทางด้านวัตถุดิบรวม คิดเป็นราคาเท่ากับ  $111.20 + 197.99 + 27.60 = 336.79$  Baht

### ➤ ต้นทุนผันแปรด้านพลังงานไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตทางด้านพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไปนั้น คำนวณได้จากการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากการใช้อุปกรณ์ทางไฟฟ้าทุกส่วนของกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยสามารถคำนวณได้ด้วยการใช้สมการหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไป ดังสมการที่ 13

$$\text{Power consumption} = \frac{P \times t}{1,000}$$

สมการที่ 13

เมื่อ Power consumption คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไป (kWh)

P คือ กำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้า (W)

t คือ เวลาในการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้านั้น (h)

### ต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้าในส่วนของเครื่องเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาถ้าหอยขมบนตัวรองรับแล้วกลับข้าวมีการใช้พลังงานไฟฟ้าดังต่อไปนี้

1. เปลือกหอยขมและแล้วกลับข้าวจะถูกปรับสภาพด้วยการให้ความร้อนด้วยการแคลไซน์เพื่อเตรียมวัสดุในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาถ้าหอยขมบนตัวรองรับแล้วกลับข้าว โดยมีการใช้เตาเผาอุณหภูมิสูง (ใช้กำลังไฟฟ้า 2,750 W) ให้ความร้อนแก่วัสดุดังกล่าวที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ซึ่งในการเผาแคลไซน์ 1 ครั้ง จะมีต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้า 11.00 kWh

2. ถ้าจากเปลือกหอยขมและแล้วกลับข้าวที่ถูกปรับสภาพด้วยการแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงเพื่อสลายสารประกอบเดิมให้อยู่ในรูปของสารประกอบประเภทออกไซด์จะถูกนำมาใช้เป็นวัสดุในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาถ้าหอยขมบนตัวรองรับแล้วกลับข้าวด้วยวิธีการเคลือบฝังแบบเปียก ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์จะมีการให้ความร้อนแก่สารด้วยการใช้เตาให้ความร้อนพร้อมเครื่องกวนสารละลาย (ใช้กำลังไฟฟ้า 630 W) ที่อุณหภูมิ 80 °C โดยมีการกวนผสมสารอย่างต่อเนื่องที่ 300-

500 rpm เป็นระยะเวลา 4 h ซึ่งในการให้ความร้อนแก่สารครั้งนี้ 1 ครั้ง จะมีต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้า 2.52 kWh

3. หลังจากเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนวัสดุรองรับด้วยวิธีการเคลือบฝังแบบเปียกจะนำเอาสารผสมที่ได้ไปอบไล่ความชื้นที่ 105 °C เป็นเวลา 10 h โดยใช้เครื่องอบลมร้อนที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้า 1,100 W ซึ่งในการให้ความร้อนแก่สารครั้งนี้ 1 ครั้ง จะมีต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้า 11.00 kWh

4. ในขั้นตอนสุดท้ายของการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาถ้าหอยขมบนวัสดุรองรับถ้าเคลือบขาวจะมีการให้ความร้อนแก่สารที่ได้ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยมีการใช้เตาเผาอุณหภูมิสูง (ใช้กำลังไฟฟ้า 2,750 W) ให้ ซึ่งในการเผาแคลไซน์ 1 ครั้ง จะมีต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้า 11.00 kWh

กระบวนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 70%wt RSSA/RHA ที่กล่าวมานี้ สามารถเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาได้ประมาณ 500 g ต่อครั้ง ซึ่งสำหรับการผลิตไบโอดีเซลแต่ละครั้งจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt ของปริมาณน้ำมันตั้งต้น 18.40 kg คิดเป็นปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ต่อครั้ง 184 g ดังนั้นเมื่อคิดภาพรวมจะพบว่า การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถใช้ผลิตไบโอดีเซลได้ทั้งหมด 2.72 ครั้ง ซึ่งใช้พลังงานไฟฟ้ารวมเท่ากับ  $11.00 + 2.52 + 11.0 + 11.00 = 35.52$  kWh/2.72 ครั้ง กล่าวคือสามารถคิดเป็นต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลได้เท่ากับ 13.06 kWh ซึ่งเมื่อนำมาคำนวณเป็นค่าราคาเงินจะพบว่าจากการกำหนดราคาค่าไฟฟ้าที่ 3.44 Baht/kWh จะได้ว่าต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลในส่วนนี้มีค่า 44.93 Baht

#### ต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้าในส่วนของการผลิตไบโอดีเซล

ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้าหอยขมบนตัวรองรับถ้าเคลือบขาวมีการใช้พลังงานไฟฟ้าดังต่อไปนี้

1. กระบวนการผลิตในส่วนเริ่มต้นจะมีการปั้มน้ำมันจากถังเก็บน้ำมันขึ้นไปยังถังทำปฏิกิริยาโดยใช้เวลาประมาณ 5 min ซึ่งจะมีการอุ่นน้ำมันรอทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 10 min โดยจะมีการใช้พลังงานไฟฟ้าในส่วนของปั้มน้ำมันและใบกวน ซึ่งมีกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 180 W และ 1,000 W ตามลำดับ จึงได้ว่าการใช้ไฟฟ้า 0.01 kWh และ 0.16 kWh ตามลำดับ

2. ในระหว่างที่อุ่นน้ำมันรอจากขั้นตอนแรก จะทำการผสมสารระหว่างเมทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยา ประมาณ 10 min ซึ่งจะมีการใช้มอเตอร์กวนสารที่มีการใช้กำลังไฟฟ้า 341 W โดยจะมีต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้า 0.05 kWh

3. เมื่อสารในขั้นตอนที่ 1. และ 2. พร้อมแล้ว จะเข้าสู่กระบวนการทำปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งจะมีการให้ความร้อนประมาณ 60-65 °C เป็นเวลาประมาณ 2 h ซึ่งในการทำปฏิกิริยา 1 ครั้ง จะมีต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้า 2.68 kWh

4. หลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จแล้ว จะปล่อยสารลงสู่ถังแยกสาร ซึ่งหลังจากแยกสารเสร็จเรียบร้อย นำไบโอดีเซลที่ได้ปล่อยออกสู่ถังเก็บเพื่อเข้าสู่กระบวนการต้มไล่ไอน้ำด้วยการนำไปให้ความร้อนที่ 105 °C เป็นเวลาประมาณ 30 min ซึ่งในการต้มไล่ไอน้ำในน้ำมันวัตถุดิบ 1 ครั้ง จะมีต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้า 0.5 kWh

5. จากนั้นเมื่อกระบวนการสิ้นสุดลงจะทำการบีบไบโอดีเซลที่ได้เข้าสู่ถังเก็บ ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 3 min ซึ่งจะมีต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้า 0.01 kWh

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่กล่าวมานี้เป็นการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ปริมาณน้ำมันตั้งต้น 12 kg ซึ่งมีใช้พลังงานไฟฟ้ารวมเท่ากับ  $0.01 + 0.16 + 0.05 + 2.68 + 0.50 + 0.01 = 3.41$  kWh ซึ่งเมื่อนำมาคำนวณเป็นค่าราคาเงินจะพบว่าจากการกำหนดราคาค่าไฟฟ้าที่ 3.44 Baht/kWh จะได้ว่าต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลในส่วนนี้มีค่า 11.73 Baht

#### ➤ ต้นทุนผันแปรรวม

จากการวิเคราะห์ของต้นทุนแปรได้ในส่วนของวัตถุดิบและค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ จะได้ว่าในการผลิตไบโอดีเซล 1 ครั้ง จะมีต้นทุนแปรได้รวมเท่ากับ  $336.79 + 56.66 = 393.44$  Baht ซึ่งสามารถแสดงผลการคำนวณได้ดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 รายละเอียดต้นทุนผันแปรการผลิตไบโอดีเซล

ต้นทุนผันแปร	รายละเอียด	ปริมาณ	ราคาต่อหน่วย	ราคารวม (Baht)
1. ต้นทุนผันแปรด้านวัตถุดิบ	1.1 น้ำมันใช้แล้ว	20 L (18.40 kg)	5.56	111.20
	1.2 เมทานอล	6.36 kg	31.13	197.99
	1.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา 70%wt RSSA/RHA (คิดในส่วนของกรใช้น้ำปราศจากไอออน ส่วนเถ้าเปลือกหอยขมและเถ้าแกลบขาวไม่มีค่าใช้จ่าย)	184 g	0.15	27.60
2. ต้นทุนผันแปรด้านพลังงานไฟฟ้า	2.1 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา	13.06 kWh	3.44	44.93
	2.2 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล	3.41 kWh	3.44	11.73
<b>ต้นทุนผันแปรรวม</b>				<b>393.44</b>

### ➤ ต้นทุนผันแปรต่อหน่วยการผลิต

การผลิตไบโอดีเซลใน 1 ครั้งการผลิตจะให้ผลผลิตประมาณ 17.20 kg หรือ 15.14 L ซึ่งมีต้นทุนผันแปรรวมเท่ากับ 393.44 Baht ดังนั้นจึงได้ว่าไบโอดีเซล 1 L มีต้นทุนผันแปรต่อหน่วยการผลิตเท่ากับ 25.99 Baht

## 2. การวิเคราะห์ต้นทุนคงที่การผลิตไบโอดีเซล

การวิเคราะห์และคำนวณต้นทุนคงที่การผลิตไบโอดีเซลจะเป็นค่าเสื่อมราคาอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต และค่าซ่อมบำรุงรายปีของอุปกรณ์การผลิตรวม มีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 17 ซึ่งพบว่าการผลิตไบโอดีเซลในครั้งนี้มีต้นทุนคงที่รวม 222,525.00 Baht คิดเป็นต้นทุนคงที่ต่อปีเท่ากับ 28,380.00 Baht

ตารางที่ 17 รายละเอียดต้นทุนคงที่การผลิตไบโอดีเซล

รายละเอียดต้นทุนคงที่	ราคา (บาท)	อายุการใช้ งาน (ปี)	ค่าใช้จ่ายต่อปี (Baht/ปี)
1. ค่าเสื่อมราคาเครื่องผลิตไบโอดีเซล (ราคาเครื่อง 100,000 บาท)	90,000.00	15	6,000.00
2. ค่าเสื่อมราคาเตาเผาอุณหภูมิสูง (ราคาเครื่อง 40,000 บาท)	36,000.00	15	2,400.00
3. ค่าเสื่อมราคาตู้อบลมร้อน (ราคาเครื่อง 48,500 บาท)	43,650.00	15	4,365.00
4. ค่าเครื่องซังสาร (ราคาเครื่อง 26,000 บาท)	23,400.00	10	2,340.00
5. ค่าเครื่องให้ความร้อนและกวนสาร (ราคาเครื่อง 15,000 บาท)	13,500.00	10	1,350.00
6. ค่าอุปกรณ์อื่น ๆ (ราคาเต็ม 5,000 บาท)	4,500.00	10	450.00
7. ค่าซ่อมบำรุง*	11,475.00	1	11,475.00
รวมต้นทุนคงที่	222,525.00		
รวมต้นทุนคงที่ต่อปี			28,380.00

\* คิดจาก 5% ของราคาเครื่องจักรข้อ 1. ถึง 5. (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2559)

จากข้อมูลข้างต้นทั้งในส่วน of ต้นทุนผันแปรและต้นทุนคงที่รวม สามารถนำมาหาค่าไรส่วนเกินต่อหน่วย (Contribution margin per unit) ปริมาณ ณ จุดคุ้มทุน (Break-even quantity) และระยะเวลาคืนทุน (Payback period) ดังรายละเอียดด้านล่าง ซึ่งในส่วนของการคิดกำไรส่วนเกินจะอ้างอิงราคาไบโอดีเซล B100 เฉลี่ย (ณ 28 ก.ย.- 4 ต.ค. 2563) ที่มีค่าอยู่ที่ 29.59 Baht/L

(สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2563) และในส่วนของ การคิดระยะเวลาคืนทุนจะกำหนดเวลาการผลิตไว้ที่ 248 วัน/ปี (หักกลางวันหยุดประจำสัปดาห์และวันหยุดนักขัตฤกษ์แล้ว) ซึ่งในแต่ละวันมีการผลิต 2 รอบ ดังนั้นใน 1 ปี จึงได้ว่าสามารถผลิตไบโอดีเซลได้ทั้งหมด 7,509.44 L

$$\begin{aligned} \text{กำไรส่วนเกินต่อหน่วย} &= \text{ราคาขายต่อหน่วย} - \text{ต้นทุนผันแปรต่อหน่วย} \\ &= 29.59 - 25.99 \\ &= 3.60 \text{ Baht} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จุดคุ้มทุน} &= \text{ต้นทุนคงที่} / \text{กำไรส่วนเกินต่อหน่วย} \\ &= 222,525.00 / 3.60 \\ &= 61,812.50 \text{ L} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ระยะเวลาคืนทุน} &= \text{ต้นทุนคงที่} / (\text{กำไรส่วนเกิน} \times \text{ผลผลิตต่อปี}) \\ &= 222,525.00 / (3.60 \times 7,509.44) \\ &= 8.23 \text{ ปี} \end{aligned}$$

จากการคำนวณและวิเคราะห์จึงสามารถสรุปได้ว่ากระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มที่ผ่านการทอดมันฝรั่งโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าหอยขมบนวัสดุรองรับเถ้ากลบข้าวในเครื่องต้นแบบการผลิตไบโอดีเซลขนาดการผลิต 20 L มีต้นทุนต่อหน่วยเท่ากับ 25.99 Baht ซึ่งถือว่าเป็นค่าต้นทุนการผลิตที่ต่ำ และมีค่าจุดคุ้มทุนหรือจุดที่ไม่มีการขาดทุนหรือได้กำไรอยู่ที่ปริมาณ ณ จุดคุ้ม 61,812.50 L กล่าวคือจะต้องมีการขายไบโอดีเซลให้ได้ปริมาณมากกว่า 61,812.50 L จึงจะทำให้เกิดกำไรในการลงทุนครั้งนี้ ซึ่งในส่วนเพิ่มเติมพบว่าการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วที่มีการตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 70%wt RSSA/RHA ในเครื่องต้นแบบการผลิตไบโอดีเซลขนาดการผลิต 20 L มีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 8.23 ปี

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาวิธีพ่นธูปจากวัสดุทางธรรมชาติด้วยการใช้เถาหอยขมและเถากล้วยที่มีการเตรียมผ่านกระบวนการการเคลือบผงแบบเปียก เพื่อให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับในรูปแบบตัวเร่งปฏิกิริยาเถาหอยขมบนตัวรองรับเถากล้วย จากนั้นใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ผ่านการทอดมันฝรั่งแล้วแทนการใช้สารเคมีเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสามารถแยกผลสรุปได้ออกเป็น 6 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันวัตถุดิบ ส่วนที่ 2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนที่ 3 ผลการวิเคราะห์ร้อยละผลผลิตและคุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ในระดับห้องปฏิบัติการ ส่วนที่ 4 ผลการวิเคราะห์ร้อยละผลผลิตและคุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ในระดับเครื่องต้นแบบ ส่วนที่ 5 ผลการวิเคราะห์ผลการทดสอบใช้งานไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก และส่วนที่ 6 ผลการวิเคราะห์ค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตไบโอดีเซล โดยสามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

#### สรุปผลงานวิจัย

1. การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันวัตถุดิบ พบว่าน้ำมันพืชที่ผ่านกระบวนการทอดมันฝรั่ง สามารถนำมาผลิตไบโอดีเซลได้โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการลดกรดก่อน เนื่องจากมีค่ากรดไขมันอิสระอยู่ในช่วงค่าที่ยอมรับได้ คือ มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.569%wt รวมไปถึงค่าความเป็นกรด 1.148 mg KOH/g oil ค่าความหนาแน่น 920 kg/m<sup>3</sup> และมีค่าความหนืดอยู่ที่ 52.363 cSt
2. การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของเถาหอยขมต่อเถากล้วยที่ผ่านการแคลไซน์ด้วยอุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 4 h คือ 70:30 โดยมีอุณหภูมิการเผาแคลไซน์หลังการเคลือบผงแบบเปียกที่ 900 °C เนื่องจากส่งผลให้เกิดผลผลิตไบโอดีเซลสูงถึง 94.16%wt และมีคุณสมบัติอยู่ในช่วงมาตรฐานทั้งหมด ซึ่งเถาที่ได้มีลักษณะเป็นผงละเอียด สีขาวเทา และมีปริมาณของ CaO และ SiO<sub>2</sub> สูงถึง 71.96 และ 13.77%wt ตามลำดับ และเมื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณวิทยาพบว่าอนุภาคของ CaO แพร่กระจายอยู่อย่างหนาแน่นทั่วบริเวณพื้นผิวของอนุภาค SiO<sub>2</sub>

3. การวิเคราะห์ร้อยละผลผลิตและคุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากการใช้น้ำมันพืชใช้แล้วเป็นวัตถุดิบ ซึ่งมีการศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA และ RSSA/RHA ในกระบวนการผลิตสามารถสรุปเงื่อนไขที่เหมาะสมได้ว่าการใช้ประเภทตัวเร่งปฏิกิริยา RSSA/RHA ชนิด 70%wt RSSA/RHA ที่อัตราส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt ระยะเวลาการผลิต 2 h ภายใต้การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60-65 °C และมีอัตราการกวนผสมอย่างต่อเนื่อง 300-500 rpm สามารถทำให้เกิดผลผลิตไบโอดีเซลสูงถึง 94.16%wt ซึ่งมีค่าคุณสมบัติอยู่ในช่วงมาตรฐานตามกรมธุรกิจพลังงานกำหนด ได้แก่ ค่า pH เท่ากับ 7, ค่าความเป็นกรด 0.365 mg KOH/g oil, ความหนาแน่น 880 kg/m<sup>3</sup>, ความหนืด 4.759 cSt, จุดวาบไฟ 176 °C, จุดติดไฟ 186 °C, จุดชุ่น 10 °C และจุดไหลเท 7 °C

4. การผลิตไบโอดีเซลในระดับเครื่องต้นแบบ พบว่าการผลิตไบโอดีเซลด้วยการใช้น้ำมันตั้งต้น 12 kg สามารถผลิตไบโอดีเซลได้ 11.22 kg หรือคิดเป็นร้อยละผลผลิต 93.46%wt ซึ่งเมื่อนำน้ำมันดังกล่าวไปวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติจะพบว่าค่าที่ได้ช่วงมาตรฐานที่กรมธุรกิจพลังงานกำหนด ได้แก่ ค่า pH เท่ากับ 7, ค่าความเป็นกรด 0.365 mg KOH/g oil, ความหนาแน่น 880 kg/m<sup>3</sup>, ความหนืด 4.563 cSt, จุดวาบไฟ 182 °C, จุดติดไฟ 187 °C, จุดชุ่น 12 °C และจุดไหลเท 8 °C โดยในส่วนเพิ่มเติมพบว่าไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีค่าความร้อนสูง 41.09 MJ/kg

5. การทดสอบการใช้งานไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก พบว่าการทดสอบค่าสมรรถนะทั้งในส่วนของคุณสมบัติกำลังเบรค อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และประสิทธิภาพความร้อนเบรค ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ทดสอบ 900-2,200 rpm ของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ (BOB100) มีค่าอยู่ในช่วง 0.903-1.523 kg/h, 9.72-13.84 N.m, 0.854-2.781 kW, 0.46-1.30 kg/kWh, 18.95-53.28 MJ/kWh และ 6.76-19.00% ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มความสัมพันธ์กับรอบของเครื่องยนต์เป็นไปในลักษณะเดียวกับการใช้ไบโอดีเซลลูกผสมและน้ำมันดีเซลฐานที่มีขายตามท้องตลาดในการทดสอบ

6. การวิเคราะห์ค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตไบโอดีเซลพบว่าไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางธรรมชาติ 70%wt RSSA/RHA มีต้นทุนต่อหน่วยเท่ากับ 25.99 Baht ซึ่งถือว่าเป็นค่าต้นทุนการผลิตที่ต่ำ และมีค่าจุดคุ้มทุนอยู่ที่ปริมาณ 61,812.50 L ซึ่งในส่วนเพิ่มเติมพบว่า การผลิตไบโอดีเซลครั้งนี้ภายใต้การผลิตในเครื่องต้นแบบมีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 8.23 ปี

### ข้อเสนอแนะ

1. เพื่อคำนึงถึงความเป็นไปได้ ความยากง่าย และต้นทุนการผลิตของการนำวัสดุนี้ไปใช้งานได้จริงในชุมชนการผลิตไบโอดีเซล ควรมีการนำถ้ำกลับข้าวที่ผ่านการเผาด้วยเตาชีวมวลความร้อน

สูง หรือผ่านการเผาใช้งานจริงมาศึกษาความสามารถในการใช้เป็นวัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ โดยไม่ต้องผ่านการเผาแคลไซน์เพิ่มเติม

2. เมื่อคำนึงถึงความเป็นไปได้ ความยากง่าย และต้นทุนการผลิตของการนำวัสดุตัวเร่งปฏิกิริยาไปใช้งานได้จริงในชุมชนการผลิตไบโอดีเซล เห็นได้ว่าควรมีการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าไม้ที่ผ่านการให้ความร้อนจากการใช้งานจริงในครัวเรือน โดยไม่ต้องผ่านการให้ความร้อนซ้ำมาศึกษาการผลิตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับใช้ในการผลิตไบโอดีเซล จะสามารถลดการใช้พลังงานและต้นทุนในการผลิตได้มากขึ้น

3. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาแคลไซน์ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์บนวัสดุรองรับที่ผ่านการเตรียมด้วยวิธีการเคลือบฝังแบบเปียก

4. ควรทำการวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผลิตได้เพิ่มเติม ด้วยเทคนิค Hammett indicator EDX/EDS และ BET เพื่อหาค่าความเป็นกรดต่าง ธาตุที่พบบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา และปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น

5. ควรมีการวัดค่ามลพิษที่เกิดขึ้นจากการใช้น้ำมันแข็งเพลิงที่ผลิตได้ในเครื่องยนต์ เพื่อชี้ให้เห็นความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมของไบโอดีเซลที่ผลิตได้

## บรรณานุกรม

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2558). *แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558–2579*. สืบค้นเมื่อ 17 กรกฎาคม 2562, จาก สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน: <http://www.eppo.go.th/index.php/th/plan-policy/tieb/aedp>.
- กวิศ ตั้งพลสินธนา. (2553). *สมรรถนะเชิงเร่งปฏิกิริยาของทอง-คอปเปอร์ออกไซด์/ซีเรียสำหรับออกซิเดชันแบบเลือกเกิดของคาร์บอนไดออกไซด์ในกระแสไฮโดรเจนเข้มข้น*. วิทยานิพนธ์ประกอบปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค, ภาควิชาเคมีเทคนิค, คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- คุณานนต์ ศักดิ์กำปัง และเกียรติฟา ตั้งใจจิต. (2556). การศึกษาสมรรถนะและการปล่อยมลพิษของเครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็วเมื่อน้ำมันไบโอดีเซลจากไขมันไก่. *KKU Research Journal*, 18 (4), 616-627.
- ชื่นสุมน ยิ้มถิ่น, สาโรจน์ ยิ้มถิ่น, เกียรติศักดิ์ ศรีวิจิตรกมล, อรุณี ชัยศรี และวิษณุ แพงเมือง. (2559). *การผลิตและตรวจสอบคุณภาพของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ใช้น้ำมันที่ใช้แล้วโดยใช้วัสดุเหลือทิ้ง*. แผนงานวิจัยบกองทุนส่งเสริมงานวิจัย ประจำปี 2559 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ.
- นพพร แสงอาทิตย์. (2559). *ไบโอดีเซล: การออกแบบการทดลองสำหรับเรียนรู้วิทยาศาสตร์ยุคศตวรรษที่ 21 ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีศึกษา, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- นันทิรา หงษ์ศรีสุวรรณ. (2560). *อันตรายจากน้ำมันทอดซ้ำ*. *RMUTP Research Journal*, 9 (1), 163-175.
- นิธิ นิธิวัฒน์เลิศ. (2554). *การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม โดยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์*. วิทยานิพนธ์ประกอบปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์, ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2556. (2556, 17 พฤศจิกายน). *ราชกิจจานุเบกษา*. เล่ม 130 ตอนพิเศษ 158. หน้า 15-17.

- ปิยรัตน์ศิริ พันธุ์จันทร์. (2556). การสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันโดยใช้ตัวเร่งจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และการเตรียมอนุพันธ์ของกลีเซอรอล. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- พิชยาภรณ์ สิงห์รัญ. (2561). การผลิตไบโอดีเซลจากตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเถ้าชีวมวลสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ภัทรติกรณ์ รัชศักดิ์ศรี และสมชาย พัวจินดาเนตร. (2555). การผลิตและตรวจสอบคุณภาพของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555, 17-19 ตุลาคม 2555, ชะอำ เพชรบุรี. 1,037-1,042.
- ศศิประภา แก้วแดง. (2560). การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้เปลือกหอยขมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ศิริวรรณ ว่องวีระวุฒิ. (2553). จุดคุ้มทุน สิ่ง SMEs ควรรู้. *Executive Journal*, 203-210.
- ศุภกฤษณ์ งามเมือง, ธรรณิศร์ ดีทายาท และทองเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. 2560. กระบวนการผลิตและการประเมินต้นทุนไบโอดีเซลที่ผ่านการเร่งปฏิกิริยาด้วยสนามไฟฟ้า และการทำความสะอาดแบบแห้ง. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 24 (2), 176-184.
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2559). มติคณะกรรมการบริหารนโยบายพลังงาน ครั้งที่ 3/2553 (ครั้งที่ 54), วันพฤหัสบดี ที่ 22 เมษายน พ.ศ. 2553 เวลา 9.30 น., ณ ห้องประชุมบุญรอด - นิธิพัฒน์ ชั้น 11 อาคาร 7 กระทรวงพลังงาน.
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2561). รายงานสถิติพลังงานของประเทศไทย ปี 2561. กรุงเทพมหานคร: บริษัท เพจแมคเกอร์ จำกัด.
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2563). สถานการณ์ราคาน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ, จากเว็บไซต์ : [http://www.eppo.go.th/index.php/th/component/k2/item/16149-news-160963#:~:text=ไบโอดีเซล%20\(B100\)%3A,แล้ว%201.41%20บาทต่อลิตร.](http://www.eppo.go.th/index.php/th/component/k2/item/16149-news-160963#:~:text=ไบโอดีเซล%20(B100)%3A,แล้ว%201.41%20บาทต่อลิตร.) สืบค้นเมื่อ 9 พฤศจิกายน 2563.
- สุภกร บุญยีน, มณฑา มาลัยทอง และอภิสิทธิ์ โพธิ์แก้ว. (2558). การสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกหอย. *Thai Journal of Science and Technology*, 4 (2), 115-122.
- สุรเชษฐ์ วรศรี. (2558). การพัฒนาเนื้อดินสำหรับการผลิตเตาหุงต้มประสิทธิภาพสูง. วิทยานิพนธ์ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์.

- สุรศิษฏ์ ดีสวัสดิ์. (2556). การเตรียมและทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิถีพันธู์ที่ได้จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรสำหรับการผลิตไบโอดีเซล. วิทยานิพนธ์ประกอบปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์, ภาควิชาวิทยาการและวัสดุศาสตร์, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- เสนีย์ พันโยธา และเนรมิตร กระแสร์ลม. (2554). การศึกษาสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กจากการใช้น้ำมันปาล์มใช้แล้วจากการทอดปาท่องโก๋ผสมกับน้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง. *Princess of Naradhiwas University Journal*, 3 (2), 41-52.
- หญิง ชูศรี. (2559). การสกัดน้ำมันเมล็ดสะเดาและการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชัน. เอกสารโครงการประกอบหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาพลังงานทดแทน, วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- อธิยา คงเซ็น, รัตนชัย ไพรินทร์, แก้วกันยา สดุดประเสริฐ และวารุณี ลิ้มมัน. 2557. การศึกษาปริมาณกรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้นในน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์ในขณะเก็บรักษา. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*, 45 (2), 261-264.
- อัคมพงศ์ สถาวรินทุ และไกรสร รวยป้อม. (2563). ชุดทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลสำหรับห้องปฏิบัติการ. *วารสารวิจัย*, 13 (2), 68-76.
- อัจฉรา อิมคำ พุฒคำ และอภิพงษ์ พุฒคำ. (2557). บทความปริทัศน์การสังเคราะห์และคุณลักษณะของแคลเซียมออกไซด์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล. *Naresuan University Journal: Science and Technology 2014*, 22 (3), 29-46.
- Abed, K.A., Morsi, A.K.E., Sayed, M.M., Shaib, A.A.E. and Gad, M.S. (2018). Effect of Waste Cooking-oil Biodiesel on Performance and Exhaust Emissions of a Diesel Engine. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27, 985–989.
- Adipah, S. (2019). Introduction of Biodiesel as a Sustainable Resource. *Journal of Environmental Science and Public Health*, 3 (1), 99-103.
- Birla, A., Singh, B., Upadhyay, S.N. and Sharma, Y.C., 2012. Kinetics Studies of Synthesis of Biodiesel from Waste Frying Oil Using a Heterogeneous Catalyst Derived from Snail Shell. *Bioresource Technology*, 106, 95-100.
- Buasri, A., Chaiyut, N., Loryuenyong, V., Worawanitchaphong, P., and Trongyong, S. (2013). Calcium Oxide Derived from Waste Shells of Mussel, Cockle, and Scallop as the Heterogeneous Catalyst for Biodiesel Production. *The Scientific World Journal*, Volume 2013, 1-7.

- Buta, J. G. and Balasubramanian, N. (2017). Potential Application of Rice Husk for Synthesis of Catalyst for Biodiesel Production. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 8 (12), 1,158-1,169.
- Che, Z., Lingmei, Y., Shiyou, X., Wen, L., Zhongming, W. And Pengmei, L. (2018). Biodiesel Production by a Highly Effective Renewable Catalyst from Pyrolytic Rice Husk. *Journal of Cleaner Production*, 199, 772-780.
- Chinglenthoba, C., Das, A. and Vandana, S. (2020) Enhanced Biodiesel Production from Waste Cooking Palm Oil, with NaOH-Loaded Calcined Fish Bones as the Catalyst. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 15,925-15,930.
- Dalibor M.M., Miroslav V.S., Ana V.V., Jelena M.A., Milord D.C. and Vlada B.V. (2015). The Synthesis of CaO Loaded onto Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> from Calcium Acetate and Its Applications in the Transesterification of the Sunflower Oil. *Advanced Technologies*, 4 (1), 26-32.
- Faruque, M.O., Razzak, S.A. and Hossain, M.M. (2020). Application of Heterogeneous Catalysts for Biodiesel Production from Microalgal Oil-A Review. *Catalysts*, 10, 1-25.
- Ghadge, S.V and Raheman, H. (2005). Biodiesel Production from Mahua (*Madhuca Indica*) Oil Having High Free Fatty Acids. *Biomass & Bioenergy*, 28 (6), 601-605
- Guan-Yi, C., Rui, S., Jia-Fu, S. and Bei-Bei, Y. (2015). Transesterification of Palm Oil to Biodiesel Using Rice Husk Ash-Based Catalysts. *Fuel Processing Technology*, 133, 8-13.
- Gumba, R.E., Saallah, S., Misson, M., Ongkudon, C.M. and Anton A. (2016). Green Biodiesel Production: A Review on Feedstock, Catalyst, Monolithic Reactor and Supercritical Fluid Technology. *Biofuel Research Journal*, 11, 431-447.
- Hadiyanto, H., Afianti, A.H., Navi'a, U.I., Adetya, N.P., Widayat, W. and Sutanto, H. (2017). The Development of Heterogeneous Catalyst C/CaO/NaOH from Waste of Green Mussel Shell (*Perna Varidis*) for Biodiesel Synthesis. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5, 4,559-4,563.
- Hadiyanto, H., Lestari, S.P. and Widayat, W. (2016). Preparation and Characterization of *Anadara Granosa* Shells and CaCO<sub>3</sub> as Heterogeneous Catalyst for Biodiesel

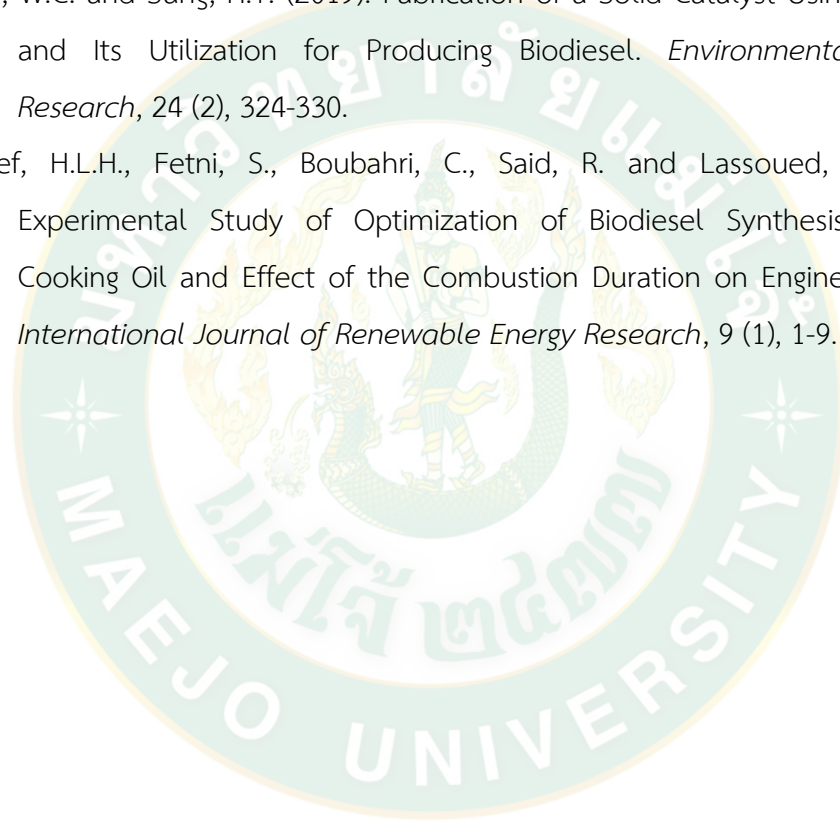
- Production. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 11 (1), 21-26.
- Hadiyanto, H., Lestari, S.P., Abdullah, A., Widayat, W. and Sunanto, H. (2016). The Development of fly Ash-Supported Cao Derived from Mollusk Shell of *Anadara Granosa* and *Paphia Undulata* as Heterogeneous CaO Catalyst in Biodiesel Synthesis. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 7, 297–305.
- Helwani, Z., Fatra, W., Saputra, E. and Maulana, R. (2017). Preparation of CaO/Fly Ash as a Catalyst Inhibitor for Transesterification Process of Palm Oil in Biodiesel Production. *Materials Science and Engineering*, 334, 1-10.
- Ho, W.W.S., Ng, H.K. and Gan, S. (2012). Development and Characterization of Novel Heterogeneous Palm Oil Mill Boiler Ash-Based Catalysts for Biodiesel Production. *Bioresource Technology*, 125, 158-164.
- Ho, W.W.S., Ng, H.K., Gan, S. and Tan S.H. (2014). Evaluation of Palm Oil Mill Fly Ash Supported Calcium Oxide as a Heterogeneous Base Catalyst in Biodiesel Synthesis from Crude Palm Oil. *Energy Conversion and Management*, 88, 1,167-1,178.
- Hossain, S.K.S., Mathur, L. and Roy, P.K. (2018). Rice Husk/Rice Husk Ash as an Alternative Source of Silica in Ceramics: A Review. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 6 (4), 299–313.
- Kaewdaeng, S. and Nirunsin, R. (2019). Synthesis of Calcium Oxide from River Snail Shell as a Catalyst in Production of Biodiesel. *Applied Environmental Research*, 41 (1), 31-37.
- Kaewdaeng, S., Sintuya, P. and Nirunsin, R. (2017). Biodiesel Production Using Calcium Oxide from River Snail Shell Ash as Catalyst. *Energy Procedia*, 138, 937-942.
- Lani, N.S., Ngadi, N. and Taib, M.R. (2017). Parametric Study on the Transesterification Reaction by Using CaO/Silica Catalyst. *Chemical Engineering Transactions*, 56, 601-606.
- Lukic, I., Krstic, J., Javonavic, D. and Skala, D. (2009). Alumina/Silica Supported  $K_2CO_3$  as a Catalyst for Biodiesel Synthesis from Sunflower Oil. *Bioresource Technology*, 100, 4,690-4,696.

- Marinkovic, D.M., Avramovic, J.M., Stankovic, M.V., Stamenkovic, O.S., Jovanovic, D.M. and Veljkovic, V.B. (2017). Synthesis and Characterization of Spherically-Shaped  $\text{CaO}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  Catalyst and Its Application in Biodiesel Production. *Energy Conversion and Management*, 144, 399-413.
- Mecher, L.C., Vidya Sagar, D. and Naik, S.N. (2006). Technical Aspects of Biodiesel Production by Transesterification-A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10, 248-268.
- Mohadesi, M., Hojabri, Z. and Moradi, G. (2014). Biodiesel Production Using Alkali Earth Metal Oxides Catalysts Synthesized by Sol-Gel Method. *Biofuel Research Journal*, 1, 30-33.
- Moradi, G.R., Mohadesi, M., Ghanbari, M., Moradi, M.J., Hosseini, Sh. And Davoodbeygi, Y. (2015). Kinetic Comparison of Two Basic Heterogenous Catalysts Obtained from Sustainable Resources for Transesterification of Waste Cooking Oil. *Biofuel Research Journal*, 6, 236-241.
- Nabora, C.S., Kingondu, C.K. and Kivevele, T.T. (2019). *Tamarindus Indica* Fruit Shell Ash: A Low Cost and Effective Catalyst for Biodiesel Production from *Parinari Curatellifolia* Seeds Oil. *SN Applied Sciences*.
- Niju, S., Meera, K.M., Begum, S. and Anantharaman, N. (2014). Modification Of Egg Shell and Its Application in Biodiesel Production. *Journal of Saudi Chemical Society*, 18, 702–706.
- Nor Hazurina, O., Abu Bakar, B.H., Megat Johari, M.A. and Mat Don, M. (2013). Potential Use of Cockle (*Anadara granosa*) Shell Ash as Partial Cement Replacement in Concrete. *Caspian Journal of Applied Sciences Research*, 2, 369-376.
- Ong, H.C., Masjuki, H.H., Mahila, T.M.I., Silitonga, A.S., Chong W.T. and Yusaf, T. (2014). Engine Performance and Emissions Using *Jatropha Curcas*, *Ceiba Pentandra* and *Calophyllum Inophyllum* Biodiesel in a CI Diesel Engine. *Energy*, 1-19.
- Putra, M.D., Irawan, C., Udiantoro, Ristianingsih, Y. and Nata, I.F. (2018). A Cleaner Process for Biodiesel Production from Waste Cooking Oil Using Waste Materials as a Heterogeneous Catalyst and Its Kinetic Study. *Journal of Cleaner Production*, 195, 1,249-1,258.

- Sahar, Sana, S., Iqbal, J., Ullah, I., Bhatti, H.N., Nouren, S., Habib-ur-Rehman, Nisar, J. and Iqbal, M., (2018). Biodiesel Production from Waste Cooking Oil: An Efficient Technique to Convert Waste into Biodiesel. *Sustainable Cities and Society*, 41, 220-226.
- Saputra, E., Nugraha, M.W., Helwani, Z., Olivia, M. and Wang, S. (2018). Synthesis of Geopolymer from Rice Husk Ash for Biodiesel Production of *Calophyllum Inophyllum* Seed Oil. *Materials Science and Engineering*, 345, 1-4.
- Singh, B., Bux, F. and Sharma, Y.C. (2011). Comparison of Homogeneous and Heterogeneous Catalysis for Synthesis of Biodiesel from *Madhuca Indica* Oil. *Chemistry Industry & Chemical Engineering Quarterly*, 17 (17), 117-124.
- Singharun, P. and Nirunsin, R. (2017). Biodiesel Production from Used Cooking Oil Using Biomass Ash as Catalyst. *The 13<sup>th</sup> International Conference on Ecomaterials 2017 (ICEM13)*, 12-18.
- Sompech, S., Dasri, T. and Thaomola, S. (2016). Preparation and Characterization of Amorphous Silica and Calcium Oxide from Agricultural Wastes. *Oriental Journal of Chemistry*, 32 (4), 1,923-1,928.
- Syed Aalam, C. (2019). Reduction of Emissions from Common-rail Diesel Engine using Mahua and Pongamia Methyl Esters. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)*, 6 (4), 268-277.
- Talha, N.S. and Sulaiman, S. (2016). Overview of Catalysts in Biodiesel Production. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11 (1), 439-448.
- Thiangtrong, A. (2015). *Preparation of Calcium Oxide Supported Rice Husk Silica as Catalyst for Biodiesel Production*. Thesis submitted for the Degree of Master of Science Program in Petrochemistry and Polymer Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University.
- Tshizanga, N. (2015). *A Study of Biodiesel Production from Waste Vegetable Oil Using Eggshell Ash as a Heterogeneous Catalyst*. Thesis submitted for master degree. Master of Technology, Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Cape Peninsula University of Technology.
- Uprety, B.K., Chaiwong, W., Ewelike, C. and Rakshit, S.K. (2016). Biodiesel Production Using Heterogeneous Catalysts Including Wood Ash and the Importance of

- Enhancing Byproduct Glycerol Purity. *Energy Conversion and Management*, 115, 191–199.
- Venkata, R.P. and Subramanyam, R. (2016). Evaluation of The Deleterious Health Effects of Consumption of Repeatedly Heated Vegetable Oil. *Toxicology Reports*, 3, 636–643.
- Verma P. and Sharma M.P. (2016). Review of Process Parameters for Biodiesel Production from Different Feedstocks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1,063-1,071.
- Vinukumar, K., Azhagurajan, A. and Karthick Stephen V. (2016). Synthesis of Rice Husk Nano-Particles for Biodiesel Production. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, 9 (4), 2,671-2,673.
- Wadood, T.M. and Marwa F.A. (2015). Comparison between Homogeneous and Heterogeneous Esterification Reactions for Biodiesel Production using Reactive Distillation. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 5 (5), 3,439-3,447.
- Waidee, T. (2019). *Optimization of Biodiesel Production from Castor Plant Oil for Using in Agricultural Diesel Engine*. Thesis submitted for Master Degree of Engineering in Renewable Energy Engineering, School of Renewable Energy, Maejo University, Thailand.
- Watthanachai, C., Ngamcharussrivichai, C. and Pengprecha, S. (2019). Synthesis and Characterization of Bimodal Mesoporous Silica Derived from Rice Husk Ash. *Engineering Journal*, 23 (1), 25-34.
- Wei, H., Shaokun, T., Hua, Z. and Songjiang, T. (2013). Activation of Commercial CaO for Biodiesel Production from Rapeseed Oil Using a Novel Deep Eutectic Solvent. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52, 11,943-11,947.
- Widayat, Satriadi, H., Syaiful, Khaibar, A. and Almakhi, M.M. (2017). Biodiesel Production by Using Heterogeneous Catalyst from Fly Ash and Limestone. *International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA)*, 41-44.

- Yasar, F. (2019). Biodiesel Production via Waste Eggshell as a Low-Cost Heterogeneous Catalyst: Its Effects on Some Critical Fuel Properties and Comparison with CaO. *Fuel*, 255, 1-6.
- Yen-Ping, P., Kassian, T.T.A., Chin-E, C., Syu-Ruei, J., Feng-Chih. C. and Yuan-Chung, L. (2018). Optimization of Biodiesel Production from Waste Cooking Oil Using Waste Eggshell as a Base Catalyst under a Microwave Heating System. *Catalysts*, 8 (81), 1-16.
- Young, W.C. and Sung, H.Y. (2019). Fabrication of a Solid Catalyst Using Coal Fly Ash and Its Utilization for Producing Biodiesel. *Environmental Engineering Research*, 24 (2), 324-330.
- Youssef, H.L.H., Fetni, S., Boubahri, C., Said, R. and Lassoued, I. (2019). An Experimental Study of Optimization of Biodiesel Synthesis from Waste Cooking Oil and Effect of the Combustion Duration on Engine Performance. *International Journal of Renewable Energy Research*, 9 (1), 1-9.





ภาคผนวก





**adiCET**



## **The 1<sup>st</sup> International Conference on Smart Community Development in the Asia Pacific (iSCAP2020)**

**February 21<sup>st</sup>, 2020**

**Asian Development College for Community Economy and Technology (adiCET)  
Chiang Mai Rajabhat University, Chiang Mai, Thailand**





## Comparison of Biodiesel Synthesis via Transesterification by Using Homogeneous and Heterogeneous Catalyst

Ying Chusree<sup>1</sup>, Pakamon Pintana<sup>1</sup>, Ratchadaporn Puntharod<sup>2</sup>, and Rotjapun Nirunsin<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai, Thailand

<sup>2</sup>Faculty of Science, Maejo University, Chiang Mai, Thailand

\*rotjapun@gmail.com

**Abstract:** The aim of this research was to compare biodiesel production from waste cooking oil by using homogeneous and heterogeneous catalysts. The homogeneous catalyst was potassium hydroxide (KOH) which was commonly used to make biodiesel through transesterification process. Heterogeneous catalysts on this work used calcium oxide from Commercial Calcium Oxide (CCO) and Natural Calcium Oxide (NCO) that derived from waste shells of mollusk named River Snail (*Filopaludina martensi*) through calcination process at 900 °C for 4 h. Transesterifications of Waste Cooking Oil (WCO) were carried out in laboratory scale with the concentration of catalysts (KOH, CCO and NCO) at 1-3%wt, 3:1-9:1 of methanol to oil molar ratio, reaction temperature at 60-65 °C, reaction time for 1 h and 300-500 rpm of magnetic stirrer. The results showed the optimal conditions of biodiesel productions by using KOH, CCO and NCO were 1%wt of catalyst concentration and MeOH/Oil molar ratio at 3:1. Biodiesel yields were 94.05, 94.79 and 94.75%, respectively. In addition, properties of obtained biodiesel were qualified according to Thailand's biodiesel quality standard that issued by the Department of Energy Business, Ministry of Energy, Thailand.

**Keywords:** Biodiesel, Transesterification, Waste cooking oil, Heterogeneous catalyst, Homogeneous catalyst



## 1 INTRODUCTION

Currently, the world's fuel demand is increasing whilst in fact, 85% of the world's energy is still supplied by fossil fuels (Hadiyanto et al., 2016). Therefore, searching renewable energy sources are heavily invested to replace the fuels. As an alternative solution, biodiesel has become an attractive option since it has low emissions (Lani et al., 2017), nontoxic and biodegradable (Che et al. 2018). The green-diesel can be produced from vegetable oils, animal fats and even from waste cooking oil (WCO), whereby triglycerides react with alcohol (mostly use methanol) in the presence of a catalyst (Lani et al., 2017) through transesterification method as in Figure 1.



Figure 1: Transesterification reaction.

The production is catalyzed by using an either homogeneous or heterogeneous catalyst which sodium hydroxide (NaOH) and potassium hydroxide (KOH) have been extensively used in the industry because they usually produce biodiesel at high reaction rate owing to their high catalytic activity. Moreover, their prices are relatively cheap (Young and Sung, 2019). However, solubility in the reaction of the basic catalysts lead to the formation of soap or saponification that causes reduction of biodiesel yield (Uprety et al., 2016) as well as using these catalysts bring about to wastewater problem forasmuch it needs to be removed by water washing after the reaction complete. Hence, to avoid those disadvantages, one of the most frequent development is using of heterogeneous catalyst in the biodiesel production since it is easy and cheap for separation and regeneration (Widayat et al., 2017).

Overall, basic heterogeneous catalysts are preferred because they have higher catalytic activity than acidic ones (Moradi et al., 2015) and calcium oxide (CaO) is achieved the most attention among the others by virtue of its production that can be generated from calcium carbonate (CaCO<sub>3</sub>) decomposition by calcination

process of inexpensive or waste resources, such as eggshells, mollusk shells, animal bones or wood ashes. For mollusk shells, their main composition is 95-98% of CaCO<sub>3</sub> and the use of them as catalyst in biodiesel production has been investigated, the result showed that shell-based catalysts are very effective for biodiesel production (Hadiyanto et al., 2016).

In this present work, it was aimed to synthesize a low cost and highly efficient catalyst from natural or waste sources derived from river snail (*Filopaludina martensi*) shells which are found in several parts of Thailand. The synthesized catalyst was obtained through the calcination process and then it was used for the transesterification of waste cooking oil with methanol. Moreover, the produced biodiesels were compared with biodiesel production by using KOH and CaO as a catalyst. The effects of catalyst loading and methanol to oil molar ratio were studied. Likewise, properties of obtained biodiesels were also systematically determined.

## 2 MATERIALS AND METHODS

### 2.1 Materials

In this work, waste cooking oil, river snail (*Filopaludina martensi*) shells as Figure 2, calcium oxide (CaO) 90.0%, potassium hydroxide 85.0% and methyl alcohol (methanol) 99.9% were used as raw materials. WCO was obtained from Chedi Mae Kruea agricultural group (Chiang Mai, Thailand) that using Morakot olein palm oil for deep-frying potato chips (Their properties about acid value, density and heat of combustion were analyzed by using ASTM D664, ASTM D1298 and ASTM D4809 standard, respectively). The shells were collected from Number One farm (Pathum Thani, Thailand) and other chemicals are analytical grade purchased from Union Science, Thailand.



Figure 2: (a) River snail shells and (b-d) calcined river snail shell ash.



## 2.2 Catalyst preparation

On this work, biodiesel was produced from 3 different catalysts, the first was potassium hydroxide which is a homogeneous base catalyst that has been popularly used in biodiesel production through transesterification. Therefore, to compare biodiesel production by using heterogeneous catalysts, KOH was used in this study in the form of reference catalytic reaction. In an important way, because of this work aimed to synthesize naturally heterogeneous catalyst derived from the river snail shells which their main chemical composition is  $\text{CaCO}_3$  that need to be changed into CaO by calcination process as Equation 1 before using it as a catalyst in the biodiesel production. Accordingly, the second catalyst was commercial calcium oxide (CCO) for comparison the obtained biodiesels using the catalyst in CaO form between commercial and natural resources.



The third was natural calcium oxide (NCO) that prepared from river snail shells by the following method. The shells were removed impurities by rinsing with deionized water several times in the first step and then were dried by using the heat of sunlight for 12 h. After that, the dried objects were pounded into smaller pieces. To decompose calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) of the shells into CaO form, they were calcined at 900 °C for 4 h in a muffle furnace (From the study of Kaewdang and Nirunsin, the chemical composition of calcined river snail shell at 900 °C for 4 h were showed percentage of CaO, MgO and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{SiO}_2$  at 78.881%, 0.329% and 0.162%, respectively.) (Kaewdang and Nirunsin, 2017)). After that, the calcined river snail shell was crushed and ground into fine powder by using a mortar and pestle, then sieve them through a stainless-steel wire mesh. Lastly, the ash catalyst was kept in a desiccator to prevent catalytic deterioration.

## 2.3 Biodiesel production

Biodiesel on this research was produced through the transesterification process. The first step before generating biodiesel, WCO was pretreated to eliminate contamination and moisture by filtration and heating, respectively. After that, it was measured Free Fatty Acid (FFA) percentage to make sure it could be used in this

biodiesel production process (It should be having %FFA lesser than 2%). Transesterification of WCO was carried out in laboratory scale which using 200 g of WCO with catalyst (KOH, CCO and NCO) concentration at 1, 2 and 3%wt, 3:1, 6:1 and 9:1 of methanol to oil molar ratio (MeOH/oil molar ratio), reaction time for 1 h and reaction temperature at 60-65 °C with 300-500 rpm of magnetic stirrer. After reaction completed, biodiesel, glycerol and solid catalyst phase were separated by using a separating funnel. Then invented biodiesels were analyzed yield percentage by Equation 2. Likewise, properties of obtained biodiesels such as pH, acid value (ASTM D664), density (ASTM D1298) and heat of combustion (ASTM D4809) were also systematically determined.

$$\text{Biodiesel Yield (\%)} = \frac{\text{Weight of Biodiesel (g)}}{\text{Weight of WCO (g)}} \times 100\% \quad (2)$$

## 3 RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1 Properties of Waste Cooking Oil

Waste cooking oil from deep frying potato chips that used in this work showed %FFA lesser than 2% (0.569%) that meant it could be used in this transesterification without passing deacidification by esterification process. And the other properties of WCO in Table 1 showed 6 of pH, density at 920  $\text{kg/m}^3$ , acid value at 1.148 mg KOH/g oil and 34.64 MJ/kg of high heating value.

Table 1: Properties of waste cooking oil.

Property	FFA (%)	pH	Density ( $\text{kg/m}^3$ )	Acid value (mg KOH/g oil)	High heating value (MJ/kg)
Value	0.569	6	920	1.148	34.64

### 3.2 Effect of Potassium Hydroxide

Potassium hydroxide is a homogeneous base catalyst which is a famous one that is extensively used in biodiesel production industry as well as sodium hydroxide for a long time due to it gives high catalytic activity. In this research, it was used for referential comparison of the results of biodiesel production with the heterogeneous base catalysts.

Effect of using methanol to oil molar ratio and KOH dosage in biodiesel production



from this WCO showed the data as Figure 2 (A) and (B) that were a graph of the relationship between biodiesel yield and methanol to oil molar ratio, and a graph of relationship between biodiesel yield and KOH concentration, respectively. From that data, it exhibited the best conditions of this biodiesel production were using 1%wt of KOH concentration and MeOH/Oil molar ratio at 3:1 since they did the highest biodiesel yield at 94.05%. Moreover, the figure showed using more MeOH/Oil molar ratio (3:1, 6:1 and 9:1) and the amount of KOH from 1-3%wt affected the declining trend in biodiesel yield as the study of Wadood and Marwa (2015) and Sahar et al. (2018). Excessive methanol usage unnecessary rise in cost of the process because alcohol recovery becomes difficult (MeOH/Oil molar ratios that usually lead to maximum yield were in the range of 6:1 to 9:1 (Verma et al., 2016).) and using too much KOH will cause of yield reduction as it bring more saponification or soap formation.

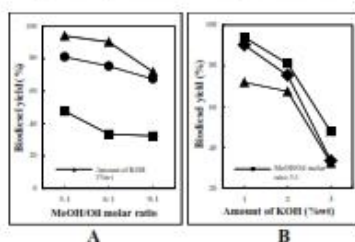


Figure 2: A relational graph of biodiesel yield based on A) Methanol to oil molar ratio and B) Amount of KOH catalyst.

### 3.3 Effect of Commercial Calcium Oxide

Calcium oxide is the most attentional catalyst on heterogeneous alkaline catalysis systems forasmuch it has higher catalytic activity than acidic ones. In addition, it can be generated from calcium carbonate resources by calcination process for decomposition of  $\text{CaCO}_3$  to  $\text{CaO}$  form. Thus, to ensure studying of feasibility on this biodiesel production by using the naturally synthesized catalyst from river snail shell which is one of the  $\text{CaCO}_3$  resources, CCO was used in this work for representation.

The results of biodiesel production from WCO via CCO catalyst by using reaction conditions, 3:1-9:1 of MeOH/Oil molar ratio and  $\text{CaO}$  loading at 1-3%wt presented in Figure 3 (A)

and (B) that showed the best conditions were catalyst concentration at 2%wt and 3:1 of MeOH/Oil molar ratio because their brought about to 96.69% of biodiesel yield. However, using more methanol loading occurred from 3:1-9:1 ratio led to decreasing of the yield because by-product of glycerol form reacted with excessive methanol and hid reaction of methanol with the catalyst (Widayat et al., 2017). Addition catalyst concentration in the samples also was a result of biodiesel yield reduction with the same reason for unsuitable KOH usage.

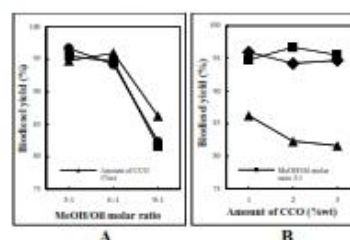


Figure 3: A relational graph of biodiesel yield based on A) Methanol to oil molar ratio and B) Amount of CCO catalyst.

### 3.4 Effect of Calcined River Snail Shell

Molar ratio of methanol to WCO (3:1, 6:1 and 9:1) and amount of the natural catalyst (NCO) from 1-3%wt in biodiesel production with biodiesel yield were exhibited in Figure 4 (A) and (B). From that data, they showed the best yield was 99.27% by using NCO concentration at 2%wt and 3:1 of the MeOH/Oil molar ratio. Moreover, these graphs showed biodiesel yield was in the same trend of Birla et al. (2012) studying (Biodiesel from waste frying oil using a heterogeneous catalyst derived from snail shell), Young and Sung (2019) research (Fabrication of a solid catalyst using coal fly ash and its utilization for producing biodiesel) and the biodiesel production via CCO in this work.

Transesterification using both of CCO and NCO had the best yield when using 3:1 of the MeOH/Oil molar ratio. In the same way, Singharun and Nirunsin (2017) found their synthesized  $\text{CaO}$  catalysts from natural waste resources gave the highest yield at 98.57% (Calcined coconut ash) and 95.32% (Calcined longan ash) of biodiesel generation from used



cooking oil. Widayat et al (2017) reported their biodiesel production by using CaO derived from calcined limestone could obtain maximum at ratio of methanol to oil 9:1. Moreover, Kaewdang and Nirunsin (2017) found using calcined river snail shells (900 °C for 4 h) in biodiesel production from used cooking oil could give the highest yield at 94.86% by using 6:1 of MeOH/Oil molar ratio, 2%wt of the catalyst, 60-65 °C of reaction temperature and 3 h of reaction time. So, this research was better than previous research, because it could save more methanol as a reactant.

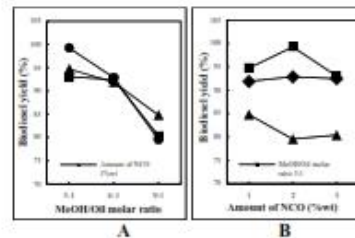


Figure 4: A relational graph of biodiesel yield based on A) Methanol to oil molar ratio and B) Amount of NCO catalyst.

### 3.5 Overall Image of Biodiesel Production

For discussion of feasibility to bring NCO as a catalyst in biodiesel production, the overall image of yield relationship between catalyst dosage and methanol to oil molar ratio were shown at Figure 5 and Figure 6 that consisted of biodiesel yield graphs on 3 different catalysts, KOH, CCO and NCO, respectively. They indicated taking the heterogeneous catalysts for this biodiesel generation from the waste cooking oil were possible and effective because they provided a rather high yield. In addition, all data of 3 catalysts had identical trends.

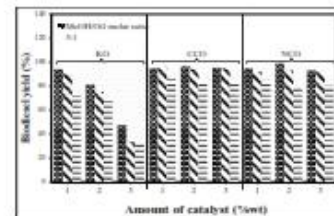


Figure 5: A graph of biodiesel yield relationship between each of catalyst dosages.

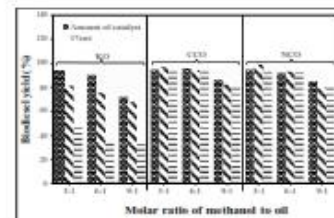


Figure 6: A graph of biodiesel yield depended on methanol to oil molar ratio condition in each type of catalysts.

### 3.6 Properties of biodiesel

The obtained biodiesel from the transesterification process that accelerated by using 2 types of catalysts (KOH for homogeneous, CCO and NCO for heterogeneous catalysis) were analyzed physical properties as Table 2 that included pH and others by following ASTM standards, ASTM D664 for acid value and ASTM D4809 for density.

Table 2: Properties of biodiesel.

Type of catalyst	Molar ratio of methanol to oil	Amount of catalyst (%wt)	pH value	Acid value (mg KOH/g oil)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	
KOH	3:1	1	6	0.337	875	
		2	6	0.222	870	
		3	7	0.447	870	
	6:1	1	7	0.328	870	
		2	6	0.224	875	
		3	7	0.776	870	
	9:1	1	7	0.331	875	
		2	7	0.332	875	
		3	7	0.331	870	
	CCO	3:1	1	7	0.444	870
			2	7	0.404	880
		6:1	1	7	0.410	875
2			6	0.272	880	
9:1		2	6	0.212	875	
		3	6	0.165	875	



Type of catalyst	Molar ratio of methanol to oil	Amount of catalyst (1 (%wt))	pH value	Acid value (mg KOH/g oil)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	
KOH	0:1	1	6	0.429	900	
		2	6	0.320	880	
		3	6	0.471	900	
	3:1	1	6	0.366	900	
		2	6	0.447	900	
		3	6	0.422	900	
	NCO	0:1	1	6	0.315	900
			2	6	0.217	890
			3	6	0.425	900
0:1		1	6	0.385	890	
		2	6	0.217	890	
		3	6	0.356	890	

Using KOH gave 6-7 of pH, acid value at 0.222-0.776 mg KOH/g of sample and 870-875 kg/m<sup>3</sup> of density. For addition heterogeneous catalyst to avoid using chemical homogeneous into the reaction, CCO let biodiesel which had their merits about pH at 6-7, acid value at 0.165-0.444 mg KOH/g oil and 870-900 kg/m<sup>3</sup> of density. Besides, NCO provided 6 of pH, acid value at 0.217-0.447 mg KOH/g of sample and 890-900 kg/m<sup>3</sup> of density. By their properties consideration, the density and acid values of almost biodiesel obtained from all operating parameters were found values in the range of 860-900 kg/m<sup>3</sup> (similar to the study of Yasar, F., 2019) and not over than 0.5 mg KOH/g of oil, which were within the accepted limits of the standards.

Although achieved biodiesel from using KOH could reach better values of the properties than using CCO and NCO as a catalyst, biodiesel in the separation step need to be washed by water to get rid of the basic catalyst that why it produces more wastewater from the purification. In contrast, the heterogeneous catalytic processes provided more simple purification and using this catalyst type from the natural source could be made effective low-cost biodiesel producing process. Therefore, using NCO as a catalyst was possible in biodiesel production with it gave accepted values of the properties.

For investigation of the optimal conditions of biodiesel production on this work. The productive parameters were selected for measurement more property about the heat of combustion. Therefore, 3:1 of methanol to oil molar ratio in the different dosages of 3 catalysts (KOH, CCO and NCO) from 1-3%wt with reaction time for 1 h, reaction temperature at 60-65 °C and 300-500 rpm of magnetic stirrer were chosen because biodiesel production by using KOH, CCO and NCO could reach the highest

yields at 3:1 of MeOH/Oil molar ratio. Table 3 exhibited biodiesel from KOH still had the optimal conditions at 3:1 of MeOH/Oil molar ratio and 1%wt of catalyst concentration as they gave the highest yield which properties within the accepted limits of the standards.

Table 3: Properties of biodiesel based on using 3:1 MeOH/Oil molar ratio.

Type of catalyst	Amount of catalyst (1 (%wt))	Biodiesel yield (%)	Acid value (mg KOH/g oil)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	High heating value (MJ/kg)
KOH	1	94.05	0.537	875	39.82
	2	91.69	0.222	870	39.96
	3	47.61	0.447	870	40.11
CCO	1	94.79	0.444	870	40.76
	2	96.69	0.404	880	37.50
	3	95.51	0.410	875	36.91
NCO	1	94.75	0.266	900	40.96
	2	93.27	0.447	900	41.09
	3	93.05	0.422	900	37.85

Even though 2%wt of catalyst concentration with 3:1 of MeOH/Oil molar ratio could lead the production to the highest yield of biodiesel when using CCO and NCO as the catalyst, but considering the properties of biodiesel found the optimal conditions of two heterogeneous catalysts were selected at 1%wt of catalyst concentration and 3:1 of MeOH/Oil molar ratio because of they achieved biodiesel which had better properties than using 2%wt of catalyst dosage.

#### 4 CONCLUSIONS

Our present study revealed that heterogeneous catalyst (CCO and NCO) could make good biodiesel because their results showed similar characteristics of properties to homogeneous catalyst (KOH). The optimum parameters of biodiesel production by using 3 catalysts had the same conditions, 3:1 molar ratio of methanol to oil, 1wt% of catalyst concentration, 60-65 °C reaction temperature and 300-500 rpm with reaction time for 1 h. Biodiesel yields were 94.05, 94.79 and 94.75%, respectively. In addition, the properties of obtained biodiesels were qualified according to Thailand's biodiesel quality standard that issued by the Department of Energy Business, Ministry of Energy, Thailand.

Although achieved biodiesel from using KOH could reach better values of the properties than using CCO and NCO as the catalyst, biodiesel in the separation step need to be washed by water to get rid of the basic catalyst that why it produces more wastewater from purification. In



contrast, the heterogeneous catalytic processes provided more simple purification and using this catalyst type from the natural source could be made effective low-cost biodiesel producing process. Therefore, using NCO as the catalyst was possible in biodiesel production with it gave accepted values of the properties.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

The authors profoundly thank and acknowledge for master program study scholarship and support from the School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai, Thailand. And very thank you for sponsor and support from National Research Council of Thailand.

#### REFERENCES

- Birla, A., Singh, B., Upadhyay, S.N. and Sharma, Y.C., 2012. Kinetics studies of synthesis of biodiesel from waste frying oil using a heterogeneous catalyst derived from snail shell. *Bioresour. Technology*, 106, 95-100.
- Che, Z., Lingmei, Y., Shiyu, X., Wen, L., Zhongming, W. And Pengmei, L., 2018. Biodiesel production by a highly effective renewable catalyst from pyrolytic rice husk. *Journal of Cleaner Production*, 199, 772-780.
- Hadiyanto, H., Lestari, S.P. and Widayat, W., 2016. Preparation and Characterization of *Anadara Granosa* Shells and CaCO<sub>3</sub> as Heterogenous Catalyst for Biodiesel Production. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 11 (1), 21-26.
- Kaewdang, S. And Nirunsin, R., 2017. Synthesis of Calcium Oxide from River Snail Shell to a Catalyst in the Production of Biodiesel. *The 4<sup>th</sup> Environment Asia International Conference*, 247-255.
- Lani, N.S., Ngadi, N. and Taib, M.R., 2017. Parametric Study on the Transesterification Reaction by Using CaO/Silica Catalyst. *Chemical Engineering Transactions*, 56, 601-606.
- Moradi, G.R., Mohadesi, M., Ghanbari, M., Moradi, M.J., Hosseini, Sh. And Davoodbeygi, Y., 2015. Kinetic comparison of two basic heterogenous catalysts obtained from sustainable resources for transesterification of waste cooking oil. *Biofuel Research Journal*, 6, 236-241.
- Sahar, Sadaf, S., Iqbal, J., Ullah, I., Bhatti, H.N., Nouren, S., Rehman, H., Nisar, J. and Iqbal, M., 2018. Biodiesel production from waste cooking oil: An efficient technique to convert waste into biodiesel. *Sustainable Cities and Society*, 41, 220-226.
- Singharun, P. and Nirunsin, R. (2017). Biodiesel production from used cooking oil using biomass ash as catalyst. *The 13<sup>th</sup> International Conference on Ecomaterials 2017 (ICEM13)*, 12-18.
- Uprety, B.K., Chaiwong, W., Ewelike, C. and Rakshit, S.K., 2016. Biodiesel production using heterogeneous catalysts including wood ash and the importance of enhancing byproduct glycerol purity. *Energy Conversion and Management*, 115, 191-199.
- Verma, P., Sharma, M.P., Dwivedi, G., 2016. Impact of alcohol on biodiesel production and properties. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 319-333.
- Wadood, T.M. and Marwa F.A.J., 2015. Comparison between Homogeneous and Heterogeneous Esterification Reactions for Biodiesel Production using Reactive Distillation. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 5 (5), 3439-3447.
- Widayat, Satriadi, H., Syaiful, Khaibar, A. and Al makhi, M.M., 2017. Biodiesel Production by Using Heterogenous Catalyst from Fly Ash and Limestone. *2017 International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA)*, 41-44.
- Widayat, W., Darmawan, T., Rosyid, R.A. and Hadiyanto, H., 2017. Biodiesel Production by Using CaO Catalyst and Ultrasonic Assisted. *International Conference on Energy Sciences (ICES 2016)*, 877, 1-8.
- Yasar, F., 2019. Biodiesel production via waste eggshell as a low-cost heterogeneous catalyst: Its effects on some critical fuel properties and comparison with CaO. *Fuel*, 255, 1-6.
- Young, W.G. and Sung, H.Y., 2019. Fabrication of a solid catalyst using coal fly ash and its utilization for producing biodiesel. *Environmental Engineering Research*, 24 (2), 324-330.



ภาคผนวก ข  
ประวัติผู้วิจัย

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาวหญิง ชูศรี
เกิดเมื่อ	24 กุมภาพันธ์ 2537
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2560 ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ (เกียรตินิยมอันดับ 1) พ.ศ. 2556 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนมัธยมศึกษา
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2560 นักศึกษาฝึกประสบการณ์ องค์กร Solar Energy Research Institute (SERI) ของ National University of Malaysia ประเทศมาเลเซีย

