

การผลิตไบโอดีเซลจากตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเถ้าชีวมวล
สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก



พัชยาภรณ์ สิงห์ธัญญ์

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2561

การผลิตไบโอดีเซลจากตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเถ้าชีวมวล
สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก



พัชยาภรณ์ สิงห์บุญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การผลิตไบโอดีเซลจากตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเถ้าชีวมวล
สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก

พัชยาภรณ์ สิงห์ธัญญ์

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(อาจารย์ ดร.รจพรรณ นิรัฐศิลป์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อักรินทร์ อินทนิเวศน์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชดาภรณ์ ปิ่นทฤษฎ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร.ปริญ คงกระพันธ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ ไชยชนะ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ เม่งอำพัน)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ชื่อเรื่อง	การผลิตไบโอดีเซลจากตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเถ้าชีวมวล สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก
ชื่อผู้เขียน	นางสาวพัชยาภรณ์ สิงห์บุญ
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	อาจารย์ ดร.รจพรรณ นิรัญศิลป์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากเถ้าชีวมวลมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าชีวมวลที่ใช้ เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ เถ้ากาบมะพร้าว เถ้าไม้ลำไย และเถ้ากลบข้าว ที่โดยเตรียมตัวเร่งด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300, 600 และ 900 °C เป็นเวลา 4 hr และศึกษาสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และสเปกโตรมิเตอร์เอ็กซ์เรย์แบบกระจายพลังงาน (EDS) จากการศึกษาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้ากาบมะพร้าวและเถ้าไม้ลำไยนั้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการให้ความร้อนซ้ำ พบว่าปริมาณคาร์บอนในองค์ประกอบเถ้าลดลงในขณะที่ปริมาณออกซิเจน และแคลเซียมเพิ่มขึ้น สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้ากลบข้าวพบว่า มีซิลิกอนเป็นองค์ประกอบที่แตกต่างและมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามลำดับเมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้น สำหรับการกระจายตัวของทั้งเถ้าสามชนิด พบว่ามีรูปแบบใกล้เคียงกัน โดยอนุภาคของเถ้าจะจับตัวเป็นกลุ่มก้อนในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ และอนุภาคจะมีกระจายตัวได้ดียิ่งขึ้นในการให้ความร้อนซ้ำ อุณหภูมิที่สูงขึ้นตามลำดับ งานวิจัยนี้ศึกษาที่เงื่อนไขของการทดลองของตัวเร่งปฏิกิริยาทุกชนิด ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1-3%wt อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1, 6:1, 9:1 และ 12:1 อุณหภูมิปฏิกิริยาที่ 60 °C เป็นเวลา 1 hr ผลการทดลองพบว่าการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้ากลบข้าวให้ผลผลิตที่ต่ำมากและไม่เพียงพอในการทดสอบคุณสมบัติ การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้ากาบมะพร้าว และเถ้าไม้ลำไยที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 °C อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1 ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt เป็นเงื่อนไขให้ผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุด คือ 98.57% และ 95.32% ตามลำดับ และเหมาะสมในการศึกษาเพื่อผลิตน้ำมันไบโอดีเซลสำหรับใช้ทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก การวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซล พบว่าไบโอดีเซลที่ได้จากเงื่อนไขที่ดีที่สุดดังกล่าวข้างต้นมีคุณสมบัติเป็นไปตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน คือ ค่าความเป็นกรดตามมาตรฐาน ASTM D2896, ค่าความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM D1298, ค่าความหนืดตามมาตรฐาน ASTM D445, จุดวาบไฟมาตรฐาน ASTM D93, ค่าความร้อนตาม

มาตรฐาน ASTM D4809 และปริมาณเมทิลเอสเทอร์ตามมาตรฐาน EN 14103 โดยผลการทดสอบคุณสมบัติของไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้ากาบมะพร้าว มีค่าเท่ากับ 0.43 mg KOH/g, 870 kg/m³, 4.20 cSt, 190 °C, 42,646 kJ/kg มี และ 97% ตามลำดับ จากการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าไม้ลำไย มีค่าเท่ากับ 0.50 mg KOH/g, 875 kg/m³, 4.50 cSt, 186 °C, 42,556 kJ/kg และ 96.5% ตามลำดับ จากการวิเคราะห์การใช้ไบโอดีเซลกับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กโดยทำการศึกษาด้านสมรรถนะของเครื่องยนต์ พบว่า ไบโอดีเซลที่ผลิตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้ากาบมะพร้าว มีค่าแรงบิด และกำลังเบรก เท่ากับ 19.38 N-m และ 56 kW ตามลำดับ และไบโอดีเซลที่ผลิตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าไม้ลำไย มีค่ามีค่าแรงบิด และกำลังเบรกเท่ากับ 19.40 N-m, 3.45 kW ตามลำดับ และทำการวิเคราะห์ด้านความสิ้นเปลืองพลังงาน ได้แก่ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูงสุด และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะสูงสุด พบว่าไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้ากาบมะพร้าว มีค่าเท่ากับ 0.043 cc/s และ 0.00068 kg/kWh ตามลำดับ สำหรับไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าไม้ลำไย มีค่า 0.041 cc/s และ 0.00074 kg/kWh ตามลำดับ

คำสำคัญ : ไบโอดีเซล เถ้าชีวมวล ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก

Title	BIODIESEL PRODUCTION USING BIOMASS ASH AS CATALYST FOR SMALL DIESEL ENGINE
Author	Miss Patchayaporn Singharun
Degree	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
Advisory Committee Chairperson	Dr. Rotjapun Nirunsin

ABSTRACT

The objective of this research was to study the utilization of biomass ash catalyst in the biodiesel production via transesterification reaction of used cooking oil. The biomass ash catalysts in this study were agricultural waste ash, namely coconut, longan and rice husk ash. The catalysts were prepared by calcination at 300, 600 and 900 °C for 4 hr. After which their properties were studied using scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive X-ray spectrometry (EDS) The study found that the catalyst from coconut and longan ash exhibited a decrease of carbon content by increasing calcination temperature whereas oxygen and calcium content increased. As for the catalyst from rice husk ash, it was found that different silicon component were produced corresponding to the increasing of calcination temperature. All catalysts prepared at low calcination temperature were agglomerated together while catalysts prepared at the high calcination temperature were noticeably distributed. This research studied catalysts quantity of 1-3%wt, methanol/oil molar ratios of 3:1 6:1, 9:1 and 12:1. The reaction was done at 60 °C for 1 hr. The results showed biodiesel production using rice husk ash as catalyst exhibited low percentage yield and not enough information for properties assessment. Biodiesel product using calcined coconut ash and calcined longan ash using catalysts calcined at 900 °C showed maximum low percentage yield of 98.57% and 95.32%, respectively. The catalyst amount was 1%wt and molar ratio of methanol per oil was 3:1. Biodiesel in these conditions were suitable for biodiesel production for small diesel engine application. The characterization of biodiesel from

experiments were qualified according to the standard announced by the department of energy business, Ministry of Energy. Total acid (ASTM D2896), density (ASTM D1298), viscosity (ASTM D445), flash point (ASTM D93), heat of combustion (ASTM D4809) and methyl esters (EN 14103) were studied. The properties of the best biodiesel product using calcined coconut ash as catalyst were 0.43 mg KOH/g, 870 kg/m³, 4.20 cSt, 190 °C 42,646 kJ/kg and 97%, respectively. Properties of the best biodiesel product using calcined longan ash as catalyst were 0.50 mg KOH/g, 875 kg/m³, 4.50 cSt, 186 °C, 42,556 kJ/kg and 96.5%, respectively. The evaluation of biodiesel application in diesel engines was performance testing. It was found that biodiesel produced by coconut ash showed torque and horsepower of 19.38 N-m and 56 kW, respectively. Biodiesel produced by longan ash showed torque and horsepower of 19.40 N-m and 3.45 kW, respectively. In addition, fuel consumption and specificity fuel consumption using biodiesel from coconut ash was found to be 0.043 cc/s and 0.00068 kg/kWh, respectively. Fuel consumption and specificity fuel consumption using biodiesel from longan ash was found to be 0.041 cc/s and 0.00074 kg/kWh, respectively.

Keyword : Biodiesel, Biomass ash, Tranesterification, Small diesel engine

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากการสนับสนุน และได้รับความร่วมมือเป็นอย่างดีจากบุคคลหลายๆ ท่านดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.รจพรธม นิรัฐศิลป์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก พร้อมกับ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อักรินทร์ อินทนิเวศน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชดาภรณ์ ปันทะรส และ อาจารย์ ดร.ปริญ คงกระพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่กรุณาให้คำปรึกษา คำชี้แนะแนวทางการแก้ปัญหา และให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา อีกทั้งยังช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.หทัยทิพย์ สีนุญา ประธานกรรมการสอบ พร้อมทั้งให้คำปรึกษา และคำแนะนำ ตลอดจนการตรวจเล่มวิทยานิพนธ์ ทำให้เกิดความสำเร็จลุล่วงเป็นไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ สถาบันบริการตรวจสอบคุณภาพและมาตรฐานผลิตภัณฑ์ และศูนย์วิจัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่คอยเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดสอบคุณสมบัติด้านต่างๆ

ขอขอบพระคุณเงินทุนสนับสนุนงานวิจัย วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ภายใต้ “โครงการการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในประเทศอาเซียนสำหรับ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา”

ขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ภายใต้โครงการการพัฒนาพลังงานทดแทนและการประยุกต์ใช้ชุมชนสีเขียว ที่มอบทุนสนับสนุนงานศึกษาวิจัยในครั้งนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดาที่ให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนพี่ๆ เพื่อนๆ และ น้องๆ ทุกคน ที่มีส่วนช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้การทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้สำเร็จไปได้อย่างดี

พัชยาภรณ์ สิงห์รัญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ท
สารบัญตารางภาคผนวก.....	ด
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญ.....	1
วัตถุประสงค์.....	6
ขอบเขตของการวิจัย.....	6
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี.....	8
นิยามและความหมายของไบโอดีเซล.....	8
ประเภทของไบโอดีเซล.....	9
ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน.....	9
น้ำมันทอดซ้ำ.....	10
ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	11
วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่นำมาผลิตเป็นเอ้าท์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	12
ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน.....	14
คุณภาพและมาตรฐานของไบโอดีเซล.....	16

เครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก.....	21
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	31
การเตรียมอุปกรณ์ และสารเคมี.....	31
1. วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา	31
2. อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล	32
3. อุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซล	32
4. เครื่องมือในการทดสอบการใช้ไบโอดีเซลกับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก	33
การเตรียมและการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา	33
การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน.....	34
การวิเคราะห์คุณสมบัติไบโอดีเซล.....	35
1. การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด.....	35
2. การวิเคราะห์ความหนาแน่น.....	37
3. การวิเคราะห์ค่าความหนืด.....	37
4. การวิเคราะห์จุดวาบไฟ.....	38
5. การวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์.....	39
6. การวิเคราะห์ค่าความร้อน.....	39
การทดสอบการใช้ไบโอดีเซลกับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก	40
บทที่ 4 ผลและการอภิปรายผลการทดลอง.....	42
ผลการวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	42
1. ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ	43
2. ผลการวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคและองค์ประกอบธาตุของเถ้า	44
องค์ประกอบธาตุของเถ้ากาบมะพร้าว.....	45
องค์ประกอบธาตุของเถ้าไม้ลำไย.....	47

ผลการวิเคราะห์ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน จากน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าชีวมวล	51
1. ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน และอุณหภูมิการให้ความร้อนของเถ้าชีวมวลที่มีผลต่อผลผลิตของไบโอดีเซล	52
2. ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิการให้ความร้อนของเถ้าชีวมวลที่มีผลต่อผลผลิตไบโอดีเซล	56
3. ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่มีต่อผลผลิตไบโอดีเซล	61
4. ผลของอุณหภูมิการให้ความร้อนที่มีผลต่อผลผลิตไบโอดีเซล	64
5. ผลของชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อผลผลิตไบโอดีเซล	66
ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติไบโอดีเซล	67
1. ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด	67
2. ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่น	71
3. ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืด	75
4. ผลการวิเคราะห์จุดวาบไฟ	79
5. ผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์	83
ผลการวิเคราะห์การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ กับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก	87
1. ผลการทดสอบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก	87
ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่น	87
ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อน	89
2. ผลการทดสอบด้านสมรรถนะของเครื่องยนต์	90
3. ผลการทดสอบด้านความสิ้นเปลืองพลังงาน	95
ผลการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ของกระบวนการ	98
1. การวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตทางด้านไฟฟ้า	98
2. การวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตทางด้านวัตถุดิบ	100

3. การวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตทั้งหมด.....	100
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	102
สรุปผลงานวิจัย.....	102
ข้อเสนอแนะ	103
บรรณานุกรม.....	105
ภาคผนวก.....	112
ภาคผนวก ก การคำนวณหาปริมาณเมทานอลที่ต้องการใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน.....	113
ภาคผนวก ข ผลการทดลองทางด้านเครื่องยนต์.....	115
ภาคผนวก ค บทความที่ได้เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ.....	122
ประวัติผู้วิจัย.....	139



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 1 ปริมาณการใช้ดีเซลและน้ำมันเบนซิน.....	2
ตารางที่ 2 การใช้เชื้อเพลิงในภาคขนส่งทางบก.....	2
ตารางที่ 3 เป้าหมายการใช้เอทานอลและไบโอดีเซลภายใต้แผนพลังงานทดแทน	3
ตารางที่ 4 เปรียบเทียบคุณสมบัติของดีเซลและไบโอดีเซลตามมาตรฐาน ASTM.....	4
ตารางที่ 5 ศักยภาพชีวมวลจากไม้ลำไย แกลบข้าว และกากมะพร้าว.....	5
ตารางที่ 6 แสดงองค์ประกอบทางเคมีแ่้ากากมะพร้าว	13
ตารางที่ 7 ปริมาณองค์ประกอบของแ่้าลำไย	13
ตารางที่ 8 ปริมาณองค์ประกอบของแ่้าแกลบข้าว	14
ตารางที่ 9 ข้อกำหนดคุณสมบัติของไบโอดีเซลและวิธีการทดสอบ	20
ตารางที่ 10 ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก All Power รุ่น 186 F.....	22
ตารางที่ 11 องค์ประกอบทางเคมีของแ่้ากากมะพร้าวที่อุณหภูมิการให้ความร้อนต่างๆ	47
ตารางที่ 12 องค์ประกอบทางเคมีของแ่้าไม้ลำไยที่อุณหภูมิการให้ความร้อนต่างๆ.....	49
ตารางที่ 13 องค์ประกอบทางเคมีของแ่้าแกลบข้าวที่อุณหภูมิการให้ความร้อนต่างๆ.....	51
ตารางที่ 14 ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้จากการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน และอุณหภูมิการให้ความร้อนของแ่้าชีวมวลที่มีผลต่อผลผลิตของไบโอดีเซล	52
ตารางที่ 15 ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้จากการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิการให้ความร้อนของแ่้าชีวมวลที่มีผลต่อผลผลิตไบโอดีเซล.....	57
ตารางที่ 16 ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้จากการศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่มีผลต่อผลผลิตไบโอดีเซล.....	61
ตารางที่ 17 ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้จากการศึกษาผลของอุณหภูมิการให้ความร้อนแก่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อผลผลิตไบโอดีเซล.....	64

ตารางที่ 18 ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้จากการศึกษาชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อผลผลิตไบโอดีเซลที่อุณหภูมิการให้ความร้อนแก่ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าชีวมวลที่อุณหภูมิ 900 °C	66
ตารางที่ 19 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซล.....	68
ตารางที่ 20 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นหนาแน่นของไบโอดีเซล.....	72
ตารางที่ 21 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของไบโอดีเซล	76
ตารางที่ 22 ผลการวิเคราะห์ค่าจุดวาบไฟของไบโอดีเซล	80
ตารางที่ 23 ผลการวิเคราะห์ค่าเมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซล.....	84



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 1 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์.....	8
ภาพที่ 2 ปฏิกริยาย่อยระหว่างน้ำมันพืชหรือไขมันกับแอลกอฮอล์.....	10
ภาพที่ 3 ถังไม้ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการให้ความร้อน.....	12
ภาพที่ 4 เครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก All Power รุ่น 186 F.....	22
ภาพที่ 5 วิธีการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว.....	35
ภาพที่ 6 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด.....	36
ภาพที่ 7 การใช้ไฮโกรมิเตอร์วัดความหนาแน่นของน้ำมัน.....	37
ภาพที่ 8 ทำการวิเคราะห์ค่าความหนืด.....	38
ภาพที่ 9 การวิเคราะห์จุดวาบไฟ.....	38
ภาพที่ 10 การวิเคราะห์ค่าความร้อน.....	40
ภาพที่ 11 ลักษณะทางกายภาพของถั่วเขียวมวล (ก.) ถั่วกาบมะพร้าว (ข.) ถั่วไม้ลำไย และ (ค.) ถั่ว กลบข้าวที่อุณหภูมิแคลไซน์ 300, 600 และ 900 °C.....	44
ภาพที่ 12 ลักษณะของถั่วเขียวมวล (ก.) ถั่วกาบมะพร้าว (ข.) ถั่วไม้ลำไย และ(ค.) ถั่วกลบข้าวจาก กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่อุณหภูมิแคลไซน์ 300 °C 600 °C และ 900 °C.....	45
ภาพที่ 13 องค์ประกอบของถั่วจากการวิเคราะห์เทคนิค EDS ของถั่วไม้กลบกาบมะพร้าวที่ อุณหภูมิแคลไซน์ (ก.) 300 °C (ข.) 600 °C และ (ค.) 900 °C.....	46
ภาพที่ 14 องค์ประกอบของถั่วจากการวิเคราะห์เทคนิค EDS ของถั่วไม้ลำไยที่อุณหภูมิแคลไซน์ (ก.) 300 °C (ข.) 600 °C และ (ค.) 900 °C.....	48
ภาพที่ 15 องค์ประกอบของถั่วจากการวิเคราะห์เทคนิค EDS ของถั่วไม้กลบข้าวที่อุณหภูมิ แคลไซน์ (ก.) 300 °C (ข.) 600 °C และ (ค.) 900 °C.....	50
ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์จากการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อไขมัน และอุณหภูมิการให้ ความร้อนของถั่วเขียวมวลที่ได้แก่ (ก.) ถั่วกาบมะพร้าว, (ข.) ถั่วไม้ลำไย และ (ค.) ถั่วกลบข้าว ที่มี ผลต่อผลผลิตไบโอดีเซล.....	53

ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์จากการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิการให้ความร้อนของตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ่านชีวมวล ได้แก่ (ก.) ถ่านบมะพร้าว, (ข.) ถ่านไม้ลำไย และ (ค.) ถ่านกลบข้าว ที่มีผลต่อผลผลิตไบโอดีเซล..... 58

ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์จากการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันของตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ่านชีวมวล ได้แก่ (ก.) ถ่านบมะพร้าว, (ข.) ถ่านไม้ลำไย และ (ค.) ถ่านกลบข้าว ที่มีผลต่อผลผลิตไบโอดีเซล 62

ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์จากการศึกษาอุณหภูมิการให้ความร้อนแก่ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มีผลต่อผลผลิตไบโอดีเซล 65

ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์จากการศึกษาชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อผลผลิตไบโอดีเซลที่อุณหภูมิการให้ความร้อนแก่ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านชีวมวลที่อุณหภูมิ 900 °C 66

ภาพที่ 21 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ่านชีวมวล ได้แก่ (ก.) ถ่านบมะพร้าว, (ข.) ถ่านไม้ลำไย และ (ค.) ถ่านกลบข้าว 70

ภาพที่ 22 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของไบโอดีเซลที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ่านชีวมวล ได้แก่ (ก.) ถ่านบมะพร้าว และ (ข.) ถ่านไม้ลำไย 74

ภาพที่ 23 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของไบโอดีเซลที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจาก ถ่านชีวมวล ได้แก่ (ก.) ถ่านบมะพร้าว และ (ข.) ถ่านไม้ลำไย 78

ภาพที่ 24 ผลการวิเคราะห์ค่าจุดวาบไฟไบโอดีเซลที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจาก ถ่านชีวมวล ได้แก่ (ก.) ถ่านบมะพร้าว และ (ข.) ถ่านไม้ลำไย 82

ภาพที่ 25 ผลการวิเคราะห์ค่าเมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ่านชีวมวล ได้แก่ (ก.) ถ่านบมะพร้าว และ (ข.) ถ่านไม้ลำไย..... 86

ภาพที่ 26 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของไบโอดีเซลและดีเซลผสมที่ใช้ในการทดสอบเครื่องยนต์..... 88

ภาพที่ 27 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของไบโอดีเซลและดีเซลผสมที่ใช้ในการทดสอบเครื่องยนต์89

ภาพที่ 28 ค่าแรงบิดและค่ากำลังเบรคของเครื่องยนต์ทดสอบ กรณีใช้เชื้อเพลิงไบโอดีเซล CCA..... 91

ภาพที่ 29 ค่าแรงบิดและค่ากำลังเบรคของเครื่องยนต์ทดสอบ กรณีใช้เชื้อเพลิงไบโอดีเซล CLA..... 91

ภาพที่ 30 ค่าแรงบิดและค่ากำลังเบรคของเครื่องยนต์ทดสอบ กรณีใช้เชื้อเพลิงดีเซลผสม DCCA... 92

ภาพที่ 31 ค่าแรงบิดและค่ากำลังเบรคของเครื่องยนต์ทดสอบ กรณีใช้เชื้อเพลิงดีเซลผสม DCLA... 92

ภาพที่ 32 ค่าแรงบิดและค่ากำลังเบรคของเครื่องยนต์ทดสอบ กรณีใช้เชื้อเพลิงดีเซลผสม B5 93

ภาพที่ 33 ค่าแรงบิดและค่ากำลังเบรคของเครื่องยนต์ทดสอบ กรณีใช้เชื้อเพลิงดีเซล 93

ภาพที่ 34 ผลการเปรียบเทียบค่าแรงบิดของเครื่องยนต์ในกรณีใช้เชื้อเพลิงต่างชนิดกัน 94

ภาพที่ 35 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังเบรคของเครื่องยนต์ในกรณีใช้เชื้อเพลิงต่างชนิดกัน 94

ภาพที่ 36 การเปรียบเทียบค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่อความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 96

ภาพที่ 37 การเปรียบเทียบค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะต่อความเร็วรอบของเครื่องยนต์ในกรณีใช้น้ำมันเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ 96



สารบัญภาคผนวก

ภาคผนวกที่	หน้า
ก การคำนวณหาปริมาณเมทานอลที่ต้องการใช้ในการทำปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	113
ข ผลการทดลองทางด้านเครื่องยนต์.....	115
ค บทความที่ได้เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ.....	122



สารบัญตารางภาคผนวก

ตารางภาคผนวกที่	หน้า
1 ระยะเวลาในการใช้เชื้อเพลิงแรงบิด และกำลังเบรกของไบโอดีเซล (CCA).....	116
2 ระยะเวลาในการใช้เชื้อเพลิงแรงบิด และกำลังเบรกของไบโอดีเซล (CLA).....	116
3 ระยะเวลาในการใช้เชื้อเพลิงแรงบิด และกำลังเบรกของไบโอดีเซล B5(DCCA).....	116
4 ระยะเวลาในการใช้เชื้อเพลิงแรงบิด และกำลังเบรกของไบโอดีเซล B5 (DCLA).....	117
5 ระยะเวลาในการใช้เชื้อเพลิงแรงบิด และกำลังเบรกของไบโอดีเซล B5.....	117
6 ระยะเวลาในการใช้เชื้อเพลิงแรงบิด และกำลังเบรกของ ดีเซล.....	117
7 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของ ไบโอดีเซล (CCA).....	118
8 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของ ไบโอดีเซล (CLA).....	118
9 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของ ไบโอดีเซล B5 (DCCA).....	119
10 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของ ไบโอดีเซล B5 (DCCA).....	119
11 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของ ดีเซล B5.....	120
12 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของ ดีเซล	120

บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและความสำคัญ

พลังงานทดแทนถือเป็นพลังงานทางเลือกที่ทั่วโลกกำลังให้ความสำคัญ ประเทศไทยเป็นหนึ่งในประเทศที่ให้ความสำคัญในเรื่องของการใช้พลังงานทดแทนให้เพิ่มมากขึ้น โดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน จึงได้มีการจัดทำเป้าหมายการพัฒนาพลังงานทดแทน โดยได้ทบทวนการจัดทำแผนพลังงาน 5 แผนหลัก พ.ศ.2558 – 2579 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน, 2550) ที่สอดคล้องกับกรอบของการจัดทำแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติได้แก่ แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย แผนอนุรักษ์พลังงาน แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก แผนการจัดหาก๊าซธรรมชาติของไทย และแผนบริหารจัดการน้ำมันเชื้อเพลิง โดยทุกแผนงานได้ให้ความสำคัญในการส่งเสริมการผลิตพลังงานทดแทนจากวัตถุดิบพลังงานทดแทนที่มีอยู่ภายในประเทศ มุ่งมั่นพัฒนาศักยภาพการผลิตพลังงานทดแทนด้วยเทคโนโลยีที่มีความเหมาะสม และการพัฒนา พลังงานทดแทนเพื่อผลประโยชน์ร่วมในมิติด้านสังคมและสิ่งแวดล้อมแก่ชุมชน สำหรับแผนบริหารจัดการน้ำมันเชื้อเพลิงนั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้กำหนดทิศทางการบริหารจัดการด้านน้ำมันเชื้อเพลิงให้สอดคล้องกับเป้าหมายที่ระบุภายใต้แผนอื่นๆ โดยช่วงไตรมาสแรกของปี 2561 การใช้น้ำมันเบนซินและดีเซลเพิ่มขึ้น 4.7% และ 3.4% ตามลำดับ เนื่องจากมีการใช้รถยนต์ส่วนตัวในการเดินทางมากขึ้น การใช้ดีเซลเฉลี่ยอยู่ที่ 68.5×10^6 L/day เพิ่มขึ้น 3.4% จากการใช้ในภาคขนส่งทางบกที่เพิ่มขึ้น ราคาขายปลีกเฉลี่ยอยู่ที่ 27.12 bath/L ทั้งนี้เนื่องจากผลผลิตปาล์มน้ำมันที่มากขึ้นทางกระทรวงพลังงานมีนโยบายในการเพิ่ม สัดส่วนไบโอดีเซลเป็น B10 และ B20 โดยในไตรมาสแรก การผลิต B100 เฉลี่ยอยู่ที่ 4.8 L/day เพิ่มขึ้นจากช่วงเดียวกันของปี ส่วนหนึ่งเกิดจากการใช้รถส่วนตัวเดินทางมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณการใช้ดีเซลและน้ำมันเบนซิน

ชนิดน้ำมัน	ปริมาณการใช้เฉลี่ย(Million liters/day)			
	2558	2559	2560	2561 (ม.ค.-มี.ค.)
ดีเซล	60.12	61.94	63.77	68.52
กลุ่มเบนซิน	26.39	28.98	30.06	30.81

การใช้เชื้อเพลิงในภาคขนส่งทางบกจะมีการใช้ดีเซลและน้ำมันกลุ่มเบนซินเพิ่มขึ้น ขณะที่การใช้ก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์ (NGV) และก๊าซปิโตรเลียมเหลวหรือก๊าซหุงต้ม (LPG) ลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยดีเซลมีส่วนการใช้สูงสุดคิดเป็น 55% ของการใช้เชื้อเพลิงในภาคการขนส่งทางบก โดยมีสัดส่วนการใช้เพิ่มขึ้นเป็น 3.4% สำหรับน้ำมันกลุ่มเบนซิน มีสัดส่วนการใช้คิดเป็น 32% ของการใช้เชื้อเพลิงในภาคขนส่งทางบก ซึ่งพบว่ามีอัตราการใช้เพิ่มขึ้น 4.7% NGV มีสัดส่วนการใช้คิดเป็น 8% ของการใช้เชื้อเพลิงในภาคการขนส่งทางบก ซึ่งพบว่ามีอัตราการใช้ลดลง 8.3% ซึ่งลดลงมาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปลายปีพ.ศ.2558 โดยมีสาเหตุมาจากปัจจัยทางด้านของราคาน้ำมันที่ลดลงส่งผลให้ผู้มีส่วนหนึ่งหันกลับไปใช้น้ำมันเชื้อเพลิงหรือน้ำมันสำเร็จรูปที่ผ่านกระบวนการกลั่นแล้ว อีกทั้งยังประกอบกับสถานีบริการน้ำมันที่มีอยู่อย่างทั่วถึงมากกว่าสถานี NGV ซึ่งปริมาณการใช้เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การใช้เชื้อเพลิงในภาคขนส่งทางบก

ชนิดน้ำมัน	ปริมาณการใช้เฉลี่ย (Ktoe)			
	2558	2559	2560	2561 (ม.ค.-มี.ค.)
ดีเซล	10,389	11,498	13,688	3,627
กลุ่มเบนซิน	7,177	7,904	8,175	2,066
NGV	2,726	2,500	2,179	517
LPG	2,020	1,711	1,539	354
รวม	23,312	23,613	25,582	6,563

ที่มา: (กระทรวงพลังงาน, 2558)

จากตารางที่ 2 แสดงสัดส่วนการใช้งานน้ำมันสำเร็จรูปในประเภทต่างๆ ทำให้มีการพัฒนาการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงในรูปแบบของพลังงานทดแทน ได้แก่ แก๊สโซฮอล์ และไบโอดีเซล ซึ่งไบโอดีเซลสามารถผลิตได้จากปาล์มน้ำมัน สบู่ดำ น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ใช้แล้ว ที่ผ่านกระบวนการเคมีจะได้ผลผลิตที่เรียกว่าไบโอดีเซล 100% หรือที่เรียกว่า B100 ที่สามารถใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลรอบต่ำ เช่น เครื่องจักรกลการเกษตร หรืออาจจะผสมสัดส่วน 5% ในดีเซล ที่เรียกว่า B5 ก็สามารถใช้กับรถยนต์เครื่องยนต์ดีเซลได้ และไบโอดีเซลยังเป็นพลังงานทดแทนที่สำคัญอย่างหนึ่งของประเทศไทย เป็นทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยพัฒนาประเทศ เนื่องจากผลิตได้จากวัตถุดิบหลักที่มีอยู่แล้วในประเทศไทย ทำให้สามารถลดการนำเข้าน้ำมันปิโตรเลียมจากต่างประเทศ ลดการขาดดุลการค้า และเสริมสร้างความมั่นคงด้านพลังงานของประเทศไทยอีกประการหนึ่งด้วย ทำให้กระทรวงพลังงานได้มีการผลักดันการใช้เชื้อเพลิงในรูปแบบเชื้อเพลิงชีวภาพ เอทานอล และไบโอดีเซล ซึ่งมีเป้าหมายระบุภายใต้แผนพลังงานทดแทน ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เป้าหมายการใช้เอทานอลและไบโอดีเซลภายใต้แผนพลังงานทดแทน

เป้าหมาย (Million liters/day)	เป้าหมายปี		
	สภาพปี 2558	2569	เป้าหมายปี 2579
เอทานอล	3.5	7.0	11.3
ไบโอดีเซล	3.9	10.0	14.1

ที่มา: (กระทรวงพลังงาน, 2558)

จากตารางที่ 3 แสดงเป้าหมายการใช้เอทานอลและไบโอดีเซล ซึ่งจากเป้าหมายจะเห็นอย่างชัดเจนว่า การใช้ไบโอดีเซลนั้นมีเป้าหมายในการเพิ่มปริมาณการใช้ที่มากยิ่งขึ้น โดยมีมาตรการส่งเสริมการใช้ไบโอดีเซล และใช้มาตรการทางภาษี เพื่อส่งเสริมการใช้ไบโอดีเซลในสัดส่วนที่สูงขึ้น โดยทางกรมธุรกิจพลังงานจึงได้มีมาตรการเร่งส่งเสริมการผลิตไบโอดีเซลเพิ่มมากขึ้น จากพืชน้ำมันที่มีภายในประเทศ รวมทั้งจากน้ำมันพืชใช้แล้วที่มีเหลืออยู่เป็นจำนวนมาก เพื่อให้คนไทยได้ใช้แทนดีเซล ช่วยลดภาระการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศ แก้ไขปัญหาวิกฤตราคาน้ำมันแพง และเป็นการสร้างความมั่นคงด้านพลังงานในระยะยาว (ชูชีพ พิพัฒน์ศิริ, 2540)

สำหรับการวิจัยในการนำน้ำมันพืชและไขมันสัตว์ใช้แล้ว กลับมาประกอบอาหารซ้ำมีความเสี่ยงต่อการก่อให้เกิดโรคมะเร็งได้ เนื่องจากในน้ำมันพืชใช้แล้วที่นำกลับมาใช้ซ้ำมีสารพิษก่อมะเร็ง

อยู่ 2 กลุ่ม คือ อนุพลอิสระ และไดออกซิน จึงทำให้สังเกตเห็นถึงความสำคัญในการนำน้ำมันใช้แล้ว เหล่านั้นมาแปรรูปให้เกิดประโยชน์เป็นพลังงานทดแทน ที่สามารถใช้ทดแทนดีเซลซึ่งได้มาจากน้ำมัน พืชหรือไขมันสัตว์ใช้แล้ว โดยผ่านกระบวนการทางเคมีกับแอลกอฮอล์ หรือกระบวนการ ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน มาทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ส่วนใหญ่นิยมใช้เมทานอล โดยมีเบสเป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยา ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดผลิตภัณฑ์ที่ผสมระหว่างไบโอดีเซลและกลีเซอริน จึงต้องมีการแยกชั้น กลีเซอรอลออกจากไบโอดีเซล แล้วนำไปโอดีเซลที่ได้มาล้างน้ำ และแยกน้ำออกจนได้ไบโอดีเซลที่ บริสุทธิ์ ซึ่งประเทศไทยมีการใช้ไบโอดีเซลมากในภาคอุตสาหกรรมการผลิตสินค้าและภาคขนส่ง และ ยังรวมไปถึงภาคเกษตรกรรมที่ต้องใช้เครื่องยนต์ดีเซลเป็นเครื่องมือหลักในการทำงานด้วย โดย ไบโอดีเซลมีคุณสมบัติเทียบเคียงได้กับดีเซล แต่ให้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่า เพราะออกซิเจนใน ไบโอดีเซล ให้การสันดาปที่สมบูรณ์กว่าดีเซลปกติ จึงเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยกว่า และใน ไบโอดีเซลไม่มีส่วนประกอบของสารซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ให้ไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ ปราศจากมลพิษ รวมทั้งการใช้ไบโอดีเซล ยังก่อให้เกิดเขม่าคาร์บอนน้อย ช่วยหล่อลื่นเครื่องยนต์ ทำ ให้ยืดอายุการทำงานของเครื่องยนต์ได้ดี โดยเฉพาะเมื่อเทียบกับการใช้ดีเซล ดังแสดงในตารางตาราง ที่ 4 เปรียบเทียบคุณสมบัติของดีเซลและไบโอดีเซลตามมาตรฐาน ASTM

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบคุณสมบัติของดีเซลและไบโอดีเซลตามมาตรฐาน ASTM

คุณสมบัติ	ดีเซล ASTM D975	ไบโอดีเซล ASTM D6751
องค์ประกอบ	ไฮโดรคาร์บอน (C10-C21)	เมทิลเอสเทอร์ของกรด ไขมัน
ความหนืด (m ² /s)	1.9-4.1 ที่ 40°C	1.9-6.0 ที่ 40°C
ความถ่วงจำเพาะ	0.85	0.88
จุดวาบไฟ (°C)	60-80	100-170
ปริมาณน้ำ (%)	0.05	0.05
ปริมาณออกซิเจน (%)	0	11

ที่มา: (Van Gerpen, 2010)

สำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งมีการใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยาจากสารเคมีถึงแม้จะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่สั้น (Alhassan et al., 2013) แต่จาก กระบวนการผลิตจะทำให้ได้สารประกอบประเภทเมท็อกไซด์ที่มีความเป็นพิษต่อผู้ผลิตไบโอดีเซล

และมีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมโดยตรง (Rajaeifar et al., 2017) อีกทั้งยังทำให้เกิดกลีเซอรอลเป็นจำนวนมากจากกระบวนการของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์ (Shajaratun Nur et al., 2014) จากปัญหาดังกล่าวจึงมีความพยายามในการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทโลหะอัลคาไลน์ออกไซด์ (Teo et al., 2014) การผลิตไบโอดีเซลจากตัวเร่งปฏิกิริยาจากธรรมชาติประเภทเถ้าชีวมวลเป็นอีกทางเลือกหนึ่งเพื่อลดการใช้สารเคมีและใช้วัสดุเหลือทิ้งจากธรรมชาติให้เกิดประโยชน์สูงสุด ประกอบกับชุมชนมีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก ได้แก่ ไม้ลำไย แกลบข้าว และกาบมะพร้าว เป็นต้น โดยมีปริมาณชีวมวลเหลือใช้ของไม้ลำไยประมาณ 222,682.11 Ton แกลบข้าวประมาณ 3,510,598.90 Ton และ กาบมะพร้าว 464,250.95 Ton ดังแสดงในตารางที่ 5 ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนว่ามีปริมาณชีวมวลเหลือใช้ที่มีอยู่ภายในประเทศไทยนั้นมีอยู่เป็นจำนวนมาก การใช้ประโยชน์จากชีวมวลสามารถใช้ได้หลายประเภท เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับกระบวนการเผาไหม้โดยตรง กระบวนการผลิตก๊าซ กระบวนการหมัก และกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากพืช เป็นต้น โดยเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการจะได้เถ้าเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการเผาไหม้ ซึ่งในเถ้าจะประกอบด้วยที่ประกอบด้วยโลหะอัลคาไลน์ มีคุณสมบัติเป็นเบส และสามารถนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ (Sharma et al., 2011)

ตารางที่ 5 ศักยภาพชีวมวลจากไม้ลำไย แกลบข้าว และกาบมะพร้าว

ชีวมวล	ปริมาณชีวมวลเหลือใช้ (Ton)
ไม้ลำไย	222,682.11
แกลบข้าว	3,510,598.90
กาบมะพร้าว	464,250.95

ที่มา: (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2559)

ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงมีความสนใจในการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยใช้เถ้าจากชีวมวลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อใช้สำหรับเป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก ลดการใช้สารเคมี และลดต้นทุนในการผลิต โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการใช้เถ้าจากชีวมวล ได้แก่ ไม้ลำไย แกลบข้าว และกาบมะพร้าว มาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อใช้ในการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งไบโอดีเซลที่ผลิตได้จะนำไปใช้ทดแทนดีเซล โดยงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันที่ได้ และทดสอบการใช้งานกับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก เพื่อศึกษาสมรรถนะของเครื่องยนต์ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และเป็นแนวทางในการศึกษาการใช้งาน

เพื่อประกอบการตัดสินใจศึกษาและใช้งานจริงในชุมชนที่มีความต้องการใช้ในเรือของการเกษตรต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยการใช้เถ้าที่ได้จากชีวมวลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
2. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากเถ้าชีวมวลชนิดต่างๆ
3. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตได้กับไบโอดีเซลมาตรฐาน
4. เพื่อศึกษาการใช้ไบโอดีเซลกับเครื่องยนต์ทางการเกษตร

ขอบเขตของการวิจัย

1. ใช้ไม้ลำไย แกลบข้าว และกาบมะพร้าว ที่ได้จากชีวมวลมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล
2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วโดยการใช้เถ้าจากชีวมวลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยมี 5 ปัจจัย ได้แก่
 - ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ เถ้าไม้ลำไย เถ้าแกลบข้าว และเถ้ากาบมะพร้าว
 - ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ระดับ ที่ 1-3%wt ต่อน้ำหนักของน้ำมัน
 - อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว ศึกษาที่ 3:1, 6:1, 9:1 และ 12:1
 - อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาไม่เกิน 65 °C
 - เวลาในการทำปฏิกิริยาไม่เกิน 3 hr
3. ทำการทดสอบการใช้น้ำมันกับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดไม่เกิน 20 HP

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด และช่วยลดค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคมี ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล
2. สามารถนำไบโอดีเซลที่ผลิตไปใช้กับเครื่องยนต์การเกษตร ประเภทเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก
3. เพื่อช่วยลดมลพิษที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกายและสิ่งแวดล้อม จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล



บทที่ 2

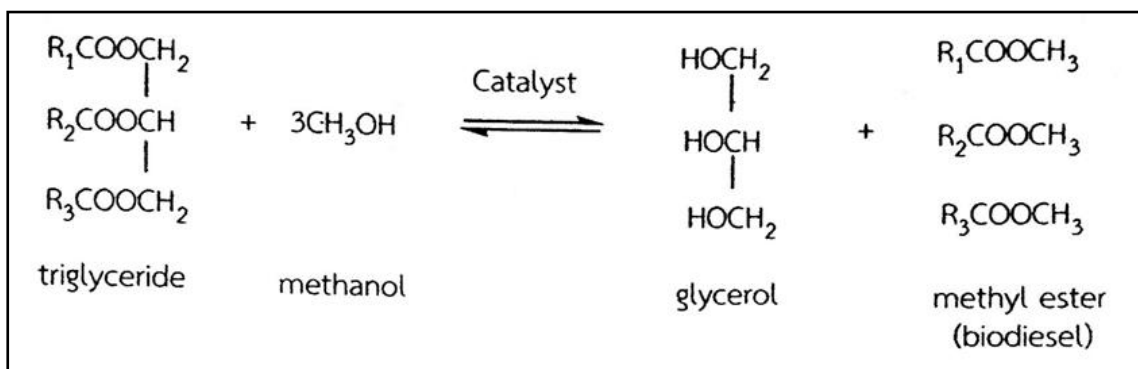
หลักการและทฤษฎี

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจากน้ำมันใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าชีวมวล ได้แก่ ไม้ลำไย แกลบข้าว และกากบะเพรา โดยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องประกอบไปด้วย นิยามและความหมายของไบโอดีเซล ประเภทของไบโอดีเซล ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน น้ำมันทอดซ้ำ ตัวเร่งปฏิกิริยา วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่นำมาผลิตเป็นเถ้าที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน คุณภาพและมาตรฐานไบโอดีเซล และการทดสอบการใช้ไบโอดีเซลกับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก โดยสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

นิยามและความหมายของไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล (Biodiesel) คือ น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพที่ผ่านการผลิตมาจากน้ำมันพืช หรือไขมันสัตว์ผสมกับเอทานอลหรือเมทานอล เพื่อให้ได้เชื้อเพลิงโมเลกุลเล็กอยู่ในรูปของเอทิลเอสเทอร์ หรือ เมทิลเอสเทอร์ ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงสะอาด ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม โดยจะมีสมบัติใกล้เคียงกับดีเซล และสามารถใช้ทดแทนกันได้ (Knothe, 2010)

ไบโอดีเซลเป็นสารประเภทเอสเทอร์ที่สามารถผลิตได้จากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ทั้งที่ยังไม่ได้ใช้หรือผ่านการใช้แล้วโดยทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล มีตัวเร่งปฏิกิริยา ผ่านปฏิกิริยาทางเคมีที่มีชื่อว่า กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน แสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์

ประเภทของไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลแบ่งเป็น 3 ประเภท ตามประเภทของน้ำมันที่นำมาใช้

1. น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ ไบโอดีเซลที่ใช้ น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์โดยตรง คือ สามารถนำน้ำมันมาใช้ได้กับเครื่องยนต์ดีเซลได้ ไม่ต้องผสมหรือเติมสารเคมีอื่นเพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำมัน น้ำมันพืชที่ใช้ เช่น น้ำมันปาล์ม และน้ำมันถั่วเหลือง เป็นต้น ส่วนไขมันสัตว์ที่ใช้ เช่น ไขมันหมู เป็นต้น การใช้ น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ซึ่งไบโอดีเซลประเภทนี้ใช้ได้กับเฉพาะเครื่องยนต์รอบต่ำ มีราคาถูกแต่ยังไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากมีปัญหาในเรื่องสมบัติที่แตกต่างจากดีเซลอยู่มาก ทำให้เครื่องยนต์สันดาปไม่สมบูรณ์ เครื่องสั่นไหว ส่งผลกระทบต่อลูกสูบและวาล์วและเกิดตะกรันขาวติดอยู่ในถังน้ำมัน ทำให้เครื่องยนต์มีความหนืดเมื่ออุณหภูมิต่ำลง มีผลต่อการสตาร์ทเครื่องทำให้เครื่องติดยากหรืออาจไม่ติด (Bart et al., 2010; Dunn, 2010)

2. ไบโอดีเซลแบบลูกผสม เป็นการผสมน้ำมันจากพืชหรือสัตว์ตั้งที่กล่าวมากับน้ำมันก๊าดหรือดีเซล เพื่อให้ได้ไบโอดีเซลที่มีสมบัติใกล้เคียงกับดีเซลมากที่สุด ไบโอดีเซลประเภทนี้เหมาะสำหรับการใช้กับเครื่องยนต์รอบต่ำ หรือเครื่องจักรกลทางการเกษตรการแปลงให้มีสมบัติใกล้เคียงกับดีเซล ทำให้ลดปัญหาเรื่องของการเครื่องยนต์และการสตาร์ทเครื่องติดยากลงไปได้ แต่ก็ยังมีปัญหาในเรื่องของการอุดตันของไส้กรองเครื่องยนต์ที่จะเกิดการอุดตันได้เร็วกว่าปกติ (Pinzi and Pilar dorado, 2012)

3. ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ เป็นประเภทของไบโอดีเซลตามความหมายสากลที่ยอมรับกัน โดยผ่านกระบวนการแปรรูปตามกระบวนการทางเคมีนี้ เรียกว่า ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งเป็นการนำเอาน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์มาผ่านกรรมวิธีทางเคมี เพื่อเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ให้อยู่ในรูปของ Monoalcohol Fatty Acid Ester โดยเรียกชนิดตามชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาว่า เป็นเมทิลเอสเทอร์หรือเอทิลเอสเทอร์ ซึ่งไบโอดีเซลประเภทนี้จะเกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง น้ำมันพืช ไขมันสัตว์หรือน้ำมันพืชใช้แล้วกับแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล หรือ เอทานอล โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นกรดหรือเบส ดังนั้นในการนำน้ำมันมาใช้เป็นเชื้อเพลิง จำเป็นต้องผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างให้เป็นสายโซ่ตรง (Pinzi and Pilar dorado, 2012)

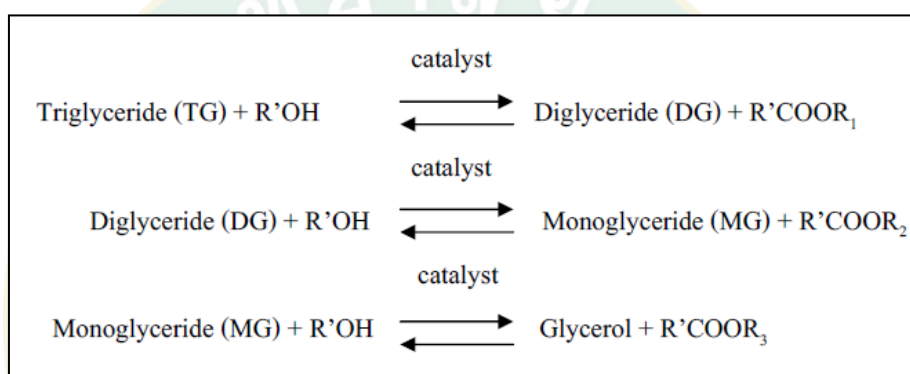
ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน คือ ปฏิกิริยาแตกพันธะของเอสเทอร์ (-OR) หรือไตรกลีเซอไรด์ ด้วยแอลกอฮอล์ (เมทานอล) โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเมทิลเอสเทอร์ (เมทานอล + กรดไขมัน) และกรีเซอร์ออลหรือที่เรียกว่ากลีเซอริน ดังแสดงในภาพที่ 2

ในทางทฤษฎีการเกิดปฏิกิริยาโดยสมบูรณ์จะต้องใช้อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์กับน้ำมันเป็น 3:1 (Freedman et al., 1986)

ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้ง่ายกว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและใช้เวลาน้อยกว่า แต่มีข้อจำกัดคือ ค่ากรดไขมันอิสระ (FFA) ที่ได้ไม่ควรเกิน 3% (Banerjee and Chakraborty, 2009)

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันประกอบด้วยปฏิกิริยาย่อยแบบผันกลับได้ 3 ขั้นตอนย่อย ดังแสดงในภาพที่ 2 โดยเริ่มจากไตรกลีเซอไรด์จะเปลี่ยนเป็นไดกลีเซอไรด์ และโมนโกลีเซอไรด์ ตามลำดับ สุดท้ายจะได้กลีเซอรอลและเอสเทอร์ โดยแต่ละในปฏิกิริยาย่อยจะได้เอสเทอร์ 1 mol (Banerjee and Chakraborty, 2009)



ภาพที่ 2 ปฏิกิริยาย่อยระหว่างน้ำมันพืชหรือไขมันกับแอลกอฮอล์
ที่มา : (Banerjee and Chakraborty, 2009)

น้ำมันทอดซ้ำ

ตามมาตรฐานของน้ำมันที่ยังไม่ผ่านการใช้งานจะมีสารโพลาร์ (Polar compound) ค่อนข้างต่ำ แต่เมื่อน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้วจะพบสารโพลาร์ในปริมาณสูง ซึ่งสารโพลาร์เป็นตัวบ่งบอกถึงคุณภาพน้ำมันทอดอาหารที่ใช้ทอดมาแล้ว โดยการทอดอาหารแบบน้ำมันท่วมที่ใช้ น้ำมันปริมาณมาก อุณหภูมิสูงประมาณ 170–180 °C และทอดเป็นระยะเวลานานน้ำในอาหารและออกซิเจนจากอากาศจะไปเร่งการเสื่อมสภาพของน้ำมันทำให้น้ำมันแตกตัวทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและสร้างเป็นสารพอลิเมอร์ในน้ำมัน มีผลให้สี กลิ่น และรสชาติของน้ำมันเปลี่ยนไป จุดเกิดควันลดต่ำลง ฟองและความหนืดมากขึ้น นอกจากนี้ น้ำมันซึ่งเดิมเป็นสารไม่มีประจุเกิดการแตกตัวเป็นสารมีประจุ (สารโพลาร์) เช่น กรดไขมันอิสระ โมโนเอซิลกลีเซอรอลและไดเอซิลกลีเซอรอล แม้สารประกอบดังกล่าวไม่อันตรายต่อร่างกายแต่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน หากใช้น้ำมันทอดซ้ำหลายๆครั้ง

การเสื่อมสภาพของน้ำมัน ทอดอาหารจะเกิดมากขึ้น มีการสะสมที่ไม่พึงประสงค์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และเกิดสารประกอบที่สามารถสะสมในร่างกายและส่งผลกระทบต่อการทำงานของเซลล์ได้ รวมทั้งยังก่อให้เกิดเนื้องอกในตับ ปอด และก่อให้เกิดมะเร็งในเม็ดเลือดขาว และยังพบสาร carcinogenesis ที่ก่อให้เกิดมะเร็งผิวหนังอีกด้วย (Liu et al., 2017)

ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

ตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาจากสารเคมี

- เมทานอลหรือเมทิลแอลกอฮอล์ สูตรโมเลกุลคือ CH_3OH เป็นของเหลวใส ระเหยง่าย เป็นพิษ นิยมใช้เป็นตัวทำละลาย และใช้เป็นเชื้อเพลิง ในธรรมชาติ เมทานอล เป็นผลิตภัณฑ์จากการสลายสารอาหารแบบไม่ใช้ออกซิเจนของแบคทีเรียหลายชนิด ซึ่งเมทานอลจะระเหยออกสู่อากาศภายนอก แล้วสลายตัวได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำหากเราเผาเมทานอลกับอากาศ จะได้คาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ ความสามารถในการทำปฏิกิริยา ดูดความชื้น ไวไฟสูง วัสดุที่ไม่เหมาะสมในการใช้งานด้วยได้แก่ พลาสติกชนิดต่างๆ อะลูมิเนียม อัลลอยด์ซิงค์ สารเคมีในสภาพที่เป็นไอระเหยหรือแก๊สเมื่อผสมกับอากาศก่อให้เกิดการระเบิดได้ (Pinzi and Pilar dorado, 2012) เป็นแอลกอฮอล์ที่ไม่สามารถรับประทานได้โดยส่วนใหญ่ นำไปเป็นสารฟอร์มัลดีไฮด์ เพื่อผลิตพลาสติกไม้อัด สี วัตถุระเบิด และการจัดกลีบผ้าถาวร สารแปรรูปของเมทานอลถูกนำไปผสมกับก๊าซปิโตรเลียมเหลว เพื่อใช้ในครัวเรือนหรือผสมกับดีเซลทำเป็นไบโอดีเซล

- โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือ โซดาไฟ (Sodium Hydroxide) มีสูตรทางเคมีว่า NaOH หรืออาจเรียกว่าต่าง มีชื่ออื่นที่ถูกเรียกคือ โซดาไฟ มีสถานะเป็นของแข็งมีลักษณะเป็นของผงหรือเป็นเกล็ด สีขาวขุ่น มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.13 สามารถละลายได้ในน้ำ หรือ แอลกอฮอล์ได้ดี สามารถใช้ได้ในการผลิตไบโอดีเซลหรืออุตสาหกรรมต่างๆเช่น อุตสาหกรรมกระดาษ และใช้ในห้องปฏิบัติการการทดลอง เป็นต้น (Verhé et al., 2011)

- โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide) เป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ของโพแทสเซียม มีสูตรโมเลกุลว่า KOH ในธรรมชาติมักเป็นสารประกอบร่วมกับธาตุอื่นเพราะไวต่อ

ปฏิกิริยาเคมีมาก สามารถออกซิไดซ์ได้อย่างรวดเร็วในอากาศ มีสมบัติทางเคมีใกล้เคียงกับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Leung et al., 2010)

2. ตัวเร่งปฏิกิริยาจากธรรมชาติ

- เถ้า (Ash) คือ ส่วนของสารอนินทรีย์ที่เหลือจากการสันดาปภายในเตาเผา ที่ อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 6 hr ซึ่งประกอบด้วย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ หรือเป็นส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ ดังนั้น ถ้าหากของเสียมีเถ้าในปริมาณมากจะเป็น ปัญหาในการเผาไหม้และเพิ่มความยุ่งยากในการกำจัดเถ้าที่เกิดขึ้น (Borges and Díaz, 2012) แสดงดังในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 เถ้าไม้ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการให้ความร้อน

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่นำมาผลิตเป็นเถ้าที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

1. **มะพร้าว** กาบมะพร้าวจะถูกแกะออกมาจากด้านในของเปลือกมะพร้าวซึ่งสามารถแกะ ออกมาได้ด้วยมือหรือใช้เครื่องช่วยแกะ และสามารถนำมาผสมใช้เป็นวัสดุก่อสร้างมากที่สุด เนื่องจาก เป็นวัสดุธรรมชาติที่ไม่มีสารพิษ มีปริมาณมาก และราคาถูก แต่ยังมีกาบมะพร้าวบางส่วนถูกนำไปทิ้ง เป็นขยะ หรือ ถูกเผาทิ้งซึ่งก่อให้เกิดปัญหาต่อสภาพแวดล้อม (Vadery et al., 2014) ซึ่งกาบ มะพร้าวสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ชีวมวล โดยหลังจากการเผายังคงเหลือเถ้ากาบมะพร้าวใน ปริมาณมาก ซึ่งมีลักษณะเป็นผงฝุ่น น้ำหนักเบา สามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย จึงทำให้เกิดปัญหาในการ กำจัดทิ้งทั้งด้านการขนส่งและการจัดหาสถานที่ในการทิ้งนอกจากนั้นยังทำให้เกิดมลภาวะต่อ

สิ่งแวดล้อมอีกด้วย โดยได้จากกาบมะพร้าวมีองค์ประกอบทางเคมีของเถ้ากาบมะพร้าว ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงองค์ประกอบทางเคมีเถ้ากาบมะพร้าว

ธาตุ	C	O	Na	Mg	Si	Cl	K	อื่นๆ
(wt.%)	61.77	16.43	-	-	-	8.06	10.61	2.82

ที่มา: (Vadery et al., 2014)

2. ไม้ลำไย ในปัจจุบันมีการรับซื้อไม้ลำไยไปใช้ประโยชน์ในด้านพลังงานในอุตสาหกรรมโดยการใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล ขณะเดียวกันชุมชนก็มีการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านเชื้อเพลิงในครัวเรือน โดยเผาเพื่อให้ได้ถ่านไม้ใช้ในครัวเรือน และผลพลอยได้จากใช้ถ่านไม้ลำไยจะได้เถ้าเป็นจำนวนมาก และยังได้ศึกษาองค์ประกอบของเถ้าไม้ลำไย ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS พบว่า เถ้าจากชีวมวลจะประกอบไปด้วยธาตุ O เป็นองค์ประกอบหลักในปริมาณที่สูง รองลงมา คือ Ca, K และ C นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบของธาตุอื่นๆ ได้แก่ Na, Mg, Si, Cl, P และ Al โดยปริมาณธาตุแต่ละชนิด ดังแสดงตารางที่ 7 (ปิยรัตน์ศิริ, 2556)

ตารางที่ 7 ปริมาณองค์ประกอบของเถ้าลำไย

ธาตุ	C	O	Na	Mg	Si	Cl	K	Ca
(wt.%)	9.51	48.27	1.32	3.24	0.88	2.05	20.19	14.53

ที่มา: (ปิยรัตน์ศิริ, 2556)

3. แกลบข้าว ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการผลิตข้าวสาร มีลักษณะเป็นรูปทรงรี เม็ดยาวสีเหลืองอมน้ำตาล แกลบข้าวนี้ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเถ้า แกลบข้าวมีความคงตัวทางเคมี ทนทานต่อแรงกระทำ จึงเป็นตัวดูดซับที่ดี โดยสามารถใช้ได้ทั้งในรูปแบบที่ทำและไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมี สารเคมีที่นิยมใช้ทำปฏิกิริยากับแกลบเพื่อให้ดูดซับโลหะมากขึ้นคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ นอกจากแกลบข้าวจะสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงต่างๆแล้ว ยังสามารถนำไปผสมกับวัสดุอื่นๆทำเป็นวัสดุก่อสร้าง แกลบข้าวยังถูกนำไปผลิตเป็นเถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ ส่วนประกอบหลักของเถ้าแกลบ คือ ซิลิกา สามารถนำไปทำให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการทางเคมี โดยทำการเผาที่อุณหภูมิสูง ซิลิกาในเถ้าแกลบนั้นมีทั้งที่เป็น ซิลิกาแบบผลึก

(Crystalline Silica) และซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous Silica) ซึ่งเป็นซิลิกาที่มีรูปร่างไม่เป็นผลึก (Non-crystalline Silica) ด้านพลังงานและอุตสาหกรรม แกลบข้าวยังสามารถนำมาใช้ในลักษณะของเชื้อเพลิง โดยเมื่อทำการเผาให้ความร้อนแล้ว จะได้เถ้าซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการเผาของชีวมวล ซึ่งมีลักษณะเป็นเถ้าละเอียดสีเทา ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นเบส สามารถนำไปใช้ในกระบวนการทางเคมีได้ เช่น ใช้เป็นส่วนผสมของสบู่ ยาสระผม และน้ำยาล้างจาน เป็นต้น ใช้ทำแท่งถ่านอัดจากเถ้าแกลบเพื่อเป็นเชื้อเพลิง ใช้สำหรับดูดซับก๊าซจากกระบวนการผลิตทางด้านอุตสาหกรรม ด้วยคุณสมบัติความเป็นเบสจริงมีงานวิจัยต่างๆทำการศึกษาการใช้เถ้าจากแกลบข้าวเป็นตัวดูดซับและตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล (Li et al., 2014; Pode, 2016) และจากงานวิจัยของ (Billong et al., 2018) ทำการศึกษาการเถ้าแกลบข้าว โดยทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าแกลบข้าวที่ได้จากเตาเผา โดยใช้เทคนิค EDS พบว่า เถ้าแกลบข้าวที่ได้มีค่าดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ปริมาณองค์ประกอบของเถ้าแกลบข้าว

ธาตุ	C	O	Al	Si	K	Ca	Fe	Mg
(wt.%)	5.79	65.71	3.58	10.89	0.48	12.86	0.34	0.36

ที่มา: (Billong et al., 2018)

ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันมีอยู่หลายปัจจัย ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. อัตราส่วนระหว่างเมทานอลกับน้ำมัน โดยการเร่งปฏิกิริยาด้วยเมทานอลจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้า แต่มีผลต่อการเข้ากันได้ของสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา คือการเพิ่มความไม่มีขั้ว ซึ่งน้ำมันเป็นสารประกอบอินทรีย์จึงไม่มีขั้ว เนื่องจากขั้วหักล้างกันหมด ส่วนเมทานอลเป็นแอลกอฮอล์มีทั้งส่วนที่มีขั้วคือหมู่ -OH และส่วนที่ไม่มีขั้วคือหมู่แอลคิล (R) มีสูตรทั่วไปเป็น R-OH ซึ่งการละลายสารมีขั้วจะละลายในสารมีขั้วเหมือนกัน เช่นเดียวกับสารละลายไม่มีขั้ว ดังนั้นเมทานอลบางส่วนที่มีขั้วจึงไม่ละลายในน้ำมัน ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์อื่นเพิ่มออกมา โดยการใช้อัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 6:1 จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์มากที่สุด ถ้ามีปริมาณแอลกอฮอล์เพิ่มมากขึ้น จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ไวและดียิ่งขึ้น และยังให้ผลผลิตเอสเทอร์เพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อใช้อัตราส่วน

เมทานอลต่อน้ำมันที่สูงขึ้นทำให้การแยกชั้นระหว่างชั้นเอสเทอร์และน้ำมันนั้นยากกว่าเดิมรวมถึงใช้เวลานานและอาจต้องเสียค่าใช้จ่ายในการแยกเพิ่มขึ้น

2. อุณหภูมิ เป็นปัจจัยที่สำคัญในการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งการใช้อุณหภูมิสูงในการทำปฏิกิริยาจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นโดยอุณหภูมิสูงและทำให้การแยกตัวของแต่ละเฟสลดลง ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นและเพิ่มการเข้ากันได้ของสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยา เวลาในการทำปฏิกิริยาลดลงแต่การใช้อุณหภูมิสูงจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้การใช้อุณหภูมิสูงยังทำให้เกิดกลีเซอรอลมากขึ้นสำหรับน้ำมันพืชที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ส่วนในน้ำมันพืชใช้แล้วการใช้อุณหภูมิสูงจะเพิ่มความหนืดของไบโอดีเซลและส่งผลกระทบต่อเกิดการเกิดกลีเซอรอลอันทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ลดลง ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีและรวดเร็วขึ้น แต่ส่งผลกระทบต่อเกิดการเกิดกลีเซอรอลมากขึ้น ดังนั้น แสดงว่าอุณหภูมิสูงจะมีผลเสียต่อน้ำมันพืชที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการการใช้งาน แต่มีผลดีต่อน้ำมันพืชใช้แล้วเนื่องจากช่วยลงความหนืดลง ซึ่งอุณหภูมิจะสัมพันธ์กับเวลา โดยไม่ควรใช้อุณหภูมิที่มากกว่าจุดเดือดของเนื่องจากจะทำให้แอลกอฮอล์ระเหยและทำให้เกิดกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น

3. เวลา เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันจะสามารถเกิดอย่างได้สมบูรณ์นั้นต้องมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา หากใช้อุณหภูมิสูงระยะเวลาที่ใช้ก็จะน้อย แต่ถ้าใช้อุณหภูมิต่ำระยะเวลาที่ใช้ก็จะมากขึ้น การใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาควรควบคุมให้เหมาะสม เนื่องจากหาใช้เวลามากเกินไปปริมาณเอสเทอร์ไม่ได้เพิ่มขึ้นแต่จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นลดลง เนื่องจากเวลาที่มากจะทำให้เกิดการไฮโดรลิซิสของเอสเทอร์ ซึ่งจะทำให้มีปริมาณเอสเทอร์ลดลง แต่จะมีกรดไขมันเพิ่มและเกิดกลีเซอรอลในที่สุด เมื่อเวลาผ่านไปจะเริ่มเห็นกลีเซอรอลมากขึ้น ดังนั้น ต้องควบคุมเวลาไม่ให้นานเกินไป เพราะจะทำให้เกิดปฏิกิริยาผันกลับ ซึ่งทำให้เกิดผลผลิตลดลง

4. ความเข้มข้นและชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา หากความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นน้อยเกินไปจะไม่เพียงพอต่อการเร่งปฏิกิริยา แต่หากมากเกินไปจะเกิดผลผลิตน้อยลง เนื่องจากเกิดกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นทำให้ความหนืดของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น การใช้เบสมากเกินไปจะทำให้ไตรกลีเซอไรด์เปลี่ยนไปเป็นกลีเซอรอล ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์น้อยลง เนื่องจากมีการเกิดกรีสเอรอลในปฏิกิริยา จะทำให้เมทิลเอสเทอร์ละลายในชั้นกลีเซอรอล ทำให้การแยกชั้นเมทิลเอสเทอร์กับชั้นกลีเซอรอลทำได้ยากขึ้น ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลมากกว่าอุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยา และอัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมันที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

คุณภาพและมาตรฐานของไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลสามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลดีเซล โดยเครื่องยนต์บางรุ่นอาจต้องการ การปรับปรุงระบบเชื้อเพลิงและถังเชื้อเพลิงเล็กน้อย การใช้งานส่วนใหญ่จึงนิยมไปผสมกับดีเซลเพื่อส่งเสริมให้เกิดการใช้ไบโอดีเซลอย่างแพร่หลาย ในหลายประเทศทั่วโลกจึงต้องกำหนดมาตรฐานสำหรับคุณภาพไบโอดีเซลขึ้น เช่น ในประเทศสหรัฐอเมริกา มีมาตรฐาน ASTM D6751 ในทวีปยุโรป มีมาตรฐานรวมกันที่ใช้ EN14214:2003 ประเทศสหพันธรัฐเยอรมนีมีมาตรฐาน DIN E51606 และประเทศออสเตรเลีย มีมาตรฐานที่กำหนดขึ้นใช้เองเรียกว่า Fuel standard (Biodiesel) determination 2003 เป็นต้น

กรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงานได้ออกประกาศเพื่อกำหนดคุณภาพ และลักษณะของไบโอดีเซลขึ้น 2 ฉบับ ได้แก่

1) ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพไบโอดีเซล ประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2550 สำหรับไบโอดีเซลที่จะนำมาผสมกับดีเซลเพื่อจำหน่ายเชิงพาณิชย์ ซึ่งสามารถใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลทุกประเภท

2) ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซล สำหรับ เครื่องยนต์การเกษตร พ.ศ.2549 ประกาศขึ้นเพื่อกำกับคุณภาพของไบโอดีเซล ที่ผลิตขึ้นในชุมชนและใช้กันเองภายในชุมชน ใช้กับเครื่องจักรกลการเกษตรประเภทรอบต่ำเท่านั้น

สำหรับมาตรฐานกรมธุรกิจ พลังงาน พ.ศ.2550 จะมีข้อกำหนด 23 ข้อรวมกับสารแต่งเติมอีก 1 ข้อรวมทั้งสิ้นเป็น 24 ข้อ ซึ่งคุณสมบัติแต่ละข้อสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังหัวข้อด้านล่าง และสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 9

1. เมทิลเอสเทอร์ (Methyl Ester) คือ ค่าที่แสดงถึงความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล และบอกถึงการเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ ผลที่ได้ต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 96.5%wt โมเลกุลของสารอื่นที่ปะปนมาจะมีน้อย ซึ่งจะทำให้ไบโอดีเซลมีคุณสมบัติในทุกๆด้านดีตามไปด้วย การนำไปใช้จะให้ผลด้านประสิทธิภาพ การสึกหรอ เขม่าควัน หรือคุณสมบัติอื่นๆ ในทางที่ดีทั้งหมดใช้ระบุความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล วิธีทดสอบใช้ตาม EN 14103 ซึ่งตรวจวัด โดยใช้เทคนิคโครมาโตกราฟีและผลที่ได้ต้องให้ค่าต่ำกว่า 96.5%wt เทคนิคโครมาโตกราฟี (Chromatography)

2. ความหนาแน่น (Density) เป็นค่าที่ระบุคุณสมบัติเบื้องต้นทางกายภาพของไบโอดีเซล ทดสอบตามวิธี ASTM D1298 ซึ่งผลที่ได้ต้องไม่ต่ำกว่า 860 kg/m³ และไม่สูงกว่า 900 kg/m³ ที่ 15 °C

3. ความหนืด (Viscosity) ความหนืดในน้ำมันมีความสำคัญมากในการใช้งาน เครื่องยนต์เป็นตัวบ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานการไหลและบอกถึงคุณสมบัติในการหล่อลื่นพื้นผิว ใช้วิธีทดสอบตาม ASTM D445 ซึ่งผลที่ได้ให้ค่าในช่วง 3.5-5.0 (เซนติสโตก, cSt) ณ อุณหภูมิ 40 °C

4. จุดวาบไฟ (Flash point) อุณหภูมิต่ำสุดที่เชื้อเพลิงเกิดระเหย มีจำนวนเพียงพอที่จะลุกติดไฟได้วูบหนึ่งแล้วดับ เมื่อมีเปลวไฟผ่านเข้ามา ให้ใช้วิธีตาม ASTM D93 (Pensky Martens Closed Cup Tester) ซึ่งผลที่ได้ต้องให้ค่าไม่ต่ำกว่า 120 °C

5. กำมะถัน (Sulphur) ปริมาณกำมะถันในน้ำมัน มีความจำเป็นอย่างมากในการ ตรวจวัด เนื่องจากกำมะถันมีผลให้เกิดการกัดกร่อนของชิ้นส่วนภายในเครื่องยนต์ โดยออกไซด์ของกำมะถันที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้จะกลายเป็นกรดกัดกร่อนโลหะได้เกิดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ เกิดเขม่าจับในห้องเผาไหม้ การทดสอบให้ใช้วิธี ASTM D2622 ซึ่งผลที่ได้ต้องให้ค่าไม่เกิน 0.0010%wt การหาปริมาณกำมะถันทดสอบด้วยวิธี Wavelength

6. กากถ่าน (Carbon Residue) กากที่เหลือจากการเผาไหม้ในที่อับอากาศ ปริมาณคาร์บอนสูงเป็นสิ่งไม่พึงประสงค์ในเชื้อเพลิง เช่น กลีเซอรอลกรดไขมันอิสระ สบู่ และตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นต้น เพราะมีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดเขม่าตกค้าง (Deposit) และไอเสียที่มี คว้นดำมาก วิธีการทดสอบให้ทดสอบตาม ASTM D4530 ซึ่งผลที่ได้ต้องให้ค่าไม่สูงกว่า 0.30%wt (ทดสอบจาก 10% ของกากที่เหลือจากการกลั่น)

7. จำนวนซีเทน (Cetane Number) คือ พารามิเตอร์ที่บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพในการ ติดไฟ (Ignition) ของเครื่องยนต์ดีเซลจำนวนซีเทนที่สูงช่วยให้การสตาร์ทเครื่องยนต์ได้ง่าย ทั้งยังช่วยลดคว้นขาวที่เกิดขึ้นด้วย การทดสอบจำนวนค่าซีเทน ใช้วิธีตาม ASTM D613 ซึ่งผลที่ได้ต้องให้ค่าไม่ต่ำกว่าเลข 51

8. เถ้าซัลเฟต (Sulfated Ash) การทดสอบเพื่อหาค่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในส่วนของอัลคาไลน์ไนโบไดเซิล และเถ้าของสารประกอบอื่นๆ ที่สามารถทำให้เกิดการอุดตันในระบบจ่ายน้ำมันเข้าสู่ห้องเผาไหม้ นอกจากนั้นเถ้าซัลเฟตในปริมาณสูงยังส่งผลให้เกิดการสึกหรอของเครื่องยนต์เนื่องจากการขัดสีอีกด้วย

9. น้ำ (Water) การตรวจหาน้ำที่อยู่ในน้ำมัน เพราะการมีน้ำปริมาณสูง เกินไปเร่งให้เกิดออกซิเดชันได้ง่าย ส่งผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์ และอายุการใช้งานต่ำลง เพราะการเกิดสนิมและตะกรันตกค้างในส่วนต่างๆ ของเครื่องยนต์ นอกจากนั้นน้ำยังเป็นแหล่งเพาะจุลินทรีย์ทำให้เกิดกรดและนำไปสู่การกัดกร่อนและอุดตันระบบกรองน้ำมัน การทดสอบใช้มาตรฐาน EN ISO 12937 ต้องให้ค่าไม่เกิน 0.050%wt

10. สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด (Total Contaminant) เป็นปริมาณสารแขวนลอยที่ปะปนอยู่ทั้งหมดในไบโอดีเซล ถ้ามีมากกว่าเกณฑ์มาตรฐานจะส่งผลเสียต่อระบบฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง เพราะจะ

เข้าไปอุดตันและจับตัวอยู่ในระบบ ในข้อกำหนดของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน
กรมธุรกิจพลังงานให้ทดสอบตามวิธี EN12662 ซึ่งให้ค่าไม่เกิน 0.0024%wt

11. การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Strip Corrosion) วิธีการทดสอบใช้แผ่น
ทองแดงขัดผิวแช่ลงในน้ำมันตัวอย่างไบโอดีเซลปริมาณ 30 มิลลิลิตร ณ อุณหภูมิปกติ เป็นระยะเวลา
ที่กำหนดแล้วนำแผ่นทองแดงมาตรวจสอบสภาพการถูกกัดกร่อนโดยเปรียบเทียบกับระดับหมายเลข 1-4
(เลข 1 : มัวเล็กน้อย (Slight Tarnish) เลข 2 : มัวปานกลาง (Middle Tarnish) เลข 3 : มัวมาก
(Dark Tarnish) เลข 4 : กัดกร่อน(Corrosion))

12. เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Stability) เป็นการ
เสถียรภาพของไบโอดีเซล โดยการทดสอบเพื่อดูแนวโน้มการรวมตัวกับออกซิเจน ว่าสามารถ เกิดขึ้น
ได้ช้าหรือเร็วเพียงใด โดยให้ทดสอบตามวิธี EN 14112 ซึ่งผลการวัดค่าจะต้องไม่ต่ำกว่า 6 hr
อุณหภูมิ ทดสอบ 110°C

13. ความเป็นกรด (Acid Number) ใช้บ่งชี้ถึงกรดไขมันอิสระที่ทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์หรือ
การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด หรือมีข้อผิดพลาดที่เพิ่มขึ้นจากขั้นตอน การล้าง
ไบโอดีเซลที่มีการเติมกรด ช่วยปรับ PH เป็นกลาง การมีค่าความเป็นกรดในน้ำมันสูง เกินไปส่งผลให้
อายุการใช้งานของระบบจ่ายน้ำมันและเครื่องสั้นลง ข้อกำหนดของไบโอดีเซล ประเภท
เมทิลเอสเทอร์กรมธุรกิจพลังงาน ให้ทดสอบตามวิธี ASTM D664 ซึ่งผลที่ได้ต้องไม่สูงกว่า 0.5 mg
KOH/g

14. ค่าไอโอดีน (Iodine Value) ที่บ่งบอกความมีเสถียรภาพทางเคมี ของไบโอดีเซลถ้ามี
ค่าไอโอดีนสูงกว่าเกณฑ์ไบโอดีเซลจะมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ ได้ง่ายมากขึ้น ใน
ข้อกำหนดของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ กรมธุรกิจพลังงานให้ทดสอบตามวิธี
EN 14111 ซึ่งผลจากการวัดค่าต้องไม่สูงกว่า 120 g Iodine ต่อ 100 g

15. กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ (Linolenic Acid Methyl Ester Content) เป็นการ
ทดสอบหาปริมาณกรดลิโนเลนิกเอสเทอร์ในไบโอดีเซล ในข้อกำหนดของไบโอดีเซลประเภท
เมทิลเอสเทอร์ กรมธุรกิจพลังงานให้ทดสอบตามวิธี EN 14103 ซึ่งตรวจวัดโดยใช้เทคนิค
โครมาโตกราฟีผลทดสอบต้องมีกรดลิโนเลนิกเอสเทอร์ในไบโอดีเซลไม่สูงกว่า 12.0%wt

16. เมทานอล (Methanol) เป็นการทดสอบหาเมทานอลในไบโอดีเซล ถ้าในไบโอดีเซลมี
เมทานอลปนอยู่มากจะมีความเสี่ยงมากขึ้นที่จะลุดติดไฟในการขนย้าย และจัดเก็บ ในข้อกำหนด
ของไบโอดีเซล ประเภท เมทิล เอส เทอร์ กรมธุรกิจพลังงานให้ทดสอบ ตาม วิธี
EN 14110 ซึ่งตรวจวัดโดยให้ความร้อนกับไบโอดีเซลในภาชนะปิดที่อุณหภูมิ 80 °C จนมีการระเหย
เป็นก๊าซจนเกิดดุลยภาพ (Equilibrium) จากนั้นฉีดเข้าเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี ผลทดสอบต้องมี
เมทานอลในไบโอดีเซลไม่สูงกว่า 0.20%wt

17. โมโนกลีเซอไรด์ (Monoglyceride) ในข้อกำหนดของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ กรมธุรกิจพลังงานให้ทดสอบตามวิธี EN 14105 ซึ่งตรวจวัดโดยใช้เทคนิคโครมาโตกราฟี ผลการทดสอบต้องไม่สูงกว่า 0.80%wt

18. ไดกลีเซอไรด์ (Diglyceride) ในข้อกำหนดในข้อกำหนดของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ กรมธุรกิจพลังงานให้ทดสอบตามวิธี EN 1405 ซึ่งตรวจวัดโดยใช้เทคนิคโครมาโตกราฟี ผลการทดสอบไตรกลีเซอไรด์ไม่สูงกว่า 0.20%wt

19. ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ในข้อกำหนดของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ กรมธุรกิจพลังงานให้ทดสอบตามวิธี EN 1405 ซึ่งตรวจวัดโดยใช้เทคนิคโครมาโตกราฟี ผลการทดสอบไตรกลีเซอไรด์ไม่สูงกว่า 0.20%wt

20. กลีเซอรินอิสระ (Free Glycerine) ใช้ระบุถึงกลีเซอรินอิสระที่แยกไม่หมดในไบโอดีเซลเมื่อมีค่าสูงไม่เกินไปอาจส่งผลให้เกิดการอุดตันที่ระบบกรองน้ำมัน อีกทั้งการมีกลีเซอรินสูงเกินไปส่งผลให้การเผาไหม้ไบโอดีเซลจะเกิดสารพิษปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมในปริมาณที่อาจก่อให้เกิดอันตราย วิธีการตรวจวัดกลีเซอรินมีหลายวิธี แต่ที่ระบุในข้อกำหนดไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ กรมธุรกิจพลังงานให้ทดสอบตามวิธี EN 14105 และผลที่ได้ต้องมีค่าไม่สูงกว่า 0.20%wt

21. กลีเซอรินทั้งหมด (Total Glycerine) ใช้ระบุถึงกลีเซอรินทั้งหมดที่แยกไม่หมดในไบโอดีเซลซึ่งประกอบด้วยกลีเซอรินอิสระ โมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ ในการทดสอบมีหลายวิธี แต่ที่ระบุในข้อกำหนดไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ กรมธุรกิจพลังงานให้ทดสอบตามวิธี EN 14105 ซึ่งผลที่ได้ต้องมีค่าไม่สูงกว่า 0.25%wt

22. โลหะกลุ่มที่ 1 : Na, K ให้ทดสอบตามวิธี EN 14108 สำหรับการวัดโซเดียม และ EN 14109 สำหรับการวัดโปแตสเซียม ผลทดสอบต้องโซเดียมและโปแตสเซียมไม่สูงกว่า 5.0 mg/kg

โลหะกลุ่มที่ 2 : Ca, Mg ให้ทดสอบตามวิธี prEN 14538 ต้องมีโลหะกลุ่มที่ 2 รวมกันไม่สูงกว่า 5.0 mg/kg

23. ฟอสฟอรัส (Phosphorus) อาจปนอยู่ในไบโอดีเซลได้จากการปนเปื้อนจาก สารเติมแต่งหรือจากการเกิดสบู่ ในกระบวนการผลิตแล้วกำจัดออกไม่หมด เป็นสารที่ทำให้เกิดตะกรันตกค้างในกระบอกสูบและระบบฉีด น้ำมันเชื้อเพลิงตามข้อกำหนด ให้ทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM D4951 จะต้องมีค่าไม่สูงกว่า 0.001%wt

24. สารแต่งเติม (Additive) เป็นสารที่เติมผสมลงในไบโอดีเซลเพื่อเพิ่ม ประสิทธิภาพการเผาไหม้ช่วยชะล้างและทำความสะอาดเครื่องยนต์หรืออื่นๆ ไม่มีการระบุวิธี ทดสอบที่ชัดเจน แต่ให้ เป็นไปตามความเห็นชอบจากอธิบดี กรมธุรกิจพลังงานในมาตรฐาน ASTM

ตารางที่ 9 ข้อกำหนดคุณสมบัติของไบโอดีเซลและวิธีการทดสอบ

ลำดับ	คุณสมบัติ	ข้อกำหนด	วิธีทดสอบ
1	เมทิลเอสเทอร์ (Methyl Ester) (%wt)	ไม่ต่ำกว่า 96.5	EN 14103
2	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 °C (kg/m ³)	ไม่ต่ำกว่า 860-900	ASTM D1298
3	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 °C (cSt)	ไม่ต่ำกว่า 3.5-5.0	ASTM D455
4	จุดวาบไฟ (Flash point) (°C)	ไม่ต่ำกว่า 120	ASTM D93
5	กำมะถัน (Sulphur) (%wt)	ไม่สูงกว่า 0.0010	ASTM D2622
6	กากถ่าน (10% ของกากที่เหลือจากการกลั่น) (%wt)	ไม่สูงกว่า 0.30	ASTM D4530
7	จำนวนซีเทน (Cetane Number)	ไม่ต่ำกว่า 51	ASTM D613
8	เถ้าซัลเฟต (Sulfated Ash) (%wt)	ไม่สูงกว่า 0.020	ASTM D874
9	น้ำ (Water) (%wt)	ไม่สูงกว่า 0.050	ENISO 12937
10	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด (Total Contaminant) (%wt)	ไม่สูงกว่า 0.0024	ASTM D5452
11	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Strip Corrosion)	ไม่สูงกว่าเลข 1	ASTM D130
12	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110°C	ไม่ต่ำกว่า 6	EN 14112
13	ความเป็นกรด (Acid Number) (mg/KOH/g)	ไม่สูงกว่า 0.50	ASTM D664
14	ค่าไอโอดีน (g Iodine ต่อ 100 g)	ไม่สูงกว่า 120	EN 14111
15	กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ (%wt)	ไม่สูงกว่า 12.0	EN 14103
16	เมทานอล (Methanol) (%wt)	ไม่สูงกว่า 0.20	EN 14110
17	โมนोगลิเซอไรด์ (Monoglyceride) (%wt)	ไม่สูงกว่า 0.80	EN 14105
18	ไดกลีเซอไรด์ (Diglyceride) (%wt)	ไม่สูงกว่า 0.20	EN 14105
19	ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) (%wt)	ไม่สูงกว่า 0.20	EN 14105

ตารางที่ 9 ข้อกำหนดคุณสมบัติของไบโอดีเซลและวิธีการทดสอบ (ต่อ)

ลำดับ	คุณสมบัติ	ข้อกำหนด	วิธีทดสอบ
20	กลีเซอรินอิสระ (Free Glycerine) (%wt)	ไม่สูงกว่า 0.02	EN 14105
21	กลีเซอรินทั้งหมด (Total Glycerine) (%wt)	ไม่สูงกว่า 0.25	EN 14105
22	โลหะกลุ่มที่ 1 : Na, K (mg/kg)	ไม่สูงกว่า 5.0	EN 14108-9
	โลหะกลุ่มที่ 2 : Ca, Mg (mg/kg)	ไม่สูงกว่า 5.0	EN 14538
23	ฟอสฟอรัส (Phosphorus) (%wt)	ไม่สูงกว่า 0.001	ASTM D4951
24	สารแต่งเติม (Additive) (ถ้ามี)	ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน	

ที่มา: (กรมธุรกิจพลังงาน, 2558)

เครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก

เครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก หมายถึงเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยวขนาดไม่เกิน 20 HP เป็นเครื่องยนต์ต้นกำลังที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานเกษตรกรรมสำหรับในประเทศไทยเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กที่นิยมใช้จะเป็นเครื่องยนต์สูบนอนสูบเดี่ยว ระบายความร้อนด้วยน้ำ (อำพล, 2545) โดยหลักการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลคือ เมื่ออากาศถูกอัดตัวจะมีความร้อนสูงขึ้น แต่ถ้าอากาศถูกอัดตัวอย่างรวดเร็ว เมื่อฉีดละอองน้ำมันเชื้อเพลิงเข้าไปในอากาศที่ร้อนจัดการอัดตัว ก็จะเกิดการเผาไหม้ขึ้นทันที ทำให้เกิดกำลังงานขึ้น กำลังงานก็จะถูกนำไปใช้ในรูปแบบของแรงขับ ผ่านลูกสูบและก้านสูบทำให้เพลาช้อเหวี่ยงหมุน ณ กำลังอัดเดียวกัน อากาศที่อุณหภูมิเริ่มต้นสูงกว่า เมื่อถูกอัดย่อมมีอุณหภูมิสูงกว่า

เครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก ALL POWER รุ่น 186F

โดยมีข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก All Power รุ่น 186F ดังแสดงในตารางที่ 10 และภาพที่ 4

ตารางที่ 10 ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก All Power รุ่น 186 F

ข้อมูลทางเทคนิค	รายละเอียด
แบบเครื่องยนต์	ดีเซล 4 จังหวะ สูบเดี่ยว ระบายความร้อนด้วยอากาศ
ความกว้างกระบอกสูบ x ช่วงชัก	86 mm x 72 mm
ปริมาตรกระบอกสูบ	418 cm ³
กำลังม้าเบรกสูงสุด	10 hp ที่ 3000 rpm
กำลังม้าเบรกต่อเนื่อง	8.85 hp ที่ 3600 rpm
อัตราส่วนแรงอัด	19:1
ระบบสตาร์ท	ชุดเชือกดึงสตาร์ทแบบสปริงรั้งกลับ
ชนิดน้ำมันหล่อลื่น	SAE 10W30 (above cc grade)
ความจุน้ำมันหล่อลื่น	1.65 L
ความจุถังน้ำมันเชื้อเพลิง	5.5 L
น้ำมันเชื้อเพลิง	ดีเซล
ขนาดเครื่องยนต์ (กxยxส)	470 mm x 420 mm x 494 mm
น้ำหนักสุทธิของเครื่องยนต์	48 kg



ภาพที่ 4 เครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก All Power รุ่น 186 F

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(ปิยรัตน์ศิริ, 2556) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร 6 ชนิด ได้แก่ ลำไย, ขนุน, มะขาม, เต็ง, ถ่าน และเถ้าผสม ซึ่งทำการศึกษาสภาวะของปฏิกิริยา ได้แก่ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา พบว่า สภาวะที่ให้ผลผลิตไบโอดีเซลดีที่สุดคือการให้เถ้าลำไย 10%wt และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 100:1 ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1 hr ให้ผลผลิตไบโอดีเซล เมทิลเอสเทอร์ที่ 92% และเอทิลเอสเทอร์ที่ 89% ซึ่งพบว่าจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ร่วมกับ เทคนิค EDS พบว่าการกระจายตัวของเถ้าไม้ลำไยนั้นกระจายตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ และเมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุที่มีองค์ประกอบสูงสุดสามลำดับพบว่า มีธาตุออกซิเจน 48.27%, โพแทสเซียม 20.19%, แคลเซียม 14.53% และคาร์บอน 9.51% ตามลำดับ จากนั้นทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซล พบว่าศึกษาค่าความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM D4052-09 โดยทั้งชนิดเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 875.90 และ 870.80 kg/m³ ตามลำดับ ศึกษาค่าความหนืดตามมาตรฐาน ASTM D445-09 โดยทั้งชนิดเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์มีค่าความหนืดเท่ากับ 4.12 และ 4.69 cSt ตามลำดับ ค่าจุดวาบไฟตามมาตรฐาน ASTM D93-10 โดยทั้งชนิดเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์มีค่าจุดวาบไฟเท่ากับ 120 และ 111 °C ตามลำดับ และค่าความเป็นกรดตามมาตรฐาน ASTM D664-09 โดยทั้งชนิดเมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์มีค่าความเป็นกรดเท่ากับ 0.04 mg KOH/g

(Sharma et al., 2012) การศึกษาการใช้เถ้าจากไม้ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำ โดยทำการให้ความร้อนกับไม้ที่อุณหภูมิ ในช่วง 500–1,200 °C โดยทำการกระตุ้นทางเคมีด้วย K₂CO₃ และ CaCO₃ และทำการศึกษาวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค พื้นที่ผิว องค์ประกอบธาตุ และสัณฐานวิทยาของผิวด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) และ X-Ray Diffraction (XRD) พบว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลต่อขยายตัวของอนุภาคที่มีพื้นที่เพิ่มขึ้น ความละเอียดเพิ่มขึ้นจากเดิมอย่างชัดเจนตามอุณหภูมิ ในเถ้าไม้พบว่ามี Si, Ca, Mg, Na, K, Al และ P เป็นองค์ประกอบ ซึ่งปริมาณธาตุแต่ละชนิดในแต่ละช่วงอุณหภูมิมีปริมาณของธาตุที่แตกต่างกันออกไป โดยมีค่าซิลิกอนสูงที่สุดในทุกเถ้าที่ทดสอบ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาที่ 800 °C ขึ้นไป พบว่าปริมาณแคลเซียมเพิ่มขึ้น และ

เพิ่มขึ้นอย่างเป็นลำดับ โดยระยะเวลาในการเผาและเก็บรักษาเอามีผลต่อการให้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของเอามีลักษณะเป็นผงคล้ายแป้ง ซึ่งส่งผลให้มีความไวต่อความชื้นในอากาศ ผุ่นละอองต่างๆ ที่ทำให้ความสกปรกและเกิดการเปลี่ยนแปลงของตัวเร่งปฏิกิริยา การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันศึกษาในสภาวะที่ดีที่สุดคือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ 12:1 ทำปฏิกิริยาที่ 65 °C โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 800 °C ให้ผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ดีที่สุดในที่ 98.70% และทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ จุดวาบไฟตามมาตรฐาน ASTM D-93 เท่ากับ 164 °C ความหนืดตามมาตรฐาน ASTM D-445 4.21 cSt ค่าความเป็นกรดตามมาตรฐาน ASTM D-664 0.05 mg KOH/g

(Manique et al., 2012) ศึกษาการเผาเกลือที่อุณหภูมิ 300 °C เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันพืชใช้แล้ว เนื่องจากช่วงอุณหภูมิดังกล่าวนี้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง พื้นที่ผิวของเอาสีเส้นผ่าศูนย์กลาง แลรูพรุนของเอา สำหรับการเผาที่สูงขึ้นอุณหภูมิการเผาใหม่ของสารประกอบอินทรีย์ของเกลือขาวมีการเปลี่ยนแปลงโดยเฉพาะช่วงอุณหภูมิการเผาที่ 500–700 °C พบว่าปริมาณ 20% ของเอาจะประกอบไปด้วยซิลิกา และเมื่อเผาที่อุณหภูมิที่สูงกว่า 800 °C ที่ทำให้เกิดรูปแบบผลึก ลดพื้นที่ผิวและความสามารถในการดูดซับ โดยเงื่อนไขที่ดีที่สุดอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 65 °C นาน 1 hr เถ้าเกลือที่ปริมาณ 4% จะทำให้ไบโอดีเซลที่ได้มีความบริสุทธิ์เทียบเท่าการใช้แมกนีเซียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา 1% ทำให้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์ โดยยืนยันจากการวิเคราะห์ทางเทคนิค EDS และ FTIR ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความขรุขระของผิวเอาเกลือขาว พื้นที่ผิวของเอาเกลือขาวมีรูพรุนขนาดใหญ่ และยังมีปริมาณซิลิกาสูงที่เป็นตัวช่วยดูดซับสิ่งสกปรกอินทรีย์และอนินทรีย์ในไบโอดีเซลได้ดี

(Chen et al., 2015) ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยการเผาเกลือที่อุณหภูมิ 400, 600, 800 °C นาน 4 hr ทำการศึกษาวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค พื้นที่ผิว องค์ประกอบธาตุ และสัณฐานวิทยาของผิว ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) และ X-Ray Diffraction (XRD) พบว่าอนุภาคของเอามีการรวมตัวกันจำนวนมาก นอกจากนี้ยังทำการศึกษาการใช้เปลือกไข่เป็นตัวเสริมในการเผาพร้อมกับเกลือขาวเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในช่วงอุณหภูมิเดียวกันจะเห็นได้ว่าการใช้เปลือกไข่รวมการกระจายตัวของเอาจะเกิดได้อย่างชัดเจนกว่า จากนั้นทำการศึกษาธาตุที่อยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า ในการใช้เกลือขาวที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 °C มีปริมาณมีออกซิเจน 47.70% ซิลิกอน 38.30% และไม่พบปริมาณของแคลเซียม แต่สำหรับการเพิ่มการใช้เปลือกไข่ในการเผาพร้อมกับเกลือขาวที่อุณหภูมิ 800 °C เท่ากัน พบว่า มีปริมาณมี

ออกซิเจน 42.20% ซิลิกอน 25.60% และแคลเซียม 27.40% และการใช้เปลือกไข่ในการเผา ร่วมกับแกลบข้าวที่เผาด้วยอุณหภูมิ 800 °C นาน 4 hr ในอัตราส่วน 7:3 ทำการทดลองกับน้ำมัน ปาล์มบริสุทธิ์ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1 อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 65 °C นาน 4 hr และตัวเร่งปฏิกิริยา 7% ได้ไบโอดีเซล 91.5% และทำการเปรียบเทียบกับการใช้แคลเซียม ออกไซด์ ได้ไบโอดีเซล 93.2% จากอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ณ อุณหภูมิ 65 °C นาน 3 hr ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% และเนื่องจากแกลบเผามีองค์ประกอบของซิลิกอน ซึ่งมีคุณสมบัติเป็น สารดูดซับความชื้น แต่มีคุณสมบัติในการเร่งปฏิกิริยาไม่มาพอ เมื่อเทียบกับการเพิ่มการใช้เปลือกไข่ที่ เป็นตัวเสริมในการเกิดธาตุแคลเซียมในกระบวนการที่มีผลต่อการเร่งปฏิกิริยา ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวนี้ จะทำให้ไบโอดีเซลที่ได้มีความใสขึ้น แกลบและเปลือกไข่จึงเป็นตัวเร่งทางเลือกหนึ่งที่มีประสิทธิภาพ สูง มีต้นทุนต่ำและเหมาะสมแก่การนำมาใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

(Zhao et al., 2018) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูง และตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการเผาแกลบที่อุณหภูมิ 400–800 °C นาน 4 hr เพื่อสังเคราะห์ CaO ที่ทำ การชุบแบบเปียกกับเถ้าแกลบข้าวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับการศึกษาวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค พื้นที่ผิว องค์ประกอบธาตุ และสัณฐานวิทยาของผิว ด้วย เทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) และ X-Ray Diffraction (XRD) พบว่า เถ้าที่ผ่านการชุบด้วย CaO มีความสม่ำเสมอและมีรูพรุนเพิ่มมากขึ้น และจากการวิเคราะห์ธาตุพบว่า เถ้าที่ แกลบข้าวเผาที่อุณหภูมิ 700 °C มีปริมาณมีออกซิเจน 24.71% ซิลิกอน 13.72% และ แคลเซียม 1.30% เถ้าที่ผ่านการชุบด้วย CaO เเผาที่อุณหภูมิ 700 °C มีปริมาณมีออกซิเจน 26.68% ซิลิกอน 6.68% และ แคลเซียม 20.48% ความสามารถในการเตรียมสารตัวเร่งปฏิกิริยาพาราเมเตอร์ปฏิกิริยา และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ผลการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเร่ง ปฏิกิริยาส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิโครงสร้างและพื้นฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนการบำบัด ผลผลิต สูงสุดอาจอยู่ที่ 93.40% ในอุณหภูมิเผาที่ 700 °C ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมของเวลาในการทำ ปฏิกิริยา 180 min ตัวเร่งปฏิกิริยา 8% และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1 นอกจากนี้ ยังสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ซ้ำได้ถึง 10 รอบ พบว่าการสูญเสียประสิทธิภาพของไบโอดีเซล ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลไม่สูงมากนัก ได้ผลผลิต 85% ขึ้นไป ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ขึ้นจาก แกลบข้าวที่เผาที่มีองค์ประกอบของซิลิกอนและจากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้เป็นอย่างดีเมื่อทำงาน ร่วมกับ CaO บริสุทธิ์ .ซึ่งเป็นแนวทางในการศึกษารวมระหว่างซิลิกอนและแคลเซียมต่อไป เมื่อนำ ไบโอดีเซลที่ผลิตได้ไปวิเคราะห์คุณสมบัติตามมาตรฐาน ASTM D-6751 พบว่า มีค่าความหนืดอยู่ที่ 3.61 cSt จุกวาวไฟ 151 °C ค่าความเป็นกรด 0.21 mg KOH/g ค่าความหนาแน่น 882 kg/m³

(ศิริวัฒนา และคณะ, 2556) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้น้ำมันมะพร้าวที่สกัดจากเปลือกทิวมะพร้าว ซึ่งเป็นส่วนเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปมะพร้าวของเกษตรกร โดยใช้แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแครงเผาที่อุณหภูมิ 1,300 °C เป็นเวลา 4 hr ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1, 2 และ 3% ตามลำดับ ทำการทดลองโดยใช้อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลกับน้ำมัน 6:1, 9:1 และ 12:1 อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 50, 55 และ 60 °C และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 0.5, 1, 1.5 และ 2 hr พบว่าสภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่สุด คือ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 3%wt ต่อปริมาตรเมทานอล สัดส่วนโมลของเมทานอลกับน้ำมันที่ 12:1 อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 60 °C เป็นเวลา 2 hr ให้ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซล 99.50% และจากการทดสอบการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าสามารถนำกลับมาใช้งาน 1 ครั้ง ให้ได้ไบโอดีเซล 88.30% และมีคุณสมบัติผ่านมาตรฐานของ ASTM D6751 และ EN 14214

(ไชยยันต์ และคณะ, 2551) ศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ 2 วิธี คือ ชนิดเติมโพแทสเซียมซึ่งผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 °C และชนิดเติมแคลเซียมที่อุณหภูมิ 900 °C จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence พบว่าชนิดเติมโพแทสเซียม มีปริมาณโพแทสเซียม 6.44% และชนิดเติมแคลเซียมมีปริมาณแคลเซียมร้อยละ 4.48% ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยแปรผันจำนวนการใช้งานน้ำมันพืช 1, 3 และ 5 ครั้ง และ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันต่อเมทานอลที่ 1:10, 1:15, และ 1:20 โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 60 °C ที่เวลา 3 hr ผลจากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟพบว่า เมทิลเอสเทอร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนระหว่างน้ำมันต่อเมทานอล โดยปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งชนิดแคลเซียมจะให้ปริมาณร้อยละเมทิลเอสเทอร์ระหว่าง 1.15-4.56 ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดโพแทสเซียม จะให้ปริมาณร้อยละเมทิลเอสเทอร์สูงกว่าอย่างชัดเจนคือระหว่าง 83.24-98.97% จากนั้นทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ตามมาตรฐานกระทรวงพลังงาน พบว่าค่าความหนืด 4.61 cSt ค่าความร้อน 39,886 kJ/kg

(Vadery et al., 2014) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถั่วมะพร้าวซึ่งทำการศึกษาการเตรียมตัวเร่งที่อุณหภูมิการเผา 300-500 °C เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในถั่วพบว่าปริมาณโพแทสเซียมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการให้อุณหภูมิความร้อน ในขณะที่ธาตุตัวอื่นๆลดลง ซึ่งจากการศึกษาพบว่าช่วงอุณหภูมิการเผาที่ 350 °C พบการเกิดผลผลิตไบโอดีเซลที่มากที่สุดและเกิดผลผลิตลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผา ในส่วนของลักษณะพื้นผิวของถั่วเกิดเปลี่ยนแปลงลักษณะชัดเจนโดยเพราะรูพรุนและการกระจายตัวของถั่ว เมื่อทำการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันต่อเมทานอลที่ 6:1, 9:1, 12:1 และ 15:1 ศึกษาปริมาณตัวเร่ง

ปฏิกิริยาที่ 3–8% ศึกษาอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 45, 55 และ 60 °C ศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยา 15–75 min พบว่าเถ้ามะพร้าวที่อุณหภูมิ 350 °C ตัวเร่งปฏิกิริยา 7% เมื่อทำอัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันต่อเมทานอลที่ 12:1 ที่ 45 °C เป็นเวลา 45 min เป็นช่วงการผลิตที่ดีที่สุดและเกิดเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันของไบโอดีเซล มากกว่า 99.86%

(ญาณินท์ และพัชยาภรณ์, 2558) ศึกษาการใช้เถ้าจากกากปาล์มและกากมะพร้าวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน พร้อมทั้งศึกษาองค์ประกอบทางเคมีในเถ้าทั้งสองชนิด โดยการนำเถ้าที่ได้ทำการแคลไซน์ด้วยความร้อน 600 °C เป็นเวลา 45 min จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าทั้งสองชนิดด้วย X-Ray Fluorescence พบว่าเถ้ากากปาล์มมีโพแทสเซียมออกไซด์ 11.29% มีค่าแคลเซียมออกไซด์ 65.69% และเถ้ากากมะพร้าวมีโพแทสเซียมออกไซด์ 32.85% มีค่าแคลเซียมออกไซด์ 4.73% ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 65 °C เป็นเวลา 15 min และใช้เมทานอล 45 ml พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เถ้ากากปาล์มและเถ้ากากมะพร้าวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.25 g : เถ้ากากปาล์ม 1.75 g : เมทานอล 45 ml ค่าร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้คือ 85% และ 97% ตามลำดับ จากการตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติไบโอดีเซลพบว่า การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เถ้ากากมะพร้าวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีค่า มีความเป็นเมทิลเอสเทอร์ ความหนืดเท่ากับ 5.53 cSt จุดวาบไฟเท่ากับ 171 °C จุดติดไฟเท่ากับ 192 °C และค่าความร้อนเท่ากับ 36.40 MJ/kg

(สุภกรม และคณะ, 2552) ศึกษาการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันในน้ำมันปาล์มและน้ำมันพืชใช้แล้วเพื่อการผลิตไบโอดีเซลโดยศึกษาสภาวะการให้ความร้อนแบบต่อเนื่องเป็นเวลา 4 hr จากการศึกษพบว่าภาวะแทรกออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ผลผลิต โอดีเซล 96.33%, 86% ในน้ำมันปาล์มและน้ำมันพืชใช้แล้วตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับออกไซด์ของโลหะชนิดอื่นๆพบว่าให้ผลมากกว่าถึง 50% ดังนั้นแคลเซียมออกไซด์จึงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ที่ดีที่สุดในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันแต่เนื่องจากน้ำมันพืชใช้แล้วมีค่าความเป็นกรดของไขมันอิสระอยู่สูงมากทำให้เกิดเป็นปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันขึ้นได้ผลเป็นสบู่ จึงต้องทำการทำปฏิกิริยา 2 ขั้นตอนคือปฏิกิริยาเอสเทอร์ิฟิเคชันเพื่อกำจัดกรดไขมันอิสระและตามด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันเพื่อผลิตไบโอดีเซล ซึ่งส่งผลให้ร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซลลดลง โดยการใส่แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล พบว่าคุณสมบัติของมันมีค่าเป็นไปตามมาตรฐาน โอดีเซลที่ผลิตได้จากน้ำมันปาล์มดิบค่าความหนาแน่นเท่ากับ 878 kg/m³ ค่าความหนืดเท่ากับ 4.8 cSt ค่าจุดวาบไฟ

เท่ากับ 174 °C และไบโอดีเซลที่ได้จากน้ำมันพืชใช้แล้วโดยค่าความหนาแน่นเท่ากับ 877 kg/m³ ค่าความหนืดเท่ากับ 4.60 cSt ค่าจุดควบไฟเท่ากับ 188 °C

(อัจฉรา และอภิพงษ์, 2557) การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวีวิธพันธ์ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลนั้นจัดว่าเป็นกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวีวิธพันธ์โดยทั่วไปจะละลายในตัวทำปฏิกิริยาได้น้อย ทำให้สามารถแยกไบโอดีเซลออกมาได้ง่าย และยังสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้หลายครั้ง นอกจากนี้หลังกระบวนการไม่จำเป็นต้องมีกระบวนการปรับสภาพหรือทำให้ไบโอดีเซลเป็นกลางจึงไม่เกิดน้ำเสียขึ้นจากหน่วยการผลิตนี้ ส่งผลให้ระบบการผลิตด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวีวิธพันธ์มีหน่วยการผลิตที่ไม่ซับซ้อนเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ ในปัจจุบันแคลเซียมออกไซด์จัดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวีวิธพันธ์ชนิดหนึ่งที่มีรายงานผลการวิจัยการนำมาใช้ผลิตไบโอดีเซลอย่างแพร่หลาย ทั้งนี้เนื่องจากแคลเซียมออกไซด์สามารถผลิตได้จากวัสดุธรรมชาติ และของเสียอุตสาหกรรม ทำให้หาได้ง่ายและราคาไม่แพง นอกจากนี้แคลเซียมออกไซด์ยังมีคุณสมบัติความแข็งแรงของเบสค่อนข้างสูง ให้ผลผลิตไบโอดีเซลสูงถึง 80–98% และละลายในแอลกอฮอล์ได้น้อยเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มอัลคาไลน์เอิร์ธด้วยกัน อย่างไรก็ตาม ความเร็วของปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ยังช้ากว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ ดังนั้นในรายงานนี้จะได้กล่าวถึงการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์โดยการสังเคราะห์เพื่อให้มีพื้นที่ผิวและความแข็งแรงของเบสสูงขึ้น รวมถึงทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กลงเพื่อจะนำไปใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตไบโอดีเซลต่อไป

(เขาวลิต และคณะ, 2552) ศึกษาไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วมาทำการทดลองและหาคุณภาพของไบโอดีเซล โดยทดลองใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลสี่จังหวะแบบสูบเดี่ยวเปรียบเทียบกับดีเซลเมื่อทดลองใช้งานที่ระยะเวลา 250, 500, 750 และ 1,000 hr ใช้กับเครื่องยนต์ยี่ห้อมาร์รุ่น TF 105–LM ซึ่งเป็นเครื่องยนต์ดีเซลสี่จังหวะแบบสูบเดี่ยว พบว่า มีการสึกหรอของเครื่องยนต์น้อยมาก อีกทั้งไม่มีสิ่งปนเปื้อนหลงเหลือจากการสันดาปอันจะก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมใดๆ แสดงให้เห็นว่าไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว มีคุณภาพและสามารถนำไบโอดีเซล 100% นี้มาใช้งานกับเครื่องยนต์ดีเซลสี่จังหวะแบบสูบเดี่ยวได้โดยไม่เกิดผลเสียต่อเครื่องยนต์

(ธรรมศักดิ์ และอนุกุล, 2553) ศึกษาสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กโดยใช้ไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับใช้น้ำมันดีเซล จากการศึกษาวิจัย พบว่า ในช่วงความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1,200–1,800 rpm โดย ให้ค่าแรงบิดสูงสุดที่ความเร็วรอบของ

เครื่องยนต์ 1,600 rpm ส่วนกำลังของเครื่องยนต์ที่ได้จากการใช้ไบโอดีเซลในอัตราส่วนผสมต่างๆ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังที่ได้จากน้ำมันดีเซลในช่วง 1,200–2,200 rpm และจะให้กำลังงานสูงสุดที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ประมาณ 2,200 rpm โดยมีอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจำเพาะของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันไบโอดีเซลในอัตราส่วนผสมต่างๆ สูงกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลอยู่ประมาณ 10-15% และการใช้น้ำมันไบโอดีเซลในอัตราส่วนผสมต่างๆ จะให้ค่าวินดำน้อยกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลประมาณ 40% และมีปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่น้อยกว่าการใช้น้ำมันดีเซล

(วุฒินันท์ และคณะ, 2550) การศึกษาการใช้ดีเซลปาล์มกับเครื่องยนต์ดีเซลสำหรับการเกษตร โดยใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยว ยี่ห้อคูโบต้า รุ่น ET115 กับดีเซลปาล์มที่ผสมระหว่างดีเซล (ปตท.) กับน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ในอัตราส่วนผสมโดยปริมาตร 95:5, 90:10, 85:15, 80:20 ตามลำดับ จากการทดสอบพบว่า การผสมดีเซลกับน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ทุกอัตราส่วนไม่ทำให้เกิดการแยกชั้นและตกตะกอน ทั้งนี้ค่าความร้อนของดีเซลปาล์มลดลงเมื่อส่วนผสมของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์เพิ่มมากขึ้น และในการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์พบว่าเมื่อใช้ดีเซลปาล์มที่อัตราส่วนผสม 80:20 โดยปริมาตร จะให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าการใช้ไบโอดีเซล และส่งผลให้กำลังของเครื่องยนต์มากกว่าที่ความเร็วรอบเท่ากัน ซึ่งจะทำให้มีอัตราการสิ้นเปลืองดีเซลปาล์มน้อยกว่าการใช้ไบโอดีเซล

(จักรกฤษณ์ และธนุพล, 2554) ทำการศึกษากระบวนการผลิตน้ำมันผสมสำหรับเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ในการเกษตร โดยน้ำมันผสมประกอบด้วยดีเซลและน้ำมันปาล์มดิบและน้ำในรูปอิมัลชัน การผลิตถูกทำไปทดสอบหาคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงโดยเทียบกับดีเซลท้องตลาด การทดสอบสมบัติทางเชื้อเพลิง ได้แก่ ค่าความร้อน ค่าความหนืด และทดสอบการใช้งานกับเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ในการเกษตร จากการวิจัยพบว่า การใช้น้ำมันผสมในอัตราส่วนโดยปริมาตรของดีเซล น้ำมันปาล์มดิบ และน้ำ (สัดส่วน 80:15:5) จะได้สมรรถนะที่ใกล้เคียงกับดีเซลมากที่สุด โดยดีเซลผสมมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 846 kg/m^3 ค่าความหนืดเท่ากับ 8.20 cSt ค่าความร้อนเท่ากับ $41,937 \text{ kJ/kg}$ จุดวาบไฟเท่ากับ $87 \text{ }^\circ\text{C}$ และทำการทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลที่ความเร็วรอบ 1,200–2,000 rpm กำลังของเครื่องยนต์มีค่าใกล้เคียงกับดีเซลมากที่สุดในช่วงความเร็วรอบ 1,200–1,600 rpm และในช่วงความเร็วรอบ 1,600–2,000 rpm จะได้แรงบิดของเครื่องยนต์ที่สูงขึ้นและใกล้เคียงกับการใช้ดีเซล

(คุณานนท์ และเกียรติฟ้า, 2556) ทำการศึกษาสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้เชื้อเพลิงไบโอดีเซลจากไขมันไก่ โดยทำการทดสอบเชื้อเพลิงผสมระหว่างเชื้อเพลิงดีเซลกับเชื้อเพลิงไบโอดีเซลจากไขมันไก่ ในสัดส่วนผสมโดยปริมาตร 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ 0:100 ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบกับดีเซล โดยทำการทดสอบกับเครื่องยนต์ยี่ห้อ TOYOTA รุ่น LN-40 4 สูบ ขนาด 2,188 cm³ จากการทดสอบ พบว่าเชื้อเพลิงผสมในสูตรต่างๆ มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงดีเซลมากที่สุดคือ น้ำมันเชื้อเพลิงผสมอัตราส่วน 90:10 โดยจากผลการทดสอบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลพบว่าค่าความร้อนของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลมีค่าอยู่ที่ 41,449 kJ/kg และมีค่าความหนืดอยู่ที่ 4.45 cSt และมีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ที่ 880 kg/m³ ในส่วนของการทดสอบด้านสมรรถนะ พบว่าเชื้อเพลิงผสมในสัดส่วนผสมต่างๆมีค่าแรงบิด และกำลังเบรکت่ำกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ไขมันดีเซลประมาณ 3.86–8.97% และ 4.69–11.48% ตามลำดับ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเชื้อเพลิงผสมมีค่าสูงกว่าใช้เชื้อเพลิงดีเซลประมาณ 1.75–22.65% ในด้านการปล่อยมลพิษไอเสียเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงผสมในสัดส่วนต่างๆมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ต่ำกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซลประมาณ 15.58% ถึง 28.15–50.81% ตามลำดับ ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) มีสูงกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซลประมาณ 2.36–11.82% ส่วนปริมาณควันดำเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงไบโอดีเซลมีค่าน้อยกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซลทุกอัตราส่วน

(ศุภกฤษณ์ และทงเกียรติ, 2558) ทำการศึกษาการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลเกษตรกรรมที่ใช้เชื้อเพลิงผสมดีเซล ไบโอดีเซล และน้ำในรูปอิมัลชัน ที่สัดส่วนเชื้อเพลิงผสม ดีเซล ไบโอดีเซลและน้ำ 70:25:5, 60:35:5 และ 50:45:5 โดยปริมาตร เครื่องยนต์เกษตรกรรมที่ใช้ในการทดสอบใน ห้องปฏิบัติการ คือ เครื่องยนต์ดีเซลยี่ห้อ ยันมาร์ รุ่น TF 75-LM ซึ่งผลการศึกษาพบว่าเชื้อเพลิงผสมในรูปอิมัลชันที่สัดส่วน 60:35:5 และ 70:25:5 โดยทำการศึกษาค่าความร้อน พบว่าค่าความร้อนของดีเซลมีค่าเท่ากับ 46,935.23 kJ/kg เชื้อเพลิงผสมในรูปอิมัลชัน (70:25:5) มีค่าเท่ากับ 43,881.09 kJ/kg, เชื้อเพลิงผสมในรูปอิมัลชัน (60:35:5) ,มีค่าเท่ากับ 42,007.92 kJ/kg เชื้อเพลิงผสมในรูปอิมัลชัน (50:45:5) ,มีค่าเท่ากับ 38,097.79 kJ/kg และทำการศึกษาสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบตั้งแต่ 1,200–2,000 rpm โดยเพิ่มความเร็วรอบของเครื่องยนต์ครั้งละ 200 rpm ผลของสมรรถนะของเครื่องยนต์พบว่า ที่ความเร็วรอบประมาณ 1,800–2,000 rpm จะมีค่าแรงบิดใกล้เคียงกับดีเซล กำลังเบรกของเครื่องยนต์ที่ได้ต่ำกว่าดีเซลเล็กน้อยและมีค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเครื่องยนต์ใกล้เคียงกับดีเซล แต่มีมลพิษในไอเสียจากการเผาไหม้ต่ำกว่า และการเผาไหม้สมบูรณ์กว่าการใช้ดีเซล

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้มีเพื่อศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยการใช้เถ้าที่ได้จากชีวมวลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากเถ้าชีวมวลชนิดต่างๆ พร้อมทั้งศึกษาคูณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตได้กับไบโอดีเซลมาตรฐาน และศึกษาการใช้ไบโอดีเซลกับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงอุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือการทดสอบ รวมถึงวิธีการดำเนินงานวิจัย เพื่อให้งานวิจัยเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ ดังนี้

การเตรียมอุปกรณ์ และสารเคมี

อุปกรณ์ที่ใช้ในงานการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ตามลักษณะของกระบวนการศึกษา ได้แก่ ส่วนที่ 1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนที่ 2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ส่วนที่ 3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ และส่วนที่ 4 เครื่องมือในการทดสอบการใช้ไบโอดีเซลกับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาของการศึกษางานวิจัยในครั้งนี้ประกอบด้วย

- 1) กาบมะพร้าว, ตาบปลาไผ่ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่
- 2) ไม้ลำไย, มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่
- 3) แกลบข้าว, ตำบลเหมืองแก้ว อำเภอมะริม จังหวัดเชียงใหม่
- 4) เตาแก๊สชีวมวล, ศูนย์วิจัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่
- 5) เตาอบความร้อนสูง Electric furnace อุณหภูมิใช้งานสูงสุด 1,500 °C ลวดความร้อนทำจาก MoSi₂ สามารถ ควบคุมอุณหภูมิด้วยระบบไมโครคอนโทรลเลอร์

- 6) สแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป และ เอ็นเนอร์จีดีสเพอร์ซีฟเอกซ์เรย์สเปกโทรมิเตอร์ (Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectrometer, SEM-EDS); JEOL JSM-6335F; 15 kV)

2. อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยมีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

- 1) น้ำมันพืชที่ผ่านการใช้แล้ว, ต้มแม่ใหม่ อำเภอสนทราย จังหวัดเชียงใหม่
- 2) ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าชีวมวล ได้แก่ เถ้าไม้ลำไย เถ้ากลบข้าว และเถ้ากาบมะพร้าว อุณหภูมิการแคลไซน์ 300, 600 และ 900 °C เป็นเวลา 4 hr
- 3) เมทานอล (Methanol)
- 4) ไอโซโพรพานอล (Isopropanol)
- 5) ฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein)
- 6) น้ำกลั่น
- 7) แผ่นให้ความร้อนพร้อมระบบกวนแบบแม่เหล็ก (Hot plate stirrer)
- 8) กรวยแยก (Flash separator)
- 9) เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
- 10) แท่งกวนแม่เหล็ก (Magnetic bar)

3. อุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซล

อุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติไบโอดีเซล โดยรายละเอียดต่างๆ มีดังนี้

- 1) ยูนิเวอร์แซลอินดิเคเตอร์ (Universal indicator)
- 2) ไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer)
- 3) อุปกรณ์วัดความหนืด (Viscometer)

- 4) เครื่อง GC-MS (Gas Chromatograph-Mass Spectrometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้เพื่อ การวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณที่ต้องการความแม่นยำสูง ใช้สำหรับวิเคราะห์ ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ หรือวิเคราะห์ความเป็นไบโอดีเซล ทดสอบด้วยเครื่อง GC-MS Agilent Technologies รุ่น 7683B ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน EN 14103

4.เครื่องมือในการทดสอบการใช้ไบโอดีเซลกับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก

อุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือในการทดสอบการใช้ไบโอดีเซลกับเครื่องยนต์ดีเซลขนาด เล็ก โดยรายละเอียดต่างๆ มีดังนี้

- 1) เครื่องยนต์ต้นกำลังที่นำมาทดสอบเป็นเครื่องยนต์ดีเซลแบบ Air-cooled รุ่น 186 F ขนาดกำลังสูงสุด 7.3 KW
- 2) ดีเซล (จำหน่ายตามท้องตลาด)
- 3) ดีเซล B5 (จำหน่ายตามท้องตลาด)
- 4) ไบโอดีเซลที่ได้จากงานวิจัย

การเตรียมและการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

1. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าไม้ลำไย เถ้าแกลบข้าว และเถ้ากาบมะพร้าว ซึ่งเป็น ชีวมวลที่หาได้ในชุมชน เริ่มต้นโดยนำเถ้าชีวมวลทั้งสองชนิดที่เหลือจากการเผาไหม้ในกระบวนการที่ อุณหภูมิ 800–1,200 °C แล้วทำการบดให้ละเอียด ทำการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 60 mesh เถ้าที่ได้ นำไปเผาซ้ำ (แคลไซน์) ที่อุณหภูมิ 300, 600 และ 900 °C เป็นเวลา 4 hr นำไปเก็บไว้ใน โถสุญญากาศเพื่อรักษาสภาพเถ้าก่อนนำไปตรวจวัดคุณสมบัติและทำปฏิกิริยาต่อไป

2. ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีด้วยการตรวจสอบลักษณะของเถ้า ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscope เพื่อช่วยในการ วิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของวัสดุ สร้างภาพโดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิว ร่วมกับ เทคนิค Energy dispersive X-ray spectrometer) เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ เถ้าชีวมวล

การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ทำการศึกษาปัจจัยสำหรับการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันกับน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดปัจจัยในการศึกษา 5 ปัจจัย ได้แก่

- ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ เถ้าไม้ลำไย เถ้าแกลบข้าว และเถ้ากาบมะพร้าว ปริมาณของตัวเร่ง
- ปฏิกิริยา 3 ระดับ ที่ 1-3 %wt ต่อน้ำหนักของน้ำมัน
- อัตราส่วนโดยมวลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว ได้แก่ อัตราส่วน 3:1, 6:1, 9:1 และ 12:1
- อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาไม่เกิน 65 °C
- เวลาในการทำปฏิกิริยาไม่เกิน 3 hr

วิธีการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 5

1. ทำการเตรียมน้ำมันสารตั้งต้นด้วยวิธีการกรอง และกำจัดความชื้นโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100-120 °C เป็นเวลา 30 min
2. ให้ความร้อนแก่น้ำมันที่อุณหภูมิ 60 °C กวนและให้ความร้อนด้วย Hot plate & Stirrer
3. นำตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราส่วนโดยมวลเมทานอลต่อน้ำมันตามเงื่อนไขการทดลองผลเข้าด้วยกันจากนั้นเทลงในน้ำมันที่อุณหภูมิ 60 °C พร้อมทั้งควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 hr
4. ใส่กรวยแยก ตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการแยกตัวของไบโอดีเซล และกลีเซอริน
5. ไบโอดีเซลที่ได้นำไปให้ความร้อนเพื่อทำการไล่ความชื้นในไบโอดีเซล
6. ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซล ตามวิธีที่กำหนดไว้ในหัวข้อถัดไปโดยวิธีการทดลองในข้างต้น



ภาพที่ 5 วิธีการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว

การวิเคราะห์คุณสมบัติไบโอดีเซล

จากการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน โดยการใช้เถ้าที่ได้จากชีวมวลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อได้ไบโอดีเซลแล้วทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซลได้รับการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดตามมาตรฐาน ASTM D2896 ค่าความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM D1298 ค่าความหนืดตามมาตรฐาน ASTM D445 ค่าจุดวาบไฟตามมาตรฐาน ASTM D93 และปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (EN) 14103 โดยผลการวิเคราะห์ต่างๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้

1.การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด

ค่าความเป็นกรดเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการกัดกร่อนของเครื่องยนต์ น้ำมันที่มีค่าความเป็นกรดสูงจะส่งผลให้เครื่องยนต์มีอายุการใช้งานสั้นลงได้ โดยการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด ตามมาตรฐาน ASTM D664 ดังแสดงในภาพที่ 6 โดยวิธีการทดสอบสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 1) ทำการชั่งน้ำหนักน้ำมันที่ต้องการทดสอบ 5 g เติมดวงไอโซโพรพิล 25 ml และหยดฟีนอล์ฟทาลีน 3-5 unit พร้อมเขย่ารวมกันในขวดรูปชมพู่
- 2) ทำการไทเทรตด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ความเข้มข้น 0.1 N ใส่บิวเรตพร้อมเปิดไล่อากาศออกเพื่อให้พร้อมใช้งาน และจดค่าเริ่มต้นเอาไว้
- 3) หยดสารละลายต่างจากบิวเรตลงในขวดรูปชมพู่พร้อมเขย่าให้เข้ากัน
- 4) สังเกตสีของน้ำมันจะเปลี่ยนเป็นสีชมพูหรือสีม่วงถาวร หยุดทำการไทเทรต
- 5) บันทึกปริมาณสารไทเทรต
- 6) คำนวณค่าความเป็นกรด จะได้ค่าความเป็นกรด mg KOH/g

$$A.V. = (56.1 \times N \times V)/m$$

สมการที่ 1

เมื่อ	A.V.	คือ	ค่าความเป็นกรด (mg KOH/g)
	N	คือ	ความเข้มข้นของสารละลายต่าง (N)
	V	คือ	ปริมาตรสารละลายต่างที่ใช้ไป (ml)
	m	คือ	น้ำหนักน้ำมันที่ใช้ในการทดสอบ (g)



ภาพที่ 6 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด

2. การวิเคราะห์ความหนาแน่น

การวัดความหนาแน่นของไบโอดีเซล เป็นการศึกษาทายภาพ ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1298 ดังแสดงในภาพที่ 7 โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้

- 1) ทำการให้ความเย็นแก่ไบโอดีเซล โดยแช่ไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 15 °C
- 2) จากนั้นนำน้ำมันที่ผ่านการให้ความเย็นใส่ลงในกระบอกตวงขนาด 100 ml
- 3) ใช้ไฮโดรมิเตอร์ที่มีช่วงการวัด 700–1,000 kg/m³ ใส่ลงในกระบอกตวง โดยให้ไฮโดรมิเตอร์อยู่ตรงกลางของกระบอกตวง
- 4) บันทึกผลความหนาแน่นโดยอ่านจากรอยน้ำมันที่ขีดบนสุดของไฮโดรมิเตอร์



ภาพที่ 7 การใช้ไฮโดรมิเตอร์วัดความหนาแน่นของน้ำมัน

3. การวิเคราะห์ค่าความหนืด

การศึกษาค่าความหนืดของไบโอดีเซล เป็นการศึกษาทายภาพ ดังแสดงในภาพที่ 8 สามารถอธิบายได้ดังนี้

- 1) ทำการให้ความร้อนแก่น้ำมันที่อุณหภูมิ 40 °C
- 2) ใส่น้ำกลั่นลงในปิกลอร์ขนาด 5 L พร้อมให้ความร้อนแก่น้ำกลั่นจนกระทั่งมีอุณหภูมิ 40 °C
- 3) ติดตั้งหลอดวัดความหนืดชนิดคาปิลลารีกับขาตั้งลงในปิกลอร์ โดยแช่ไว้ในน้ำร้อนประมาณ 10 minute
- 4) ปิเปิดนำน้ำมันที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C ปริมาณ 15 mL บรรจุลงในหลอดคาปิลลารี จนกระทั่งถึงขีด C ที่ด้านซ้ายของหลอด

5) ตูดน้ำมันให้ขึ้นมาถึงขีดที่จุด A ทางด้านขวาบน จากนั้นปล่อยให้ น้ำมันไหลลงมายังจุด B พร้อมบันทึกเวลาจากจุด A มายังจุด B

6) คำนวณผลการวิเคราะห์ค่าความหนืด

$$\text{ค่าความหนืด (cSt)} = t (\text{sec}) \times 0.958 (\text{mm}^2/\text{s}^2) \quad \text{สมการที่ 2}$$

เมื่อ t คือ เวลาที่ใช้ในการทดสอบ (sec)



ภาพที่ 8 ทำการวิเคราะห์ค่าความหนืด

4. การวิเคราะห์จุดวาบไฟ

จุดวาบไฟเป็นจุดที่อุณหภูมิต่ำสุดที่ทำให้เชื้อเพลิงเกิดการระเหย มีจำนวนเพียงพอที่จะลุกติดไฟได้วูบหนึ่งแล้วดับเมื่อมีเปลวไฟผ่านเข้ามา โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้ ดังแสดงในภาพที่ 9

- 1) เทไบโอดีเซลใส่ในถ้วยของเครื่องวัดจุดวาบไฟ พร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิให้ปลายสัมผัสกับน้ำมันโดยตรง
- 2) ให้ความร้อนแก่ไบโอดีเซล อุณหภูมิของน้ำมันจะสูงขึ้นเรื่อยๆ
- 3) สังเกตช่วงเวลาที่น้ำมันเกิดการวาบไฟ พร้อมบันทึกผลอุณหภูมิจุดวาบไฟ



ภาพที่ 9 การวิเคราะห์จุดวาบไฟ

5. การวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์

ปริมาณเมทิลเอสเทอร์เป็นค่าที่แสดงถึงความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี โดยใช้ Methyl heptadecanoate (C-17) เป็นสารละลายมาตรฐาน ทำการเตรียมโดยใช้ Methyl heptadecanoate จำนวน 0.5 g ละลายใน n-heptane 50 mg เป็นสารละลายมาตรฐานในการอ้างอิงของเครื่อง อุปกรณ์ที่ใช้มีคอปิลลารีคอลัมน์ (ความยาวของคอลัมน์ 30 m X 0.25 mm (I.D.) มีความหนาของชั้นฟิล์ม 0.25 μm) ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3 (พัทธนันท์, 2554)

$$C = [(\Sigma A \times A_{EI}) / A_{EI}] \times [(C_{EI} \times V_{EI}) / m] \times 100\% \quad \text{สมการที่ 3}$$

เมื่อ	C	คือ	ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (%)
	ΣA	คือ	พื้นที่ใต้กราฟทั้งหมดที่วิเคราะห์จากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี จาก C14:0 - C24:1
	A_{EI}	คือ	พื้นที่ใต้กราฟของ Methyl heptadecanoate
	C_{EI}	คือ	ความเข้มข้นของ Methyl heptadecanoate (mg/ml)
	V_{EI}	คือ	ปริมาณของ Methyl heptadecanoate (ml)
	m	คือ	น้ำหนักของสารตัวอย่าง (g)

6. การวิเคราะห์ค่าความร้อน

ค่าความร้อนของไบโอดีเซล วิเคราะห์โดยใช้เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb Calorimeter) หาค่าความร้อนของไบโอดีเซล แล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน ดังแสดงในภาพที่ 10 โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้

- ชั่งน้ำมันตัวอย่าง 5 g ใส่ลงในถ้วยที่บรรจุอยู่ในถ้วยจุดระเบิด
- มัดลวดบอมบ์กับขาเหล็กของชุดบอมบ์ โดยใช้ความยาว 10 cm
- จากนั้นนำถ้วยจุดระเบิด และขาเหล็กบอมบ์ที่มีลวดมัดไว้ใส่ลงในกระบอกบอมบ์
- ทำการแล้วอัดแก๊สออกซิเจนปริมาณ 30 bar ลงในถ้วยกระบอกบอมบ์
- เติมน้ำลงในเครื่องบอมบ์ โดยให้มีปริมาตรสูงเท่าขอบของกระบอกบอมบ์

- ป้อนข้อมูลน้ำหนักตัวอย่าง และความยาวของลวดลงในโปรแกรมบอมบ์ จากนั้นเริ่มทำการหาค่าความร้อน โดยกดปุ่มเปิดสวิตซ์ที่เครื่องบอมบ์ และกดปุ่ม Start ที่โปรแกรม
- หลังสิ้นสุดการหาค่าความร้อนด้วยเครื่องบอมบ์ นำลวดที่เหลือจากการเผาไหม้มาวัดความยาว และป้อนลงในโปรแกรมเพื่อทำการคำนวณค่าความร้อนที่ทดสอบได้
- บันทึกผลค่าความร้อนที่ได้จากเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์



ภาพที่ 10 การวิเคราะห์ค่าความร้อน

การทดสอบการใช้ไบโอดีเซลกับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก

การทดสอบแรงบิด (Torque) คือ แรงหมุนของเพลาเครื่องยนต์ เป็นแรงที่ใช้เพื่อส่งกำลังของเครื่องยนต์ไปหมุนเกียร์ เพลา และ ล้อรถ เพื่อให้รถเคลื่อนที่ไปได้ แรงบิดจะมีค่าแตกต่างกันไปที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่างๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับการออกแบบของผู้ผลิตว่าต้องการให้มีแรงบิดสูงสุดอยู่ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่ำ ปานกลาง หรือ สามารถคำนวณค่าแรงบิดได้ดังแสดงในสมการที่ 4

$$T = F \times R$$

สมการที่ 4

เมื่อ T คือ แรงบิด (N-m)

F คือ แรงกระทำต่อแขนไดนาโมมิเตอร์ (N)

R คือ ความยาวของแขนไดนาโมมิเตอร์ (m)

กำลังเบรก หมายถึง กำลังของเครื่องยนต์ที่ได้รับจากเพลาท่อกับกำลังที่เครื่องยนต์ผลิตได้ หักออกด้วยแรงเสียดทานภายในเครื่องยนต์แรงม้าสูงสุดของเครื่องยนต์แต่ละรุ่นแต่ละแบบจะอยู่ที่ ความเร็วรอบเครื่องยนต์แตกต่างกันไปแล้วแต่การออกแบบของผู้ผลิตโดยสามารถคำนวณได้จาก สมการดังนี้สมการที่ 5

$$BP = 2 \pi FRN/60$$

สมการที่ 5

เมื่อ BP คือ กำลังเบรก (kW)

F คือ แรงกระทำต่อแขนไดนาโมมิเตอร์ (N)

R คือ ความยาวของแขนไดนาโมมิเตอร์ (m)

N คือ ความเร็วรอบ (rpm)

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง เป็นวิธีวัดเปรียบเทียบความสามารถของเครื่องยนต์ของแต่ละ เครื่องบนพื้นฐานของกำลังที่ได้จากจำนวนเชื้อเพลิงที่หมดสิ้นไป โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้สมการที่ 6

$$FC = \pi r^2 L/t$$

สมการที่ 6

เมื่อ FC คือ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (cm^3/s)

R คือ รัศมีในหลอดแก้ว (cm)

L คือ ความสูงของเชื้อเพลิงในหลอดแก้ว (cm)

t คือ เวลาที่ใช้ในการทดสอบ (s)

การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ หมายถึง อัตราส่วนระหว่างปริมาณหรือมวลของเชื้อเพลิงที่ เผาไหม้หมดไปในช่วงเวลาหนึ่งต่อกำลังที่ได้จากเชื้อเพลิงนั้น เรียกว่า การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific fuel consumption, SFC) ดังแสดงในสมการที่ 7

$$SFC = Wf / BP$$

สมการที่ 7

เมื่อ SFC คือ ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (kg/kWh)

Wf คือ น้ำหนักของเชื้อเพลิงที่หมดสิ้นไป (kg/hr)

บทที่ 4

ผลและการอภิปรายผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้เถ้าจากชีวมวล ได้แก่ เถ้ากาบมะพร้าว ไม้ลำไย และแกลบข้าวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยแบ่งผลการศึกษาออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนที่ 2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซล ส่วนที่ 3 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติไบโอดีเซลส่วนที่ 4 ผลการวิเคราะห์ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ กับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก และส่วนที่ 5 ผลการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ของกระบวนการ โดยทำการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าชีวมวลและกำหนดสัญลักษณ์ย่อดังนี้

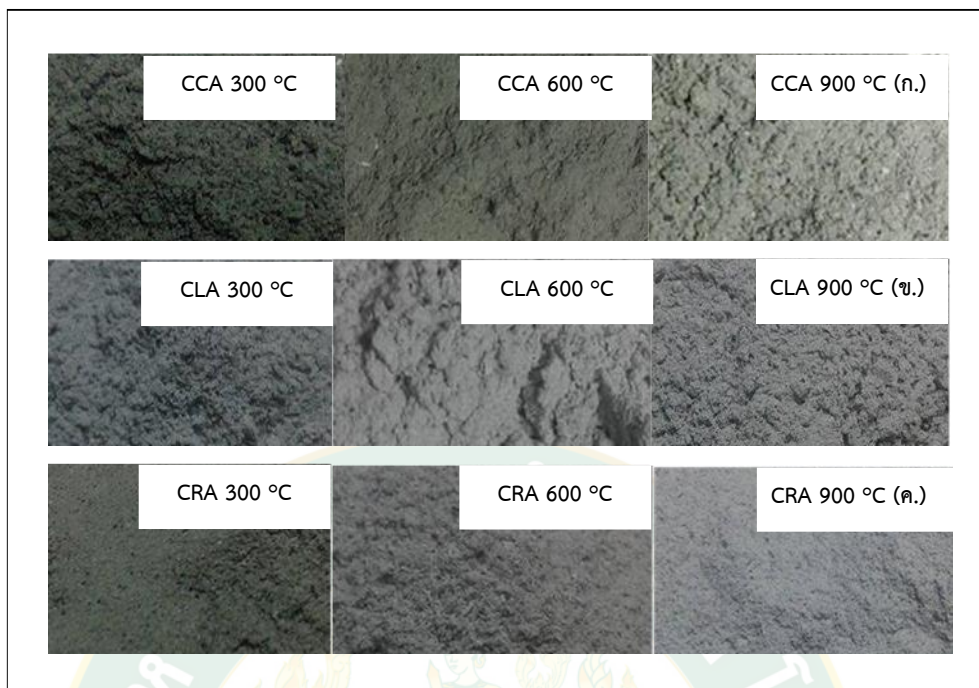
- 1) ตัวเร่งปฏิกิริยา CCA (ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้ากาบมะพร้าว)
- 2) ตัวเร่งปฏิกิริยา CLA (ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าไม้ลำไย)
- 2) ตัวเร่งปฏิกิริยา CRA (ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าแกลบข้าว)

ผลการวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการศึกษาคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เถ้าจากชีวมวลจากงานวิจัย (Sharma et al., 2012) พบว่าการใช้เถ้าชีวมวลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนแก่เถ้าชีวมวลซ้ำทำให้เถ้าชีวมวลที่ได้มีขนาดใหญ่ เนื้อหยาบ และมีเศษชีวมวลที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ปนอยู่ และจากศึกษาองค์ประกอบธาตุจากงานวิจัยของ (Vadery et al., 2014) พบว่าเถ้ากาบมะพร้าวที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการให้ความร้อนซ้ำไม่พบธาตุแคลเซียมอยู่ในองค์ประกอบ จึงทำการศึกษาการให้ความร้อนซ้ำที่อุณหภูมิสูงขึ้นและพบว่าปริมาณของแคลเซียมเพิ่มขึ้นตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (ปิยรัตน์ศิริ, 2556) พบว่าเถ้าไม้ลำไยที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการให้ความร้อนซ้ำพบธาตุแคลเซียมอยู่ในองค์ประกอบ 14.53% และจากงานวิจัยของ (Billong et al., 2018) พบว่าเถ้าแกลบข้าวที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการให้ความร้อนซ้ำพบธาตุแคลเซียม 12.86% ดังนั้นการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวข้างต้นทำให้สรุปได้ว่า การให้ความร้อนซ้ำแก่เถ้าชีวมวลทำให้องค์ประกอบของแคลเซียมเพิ่มขึ้นตามลำดับ จึงทำการกำหนดเงื่อนไขในการศึกษาโดยทำการศึกษาเถ้าชีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ เถ้ากาบมะพร้าว ไม้ลำไย และแกลบข้าว ณ อุณหภูมิการให้ความร้อน 300, 600 และ 900 °C เป็นเวลา 4 hr สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ

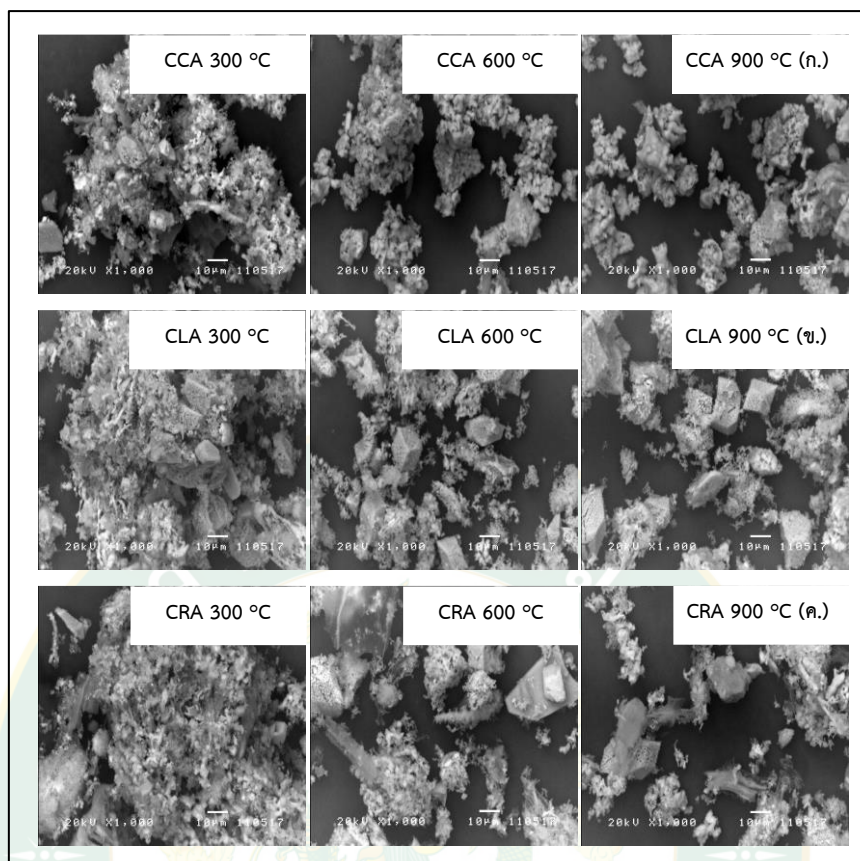
จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้ากาบมะพร้าว ไม้ลำไย และแกลบข้าวแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการเผามีผลต่อสีของเถ้า เนื่องจากก่อนทำการเผาให้ความร้อนซ้ำด้วยการแคลไซน์ เถ้าชีวมวลที่ได้มีสีดำ โดยสีของเถ้าชีวมวลทั้งสามชนิดมีสีที่ใกล้เคียงกัน เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ 300 °C ทำให้เถ้าเกิดการเผาไหม้ซ้ำอีกครั้ง เถ้าที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการเผาที่ช่วงอุณหภูมิต่ำดังกล่าวจึงยังคงมีสีเทาปนดำและมีเนื้อหยาบเป็นเม็ด เมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้น 600 °C เถ้าที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการเผาที่อุณหภูมินี้ได้เถ้าที่มีสีเทาและมีความละเอียดมากยิ่งขึ้น และเมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้นไปถึง 900 °C เถ้าที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการเผาที่อุณหภูมินี้ได้เถ้าที่มีสีขาวปนเทาเล็กน้อยและมีความละเอียดมากยิ่งขึ้นและมีลักษณะคล้ายเนื้อแป้งละเอียด โดยความแตกต่างของเนื้อเถ้าทั้ง 3 ชนิด คือ เถ้าไม้ลำไยและเถ้ากาบมะพร้าวจะมีลักษณะเป็นเม็ดกลม ส่วนเถ้าแกลบข้าวมีลักษณะเป็นเม็ดรียาว ดังแสดงในภาพที่ 11 และเมื่อทำการพิจารณาปริมาณน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากทำการแคลไซน์ เนื่องจากการเผาเถ้าที่อุณหภูมิต่างกับพบว่าการเผาเถ้าที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าทำให้คาร์บอนลดลงทำให้สีของเถ้าที่ได้มีสีเทาและสัดส่วนของน้ำหนักหลังการให้ความร้อนที่ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Misra et al., 1993) ที่ทำการศึกษาการเผาเถ้าชีวมวลในอุณหภูมิต่างๆ และพบว่าการเผาที่อุณหภูมิสูงจะทำให้สารประกอบอินทรีย์ลดลง โดยเฉพาะคาร์บอนที่มีสมบัติเฉพาะตัวทำให้เกิดสีดำ เมื่ออุณหภูมิสูงสามารถลดคาร์บอนทำให้เถ้าบริสุทธิ์มากขึ้น มีสีที่อ่อนลงจากเดิมอย่างชัดเจน โดยสัดส่วนของจำนวนคาร์บอนแปรผันตรงต่อสีของเถ้า และสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Lu et al., 2018) ที่ได้ทำการอธิบายถึงการเผาไหม้ซึ่งเมื่อทำการเผาไหม้ว่าปฏิกิริยาเคมีอย่างหนึ่ง วัสดุที่เผาไหม้จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนพร้อมกับปลดปล่อยความร้อนออกมา ในขณะที่เดียวกันก็จะแปรสภาพไปเป็นสารประกอบออกไซด์ หรือผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่สมบูรณ์ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนว่าในการเผาที่อุณหภูมิแต่ละยิ่งสูงขึ้นจำนวนคาร์บอนและออกซิเจนก็จะลดลงอย่างเป็นลำดับเนื่องจากถูกปล่อยออกจากกระบวนการในรูปแบบของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



ภาพที่ 11 ลักษณะทางกายภาพของเถ้าชีวมวล (ก.) เถ้ากาบมะพร้าว (ข.) เถ้าไม้ลำไย และ(ค.) เถ้า
 แกลบข้าวที่อุณหภูมิแคลไซน์ 300, 600 และ 900 °C

2. ผลการวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคและองค์ประกอบธาตุของเถ้า

ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ร่วมกับเทคนิค EDS เพื่อหาองค์ประกอบของเถ้าได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ จากการศึกษา ลักษณะของเถ้าจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในภาพที่ 12 พบว่า เถ้ากาบมะพร้าว, เถ้าไม้ลำไย และเถ้าแกลบข้าวที่อุณหภูมิ 300, 600 และ 900 °C พบว่า จะมีการรวมตัวกับเป็นกลุ่มและมีรูพรุนมาก เมื่อให้อุณหภูมิในเผาสูงขึ้นมีการกระจายตัวมากขึ้นแต่ยังคง ความเป็นรูพรุน และเมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นจนถึง 900 °C แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการกระจายตัว ดีกว่าทุกช่วยอุณหภูมิ ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับงานวิจัยของ (Jeffry et al. Jaya et al. Hassan et al., 2018) ที่แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวจะดีขึ้นเมื่อให้ความร้อนที่สูงขึ้นตามลำดับ และสอดคล้อง กับงานวิจัยของ (Sharma et al., 2012) ที่ทำการศึกษการใช้เถ้าจากไม้ในการผลิตไบโอดีเซลซึ่ง พบว่าเถ้าจากไม้จะมีความเป็นรูพรุนมากแต่จับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนในอุณหภูมิต่ำ และกระจายตัวได้ ดีในอุณหภูมิที่สูงขึ้น

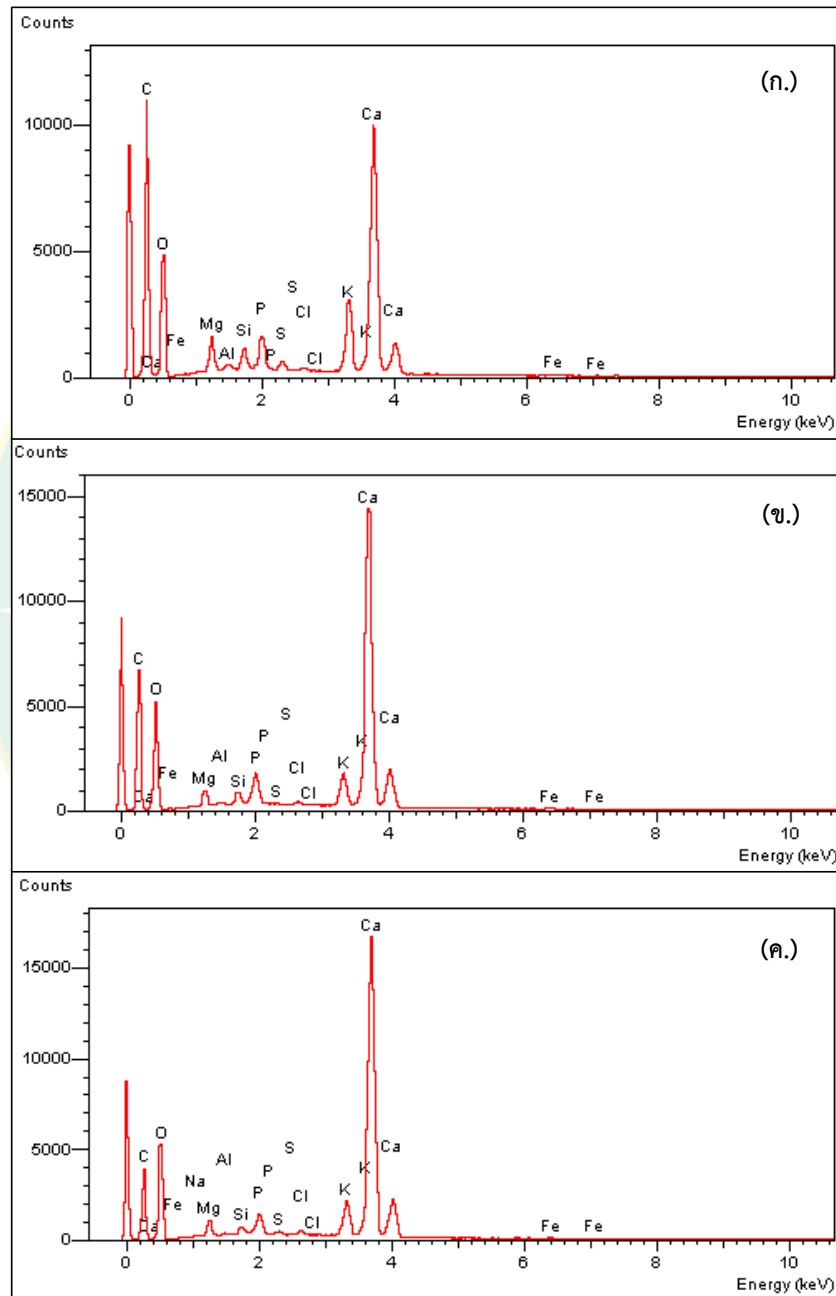


ภาพที่ 12 ลักษณะของเถ้าชีวมวล (ก.) เถ้ากาบมะพร้าว (ข.) เถ้าไม้ลำไย และ (ค.) เถ้าแกลบข้าวจาก กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่อุณหภูมิแคลไซน์ 300 °C 600 °C และ 900 °C

องค์ประกอบธาตุของเถ้ากาบมะพร้าว

สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้ากาบมะพร้าว พบว่ามีองค์ประกอบของธาตุทางเคมีประกอบไปด้วย C, O, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K และ Fe ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Sarki et al., 2011) และ (Jeffrey et al. Jaya et al. Abdul Hassan et al., 2018) ที่ทำการศึกษาเถ้าจากกาบมะพร้าวแล้วพบธาตุประกอบไปด้วย C, O, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K และ Fe เป็นองค์ประกอบ ซึ่งจากการศึกษาก็ยังพบธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่มากที่สุดในตัวอย่างที่ศึกษาเช่นกัน โดยมีสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของเถ้ากาบมะพร้าวแต่ละอุณหภูมิการให้ความร้อน ดังแสดงตารางที่ 18 โดยอุณหภูมิการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300 °C พบว่ามีองค์ประกอบของธาตุสูงสุดสามลำดับคือ ธาตุออกซิเจน 41.83% ธาตุคาร์บอน 37.81% และมีธาตุแคลเซียมอยู่ที่ 12.79% ตามลำดับ เถ้ากาบมะพร้าวที่อุณหภูมิ 600 °C พบว่า มีองค์ประกอบของธาตุสูงสุดสามลำดับคือ ธาตุออกซิเจน 47.58 % ธาตุคาร์บอน 26.94% และมีธาตุแคลเซียมอยู่ที่ 20.06% ตามลำดับ

ไส้ก้ามมะพร้าวที่อุณหภูมิ 900 °C พบว่า ไส้มี องค์ประกอบของธาตุสูงสุดสามลำดับคือ ธาตุออกซิเจน 51.14% ธาตุคาร์บอน 18.12% และมีธาตุแคลเซียมอยู่ที่ 24.56% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 11 และภาพที่ 13



ภาพที่ 13 องค์ประกอบของไส้จากการวิเคราะห์เทคนิค EDS ของไส้ไม้แกลบก้ามมะพร้าวที่อุณหภูมิแคลไซน์ (ก.) 300 °C (ข.) 600 °C และ (ค.) 900 °C

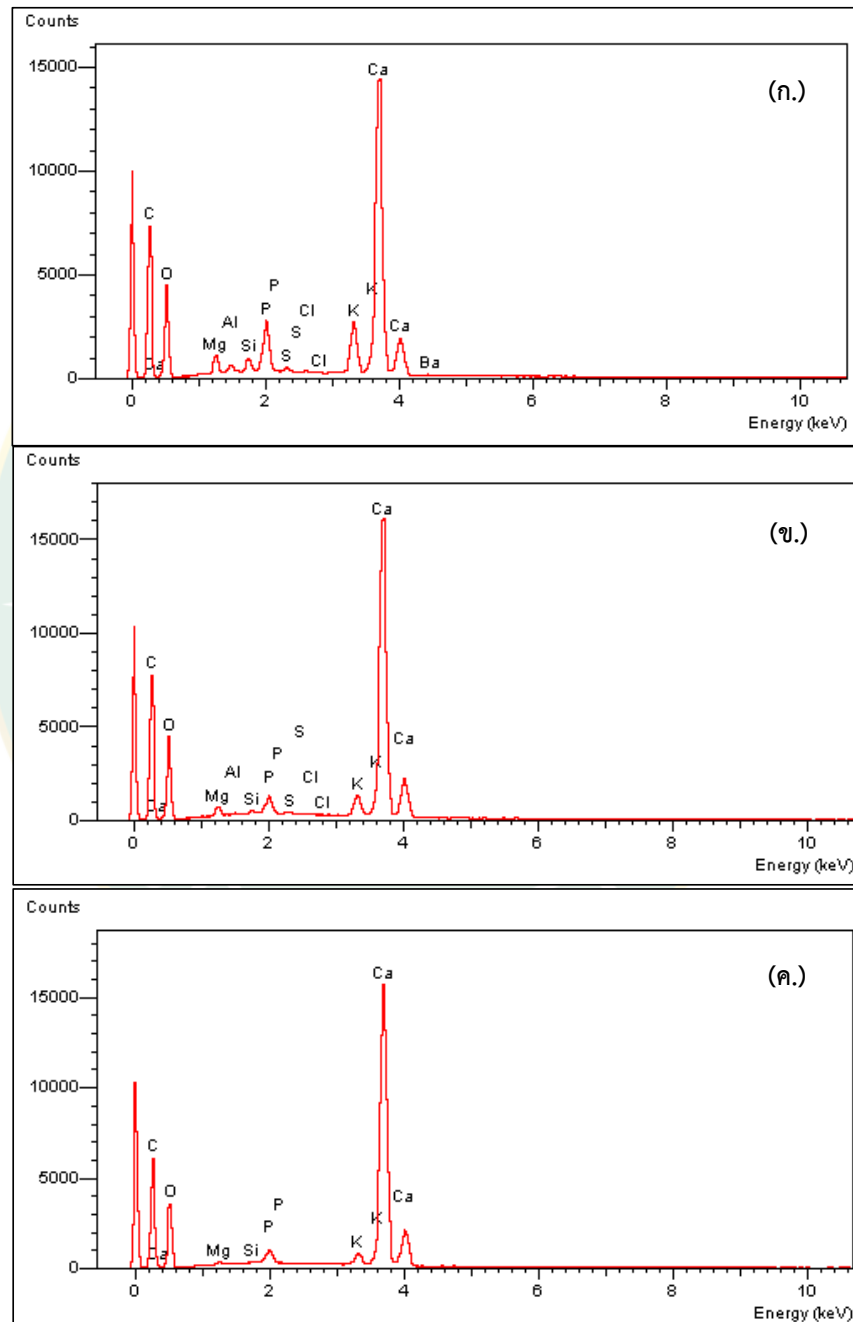
ตารางที่ 11 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้ากาบมะพร้าวที่อุณหภูมิการให้ความร้อนต่างๆ

ธาตุ (%)	อุณหภูมิการให้ความร้อน (°C)		
	300	600	900
C	37.81	26.94	18.12
O	41.83	47.58	51.14
Mg	1.53	0.90	1.14
Al	0.21	0.14	0.12
Si	0.70	0.51	0.39
P	1.26	1.52	1.24
S	0.30	0.07	0.15
Cl	0.09	0.16	0.24
K	3.33	1.96	2.55
Ca	12.79	20.06	24.56
Fe	0.15	0.16	0.17
Na	-	-	0.18
รวม	100	100	100

องค์ประกอบธาตุของเถ้าไม้ลำไย

เถ้าไม้ลำไยที่อุณหภูมิแคลไซน์ 300 °C พบว่า ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าไม้ลำไย พบว่าประกอบไปด้วย C, O, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K และ Fe ที่อุณหภูมิ 300 °C พบว่ามีองค์ประกอบของธาตุสูงสุดสามลำดับคือ ธาตุออกซิเจน 42.19% ธาตุคาร์บอน 30.42% และมีธาตุแคลเซียมอยู่ที่ 19.57% ตามลำดับ สำหรับเถ้าไม้ลำไยที่อุณหภูมิแคลไซน์ 600 °C พบว่ามีองค์ประกอบของธาตุสูงสุดสามลำดับคือ ธาตุออกซิเจน 44.81 % ธาตุคาร์บอน 28.91% และมีธาตุ

แคลเซียมอยู่ที่ 22.88% ตามลำดับ และ ถ้ำไม้ลำไยที่อุณหภูมิแคลไซน์ 900 °C พบว่ามีองค์ประกอบของธาตุสูงสุดสามลำดับคือ ธาตุออกซิเจน 44.59% ธาตุคาร์บอน 27.07% และมีธาตุแคลเซียมอยู่ที่ 26.23% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 12 และภาพที่ 14



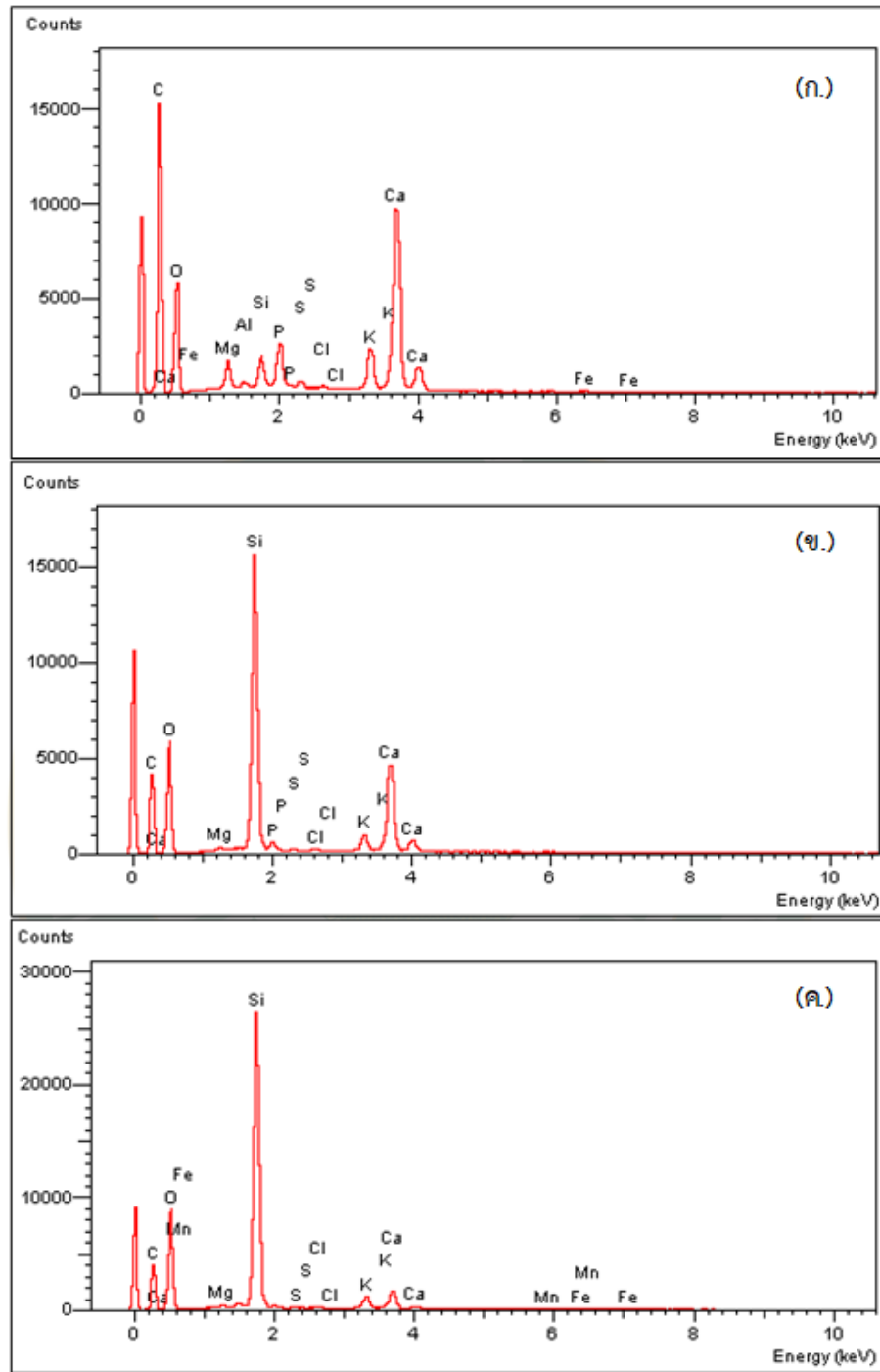
ภาพที่ 14 องค์ประกอบของถ้ำจากการวิเคราะห์เทคนิค EDS ของถ้ำไม้ลำไยที่อุณหภูมิแคลไซน์ (ก.) 300 °C (ข.) 600 °C และ (ค.) 900 °C

ตารางที่ 12 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าไม้ลำไยที่อุณหภูมิการให้ความร้อนต่างๆ

ธาตุ (%)	อุณหภูมิการให้ความร้อน (°C)		
	300	600	900
C	30.42	28.91	27.07
O	42.19	44.81	44.59
Mg	0.99	0.61	0.23
Al	0.31	0.07	-
Si	0.53	0.14	0.11
P	2.44	0.95	0.82
S	0.21	0.11	-
Cl	0.06	0.06	-
K	3.05	1.46	0.95
Ca	19.57	22.88	26.23
Ba	0.23	-	-
รวม	100	100	100

องค์ประกอบธาตุของเถ้าแกลบข้าว

สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าแกลบข้าวที่อุณหภูมิ 300 °C พบว่าประกอบไปด้วย C, O, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K และ Fe โดยมีปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของเถ้ากาบมะพร้าวตั้งแสดงตารางที่ 20 พบว่ามีองค์ประกอบของธาตุสูงสุดสามลำดับคือ ธาตุคาร์บอน 42.73 % ธาตุออกซิเจน 40.30% และมีธาตุแคลเซียมอยู่ที่ 10.16% ตามลำดับ เถ้าแกลบข้าวที่อุณหภูมิ 600 °C พบว่ามีองค์ประกอบของธาตุสูงสุดสามลำดับคือ คาร์บอน 44.24% ออกซิเจน 33.06% และมีซิลิกอนอยู่ที่ 13.63% ตามลำดับ เถ้าแกลบข้าวที่อุณหภูมิ 900 °C พบว่ามีองค์ประกอบของธาตุสูงสุดสามลำดับคือ ออกซิเจน 46.58% คาร์บอน 31.01% และมีซิลิกอนอยู่ที่ 18.75% ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 15 ตารางที่ 13



ภาพที่ 15 องค์ประกอบของถ้ำจากการวิเคราะห์เทคนิค EDS ของถ้ำไม้แกลบข้าวที่อุณหภูมิแคล
ไซน์ (ก.) 300 °C (ข.) 600 °C และ (ค.) 900 °C

ตารางที่ 13 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบข้าวที่อุณหภูมิการให้ความร้อนต่างๆ

ธาตุ (%)	อุณหภูมิการให้ความร้อน (°C)		
	300	600	900
C	42.73	33.06	31.01
O	40.30	44.24	46.58
Mg	1.25	0.22	0.02
Al	0.19	-	-
Si	1.07	13.63	18.75
P	1.75	0.57	-
S	0.23	0.08	0.12
Cl	0.10	0.11	0.09
K	2.04	1.16	1.21
Ca	10.19	6.93	1.78
Mn	-	-	0.11
Fe	0.15	-	0.15
รวม	100	100	100

ผลการวิเคราะห์ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน
จากน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าชีวมวล

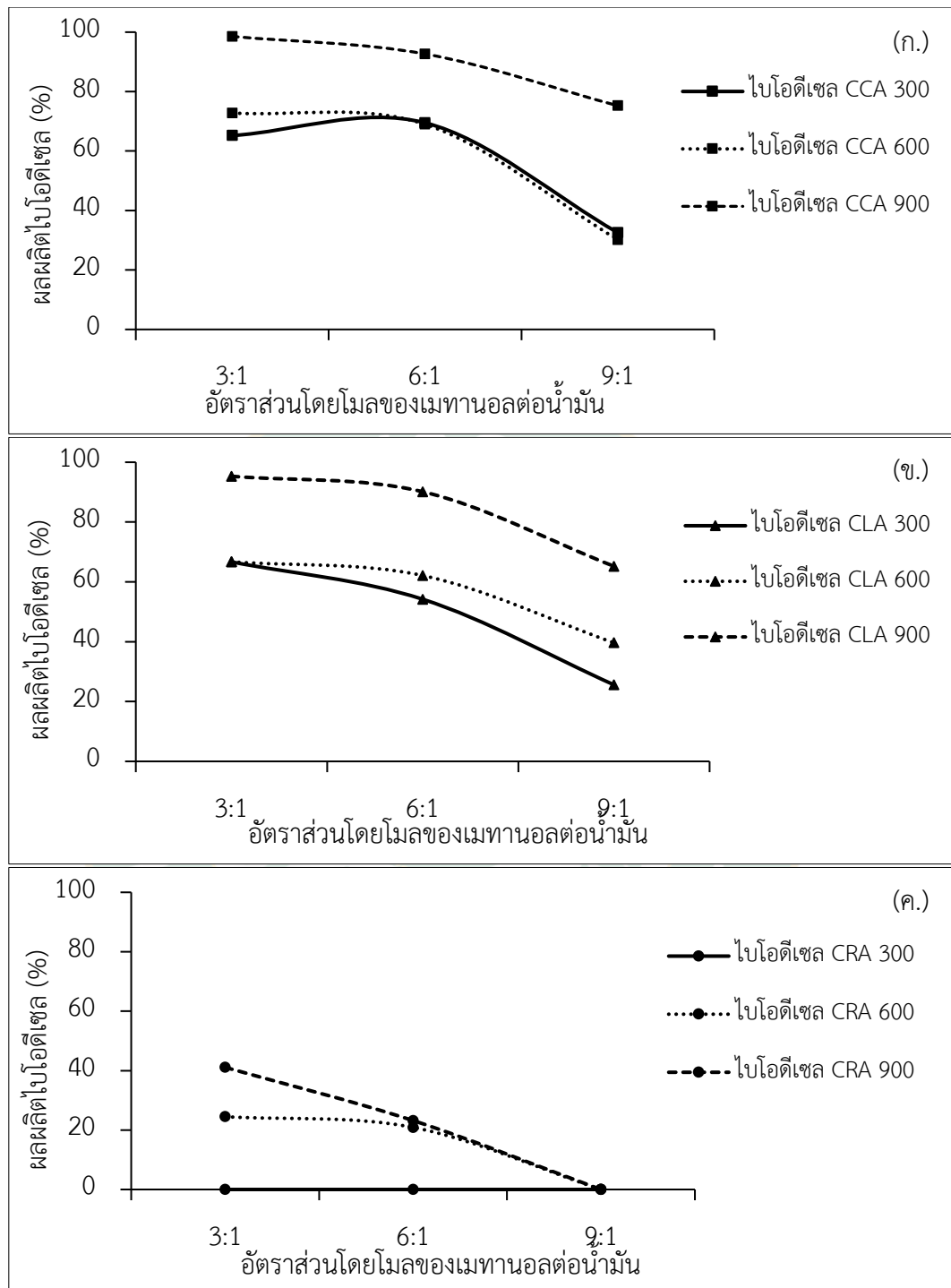
ในการศึกษาปริมาณผลผลิตในการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันจากน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าชีวมวล ได้ทำการศึกษา อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล ต่อน้ำมัน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิการให้ความร้อนและชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซล โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน และอุณหภูมิการให้ความร้อนของเถ้าชีวมวล ที่มีผลต่อผลผลิตของไบโอดีเซล

จากการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 3:1, 6:1, 9:1 และ 12:1 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าชีวมวล ได้แก่ เถ้ากาบมะพร้าว เถ้าไม้ลำไย และเถ้าแกลบข้าว ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300, 600 และ 900 °C เมื่อพิจารณาที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt ต่อน้ำหนักของน้ำมัน และโดยควบคุมเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 1 hr และ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 60 °C ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 14 และภาพที่ 16

ตารางที่ 14 ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้จากการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน และอุณหภูมิการให้ความร้อนของเถ้าชีวมวลที่มีผลต่อผลผลิตของไบโอดีเซล

ชนิดของ ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิการให้ ความร้อนซ้ำ (°C)	ผลผลิตไบโอดีเซล (%)		
		อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน		
		3:1	6:1	9:1
CCA	300	65.21	69.50	32.54
	600	72.81	69.01	30.18
	900	98.57	92.66	75.24
CLA	300	66.69	54.20	25.60
	600	66.72	62.13	39.65
	900	95.32	90.14	65.23
CRA	300	-	-	-
	600	24.50	20.90	-
	900	41.10	23.20	-



ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์จากการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน และอุณหภูมิการให้ความร้อนของถ้ำชีวมวลที่ได้แก่ (ก.) ถ้ำกากบมะพร้าว, (ข.) ถ้ำไม้ลำไย และ (ค.) ถ้ำแกลบข้าว ที่มีผลต่อผลผลิตไบโอดีเซล

จากตารางที่ 14 และภาพที่ 16 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันกับอุณหภูมิการให้ความร้อนของเก้าอี้มวลพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันแนวโน้มของผลผลิตไบโอดีเซลลดลงตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Gerpen,2005) ที่กล่าวไว้ว่า โดยปกติอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา คือ 3:1 และเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเพิ่มขึ้น ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลกลับมีค่าลดลงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Suchada Sirisomboonchai, 2015) ที่พบว่าอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่เพิ่มขึ้นจนมากเกินไปจนเกินความจำเป็นในปฏิกิริยาจะทำให้ความสามารถในการละลายตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาจึงลดลง ส่งผลให้ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้มีค่าลดลง เกิดปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มมากขึ้น โดยเมื่อพิจารณาที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเก้าอี้บมะพร้าวที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300 °C เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันจาก 3:1 เป็น 6:1 และ 9:1 พบว่าผลผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นจาก 65.21% เป็น 69.50% และ 32.54% ตามลำดับ ซึ่งปริมาณการเพิ่มขึ้นระหว่างอัตราส่วน 3:1 เป็น 6:1 การเพิ่มขึ้นของผลผลิตไบโอดีเซลไม่มากนัก แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันจาก 6:1 เป็น 9:1 ผลผลิตไบโอดีเซลลดลงจากอย่างเห็นได้ชัดเจน ที่อุณหภูมิการให้ความร้อนที่ 600 °C เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันจาก 3:1 เป็น 6:1 และ 9:1 พบว่าผลผลิตไบโอดีเซลลดลงจาก 72.81% เป็น 69.01% และ 30.18% ตามลำดับ และตัวเร่งปฏิกิริยาจากเก้าอี้บมะพร้าวที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 °C เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันจาก 3:1 เป็น 6:1 และ 9:1 พบว่า ผลผลิตไบโอดีเซลลดลงจาก 98.57% เหลือ 92.66% และ 75.24% ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเก้าอี้บมะพร้าวที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300 °C เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันจาก 3:1 เป็น 6:1 และ 9:1 พบว่าผลผลิตไบโอดีเซลลดลงจาก 66.69% เหลือ 54.20% และ 25.60% ตามลำดับ ที่อุณหภูมิการให้ความร้อนที่ 600 °C เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันจาก 3:1 เป็น 6:1 และ 9:1 พบว่าผลผลิตไบโอดีเซลลดลงจาก 66.72% เหลือ 62.13% และ 39.65% ตามลำดับ และที่อุณหภูมิการให้ความร้อนที่ 900 °C เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันจาก 3:1 เป็น 6:1 และ 9:1 พบว่าผลผลิตไบโอดีเซลลดลงจาก 95.32% เหลือ 90.14% และ 65.23% ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเก้าอี้บมะพร้าวที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300 °C พบว่าไม่เกิดผลผลิตไบโอดีเซลเนื่องจากในตัวเร่งปฏิกิริยาในช่วงความร้อดังกล่าวพบธาตุที่มีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่น้อยมากและไม่เพียงพอต่อการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Manique,2011) ที่พบว่า การให้ความร้อนในอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมทำให้การเผาไหม้

ของตัวเร่งปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้ไม่สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้และเป็นแนวทางในการศึกษาการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิที่สูงขึ้นต่อไป ที่อุณหภูมิการให้ความร้อนที่ 600 °C เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันจาก 3:1 เป็น 6:1 ผลผลิตไบโอดีเซลลดลงจาก 24.50% เหลือ 20.90% และเมื่อเพิ่มปริมาณอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันในจำนวนที่มากขึ้นไม่เกิดผลผลิตไบโอดีเซลเนื่องจากเถ้ากลบข้าวมีปริมาณธาตุที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาต่ำและเมื่อใช้เมทานอลที่มากขึ้นทำให้เกิดการเงาจนมากส่งผลให้ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ ที่อุณหภูมิการให้ความร้อนที่ 900 °C เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันจาก 3:1 เป็น 6:1 ผลผลิตไบโอดีเซลลดลงจาก 41.10% เหลือ 23.20% เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 9:1 และ 12:1 พบว่าไม่เกิดผลผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของเมทานอลจะไปทำลายตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดความเงาจน ส่งผลให้คุณสมบัติในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง และเมื่อเพิ่มปริมาณของเมทานอลจะมากเกินไปในการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันไม่ก่อให้เกิดผลผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันมากเกินไปจนทำให้เมทานอลลอยอยู่เหนือน้ำมันซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Suchada Sirisomboonchai, 2015) ที่พบว่าการใช้เมทานอลมากเกินไปจะทำให้ไม่เกิดปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตลดความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากการทำลายตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง และปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้มีค่าลดลงจากการทดลองทั้งหมดจะเห็นได้ว่าอัตราการผลิตไบโอดีเซลที่ให้ผลผลิตสูงที่สุดในทุกเงื่อนไขการทดลองคือการใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 3 :1 จึงกล่าวได้ว่าอัตราส่วนดังกล่าวเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการทดลอง

ทั้งนี้เมื่อทำการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการให้ความร้อนของเถ้าชีวมวลกับอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 3:1 พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการให้ความร้อนของเถ้าชีวมวลทำให้แนวโน้มของผลผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นตามการให้อุณหภูมิการให้ความร้อนที่สูงขึ้นตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการให้ความร้อนทำให้ธาตุที่จำเป็นต่อการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น และธาตุคาร์บอนในเถ้าที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงทำให้เถ้ามีความบริสุทธิ์มากขึ้นซึ่งมีผลต่อการเร่งปฏิกิริยาที่ดียิ่งขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Chen et al., 2015) ที่พบว่าการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าในอุณหภูมิที่สูงที่สุดในการทดลองพบปริมาณธาตุที่มีสมบัติในการเร่งปฏิกิริยามากกว่าช่วงอุณหภูมิอื่นๆ โดยเมื่อพิจารณาที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้ากาบมะพร้าวที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 3:1 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการให้ความร้อนจาก 300 °C เป็น 600 °C และ 900 °C ผลผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นจาก 65.21% เป็น 72.81% และ 98.57% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าไม้ลำไยที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 3:1

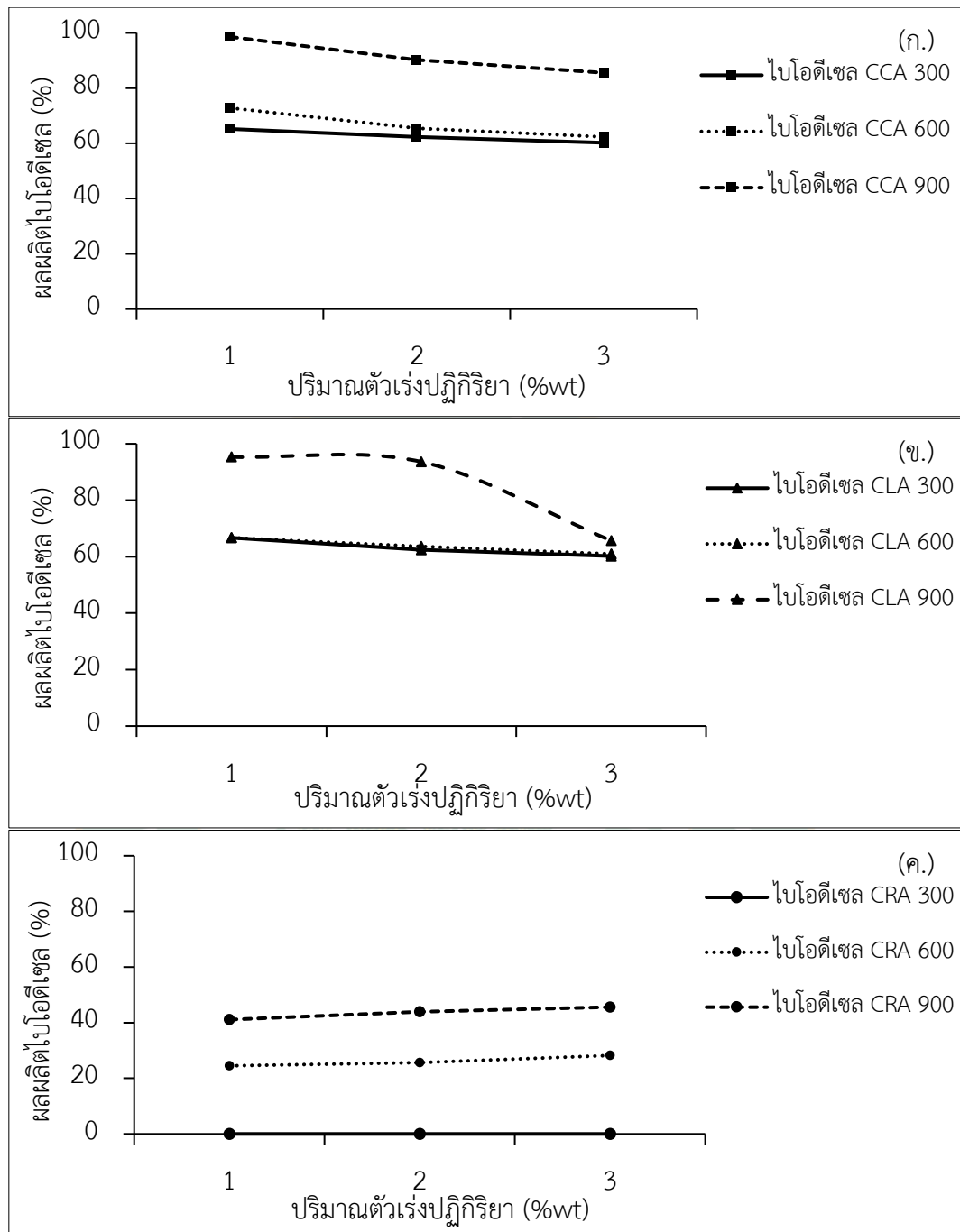
เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการให้ความร้อนจาก 300 °C เป็น 600 °C และ 900 °C ผลผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นจาก 66.69% เป็น 66.72% และ 95.32% ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าแกลบข้าวที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 3:1 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการให้ความร้อนจาก 300 °C เป็น 600 °C ผลผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นจาก 41.10% เป็น 23.2% และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการให้ความร้อนเป็น 900 °C พบว่าไม่เกิดผลผลิตไบโอดีเซลเนื่องจากในเถ้าแกลบข้าวพบธาตุที่มีคุณสมบัติในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่ำกว่าเถ้าชนิดอื่นๆ เนื่องจากเถ้าเป็นชีวมวลที่มีขนาดเล็กและมีธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักคือ ธาตุซิลิกอนมากกว่าธาตุหมู่เบสชนิดอื่นๆ ที่มีคุณสมบัติในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Chen et al., 2015) ที่ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของเถ้าแกลบข้าว ซึ่งพบว่าในเถ้าแกลบข้าวมีปริมาณของซิลิกอนเป็นจำนวนมาก แต่ยังคงพบแคลเซียมที่เป็นธาตุที่มีคุณสมบัติในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สูงกว่า จึงทำการทดลองโดยการใช้เปลือกไข่เผาพร้อมกับเถ้าแกลบข้าวและพบว่า เมื่อใช้ร่วมกันทำให้ประสิทธิภาพดีขึ้นเนื่องจาก เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบจากการเผาแล้วพบทั้งซิลิกอนและแคลเซียมรวมกันอยู่เถ้ามากกว่า 50% ซึ่งจากการทดลองทั้งหมดพบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการให้ความร้อนของเถ้าที่นำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อการให้ผลผลิตไบโอดีเซล โดยการให้อุณหภูมิของการให้ความร้อนที่สูงขึ้นทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีองค์ประกอบของธาตุที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้นและให้ผลผลิตเมื่อทำปฏิกิริยามากขึ้นเช่นกัน โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองที่สูงสุดที่ให้ผลผลิตมากที่สุด คือ 900 °C จึงกล่าวได้ว่า อุณหภูมิดังกล่าวเป็นอุณหภูมิการแคลไซน์ของเถ้าที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการศึกษาครั้งนี้ และทำการศึกษ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เงื่อนไขการศึกษาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 3:1 ณ อุณหภูมิการให้ความร้อน 900 °C ในหัวข้อถัดไป

2. ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิการให้ความร้อนของเถ้าชีวมวลที่มีผลต่อผลผลิตไบโอดีเซล

จากการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 1, 2 และ 3%wt โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าชีวมวลที่ศึกษา ได้แก่ เถ้ากาบมะพร้าว เถ้าไม้ลำไย และเถ้าแกลบข้าว ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300, 600 และ 900 °C เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 3:1 และโดยควบคุมเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 1hr และ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 60 °C ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 15 และภาพที่ 17

ตารางที่ 15 ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้จากการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิการให้ความร้อนของเถ้าชีวมวลที่มีผลต่อผลผลิตไบโอดีเซล

ชนิดของ ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิการใช้ ความร้อน (°C)	ผลผลิตไบโอดีเซล (%)		
		ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%wt)		
		1	2	3
CCA	300	65.21	62.32	60.22
	600	72.81	65.43	62.34
	900	98.57	90.24	85.56
CLA	300	66.69	62.45	60.23
	600	66.72	63.65	60.98
	900	95.32	93.62	65.69
CRA	300	-	-	-
	600	24.50	25.60	28.20
	900	41.10	43.90	45.60



ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์จากการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิการให้ความร้อนของตัวเร่งปฏิกิริยาจากถั่วเขียวพล ได้แก่ (ก.) ถั่วกบบมะพร้าว, (ข.) ถั่วไม้ลำไย และ (ค.) ถั่วกลบข้าว ที่มีผลต่อผลผลิตไปโอติเซล

จากตารางที่ 15 และภาพที่ 17 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยากับอุณหภูมิการให้ความร้อนของถ้ำชีวมวลพบว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นกับมีแนวโน้มของผลผลิตไบโอดีเซลลดลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีลักษณะเป็นของแข็งเป็นใช้ในปริมาณที่มากขึ้นทำให้การทำละลายของเมทานอลยากยิ่งขึ้น และเมื่อทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันแล้วส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ้ำชีวมวลนั้นเกาะกลุ่มกับกลีเซอรอลซึ่งเมื่อตกตะกอนจะเกิดขึ้นเป็นช่องว่างเล็กๆทำให้ไบโอดีเซลบางส่วนแทรกตัวเข้าไปในชั้นของถ้ำและกลีเซอรอลจึงส่งผลให้ปริมาณของผลผลิตไบโอดีเซลนั้นลดลงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Pradana et al., 2017) ที่ทำการศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์โดยพบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับสารละลายมีข้อจำกัดในเรื่องของปริมาณการใช้งานหากใช้มากเกินไปอาจทำให้ผลผลิตเกาะกับตัวเร่งปฏิกิริยาถึงแม้จะสามารถกำจัดออกจากกระบวนการได้ง่ายในขั้นสุดท้ายแต่อาจจะทำให้ผลผลิตที่ติดอยู่ถูกกำจัดออกไปด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงควรศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ที่มีความเข้มข้นสูงแต่ปริมาณต่ำเพื่อลดการสูญเสียผลผลิตจากขั้นตอนการกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยา

โดยเมื่อพิจารณาที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ้ำกาบมะพร้าวที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300 °C เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 1%wt เป็น 2%wt และ 3%wt ผลผลิตไบโอดีเซลลดลงจาก 65.21% เหลือ 62.32% และ 60.22% ตามลำดับ ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ้ำกาบมะพร้าวที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600 °C เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 1%wt เป็น 2%wt และ 3%wt ผลผลิตไบโอดีเซลลดลงจาก 72.81% เหลือ 65.43% และ 62.34% ตามลำดับ ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ้ำกาบมะพร้าวที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 °C เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 1%wt เป็น 2%wt และ 3%wt ผลผลิตไบโอดีเซลลดลงจาก 98.57% เหลือ 90.24% และ 85.56% ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ้ำไม้ลำไยที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300 °C เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 1%wt เป็น 2%wt และ 3%wt ผลผลิตไบโอดีเซลลดลงจาก 66.69% เหลือ 62.45% และ 60.23% ตามลำดับ ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ้ำไม้ลำไยที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600 °C เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 1%wt เป็น 2%wt และ 3%wt ผลผลิตไบโอดีเซลลดลงจาก 66.72% เหลือ 63.65% และ 60.98% ตามลำดับ ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ้ำไม้ลำไยที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 °C เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 1%wt เป็น 2%wt และ 3%wt ผลผลิตไบโอดีเซลลดลงจาก 95.32% เหลือ 93.62% และ 65.69% ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ้ำแกลบข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300 °C พบว่าไม่เกิดปฏิกิริยาเนื่องจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิดังกล่าวเกิดธาตุที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาต่ำมากซึ่งไม่เมื่อทำปฏิกิริยาแล้วพบว่ามีความเข้มข้นไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาจาก

ถ้ากลบข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600 °C เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 1%wt เป็น 2%wt และ 3%wt ผลผลิตไบโอดีเซลลดลงจาก 24.50% เหลือ 25.60% และ 28.20% ตามลำดับ ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ้ากลบข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 900 °C เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 1%wt เป็น 2%wt และ 3%wt ผลผลิตไบโอดีเซลลดลงจาก 41.10% เหลือ 43.90% และ 45.60% ตามลำดับ จากการทดลองทั้งหมดจะเห็นได้ว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ผลผลิตไบโอดีเซลสูงที่สุดคือตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณ 1%wt จึงกล่าวได้ว่าเป็นปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่สุดในการทดลอง

ทั้งนี้เมื่อทำการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการให้ความร้อนของถ้าชีวมวลกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 1%wt พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการให้ความร้อนของถ้าชีวมวลทำให้แนวโน้มของผลผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นตามการให้อุณหภูมิการให้ความร้อนที่สูงขึ้นตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการให้ความร้อนทำให้อาตุที่จำเป็นต่อการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น และธาตุคาร์บอนในถ้าที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงทำให้ถ้ามีความบริสุทธิ์มากขึ้นซึ่งมีผลต่อการเร่งปฏิกิริยาที่ดียิ่งขึ้น โดยเมื่อพิจารณาที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ้ากาบมะพร้าวที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 3:1 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการให้ความร้อนจาก 300 °C เป็น 600 °C ผลผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นจาก 65.21% เป็น 72.81% และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการให้ความร้อนจาก 600 °C เป็น 900 °C ผลผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นจาก 72.81% เป็น 98.57% เมื่อพิจารณาที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ้าไม้ลำไยที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 3:1 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการให้ความร้อนจาก 300 °C เป็น 600 °C ผลผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นจาก 66.69% เป็น 66.72% และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการให้ความร้อนจาก 600 °C เป็น 900 °C ผลผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นจาก 66.72% เป็น 95.32% และเมื่อพิจารณาที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ้ากลบข้าวที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 3:1 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการให้ความร้อนจาก 300 °C เป็น 600 °C ผลผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นจาก 41.10% เป็น 23.2% และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการให้ความร้อนเป็น 900 °C พบว่าไม่เกิดผลผลิตไบโอดีเซลเนื่องจากในถ้ากลบข้าวพบธาตุที่มีคุณสมบัติในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่ำกว่าถ้าชนิดอื่นๆ เนื่องจากกลบข้าวเป็นชีวมวลที่มีขนาดเล็ก และมีธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักคือ ธาตุซิลิกอนมากกว่าธาตุหมู่เบสชนิดอื่นๆที่มีคุณสมบัติในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Chen et al., 2015) และ (Zhao et al., 2018) ที่ทำการศึกษาการใช้แคลเซียมที่ได้จากแหล่งอื่นมาเป็นส่วนช่วยในการเร่งปฏิกิริยาของถ้ากลบข้าว โดยใช้แคลเซียมจากเปลือกไข่ และCaO เข้ามาเป็นส่วนช่วยเพื่อให้ผลผลิตไบโอดีเซลดีขึ้น สารซึ่งจากการทดลองทั้งหมดพบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการให้ความร้อนของถ้าที่นำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อการให้ผลผลิตไบโอดีเซล โดยการให้อุณหภูมิของการให้ความร้อนที่สูงขึ้นทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีองค์ประกอบของธาตุที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้นและให้

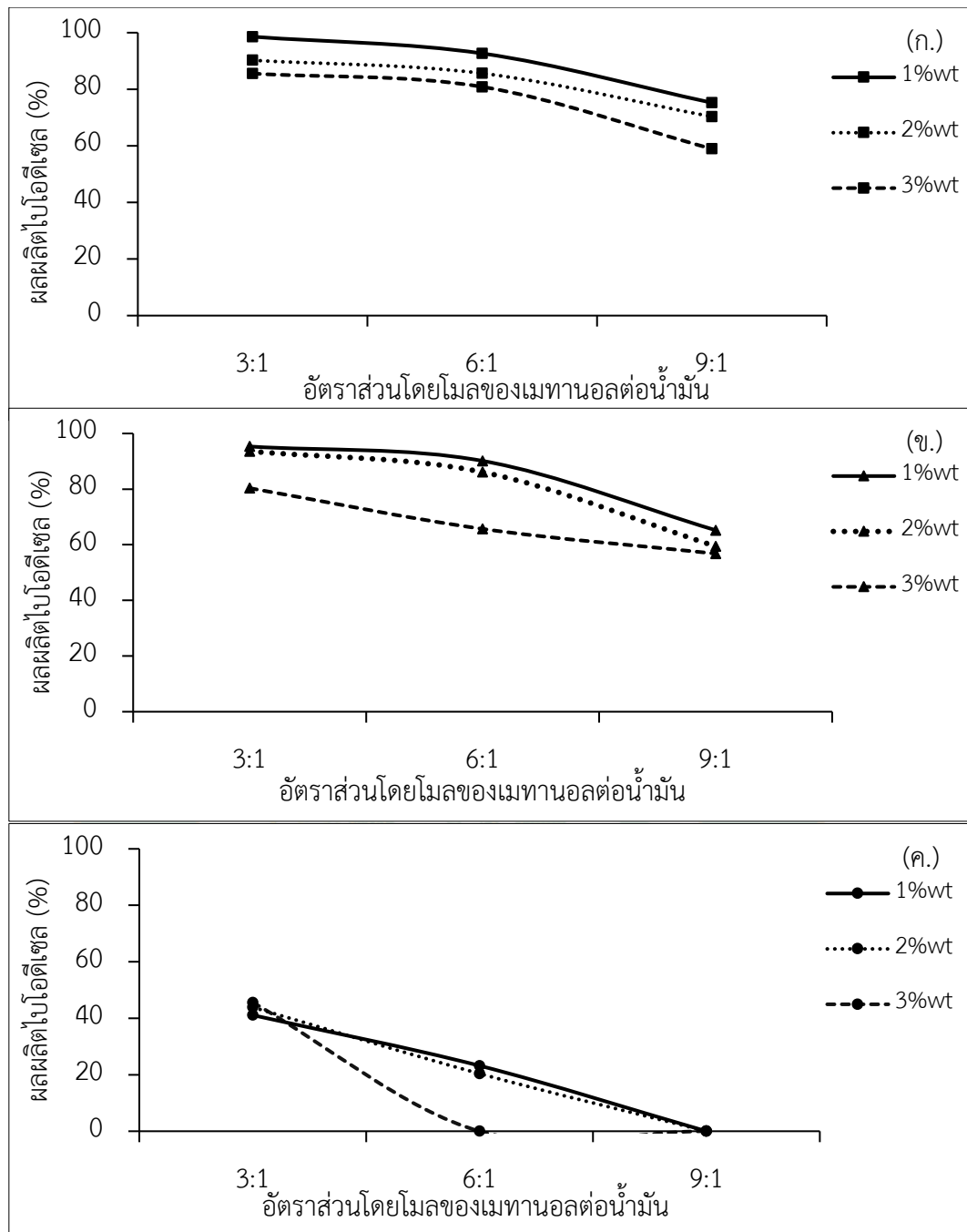
ผลผลิตเมื่อทำปฏิกิริยามากขึ้นเช่นกัน โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองที่สูงสุดที่ให้ผลผลิตมากที่สุด คือ 900 °C จึงกล่าวได้ว่าอุณหภูมิดังกล่าวเป็นอุณหภูมิการแคลไซน์ของเถ้าที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการศึกษาครั้งนี้ และทำการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เงื่อนไขการศึกษาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 3:1 ณ อุณหภูมิการให้ความร้อน 900 °C ในหัวข้อถัดไป

3. ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่มีต่อผลผลิตไบโอดีเซล

จากการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 1, 2 และ 3%wt ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 3:1 6:1 และ 9:1 ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าชีวมวลที่ศึกษา ได้แก่ เถ้าบวมะพร้าว เถ้าไม้ลำไย และเถ้ากลบข้าว ที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 900 °C และโดยควบคุมเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 1hr และ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 60 °C ได้ผลการทดลองดังแสดงตารางที่ 16 และภาพที่ 18

ตารางที่ 16 ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้จากการศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่มีผลต่อผลผลิตไบโอดีเซล

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%wt)	ผลผลิตไบโอดีเซล (%)		
		อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน		
		3:1	6:1	9:1
CCA	1	98.57	92.66	75.24
	2	90.24	85.62	70.32
	3	85.56	80.85	58.96
CLA	1	95.32	90.14	65.23
	2	93.65	86.09	59.46
	3	65.69	80.34	56.82
CRA	1	41.10	23.20	-
	2	43.90	20.40	-
	3	45.60	-	-



ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์จากการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันของตัวเร่งปฏิกิริยาจากเจ้าชิวมวล ได้แก่ (ก.) เจ้ากบมะพร้าว, (ข.) เจ้าไม้ลำไย และ (ค.) เจ้ากลบข้าว ที่มีผลต่อผลผลิตไปโอดีเซล

จากตารางที่ 16 และภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ของผลผลิตไบโอดีเซลที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน ที่ 3:1, 6:1 และ 9:1 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 1, 2 และ 3%wt ที่อุณหภูมิการให้ความร้อนที่ 900 °C พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไม่มีแนวโน้มในการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากผลผลิตไบโอดีเซลเกิดมากที่สุดปริมาณการให้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่ำ ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการใช้เมทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากเกินไปต้องการทำให้ได้ผลผลิตไบโอดีเซลที่มีแนวโน้มในการเกิดลดลง

โดยเมื่อพิจารณาที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถั่วเขียวที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 900 °C ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt เมื่อให้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน ที่ 3:1 เป็น 6:1 และ 9:1 ได้ผลผลิตไบโอดีเซล 98.57%, 92.66% และ 75.24% ตามลำดับ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 2%wt เมื่อให้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน ที่ 3:1 เป็น 6:1 และ 9:1 ได้ผลผลิตไบโอดีเซล 90.24%, 85.62% และ 70.32% ตามลำดับ และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3%wt เมื่อให้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน ที่ 3:1 เป็น 6:1 และ 9:1 ได้ผลผลิตไบโอดีเซล 85.56%, 80.85% และ 58.96% ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนว่าผลผลิตไบโอดีเซลลดลงตามลำดับ เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน

เมื่อพิจารณาที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถั่วเขียวที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 900 °C ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt เมื่อให้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน ที่ 3:1 เป็น 6:1 และ 9:1 ได้ผลผลิตไบโอดีเซล 95.32%, 90.14% และ 65.23% ตามลำดับ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 2%wt เมื่อให้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน ที่ 3:1 เป็น 6:1 และ 9:1 ได้ผลผลิตไบโอดีเซล 93.62%, 86.09% และ 59.46% ตามลำดับ และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3%wt เมื่อให้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน ที่ 3:1 เป็น 6:1 และ 9:1 ได้ผลผลิตไบโอดีเซล 80.34%, 65.69% และ 56.82% ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Suchada Sirisomboonchai, 2015) ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนว่าผลผลิตไบโอดีเซลลดลงตามลำดับเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน

เมื่อพิจารณาที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจากกลบข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 900 °C ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt เมื่อให้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน ที่ 3:1 เป็น 6:1 และ 9:1 ได้ผลผลิตไบโอดีเซล 41.10%, 23.20% และไม่เกิดปฏิกิริยา ตามลำดับ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 2%wt เมื่อให้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน ที่ 3:1 เป็น 6:1 และ 9:1 ได้ผลผลิตไบโอดีเซล 43.90%, 20.40% และไม่เกิดปฏิกิริยา ตามลำดับ และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3%wt

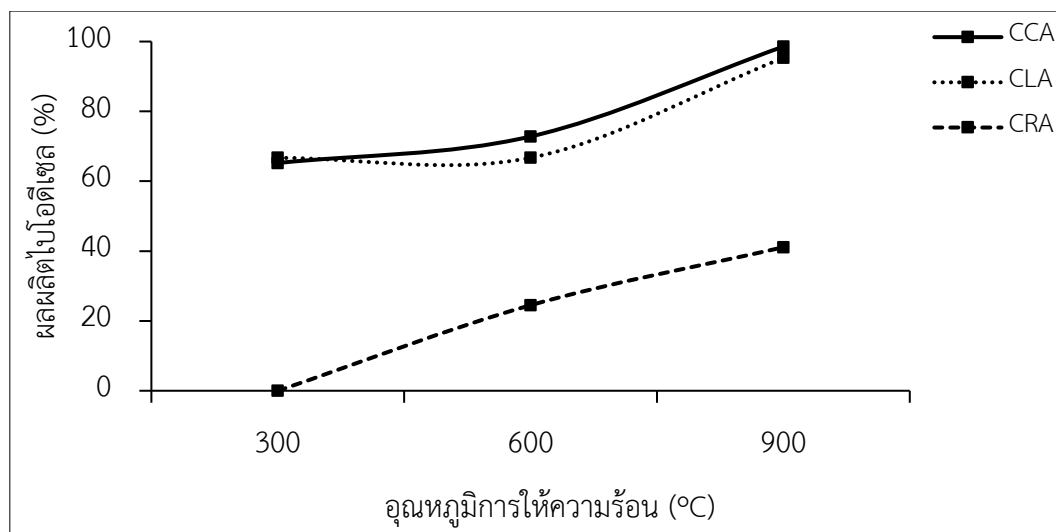
เมื่อเพื่ออัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน ที่ 3:1 ได้ผลผลิตไบโอดีเซล 45.60%. โดยที่อัตราส่วน 6:1 และ 9:1 พบว่าไม่เกิดปฏิกิริยา ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนว่าผลผลิตไบโอดีเซลลดลงตามลำดับเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน และการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากขึ้นไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของผลผลิตไบโอดีเซล ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Loy et al., 2018) ที่ทำการศึกษาลักษณะจากอุตสาหกรรมโดยพบว่า ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาจะลดลงเมื่อเพิ่มตัวทำละลาย เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยามีลักษณะเป็นของแข็งไม่สามารถละลายได้เป็นเนื้อเดียวกับตัวทำละลายได้ จึงทำให้มีของแข็งตกค้างและเป็นผลให้ผลผลิตที่เกิดในกระบวนการลดลง

4. ผลของอุณหภูมิการให้ความร้อนที่มีผลต่อผลผลิตไบโอดีเซล

จากการศึกษาผลผลิตไบโอดีเซลที่อุณหภูมิการให้ความร้อนแก่ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าชีวมวล ทั้ง 3 ชนิด ที่อุณหภูมิ 300, 600 และ 900 °C อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 1% wt เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 hr และ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 °C ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 17 และภาพที่ 19

ตารางที่ 17 ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้จากการศึกษาผลของอุณหภูมิการให้ความร้อนแก่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อผลผลิตไบโอดีเซล

อุณหภูมิการให้ความร้อน (°C)	ผลผลิตไบโอดีเซล (%)		
	ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา		
	CCA	CLA	CRA
300	65.21	66.69	0.00
600	72.81	66.72	24.50
900	98.57	95.32	41.10



ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์จากการศึกษาอุณหภูมิการให้ความร้อนแก่ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มีผลต่อผลผลิตไปโอติเซล

จากตารางที่ 17 และภาพที่ 19 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการให้ความร้อนของเถ้าชีวมวลพบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิการให้ความร้อนที่สูงขึ้นพบว่าอัตราการเกิดผลผลิตไปโอติเซลมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอุณหภูมิการให้ความร้อนที่มากขึ้น โดยเมื่อพิจารณาที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้ากาบมะพร้าวที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300 °C เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการให้ความร้อนเป็น 600 °C และ 900 °C ตามลำดับ พบว่ามีอัตราการเกิดผลผลิตไปโอติเซลมากขึ้นจาก 65.21% เป็น 72.81% และ 98.57% ตามลำดับ ที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้ากาบไม้ไผ่ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300 °C เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการให้ความร้อนเป็น 600 °C และ 900 °C ตามลำดับ พบว่ามีอัตราการเกิดผลผลิตไปโอติเซลมากขึ้นจาก 66.69% เป็น 66.72% และ 95.32% ตามลำดับ และที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้ากลบข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300 °C พบว่าไม่เกิดผลผลิตไปโอติเซลเนื่องจากปริมาณของธาตุที่พบในเถ้ามีปริมาณน้อยเกิดกว่าจะสามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการให้ความร้อนเป็น 600 °C และ 900 °C ตามลำดับ พบว่ามีอัตราการเกิดผลผลิตไปโอติเซลมากขึ้นจาก 24.50% และ 41.10% ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อให้ความร้อนซ้ำในอุณหภูมิที่สูงขึ้นพบธาตุที่สามารถให้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีมากขึ้นส่งผลให้ผลผลิตไปโอติเซลเพิ่มขึ้น โดยจากการทดลองทั้งหมดพบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการให้ความร้อนของเถ้าที่นำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อการให้ผลผลิตไปโอติเซล โดยการให้อุณหภูมิของการให้ความร้อนที่สูงขึ้นทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีองค์ประกอบของธาตุที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้นและให้ผลผลิตเมื่อทำปฏิกิริยามากขึ้นเช่นกัน โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองที่สูงสุดที่ให้ผลผลิตมากที่สุด คือ 900 °C ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Chen et al., 2013) ที่พบว่าการใช้อุณหภูมิการให้ความร้อนที่สูงขึ้นส่งผลให้เถ้ามี

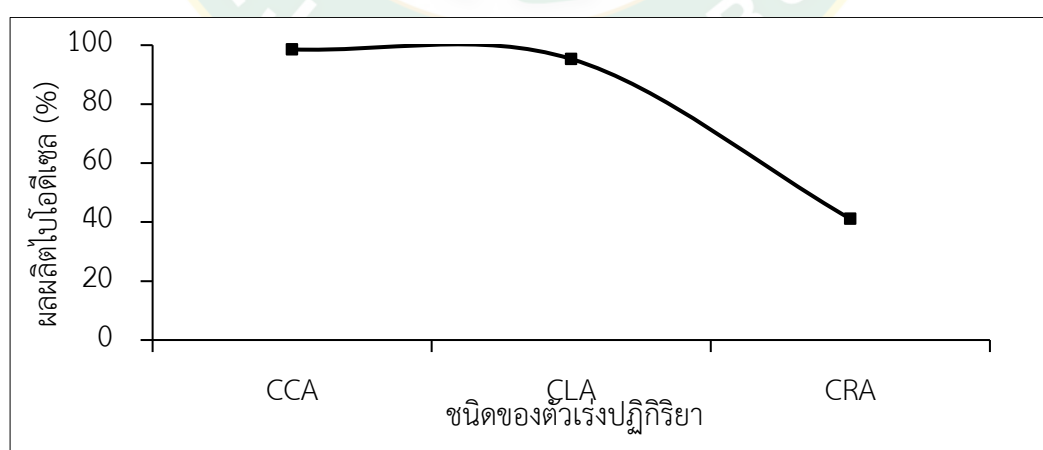
ความบริสุทธิ์มากขึ้นและลดจำนวนคาร์บอนลดลงส่งผลให้ธาตุต่างๆเพิ่มขึ้น จึงกล่าวได้ว่าอนุหภูมิดังกล่าวเป็นอนุหภูมิการแคลไซน์ของเก้าที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการศึกษาครั้งนี้

5. ผลของชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อผลผลิตไบโอดีเซล

จากการศึกษาผลผลิตไบโอดีเซลที่อนุหภูมิการให้ความร้อนแก่ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเก้าชีวมวล ทั้ง 3 ชนิด ที่อนุหภูมิ 900 °C อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 hr และ อนุหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 °C ได้ผลการทดลองดังแสดงตารางที่ 18 และภาพที่ 20

ตารางที่ 18 ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้จากการศึกษาชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อผลผลิตไบโอดีเซลที่อนุหภูมิการให้ความร้อนแก่ตัวเร่งปฏิกิริยาเก้าชีวมวลที่อนุหภูมิ 900 °C

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ผลผลิตไบโอดีเซล (%)
CCA	98.57
CLA	95.32
CRA	41.10



ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์จากการศึกษาชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อผลผลิตไบโอดีเซลที่อนุหภูมิการให้ความร้อนแก่ตัวเร่งปฏิกิริยาเก้าชีวมวลที่อนุหภูมิ 900 °C

จากการศึกษาชนิดของพบว่าเกิดการเกิดผลผลิตไบโอดีเซลของตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าชีวมวลมวลทั้ง 3 ชนิด ที่อุณหภูมิ 900 °C อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 hr และ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 °C เห็นได้อย่างชัดเจนว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้ากาบมะพร้าวและเถ้าไม้ลำไย เกิดผลผลิตไบโอดีเซลในปริมาณที่ใกล้เคียงกันเนื่องจากมีองค์ประกอบของธาตุในเถ้าที่เป็นธาตุหลักและมีผลต่อการเร่งปฏิกิริยา คือ แคลเซียม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (ปิยรัตน์ศิริ, 2556) ที่ทำการศึกษเถ้าจากชีวมวลหลายๆชนิดพบว่าปัจจัยสำคัญที่ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำหน้าที่ได้ดีที่สุดคือธาตุแคลเซียมที่อยู่ในเถ้า แต่ในเถ้ากลบขี้เถ้าพบว่ามีปริมาณผลผลิตที่ต่ำกว่าเถ้าทั้งสองชนิดข้างต้น เนื่องจากในเถ้ากลบขี้เถ้าพบธาตุออกซิเจนและซิลิกอนเป็นองค์ประกอบหลักทำให้คุณสมบัติในการเร่งปฏิกิริยาต่างกันออกไปอย่างเห็นได้ชัดซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Chen et al., 2011) ที่ทำการศึกษเถ้ากลบขี้เถ้าที่อุณหภูมิสูงสุด 900 °C พบธาตุออกซิเจนและซิลิกอนเป็นองค์ประกอบหลัก แต่ทำการสังเคราะห์รวมกับ Li_2CO_3 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดียิ่งขึ้น

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติไบโอดีเซล

ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซลได้รับการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดตามมาตรฐาน ASTM D2896 ค่าความหนาแน่น ตามมาตรฐาน ASTM D1298 ค่าความหนืดตามมาตรฐาน ASTM D445 ค่าจุดวาบไฟตามมาตรฐาน ASTM D93 และปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (EN) 14103 โดยผลการวิเคราะห์ต่างๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้

1.ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด

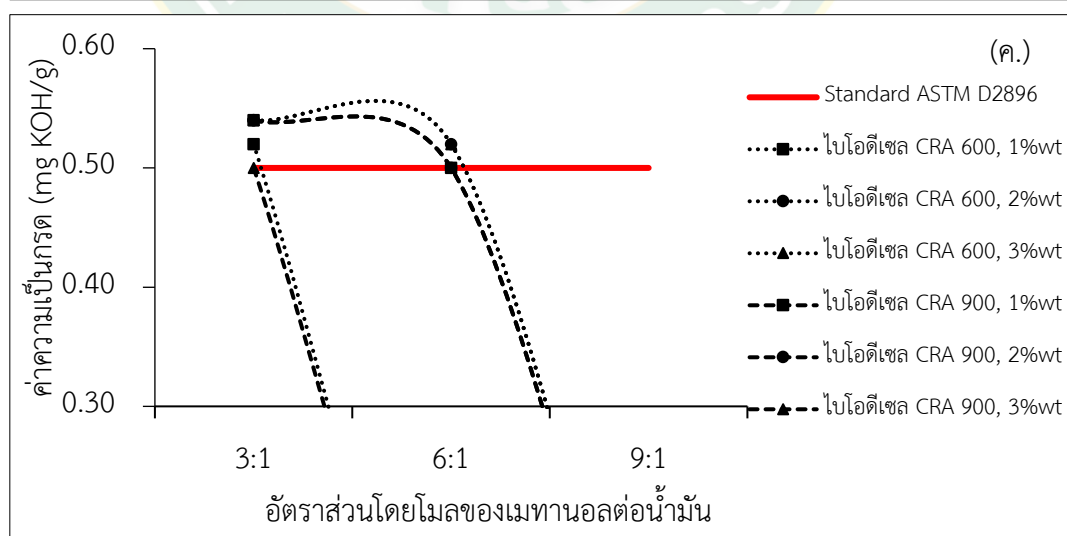
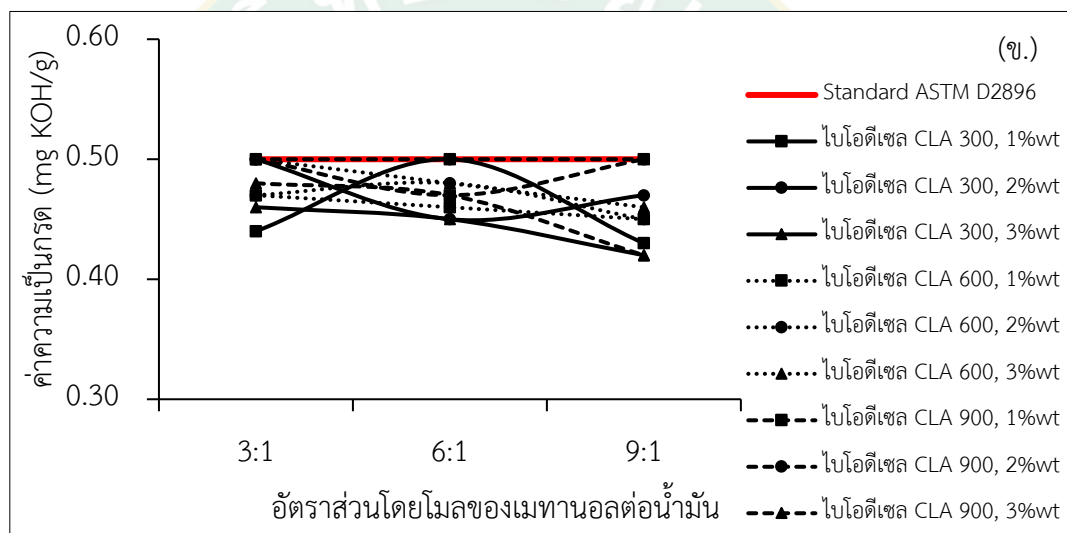
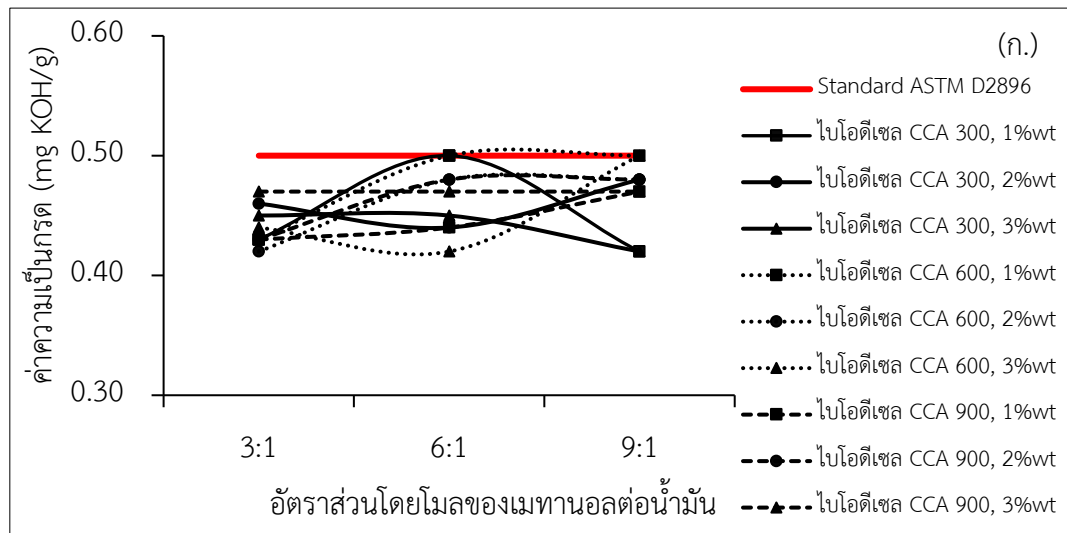
การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดเป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นทางเคมีของไบโอดีเซลจากการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 3:1, 6:1, 9:1 และ 12:1 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าชีวมวล ได้แก่ เถ้ากาบมะพร้าว เถ้าไม้ลำไย และเถ้ากลบขี้เถ้า ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300, 600 และ 900 °C เมื่อพิจารณาที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 1–3%wt ต่อน้ำหนักของน้ำมัน และโดยควบคุมเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 1 hr และ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 60 °C จากการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ทั้งหมด โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2896 ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 19 และภาพที่ 21

ตารางที่ 19 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซล

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิการใช้ความร้อนซ้ำ (°C)	ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซล (mg KOH/g)	อัตราส่วนโมเลกุลของเมทานอลต่อน้ำมัน			
			ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%wt)			
			3:1	6:1	9:1	
CCA	300	1	0.43	0.50	0.42	
			2	0.46	0.44	0.48
				3	0.45	0.45
	600	1	0.43	0.50	0.50	
			2	0.42	0.48	0.48
				3	0.44	0.42
	900	1	0.43	0.44	0.47	
			2	0.43	0.48	0.48
				3	0.47	0.47
CLA	300	1	0.44	0.50	0.43	
			2	0.50	0.45	0.47
				3	0.46	0.45

ตารางที่ 19 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซล (ต่อ)

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิการใช้ความร้อนซ้ำ (°C)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%wt)	ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซล (mg KOH/g)			
			อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน			
			3:1	6:1	9:1	
CLA	600	1	0.47	0.46	0.45	
		2	0.47	0.48	0.45	
		3	0.50	0.48	0.46	
	900	1	0.50	0.47	0.50	
		2	0.50	0.50	0.50	
		3	0.48	0.47	0.42	
	CFA	300	1	-	-	-
			2	-	-	-
			3	-	-	-
600		1	0.52	-	-	
		2	0.54	0.52	-	
		3	0.54	0.52	-	
900		1	0.54	0.50	-	
		2	0.54	0.50	-	
		3	0.50	-	-	



ภาพที่ 21 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดดของไบโอดีเซลที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจาก
 ถั่วเขียวพล ได้แก่ (ก.) ถั่วกบมะพร้าว, (ข.) ถั่วไม้ลำไย และ (ค.) ถั่วกลบข้าว

จากตารางที่ 19 และ ภาพที่ 21 ค่าความเป็นกรดเป็นค่าที่ระบุคุณสมบัติเบื้องต้นของไบโอดีเซล ทดสอบตามวิธี ASTM D2896 โดยค่าความเป็นกรดในไบโอดีเซลใช้บ่งชี้ถึงกรดไขมันอิสระที่ทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ หรือการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากเกินไปหรือมีข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการล้างไบโอดีเซล การมีค่าความเป็นกรดในน้ำมันสูงเกินไป ส่งผลให้อายุการใช้งานของระบบจ่ายน้ำมันและเครื่องสันลง ซึ่งผลที่ได้ต้องให้ค่าไม่สูงกว่า 0.50 mg KOH/g พบว่า ค่าความเป็นกรดที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้ากาบมะพร้าวมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานเพียงเล็กน้อยและสามารถยอมรับได้ โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้ากาบมะพร้าว พบว่า มีค่าความเป็นกรดอยู่ที่ ช่วง 0.42–0.50 mg KOH/g สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าไม้ลำไย พบว่า มีค่าความเป็นกรดอยู่ที่ 0.42–0.50 mg KOH/g และที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าแกลบข้าว พบว่า มีค่าความเป็นกรดอยู่ที่ 0.50–0.54 mg KOH/g ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนว่าในเถ้ากาบมะพร้าวและเถ้าไม้ลำไยนั้นมีค่าความเป็นกรดที่ผ่านมาตรฐานทั้งหมด ส่วนในเถ้าของแกลบข้าวพบว่ามีบางค่าที่สูงกว่ามาตรฐาน ซึ่งค่าความเป็นกรดในไบโอดีเซลเป็นตัวที่บ่งบอกถึงกรดไขมันอิสระที่ทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย (Chandran et al., 2018) ที่ทำการศึกษาค่าความเป็นกรดในไบโอดีเซลเพื่อเป็นตัวบ่งชี้คุณสมบัติของไบโอดีเซลเพื่อใช้ในการทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลต่อไป

2.ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่น

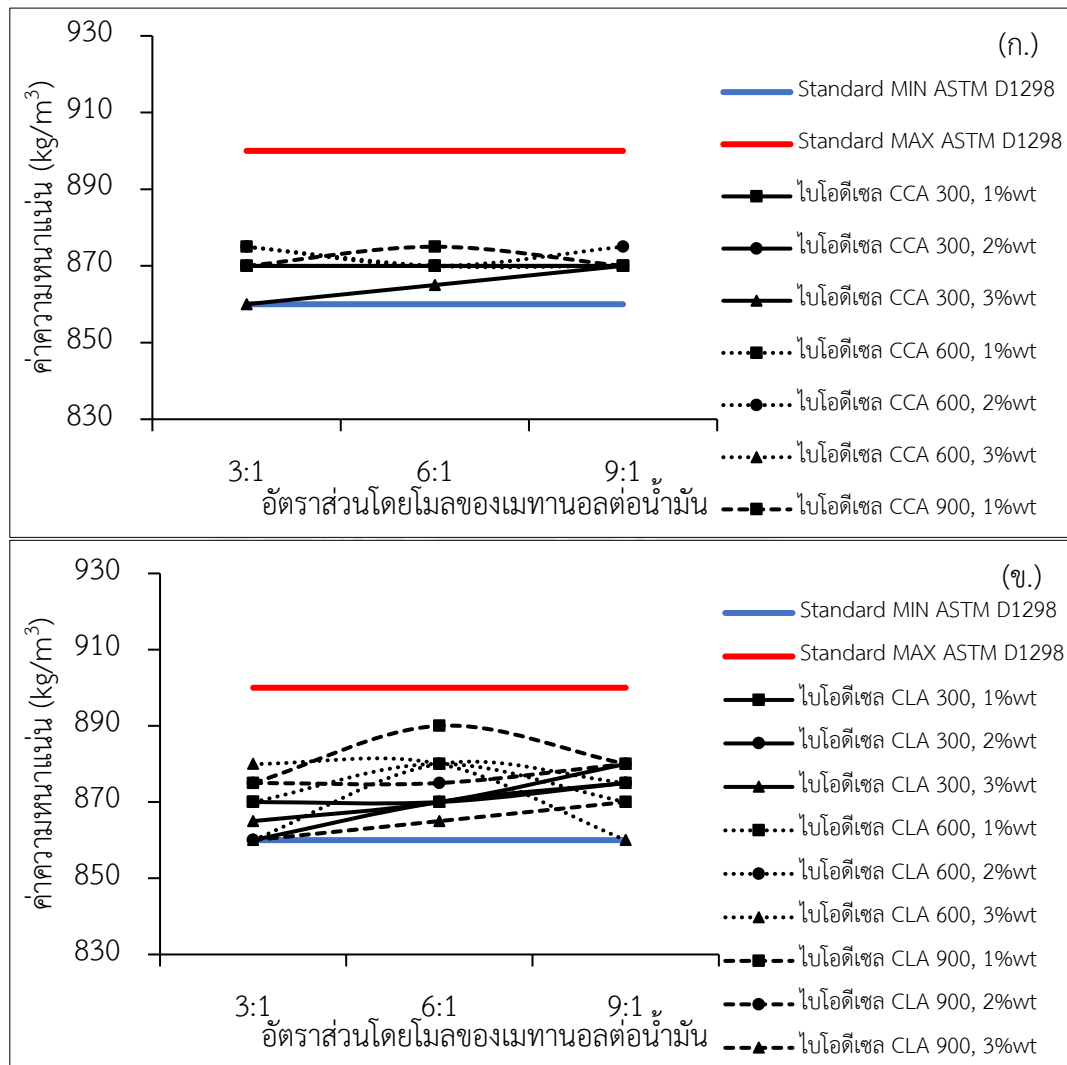
การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นเป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นทางเคมีของไบโอดีเซลจากการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 3:1, 6:1, 9:1 และ 12:1 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าชีวมวล ได้แก่ เถ้ากาบมะพร้าว เถ้าไม้ลำไย และเถ้าแกลบข้าว ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300 °C, 600 °C และ 900 °C เมื่อพิจารณาที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 1–3%wt ต่อน้ำหนักของน้ำมัน และโดยควบคุมเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 1 hr และ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 60 °C จากการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ทั้งหมด โดยเงื่อนไขการใช้เถ้าแกลบข้าวไม่สามารถวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นได้เนื่องจากผลผลิตที่ได้ต่ำกว่า 25 mL ซึ่งมีปริมาณไม่เพียงพอในการทดสอบ โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1298 ผลการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 20 และภาพที่ 22

ตารางที่ 20 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นหนาแน่นของไปโอดีเซล

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิการใช้ความร้อนซ้ำ (°C)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%wt)	ค่าความหนาแน่น (kg/m ³)		
			อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน		
			3:1	6:1	9:1
CCA	300	1	870	870	870
		2	870	870	870
		3	860	865	870
	600	1	875	870	870
		2	875	870	875
		3	870	870	870
	900	1	870	875	870
		2	860	870	870
		3	870	880	870
CLA	300	1	870	870	875
		2	860	870	875
		3	865	870	880

ตารางที่ 20 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นหนานเนนของไบโอดีเซล (ต่อ)

ชนิดของตัวเร่ง ปฏิกิริยา	อุณหภูมิการใช้ความร้อนซ้ำ (°C)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%wt)	ค่าความหนานเนน (kg/m ³)			
			อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน			
			3:1	6:1	9:1	
CLA	600	1	870	880	870	
		2	860	880	875	
		3	880	880	860	
	900	1	875	890	880	
		2	875	875	880	
		3	860	865	870	
	CRA	300	1	-	-	-
			2	-	-	-
			3	-	-	-
600		1	-	-	-	
		2	-	-	-	
		3	-	-	-	
900		1	-	-	-	
		2	-	-	-	
		3	-	-	-	



ภาพที่ 22 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของไบโอดีเซลที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจาก
 ถั่วเขียวผุ ได้แก่ (ก.) ถั่วกาบมะพร้าว และ (ข.) ถั่วไม่ลำไย

จากตารางที่ 20 และ ภาพที่ 22 ค่าความหนาแน่นเป็นค่าที่ระบุคุณสมบัติไบโอดีเซล ทดสอบตามวิธี ASTM D1298 ซึ่งค่ามาตรฐานกำหนดไว้ที่ช่วง 860–900 kg/m³ คุณลักษณะที่สัมพันธ์กับสมรรถนะ เช่น คุณภาพการจุดระเบิด, กำลัง, การประหยัดเชื้อเพลิง, คุณสมบัติที่อุณหภูมิต่ำและแนวโน้มของควัน พบว่า ค่าความหนาแน่นที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถั่วกาบมะพร้าวมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานเพียงเล็กน้อยและสามารถยอมรับได้ โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถั่วกาบมะพร้าว พบว่ามีค่าความหนาแน่นอยู่ที่ ช่วง 860–890 kg/m³ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาจากถั่วไม่ลำไย พบว่ามีค่าความหนาแน่นอยู่ที่ 860–890 kg/m³ ซึ่งความหนาแน่นมีผลกระทบต่อค่าความร้อน และการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง โดยปริมาณของเชื้อเพลิงที่ส่งเข้าไปในห้องเผา

ไหม้สามารถคิดในเชิงปริมาตร ค่าความร้อนจะวัดต่อหน่วยมวล ดังนั้นเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นสูงกว่าหากมีค่าความร้อนต่อมวลเท่ากันก็จะให้ค่าความร้อนสูงกว่าด้วยเนื่องจากประสิทธิภาพในการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ที่ต่างกันไป โดยไบโอดีเซลจะมีประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูงกว่าดีเซล เนื่องจากในโมเลกุลมีอะตอมออกซิเจน แก๊สไอเสียที่ออกมาจะมีคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยกว่า ซึ่งหมายถึงเกิดการเผาไหม้ที่บริบูรณ์กว่าดีเซล โดยจากการศึกษาพบว่าไบโอดีเซลที่ผลิตได้อยู่ในช่วงของค่ามาตรฐานโดยมีค่าอยู่ระหว่าง $860\text{--}890\text{ kg/m}^3$ ซึ่งพบว่า 100% ของการทดลองทั้งหมดผ่านมาตรฐาน

3.ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืด

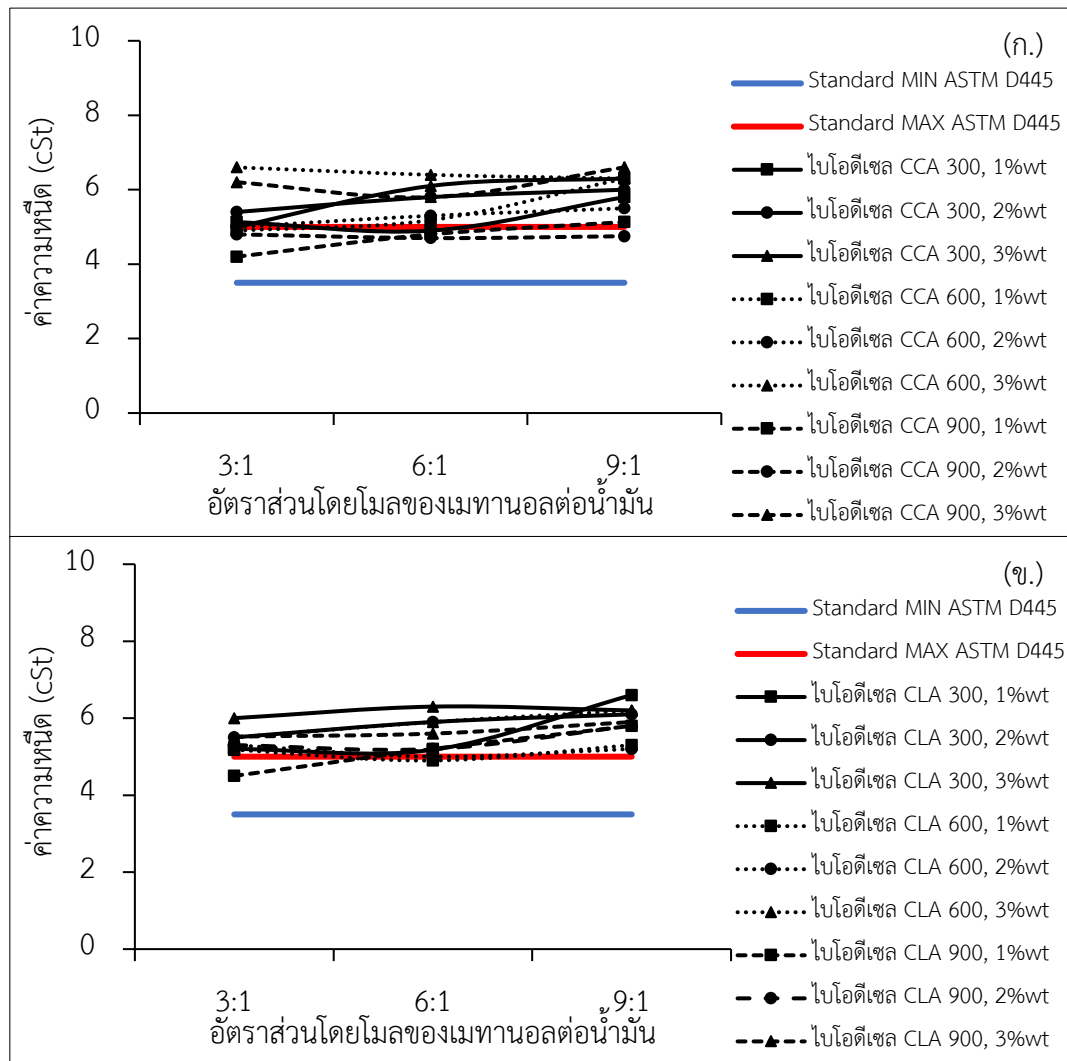
การวิเคราะห์ค่าความหนืดเป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นทางเคมีของไบโอดีเซล จากการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 3:1, 6:1, 9:1 และ 12:1 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าชีวมวล ได้แก่ เถ้ากาบมะพร้าว เถ้าไม้ลำไย และเถ้าแกลบข้าว ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ เมื่อพิจารณาที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 1–3%wt ต่อน้ำหนักของน้ำมัน และโดยควบคุมเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 1 hr และ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ จากการวิเคราะห์ค่าความหนืดของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ทั้งหมด โดยเงื่อนไขการใช้เถ้าแกลบข้าวไม่สามารถวิเคราะห์ค่าความหนืดได้เนื่องจากผลผลิตที่ได้มีปริมาณไม่เพียงพอในการทดสอบ โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D445 ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 21 และภาพที่ 23

ตารางที่ 21 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของไบโอดีเซล

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิการใช้ความร้อนซ้ำ (°C)	ค่าความหนืด (cSt)	อัตราส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน			
			ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%wt)	3:1	6:1	9:1
				1	2	3
CCA	300	1	5.13	4.9	5.8	
			5.4	5.8	6	
			5	6.1	6.3	
	600	1	4.9	5.18	6.3	
			5	5.3	5.5	
			6.6	6.4	6.3	
	900	1	4.2	4.8	5.13	
			4.8	4.7	4.75	
			6.2	5.8	6.6	
CLA	300	1	5.2	5.18	6.6	
			5.5	5.9	6.1	
			6	6.3	6.2	

ตารางที่ 21 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของไบโอดีเซล (ต่อ)

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิการใช้ความร้อนซ้ำ (°C)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%wt)	ค่าความหนืด (cSt)			
			อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	3:1	6:1	9:1
CLA	600	1	5.18	4.9	5.3	
		2	5.3	5	5.2	
		3	5.5	5.9	6.2	
	900	1	4.5	5.2	5.8	
		2	5.3	5.2	5.8	
		3	5.52	5.6	5.9	
	CRA	300	1	-	-	-
			2	-	-	-
			3	-	-	-
600		1	-	-	-	
		2	-	-	-	
		3	-	-	-	
900		1	-	-	-	
		2	-	-	-	
		3	-	-	-	



ภาพที่ 23 ผลการวิเคราะห์ค่าความเหน็ดของโพลีเอทีเชลที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจาก
 ถ้ำซีมมวล์ ได้แก่ (ก.) ถ้ำกาบมะพร้าว และ (ข.) ถ้ำไม้ลำไย

จากตารางที่ 21 และภาพที่ 23 ค่าความเหน็ดเป็นค่าที่ระบุคุณสมบัติเบื้องต้นของโพลีเอทีเชล ทดสอบด้วยมาตรฐาน ASTM D 445 ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 3.5–5 cSt ค่าความเหน็ดเป็นตัวบ่งบอกถึงความสามารถในการไหล ค่าความเหน็ดจะแปรเปลี่ยนไปตามคาอุนทุมิ ยิ่งคาอุนทุมิสูงค่าความเหน็ดยิ่งน้อยลง และความสามารถในการไหลจะยิ่งดีขึ้น พบว่า ค่าความเหน็ดที่ได้จากการผลิตโพลีเอทีเชลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ้ำกาบมะพร้าวมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานเพียงเล็กน้อยและสามารถยอมรับได้ โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ้ำกาบมะพร้าว พบว่า มีค่าความเหน็ดอยู่ที่ 4.5–6.6 cSt สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ้ำไม้ลำไยปริมาณของตัวเร่ง พบว่ามีค่าความเหน็ดอยู่ที่ 4.9–6.6 cSt โดยพบการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ้ำกาบมะพร้าวที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt อัตราส่วนโดย

มวลของเมทานอลต่อน้ำมันพีซีใช้แล้วที่ 3:1 พบว่า มีค่าความหนืดต่ำที่สุดอยู่ที่ 4.5 cSt สำหรับน้ำมันประเภทดีเซลที่ใช้ในเครื่องยนต์เมื่อมีคราบสกปรกหรือสารประกอบที่เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะทำให้ น้ำมันมีค่าความหนืดที่เพิ่มสูงขึ้นหรือหากมีการปนเปื้อนของสิ่งสกปรกแขวนลอยที่เป็นของแข็งในน้ำมันก็จะทำให้ค่าความหนืดของน้ำมันเพิ่มสูงขึ้น เช่น ของแข็งแขวนลอยที่มีปริมาณเกิน 5 %wt ในน้ำมันประเภทดีเซลหากมีความหนืดสูงมากและทำให้เกิดปัญหาในการสตาร์ทการจุดตันในไส้กรองและส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องยนต์ชำรุดได้ ความหนืดมีผลต่อการไหล ความต้านทานการไหล คุณสมบัติในการหล่อลื่นพื้นผิว และการฉีดยุติของหัวฉีดในห้องเผาไหม้ หากความหนืดไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของปั๊มและหัวฉีดของเครื่องยนต์เพราะการฉีดยุติน้ำมันให้เป็นฝอยจะทำได้ยาก ส่งผลให้การเผาไหม้น้ำมันเกิดไม่สมบูรณ์ กำลังของเครื่องยนต์ตก เกิดควันดำ และสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง น้ำมันประเภทดีเซลมักจะมีการกำหนดคุณสมบัติขอบเขตบนของความหนืดเพื่อให้อายุการใช้งาน การไหลของน้ำมันที่เพียงพอสำหรับการฉีดเครื่องยนต์และยังมีการกำหนดความหนืดต่ำสุด เพื่อป้องกันการสูญเสียกำลังที่ อุณหภูมิสูงด้วยเนื่องจากหากว่าเชื้อเพลิงมีค่าความหนืดต่ำเกินไปจะทำให้การพ่นของสเปรย์ยาวเกินไป ซึ่งจะทำให้เกิดการเปียกที่ผนังห้องเผาไหม้ทำให้สูญเสียกำลังของเครื่องยนต์ได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Gülüm and Bilgin, 2017) ที่ทำการศึกษความสัมพันธ์ของความหนืดความหนาแน่นของไบโอดีเซลที่เป็นตัวบ่งชี้คุณสมบัติของไบโอดีเซลเพื่อใช้ในการทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซล

4.ผลการวิเคราะห์จุดวาบไฟ

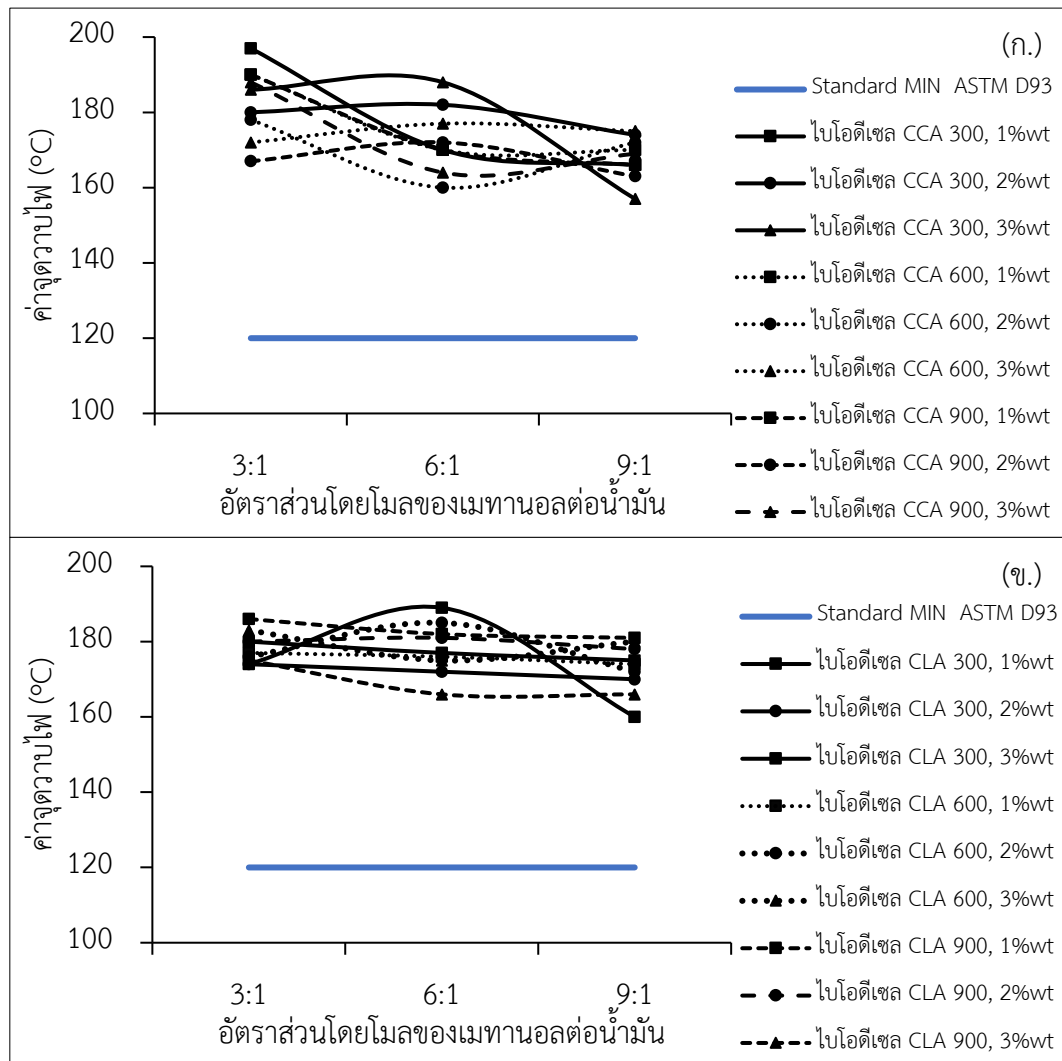
การวิเคราะห์ค่าจุดวาบไฟเป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นทางเคมีของไบโอดีเซล จากการศึกษาอัตราส่วนโดยมวลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 3:1, 6:1, 9:1 และ 12:1 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าชีวมวล ได้แก่ เถ้ากาบมะพร้าว เถ้าไม้ลำไย และเถ้าแกลบข้าว ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300 °C, 600 °C และ 900 °C เมื่อพิจารณาที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 1–3%wt ต่อน้ำหนักของน้ำมัน และโดยควบคุมเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 1 hr และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 60 °C จากการวิเคราะห์ค่าจุดวาบไฟของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ทั้งหมด โดยเงื่อนไขการใช้เถ้าแกลบข้าวไม่สามารถวิเคราะห์ค่าจุดวาบไฟได้เนื่องจากผลผลิตที่ได้มีปริมาณไม่เพียงพอในการทดสอบ โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D93 ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 22 และภาพที่ 24

ตารางที่ 22 ผลการวิเคราะห์ค่าจุดวาบไฟของไบโอดีเซล

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิการใช้ความร้อนซ้ำ (°C)	ค่าจุดวาบไฟ (°C)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%wt)	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน		
				3:1	6:1	9:1
				1	2	3
CCA	300	1	1	197	170	166
				2	182	174
				3	186	157
	600	1	1	190	170	170
				2	160	172
				3	172	175
	900	1	1	190	170	166
				2	167	163
				3	188	169
CLA	300	1	1	180	177	175
				2	174	170
				3	174	160

ตารางที่ 22 ผลการวิเคราะห์ค่าจุดวาบไฟของไบโอดีเซล (ต่อ)

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิการใช้ความร้อนซ้ำ (°C)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%wt)	ค่าจุดวาบไฟ (°C)		
			อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน		
			3:1	6:1	9:1
CLA	600	1	177	176	174
		2	176	185	172
		3	183	175	180
	900	1	186	182	181
		2	180	181	178
		3	175	166	166
CRA	300	1	-	-	-
		2	-	-	-
		3	-	-	-
	600	1	-	-	-
		2	-	-	-
		3	-	-	-
	900	1	-	-	-
		2	-	-	-
		3	-	-	-



ภาพที่ 24 ผลการวิเคราะห์ค่าจุดวาบไฟไบโอดีเซลที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจาก
 ถั่วเขียวผุส ได้แก่ (ก.) ถั่วกบมะพร้าว และ (ข.) ถั่วไม้ลำไย

จากตารางที่ 22 และภาพที่ 24 ค่าจุดวาบไฟเป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นทางเคมีของไบโอดีเซล โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D93 โดยผลการศึกษาพบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถั่วกบมะพร้าวและถั่วไม้ลำไยผ่านมาตรฐานการทดสอบทั้งหมด เนื่องจากมีค่าจุดวาบไฟอยู่ที่ 157–197 °C จุดวาบไฟเป็นตัวที่บ่งบอกถึงความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ต่อการเก็บรักษาหรือขนส่งน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งจุดวาบไฟนั้นเป็นอุณหภูมิต่ำสุดที่เชื้อเพลิงสามารถลุกวาบไฟได้เท่านั้นซึ่งในทางปฏิบัติแล้วจุดวาบไฟถูกทดสอบเพื่อป้องกันอันตรายจากอัคคีภัยในการเก็บรักษาและการทำงาน โดยไม่มีความสำคัญโดยตรงต่อสมบัติการเผาไหม้และประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ ซึ่งการมีค่าจุดวาบไฟที่ต่ำกว่ามาตรฐานนั้นเกิดจากการที่กำจัดเมทานอลออกจากกระบวนการผลิตไม่หมด แอลกอฮอล์

จะส่งผลให้การวาบไฟและติดไฟเกิดขึ้นได้รวดเร็วขึ้น การมีค่าจุดวาบไฟที่สูงแสดงให้เห็นว่าการกักเก็บและขนส่งไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีความปลอดภัย

5.ผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์

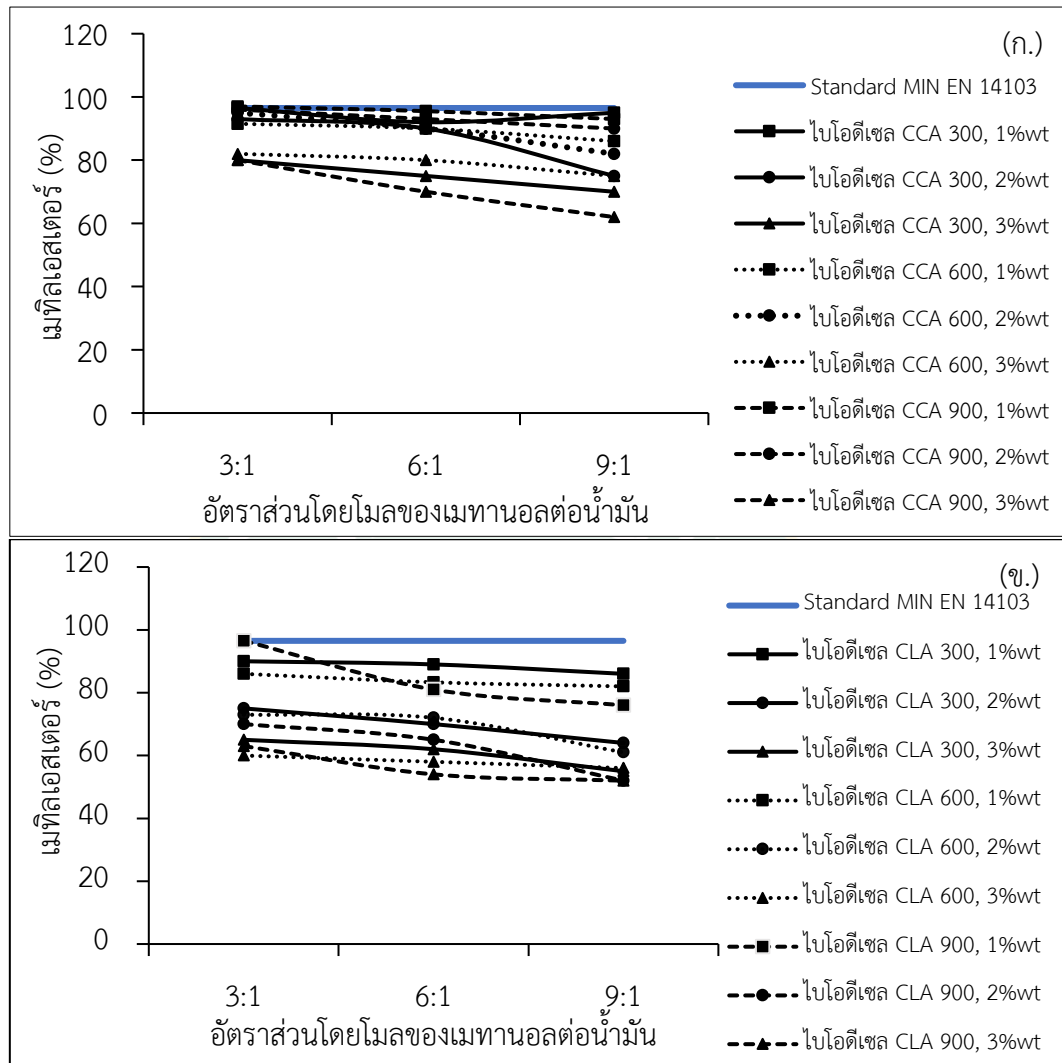
การวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์เป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นทางเคมีของไบโอดีเซล จากการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 3:1, 6:1, 9:1 และ 12:1 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าชีวมวล ได้แก่ เถ้ากาบมะพร้าว เถ้าไม้ลำไย และเถ้าแกลบข้าว ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300 °C, 600 °C และ 900 °C เมื่อพิจารณาที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 1–3%wt ต่อน้ำหนักของน้ำมัน และโดยควบคุมเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 1 hr และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 60 °C จากการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ทั้งหมด โดยเงื่อนไขการใช้เถ้าแกลบข้าวไม่สามารถวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ได้เนื่องจากผลผลิตที่ได้มีปริมาณไม่เพียงพอในการทดสอบ โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน EN 14103 ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 23 และภาพที่ 25

ตารางที่ 23 ผลการวิเคราะห์ค่าเมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซล

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิการใช้ความร้อนซ้ำ (°C)	เมทิลเอสเทอร์ (%)	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน								
			ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%wt)	3:1	6:1	9:1					
							ปฏิกิริยา				
CCA	300	1	96.5	92	95	1					
							2	93	90	75	2
							3	80	75	70	3
	600	1	91.5	90	86	1					
							2	95	90	82	2
							3	82	80	75	3
	900	1	97	95.5	93	1					
							2	96	93	90	2
							3	80	70	62	3
CLA	300	1	90	89	86	1					
							2	75	70	64	2
							3	65	62	55	3

ตารางที่ 23 ผลการวิเคราะห์ค่าเมทิลเอสเทอร์ของโปอิตีเซล (ต่อ)

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิการใช้ความร้อนซ้ำ (°C)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%wt)	เมทิลเอสเทอร์ (%)			
			อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน		
				3:1	6:1	9:1
CLA	600	1	86	83.3	82	
		2	73	72	61	
		3	60	58	56	
	900	1	96.5	81	76	
		2	70	65	52	
		3	63	54	52	
	CRA	300	1	-	-	-
			2	-	-	-
			3	-	-	-
600		1	-	-	-	
		2	-	-	-	
		3	-	-	-	
900		1	-	-	-	
		2	-	-	-	
		3	-	-	-	



ภาพที่ 25 ผลการวิเคราะห์ค่าเมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจาก
 ถั่วเขียวมวน ได้แก่ (ก.) ถั่วกานมะพร้าว และ (ข.) ถั่วไม้ลำไย

จากตารางที่ 23 และภาพที่ 25 จากการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ของน้ำไบโอดีเซลที่ผลิตได้นี้ พบว่าไบโอดีเซลที่ผลิตได้และมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตามมาตรฐานตามมาตรฐาน EN 14103 ที่กำหนดให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ควรมีค่ามากกว่า 96.5%wt (ศูนย์บริการวิชาการที่ 3, 2553) คือ เงื่อนไขการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถั่วกานมะพร้าวและถั่วไม้ลำไยที่อุณหภูมิการให้ความร้อนที่ 900 °C อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 hr และ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 60 °C ผลการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์นั้นจะเป็นข้อบ่งชี้ถึงความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล

ผลการวิเคราะห์การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ กับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก

จากการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าชีวมวล ผลการศึกษาการทำปฏิกิริยาที่เงื่อนไขของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้ากาบมะพร้าวและเถ้าไม้ลำไยที่ดีที่สุดของทั้งสองชนิดเหมือนกัน คือ อุณหภูมิการให้ความร้อนที่ 900 °C อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt พบว่าให้ปริมาณผลผลิต 98.57% และ 95.32% ตามลำดับ โดยผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลที่ได้ผ่านมาตรฐานการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM (American Society of Testing and Materials) และ EN (European Standard) โดยนำน้ำมันดังกล่าวมาเป็นเงื่อนไขในการวิเคราะห์การใช้งานกับเครื่องยนต์ดีเซลร่วมกับน้ำมันดีเซลที่มีขายในท้องตลาด โดยเครื่องยนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ เครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก ALL POWER รุ่น 186F ซึ่งเป็นเครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะ สูบเดียว ระบายความร้อนด้วยอากาศ ขนาด 10 HP โดยได้ทำการแบ่งน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในการวิเคราะห์ออกเป็น 6 ชนิด ดังนี้

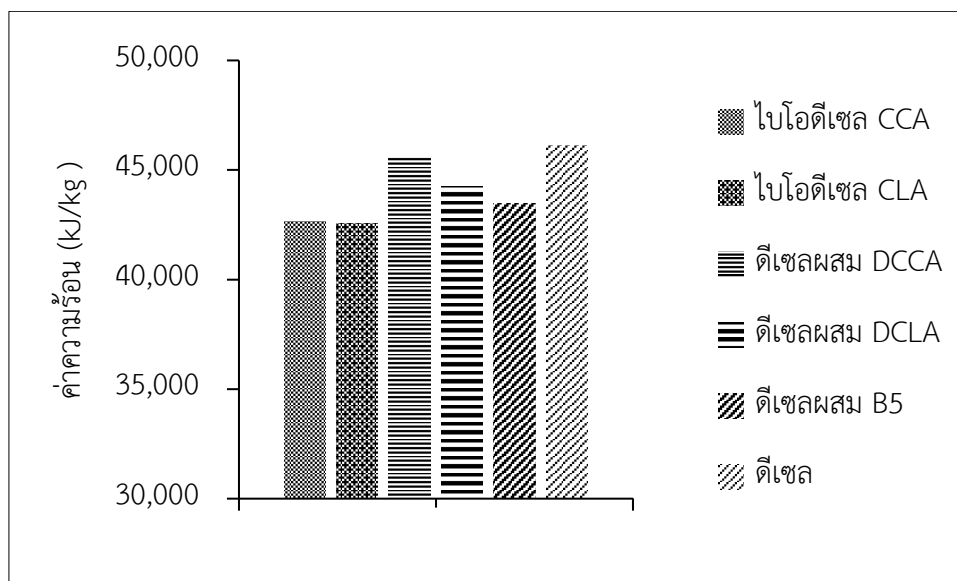
- 1) ไบโอดีเซล CCA (ไบโอดีเซลที่ผลิตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้ากาบมะพร้าว 100%)
- 2) ไบโอดีเซล CLA (ไบโอดีเซลที่ผลิตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าไม้ลำไย 100 %)
- 3) ดีเซลผสม DCCA (ดีเซล 95% ผสมกับไบโอดีเซลที่ผลิตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้ากาบมะพร้าว (CCA) 5%)
- 4) ดีเซลผสม DCLA (ดีเซล 95% ผสมกับไบโอดีเซลที่ผลิตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าไม้ลำไย (CLA) 5%)
- 5) ดีเซลผสม B5 (ดีเซล 95% ผสมไบโอดีเซล 5% ที่มีขายในท้องตลาด)
- 6) ดีเซล (ดีเซล 100% ที่มีขายในท้องตลาด)

1. ผลการทดสอบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก

ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่น

ความหนาแน่นเป็นค่าที่ระบุคุณสมบัติไบโอดีเซล ทดสอบตามวิธี ASTM D1298 ซึ่งค่ามาตรฐานกำหนดไว้ในช่วง 860–900 kg/m³ โดยได้ทำการศึกษาเงื่อนไขของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้ากาบมะพร้าวและเถ้าไม้ลำไยที่ดีที่สุดของทั้งสองชนิดเหมือนกัน คือ อุณหภูมิการให้ความร้อนที่

900 °C อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 hr และ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 60 °C ได้เป็นผลิตภัณฑ์ ไบโอดีเซล CCA และ ไบโอดีเซล CLA ตามลำดับ และทำการศึกษาร่วมกับดีเซลผสม DCCA, ดีเซลผสม DCLA, ดีเซลผสม B5 และดีเซล ให้ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น ดังแสดงในภาพที่ 26



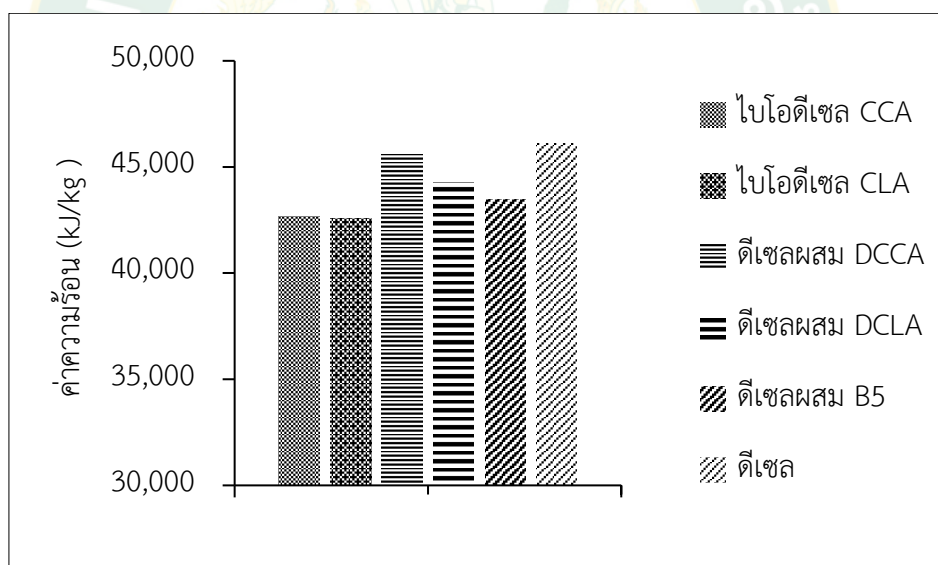
ภาพที่ 26 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของไบโอดีเซลและดีเซลผสมที่ใช้ในการทดสอบเครื่องยนต์

จากภาพที่ 26 พบว่า ความหนาแน่นของไบโอดีเซลที่ผลิตได้อยู่ในช่วงของค่ามาตรฐานโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 860–890 kg/m³ โดยพบว่า ผลิตภัณฑ์จากการทดสอบทั้งหมดผ่านมาตรฐาน 100% โดยค่าความหนาแน่นที่ได้จากการทดสอบ พบว่า ไบโอดีเซล CCA, ไบโอดีเซล CLA, ดีเซลผสม DCCA, ดีเซลผสม DCLA, ดีเซล B5 และดีเซล มีค่าความหนาแน่น เท่ากับ 870, 875, 860, 860, 850 และ 850 kg/m³ ตามลำดับ โดยความหนาแน่นมีผลกระทบต่อค่าความร้อน และการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ความหนาแน่นจากการทดสอบพบว่า ไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้ากาบมะพร้าว และเถ้าไม้ลำไย มีและดีเซลผสม B5 ความหนาแน่นแปรผันโดยตรงต่อความหนืด แต่แปรผกผันต่ออัตราการไหลของเชื้อเพลิงที่ส่งเข้าไปในห้องเผาไหม้ จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ลดต่ำลงเมื่อความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (คุณานนท์ และเกียรติฟ้า, 2556) ที่กล่าวว่าเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นที่มากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความหนืดสูงขึ้น และค่าอัตราการไหลในเชื้อเพลิงต่ำลง โดยเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นต่างกันแต่มีค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่

เท่ากัน เชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นที่ต่ำกว่าจะทำให้สมรรถนะในการใช้งานดีกว่า เนื่องจากอัตราไหลของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ดีกว่า

ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อน

การวิเคราะห์ค่าความร้อน เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิง จากตามมาตรฐาน ASTM D4809 โดยได้ทำการศึกษาเงื่อนไขของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้ากาบมะพร้าวและเถ้าไม้ลำไยที่ดีที่สุดของทั้งสองชนิดเหมือนกัน คือ อุณหภูมิการให้ความร้อนที่ 900 °C อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 hr และ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 60 °C ได้เป็นผลิตภัณฑ์ ไบโอดีเซล CCA และไบโอดีเซล CLA ตามลำดับ และทำการศึกษาร่วมกับดีเซลผสม DCCA, ดีเซลผสม DCLA, ดีเซลผสม B5 และดีเซล ให้ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น ดังแสดงในภาพที่ 27



ภาพที่ 27 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของไบโอดีเซลและดีเซลผสมที่ใช้ในการทดสอบเครื่องยนต์

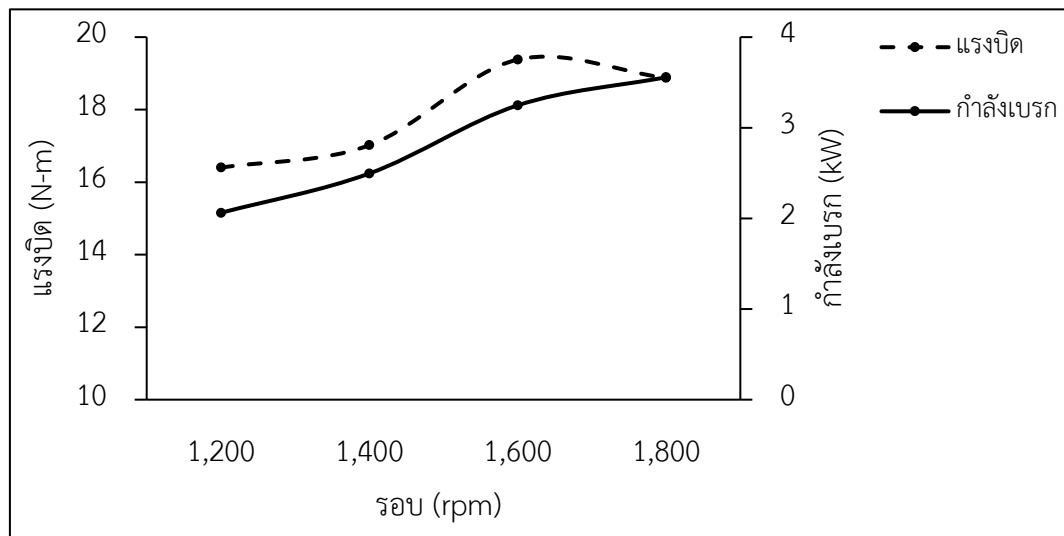
จากภาพที่ 27 พบว่า ค่าความร้อนของไบโอดีเซล CCA, ไบโอดีเซล CLA, ดีเซลผสม DCCA, ดีเซลผสม DCLA, ดีเซลผสม B5 และดีเซล มีค่าเท่ากับ 42,646, 42,556, 45,580, 44,256, 43,460 และ 46,100 kJ/kg ตามลำดับ โดยพบว่า ค่าความร้อนของดีเซลที่จำหน่ายตามท้องตลาดมีค่าร้อนสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับ (กรมธุรกิจพลังงาน, 2558) กล่าวได้ว่าโดยทั่วไปแล้วดีเซลที่จำหน่ายตามท้องตลาดนั้นเพื่อให้มีประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงสุดได้มีการผสมสารเติมแต่งลงในน้ำมันหรือใช้

เทคโนโลยีการกลั่นเพื่อปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันก่อนการจำหน่าย ซึ่งการที่น้ำมันดีเซลมีประสิทธิภาพดีนั้นค่าความร้อนเป็นพารามิเตอร์หนึ่งในการชี้วัด ประกอบกันในปัจจุบันกรมธุรกิจพลังงานได้มีการกำหนดให้ผู้ค้าน้ำมันต้องมีสารเติมแต่งประเภทสารชะล้าง ทำให้คุณภาพของดีเซลที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไปมีคุณภาพที่ดีขึ้น สำหรับไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้ากาบมะพร้าว และเถ้าไม้ลำไยมีค่าความร้อนที่ใกล้เคียงกัน และอยู่ในมาตรฐานของเชื้อเพลิงดีเซล โดยการใช้ดีเซลผสมร่วมกับไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้ากาบมะพร้าว และเถ้าไม้ลำไย พบว่ามีค่าความร้อนที่ดีขึ้นมีค่าความร้อนที่ใกล้เคียงกับดีเซลมาตรฐานและดีเซล B5 ที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด ซึ่งแสดงถึงคุณภาพที่ดีของเชื้อเพลิงไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าชีวมวล สอดคล้องกับ (ไชยยันต์ และคณะ, 2551) ที่ทำการศึกษาใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 °C พบว่าให้ค่าความร้อนจากไบโอดีเซลที่ผลิตได้ 39,886 kJ/kg และค่าความร้อนจากดีเซล 46,768 kJ/kg ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน โดยในส่วนของน้ำมันดีเซล B5 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน, 2550) ระบุว่า เป็นการผสมระหว่างดีเซลในอัตราส่วนดีเซลต่อน้ำมันพืชที่เรียกว่าไบโอดีเซลลูกผสมในอัตราส่วน 95:5 หรือการผสมระหว่างดีเซลในอัตราส่วนดีเซลต่อน้ำมันไบโอดีเซลประเภทเอสเทอร์ในอัตราส่วน 95:5 ซึ่งหากพิจารณาแล้วเป็นลักษณะของการใช้น้ำมันดีเซลชนิดลูกผสม โดยที่มีน้ำมันพืชเป็นส่วนประกอบอาจส่งผลให้คุณสมบัติต่างๆ มีค่าที่ต่ำกว่าการใช้ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์มาเป็นส่วนผสมของเชื้อเพลิงซึ่งสอดคล้องกับ (วุฒินันท์ และคณะ, 2550) ที่ทำการศึกษาการใช้ดีเซลผสมในอัตราส่วนต่างๆร่วมกับน้ำมันปาล์ม และทำการเปรียบเทียบกับไบโอดีเซล พบว่ามีค่าเชิงความร้อนใกล้เคียงกัน แต่คุณสมบัติอื่นๆ มีค่าที่แตกต่างกันออกไปตามชนิดของน้ำมันที่ผสม โดยจากงานวิจัยนี้ ค่าความร้อนที่ได้ไม่ต่ำกว่ามาตรฐานและใกล้เคียงกับดีเซลที่มีขายตามท้องตลาด โดยค่าความร้อนเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิง ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่สูงแสดงถึงคุณภาพที่ดีของเชื้อเพลิง และเมื่อนำไปใช้งานกับเครื่องยนต์จะมีอัตราการสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิงต่ำ

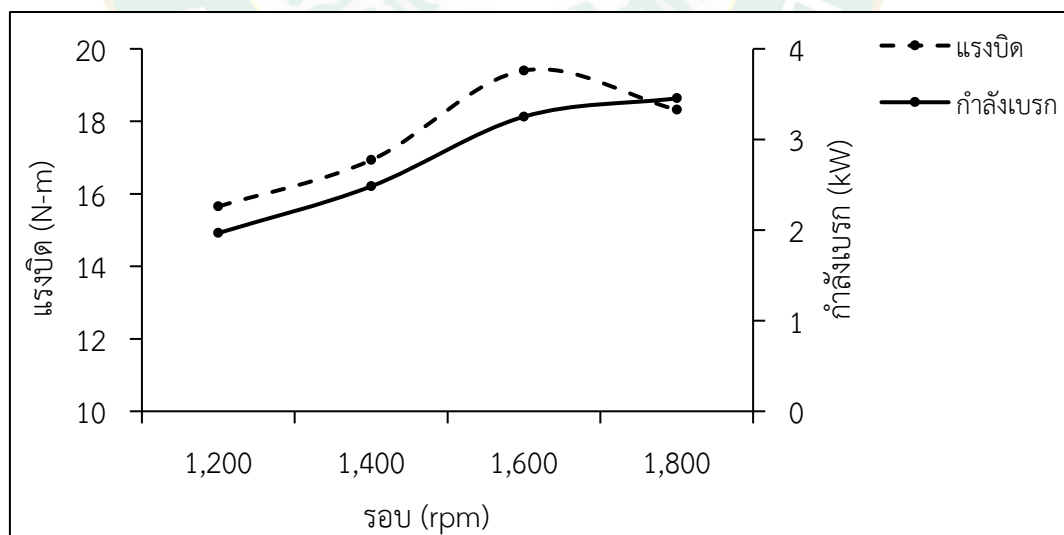
2. ผลการทดสอบด้านสมรรถนะของเครื่องยนต์

การทดสอบการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ข้างต้นได้ทำการทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กแบบ 4 จังหวะ 1 ลูกสูบ ระบายความร้อนด้วยอากาศ ยี่ห้อ Air-Cooled Diesel Engine รุ่น 186F ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์เท่ากับ 1,200 1,400 1,600 และ 1,800 rpm ตามมาตรฐานการทดสอบ ISO 15550-2002: International Combustion Engine Determination

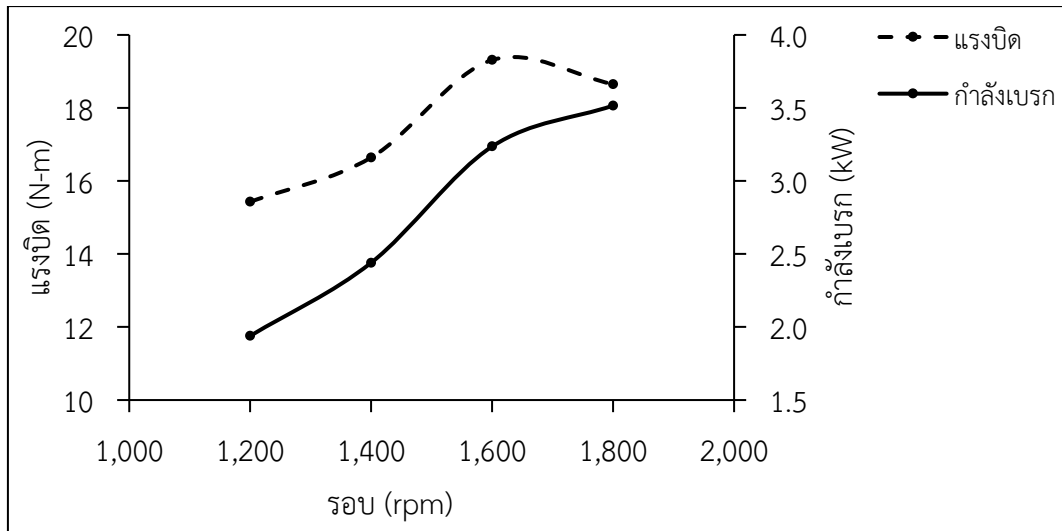
and Method for the Measurement of Engine Power (ISBGS, 2002) โดยผลการทดสอบด้านสมรรถนะของเครื่องยนต์ ประกอบด้วย ค่าแรงบิด (Torque: N-m), ค่ากำลังเบรค (Brake Power: kW) และค่าแรงม้า (Horse Power: hp) ของเครื่องยนต์ทดสอบในกรณีใช้เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ โดยให้ผลการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 28–35



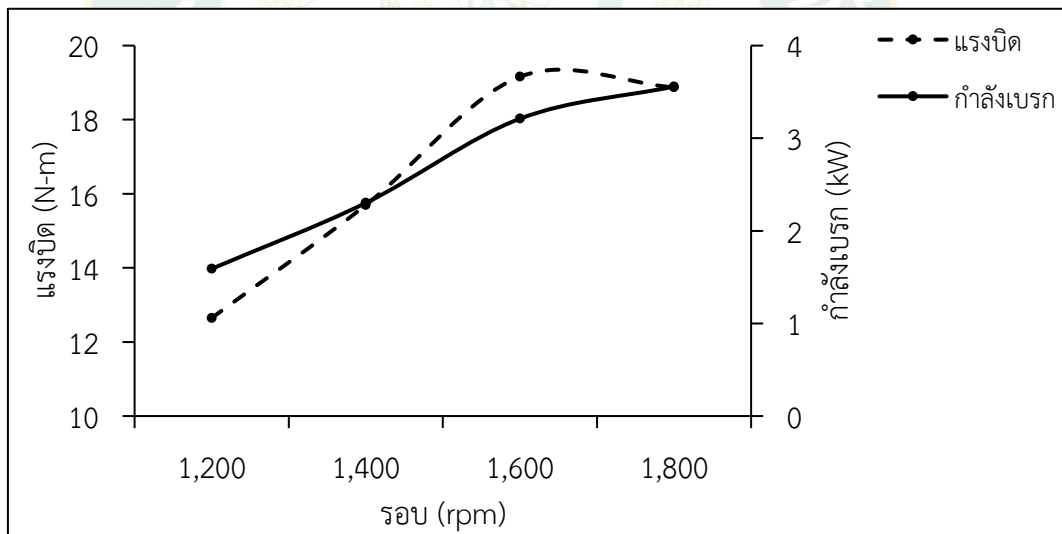
ภาพที่ 28 ค่าแรงบิดและค่ากำลังเบรคของเครื่องยนต์ทดสอบ
กรณีใช้เชื้อเพลิงไบโอดีเซล CCA



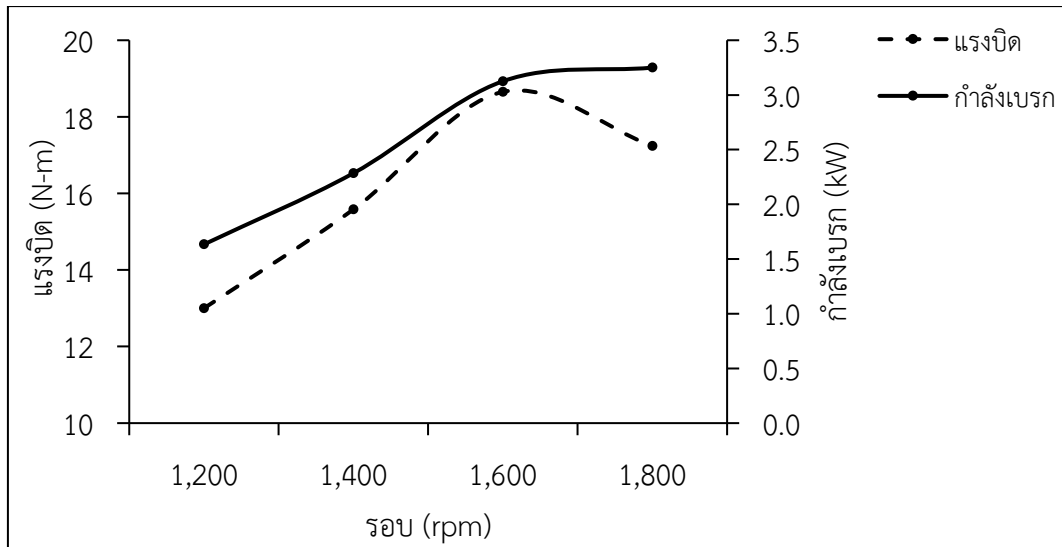
ภาพที่ 29 ค่าแรงบิดและค่ากำลังเบรคของเครื่องยนต์ทดสอบ
กรณีใช้เชื้อเพลิงไบโอดีเซล CLA



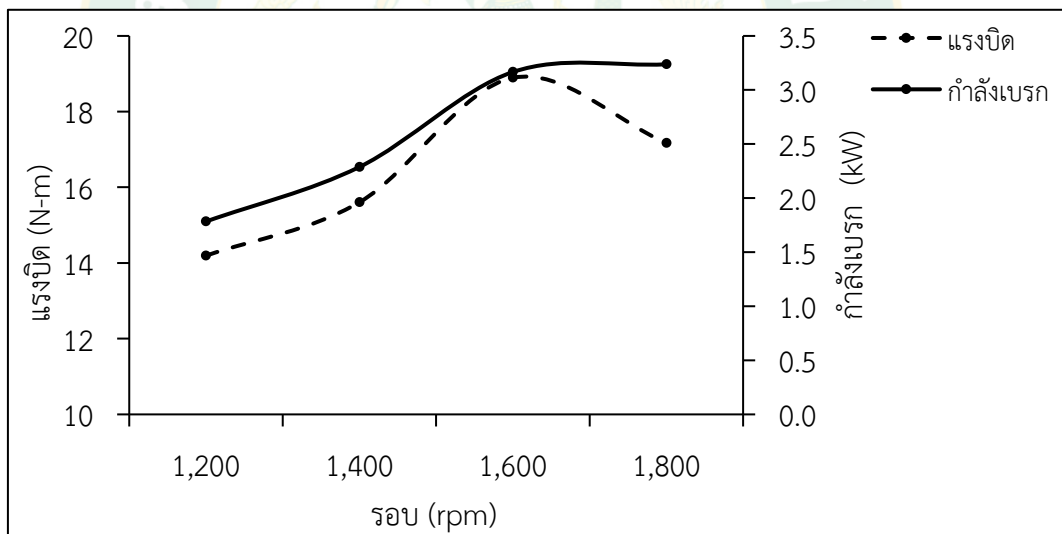
ภาพที่ 30 ค่าแรงบิดและค่ากำลังเบรคของเครื่องยนต์ทดสอบ
กรณีใช้เชื้อเพลิงดีเซลผสม DCCA



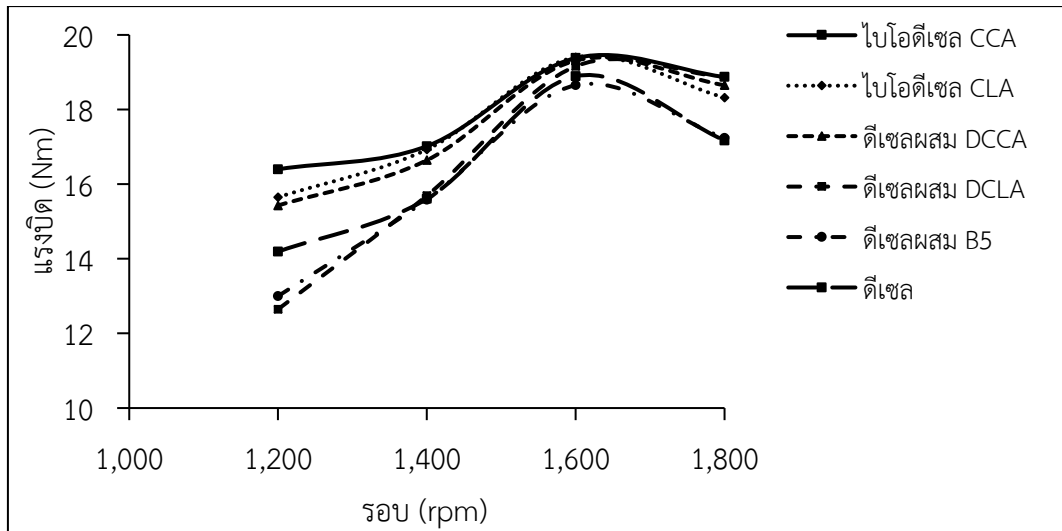
ภาพที่ 31 ค่าแรงบิดและค่ากำลังเบรคของเครื่องยนต์ทดสอบ
กรณีใช้เชื้อเพลิงดีเซลผสม DCLA



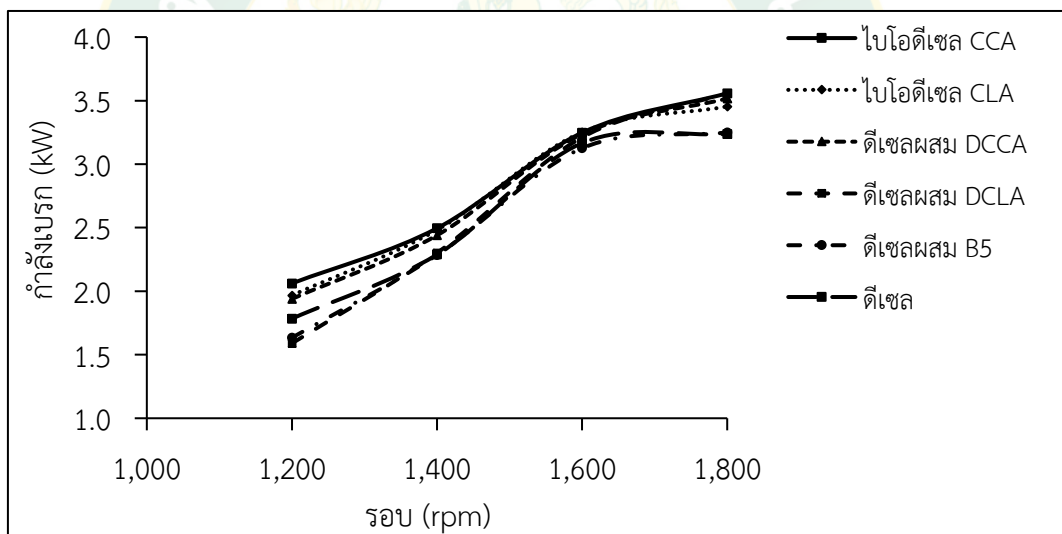
ภาพที่ 32 ค่าแรงบิดและค่ากำลังเบรคของเครื่องยนต์ทดสอบ
กรณีใช้เชื้อเพลิงดีเซลผสม B5



ภาพที่ 33 ค่าแรงบิดและค่ากำลังเบรคของเครื่องยนต์ทดสอบ
กรณีใช้เชื้อเพลิงดีเซล



ภาพที่ 34 ผลการเปรียบเทียบค่าแรงบิดของเครื่องยนต์ในกรณีใช้เชื้อเพลิงต่างชนิดกัน



ภาพที่ 35 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังเบรกของเครื่องยนต์ในกรณีใช้เชื้อเพลิงต่างชนิดกัน

จากการทดสอบใช้น้ำมันชนิดต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นพบว่าเครื่องยนต์ทดสอบให้ค่าแรงบิดที่ใกล้เคียงกันในช่วงความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,200 1,400 1,600 และ 1,800 rpm โดยค่าแรงบิดสูงสุดเกิดขึ้นที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์เท่ากับ 1,600 rpm ในทุกชนิดเชื้อเพลิง ซึ่งค่าแรงบิดสูงสุดในกรณีใช้ไบโอดีเซล CCA, ไบโอดีเซล CLA, ดีเซลผสม DCCA, ดีเซลผสม DCLA, ดีเซลผสม B5 และ ดีเซล มีค่าเท่ากับ 19.38 19.40, 19.31, 19.16, 18.65 และ 18.89 N-m ตามลำดับ จากการวัดค่ากำลังเบรก (Brake Power: kW) และค่าแรงม้า (Horse Power: hp) ของเครื่องยนต์ทดสอบพบว่า

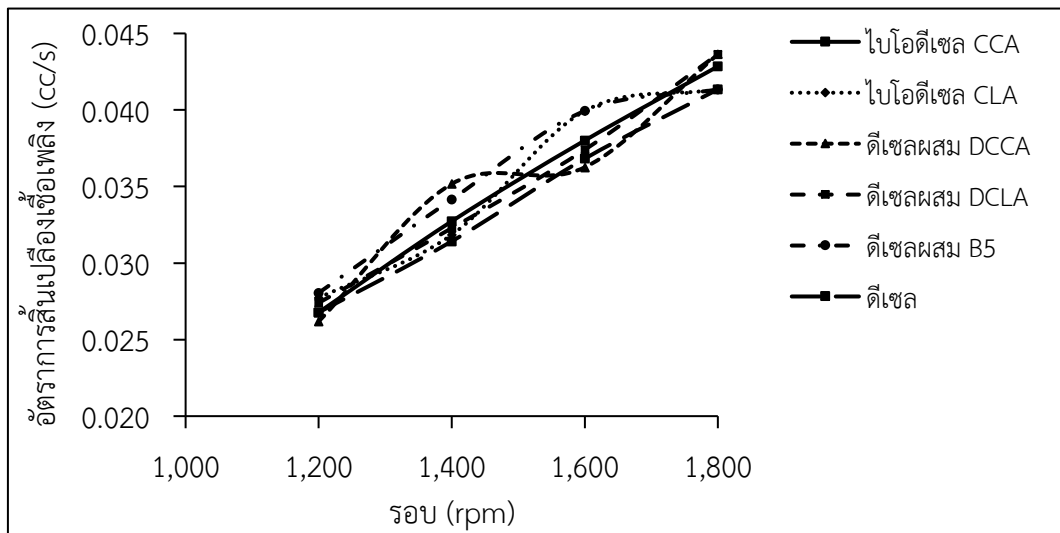
ค่าดังกล่าวเกิดขึ้นสูงสุดที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์เท่ากับ 1,800 rpm ในทุกชนิดเชื้อเพลิง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.56 kW (4.77 hp), 3.45 kW (4.36 hp), 3.52 kW (4.72 hp), 3.56 kW (4.77 hp), 3.25 kW (4.36 hp) และ 3.24 kW (4.34 hp) ตามลำดับ

พิจารณาจากการทดสอบใช้ไบโอดีเซล CCA และไบโอดีเซล CLA ที่ผลิตได้ในงานวิจัยนี้กับเครื่องยนต์ทดสอบซึ่งเป็นเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กพบว่าไบโอดีเซลตัวอย่างทั้งสองชนิดสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงพลังงานทดแทนได้จริง โดยเครื่องยนต์ทดสอบสามารถสร้างแรงบิดสูงสุดจากการใช้น้ำมันดังกล่าวเป็นเชื้อเพลิงได้ใกล้เคียงกันเฉลี่ยเท่ากับ 19.39 N-m ซึ่งค่าดังกล่าวมีค่าสูงกว่าผลจากการทดลองใช้เชื้อเพลิงดีเซล B5 และดีเซลกับเครื่องยนต์ทดสอบเท่ากับ 3.97 และ 2.65% ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันผลการทดสอบค่ากำลังเบรคสูงสุดที่ได้จากการใช้ไบโอดีเซลชนิด CCA และ CLA จากงานวิจัยนี้ยังมีค่าสูงกว่าผลจากการทดลองใช้เชื้อเพลิงดีเซล B5 และดีเซลกับเครื่องยนต์ทดสอบอีกด้วย โดยค่ากำลังเบรคสูงสุดที่ได้จากการใช้ไบโอดีเซลชนิด CCA สูงกว่าการใช้ดีเซล B5 และดีเซลเท่ากับ 9.54 และ 9.88% ตามลำดับ และการใช้ไบโอดีเซลชนิด CLA ให้ค่ากำลังเบรคสูงสุดสูงกว่าการใช้ดีเซล B5 และดีเซลเท่ากับ 6.15 และ 6.48% ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (ศุภกฤษณ์ และ ทนงเกียรติ, 2558) และ (จักรกฤษณ์ และ ดนุพล, 2554) ซึ่งทำการทดสอบเครื่องยนต์ตามมาตรฐานเดียวกันกับการทดสอบในครั้งนี้และพบว่า ค่าแรงบิดและกำลังเบรคมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันระหว่างไบโอดีเซล ดีเซลผสม และดีเซลท้องตลาด โดยในงานวิจัยของ (Noorollahi et al., 2018) ได้ทำการอธิบายถึงอัตราเร่งที่เกิดจากเชื้อเพลิงต่างชนิด พบว่าเชื้อเพลิงที่ให้แรงบิดสูงก็จะมีอัตราเร่งดีกว่าเชื้อเพลิงที่ให้แรงบิดต่ำ และในงานวิจัยของ (Behçet, 2011) ที่ทำการอธิบายไว้ว่า กำลังเบรคสูงสุดจะอยู่ที่ความเร็วรอบสูงกว่าความเร็วรอบที่มีแรงบิดที่สูงสุดเสมอ เนื่องจากจุดที่มีค่ากำลังเบรคมากที่สุดเป็นจุดที่เกิดขึ้นภายหลังจากเครื่องยนต์สามารถเอาชนะภาระที่มากระทำกับเครื่องยนต์ได้

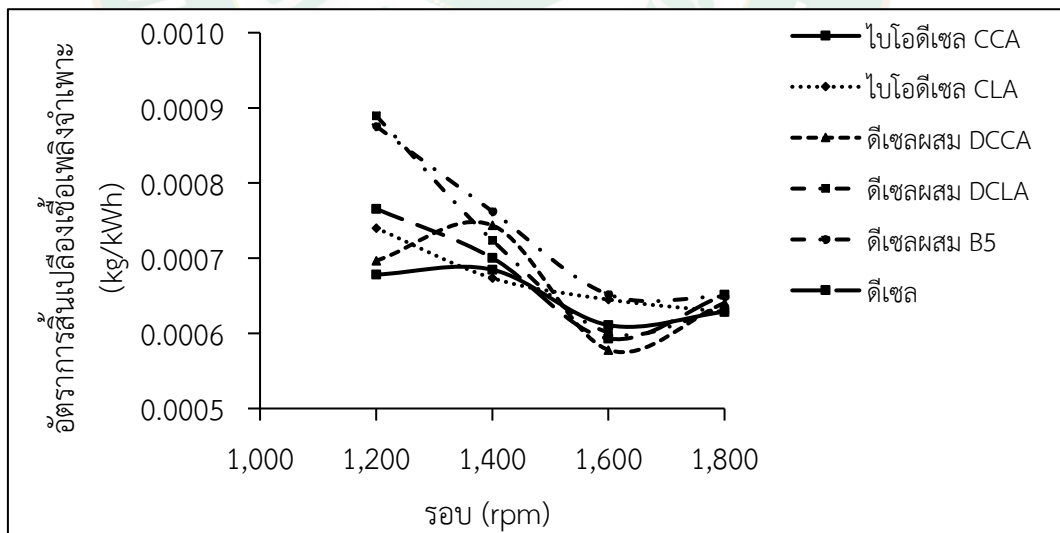
3. ผลการทดสอบด้านความสิ้นเปลืองพลังงาน

การทดสอบการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ข้างต้นได้ทำการทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กแบบ 4 จังหวะ 1 ลูกสูบ ระบายความร้อนด้วยอากาศ ยี่ห้อ Air-Cooled Diesel Engine รุ่น 186F ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์เท่ากับ 1,200 1,400 1,600 และ 1,800 rpm ตามมาตรฐานการทดสอบ ISO 15550–2002: International Combustion Engine Determination and Method for the Measurement of Engine Power (ISBGS, 2002) ผลการทดสอบด้านความสิ้นเปลืองพลังงานประกอบด้วย ค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (Fuel Consumption: cm³/s) และค่าอัตรา

การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเครื่องยนต์ (Specific Fuel Consumption, SFC: kg/kWh) โดยผลการทดสอบในส่วนต่างๆ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพที่ 36 การเปรียบเทียบค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่อความเร็วรอบของเครื่องยนต์
ในกรณีใช้น้ำมันเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ



ภาพที่ 37 การเปรียบเทียบค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะต่อความเร็วรอบของ
เครื่องยนต์ในกรณีใช้น้ำมันเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ

จากการทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กในกรณีใช้น้ำมันเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ จากส่วนที่ 1 พบว่า อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงแต่ละชนิดที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1,200 1,400 1,600 และ 1,800 rpm ในช่วง 0.020–0.044 cc/s โดยค่าดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบของเครื่องยนต์และมีค่าสูงสุดที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์เท่ากับ 1,800 rpm ในทุกชนิดของเชื้อเพลิง ซึ่งอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูงสุดกรณีใช้เชื้อเพลิงไบโอดีเซล CCA, ไบโอดีเซล CLA, ดีเซลผสม DCCA, ดีเซลผสม DCLA, ดีเซลผสม B5 และดีเซลมีค่าเท่ากับ 0.043 cc/s (0.154 L/hr), 0.041 cc/s (0.149 L/hr), 0.044 cc/s (0.157 L/hr), 0.044 cc/s (0.157 L/hr), 0.041 cc/s (0.149 L/hr) และ 0.041 cc/s (0.149 L/hr) ตามลำดับ หากพิจารณาถึงอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์โดยเทียบกับค่ากำลังเบรคที่ได้จากเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบต่างๆ กัน หรือที่เรียกว่า ค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะจะพบว่า ค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะสูงสุดเกิดขึ้นที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์เท่ากับ 1,200 rpm ในทุกชนิดของเชื้อเพลิง ซึ่งอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะสูงสุดกรณีใช้เชื้อเพลิงไบโอดีเซล CCA, ไบโอดีเซล CLA, ดีเซลผสม DCCA, ดีเซลผสม DCLA, ดีเซลผสม B5 และดีเซลมีค่าเท่ากับ 0.00068, 0.00074, 0.00070, 0.00089, 0.00088 และ 0.00077 kg/kWh ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นของไบโอดีเซลที่มีค่าสูงกว่าดีเซล (Soto, 2018) และ (Aberoumand et al., 2016) ซึ่งอธิบายถึงความหนาแน่นที่พบว่า ความหนาแน่นที่สูงทำให้มวลของเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าห้องเผาไหม้มีปริมาณที่สูงหน่วยปริมาตรต่อสโตรกซึ่งมีค่าไม่เท่ากันส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะต่อความเร็วรอบของเครื่องยนต์

พิจารณาค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงแต่ละชนิดที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1,200 1,400 1,600 และ 1,800 rpm พบว่าการใช้ไบโอดีเซลชนิด CCA และ CLA จากงานวิจัยนี้ให้ค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์เฉลี่ยเท่ากับ 0.042 cc/s (0.151 L/hr) สูงกว่าการใช้ดีเซล B5 และดีเซลเพียง 0.001 cc/s (0.002 L/hr) เมื่อพิจารณาค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะพบว่าการใช้ไบโอดีเซลชนิด CCA และ CLA มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.00071 kg/kWh ซึ่งมีค่าต่ำกว่าการใช้ดีเซล B5 และดีเซลเป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์ทดสอบเท่ากับ 19.32% และ 7.79% ซึ่งจากผลการทดสอบที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าไบโอดีเซล CCA และไบโอดีเซล CLA ที่ผลิตได้ในงานวิจัยนี้สามารถใช้ได้กับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กที่ทำการทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการได้อย่างมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับการใช้เชื้อเพลิงดีเซล B5 และดีเซลที่มีขายในท้องตลาด และเมื่อพิจารณาจากอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเฉลี่ยของการใช้ไบโอดีเซลชนิด CCA และ CLA จะพบว่าการใช้น้ำมันดังกล่าวสามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้มากกว่าอีกด้วย ทั้งนี้การใช้งานจริงต้องทำ

การทดลองใช้กับเครื่องยนต์ต้นกำลังที่เกษตรกรใช้ในฟาร์มอย่างต่อเนื่องเพื่อศึกษาการสึกหรอของชิ้นส่วนต่างๆ ที่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิงทดแทนประเภทนี้ต่อไปในอนาคต

ผลการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ของกระบวนการ

การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้จากชีวมวลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา วิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดกระบวนการการผลิตไบโอดีเซล โดยทำการเลือกผลการทดลองในการใช้เถ้าชีวมวลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เถ้า 2 ชนิดที่ให้ผลผลิตไบโอดีเซลใกล้เคียงกับและมีคุณสมบัติที่มีค่าผ่านมาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติของไบโอดีเซล คือ การทดลองจากเงื่อนไขการให้อุณหภูมิในการให้ความร้อนแก่ตัวเร่งปฏิกิริยา 900 °C ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ 1%wt ทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 3:1 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 hr และอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 60 °C สามารถอธิบายรายละเอียดต่างๆ ได้ดังนี้

1. การวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตทางด้านไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตทางด้านไฟฟ้านั้น คำนวณการใช้ไฟฟ้าจากอุปกรณ์ในการผลิตไบโอดีเซลทุกส่วนของการผลิต โดยสามารถทำการคำนวณจากสูตรคำนวณค่าไฟฟ้าดังสมการที่ 8 (ข้อมูลและข้อกำหนดของหน่วยงานราชการ, 2559)

$$\text{สูตรในการคำนวณค่าไฟฟ้า} = (\text{กำลังไฟฟ้า (W)} \times \text{จำนวนชั่วโมง (hr)}) / 1,000 \quad \text{สมการที่ 8}$$

การคำนวณต้นทุนในการผลิตทางด้านไฟฟ้า ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาการให้อุณหภูมิในการให้ความร้อนแก่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 4 hr ในการให้อุณหภูมิการให้ความร้อนแก่ตัวเร่งปฏิกิริยา 1 ครั้ง จะมีต้นทุนในการผลิตดังต่อไปนี้

เตาอบความร้อนสูง โดยทำการให้ความร้อนแก่เถ้าชีวมวลที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา ,4 hr ใช้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 3,625 W

$$\text{เตาอบความร้อนสูง} = (3,625 \text{ W} \times 4 \text{ hr}) / 1,000 = 14.50 \text{ kWh}$$

ทำการให้ความร้อนแก่ถั่วเขียวมวล 500 g ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 4 hr นั้นได้ถั่วเขียวมวล 272.50 g ในเงื่อนไขของการทดลองได้ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจากถั่วเขียวมวล 1%wt /ครั้ง

ดังนั้น ในการทดลองการผลิตไบโอดีเซล 1 ครั้ง ในปริมาณ 1,000 g ต้นทุนการผลิตทางด้านไฟฟ้าในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจากถั่วเขียวมวลมีค่าเท่ากับ $(272.50/10 = 27.25$ คือในการให้ความร้อน 1 ครั้งจะใช้ตัวเร่งได้ประมาณ 27 ครั้ง) , $(14.50/27) = 0.54$ kWh

1) การคำนวณต้นทุนในการผลิตทางด้านไฟฟ้า ในการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน 1 ครั้ง มีต้นทุนในการผลิตตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

เครื่องทำความร้อนและกวนสาร ใช้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 782 W โดยทำการให้ความร้อนแก่น้ำมันพืชใช้แล้วเพื่อทำการไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 30 min

$$\text{เครื่องทำความร้อนและกวนสาร} = (782 \text{ W} \times 0.5 \text{ hr})/1,000 = 0.39 \text{ kWh}$$

ดังนั้น กำลังไฟฟ้าในการไล่ความชื้นจากน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 0.39 kWh

เครื่องทำความร้อนและกวนสาร ใช้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 713 W โดยทำการผลิตไบโอดีเซลที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1 hr

$$\text{เครื่องทำความร้อนและกวนสาร} = (713 \text{ W} \times 1 \text{ hr})/1,000 = 0.71 \text{ kWh}$$

ดังนั้น กำลังไฟฟ้าในการผลิตไบโอดีเซล 1 ครั้ง เท่ากับ 0.71 kWh

เครื่องทำความร้อนและกวนสาร ใช้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 695 W โดยทำการให้ความร้อนแก่น้ำกลั่นเพื่อทำใช้สำหรับการล้างไบโอดีเซลที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 15 min

$$\text{เครื่องทำความร้อนและกวนสาร} = (625 \text{ W} \times 0.25 \text{ hr})/1,000 = 0.16 \text{ kWh}$$

ดังนั้น กำลังไฟฟ้าในการให้ความร้อนแก่น้ำกลั่นเพื่อทำใช้สำหรับการล้างไบโอดีเซลเท่ากับ 0.16 kWh

จะได้ กำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้ถั่วเขียวมวลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เท่ากับ 1.80 kWh ต่อการผลิต 1 ครั้ง และ เมื่อกำหนดราคาไฟฟ้าเท่ากับ 3.2484 Baht/kWh (อัตราค่าไฟฟ้าขายปลีก การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2560)

ดังนั้น ต้นทุนการผลิตทางด้านไฟฟ้าต่อการผลิต 1 ครั้ง เท่ากับ 5.85 Baht

2. การวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตทางด้านวัตถุดิบ

- น้ำมันพืชใช้แล้วที่เป็นสารตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซลสามารถเก็บรวบรวมได้จากชุมชน จึงไม่มีค่าใช้จ่ายในส่วนนี้

- ไข่ซีวมวลในการผลิตไบโอดีเซลสามารถเก็บรวบรวมได้จากชุมชน จึงไม่มีค่าใช้จ่ายในส่วนนี้

- เมทานอล 16 kg ราคา 66.90 Baht/kg ในการผลิต 1 ครั้ง ใช้ 375 g คิดเป็นราคาเท่ากับ 25.08 Baht

- น้ำกลั่นราคา 6 Baht/L ในการผลิต 1 ครั้งใช้ 0.5 L คิดเป็นราคาเท่ากับ 3 Baht

ดังนั้น ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว 1 ครั้ง จากการใช้ น้ำมันสารตั้งต้น 1,000 g จะมีต้นทุนในการผลิตทางด้านวัตถุดิบ คิดเป็นราคาเท่ากับ 28.08 Baht

3. การวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตทั้งหมด

การวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลต่อครั้ง

จากการวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตทางด้านไฟฟ้าและทางด้านวัตถุดิบของไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้ น้ำมันสารตั้งต้น 1,000g สามารถอธิบายได้ดังนี้

- การใช้ไฟฟ้าในการให้ความร้อนแก่ไข่ซีวมวล กำลังไฟฟ้า 0.54 kWh

ราคา 1.75 Baht

- เมทานอล 375 g คิดเป็นราคา เท่ากับ 25.08 Baht

- ค่าน้ำกลั่น 0.5 L คิดเป็นราคา เท่ากับ 3 Baht

- การผลิตไบโอดีเซล

กำลังไฟฟ้าในการไล่ความชื้นจากน้ำมันพืชใช้แล้ว เท่ากับ 0.39 kWh

กำลังไฟฟ้าในการผลิตไบโอดีเซล 1 ครั้ง เท่ากับ 0.71 kWh

การแก่น้ำกลั่นเพื่อทำใช้สำหรับการล้างไบโอดีเซล เท่ากับ 0.16 kWh

ราคา 4.09 Baht

ดังนั้น ต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้เถ้าชีวมวลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากการใช้น้ำมันสารตั้งต้น 1,000 g มีค่าเท่ากับ 33.92 Baht โดยจะได้ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซล 985 g ซึ่งไบโอดีเซล 985 g มีปริมาตรเท่ากับ 1.2 L ซึ่งเมื่อเทียบผลผลิตไบโอดีเซลที่ปริมาตร 1 L มีค่าเท่ากับ 28.27 Baht

จากการวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้เถ้าชีวมวลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะเห็นว่ายังคงมีต้นทุนในการผลิตที่สูง เนื่องจากมีการใช้ไฟฟ้าปริมาณมากจากกระบวนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าชีวมวลมีราคาไม่สูงมากเมื่อเทียบกับราคาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากสารเคมีและตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นๆ

หากพิจารณาข้อดีของไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วนั้น จะพบว่าเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งจากครัวเรือน หรือชุมชนมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด เนื่องจากน้ำมันพืชใช้แล้วจะมีสารพิษประเภทอนุมลพิษระ หากนำกลับมาใช้ซ้ำจะส่งผลเสียต่อสุขภาพ ทั้งยังเป็นวิธีการกำจัดน้ำมันพืชใช้แล้ว จากเดิมที่มีการกำจัดด้วยการเททิ้งลงสู่พื้นดินจะส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพของดินในระยะยาวได้ ในส่วนของเถ้าชีวมวลที่เหลือทิ้งจากการบวนการเผาไหม้ในครัวเรือน หากไม่มีการจัดเก็บให้ถูกวิธีก็จะก่อเกิดมลพิษในการสูดดมฝุ่นละอองจากเถ้าเขาสูดปอดได้ และการทำเถ้าชีวมวลที่เหลือจากการบวนการใช้งานนั้นหากจัดเก็บเพื่อนำมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจะก่อให้เกิดประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งและลดการใช้สารเคมีได้อีกด้วย ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าชีวมวล โดยทำการให้ความร้อนด้วยอุปกรณ์มีกำลังไฟฟ้าสูง ซึ่งทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีอยู่ในชุมชนเป็นแหล่งให้ความร้อน ต้นทุนการผลิตในด้านการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจริงมีค่าต่ำกว่าการให้ความร้อนแก่ชีวมวลเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยตรง

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเหลืองทิ้ง โดยใช้ ถั่วเขียวมวลเป็น ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยแบ่งผลการศึกษาออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่ง ปฏิกิริยา ส่วนที่ 2 การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน ส่วนที่ 3 การวิเคราะห์ คุณสมบัติของไบโอดีเซล ส่วนที่ 4 การใช้ไขมันเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ กับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก และ ส่วนที่ 5 การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ของกระบวนการ

สรุปผลงานวิจัย

1. การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าอุณหภูมิการให้ความร้อนแก่ถั่วเขียวมวล ที่ดีที่สุด คือ 900 °C พบว่า ถั่วที่ได้มีลักษณะเป็นเนื้อละเอียด สีขาว และมีปริมาณของธาตุคาร์บอน ลดลงส่งผลให้ธาตุหมู่เบสชนิดอื่นเพิ่มขึ้น โดยพบว่าในถั่วกาบมะพร้าวมีธาตุแคลเซียมอยู่ที่ 24.56%, ถั่วไม้ลำไยมีธาตุแคลเซียมอยู่ที่ 26.23% และถั่วกลบข้าวธาตุซิลิกอนอยู่ที่ 18.75% อีกทั้งยังพบว่า ลักษณะถั่วเขียวมวลจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในอุณหภูมิตั้งกล่าวมีการกระจายตัว ของถั่วดีที่สุด

2. การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจาก ถั่วเขียวมวล จากผลการศึกษาการทำปฏิกิริยาที่เงื่อนไขของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถั่วกาบมะพร้าว และถั่วไม้ลำไยที่ดีที่สุดของทั้งสองชนิดเหมือนกัน คือ อุณหภูมิการให้ความร้อนที่ 900 °C อัตราส่วน โดยโมลของเมทานอลต่อไขมัน 3:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 hr และ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 60 °C พบว่าให้ปริมาณผลผลิต 98.57% และ 95.32% ตามลำดับ

3. การวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจาก ถั่วเขียวมวล ได้แก่ ถั่วกาบมะพร้าวและถั่วไม้ลำไย พบว่าไบโอดีเซลที่ได้มีคุณสมบัติเป็นไปตาม ประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน คือ ค่าความเป็นกรดตามมาตรฐาน ASTM D2896 มีค่าเท่ากับ 0.43 mg KOH/g และ 0.50 mg KOH/g ตามลำดับ ค่าความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM D1298 มี ค่าเท่ากับ 870 kg/m³ และ 875 kg/m³ ตามลำดับ ค่าความหนืดตามมาตรฐาน ASTM D445 มีค่า เท่ากับ 4.20 cSt และ 4.50 cSt ตามลำดับ จุดวาบไฟมาตรฐาน ASTM D93 มีค่าเท่ากับ 190 °C และ 186 °C ตามลำดับ และเมทิลเอสเทอร์ตามมาตรฐาน EN 14103 มีค่าเท่ากับ 97% และ 96.50% ตามลำดับ

4. การทดลองใช้ไบโอดีเซล CCA และไบโอดีเซล CLA ที่ผลิตได้ในงานวิจัยนี้กับเครื่องยนต์ทดสอบซึ่งเป็นเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กพบว่าไบโอดีเซลตัวอย่างทั้งสองชนิดสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงพลังงานทดแทนได้จริง โดยเครื่องยนต์ทดสอบสามารถสร้างแรงบิดสูงสุดจากการใช้เชื้อเพลิงดังกล่าวเป็นเชื้อเพลิงได้ใกล้เคียงกันเฉลี่ยเท่ากับ 19.39 N-m ซึ่งค่าดังกล่าวมีค่าสูงกว่าผลจากการทดลองใช้เชื้อเพลิงดีเซล B5 และดีเซลกับเครื่องยนต์ทดสอบเท่ากับ 3.97 และ 2.65% ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันผลการทดสอบค่ากำลังเบรคสูงสุดและค่าแรงม้าที่ได้จากการใช้ไบโอดีเซล CCA และไบโอดีเซล CLA จากงานวิจัยนี้ยังมีค่าสูงกว่าผลจากการทดลองใช้เชื้อเพลิงดีเซล B5 และดีเซลกับเครื่องยนต์ทดสอบอีกด้วย โดยค่ากำลังเบรคสูงสุดที่ได้จากการใช้ไบโอดีเซล CCA สูงกว่าการใช้ดีเซล B5 และดีเซลเท่ากับ 9.54 และ 9.88% ตามลำดับ และการใช้ไบโอดีเซล CLA ให้ค่ากำลังเบรคสูงสุดสูงกว่าการใช้ดีเซล B5 และดีเซลเท่ากับ 6.15 และ 6.48% ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงแต่ละชนิดที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 1,200 ถึง 1,800 rpm พบว่าการใช้ไบโอดีเซล CCA และไบโอดีเซล CLA จากงานวิจัยนี้ให้ค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์เฉลี่ยเท่ากับ 0.042 cc/s (0.151 L/hr) สูงกว่าการใช้ดีเซล B5 และดีเซลเพียง 0.001 cc/s (0.002 L/hr) เมื่อพิจารณาค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะพบว่าการใช้ไบโอดีเซลชนิด CCA และไบโอดีเซล CLA มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.00071 kg/kWh ซึ่งมีค่าต่ำกว่าการใช้ดีเซล B5 และดีเซลเป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์ทดสอบเท่ากับ 0.00017 และ 0.00006 kg/kWh ซึ่งจากผลการทดสอบที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าไบโอดีเซล CCA และไบโอดีเซล CLA ที่ผลิตได้ในงานวิจัยนี้สามารถใช้ได้กับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กที่ทำการทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการได้

5. เศรษฐศาสตร์ต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้เถ้าชีวมวลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากการใช้ไขมันสารตั้งต้น 1,000 g กำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้เถ้าชีวมวลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เท่ากับ 2.88 kWh ต่อการผลิต 1 ครั้ง และเมื่อกำหนดราคาไฟฟ้าเท่ากับ 3.2484 Baht/kWh ต้นทุนการผลิตทางด้านไฟฟ้าต่อการผลิต 1 ครั้ง เท่ากับ 5.85 Baht และมีต้นทุนทางด้านวัตถุดิบ 16.26 Baht รวมต้นทุนการผลิตทั้งหมดใน 1 ครั้งมีค่าเท่ากับ 28.08 Baht โดยจะได้ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซล 985 g

ข้อเสนอแนะ

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าแกลบข้าวมีซิลิกอนเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีคุณสมบัติเด่นด้านการดูดซับ หากต้องการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ประสิทธิภาพในการผลิตไบโอดีเซลมากขึ้นควรใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซิลิกอนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาตัวอื่น ด้วยเทคนิคของการดูดซับ

2. ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้าชีวมวลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ ไม่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกับ แอลกอฮอล์ ดังนั้น จึงสามารถแยกออกจากกระบวนการ และนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำได้อีก แต่ควรมีเทคนิคในการนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีลักษณะเป็นของแข็งออกจากอุปกรณ์การผลิตอย่างเหมาะสม และต้องระมัดระวังเรื่องการอุดตันที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์การผลิตเป็นสำคัญ

3. ควรมีการตรวจและวิเคราะห์คุณสมบัติอื่นๆ ของไบโอดีเซลเพิ่มเติมนอกเหนือจากคุณสมบัติที่ได้ทำการตรวจและวิเคราะห์ในงานวิจัยครั้งนี้ และควรศึกษาการทดสอบเชื้อเพลิงดีเซลผสมในอัตราส่วนอื่นๆ เพิ่มเติม รวมถึงคุณสมบัติและคุณภาพของน้ำมันเมื่อทำการผลิตไว้เป็นเวลานาน



บรรณานุกรม

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน. 2550. **คู่มือบริหารจัดการพลังงานความร้อน**. [ออนไลน์], <http://webkc.dede.go.th/testmax/node/244> (15 , มกราคม 2561).
- กระทรวงพลังงาน. 2558. **แผนการพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก** [ออนไลน์], เข้าถึงได้จาก; <http://www.enconfund.go.th/pdf/index/aedp25.pdf>.
- คุณานนต์ ศักดิ์กำปัง และ เกียรติพา ตั้งใจจิต. 2556. การศึกษาสมรรถนะ และการปล่อยมลพิษของ เครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็วเมื่อน้ำมันไบโอดีเซลจากไขมันไก่. *KKU Res*, 18(4), 616-627.
- จักรกฤษณ์ อ้ายเหมย และตฤพล หล้าฟู. 2554. การศึกษาการสึกหรอของเครื่องยนต์ดีเซลเล็กที่ใช้ น้ำมันผสมในรูปอิมัลชันเป็นเชื้อเพลิง. *ปริญญาธิพนธ์*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ล้านนา.
- ชูชีพ พิพัฒน์ศิริ. 2540. **เศรษฐศาสตร์การวิเคราะห์โครงการ**. คณะเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เชาวลิต ถาวรสิน และคณะ. 2552. **การสร้างชุดผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว**. คณะครู ศึกษาศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- ไชยยันต์ ไชยยะ และคณะ. 2551. **การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วโดยการใช้ตัวเร่ง ปฏิกริยาแบบวิวิธพันธุ์**. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.
- ญาณินท์ เอิบอาบ และพัชยาภรณ์ สิงห์รัญ. 2558. **การศึกษาเปรียบเทียบการผลิตไบโอดีเซลจาก น้ำมันพืชใช้แล้ว**. วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ธรรมศักดิ์ พันธุ์แสนศรี และอนุกุล จันทรแก้ว. 2553. **การศึกษาสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก ในการทำงานจริงโดยใช้ไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิง**. มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ปิยรัตน์ศิริ พันธุ์จันทร. 2556. **การสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันโดยใช้**

ตัวเร่งจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและการเตรียมอนุพันธ์ของกลีเซอรอล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

พัชรนันท์ ภูสุกุล. 2554. **ศึกษาการใช้ CaO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการผลิตไบโอดีเซลโดยมีการป้อนกลับของแอลกอฮอล์.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

วุฒินันท์ ทองสุข และคณะ. 2550. **การศึกษาการใช้น้ำมันดีเซลปาล์มกับเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตร.** วิทยาลัยวิศวกรรม มหาวิทยาลัยรังสิต.

ศิริวัฒนา หัทสนันท์ และคณะ. 2556. **การผลิตไบโอดีเซลจากเปลือกหิวมะพร้าว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO จากเปลือกหอยแครง.** วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, 2(44), 361-364.

ศุภกฤษณ์ งามเมือง และทองเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. 2558. **การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลเกษตรกรรมที่ใช้เชื้อเพลิงผสม ดีเซล/ไบโอดีเซล/น้ำ ในรูปอิมัลชัน. การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย,** 8(1), 59-61.

ศูนย์บริการวิชาการที่ 3. 2553. **เทคนิคการผลิตไบโอดีเซลให้ได้คุณภาพ.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www2.dede.go.th/bett/Activities/KM/BioDiesel%20Manual.pdf> (7 มกราคม 2560).

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2559. **ลำไย พืชสวน ข้อมูลการผลิตสินค้าเกษตร.** แหล่งที่มา <http://www.oae.go.th/download/prcai/farmcrop/longan.pdf> (27 ธันวาคม 2560).

สุภกรม บุญยีน และคณะ. 2552. **ตัวเร่งปฏิกิริยารวบรวมสำหรับไบโอดีเซลน้ำมันปาล์ม และน้ำมันใช้แล้ว.** วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 17(4), 23-28.

อัจฉรา อิมคำ และอภิพงษ์ พุ่มคำ. 2557. **การสังเคราะห์และคุณลักษณะของแคลเซียมออกไซด์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล.** Naresuan University Journal, 22(3), 29-46.

อัตราค่าไฟฟ้าขายปลีก การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. 2560. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.eppo.go.th/index.php/th/electricity/electricity-bill/pea-rate>.

อำพล ชี้อตรง. 2545. **งานเครื่องยนต์**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ.

beroumand, S., Jafarimoghaddam, A., Moravej, M., Aberoumand, H. & Javaherdeh, K. 2016. Experimental study on the rheological behavior of silver-heat transfer oil nanofluid and suggesting two empirical based correlations for thermal conductivity and viscosity of oil based nanofluids. **Applied Thermal Engineering**, 101(362-372).

Alhassan, F. H., Yunus, R., Rashid, U., Sirat, K., Islam, A., Lee, H. V. & Taufiq-Yap, Y. H. 2013. Production of biodiesel from mixed waste vegetable oils using Ferric hydrogen sulphate as an effective reusable heterogeneous solid acid catalyst. **Applied Catalysis A: General**, 456(182-187).

Banerjee, A. & Chakraborty, R. 2009. Parametric sensitivity in transesterification of waste cooking oil for biodiesel production—A review. **Resources, Conservation and Recycling**, 53(9), 490-497.

Bart, J. C. J., Palmeri, N. & Cavallaro, S. (2010). 5 - Feedstocks for biodiesel production. In **Biodiesel Science and Technology** (pp. 130-225): Woodhead Publishing.

Behçet, R. 2011. Performance and emission study of waste anchovy fish biodiesel in a diesel engine. **Fuel Processing Technology**, 92(6), 1187-1194.

Billong, N., Kinuthia, J., Oti, J. & Melo, U. C. 2018. Performance of sodium silicate free geopolymers from metakaolin (MK) and Rice Husk Ash (RHA): Effect on tensile strength and microstructure. **Construction and Building Materials**, 189(307-313).

Borges, M. E. & Díaz, L. 2012. Recent developments on heterogeneous catalysts for biodiesel production by oil esterification and transesterification reactions: A

- review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 16(5), 2839-2849.
- Chandran, D., Gan, S., Lau, H. L. N., Raviadaran, R., Salim, M. & Khalid, M. 2018. Critical relationship between biodiesel fuel properties and degradation of fuel delivery materials of a diesel engine. **Thermal Science and Engineering Progress**, 7(20-26).
- Chen, G.-Y., Shan, R., Shi, J.-F. & Yan, B.-B. 2015. Transesterification of palm oil to biodiesel using rice husk ash-based catalysts. **Fuel Processing Technology**, 133(8-13).
- Chen, K.-T., Wang, J.-X., Dai, Y.-M., Wang, P.-H., Liou, C.-Y., Nien, C.-W., Wu, J.-S. & Chen, C.-C. 2013. Rice husk ash as a catalyst precursor for biodiesel production. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, 44(4), 622-629.
- Chen, Y.-H., Huang, Y.-H., Lin, R.-H., Shang, N.-C., Chang, C.-Y., Chang, C.-C., Chiang, P.-C. & Hu, C.-Y. 2011. Biodiesel production in a rotating packed bed using K/γ-Al₂O₃ solid catalyst. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, 42(6), 937-944.
- Dunn, R. O. (2010). 10 - Other Alternative Diesel Fuels from Vegetable Oils and Animal Fats. In **The Biodiesel Handbook (Second Edition)** (pp. 405-437): AOCS Press.
- Freedman, B., Butterfield, R. O. & Pryde, E. H. 1986. Transesterification kinetics of soybean oil 1. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, 63(10), 1375-1380.
- Gülüm, M. & Bilgin, A. 2017. Measurements and empirical correlations in predicting biodiesel-diesel blends' viscosity and density. **Fuel**, 199(567-577).
- Jeffry, S. N. A., Jaya, R. P., Abdul Hassan, N., Yaacob, H. & Satar, M. K. I. M. 2018. Mechanical performance of asphalt mixture containing nano-charcoal coconut

- shell ash. **Construction and Building Materials**, 173(40-48).
- Jeffry, S. N. A., Jaya, R. P., Hassan, N. A., Yaacob, H., Mirza, J. & Drahman, S. H. 2018. Effects of nanocharcoal coconut-shell ash on the physical and rheological properties of bitumen. **Construction and Building Materials**, 158(1-10).
- Knothe, G. (2010). 1 - Introduction. In G. Knothe, J. Krahl & J. Van Gerpen (Eds.), **The Biodiesel Handbook (Second Edition)** (pp. 1-3): AOCS Press.
- Leung, D. Y. C., Wu, X. & Leung, M. K. H. 2010. A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. **Applied Energy**, 87(4), 1083-1095.
- Li, M., Zheng, Y., Chen, Y. & Zhu, X. 2014. Biodiesel production from waste cooking oil using a heterogeneous catalyst from pyrolyzed rice husk. **Bioresource Technology**, 154(345-348).
- Liu, A., Fan, M.-q., Li, Z.-h. & Fan, J.-c. 2017. Non-polar oil assisted DDA flotation of quartz II: Effect of different polarity oil components on the flotation of quartz. **International Journal of Mineral Processing**, 168(25-34).
- Loy, A. C. M., Yusup, S., Lam, M. K., Chin, B. L. F., Shahbaz, M., Yamamoto, A. & Acda, M. N. 2018. The effect of industrial waste coal bottom ash as catalyst in catalytic pyrolysis of rice husk for syngas production. **Energy Conversion and Management**, 165(541-554).
- Lu, G., Zhang, K. & Cheng, F. 2018. The fusion characteristics of ashes from anthracite and biomass blends. **Journal of the Energy Institute**, 91(5), 797-804.
- Manique, M. C., Faccini, C. S., Onorevoli, B., Benvenuto, E. V. & Caramão, E. B. 2012. Rice husk ash as an adsorbent for purifying biodiesel from waste frying oil. **Fuel**, 92(1), 56-61.
- Misra, M. K., Ragland, K. W. & Baker, A. J. 1993. Wood ash composition as a function

- of furnace temperature. **Biomass and Bioenergy**, 4(2), 103-116.
- Noorollahi, Y., Azadbakht, M. & Ghobadian, B. 2018. The effect of different diesterol (diesel–biodiesel–ethanol) blends on small air-cooled diesel engine performance and its exhaust gases. **Energy**, 142(196-200).
- Pinzi, S. & Pilar dorado, M. (2012). 4 - Feedstocks for advanced biodiesel production. In **Advances in Biodiesel Production** (pp. 69-90): Woodhead Publishing.
- Pode, R. 2016. Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass power plant. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 53(1468-1485).
- Pradana, Y. S., Hidayat, A., Prasetya, A. & Budiman, A. 2017. Biodiesel production in a reactive distillation column catalyzed by heterogeneous potassium catalyst. **Energy Procedia**, 143(742-747).
- Rajaeifar, M. A., Abdi, R. & Tabatabaei, M. 2017. Expanded polystyrene waste application for improving biodiesel environmental performance parameters from life cycle assessment point of view. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 74(278-298).
- Sarki, J., Hassan, S. B., Aigbodion, V. S. & Oghenevweta, J. E. 2011. Potential of using coconut shell particle fillers in eco-composite materials. **Journal of Alloys and Compounds**, 509(5), 2381-2385.
- Shajaratun Nur, Z. A., Taufiq-Yap, Y. H., Rabiah Nizah, M. F., Teo, S. H., Syazwani, O. N. & Islam, A. 2014. Production of biodiesel from palm oil using modified Malaysian natural dolomites. **Energy Conversion and Management**, 78(738-744).
- Sharma, M., Khan, A. A., Puri, S. K. & Tuli, D. K. 2012. Wood ash as a potential heterogeneous catalyst for biodiesel synthesis. **Biomass and Bioenergy**, 41(94-106).

- Sharma, Y. C., Singh, B. & Korstad, J. 2011. Latest developments on application of heterogenous basic catalyts for an efficient and eco friendly synthesis of biodiesel: A review. **Fuel**, 90(4), 1309-1324.
- Soto, D. 2018. Modeling and measurement of specific fuel consumption in diesel microgrids in Papua, Indonesia. **Energy for Sustainable Development**, 45(180-185).
- Suchada Sirisomboonchai, M. A., Guoqing Guan, Chanatip Samart, Shawket Abliz, Xiaogang Hao, Katsuki Kusakabe and Abuliti Abudula. 2015. Biodiesel production from waste cooking oil using calcined scallop shell as catalyst. **Energy Conversion and Management**, 95(242-247).
- Teo, S. H., Islam, A., Yusaf, T. & Taufiq-Yap, Y. H. 2014. Transesterification of *Nannochloropsis oculata* microalga's oil to biodiesel using calcium methoxide catalyst. **Energy**, 78(63-71).
- Vadery, V., Narayanan, B. N., Ramakrishnan, R. M., Cherikkallinmel, S. K., Sugunan, S., Narayanan, D. P. & Sasidharan, S. 2014. Room temperature production of jatropha biodiesel over coconut husk ash. **Energy**, 70(588-594).
- Verhé, R., Echim, C., De Greyt, W. & Stevens, C. (2011). 5 - Production of biodiesel via chemical catalytic conversion. In **Handbook of Biofuels Production** (pp. 97-133): Woodhead Publishing.
- Zhao, C., Yang, L., Xing, S., Luo, W., Wang, Z. & Lv, P. 2018. Biodiesel production by a highly effective renewable catalyst from pyrolytic rice husk. **Journal of Cleaner Production**, 199(772-780).



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

การคำนวณหาปริมาณเมทานอลที่ต้องการใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

1. การคำนวณหาปริมาณน้ำมันพืชใช้แล้วต่อเมทานอล

$$\text{เมื่อกำหนดให้ มวลโมเลกุลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว} = 256 \text{ g/mol}$$

$$\text{มวลโมเลกุลของเมทานอล} = 32 \text{ g/mol}$$

ตัวอย่างการคำนวณ การคำนวณอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว

$$\begin{aligned} - \text{อัตราส่วน 3:1 (mol:mol) คิดเป็นกรัม} &= (3 \times 32) : (1 \times 256) \quad (\text{g/g}) \\ &= 0.375 : 1 \text{ g/g} \end{aligned}$$

จากการทดลองใช้น้ำมันพืชใช้แล้ว 200 g

$$\text{ดังนั้น เมทานอลที่ใช้มีค่า } 0.375 \times 200 = \underline{75 \text{ g}}$$

$$\begin{aligned} - \text{อัตราส่วน 9:1 (mol:mol) คิดเป็นกรัม} &= (6 \times 32) : (1 \times 256) \quad (\text{g/g}) \\ &= 0.75 : 1 \text{ g/g} \end{aligned}$$

จากการทดลองใช้น้ำมันพืชใช้แล้ว 200 g

$$\text{ดังนั้น เมทานอลที่ใช้มีค่า } 0.75 \times 200 = \underline{150 \text{ g}}$$

$$\begin{aligned} - \text{อัตราส่วน 9:1 (mol:mol) คิดเป็นกรัม} &= (9 \times 32) : (1 \times 256) \quad (\text{g/g}) \\ &= 1.125 : 1 \text{ g/g} \end{aligned}$$

จากการทดลองใช้น้ำมันพืชใช้แล้ว 200 g

$$\text{ดังนั้น เมทานอลที่ใช้มีค่า } 1.125 \times 200 = \underline{225 \text{ g}}$$

$$\begin{aligned} - \text{อัตราส่วน 12:1 (mol:mol) คิดเป็นกรัม} &= (12 \times 32) : (1 \times 256) \quad (\text{g/g}) \\ &= 1.5 : 1 \text{ g/g} \end{aligned}$$

จากการทดลองใช้น้ำมันพืชใช้แล้ว 200 g

$$\text{ดังนั้น เมทานอลที่ใช้มีค่า } 1.5 \times 200 = \underline{300 \text{ g}}$$

2. การคำนวณหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่กำหนดในการศึกษาครั้งนี้คือ 1%wt, 2%wt และ 3%wt

ตัวอย่างการคำนวณ

- ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt

ปริมาณน้ำมันพืชใช้แล้ว 100 g จะใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 g

- ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2%wt

ปริมาณน้ำมันพืชใช้แล้ว 100 g จะใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2 g

- ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3%wt

ปริมาณน้ำมันพืชใช้แล้ว 100 g จะใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3 g

ทั้งนี้ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้ปริมาณน้ำมันพืชใช้แล้วที่ 200 g การใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt,

2%wt และ 3%wt จึงมีค่า 2 g, 4 g และ 6 g ตามลำดับ



ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตารางภาคผนวกที่ 1 ระยะเวลาในการใช้เชื้อเพลิงแรงบิด และกำลังเบรกของไปโอดีเซล (CCA)

ความเร็วรอบ (rpm)	ระยะเวลา (min)	แรงบิด (N-m)	กำลังเบรก (kW)
1,000	106	17.658	1.849
1,200	88	16.400	2.061
1,400	72	17.018	2.495
1,600	62	19.380	3.248
1,800	55	18.872	3.558
2,000	50	20.218	4.235

ตารางภาคผนวกที่ 2 ระยะเวลาในการใช้เชื้อเพลิงแรงบิด และกำลังเบรกของไปโอดีเซล (CLA)

ความเร็วรอบ (rpm)	ระยะเวลา (min)	แรงบิด (N-m)	กำลังเบรก (kW)
1,000	102	16.356	1.713
1,200	85	15.649	1.967
1,400	74	16.930	2.482
1,600	59	19.402	3.251
1,800	57	18.320	3.454
2,000	51	19.689	4.124

ตารางภาคผนวกที่ 3 ระยะเวลาในการใช้เชื้อเพลิงแรงบิด และกำลังเบรกของไปโอดีเซล B5 (DCCA)

ความเร็วรอบ (rpm)	ระยะเวลา (min)	แรงบิด (N-m)	กำลังเบรก (kW)
1,000	99	15.208	1.593
1,200	90	15.429	1.939
1,400	67	16.643	2.440
1,600	65	19.313	3.236
1,800	54	18.651	3.516
2,000	51	20.108	4.212

ตารางภาคผนวกที่ 4 ระยะเวลาในการใช้เชื้อเพลิงแรงบิด และกำลังม้าเบรกของไบโอดีเซล B5 (DCLA)

ความเร็วรอบ (rpm)	ระยะเวลา (min)	แรงบิด (N-m)	กำลังเบรก (kW)
1,000	108	17.415	1.824
1,200	86	12.648	1.590
1,400	73	15.694	2.301
1,600	63	19.159	3.211
1,800	54	18.872	3.558
2,000	51	20.064	4.203

ตารางภาคผนวกที่ 5 ระยะเวลาในการใช้เชื้อเพลิงแรงบิด และกำลังเบรกของน้ำมันดีเซล B5

ความเร็วรอบ (rpm)	ระยะเวลา (min)	แรงบิด (N-m)	กำลังเบรก (kW)
1,000	104	16.201	1.697
1,200	84	13.001	1.634
1,400	69	15.583	2.285
1,600	59	18.651	3.125
1,800	57	17.239	3.250
2,000	50	19.468	4.078

ตารางภาคผนวกที่ 6 ระยะเวลาในการใช้เชื้อเพลิงแรงบิด และกำลังเบรกของน้ำมันดีเซล

ความเร็วรอบ (rpm)	ระยะเวลา (min)	แรงบิด (N-m)	กำลังเบรก (kW)
1,000	104	16.245	1.701
1,200	88	14.193	1.784
1,400	75	15.605	2.288
1,600	64	18.894	3.166
1,800	57	17.172	3.237
2,000	46	19.578	4.101

ตารางภาคผนวกที่ 7 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของ
ไบโอดีเซล (CCA)

ความเร็วรอบ (rpm)	อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (cc/s)	อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (kg/kWh)
1,000	0.022	0.000627
1,200	0.027	0.000678
1,400	0.033	0.000685
1,600	0.038	0.000611
1,800	0.043	0.000629
2,000	0.047	0.000581

ตารางภาคผนวกที่ 8 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของ
ไบโอดีเซล (CLA)

ความเร็วรอบ (rpm)	อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (cc/s)	อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (kg/kWh)
1,000	0.023	0.000708
1,200	0.028	0.000740
1,400	0.032	0.000673
1,600	0.040	0.000645
1,800	0.041	0.000628
2,000	0.046	0.000588

ตารางภาคผนวกที่ 9 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ
ของไปโอดีเซล B5 (DCCA)

ความเร็วรอบ (rpm)	อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (cc/s)	อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (kg/kWh)
1,000	0.024	0.000771
1,200	0.026	0.000697
1,400	0.035	0.000744
1,600	0.036	0.000578
1,800	0.044	0.000640
2,000	0.046	0.000566

ตารางภาคผนวกที่ 10 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ
ของไปโอดีเซล B5 (DCLA)

ความเร็วรอบ (rpm)	อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (cc/s)	อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (kg/kWh)
1,000	0.022	0.000617
1,200	0.027	0.000890
1,400	0.032	0.000724
1,600	0.037	0.000601
1,800	0.044	0.000632
2,000	0.046	0.000567

ตารางภาคผนวกที่ 11 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของ
ดีเซล B5

ความเร็วรอบ (rpm)	อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (cc/s)	อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (kg/kWh)
1,000	0.023	0.000681
1,200	0.028	0.000876
1,400	0.034	0.000762
1,600	0.040	0.000652
1,800	0.041	0.000649
2,000	0.047	0.000589

ตารางภาคผนวกที่ 12 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของ
ดีเซล

ความเร็วรอบ (rpm)	อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (cc/s)	อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (kg/kWh)
1,000	0.023	0.000679
1,200	0.027	0.000766
1,400	0.031	0.000700
1,600	0.037	0.000593
1,800	0.041	0.000651
2,000	0.051	0.000637

ตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กโดยใช้น้ำมันดีเซล

ที่รอบเครื่องยนต์ 1,000 rpm โดยใช้น้ำมันจากหลอดแก้ว 3 ซีต ได้ระยะเวลา 104 sec ค่า

แรงบิดอยู่ที่ 7.36 kg

หากำลังเบรคจากสมการ

$$BP = \frac{2\pi FRN}{60}$$

$$BP = \frac{2(3.142)(16.245)(1,000)}{60}$$

$$BP = 1,701.430 \text{ W}$$

หรือ $BP = 1.701 \text{ kW}$

หาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจากสมการ

$$FC = \frac{\pi r^2 L}{t}$$

เมื่อรัศมีในหลอดแก้วเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร

$$FC = \frac{(3.142)(0.5)^2(3)}{104}$$

$$FC = 0.023 \text{ cc/s}$$

หาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะจากสมการ

$$SFC = \frac{W_f}{BP}$$

เมื่อความหนาแน่นของน้ำมันดีเซลพรีเมียมเท่ากับ 0.85 กิโลกรัมต่อลิตร

$$SFC = \frac{(0.023/1,000)(0.85)(60)}{1.701}$$

$$SFC = 0.000679 \text{ kg/kWh}$$



ภาคผนวก ค

บทความที่ได้เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

E-NETT 13TH

การประชุมวิชาการ
เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13
13TH CONFERENCE ON ENERGY NETWORK OF THAILAND
 “ Sustainable Energy Development for Community and Innovation ”

31 พ.ค. - 2 มิ.ย. 2560 ณ โรงแรม ดิเอ็มเพรส เชียงใหม่



MAEJO GO Eco UNIVERSITY

ITALTHAI ENGINEERING

STC
 สังกัดทองพัน
 พจนกิจ

cristalla
 TCC sugar industry

ENGINEER

SCB
 ไทยพาณิชย์

จัดการประชุมโดย : วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ร่วมกับ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

www.e-nett.org Enett13.mju@gmail.com 053 875590 fax : 053 875599

การศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เถ้ากาบมะพร้าวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา Production of biodiesel using coconut husk ash as catalyst

พัชยาภรณ์ สิงห์บุญ¹, รัชดาภรณ์ ปันทะรส², รจพรณ นริญศิลป์^{1*}

¹วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

²คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

โทรศัพท์ 0 5387 5595

*ผู้ติดต่อ: rotjapun_energy@hotmail.com , 0 5387 5595

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้เถ้ากาบมะพร้าวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชัน พร้อมทั้งศึกษาร้อยละขององค์ประกอบทางเคมีในเถ้ากาบมะพร้าว โดยการนำเถ้ากาบมะพร้าวที่เหลือทิ้งจากการเผาไหม้ทางชีวมวลมาทำการแคลไซน์ด้วยความร้อน 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้ากาบมะพร้าวด้วยเครื่อง X-ray fluorescence ใช้น้ำมันพืชใช้แล้วจากชุมชนเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล และวิเคราะห์ค่ากรดไขมันอิสระก่อนทำปฏิกิริยา โดยศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้ากาบมะพร้าว 3 ระดับ ที่ 1-3%wt ต่อน้ำหนักของน้ำมัน และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว ศึกษาที่ 6:1, 9:1, และ 12:1 ควบคุมอุณหภูมิที่ 65 °C และให้เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 hr ทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของน้ำมันไบโอดีเซลตามมาตรฐาน โดยวิเคราะห์สมบัติดังนี้ ค่าความหนืดตามมาตรฐาน ASTM D445 ค่าความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM D1298 ค่าความเป็นกรด-ด่างตามมาตรฐาน ASTM D2896 และปริมาณเมทิลเอสเทอร์โดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography,GC) ตามวิธีมาตรฐาน EN 14103 ผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วที่อัตราส่วน 6:1 ให้ผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุด 97 %คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ในงานวิจัยนี้เป็นไปตามมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน

คำหลัก: ไบโอดีเซล น้ำมันพืชใช้แล้ว เถ้ากาบมะพร้าว

Abstract

This research aims to study using coconut husk ash as a catalyst in biodiesel production by transesterification reaction and chemical compositions of coconut husk ash. The coconut coir was burn and then coconut husk ash from burning was calcined at 600 ° C for 4 hr. Chemical compositions of coconut husk ash with X-ray fluorescence. The raw material was used vegetable oil from community and free fatty acid (FFA) was analyzed before using. The condition of experiments were catalyst quantity (1-3%wt), molar ratio of methanol to oil (6:1,9:1 and12:1), retention time 1 hr, stirring rate rpm at 65°C. Physical properties of the biodiesel were analyzed viscosity values according to ASTM D445, density values according to ASTM D1298 and total acid values according to ASTM D2896 and the amount of methyl esters was studied by Gas Chromatography, GC) according to standard EN 14103. The results showed that molar ratio of methanol to oil 6:1 were the best condition for biodiesel production. The percentage yield were 97%. The characteristics of biodiesel from experiment were qualified according to the standard announce by the department of energy business, Ministry of Energy.

Keywords: Biodiesel Used vegetable oil Coconut husk ash

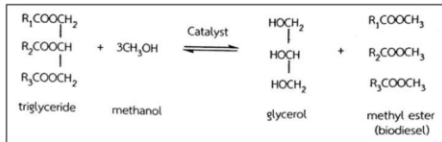
1. บทนำ

ประเทศไทยมีแหล่งปิโตรเลียมประเภทน้ำมันดิบไม่เพียงพอต่อความต้องการในการใช้งาน จำเป็นต้องพึ่งพาน้ำมันดิบโดยการนำเข้าจากต่างประเทศ น้ำมันดิบเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งเป็นแหล่งผลิตพลังงานหลักและเป็นพลังงาน

สิ้นเปลือง มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ความต้องการใช้พลังงานของประชากรกลับเพิ่มสูงขึ้นทำให้ราคาน้ำมันดิบของโลกพุ่งสูงขึ้นทุกปี โดยเฉพาะน้ำมันดีเซลที่ใช้ในภาคขนส่งและการเกษตรและมีสัดส่วนการใช้งานมากถึงร้อยละ 51ของการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทั้งหมดในประเทศไทย [1] จาก

แนวโน้มดังกล่าวข้างต้นจึงมีความพยายามในการหาแหล่งพลังงานทางเลือก เพื่อทดแทนพลังงานหลักที่กำลังจะหมดสิ้นไป ไบโอดีเซลเป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งที่ได้รับความสะดวกเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถผลิตได้จากพืชพลังงาน น้ำมันเหลือทิ้งจากระบบการทอดในเชิงอุตสาหกรรมอาหาร เป็นน้ำมันทางเลือกที่ผลิตได้จากพืชพลังงานและไขมันสัตว์ และเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกที่มีคุณสมบัติในการเผาไหม้เหมือนกับน้ำมันดีเซล [2] โดยในประเทศไทยนิยมผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันและนิยมใช้น้ำมันพืชที่ใช้แล้วเพื่อเป็นการประหยัดต้นทุนการผลิตและสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับวัสดุเหลือทิ้งในอีกทางหนึ่ง [3] ไบโอดีเซล (Biodiesel) คือน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพที่ผ่านการผลิตมาจากน้ำมันพืช หรือไขมันสัตว์ ผสมกับเอทานอลหรือเมทานอล เพื่อให้ได้เชื้อเพลิงโมเลกุลเล็ก อยู่ในรูปของเอทิลเอสเทอร์ หรือ เมทิลเอสเทอร์ เป็นเชื้อเพลิงสะอาด ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะมีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล และสามารถใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลในเครื่องยนต์ประเภทต่างๆ [4,5]

ไบโอดีเซลเป็นสารประเภทเอสเทอร์ ที่สามารถผลิตได้จากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่ยังไม่ได้ใช้หรือผ่านการใช้แล้ว ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ (Alcohol) เช่น เมทานอล โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ผ่านปฏิกิริยาทางเคมีที่มีชื่อว่า กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Trans esterification Process) [6] ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน [7]

น้ำมันพืชใช้แล้วจึงถูกเลือกมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล นอกจากจะเป็นการลดต้นทุนการผลิตแล้วยังช่วยในเรื่องของสิ่งแวดล้อม และสุขภาพของประชากร เนื่องจากที่ผ่านมามีการจัดน้ำมันพืชใช้แล้วนั้นเป็นไปอย่างไม่ถูกวิธี เช่น การทิ้งตามแม่น้ำลำคลองหรือท่อระบายน้ำ ก่อให้เกิดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงเหตุผลด้านการบริโภคน้ำมันพืชใช้แล้วซ้ำหลายๆ ครั้งก่อให้เกิดปัญหาสุขภาพของประชากร [7]

โดยจากงานวิจัยต่างๆ มีการศึกษา [8] เล้าชีวมวลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเช่น แถ่กลามพร้าว เล้าไม้ลำายเป็นต้น ซึ่งออกประกอบในเล้าชีวมวลประกอบด้วย ซิลิกา แคลเซียมออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ ซึ่งสามารถใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวีธีพันธุ (Heterogeneous Catalyst) [8] เป็นตัวเร่ง

ปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะแตกต่างจากสารตั้งต้น ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันในระบบ ถึงแม้ว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันจะมีประสิทธิภาพที่ดี แต่อาจเกิดปัญหาการปนเปื้อนและมีความยุ่งยากในการแยกออกจากผลิตภัณฑ์ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวีธีพันธุจะสามารถแยกตัวเร่งออกมาได้ง่ายโดยการกรองหรือการตกตะกอน และสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ ช่วยลดปริมาณน้ำเสียในขั้นตอนการล้างแยกผลิตภัณฑ์ จึงทำให้การผลิตไบโอดีเซลมีต้นทุนต่ำลง ซึ่งเป็นข้อดีที่ตัวเร่งชนิดอื่นๆ นับได้ว่าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [8] ไชยยันต์ ไชยยะและคณะ (2551) [9] ศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว ซึ่งผ่านการเคลือบโซลที่อุณหภูมิ 600 °C จากการศึกษาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence พบว่ามีโพแทสเซียม มีปริมาณโพแทสเซียมร้อยละ 6.44 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันต่อเมทานอลที่ 1:10, 1:15, และ 1:20 โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 60 °C ที่เวลา 3 ชั่วโมง ผลจากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพบว่า เมทิลเอสเทอร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนระหว่างน้ำมันต่อเมทานอล โดยปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดโพแทสเซียม จะให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ถึง 83.24-98.97% และ Vinu Vadery et al. (2014) [10] ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากสบู่ดำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเล้ามะพร้าว โดยตัวเร่งปฏิกิริยาเตรียมโดยการเผาถ่านมะพร้าวที่อุณหภูมิ 350 °C เมื่อทำการ X-ray diffraction พบองค์ประกอบหลักคือ โพแทสเซียมคลอไรด์ที่สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดี เมื่อทำการผลิตไบโอดีเซล ด้วยอัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันต่อเมทานอลที่ 6:1 ที่ 50 °C เป็นเวลา 1 hr เมื่อนำไปทำปฏิกิริยาเกิดเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันของไบโอดีเซล มากกว่า 97%

ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงมีความสนใจที่จะผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้เล้าจากถ่านมะพร้าวที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากถ่านมะพร้าวมีคุณสมบัติของวัสดุดังกล่าวมีความเป็นเส้นใยสูงเมื่อนำมาให้ความร้อนโดยการเผาแล้วจะได้เล้าที่เหลือจากเผาใหม่ภายในเตาเผา มาใช้ให้เกิดประโยชน์ เพื่อลดการใช้สารเคมี ลดต้นทุนในการผลิต ใช้ทดแทนน้ำมันดีเซล และทำการทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันที่ได้ เพื่อประกอบการตัดสินใจศึกษาในการผลิตไบโอดีเซลที่สามารถใช้งานจริงในชุมชนที่มีความต้องการใช้ในเรือของการเกษตรต่อไป

2. วิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจากเล้าถ่านมะพร้าว

นำถ่านมะพร้าวที่เหลือจากระบบการหีบน้ำมันและจากการเหลือทิ้งทางการเกษตร มาตากแดดไล่ความชื้น แล้วให้ความร้อนด้วยเตาชีวมวลอุณหภูมิ 800 °C จากนั้นนำเล้าจาก

มะพร้าวมาให้ความร้อนซ้ำโดยการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 4 hr และทำการศึกษองศ์ประกอบทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าจากมะพร้าว ด้วยวิธี X-Ray Fluorescence

2.2 การเตรียมน้ำมันพืชใช้แล้วและการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ

นำน้ำมันพืชใช้แล้วมากรอง และต้อน้ำมันพืชใช้แล้วที่อุณหภูมิ 100 °C เพื่อไล่ความชื้น จากนั้นทำการวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมัน ด้วยวิธีการไตเตรทด้วยสารละลายต่าง โดยชั่งน้ำมันตัวอย่าง 5 g ลงในขวดรูปชมพู่เติม 2-propanol 25 ml และหยด Phenolphthalein 3-5 หยด เขย่าให้เข้ากัน หยดสารละลายต่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ความเข้มข้น 0.1 N จากบิวเรตลงในขวดรูปชมพู่ทำการไตเตรทด้วยสารละลายต่าง พร้อมเขย่าให้เข้ากันจนได้สารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพู บันทึกปริมาตรสารละลายต่างที่ใช้ไป ทำการคำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระ (FFA) จากสมการที่ 1

$$FFA(\%) = \frac{A \times N \times 2.56}{m} \quad (1)$$

เมื่อ A คือ ปริมาณ KOH ที่ใช้ในการไตเตรท, ml
 N คือ ความเข้มข้นของ KOH ที่ใช้ในการไตเตรท
 m คือ น้ำหนักของน้ำมันตัวอย่าง, g

2.3 การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าจากมะพร้าว โดยศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าจากมะพร้าว 3 ระดับ ที่ 1-3%wt ต่อน้ำหนักของน้ำมัน ให้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว ศึกษาที่ 6:1, 9:1, และ 12:1 ควบคุมอุณหภูมิที่ 65 °C และให้เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 hr หลังจากนั้นทำการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผลิตใส่กรวยแยกชั้น เพื่อแยกกลีเซอรอลออกจากไบโอดีเซล และทำการล้างน้ำด้วยน้ำอุ่น 50 °C จากนั้นให้ความร้อนกับไบโอดีเซลที่ 100 °C เพื่อกำจัดน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ จากนั้นทำการหาละยะผลผลิตของไบโอดีเซลที่ผลิตได้

ร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ (Yield%) วิเคราะห์โดยใช้สูตร ดังแสดงในสมการที่ 2

$$Yield(\%) = \frac{A}{B} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักของไบโอดีเซล, g
 B คือ น้ำหนักของน้ำมันตั้งต้น, g

2.4 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของน้ำมันไบโอดีเซล

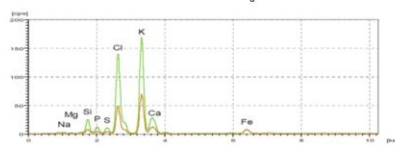
การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของน้ำมันไบโอดีเซล ตามมาตรฐาน (American Society for Testing and Materials , ASTM) โดยวิเคราะห์สมบัติดังนี้ ค่าความหนืดตามมาตรฐาน ASTM D445 ค่าความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM D1298 ค่าความเป็นกรด-ด่างตามมาตรฐาน ASTM D2896 และและปริมาณเมทิลเอสเทอร์โดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC) ตามวิธีมาตรฐาน EN 14103

3. ผลการดำเนินการวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยศึกษาการใช้เถ้าจากมะพร้าวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล โดยแบ่งผลการศึกษาเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้า ส่วนที่ 2 การวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ ส่วนที่ 3 การศึกษาปัจจัยที่ผลต่อร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้ และส่วนที่ 4 การศึกษามาตรฐานการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

3.1. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าจากมะพร้าว

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าจากมะพร้าวที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 4 hr ด้วยวิธี X-Ray Fluorescence ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าจากมะพร้าว

ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าจากมะพร้าว ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่าประกอบไปด้วย Na Mg Si P S Cl K Ca และ Fe ซึ่งค่า K มีอยู่สูงมากเนื่องจาก มีค่าของพลังงานสูงกว่าธาตุอื่น ๆ โดยมีปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าจากมะพร้าวดังแสดงตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้ากาบมะพร้าวด้วยวิธี X-Ray Fluorescence

องค์ประกอบทางเคมี(%)	เถ้ากาบมะพร้าว
Sodium Oxide (Na ₂ O)	21.95
Magnesium Oxide (MgO)	5.26
Silicon Dioxide (SiO ₂)	14.29
Phosphorus Pentoxide (P ₂ O ₅)	4.54
Sulfur Trioxide (SO ₃)	2.41
Chlorine (Cl)	13.08
Potassium Oxide (K ₂ O)	32.86
Calcium Oxide (CaO)	4.73
Iron Oxide (Fe ₂ O ₃)	0.90

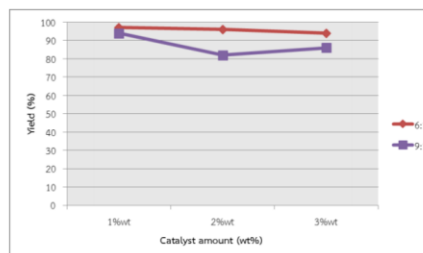
โดยพบว่าองค์ประกอบทางเคมีของเถ้ากาบมะพร้าวที่มีค่ามากที่สุดคือ Calcium Oxide (CaO) 4.73 % Potassium Oxide (K₂O) 32.86 % ซึ่งมีความเป็นเบสสูง จึงส่งผลให้สามารถเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยเทคโนโลยีและการพัฒนาการผลิตไบโอดีเซล [9] ซึ่งมีสมบัติใกล้เคียงกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสารเคมีที่นิยมใช้ในการทดลองและอุตสาหกรรม [10] ซึ่งเถ้ากาบมะพร้าวมีความเป็นเบสประเภทไฮดรอกไซด์ซึ่งสามารถตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันได้ สามารถลดระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา และยังสามารถขจัดออกไซด์เนื่องเกิดการละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ทำให้สามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยานั้นออกได้ และลดปริมาณการใช้น้ำในการล้างผลิตภัณฑ์ซึ่งทำให้เกิดน้ำเสียในปริมาณน้อยและลดปัญหาสารเคมีตกค้างได้อีกด้วย

3.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว หลังจากการทำกรดเตรียมวัตถุดิบด้วยวิธีการดังที่กล่าวมาข้างต้น ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ พบว่า ค่าปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชที่ใช้แล้วที่ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตไบโอดีเซล มีค่าเท่ากับ 1.024 โดยไม่เกินค่ามาตรฐานการค่ากรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชใช้แล้วที่มีค่าเท่ากับ 2.5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำมันพืชที่ใช้เป็นวัตถุดิบสามารถทำปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลได้เป็นอย่างดี หากน้ำมันมีค่ากรดไขมันอิสระมากเกินไปจะส่งผลให้น้ำมันมีความเป็นกรดมากเกินไปแล้วยากต่อการทำปฏิกิริยา [9]

3.3 ผลการศึกษาปัจจัยที่ผลต่อร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้

ผลผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้ากาบมะพร้าวพบว่าได้ผลผลิตไบโอดีเซลดังแสดงในรูปที่ 3



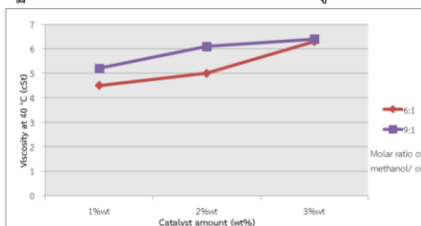
รูปที่ 3 ปัจจัยที่ผลต่อร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้

ผลผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้ากาบมะพร้าวที่ทำการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 °C พบว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้ากาบมะพร้าวที่ 1%wt ต่อน้ำหนักของน้ำมันให้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วอัตราส่วน 6:1 ให้ผลผลิตสูงสุด 97 % ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Vinu Vadery et al. [10] ที่พบว่าอัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมันที่ให้ผลผลิตไบโอดีเซลที่ดีที่สุดคือ 6:1, 9:1 ให้ผลผลิต 94% และ 12:1 ไม่เกิดปฏิกิริยา การตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้ากาบมะพร้าวที่ 2%wt ต่อน้ำหนักของน้ำมัน ในอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วอัตราส่วน 6:1 ให้ผลผลิต 96 %, 9:1 ให้ผลผลิต 82% และ 12:1 ไม่เกิดปฏิกิริยา และตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้ากาบมะพร้าวที่ 3%wt ต่อน้ำหนักของน้ำมันให้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วอัตราส่วน 6:1 ให้ผลผลิต 94 %, 9:1 ให้ผลผลิต 86% และ 12:1 ไม่เกิดปฏิกิริยา

ในอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้วอัตราส่วน 12:1 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าไม่เกิดปฏิกิริยาในทุกการทดลองเนื่องจากมีเมทานอลมากเกินไปความต้องการใช้ปฏิกิริยา [7]

3.3. ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

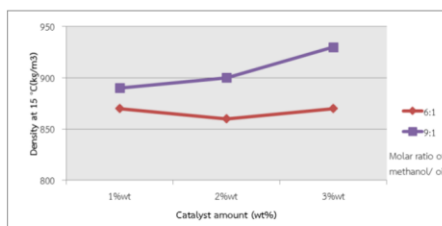
พบว่าการทดลองที่ใช้เถ้าจากมะพร้าวในการทำปฏิกิริยา มีค่าความหนืด 4.5-7 cSt ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ค่าความหนืดของผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล

ซึ่งพบว่าค่าความหนืดของผลิตภัณฑ์ผ่านเกณฑ์มาตรฐานการผลิตไบโอดีเซลที่ ASTM D 445 ซึ่งมี 3.5-5 cSt คือน้ำมันที่เจือปน ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 1%wt และ 2%wt ที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่ 6:1 ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน แสดงให้เห็นว่าการใช้อัตราส่วนเมทานอลที่เหมาะสมนี้ส่งผลให้ค่าความหนืดของน้ำมันเป็นไปตามมาตรฐาน โดยความหนืดขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันที่น้ำมันเป็นวัตถุดิบตั้งต้น ความหนืดมีผลต่อการไหล ความต้านทานการไหล คุณสมบัติในการหล่อลื่นพื้นผิว และการฉีกเป็นฝอยของหัวฉีดในห้องเผาไหม้ [11] หากความหนืดไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานจะส่งผลต่อการทำงานของปั๊มและหัวฉีดของเครื่องยนต์เพราะการฉีกน้ำมันให้เป็นฝอยจะทำได้ยาก ส่งผลให้การเผาไหม้น้ำมันเกิดไม่สมบูรณ์ กำลังของเครื่องยนต์ตก เกิดควันดำ และสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง [12]

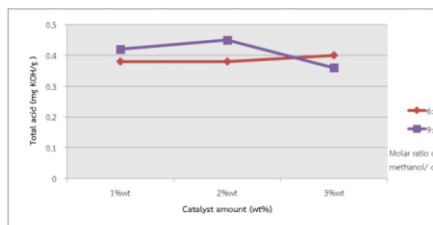
พบว่าการทดลองที่ใช้เถ้าจากมะพร้าวในการทำปฏิกิริยา มีค่าความหนาแน่นอยู่ที่ 860-930 kg/m³ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล

ซึ่งค่าความหนาแน่นเป็นค่าที่ระบุคุณสมบัติเบื้องต้นทางกายภาพของไบโอดีเซล ทดสอบตามวิธี ASTM D1298 [11] ซึ่งค่ามาตรฐานกำหนดไว้ที่ช่วง 860 - 900 kg/m³ และพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ที่อยู่ในมาตรฐานอยู่คือผลิตภัณฑ์ที่เจือปนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 1%wt 2%wt และ 3%wt ที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่ 6:1 และ เจือปนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 1%wt 2%wt และ 3%wt ที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่ 9:1

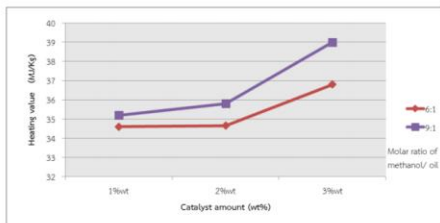
พบว่าการทดลองที่ใช้เถ้าจากมะพร้าวในการทำปฏิกิริยา มีค่าความเป็นกรด ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล

ซึ่งค่าความเป็นกรดเป็นค่าที่ระบุคุณสมบัติเบื้องต้นทางกายภาพของไบโอดีเซล ทดสอบตามวิธี ASTM D2896 [11] ซึ่งในไบโอดีเซลใช้บังคับถึงกรดไขมันอิสระที่ทำให้ปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ หรือการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดหรือมีข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการล้างไบโอดีเซลที่มีการเติมกรดช่วยปรับ pH เป็นกลาง การมีค่าความเป็นกรดในน้ำมันสูงเกินไปส่งผลให้อายุการใช้งานของระบบจ่ายน้ำมันและเครื่องสันหลัง ซึ่งผลที่ได้ต้องให้ค่าไม่สูงกว่า 0.5 mg KOH/g [13] และพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ที่อยู่ในมาตรฐานอยู่คือผลิตภัณฑ์ที่เจือปนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 1%wt 2%wt และ 3%wt ที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่ 6:1 และ เจือปนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 1%wt 2%wt และ 3%wt ที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่ 9:1

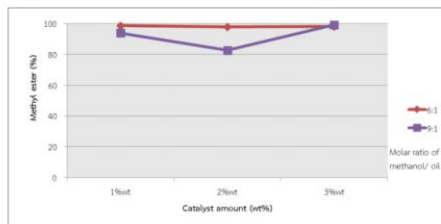
พบว่าการทดลองที่ใช้เถ้าจากมะพร้าวในการทำปฏิกิริยา มีค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล

ค่าความร้อนของไบโอดีเซล พบว่า มีค่าความร้อนของน้ำมันที่ได้จากการตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้ากาบมะพร้าว ซึ่งอยู่ในมาตรฐานไบโอดีเซลและไม่ส่งผลกระทบต่อเครื่องยนต์ ความร้อน เป็นปริมาณความร้อนที่ถูกปล่อยออกมาต่อหน่วยน้ำหนักเมื่อเชื้อเพลิงถูกนำไปเผา ซึ่งพบว่าค่าความร้อนของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่ ASTM D4809 แสดงให้เห็นว่าไบโอดีเซลที่ผลิตได้สามารถใช้กับเครื่องยนต์ขนาดเล็กได้ โดยค่าความร้อนเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิง พบว่า น้ำมันไบโอดีเซลสามารถเผาไหม้ได้สะอาดตามมาตรฐานเชื้อเพลิงที่กำหนด

พบว่าการทดลองที่ใช้เถ้ากาบมะพร้าวในการทำปฏิกิริยา มีปริมาณเมทิลเอสเทอร์ ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ของผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล

ค่าที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานบ่งชี้ว่าการผลิตไบโอดีเซลทำให้ได้โมเลกุลไบโอดีเซลมากตามเกณฑ์โมเลกุลหรือสารอื่นๆ ที่ปะปนมาจะมีน้อย ซึ่งทำให้ไบโอดีเซลมีคุณสมบัติในทุกๆด้านดีตามไปด้วย การนำไปใช้จะส่งผลด้านประสิทธิภาพ การสึกหรอ เขม่าควัน หรือคุณสมบัติอื่นๆในทางที่ดีทั้งหมดใช้ระบุความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล วิธีทดสอบใช้ตาม EN14103 [11] ซึ่งตรวจวัดโดยใช้เทคนิคโครมาโตกราฟี และผลที่ได้ต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 96.5% [13] พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ที่อยู่ในมาตรฐานโดยผลิตภัณฑ์ที่เงื่อนไขตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 1%wt 2%wt และ

3%wt ที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่ 6:1 มีปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 98.57% 97.78% และ 98.1% ตามลำดับ และ เงื่อนไขตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 3%wt ที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่ 9:1 1 มีปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 99.24%

4 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เถ้ากาบมะพร้าวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเถ้ากาบมะพร้าวที่เผาด้วยความร้อน 600 °C เป็นเวลา 4 hr สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลได้ โดยได้รับการยืนยันจากผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุด้วยเทคนิค XRF เมื่อนำมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล ผลการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากเถ้ากาบมะพร้าวให้ผลผลิตไบโอดีเซลสูงถึง 97% ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้ากาบมะพร้าว 1%wt ในปริมาณน้อย และลดการใช้เมทานอลในปฏิกิริยาเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเกิดในช่วงอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่ 6:1 ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้ากาบมะพร้าวที่จึงมีสมบัติและความสามารถในการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซลที่ดี และมีสมบัติที่ผ่านมาตรฐานในการผลิตไบโอดีเซลตามมาตรฐาน ASTM โดยให้ผลผลิตที่ 97% มีค่าความหนืด 4.5 cSt ค่าความหนาแน่นอยู่ที่ 870 kg/m³ ความเป็นกรด 0.38 mg KOH/g ค่าความร้อน 34.60 MJ/kg และมีปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 98.57%

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะอาจารย์ ศูนย์วิจัยพลังงาน และวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้คำแนะนำ การสนับสนุนอุปกรณ์และสถานที่ในการศึกษาวิจัย และขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ภายใต้โครงการการพัฒนาพลังงานทดแทนและการประยุกต์ใช้ชุมชนสีเขียวที่มอบทุนสนับสนุนงานศึกษาวิจัยในครั้งนี้ด้วย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ศิวะพงศ์ เพ็ชรสงค์, ไบโอดีเซลพลังงานทางเลือก, พิมพ์ครั้งที่ 1. 2550, กรุงเทพฯ: บริษัท มิตรภาพการพิมพ์และสตีวดีโอ จำกัด.
- [2] กลุ่มสถิติข้อมูลพลังงาน, สถานการณ์พลังงานของประเทศไทย. 2558, กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.
- [3] ชูชีพ พิพัฒน์ศิริ, เศรษฐศาสตร์การวิเคราะห์โครงการ, คณะเศรษฐศาสตร์. 2540, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพฯ.

[4] ธรรมศักดิ์ พันธุ์แสนศรี และอนุกุล จันทร์แก้ว, การศึกษาสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กในการทำงานจริงโดยใช้ไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิง. 2554, มหาวิทยาลัยแม่โจ้-แพร่ เฉลิมพระเกียรติ: แพร่

[5] เขาวลิต ถาวรสิน, สุทธิพันธ์ ชุนอินทร์ และภริษา เพชรกำบังภัย, รายงานการวิจัยการสร้างชุดผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว. 2552, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ.

[6] เทพพนม นพรัตน์ไชยพร และสุเชษฐ เทพอาษา, การใช้เชื้อเพลิงจากชีวมวลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล, วิทยาลัยพลังงานทดแทน. 2557, มหาวิทยาลัยแม่โจ้: เชียงใหม่.

[7] พัชยาภรณ์ สิงห์รัฐ และณัณท์ เอื้ออาบ, การศึกษาเปรียบเทียบการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว, วิทยาลัยพลังงานทดแทน. 2558, มหาวิทยาลัยแม่โจ้: เชียงใหม่.

[8] ปิยรัตน์ศิริ พันธุ์จันทร์, การสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และการเตรียมน้ำมันของกลีเซอรอล, ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี. 2556, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่: เชียงใหม่.

[9] ไชยยันต์ ไชยยะ และคณะ, การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิธพันธุ์. 2551, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ: กรุงเทพฯ.

[10] Vadey, V., et al., Room temperature production of jatropha biodiesel over coconut husk ash. Energy, 2014. 70: p. 588-594.

[11] กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กระทรวงพลังงาน, ไบโอดีเซล โครงการส่งเสริมการผลิตการใช้ไบโอดีเซลในระดับชุมชน, พิมพ์ครั้งที่ 1. 2550, กรุงเทพฯ: วอเตอร์แอสซิเทค.

[12] Bart, J.C.J., N. Palmeri, and S. Cavallaro, 4 - Vegetable oil formulations for utilisation as biofuels, in Biodiesel Science and Technology. 2010, Woodhead Publishing. p. 114-129.

[13] McKennedy, J., et al., Supercritical carbon dioxide treatment of the microalgae Nannochloropsis oculata for the production of fatty acid methyl esters. The Journal of Supercritical Fluids, 2016. 116: p. 264-270.



Proceedings ICEM^{13th}

The 13th International Conference on Ecomaterials 2017

November 19-23, 2017

KMUTT Knowledge Exchange for Innovation Center (KX), Bangkok, Thailand





Biodiesel production from used cooking oil using biomass ash as catalyst

Patchayaporn Singharun and Rotjapun Nirunsin*

School of Renewable, Maejo University, Chiang Mai, 50290, Thailand

*e-mail: rotjapun@mju.ac.th

Abstract: The objective of this research was to study biodiesel production from used cooking oil (UCO) with free fatty acid (FFA) using biomass ash catalyst via transesterification reaction. The biomass ash catalysts in this study were coconut ash and longan ash, which was the solid waste from agriculture. After 4 hr. Calcination at varied temperatures - 300, 600 and 900 °C, morphological properties of catalysts were assessed by scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive X-ray spectrometer (EDS). Then, catalytic activity was tested with catalyst quantity of 1%wt, reaction temperature at 60 °C for 1 hr, and varied methanol/oil molar ratios from 3:1 to 12:1. Viscosity, and density were then analyzed. Total acid and the amount of methyl esters were studied by gas chromatography (GC). From the results, coconut ash catalyst calcined at 900 °C and a molar ratio of methanol to oil 3:1 was shown to be the best for biodiesel production, achieving 98.57% conversion yield to biodiesel and the yield was 97% for methyl ester. The characteristics of biodiesel from experiments were qualified according to the standard announced by the department of energy business, Ministry of Energy.

Keywords: biodiesel; transesterification; biomass ash; coconut ash; longan ash

1. Introduction

Renewable energy are being developed to substitute conventional fossil fuels¹. Biodiesel has attracted several attention due to some distinct advantages over the conventional diesel, including being renewable, energy efficient, biodegradable and environmentally friendly. Also, a higher flash point makes it safe for transportation and storage². Transesterification using homogeneous catalysts such as sodium hydroxide (NaOH) and potassium hydroxide (KOH) is the most widely used method for the biodiesel production³. There are four methods in transesterification of biodiesel production: base- catalyzed, acid- catalyzed, enzyme catalyzed, and non- catalytic methods⁴. Homogeneous catalyst is normally emphed for biodiesel production, due to high yield and faster conversion of oil to methyl esters. However, in our recent work, we found

environmental issue due to the chemical within from waste water released from biodiesel production using homogeneous catalyst⁵, such as methoxide. Whereas biomass fuel for generating heat and power is of great interest. For all over the world, biomass producing creates a large amount of wood ash as a waste. Besides this, the biomass ash is a highly alkaline matter and its disposal is a growing problem, as environmental regulations have become more stringent⁶. The available chemical information on biomass ash has revealed that it could be used for biodiesel production as a heterogeneous catalyst. The minerals components of biomass ash are the oxides of different elements. Earlier studies have shown that the dominant elements of biomass ash are calcium, potassium, magnesium, silicon, manganese, aluminum, phosphorous, sulfur, iron, sodium and zinc⁷. The composition of biomass ash depends on



various factors, including type of forest species and conditions of combustion etc. In our work i. e. Coconut and Longan were selected as sources for biomass. These trees are local trees in the North of Thailand and are commonly used as firewood. Ash from these trees were explored for their efficiencies in biodiesel production. Properties of the obtained biodiesel are also studied. Finally, the optimal condition for the production of biodiesel employing the selected ash would reported⁸.

2. Materials and Methods

2.1 Materials and catalyst preparation

2.1.1 Materials

Used cooking oil was taken to filter and boiled for moisture removal at 100 °C for 30 min. Then free fatty acid was analyzed (FFA) according to the standard ASTM D5555-95 by titration with standard based-solution. The percentage of free fatty acid was analysis (FFA) by calculation using the following equation (1)⁹.

$$FFA = \frac{V \times N \times A}{m} \quad (1)$$

Where A = volume of potassium hydroxide solution (KOH) (ml); N = concentrations of potassium hydroxide solution (KOH); m is the mass of oil used as raw material (g)

2.1.2 Catalyst preparation

The catalyst of this research was a heterogeneous catalyst. They were coconut ash and logan ash calcined in a muffle furnace under static air conditions at temperatures of 300, 600 and 900 °C for 4 hr. Calcined coconut ash (CCA) and calcined longan ash (CLA) was crushed to fine powder and filtered through a stainless steel sieve 60 mesh.

2.1.3 Catalyst characterization

The elemental chemical compositions of CCA and CLA were analyzed by scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive X-ray spectrometer (EDS).

2.2 Transesterification reaction

The transesterification was carried out in laboratory scale waste cooking oil in a 200 g. methanol/oil molar ratio of (3:1, 6:1, 9:1 and 12:1) and used CCA and CLA at temperature of 300, 600 and 900 °C. The amount of catalyst were 1% and experimental temperature was 600 °C and stirred at 300 rpm for 1 hr, using a hot plate controlled by a thermo regulator. After the transesterification reaction finished, the percentage yield was calculated using the following equation (2)¹⁰.

$$\text{yield (\%)} = \frac{\text{Weight of biodiesel (2)}}{\text{Weight of oil}}$$

2.3 Biodiesel production properties

The research studied properties of biodiesel products from each conditions. They were analyzed by viscosity value (ASTM D445), acid value (ASTM D664), density (ASTM D1298) and fatty acid methyl ester (FAME) were performed in gas chromatograph (Agilent 7890A) by method (EN 14103), equipped with a flame ionization detector and a capillary column (DB-WAX, 30 m × 0.25 mm × 0.25 μm). Methyl heptadecanoate was used as an internal standard to quantify the content of biodiesel. The fatty acid methyl ester (FAME) of biodiesel samples was identified and then the peak areas were utilized to quantify the fatty acid methyl ester (FAME) content, using the following equation (3)¹¹.

$$FAME(\%) = \frac{(\sum A) A_{EI}}{A_{EI}} \times \frac{C_{EI} \times V_{EI}}{m} \times 100\% \quad (3)$$

Where $\sum A$ = total peak area; A_{EI} = peak area corresponding to the methyl heptadecanoate; C_{EI} = concentration of methyl heptadecanoate solution in heptane (mg/ml); V_{EI} = volume of methyl heptadecanoate solution (ml); m = mass of biodiesel sample (mg).



3. Results & Discussion

3.1 Materials and catalyst preparation

3.1.1 Scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS)

Figure 1(a-c) and figure 2(a-c) showed the morphological characteristics of the calcination catalysts by the SEM micrographs. Both catalysts were calcined at 300, 600 and 900 °C. For CCA catalyst exhibited similar spongy and porous structures that indicating highly adsorbent surfaces.^{12,13} Because of

CCA was ash from softwoods and complete combustion could happened since 300 °C but in higher calcined temperature, chemical decomposition of Ca was happened clearly¹⁴ and could observe from chemical composition by EDS. On other sides, CLA could not distribute in lower calcination temperature at 300 °C. The agglomerated structures disappear at lower calcination temperature. When calcined temperature increased, CLA catalyst showed more distributable, spongy and porous¹⁵ as shown in Figure 2 b-c.

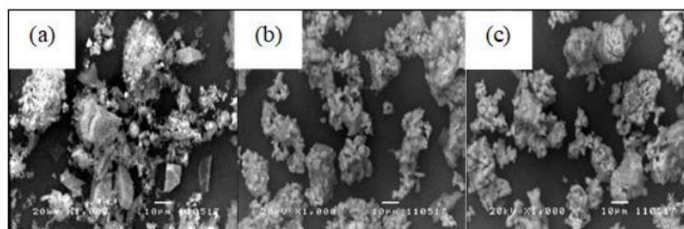


Figure 1. SEM images of catalysts were biomass ash derived from the remains of (a) CCA at 300 °C, (b) CCA at 600 °C and (c) CCA at 900 °C.

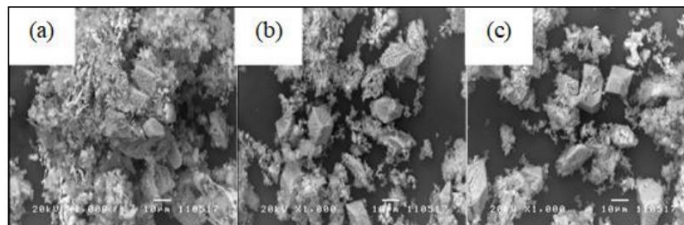


Figure 2. SEM images of catalysts were biomass ash derived from the remains of (a) CLA at 300 °C, (b) CLA at 600 °C and (c) CLA at 900 °C.

Figure 3(a-c) and in figure 4(a-c) showed EDS elemental analysis of calcination biomass ash catalysts and show in Table 1. The chemical components of CCA and CLA that analyzed by EDS showed the abundance of both Ca and O that were noticeable in catalysts but difference in percentage. Other elements appeared in minor amount such as C, Na, Mg, Al, Si, P, S, K, Fe and Ba. The most percentage of Ca was reached at the highest calcination

temperatures is 900 °C.^{16,17} Ca component of CCA was 24.56 wt.% and CLA was 26.23 wt.%. Ca and O acted as major catalysts in form of CaO that conversion triglycerides in UCO to biodiesel or fatty acid methyl ester on tranesterification reaction. So, this was a reason why the amount of Ca and O were important in catalyst function.

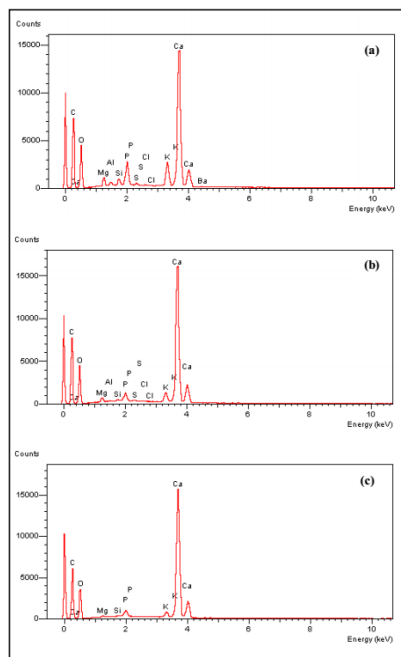


Figure 3. EDS images of catalysts were biomass ash derived from the remains of (a) CCA at 300 °C, (b) CCA at 600 °C and (c) CCA at 900 °C.

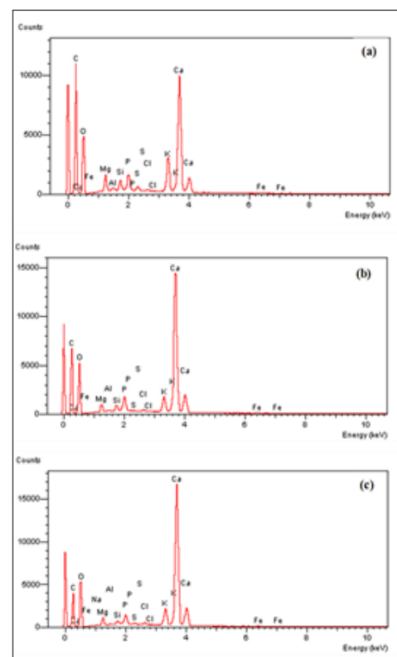


Figure 4. EDS images of catalysts were biomass ash derived from the remains of (a) CLA at 300 °C, (b) CLA at 600 °C and (c) CLA at 900 °C.

Table 1. Elemental analysis data of CCA at 300 °C, CCA at 600 °C, CCA at 900 °C, CLA at 300 °C, CLA at 600 °C and CLA at 900 °C.

Catalyst	Element content (wt.%)												
	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	Ba
CCA 300 °C	37.80	41.83	-	1.53	0.21	0.70	1.26	0.30	0.09	3.33	12.79	0.15	-
CCA 600 °C	26.94	47.58	-	0.90	0.14	0.51	1.52	0.07	0.16	1.90	20.06	0.16	-
CCA 900 °C	18.12	51.14	0.18	1.14	0.12	0.39	1.24	0.15	0.24	2.55	24.56	0.17	-
CLA 300 °C	30.42	42.19	-	0.99	0.31	0.53	2.44	0.21	0.06	3.05	19.57	-	0.23
CLA 600 °C	28.90	44.81	-	0.61	0.07	0.14	0.95	0.11	0.06	1.46	22.88	-	-
CLA 900 °C	27.07	44.59	-	0.23	-	0.10	0.82	-	-	0.95	26.23	-	-



3.2 Transesterification reaction

From transesterification reaction that operated under condition methanol/oil molar ratio of (3:1, 6:1, 9:1 and 12:1) and used CCA and CLA at temperature of 300, 600 and 900 °C. The amount of both catalysts were 1% and experimental temperature was 600 °C and stirred at 300 rpm for 1 hr. The analysis of free fatty acids (FFA) of used cooking oil was 0.45%¹⁵. The result found that reaction using CCA and CLA under conditions molar ratio methanol:oil of 12:1 could not be success because of excessive amount of methanol¹⁶. It disturbed mechanism of biodiesel production. When were discussed in reaction which used molar ratio methanol:oil of 3:1, 6:1 and 9:1 of both catalysts. The results showed the reaction using CCA and CLA catalysts that calcined catalysts at 900 °C and used methanol:oil of 3:1 were the best condition that had highest biodiesel yield and shown as Figure 5-6. The result of reaction using CCA had 98.57% of biodiesel yield and CLA had 95.32%. These results related with chemical component analysis of CCA and CLA by EDS techniques from Table 1 that showed the maximum amount of Ca and O appeared at calcined temperature of 900 °C. Ca and O were major catalyst of biodiesel production in form of CaO. Considering the molar ratio methanol:oil of 3:1, 6:1 and 9:1, The best molar ratio was 3:1 of both catalysts because homogeneous catalysts in transesterification used amount of methanol more than heterogeneous catalysts. The optimum molar ratio of methanol:oil of homogeneous catalyst was 6:1¹⁶. But, from this research we found 3:1 was the optimum and suitable for heterogeneous. The excess amount of methanol was not supported biodiesel product^{17,18}.

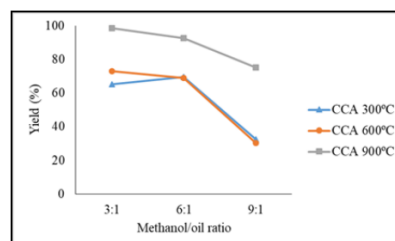


Figure 5. Effect of methanol/oil ratio using CCA at 300 °C, CCA at 600 °C, CCA at 900 °C to biodiesel yield.

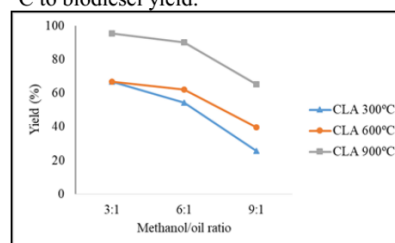


Figure 6. Effect of methanol/oil ratio using CLA at 300 °C, CLA at 600 °C, CLA at 900 °C to biodiesel yield.

3.3 Biodiesel production properties

Biodiesel properties from this research showed, biodiesel product using CCA and CLA as catalysts had properties according to standard American Society for Testing and Materials (ASTM) and European Standard (EN). From Table 3-4. First properties was methyl esters that using gas chromatography (GC) method. The results showed a percentage of methyl ester from CCA as catalysts were in range of 86–97% and methyl ester of CLA were in range of 81-90%. The results showed the potential of CCA as the best heterogeneous in this work. Second properties was viscosity value analysis (ASTM D445).²⁰ Most of biodiesel products from CCA and CLA as catalysts had the viscosity value between 4.2-6.6 cSt. The best condition that had excellent value was reaction from CCA at 900 °C, molar ratio methanol:oil of 3:1. For biodiesel



properties, viscosity was very important factor because the higher viscosity of biodiesel poses some acute problems when it is used in the engine. Third properties was density (ASTM D1298) that could be effect on the performance of fuel supply system²¹. Most of biodiesel products had the density value between 870-890 kg/m³ and fourth properties was acid value (ASTM D664) that high value effected to corrode automotive engine and its limited car engine performance. All of biodiesel product had the acid value between 0.42-0.5 mg KOH/g²². That was strength point of

biodiesel from ash catalyst. The biodiesel properties of CCA and CLA as catalysts using as shown in Table 2-3, respectively. The characteristics of biodiesel from experiments were qualified according to the standard announced by the department of the energy business, Ministry of Energy²³. From the results of this research, biodiesel production using biomass ash as catalyst could be one of eco-friendly method to produce and develop biodiesel production in the future.

Table 2. Biodiesel properties of all condition of CCA at 300 °C, CCA at 600 °C and CCA at 900 °C.

Fuel properties	Test method	Limits	Simples								
			CCA 300 °C			CCA 600 °C			CCA 900 °C		
			3:1	6:1	9:1	3:1	6:1	9:1	3:1	6:1	9:1
Methyl esters	EN 14103	96.5 min	97	92	95	92	90	86	97	96	93
Viscosity values	ASTM D445	3.5-5.0 cSt	5.13	4.90	5.80	4.90	5.18	6.30	4.20	4.80	5.13
Density values	ASTM D1298	860-930 kg/m ³	870	870	870	875	870	870	870	875	870
Acid values	ASTM D664	max 0.5 mg KOH/g	0.43	0.50	0.42	0.43	0.50	0.50	0.43	0.44	0.47

Table 3. Biodiesel properties of all condition of CLA at 300 °C, CLA at 600 °C and CLA at 900 °C.

Fuel properties	Test method	Limits	Simples								
			CLA 300 °C			CLA 600 °C			CLA 900 °C		
			3:1	6:1	9:1	3:1	6:1	9:1	3:1	6:1	9:1
Methyl esters	EN 14103	96.5 min	90	89	86	86	83.3	82	90	81	76
Viscosity values	ASTM D445	3.5-5.0 cSt	5.20	5.18	6.60	5.18	4.90	5.30	4.50	5.20	5.80
Density values	ASTM D1298	860-930 kg/m ³	870	870	875	870	880	870	875	890	880
Acid values	ASTM D664	max 0.5 mg KOH/g	0.44	0.50	0.43	0.47	0.46	0.45	0.50	0.47	0.50

4. Conclusions

Biodiesel production using coconut ash calcined at 900 °C and with a molar ratio of methanol:oil of 3:1 was shown to be the best achieved 98.57% yield of conversion to biodiesel and 97% yield for methyl ester, with lowest viscosity of 4.2 cSt viscosity values according to American Society for Testing and Materials ASTM D445, density values according to ASTM D1298 870 kg/m³ and total acid values according to ASTM D2896 0.43 mg KOH/g and biodiesel production using longan ash calcined at 900 °C and with a molar ratio of

methanol:oil of 3:1 was shown to be the best achieved 95.32% yield of conversion to biodiesel and 90% yield for methyl ester, with lowest viscosity of 4.5 cSt viscosity values according to American Society for Testing and Materials ASTM D445, density values according to ASTM D1298 875 kg/m³ and total acid values according to ASTM D2896 0.5 mg KOH/g.

Acknowledgements

The authors would like to acknowledge the following supporters of this research; School of Renewable Energy, Maejo

University and Institute of Production Quality and Standardization at Maejo University for assisting research and National Research Council of Thailand (NRCT) under Development of Alternative Energy and Its applications in green communities project.

References

1. Basheer HD, Abdul AAR, Daud WMAW and Chakrabarti MH., 2012, *Process Saf Environ Prot*, 90, 164–179.
2. Sharma, M., Khan, A.A., Puri, S.K. and Tuli, D.K., 2012, *Biomass Bioenerg.*, 41(6), 94–106.
3. Toda, M., Takagaki, A., Okamura, M., Kondo, J.N., Hayashi, S., Domen, K., et al., 2005, *Nature*, 438(7065), 178.
4. Meher, L. C., Sager, D. V. and Naik, S. N., 2006, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 10, 248–268.
5. Dorado, M.P., Ballesteros, E., Anal, J.M., Gomez, J. and Lopez, F.J., 2003, *Fuel*, 82, 1311–1315.
6. Mukherji SK, Dan TK and Machhoya BB., 1995, *Inter. Ceram.*, 44(1), 31–33.
7. Ulery AL, Graham RC and Amrhein C., 1993, *Soil Sci.*, 156(5), 358–364.
8. Barton GM., 1984, *Biomass*, 4(4), 311–314.
9. Mankong, W., Pairintra, R. and Sudaprasert, K., 2014, *Agricultural Sci. J.*, 45(2) (Suppl.), 577–580.
10. Natarajan Girish, Subramania Pillai Niju, Khadhar Mohamed Meera Sheriffa Begum and Narayanan Anantharaman. *Utilization of a cost effective solid catalyst derived from natural white bivalve clam shell for transesterification of waste frying oil.*
11. Khan AI., 2013, *Fast analysis of FAMES using conventional GC instrumentation*, Thermo Fish Sci.
12. Wei, T., Wei, W., Wang, M., Yuhan, S. and Zhong, B., 2002, *Fuel Chem Div Prep*, 47(1), 88–89.
13. Lukic, I., Krstic, J., Glisic, S., Jovanovic, D. and Skala, D., 2010, *J. Serb. Chem. Soc.*, 75(6), 789–801.
14. Guang, W., Zifeng, Y., Marianne, S., Peng, Z. and Ben, W., 2010, *Fuel*, 89, 2163–2165.
15. Liu, Y., Liu, T., Wang, X., Xu, L. and Yan, Y., 2011, *Energy Fuels*, 25, 1206–1212.
16. Boyang W, Shufen L, Songjian T, Rihua F and Yonglu M., 2013, *Fuel*, 104, 698–703.
17. Bkour Q, Faqir N, Shawabkeh R, Ul-Hamid A and Bart HJ., 2016, *J. Environ. Chem. Eng.*, 4, 973–983.
18. Department of Energy Business, Ministry of Energy, Biodiesel fuel quality standard, www.doeb.go.th/dtanotice/cancel-diesel25-01-56.pdf (Retrieved December 2016).
19. Department of Energy Business, Ministry of Energy, Biodiesel fuel quality standard, www.doeb.go.th/dtanotice/cancel-diesel25-01-56.pdf (Retrieved December 2016).
20. Yamane, K., Ueta, A. and Shimamoto Y., 2001, *Influence of physical and chemical Properties of biodiesel fuels on injection, combustion, and exhaust emission characteristics in a direct injection compression ignition engine.* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Engine research, 2(4), 249–261.
21. Alptekin, E., Canakci, M. and Sanli, H., 2014, *Waste Management*, 34, 2146–2154.
22. Lapuerta, M., Armas, O. and Herreros, M., 2008, *Progress in Energy and Combustion Science*, 34, 198–223.
23. Encinar, J.M., González, J.F., Pardo, A. and Martínez, G., 2010, *Fuel Processing Technology*, 91, 1530–1536.

ประวัติผู้วิจัย

- ชื่อ-สกุล** นางสาวพัชยาภรณ์ สิงห์รัญ
- เกิดเมื่อ** 7 กันยายน 2536
- ประวัติการศึกษา** พ.ศ. 2559 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
- ทุนวิจัยสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน ประจำปีงบประมาณ 2558 เรื่อง การศึกษาเปรียบเทียบการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยการใส่เถ้าจากกากปาล์มและเถ้าการวิจัยจากกากมะพร้าวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
 - ทุนสนับสนุนงานวิจัย วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ภายใต้ ประจำปีงบประมาณ 2559 โครงการการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา”
 - ทุนสนับสนุนวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปีงบประมาณ 2558 ภายใต้โครงการการพัฒนาพลังงานทดแทนและการประยุกต์ใช้ชุมชนสีเขียว เรื่อง โครงการวิจัยชุมชนต้นแบบเลี้ยงปลาอัจฉริยะสีเขียวเพื่อลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล กรณีศึกษาชุมชนบ้านทุ่งยาว อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่