การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว
โดยใช้เปลือกหอยขมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ศศิประภา แก้วแดง

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2560

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว
โดยใช้เปลือกหอยขมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ศศิประภา แก้วแดง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว
โดยใช้เปลือกหอยขมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ศศิประภา แก้วแดง

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย **อาจารย์ที่ปรึกษา**

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ....
(อาจารย์ ดร.รจพรรณ นิรัญศิลป์)
วันที่..............เดือน...........................พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ....
(อาจารย์ ดร.จุฑาภรณ์ ชนะถาวร)
วันที่..............เดือน............................พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัครินทร์ อินทนิเวศน์)
วันที่..............เดือน............................พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชดาภรณ์ ปันทะรส)
วันที่..............เดือน............................พ.ศ. ....

ประธานอาจารย์ประจำหลักสูตร ....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สราวุธ พลวงษ์ศรี)
วันที่..............เดือน............................พ.ศ. ....

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว ....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ เม่งอำพัน)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
วันที่..............เดือน............................พ.ศ. ....

ชื่อเรื่อง	การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้เปลือกหอยขมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
ชื่อผู้เขียน	นางสาวศศิประภา แก้วแดง
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.รจพรรณ นิรัญศิลป์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยใช้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกหอยขมเผาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการเผาเปลือกหอยขมที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทำการศึกษาลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอ็กซ์ (XRF) เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) และเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จากนั้นศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน (6:1, 9:1 และ 12:1) ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา (1, 2 และ 3%wt) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (1, 2 และ 3 ชั่วโมง) โดยกำหนดอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 °C และความเร็วรอบในการกวน 300 rpm โดยมีการวิเคราะห์คุณสมบัติไบโอดีเซลเบื้องต้น อาทิ ค่าความหนาแน่น ค่าความเป็นกรด ค่า pH จุดวาบไฟ ค่าความร้อน ปริมาณเมทิลเอสเตอร์ และค่าความหนืด ทั้งนี้ได้มีการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำ จากผลการศึกษาพบว่าเปลือกหอยขมเผาเกิดการสลายตัวเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น โดยจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C จะมีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) 50.50% 70.11% และ 73.88% ตามลำดับ และจากผลการศึกษาการทำปฏิกิริยาที่เงื่อนไขของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1 จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยขมเผาที่อุณหภูมิ 800 °C ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3%wt เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง มีปริมาณเมทิลเอสเตอร์สูงสุดที่ 98.19% และมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลสูงถึง 92.50% จากการทำปฏิกิริยาที่เงื่อนไขดังกล่าวสามารถทำให้ผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้มีค่าคุณสมบัติต่างๆ เป็นไปตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน คือ มีค่าความหนาแน่น 880 kg/m^3, ค่าความเป็นกรด 0.44 mg KOH/g,ค่า pH 9.6, จุดวาบไฟ 162 °C, ค่าความร้อน 44,656 kJ/kg ในส่วนของค่าความหนืด พบว่ามีค่า 6.42 cSt จึงกล่าวได้ว่าเปลือกหอยขมเป็นแหล่งของแคลเซียมออกไซด์ที่สามารถหาได้จากวัสดุเหลือทิ้งทางธรรมชาติที่สามารถพัฒนาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซลในเชิงพาณิชย์ได้ในอนาคต

คำสำคัญ: ไบโอดีเซล ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน เปลือกหอยขม แคลเซียมออกไซด์

มหาวิทยาลัยแม่โจ้
MAEJO UNIVERSITY
แม่โจ้ ๘๔

Title	BIODIESEL PRODUCTION FROM WASTE COOKING OIL USING RIVER SNAIL SHELL AS CATALYST
Author	Miss Sasiprapha Kaewdang
Degree	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
Advisor Committee Chairperson	Dr. Rotjapun Nirunsin

ABSTRACT

In this research of production biodiesel from waste cooking oil via transesterification process was studied. Calcium oxide (CaO) prepared from river snail shell ash was used as catalyst. The river snail shell was calcined at 700, 800 and 900 °C for 4 hrs. The samples were characterized by X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) techniques. After which, the factors affecting to transesterification of biodiesel production were studied at a molar ratio of methanol:oil (6:1, 9:1 and 12:1) with the amount of catalyst (1%wt, 2%wt and 3%wt), at a reaction time (1 hr, 2 hrs and 3 hrs) and with a reaction temperature of 60 °C and stirring at 300 rpm. The biodiesel properties such as density, acid value, pH, flash point, heat of combustion, methyl ester and viscosity were determined. Finally the catalysts reusability was examined. The study indicated that after calcination at high temperatures river snail shell was converted to calcium oxide (CaO). When calcination temperatures were 700, 800 and 900 °C, calcium oxide (CaO) quantities were 50.50% 70.11% and 73.88%, respectively. The best condition for biodiesel production was a reaction that uses methanol:oil molar ratio of 9:1, calcination temperature of calcined river snail shell at 800 °C, catalyst amount of 3%wt and reaction time for 1 hr. This reaction could produce 98.19% of methyl ester and 92.50% of biodiesel. Biodiesel product from reaction approved the standards as per the department of energy business. The density, acid value, pH, flash point and heat of combustion were found to be 880 kg/m^3, 0.44 mg KOH/g, 9.6, 162 °C and 44,656 kJ/kg

respectively. Viscosity value of biodiesel was 6.42 cSt. This research revealed that river snail shell, provided from natural waste material, could be used as a source of calcium oxide catalyst. Therefore, it could be a promising catalyst for commercial-scale biodiesel production in the future.

Keywords: Biodiesel, Transesterification, River snail shell, Calcium oxide.

มหาวิทยาลัยแม่โจ้
MAEJO UNIVERSITY
แม่โจ้ ๘๔ ปี

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับการสนับสนุน และได้รับความร่วมมือเป็นอย่างดีจากบุคคลหลายๆ ท่านดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. รจพรรณ นิรัญศิลป์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก พร้อมกับอาจารย์ ดร. จุฑาภรณ์ ชนะถาวร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อัครินทร์ อินทนิเวศน์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชดาภรณ์ ปันทะรส อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่กรุณาให้คำปรึกษา คำชี้แนะแนวการแก้ปัญหาและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา อีกทั้งยังช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. หทัยทิพย์ สินธุยา ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่ามาเป็นประธานกรรมการสอบ พร้อมทั้งให้ปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนการตรวจเล่มวิทยานิพนธ์ ทำให้เกิดความสำเร็จลุล่วงเป็นได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ สถาบันบริการตรวจสอบคุณภาพและมาตรฐานผลิตภัณฑ์ และศูนย์วิจัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่คอยเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดสอบคุณสมบัติด้านต่างๆ

ขอขอบพระคุณเงินทุนสนับสนุนงานวิจัย วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ภายใต้ “โครงการการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา”

ขอขอบพระคุณเงินทุนสนับสนุนงานวิจัย จากสำนักนโยบายและแผนพลังงานกระทรวงพลังงาน ภายใต้ “โครงการสนับสนุนทุนวิจัยแก่นักศึกษาระดับอุดมศึกษา ปีงบประมาณ 2560”

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดาที่ให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคน ที่มีส่วนช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้การทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ศศิประภา แก้วแดง

กันยายน 2560

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ค
ABSTRACT	จ
กิตติกรรมประกาศ	ช
สารบัญ	ซ
สารบัญตาราง	ฏ
สารบัญภาพ	ฑ
สารบัญภาคผนวก	ณ
สารบัญตารางผนวก	ด
บทที่ 1 บทนำ	1
ที่มาและความสำคัญ	1
วัตถุประสงค์	5
ขอบเขตของการวิจัย	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	6
นิยามและความหมายของไบโอดีเซล	6
กระบวนการผลิตไบโอดีเซล	7
1. การใช้โดยตรงและการผสม	7
2. ไมโครอิมัลชัน	7
3. การสลายด้วยความร้อน	7
4. การทำปฏิกิริยากับเมทานอลในสภาวะเหนือวิกฤติ	8
5. ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน	8
6. ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน	9

หน้า

ตัวเร่งปฏิกิริยา....9
1. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอนไซม์....10
2. ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์....10
3. ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์....11
4. แอลกอฮอล์ที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล....14
ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน....15
1. ปริมาณน้ำและกรดไขมันอิสระ....15
2. ชนิดและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา....15
3. เวลาและอุณหภูมิ....16
4. อัตราการกวนผสม....16
5. ผลของอัตราส่วนแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน....16
คุณภาพและมาตรฐานไบโอดีเซล....17
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง....21
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง....28
การเตรียมอุปกรณ์ และสารเคมี....28
1. วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา....28
2. อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล....30
3. อุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซล....32
การเตรียมและการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา....33
1. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา....34
2. การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา....34
ศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันพืชใช้แล้ว....35
1. ทำการวิเคราะห์หาค่ากรดไขมันอิสระ (FFA)....35

หน้า

2. ทำการวิเคราะห์ความหนาแน่นของน้ำมัน 36
3. ทำการวิเคราะห์ค่าความหนืด 37
การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน 37
การวิเคราะห์คุณสมบัติไบโอดีเซล 39
1. การคำนวณปริมาณผลผลิตของน้ำมันไบโอดีเซล 39
2. การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด 39
3. การวิเคราะห์ความหนาแน่นของน้ำมัน 40
4. การวิเคราะห์ค่า pH 41
5. การวิเคราะห์จุดวาบไฟ 41
6. การวิเคราะห์ค่าความร้อน 42
7. การวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 42
8. การวิเคราะห์ค่าความหนืด 43
การนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำ 43
บทที่ 4 ผลและการอภิปรายผลการทดลอง 46
ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา 46
1. ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ 46
2. ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี 47
การศึกษาคุณสมบัติเคมีและทางกายภาพของน้ำมันพืชใช้แล้ว 51
การศึกษาปริมาณผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้เปลือกหอยขมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา 51
1. ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน และอุณหภูมิการเผาเปลือกหอยขมที่มีต่อผลผลิตไบโอดีเซล 52
2. ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิการเผาเปลือกหอยขมที่มีต่อผลผลิตไบโอดีเซล 54

หน้า

3. ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา และอุณหภูมิการเผาเปลือกหอยขมที่มีต่อผลผลิตไบโอดีเซล 57
4. ผลการศึกษาอุณหภูมิการเผาของตัวเร่งปฏิกิริยา 60
ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติไบโอดีเซล 62
1. ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของน้ำมันไบโอดีเซล 63
2. ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของน้ำมันไบโอดีเซล 65
3. ผลการวิเคราะห์ค่า pH ของน้ำมันไบโอดีเซล 67
4. ผลการวิเคราะห์จุดวาบไฟของน้ำมันไบโอดีเซล 69
5. ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อน 74
6. ผลการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 74
7. ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืด 74
ผลการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำ 75
ผลการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ของกระบวนการ 77
1. การวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตทางด้านไฟฟ้า 78
2. การวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตทางด้านวัตถุดิบ 80
3. การวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตทั้งหมด 80
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ 83
สรุปผลงานวิจัย 83
ข้อเสนอแนะ 84
บรรณานุกรม 85
ประวัติผู้วิจัย 129

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1 สรุปข้อกำหนดคุณสมบัติของไบโอดีเซลและวิธีการตรวจสอบ 17

2 เปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ของน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซลตามมาตรฐาน ASTM 19

3 ลักษณะทางกายภาพของเถ้าเปลือกหอยขมที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง 47

4 แสดงปริมาณธาตุจากการเถ้าของเปลือกหอยขมที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 4 h 48

5 ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากการศึกษาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1, 9:1 และ 12:1 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยขมเผาด้วยอุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2%wt มีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง 52

6 ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ 1%wt, 2%wt และ 3%wt โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยขมเผา 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันคือ 9:1 55

7 ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากการศึกษาระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 1, 2 และ 3 ชั่วโมง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยขมเผา 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ 2%wt ณ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันคือ 9:1 58

8 สรุปสภาวะเบื้องต้นที่เหมาะสม เมื่อพิจารณาจากปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วกับเมทานอล โดยใช้เถ้าจากเปลือกหอยขมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา 62

9 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่น ของน้ำมันไบโอดีเซลที่การทดลองอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1, 9:1 และ 12:1 63

10 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของน้ำมันไบโอดีเซลที่การทดลองอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1, 9:1 และ 12:1 65

11 ผลการวิเคราะห์ค่า pH ของน้ำมันไบโอดีเซลที่การทดลองอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1, 9:1 และ 12:1 67

12 ผลการวิเคราะห์จุดวาบไฟของน้ำมันไบโอดีเซลที่การทดลองอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1, 9:1 และ 12:1 70

13 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อน ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ และค่าความหนืด 72

14 ผลคุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำ 76

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การใช้พลังงานแต่ละประเภทของประเทศไทยในปี 2558	1
2	ปริมาณความต้องการใช้น้ำมันของโลก	2
3	แนวโน้มการใช้พลังงานทดแทนในอนาคต	3
4	เปลือกหอยขม	12
5	เตาเผาสารในสภาวะก๊าซไหล	13
6	เตาเผาสารในอากาศนิ่งปกติ	13
7	วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา	29
8	วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล	30
9	อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล	31
10	อุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติโอดีเซล	33
11	การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกหอยขม	34
12	ทำการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ (FFA)	36
13	ทำการวัดความหนาแน่นของน้ำมันพืชใช้แล้ว	36
14	ทำการวิเคราะห์ค่าความหนืด	37
15	การผลิตไบโอดีเซล	38
16	การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด	40
17	การวิเคราะห์ค่า pH	41
18	การวิเคราะห์จุดวาบไฟ	41
19	แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้เปลือกหอยขมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	45
20	ลักษณะของเถ้าเปลือกหอยขมเผาที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ (ก.) 700, (ข.) 800 และ (ค.) 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	46

21 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ภายในเถ้าเปลือกหอยขมที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ (ก.) 700, (ข.) 800 และ (ค.) 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง 49

22 ลักษณะพื้นผิวของเถ้าเปลือกหอยขมที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ (ก.) 700, (ข.) 800 และ (ค.) 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง 50

23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้จากน้ำมันพืชใช้แล้วกับเมทานอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยขมเผาที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากการเติมปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2%wt ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง โดยทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1, 9:1 และ 12:1 53

24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้จากน้ำมันพืชใช้แล้วกับเมทานอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยขมเผาที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากการเติมปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt, 2%wt และ 3%wt ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง โดยทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1 56

25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้จากน้ำมันพืชใช้แล้วกับเมทานอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยขมเผาที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากการเติมปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2%wt ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมง โดยทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1 59

26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตไบโอดีเซลกับอุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง 61

สารบัญภาคผนวก

ภาคผนวก	หน้า
ภาคผนวก ก การคำนวณหาปริมาณเมทานอลที่ต้องการใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน	92
ภาคผนวก ข แสดงปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลอง	94
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเทคนิค XRF	97
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเทคนิค XRD	100
ภาคผนวก จ ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเทคนิค SEM	106
ภาคผนวก ฉ บทความที่ได้เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ	109

สารบัญตารางผนวก

ตารางภาคผนวกที่ หน้า

1 แสดงปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองตามอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 9:1 และ 12:1 95

MAEJO UNIVERSITY

บทที่ 1
บทนำ

ที่มาและความสำคัญ

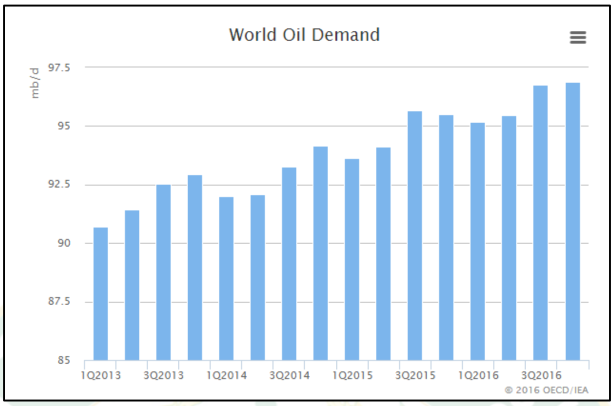
ในปัจจุบันพลังงานนับเป็นปัจจัยสำคัญในการดำเนินชีวิตของมนุษย์ และยังเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญในการพัฒนาประเทศ พลังงานที่ใช้ในโลกส่วนมากมาจากพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิล (น้ำมัน ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ) หรือน้ำมันสำเร็จรูปเป็นพลังงานที่ได้รับความสนใจมากที่สุด (ธรรมศักดิ์ และคณะ, 2553) 49.4% ของการใช้พลังงานทั้งหมด รองลงมาประกอบด้วยพลังงานไฟฟ้า 16.5% พลังงานหมุนเวียนดั้งเดิม 11.9% พลังงานหมุนเวียนก๊าซธรรมชาติ 8.3% และถ่านหิน/ลิกไนต์ 7.5% และ 6.4% ตามลำดับ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน, 2558ข) ดังแสดงในภาพที่ 1

ภาพที่ 1 การใช้พลังงานแต่ละประเภทของประเทศไทยในปี 2558

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน (2558ข)

สำหรับประเทศไทยแหล่งพลังงานหลักที่ใช้คือ น้ำมันทั้งใช้เพื่อการผลิตไฟฟ้า ในภาคเกษตรกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคอุตสาหกรรมและการคมนาคมขนส่ง (ธรรมศักดิ์ และคณะ, 2553) แต่ในสถานการณ์ปัจจุบันราคาน้ำมันมีความผันผวนอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากปริมาณน้ำมันสำรองของโลกที่เหลือน้อยลง ซึ่งสวนทางกับการเพิ่มขึ้นของประชากร และการเติบโตอย่างรวดเร็วของอุตสาหกรรมต่างๆ ส่งผลให้ปริมาณความต้องการใช้น้ำมันปิโตรเลียมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (ศูนย์สารสนเทศข้อมูลพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557) ดังแสดงในภาพที่ 2 (International

gfEnergy Agency, 2016) ประเทศไทยเป็นประเทศที่ยังต้องพึ่งพาการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศในแต่ละปีเป็นจำนวนมาก จึงได้รับผลกระทบเหล่านี้โดยตรงอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ (ธรรมศักดิ์ และคณะ, 2553)

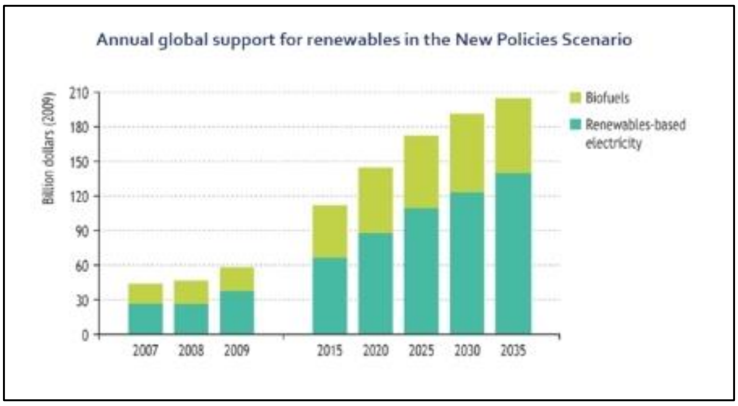


ภาพที่ 2 ปริมาณความต้องการใช้น้ำมันของโลก

ที่มา : International Energy Agency (2016)

โดยที่ผ่านมาในหลายภาคส่วนมีความพยายามศึกษา ค้นคว้า วิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนในรูปแบบต่าง ๆ ให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้สะดวก และมีประสิทธิภาพมากขึ้น เพื่อช่วยประหยัดพลังงาน และช่วยลดค่าใช้จ่าย (ศูนย์สารสนเทศข้อมูลพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557) โดยตั้งอยู่บนพื้นฐานของการพึ่งพาพลังงานจากแหล่งในท้องถิ่น และภายในประเทศ สามารถผลิตและใช้พลังงานอย่างยั่งยืน และพยายามหาแหล่งพลังงานทดแทนที่สามารถตอบสนองต่อความต้องการของประชากรมากยิ่งขึ้น หรือที่เรียกว่า พลังงานหมุนเวียน อาทิ พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานขยะ เป็นต้น ซึ่งแหล่งพลังงานเหล่านี้สามารถทดแทนพลังงานหลักที่มาจากแหล่งฟอสซิลได้ (สุรศิษฏ์, 2556)

ปัจจุบันทั้งภาครัฐและเอกชนมีการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนอย่างแพร่หลาย อีกทั้งยังส่งเสริมให้ประชาชนมีส่วนร่วมในการอบรมโครงการพลังงานทดแทนด้านต่างๆ จึงเกิดความเข้าใจเรื่องพลังงานในสถานการณ์ปัจจุบันไปในทิศทางเดียวกัน (สำนักบริการคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2551) ในอนาคตการใช้พลังงานทดแทนจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี ในขณะเดียวกันการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงจากธรรมชาติจะลดลงด้วยเช่นกัน (RENEWABLE ENERGY WORLD, 2011) ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แนวโน้มการใช้พลังงานทดแทนในอนาคต

ที่มา : RENEWABLE ENERGY WORLD (2011)

พลังงานรูปแบบหนึ่งที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในการทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงและก๊าซธรรมชาติคือ ไบโอดีเซล (อัจฉรา และคณะ, 2557) เนื่องจากวัตถุดิบในการผลิตสามารถหาได้ง่าย ได้แก่ น้ำมันจากพืชหรือสัตว์ โดยวัตถุดิบอีกประเภทหนึ่งที่ได้รับความสนใจในการนำมาใช้ในกระบวนการผลิต คือน้ำมันพืชใช้แล้ว เนื่องจากน้ำมันพืชใช้แล้วมีกรดไขมันอิสระที่สามารถนำมาผลิตเป็นไบโอดีเซลได้ ประกอบกับน้ำมันพืชใช้แล้วมีสารพิษประเภทอนุมูลอิสระและไดออกซิน หากนำกลับมาใช้ซ้ำจะส่งผลกระทบโดยตรงต่อสุขภาพ (รุ่งทิพย์, 2557) ดังนั้นการนำน้ำมันพืชใช้แล้วกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในด้านพลังงานทดแทนจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง

โดยในคำนิยามของไบโอดีเซล (Biodiesel) คือ เชื้อเพลิงที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางเคมี ได้แก่ กระบวนการผลิตโดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) และการผลิตไบโอดีเซลแบบ 2 ขั้นตอน เกิดเป็นสารที่เรียกว่า เมทิลเอสเทอร์ หรือเอทิลเอสเทอร์ ขึ้นกับชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (อัจฉรา และคณะ, 2557) โดยใช้กรด เบส หรือเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้คือกลีเซอรอล (Glycerol) น้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จะมีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลที่กลั่นจากปิโตรเลียม สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลในรูปแบบของไบโอดีเซลเกือบทั้งหมด (รุ่งทิพย์, 2557)

การผลิตไบโอดีเซลโดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจะนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ประเภทที่ 1 คือตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์ (Homogeneous Catalyst) ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้จะละลายเป็นเนื้อเดียวกับสารตั้งต้น นิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางสารเคมี เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ตัวเร่งปฏิกิริยา

เหล่านี้จะให้ผลผลิตไบโอดีเซลที่ค่อนข้างสูง แต่เนื่องจากการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาหลังสิ้นสุดกระบวนการผลิตต้องใช้น้ำในปริมาณมากเพื่อทำการล้างผลิตภัณฑ์จึงทำให้เกิดสบู่และได้ผลิตภัณฑ์ลดลง (ภาคภูมิ และคณะ, 2555) เพื่อการแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงมีการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทที่ 2 คือตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous Catalyst) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับสารตั้งต้น นิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากวัสดุทางธรรมชาติ เช่น แคลเซียมออกไซด์ (CaO) หลังสิ้นสุดกระบวนการผลิตสามารถแยกได้ง่าย และสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อีกในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการล้างจึงลดปัญหาการเกิดสบู่ ช่วยประหยัดค่าใช้จ่าย ไม่ก่อให้เกิดน้ำเสีย ไม่เกิดการกัดกร่อน เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (ภาคภูมิ และคณะ , 2555) ซึ่งมีคุณสมบัติความเป็นเบส ทำให้มีความสามารถในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลเทียบเท่ากับตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์ จึงมีการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ไปในหลายรูปแบบเพื่อเพิ่มความสามารถในการสังเคราะห์ไบโอดีเซล (อัจฉรา และคณะ, 2557)

โดยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ประเภทหนึ่งที่ได้รับความสนใจในการทำมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากสามารถเร่งปฏิกิริยาได้สูง ราคาถูก ไม่กัดกร่อน ละลายในเมทานอลต่ำ คุ้มค่าในเชิงการค้า (ชวัสรัฏฐ์ และคณะ, 2558) โดยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการสังเคราะห์ CaO จากวัสดุเหลือทิ้งทางธรรมชาติ อาทิ เปลือกหอย และเปลือกไข่ เปลือกปู (ณัฐชยา และคณะ, 2555) เป็นต้น มาใช้เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล พบว่าสามารถให้ผลผลิตไบโอดีเซลได้สูงเทียบเท่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทอื่นๆ อีกทั้งยังเป็นวิธีการหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางธรรมชาติ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ คือ CaO จากเปลือกหอยขมในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจากน้ำมันพืชใช้แล้ว เนื่องจากน้ำมันพืชใช้แล้วมีปริมาณมากและสามารถหาได้ง่ายในบ้านเรือนหรือชุมชน จึงเหมาะแก่การนำมาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือการศึกษาและทำการวิจัยการผลิตไบโอดีเซลเพื่อนำไปสู่การใช้งานจริง เป็นการช่วยลดการใช้พลังงานในยามขาดแคลนและเป็นการส่งเสริมพลังงานทดแทนที่ช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน
2. เพื่อศึกษาการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากวัสดุเหลือทิ้งทางธรรมชาติ
3. เพื่อศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยการใช้แคลเซียมออกไซด์ CaO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
4. เพื่อศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจากน้ำมันพืชใช้แล้ว
2. ศึกษาการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์ CaO จากเปลือกหอยขม เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล
3. ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์แบบเบส
4. ศึกษาการวิเคราะห์คุณสมบัติไบโอดีเซลเทียบกับค่ามาตรฐานระดับชุมชน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำวัสดุเหลือทิ้งจากครัวเรือนมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด และช่วยลดค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคมี ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล
2. สามารถลดขั้นตอนการล้างน้ำในกระบวนการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากไบโอดีเซล
3. สามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซลกลับมาใช้ซ้ำได้
4. สามารถนำไปใช้ได้จริงในชุมชน เพื่อช่วยลดมลพิษที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกายและสิ่งแวดล้อม จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

บทที่ 2
หลักการและทฤษฎี

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเหลือทิ้ง โดยใช้ CaO จากเปลือกหอยขมเผาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องประกอบไปด้วย นิยามและความหมายของไบโอดีเซล กระบวนการผลิตไบโอดีเซล ตัวเร่งปฏิกิริยา ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน คุณภาพและมาตรฐานไบโอดีเซล โดยสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

นิยามและความหมายของไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล (Biodiesel) เป็นพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงดีเซลชนิดหนึ่งที่ได้จากน้ำมันพืช ไขมันสัตว์หรือน้ำมันปรุงอาหารที่ใช้แล้ว นำมาผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่ากระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) โดยทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอลหรือเอทานอล และมีกรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างของน้ำมันจากไตรกลีเซอไรด์ให้เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมัน (Ester) และได้กลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้ ดังแสดงในสมการที่ 1 ไบโอดีเซลที่ได้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล สามารถใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลได้โดยตรง (จักรพงศ์, 2555) การเรียกชนิดของไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์นั้นจะเรียกตามชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ไบโอดีเซล คืออะไร, [ม.ป.ป.])

$$
\begin{array}{lcl}
\begin{array}{l} R_1COOCH_2 \\ \quad | \\ R_2COOCH \\ \quad | \\ R_3COOCH_2 \end{array}
+ 3\,CH_3OH
& \xrightleftharpoons{\text{Catayst}} &
\begin{array}{l} HOCH_2 \\ \quad | \\ HOCH \\ \quad | \\ HOCH_2 \end{array}
+
\begin{array}{l} R_1COOCH_3 \\ \\ R_2COOCH_3 \\ \\ R_3COOCH_3 \end{array}
\end{array}
\qquad \text{สมการที่ 1}
$$

ไตรกลีเซอไรด์ เมทานอล กลีเซอรอล เมทิลเอสเทอร์

กระบวนการผลิตไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลสามารถผลิตได้หลายวิธี ขึ้นอยู่กับคุณภาพของวัตถุดิบที่ใช้และของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิต ดังนี้

1. การใช้โดยตรงและการผสม

การใช้โดยตรงคือ การนำจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์มาใช้เป็นน้ำมันไบโอดีเซลโดยตรง เช่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม น้ำมันหมู เป็นต้น ใส่ลงในเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่มีการผสมสารเคมีอื่น หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำมัน (อาภาณี, 2549) พบว่าน้ำมันพืชจะมีความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซลและอาจทำให้หัวฉีดน้ำมันในเครื่องยนต์เกิดเป็นฝอยได้ยาก ส่งผลให้เกิดการสันดาปไม่สมบูรณ์ การใช้น้ำมันพืชโดยตรงจึงก่อให้เกิดความยุ่งยากและเครื่องยนต์อาจเกิดปัญหาได้ (มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, [ม.ป.ป.])

สำหรับการผสมคือ การนำน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์มาผสม กับน้ำมันก๊าดหรือน้ำมันดีเซล เพื่อให้ไบโอดีเซลมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลให้มากที่สุด และเป็นการลดความหนืดที่เกิดขึ้นจากการใช้ไบโอดีเซลโดยตรง (เคยูไบโอดีเซล, 2555)

2. ไมโครอิมัลชัน

วิธีการไมโครอิมัลชัน คือ การผสมสาร 2 ชนิดที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันให้สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้โดยใช้สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) เป็นตัวประสาน ทำให้ อนุภาคแขวนลอยที่ได้มีขนาดเล็กมาก อยู่ในช่วง 1-150 nm จนมองด้วยตาเปล่าเป็นสารเนื้อเดียวกันลักษณะใส วิธีนี้สามารถช่วยลดค่าความหนืดในน้ำมันพืชได้ โดยใช้ร่วมกับตัวทำละลาย เช่น เมทานอล เอทานอล และ 1-บิวทานอล การผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีนี้เป็นกรรมวิธีการผลิตที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และไม่ต้องสูญเสียพลังงานในการผลิต เพียงแต่ต้องหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารแต่ละชนิด ไมโครอิมัลชั่นที่ได้จะเป็นน้ำมันที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล แต่มีการสะสมตัวของคราบเกาะรอบๆ หัวฉีดและวาล์วของเครื่องยนต์ (พัทธนันท์, 2554)

3. การสลายด้วยความร้อน

การสลายด้วยความร้อน หรือที่เรียกว่า Pyrolysis Process เป็นกระบวนการใช้ความร้อนหรือใช้ความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อเปลี่ยนสารประกอบหนึ่งชนิดไปเป็นสารประกอบอื่นๆ มากกว่าหนึ่งชนิด ทำให้น้ำมันมีขนาดโมเลกุลเล็กลง นิยมใช้อุณหภูมิประมาณ 450 - 600 °C และมีการจำกัดปริมาณอากาศหรือออกซิเจนที่ใช้ในกระบวนการ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์

กลไกของกระบวนการแตกสลายทางความร้อน วัตถุดิบที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการ นี้ได้แก่ น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ กรดไขมันธรรมชาติ (Natural Fatty Acid) และเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (พัทธนันท์, 2554)

4. การทำปฏิกิริยากับเมทานอลในสภาวะเหนือวิกฤติ

เป็นกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยนำน้ำมันวัตถุดิบมาทำปฏิกิริยากับเมทานอลในสภาวะเหนือวิกฤต ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อย เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมจึงไม่มีของเสียจากกระบวนการ แต่จะต้องใช้อุณหภูมิและความดันในระดับที่ค่อนข้างสูงประมาณ 512.2 K และ 8.1 mPa ตามลำดับ เพื่อต้องทำให้เมทานอลอยู่ในสภาวะเหนือวิกฤต และวิธีการนี้ยังสามารถแก้ปัญหาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่มีค่าความเป็นกรดและปริมาณน้ำที่สูงได้ (พัทธนันท์, 2554)

5. ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน

ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน คือ ปฏิกิริยาการเปลี่ยนกรดไขมันอิสระให้เป็นไตรกลีเซอไรด์ ทำให้มีกรดไขมันอิสระไม่เกิน 1% โดยใช้การทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกรด โดยทั่วไปนิยมใช้กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน, 2552ข) ในสภาวะอุณหภูมิ 65-70 ℃ ใช้เวลาทำปฏิกิริยานาน 1-2 ชั่วโมง (ศูนย์บริการวิชาการที่ 3, 2553)

การผสมตัวเร่งปฏิกิริยาคือ กรด H_2SO_4 ควรผสมกับเมทานอลก่อน ถ้าใช้กรดประเภทของเหลวต้องผสมให้เข้ากันก่อน แต่ถ้ากรดเป็นประเภทของแข็ง (เม็ดหรือเกล็ด) ทำการกวนผสมให้ละลาย ปริมาณกรด H_2SO_4 ที่ใช้เทียบกับปริมาณเมทานอล อยู่ในช่วงไม่เกิน 5%wt ของน้ำมัน (ตามทฤษฎี) โดยผลการทดลองหลายงานวิจัยแนะนำให้ใช้กรด H_2SO_4 ประมาณ 1.8%wt ของน้ำมัน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน, 2552ข)

ในการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันจะใช้กรด H_2SO_4 ผลผลิตที่ได้อย่างหนึ่งของกระบวนการนี้คือน้ำ ซึ่งจะแยกชั้นออกจากสารเอสเทอร์ ถ้าน้ำไม่แยกชั้นออกไปจากสารเอสเทอร์ จะไม่สามารถทำ ทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในขั้นตอนต่อไปได้เนื่องจากอาจเกิดสบู่ หลังจากการทำปฏิกิริยานาน 1-2 ชั่วโมง จะเป็นขั้นตอนการแยกชั้นให้ส่วนผสมน้ำกับเมทานอลแยกชั้นออกจากน้ำมัน ดังแสดงในสมการที่ 2 (วิชาการ.คอม, 2553ก) เมื่อสิ้นสุดกระบวนการเอสเทอริฟิเคชันจะใช้เวลาแยกชั้นประมาณ 2 ชั่วโมง หรือนานกว่านั้น ในขั้นตอนนี้น้ำและเมทานอลจะรวมตัวกัน หลังจากทำการแยกน้ำมันออกแล้วสามารถกลั่นแยกเมทานอลออกจากน้ำเพื่อนำไปกลับมาใช้ใหม่ได้ (เคยูไบโอดีเซล, 2555)

$$R'-\overset{\overset{O}{\|}}{C}-OH + H-O-R \xrightleftharpoons{H^+} R'-\overset{\overset{O}{\|}}{C}-OR + H-O-H \qquad \text{สมการที่ 2}$$

กรดคาร์บอกซิลิก แอลกอฮอล์ เอสเทอร์ น้ำ

6. ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน คือ ปฏิกิริยาแตกพันธะของเอสเทอร์ (-OR) หรือไตรกลีเซอไรด์ ด้วยแอลกอฮอล์ (เมทานอล) โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเมทิลเอสเทอร์ (เมทานอล + กรดไขมัน) และกรีเซอรอลหรือที่เรียกว่ากลีเซอรีน ในทางทฤษฎีการเกิดปฏิกิริยาโดยสมบูรณ์จะต้องใช้อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์กับน้ำมันเป็น 3:1 (ธรรมศักดิ์ และคณะ, 2553)

ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้ง่ายกว่าปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันและใช้เวลาน้อยกว่า แต่มีข้อจำกัดคือ ค่ากรดไขมันอิสระ (FFA) ที่ได้ไม่ควรเกิน 3% (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2552ข)

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันประกอบด้วยปฏิกิริยาย่อยแบบผันกลับได้ 3 ขั้นตอนย่อย ดังแสดงในสมการที่ 3 โดยเริ่มจากไตรกลีเซอไรด์จะเปลี่ยนเป็นไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ตามลำดับ สุดท้ายจะได้กลีเซอรอลและเอสเทอร์ โดยแต่ละในปฏิกิริยาย่อยจะได้เอสเทอร์ 1 mol (พัทธนันท์, 2554)

$$\begin{aligned}
&\text{Triglyceride (TG)} + R'OH \xrightleftharpoons{\text{Catalyst}} \text{Diglyceride (DG)} + R'COOR_1 \\
&\text{Diglyceride (DG)} + R'OH \xrightleftharpoons{\text{Catalyst}} \text{Monoglyceride (MG)} + R'COOR_2 \qquad \text{สมการที่ 3} \\
&\text{Monoglyceride (MG)} + R'OH \xrightleftharpoons{\text{Catalyst}} \text{Glycerol} + R'COOR_3
\end{aligned}$$

ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ สารที่เพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้น หลังจากปฏิกิริยาสิ้นสุดลงจะเปลี่ยนกลับมาอยู่ในรูปเดิม (สุรศิษฏ์, 2556) การที่ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยลดพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาให้ต่ำลง จึงทำให้มีโมเลกุลที่มีพลังงานสูงกว่าหรือเท่ากับพลังงานก่อกัมมันต์จำนวนมากขึ้น ปฏิกิริยาเคมีจึงเกิดเร็วขึ้น แต่จะไม่ทำให้พลังงานของปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงไป (โรงเรียนนาหนังพัฒนศึกษา, 2548) การทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยามักจะเกิดขึ้นโดยการเกิดพันธะเคมีกับสารตั้งต้นอย่างน้อยหนึ่งชนิด

ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจะมีตัวเร่งปฏิกิริยา และแอลกอฮอล์ที่เป็นตัวช่วยทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีดำเนินการเสร็จสมบูรณ์ และได้ผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลเร็วยิ่งขึ้น โดยรายละเอียดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมี 4 ประเภท ดังต่อไปนี้

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอนไซม์

ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอนไซม์ที่นิยมใช้ ได้แก่ เอนไซม์ไลเปส (Lipase) สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันและเอสเทอริฟิเคชัน (อัจฉรา อิ่มคำ พุฒคำ และคณะ, 2557) ตัวเร่งชนิดนี้สามารถตรึงบนตัวรองรับได้ จึงแยกผลิตภัณฑ์ออกได้ง่ายขึ้น ไบโอดีเซลที่ได้จึงมีความบริสุทธิ์สูง ไม่จำเป็นต้องมีการล้างตัวเร่งปฏิกิริยาออก และสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ น้ำที่มีอยู่ในน้ำมันไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา สามารถใช้เอนไซม์ที่ความเข้มข้นสูงๆเพื่อให้ความไวของปฏิกิริยายาวนานขึ้น แต่ต้องมีการควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อุณหภูมิที่ใช้ และราคาค่อนข้างสูง (ณัฐชยา และคณะ, 2555)

2. ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์

ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์ (Homogeneous) คือตัวเร่งที่อยู่ในสถานะเดียวกับสารที่ทำปฏิกิริยา ส่วนใหญ่มักเป็นสารที่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับสารตั้งต้น ซึ่งเป็นผลให้การแพร่ของสารละลายเป็นไปได้อย่างดี ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์มักเป็นโมเลกุลที่มีตำแหน่งสำหรับเร่งปฏิกิริยาชัดเจน เกิดการสลายตัวหรือเสียสภาพในสภาวะที่ใช้ความร้อนหรือความดันสูง ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์มี 2 ชนิด (อัจฉรา และคณะ, 2557) คือ

1.) ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์แบบกรด โดยส่วนมากกรดที่นิยมใช้คือ H_2SO_4 สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ดีที่อุณหภูมิและความดันต่ำ ให้ผลผลิตไบโอดีเซลในปริมาณมากและใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาน้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยากรดชนิดอื่นๆ แต่การเกิดปฏิกิริยาช้ากว่าการใช้เบสเป็นตัวเร่งเหมาะสำหรับกลีเซอไรด์ที่มีปริมาณค่ากรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid) สูงมาก เช่น น้ำมันที่ผ่านการปรุงอาหารแล้ว (สุรศิษฏ์, 2556)

2.) ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์แบบเบส โดยส่วนมากเบสที่นิยมใช้คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้รับความนิยมที่สุด เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาที่ให้ปริมาณไบโอดีเซลสูงในระยะเวลาอันสั้น มีราคาถูก แต่การใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องทำให้น้ำมันไม่มีน้ำหรือมีน้อยที่สุด เนื่องจากน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสบู่ ประสิทธิภาพของตัวเร่งจะปฏิกิริยาลดลง ไบโอดีเซลที่ได้จึงน้อยลง หลังสิ้นสุดปฏิกิริยา

จำเป็นต้องทำการแยกตัวเร่งออกโดยการล้าง เพื่อให้ได้ไบโอดีเซลที่มีคุณสมบัติเป็นกลาง ดังนั้นควรทำการไล่ความชื้นในน้ำมันที่จะนำมาทำปฏิกิริยาและตัวเร่งปฏิกิริยาออกก่อน

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์จำเป็นต้องมีขั้นตอนการล้างเอาตัวเร่งปฏิกิริยาออกเพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดความบริสุทธิ์ ซึ่งต้องมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น ผลผลิตไบโอดีเซลที่จึงลดลง และส่งผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมที่ก่อให้เกิดน้ำเสีย (อัจฉรา และคณะ, 2557)

3. ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์หรือแบบของแข็ง (Heterogeneous) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะแตกต่างจากสารตั้งต้น เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นของแข็ง สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซหรือของเหลว จึงทำให้ไม่มีไอออนบวกซึ่งเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดสบู่ สามารถทำปฏิกิริยาที่ความดันและอุณหภูมิสูงได้ แต่อาจใช้เวลานาน (สุรศิษฏ์, 2556) ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้สามารถแยกตัวเร่งออกมาได้ง่ายโดยการกรองหรือการตกตะกอน และสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ ช่วยลดปริมาณน้ำเสียในขั้นตอนการล้างแยกผลิตภัณฑ์ จึงทำให้การผลิตไบโอดีเซลมีต้นทุนต่ำลง ซึ่งเป็นข้อดีกว่าตัวเร่งชนิดอื่นๆ (บริษัท ภัทรกานต์ เทรดดิ้ง จำกัด, 2555) โดยทั่วไปนิยมใช้ CaO แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) สังกะสีออกไซด์ (ZnO) เนื่องจากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวในและใช้สภาวะในการทำปฏิกิริยาที่ง่ายกว่า (รุ่งทิพย์, 2557)

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดเบส คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ได้รับการยอมรับว่ามีความเป็นเบสสูง สามารถสังเคราะห์ได้จากแหล่งวัสดุเหลือทิ้งทางธรรมชาติจำพวกแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) เช่น เปลือกปู เปลือกไข่ และเปลือกหอยต่างๆ (ณัฐชยา และคณะ, 2555)

วัสดุที่ใช้ในการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในงานวิจัยนี้คือ เปลือกหอยขม โดยลักษณะทั่วไปของหอยขมนั้นเป็นหอยน้ำจืดชนิดฝาเดียวขนาดเล็ก ยาวประมาณ 2-4 cm รูปร่างเป็นกระเปาะเกือบเป็นทรงกลม มีเปลือกหนาและแข็งเป็นเกลียวกลมยอดแหลม (ฐานข้อมูลเรื่องยาสมุนไพร, 2553) แบ่งเป็น 3 ชั้น โดยชั้นกลางเป็นหินปูน ($CaCO_3$) ที่มีขนาดหนาที่สุด มีสีน้ำตาลอมดำจนถึงดำ มีลายเส้นขนาดเล็กพาดเป็นวงเรียงซ้อนกันในแนวขวางของเปลือกหอย (ปศุสัตว์.คอม, [ม.ป.ป.]) ดังแสดงในรูปที่ 4 หอยขมมีอวัยวะเพศทั้งเพศผู้และเพศเมียอยู่ในตัวเดียวกันสามารถผสมพันธุ์ได้ด้วยตัวเองเมื่ออายุได้ 60 d และออกลูกเป็นตัวครั้งละประมาณ 40-50 unit จะพบได้มากในช่วงเดือนธันวาคม-พฤษภาคม หอยขมชอบอาศัยในแหล่งน้ำจืด เช่น ในคู คลอง หนอง บึง ที่น้ำไม่ไหลแรงและเป็นน้ำนิ่ง มีระดับความลึกตั้งแต่ 10 cm ถึง 2 m มักเกาะอยู่กับพันธุ์ไม้น้ำ เสาหลักตอไม้ หรือตามพื้น กินอาหารพวกสาหร่ายและอินทรีย์สาร ใบไม้ใบหญ้าผุๆในน้ำ (ศูนย์วิจัยและพัฒนาประมงน้ำจืดสุราษฎร์ธานี, 2553)

ภาพที่ 4 เปลือกหอยขม

ที่มา : ศูนย์วิจัยและพัฒนาประมงน้ำจืดสุราษฎร์ธานี (2553)

เปลือกหอยขมจะมีองค์ประกอบหลักที่สำคัญคือ $CaCO_3$ เมื่อทำการเผาเปลือกหอย (Calcination) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 650 °C จะทำให้ $CaCO_3$ เปลี่ยนรูปเป็น CaO และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ดังสมการที่ 4 (อัจฉรา และคณะ, 2557)

$$CaCO_3\,(s) \xrightarrow{\text{Calcination}} CaO\,(s) + CO_2\,(g)$$ สมการที่ 4

กระบวนการเผาที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เรียกว่า Calcination คือ การนำตัวอย่างไปเผาด้วยอุณหภูมิสูงในระดับที่ยังไม่ถึงจุดหลอมเหลวของตัวอย่างนั้น กระบวนการนี้อาจใช้เพื่อกำจัดความชื้น สารอินทรีย์และก๊าซต่างๆ หรือเพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีของตัวอย่าง (THAI CERAMIC, 2552) แบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ (สถาพร, 2558) คือ

1) เตาเผาสารในสภาวะก๊าซไหล จะใช้ก๊าซที่บังคับการไหลผ่านตัวอย่างและอุณหภูมิให้สอดคล้องกับจุดประสงค์ที่ต้องการจากการเผา โดยนำตัวอย่างที่ต้องการเผาซึ่งส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นผงใส่ในถาด นำไปวางในท่อควอทซ์หรือท่อเซรามิกส์ ใช้ก๊าซเฉื่อยไหลผ่านท่อพร้อมๆกับเพิ่มอุณหภูมิในอัตราที่ต้องการ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนถึงค่าที่ต้องการทำการเปลี่ยนจากก๊าซเฉื่อยเป็นอากาศแล้วควบคุมสภาวะนั้นตามเวลาที่ต้องการเผา เมื่อครบเวลาจึงเปลี่ยนจากอากาศเป็นก๊าซเฉื่อยและลดอุณหภูมิลง เตาเผาสารในสภาวะก๊าซไหล ดังแสดงในรูปที่ 5

ภาพที่ 5 เตาเผาสารในสภาวะก๊าซไหล

ที่มา : สถาพร (2558)

2) เตาเผาสารในอากาศนิ่งปกติมีจุดประสงค์หลักคือการกำจัดความชื้นและสารอินทรีย์ที่มาจากวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้นตอนก่อนหน้านี้ เช่น สังเคราะห์ CaO จากการเผา $CaCO_3$ ในช่วงอุณหภูมิ 400-900 °C (บริษัท แพนด์ส นครหลวง จำกัด, [ม.ป.ป.]) หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่จะอยู่ในลักษณะของโลหะออกไซด์ (สถาพร, 2558) ทำการเก็บรักษาไม่ให้สัมผัสกับอากาศ เนื่องจากความชื้นจะทำให้ความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง ดังแสดงในภาพที่ 6

ภาพที่ 6 เตาเผาสารในอากาศนิ่งปกติ

ที่มา : สถาพร (2558)

4. แอลกอฮอล์ที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

แอลกอฮอล์ (Alcohol) คือสารประกอบอินทรีย์ ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ต่อกับอะตอมคาร์บอนของหมู่แอลคิลหรือหมู่ที่แทนแอลคิลชื่อสารเคมีกลุ่มหนึ่ง แอลกอฮอล์ที่นิยมใช้ในการผลิตไบโอดีเซล โดยส่วนมากแบ่งออกได้ 2 ประเภท ดังนี้

1) เอทานอล (Ethanol) หรือเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl Alcohol) มีสูตรเคมีคือ C_2H_5OH (วิชาการ.คอม, 2556ค) ลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี ติดไฟง่าย มีความไวไฟ ไม่มีเขม่า ละลายน้ำได้ดี เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ 99.8% จะมีค่าออกเทนสูงถึง 113 มีสมบัติเป็นของเหลว ใส ไม่มีสี มีกลิ่นหอม ติดไฟให้ความร้อนสูง (วิชาการ.คอม, 2556ค) สามารถผลิตได้จากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี และกระบวนการหมักวัตถุดิบจำพวกแป้ง และน้ำตาลด้วยจุลินทรีย์ นิยมนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับผลิตสารเคมีอื่นๆหรือนำมาใช้ประโยชน์โดยตรง (Siamchemi.com, [ม.ป.ป.]) เช่น ทำการผสมกับน้ำมันเชื้อเพลิงเพื่อแก้ปัญหาวิกฤตการณ์น้ำมันราคาแพง โดยใช้เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ตั้งแต่ 95%v/v เนื่องจากเอทานอลมีสมบัติช่วยเพิ่มปริมาณออกซิเจนในน้ำมัน จึงทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ยิ่งขึ้นและเป็นการลดมลพิษในอากาศ (วิชาการ.คอม, 2556ง)

2) เมทานอล (Methanol) หรือ เมทิลแอลกอฮอล์ (Methyl Alcohol) มีสูตรเคมีคือ CH_3OH ลักษณะเป็นของเหลวใส ระเหยง่าย ติดไฟง่าย มีความเป็นพิษ (วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี, [ม.ป.ป.]) ใช้ประโยชน์เป็นตัวทำละลายสารลดจุดเยือกแข็งเชื้อเพลิง และสารตั้งต้นในการผลิตสารเคมี เป็นแอลกอฮอล์หลักที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากมีราคาถูก มีขนาดโมเลกุลเล็ก คุณสมบัติดังกล่าวสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับกลีเซอไรด์ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันได้อย่างรวดเร็ว โดยสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ต้องใช้อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันเป็น 3:1 แต่ในทางปฏิบัติต้องใช้อัตราส่วนที่มากกว่านั้น (สุรศิษฏ์, 2556) เมทานอลสามารถระเหยออกสู่อากาศภายนอกแล้วสลายตัวได้คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) หากเผาเมทานอลกับอากาศจะได้ CO_2 กับน้ำ ดังสมการที่ 5 (วิชาการ.คอม, 2556ข)

$$2\,CH_3OH + 3\,O_2 \longrightarrow 2\,CO_2 + 4\,H_2O \qquad \text{สมการที่ 5}$$

ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันนั้นมีหลายปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้ ดังนี้

1. ปริมาณน้ำและกรดไขมันอิสระ

ปริมาณน้ำและกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในน้ำมันจะส่งผลให้การผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันลดลง โดยกรดไขมันอิสระในน้ำมันเป็นผลโดยตรงต่อเบสที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะหักล้างความเป็นเบสที่ใส่เข้าไป ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ปริมาณค่ากรดไขมันอิสระที่เหมาะสมควรมีค่าไม่เกิน 1%wt ของน้ำมันที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (สุรศิษฏ์, 2556)

สำหรับน้ำเป็นสาเหตุให้เกิดสบู่และสบู่ที่เกิดขึ้นจะปนกับเอสเทอร์และกลีเซอรีนที่ได้ ทำให้มีความหนืดสูงขึ้น น้ำมันจะมีลักษณะเป็นเจล ส่งผลให้การแยกกลีเซอรีนออกจากเอสเทอร์ได้ยากขึ้น ดังนั้นก่อนทำปฏิกิริยาควรนำน้ำมันไปอุ่นเพื่อไล่น้ำหรือความชื้นที่อุณหภูมิ 110-120 °C (ณัฐชยา และคณะ, 2555)

2. ชนิดและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแบ่งได้เป็น ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด กรด เบส หรือ เอมไซม์ ในกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันนิยมใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงและให้ผลดีที่อุณหภูมิต่ำกว่าการใช้กรดเป็นตัวเร่ง (ธรรมศักดิ์ และคณะ, 2553) สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดเหมาะสมกับน้ำมันที่มีกรดไขมันอิสระมากกว่า 4 mg KOH/g เนื่องจากมีน้ำผสมอยู่ด้วย (พัทธนันท์, 2554) ข้อเสียของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดคือ ภาชนะที่ใช้ก็ต้องมีความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรด อัตราส่วนของแอลกอฮอล์ต่อไขมันที่ใช้ต้องสูงและอุณหภูมิสูง และใช้เวลานานในการทำปฏิกิริยา (สุรศิษฏ์, 2556)

ในส่วนของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ (พัทธนันท์, 2554) ซึ่งเมื่อใช้ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาสูงปฏิกิริยาจะเกิดได้เร็วขึ้น และหากปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่ำหรือสูงเกินไปจะทำให้ได้ปริมาณของไบโอดีเซลที่ต่ำ ดังนั้นปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจะมีค่าคงที่ค่าหนึ่งเท่านั้น นอกจากนั้นถ้าปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่ามากจะทำให้ตัวเร่งที่เกินมาไปทำปฏิกิริยากับน้ำมัน ทำให้เกิดปฏิกิริยาสปอนิฟิเคชันหรือการเกิดสบู่ (ธรรมศักดิ์ และคณะ, 2553)

3. เวลาและอุณหภูมิ

อัตราการเกิดไบโอดีเซลจะแปรผันโดยตรงกับเวลา นั่นคือถ้าเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้นก็จะทำให้ได้ปริมาณเอสเทอร์มากขึ้นเช่นกัน (พัทธนันท์, 2554) โดยส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา (สุรศิษฏ์, 2556) ในขั้นต้นจะเกิดปฏิกิริยาค่อนข้างช้า เนื่องจากการผสมและการกระจายตัวของแอลกอฮอล์ในน้ำมัน (ธรรมศักดิ์ และคณะ, 2553)

ส่วนอุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันอย่างมาก การเลือกใช้อุณหภูมิขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเช่นกัน (สุรศิษฏ์, 2556) เมื่อใช้อุณหภูมิสูงจะทำให้ความหนืดของน้ำมันลดลง อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาสั้นลง (ธรรมศักดิ์ และคณะ, 2553) โดยทั่วไปในการทำปฏิกิริยาจะใช้อุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับจุดเดือดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ เพื่อป้องกันแอลกอฮอล์ระเหยออกไป ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ที่ 60-70 ºC ที่ความดันบรรยากาศ (โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา) (รุ่งทิพย์, 2557)

4. **อัตราการกวนผสม**

การกวนผสมนับเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญมากสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน เพราะน้ำมันหรือไขมันที่นำมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซลนั้นไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับแอลกอฮอล์และตัวเร่งปฏิกิริยา (สุรศิษฏ์, 2556) ดังนั้นจึงต้องมีการกวนผสมเพื่อเพิ่มการถ่ายโอนมวลของสารทำให้เนื้อสารสัมผัสกันมากขึ้น และเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเร็วขึ้น (รุ่งทิพย์, 2557)

5. ผลของอัตราส่วนแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน

เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับ เพราะฉะนั้นแอลกอฮอล์ที่ใช้ในปฏิกิริยาจะต้องใช้ในปริมาณที่มากเกินพอ เพื่อทำให้ปฏิกิริยาเกิดไปทางขวามากขึ้น ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์มากขึ้นเช่นกัน (ธรรมศักดิ์ และคณะ, 2553) โดยตามทฤษฎีสัดส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันจะเท่ากับ 3:1 แต่ในทางปฏิบัติจะต้องใช้ปริมาณของแอลกอฮอล์มากกว่าตามทฤษฎี เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ด้วยเช่นกัน ซึ่งปกติจะใช้อัตราส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันบริสุทธิ์ระหว่าง 6:1 ถึง 15:1 (ณัฐชยา และคณะ, 2555) แต่สำหรับน้ำมันพืชใช้แล้วต้องใช้อัตราส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันเป็น 7:1 เนื่องจากน้ำมันพืชใช้แล้วมีความหนืดสูงกว่าน้ำมันบริสุทธิ์จึงต้องใช้แอลกอฮอล์ในการทำปฏิกิริยามากกว่า เพื่อละลายน้ำมันและทำให้การสัมผัสกันระหว่างน้ำมัน แอลกอฮอล์และตัวเร่งปฏิกิริยาทำได้ง่ายขึ้น (ปกรณ์, 2554)

คุณภาพและมาตรฐานไบโอดีเซล

มาตรฐานและคุณภาพของไบโอดีเซลตามมาตรฐานสากลที่นิยมใช้ในการพัฒนาไบโอดีเซล นิยมใช้มาตรฐาน DIN ของประเทศเยอรมนี และ ASTM (American Society of Testing and Materials) ของสหรัฐอเมริกา การทดสอบตามมาตรฐานเหล่านี้เป็นกระบวนการสำคัญที่ใช้ในการควบคุมคุณสมบัติของไบโอดีเซล และธุรกิจน้ำมันก่อนการซื้อขายในตลาด กรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงานได้ออกประกาศเพื่อกำหนดคุณภาพและลักษณะของไบโอดีเซลขึ้น 2 ฉบับ (ศูนย์บริการวิชาการที่ 3, 2553) ได้แก่

1) ไบโอดีเซลเพื่อจำหน่ายเชิงพาณิชย์ หรือที่เรียกว่าไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ ของกรดไขมัน (B100) ซึ่ง B100 คือน้ำมันเชื้อเพลิงที่ผลิตจากไขพืชหรือไขสัตว์ โดยไม่ต้องใช้น้ำมันดีเซลปิโตรเลียมหรือน้ำมันอื่นๆมาผสม สามารถใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลปิโตรเลียมได้ และยังใช้ได้กับเครื่องยนต์ดีเซลทุกประเภท มีการกำหนดรายละเอียดข้อกำหนดคุณภาพรวม 24 รายการ (สำนักคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง, 2553) และได้กำหนดวิธีการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้ตามมาตรฐาน แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปข้อกำหนดคุณสมบัติของไบโอดีเซลและวิธีการตรวจสอบ

รายการ	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	EN ISO 12937
10	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด (Total Contaminant) (%wt)	ไม่สูงกว่า 0.0024	ASTM D 5452

ตารางที่ 1 (ต่อ)

รายการ	คุณสมบัติ	ข้อกำหนด	วิธีทดสอบ
11	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Strip Corrosion)	ไม่สูงกว่า หมายเลข 1	ASTM D130
12	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (h) ณ อุณหภูมิ 110 °C	ไม่ต่ำกว่า 6	EN 14112
13	ความความเป็นกรด (Acid Number) (mg KOH/g)	ไม่สูงกว่า 0.50	ASTM D664
14	ค่าไอโอดีน (Iodine Value) กรัมไอโอดีนต่อ 100 g	ไม่สูงกว่า 120	EN 14111
15	กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ (%wt)	ไม่สูงกว่า 12.0	EN 14103
16	เมทานอล (Methanol) (%wt)	ไม่สูงกว่า 0.20	EN 14110
17	โมโนกลีเซอร์ไรด์ (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
20	กลีเซอรีนอิสระ (Free Glycerine) (%wt)	ไม่สูงกว่า 0.02	EN 14105
21	กลีเซอรีนทั้งหมด (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	สารเติมแต่ง (Additive) (ถ้ามี)	ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน	

ที่มา : (ธรรมศักดิ์ และคณะ, 2553)

2.) ไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร หรือไบโอดีเซลชุมชน ใช้เพื่อกำกับคุณภาพของไบโอดีเซลที่ผลิตในชุมชน และใช้กับเครื่องจักรกลการเกษตรประเภทรอบต่ำเท่านั้น มีการกำหนดรายละเอียดข้อกำหนดคุณภาพ รวม 13 รายการ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2552ข) วิธีการตรวจสอบ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ของน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซลตามมาตรฐาน ASTM

คุณสมบัติ	อัตราสูงต่ำ	วิธีทดสอบคุณสมบัติ
1. ความหนาแน่น ที่ 15 ºC (kg/m^3)	ไม่ต่ำกว่าและ ไม่สูงกว่า 860-900	ASTM D1298
2. ความหนืด ที่ 40 ºC (cSt)	ไม่ต่ำกว่าและ ไม่สูงกว่า 3.5-5	ASTM D445
3. จุดวาบไฟ (Flash point) (ºC)	ไม่ต่ำกว่า 120	ASTM D93
4. กำมะถัน (Sulphur) (%wt)	ไม่สูงกว่า 0.0015	ASTM D2622
5. จำนวนซีเทน (Cetane Number)	ไม่ต่ำกว่า 51	ASTM D613
6. เถ้าซัลเฟต (Sulfated Ash) (%wt)	ไม่สูงกว่า 0.02	ASTM D874
7. น้ำ (Water) (%wt)	ไม่สูงกว่า 0.050	EN ISO 12937
8. การกัดกร่อนแผ่นทองแดง	ไม่สูงกว่า หมายเลข 3	ASTM D130
9. ค่าความเป็นกรด (mg KOH/g)	ไม่สูงกว่า 0.5	ASTM D664
10. กลีเซอรีนอิสระ (Free Glycerine) (%wt)	ไม่สูงกว่า 0.2	EN 14105
11. กลีเซอรีนทั้งหมด (Total Glycerine) (%wt)	ไม่สูงกว่า 0.25	EN 14105
12. เมทิลเอสเทอร์ (Methyl Ester) (%wt)	ไม่ต่ำกว่า 96.5	EN 14103
13. เมทานอล (Methanol) (%wt)	ไม่สูงกว่า 0.2	EN 14110

ที่มา : (ศูนย์บริการวิชาการที่ 3, 2553; มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, [ม.ป.ป.])

กระทรวงพลังงานได้กำหนดการตรวจสอบมาตรฐานการผลิตไบโอดีเซลในระดับชุมชนเบื้องต้น อาทิเช่น ความหนืด ความหนาแน่น จุดวาบไฟ จุดไหลเท จุดขุ่นมัว และค่าความร้อน เป็นต้น (สำนักคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง, 2553) ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซลในแต่ละข้อสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (Methyl Ester) คือ ค่าที่แสดงถึงความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลและบอกถึงการเกิดปฏิกิริยาของไบโอดีเซลที่สมบูรณ์ ผลที่ได้ต้องให้ค่าไม่ต่ำกว่า 96.5 %wt โมเลกุลหรือสารอื่นๆที่ปะปนมาจะมีน้อย ซึ่งทำให้ไบโอดีเซลมีคุณสมบัติในทุกๆด้านดีตามไปด้วย การนำไปใช้จะให้ผลด้านประสิทธิภาพ การสึกหรอ เขม่าควัน หรือคุณสมบัติอื่นๆ ในทางที่ดีทั้งหมดใช้ระบุความ

บริสุทธิ์ของไบโอดีเซล วิธีทดสอบใช้ตาม EN 14103 ซึ่งตรวจวัด โดยใช้เทคนิคโครมาโทกราฟี (ศูนย์บริการวิชาการที่ 3, 2553)

2. ค่าความเป็นกรด (Acid Value) หรือ Free Fatty Acid (FFA) ในไบโอดีเซลใช้บ่งชี้ถึงกรดไขมันอิสระที่ทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ หรือการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด หรือมีข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการล้างไบโอดีเซลที่มีการเติมกรดช่วยปรับ pH เป็นกลาง การมีค่าความเป็นกรดในน้ำมันสูงเกินไปส่งผลให้ระบบจ่ายน้ำมันและเครื่องยนต์มีอายุการทำงานสั้นลง ข้อกำหนดของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ กรมธุรกิจพลังงาน ให้ทดสอบตามวิธี ASTM D664 ซึ่งผลที่ได้ต้องให้ค่าไม่สูงกว่า 0.5 mg KOH/g (ศูนย์บริการวิชาการที่ 3, 2553)

3. ความหนืด (Viscosity) เป็นตัวบอกถึงความสามารถในการต้านทานการไหลและบอกถึงคุณสมบัติในการหล่อลื่นพื้นผิว ใช้วิธีทดสอบตาม ASTM D445 ซึ่งผลที่ได้ให้ค่าในช่วง 3.5-5.0 cSt ณ อุณหภูมิ 40 °C (ศูนย์บริการวิชาการที่ 3, 2553)

4. ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (Calorific Value) เป็นปริมาณความร้อนที่ถูกปล่อยออกมาต่อหน่วยน้ำหนักเมื่อวัสดุถูกนำไปเผาไหม้อย่างสมบูรณ์กับออกซิเจน โดยการนำวัสดุไปวิเคราะห์ในเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (Bomb Calorimeter) และบันทึกอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้น ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงยิ่งสูงจะแสดงถึงคุณภาพที่ดีของเชื้อเพลิงนั้นๆ ค่าความร้อนอาจรายงานเป็นหน่วยต่างๆ แล้วแต่ประเทศที่ใช้ เช่น MJ/Kg, BTU/Lb, Cal/g หรือ Kcal/Kg (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน, 2550ก)

5. จุดวาบไฟ (Flash Point) คือ อุณหภูมิต่ำสุดที่เชื้อเพลิงเกิดการระเหย มีจำนวนเพียงพอที่จะลุกติดไฟได้วูบหนึ่งแล้วดับเมื่อมีเปลวไฟผ่านเข้ามา ให้ใช้วิธีตาม ASTM D93 (Pensky Martens Closed Cup Tester) ซึ่งผลที่ได้ต้องให้ค่าไม่ต่ำกว่า 120 °C (ศูนย์บริการวิชาการที่ 3, 2553)

6. ความหนาแน่น (Density) เป็นค่าที่ระบุคุณสมบัติเบื้องต้นทางกายภาพของไบโอดีเซล ทดสอบตามวิธี ASTM D1298 ซึ่งผลที่ได้จะมีค่าระหว่าง 860 - 900 kg/m^3 ที่ 15 °C (ศูนย์บริการวิชาการที่ 3, 2553)

7. ค่า pH คือ ค่าที่แสดงความเป็นกรด-เบส ของสารที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ต่างๆ โดยค่า pH จะอยู่ในช่วง 1-14 ถ้าค่า pH น้อยกว่า 7 สารชนิดนั้นก็จะมีฤทธิ์เป็นกรด และถ้าค่า pH มากกว่า 7 สารชนิดนั้นก็จะมีฤทธิ์เป็นเบสหรือด่าง แต่ถ้าค่า pH นั้นมีค่าเท่ากับ 7 แสดงว่าสารชนิดนั้นเป็นกลางหรือที่เรียกว่า pH balance (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2554) วิธีการตรวจสอบในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือที่เรียกว่า พีเอชมิเตอร์ ซึ่งวัด pH ของสารละลายได้โดยการวัดความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยเรื่องการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้เปลือกหอยขมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผู้วิจัยได้ทำการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

Viriya et al. (2010) ศึกษาการใช้เปลือกไข่ เปลือกหอยเชอรี่ และเปลือกหอยตลับลายเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด CaO จากการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านความร้อน (TGA) อุณหภูมิการเผา 800 ºC นาน 4 ชั่วโมง เป็นช่วงที่สังเคราะห์ CaO ได้มากที่สุด โดยได้รับการยืนยันจากเทคนิค XRD ที่สามารถเห็นผลึกของ CaO ได้อย่างชัดเจน และพบว่ามีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากจากเทคนิค BET เมื่อนำมาทำการทดลองกับน้ำมันปาล์มที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 12:1 ณ อุณหภูมิ 60 ºC เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิดให้ผลผลิตไบโอดีเซลมากกว่า 90% จากการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 10%wt และเปลือกไข่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ผลผลิตสูงสุดจึงนำมาวัดค่าความเป็นกรดของน้ำมัน ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D664 ไบโอดีเซลที่ได้มีค่าเทียบเท่ากับการใช้ CaO ทางการค้า

Asir et al. (2012) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด CaO ทางการค้า และ CaO จากการเผากระดูกแกะที่อุณหภูมิ 200, 400, 600, 800 และ 1000 ºC จากการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 65 ºC นาน 4 ชั่วโมง ที่อัตราการกวน 200 rpm ณ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 18:1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเผาที่อุณหภูมิ 800 ºC ปริมาณ 20%wt ให้ผลผลิตไบดีเซลสูงถึง 96.78% ในเงื่อนไขดังกล่าวเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ทางการค้าพบว่ามีปริมาณไบโอดีเซลสูงถึง 99% หลังสิ้นสุดปฏิกิริยาได้ทำการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกด้วยวิธีการกรองผ่านกระดาษกรอง จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นและสารอะซีโตน นำไปอบที่อุณหภูมิ 50 ºC จนแห้ง แล้วจึงนำกลับมาใช้ซ้ำ พบว่าหลังจากการนำกลับมาใช้ซ้ำ 4 ครั้ง ยังคงได้ผลผลิตไบโอดีเซลสูงถึง 83.7%

Márcia et al. (2012) ศึกษาการเผาแกลบที่อุณหภูมิ 500 ºC เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับสารอินทรีย์ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว เปรียบเทียบกับสาร Magnesol ซึ่งเป็นสารดูดซับทางการค้า พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 65 ºC นาน 1 ชั่วโมง เถ้าแกลบปริมาณ 4%wt จะทำให้ไบโอดีเซลที่ได้มีความบริสุทธิ์เทียบเท่าการใช้ Magnesol เป็นตัวดูดซับเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt เนื่องจากในพื้นผิวของเถ้าแกลบมีรูพรุนขนาดใหญ่ และยังมีปริมาณซิลิกาสูงที่เป็นตัวช่วยดูดซับสิ่งสกปรกอินทรีย์และอนินทรีย์ในไบโอดีเซลได้ดี ทำให้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์ โดยยืนยันจากการวิเคราะห์ทางเทคนิค EDS และ FTIR

Ying et al. (2013) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันเรพซีด โดยใช้ CaO ทางการค้า และ CaO ทางการค้า แช่สาร bromooctane โดยทำที่อัตราส่วน

สาร bromooctane 1 mg ต่อ CaO 1 g จากการศึกษาทางเทคนิคต่างๆ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการแช่สาร bromooctane มีพื้นที่ผิวการสัมผัสและความขรุขระมากกว่าตัวเร่งที่ไม่ได้ทำการแช่สาร เมื่อนำไปทำการผลิตไบโอดีเซลกับน้ำมันถั่วเหลือง ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5%wt อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 65 ℃ เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง ได้ไบโอดีเซล 99.5% ณ สภาวะการทดลองเดียวกันน้ำมันเรพซีดได้ปริมาณไบโอดีเซล 99.8% และเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ที่ไม่ได้ทำการแช่สารมาทำปฏิกิริยาพบว่ามีปริมาณไบโอดีเซลเพียง 40 % ทำการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกด้วยการปั่นเหวี่ยง ล้างด้วยเฮกเซน แล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 ℃ นำกลับมาใช้ซ้ำได้ถึง 15 ครั้งยังคงให้ไบโอดีเซลมากกว่า 95%

ณัฐชยา และคณะ (2555) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ทางการค้าจากเปลือกหอยและเปลือกไข่ โดยทดสอบกับน้ำมันปาล์มโอเลอิน กำหนดอุณหภูมิในการทดลองที่ 60 ℃ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ณ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 12:1 ใช้การกวนที่ความเร็ว 600 rpm ตัวเร่งปฏิกิริยา 6%wt โดยเปลือกไข่และเปลือกหอยถูกเผาที่อุณหภูมิ 800-900 ℃ ใช้เวลา 3-4 ชั่วโมง เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างจากแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) เป็น CaO จากการยืนยันด้วยเทคนิค XRD เปลือกไข่และเปลือกหอยที่สังเคราะห์ได้นั้นมีองค์ประกอบเช่นเดียวกับ CaO ทางการค้า และจากผลการทดลอง พบว่าเปลือกไข่เผาให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงสุดถึง 98.24% รองลงมาคือเปลือกหอยและ ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ทางการค้า คือ 98.09% และ 97.92% ตามลำดับ

Achanai et al. (2014) ศึกษาการใช้หอยเชลล์เผาที่อุณหภูมิ 1,000 ℃ นาน 4 ชั่วโมง ด้วยการวิเคราะห์ทางเทคนิค XRD พบปริมาณ CaO จำนวนมากและยังมีองค์ประกอบของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_3), โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) จากการวิเคราะห์ทางเทคนิค XRF เมื่อทำการหาขนาดพื้นที่ผิวด้วยเทคนิค BET พบว่ามีพื้นที่ผิวขนาด 74.96 m^2/g และขนาดรูพรุน 0.097 cm^2/g ผลการวิเคราะห์ในข้างต้นมีความเหมาะสมแก่การนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 65 ℃ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1 ได้ผลผลิตไบโอดีเซล 95.44% จากการเติมเปลือกหอยเชลล์เผา 10%wt แสดงให้เห็นว่าเปลือกหอยเชลล์มีความสามารถเร่งปฏิกิริยาได้สูง และมีโอกาสที่จะพัฒนาต่อในอนาคต

Kung-Tung et al. (2013) ศึกษาการเผาแกลบที่อุณหภูมิ 900 ℃ นาน 4 ชั่วโมง เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา CaO และทำการผสมกับลิเทียมซิลิเกต (Li_2SiO_3) ในอัตราส่วน 1g : 1.23g แล้วทิ้งไว้ 24-72 ชั่วโมง นำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Hammatt, XRD, SEM, TGA, และ FTIR พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทิ้งไว้ให้สัมผัสกับอากาศมีผลการวิเคราะห์เทียบเท่า CaO ทางการค้า เมื่อนำมาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันกับน้ำมันถั่วเหลือง พบว่าการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 4%wt ณ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 24:1 ที่อุณหภูมิ 65 ℃ นาน 3 ชั่วโมง ได้ไบโอดีเซลสูงสุด 99.5% นอกจากนี้การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำ 5 ครั้ง ยังผลิตไบโอดีเซลสูงถึง 86%

Natarajan et al. (2013) ศึกษาการสังเคราะห์ CaO จากเปลือกหอยแครง โดยทำการเผาที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF พบว่ามีปริมาณ Ca 46.84% และ O 53.16% จึงนำมาทำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว พบว่ามีผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุด 95.84% จากเงื่อนไขการทดลองอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 18:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 8%wt เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 65 °C อัตราการกวน 600 rpm ทั้งนี้ได้ทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ทางการค้าที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 12:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5%wt เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 65 °C พบว่ามีผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุด 95.66% น้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยแครงมีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D6751

Siwaporn et al. (2013) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลือง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภท CaO จากกระดูกวัวเผาที่อุณหภูมิ 350, 550, 650, 750, 850, 950, และ 1100 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ทางเทคนิค XRF กระดูกวัวที่เผาอุณหภูมิ 750 °C จะมีปริมาณ Ca สูงถึง 81.02% ทำการทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 8%wt ทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 65 °C ได้ปริมาณไบโอดีเซลสูงสุด 97% หลังสิ้นสุดปฏิกิริยาทำการกรองตัวเร่งปฏิกิริยาออกแล้วนำกลับมาใช้ซ้ำโดยตรงยังคงให้ผลผลิตไบโอดีเซลมากกว่า 90%

ศิริวัฒนา และคณะ (2556ก) ศึกษาผลของ CaO จากเปลือกหอยแครง และเปลือกปูทะเลเผาด้วยอุณหภูมิ 1,300 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันมะพร้าว โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt, 2%wt และ 3%wt สัดส่วนโมลของเมทานอลกับน้ำมันที่ 6:1, 9:1 และ12:1 พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ การใช้ CaO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา 3%wt ต่อปริมาตรเมทานอล 12:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 50, 55 และ 60 °C และเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่ 0.5, 1, 1.5 และ 2 ชั่วโมง จากการทำปฏิกิริยาพบว่าสัดส่วนของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 12:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3%wt ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ให้ผลผลิตไบโอดีเซลมากกว่า 99% ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผลิตจากเปลือกปูทะเลให้ผลผลิตไบโอดีเซลมากกว่าตัวเร่งที่ผลิตจากเปลือกหอยแครงเล็กน้อย และยังสามรถนำตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองกลับมาใช้ซ้ำ 1 ครั้ง ยังคงให้ผลผลิตไบโอดีเซลถึง 88.3% ไบโอดีเซลที่ได้มีคุณสมบัติตามมาตรฐานของ ASTM D6751 และ EN 14214

ศิริวัฒนา และคณะ (2556ข) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยใช้น้ำมันมะพร้าวที่สกัดจากเปลือกทิวมะพร้าว (Endosperm) ซึ่งเป็นส่วนเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปมะพร้าวชาวของเกษตรกร โดยใช้ CaO จากเปลือกหอยแครงเผาที่อุณหภูมิ 1,300 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt, 2%wt และ 3%wt ตามลำดับ ทำการ

ทดลองโดยใช้อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลกับน้ำมัน 6:1, 9:1 และ12:1 อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 50, 55 และ 60 °C และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 0.5, 1,1.5 และ 2 ชั่วโมง พบว่าสภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่สุด คือ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 3%wt ต่อปริมาตรเมทานอล สัดส่วนโมลของเมทานอลกับน้ำมันที่ 12:1 อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 60 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ให้ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซล 99.5% และจากการทดสอบการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าสามารถนำกลับมาใช้งาน 1 ครั้ง ให้ได้ไบโอดีเซล 88.3% และมีคุณสมบัติผ่านมาตรฐานของ ASTM D6751 และEN 14214

สุภกร และคณะ (2556) ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม โดยทำการสังเคราะห์ CaO จากเปลือกหอยแมลงภู่เผาที่อุณหภูมิ 300, 500, 700 และ 900 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากการศึกษาทางเทคนิค XRD, SEM และ BET แสดงให้เห็นว่า CaO จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิการเผา 900 °C เมื่อนำมาทำการผลิตไบโอดีเซล สามารถเปลี่ยนเป็นไบโอดีเซล 91% ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3%wt อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 80 °C นาน 5 ชั่วโมง สามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำ โดยการล้างด้วยเมทานอลและเฮกเซน พบว่ายังคงให้ผลผลิตไบโอดีเซลใกล้เคียงกับครั้งแรก นอกจากนี้ที่สภาวะการทดลองเดียวกัน ได้ทำการทดลองกับน้ำมันชนิดอื่นๆ เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันมะพร้าว น้ำมันมะกอก น้ำมันพืชใช้แล้วยังคงให้ผลผลิตไบโอดีเซลสูงถึง 91%, 91.78%, 80.65%, 82.50% และ 75.56% ตามลำดับ

Gabriel et al. (2014) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO จากทรายทะเลเผาที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อเปลี่ยน $CaCO_3$ ให้เป็น CaO จากผลการวิเคราะห์ทางเทคนิค XRD พบว่าที่อุณหภูมิการเผา 700 °C มีลักษณะคล้ายคลึงกับ $CaCO_3$ แต่ที่อุณหภูมิการเผา 800 และ 900 °C จะมีลักษณะคล้ายกับ CaO มากขึ้น อีกทั้งยังมีพื้นที่ผิวและปริมาณรูพรุนใกล้เคียงกัน น้ำมันที่ใช้ในการทดลองนี้คือน้ำมันพืชใช้แล้ว พบว่ามีค่าความเป็นกรด 0.31 mg KOH/g จึงได้ทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันโดยใช้กรด H_2SO_4 ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15:1 ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทำให้ค่าความเป็นกรดจึงลดลงเหลือ 0.08 mg KOH/g จากนั้นจึงทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 12:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 7.5%wt ทำปฏิกิริยา 6 ชั่วโมง พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจากทรายทะเลเผาที่อุณหภูมิ 800 และ 900 °C ให้ไบโอดีเซล 86.3% และ 87% ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ได้มีผลที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยจึงเลือกใช้อุณหภูมิการเผาทรายทะเลที่ 800 °C เป็นเงื่อนไขการสังเคราะห์ CaO ที่ดีที่สุดในการศึกษาครั้งนี้

Niju et al. (2014) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้ CaO จากเปลือกไข่เผาที่อุณหภูมิ 900 °C นาน 2.5 ชั่วโมง (CaO-900) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นทำการสกัดแบบไหลย้อนกลับหรือที่เรียกว่าการรีฟลักซ์ ในน้ำที่อุณหภูมิ 60 °C นาน 6 ชั่วโมง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ

120 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 600 °C นาน 3 ชั่วโมง (CaO-900-600) เปรียบเทียบกับ CaO ทางการค้า วิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM, BET, Hammat พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีรูพรุนกระจัดกระจายคล้ายรังผึ้ง พื้นที่ผิวของตัวเร่งที่ผ่านการรีฟลักซ์จะมีรูพรุนและความแรงของเบสสูง นำมาทำการทดลองโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 12:1 ที่อุณหภูมิ 65 °C นาน 1 ชั่วโมง จะได้ไบโอดีเซล 67.57%, 79.62% และ 94.52% จากการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ทางการค้า CaO-900 และ CaO-900-600 จำนวน 5%wt ตามลำดับ และเมื่อนำมาทำการทดลองซ้ำถึง 6 ครั้ง ตัวเร่ง CaO-900-600 ก็ยังสามารถให้ไบโอดีเซลได้มากกว่า 90% จึงเป็นข้อสันนิษฐานว่าพื้นที่รูพรุนจำนวนมากของ CaO-900-600 ส่งผลต่อปริมาณไบโอดีเซลที่ผลิตได้ในกระบวนการ และไบโอดีเซลที่ได้มีความหนาแน่น ความหนืด จุดวาบไฟและจุดขุ่นมัวเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM

Suchada et al. (2015) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเหลือทิ้ง โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภท CaO ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกแครงเผาที่อุณหภูมิ 600, 800, 1000, 1100, 1200 และ 1400 °C นาน 2 ชั่วโมง โดยทำการเปรียบเทียบกับ CaO ทางการค้าที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ 1000 °C จากการวิเคราะห์ทางเทคนิค XRD เปลือกแครงเผาที่อุณหภูมิ 1000 °C จะมีปริมาณ CaO มากที่สุด มีแมกนีเซียม (Mg) และสตรอนเชียม (Sr) เป็นองค์ประกอบที่ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีประสิทธิภาพสูงกว่า CaO ทางการค้า ผลการวิเคราะห์ต่างๆเหมาะแก่การนำมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล จากการทดลองพบว่า ในสภาวะที่เหมาะสมจะได้ไบโอดีเซล 86% ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ณ อุณหภูมิ 65 °C นาน 2 ชั่วโมง จากการเติมตัวเร่ง 5%wt เมื่อนำตัวเร่งมาใช้ซ้ำ 6 ครั้ง ยังคงให้ผลผลิตไบโอดีเซลถึง 66% และที่เงื่อนไขเดียวกันนี้ CaO ทางการค้าให้ไบโอดีเซลที่ต่ำกว่า

จักรพงศ์ และคณะ (2556) ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิด CaO จากกระดองหมึกเผาที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง โดยทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันกับน้ำมันปาล์มที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 12:1 และ 18:1 ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5%wt และ 10%wt ที่อุณหภูมิ 60 °C เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง พบว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5%wt ที่ทุกอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์จะให้ไบโอดีเซลสูงถึง 100% ได้มีการศึกษาทางเทคนิค XRD พบว่ากระดองหมึกมีโครงสร้างที่เป็น $CaCO_3$ และสามารถสังเคราะห์ CaO ได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDX

วรรณนพ และคณะ (2557) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากกากกาแฟและ CaO จากเปลือกปูเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยนำกากกาแฟมาทำการสกัดน้ำมันด้วยตัวทำละลายเฮกเซน และใช้เปลือกปูเผาที่อุณหภูมิ 1300 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการทำปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน ผลการทดลองพบว่าปริมาณน้ำมันที่สกัดได้จากกากกาแฟประมาณ 12.26%wt เมื่อผ่านปฏิกิริยา

เอสเทอริฟิเคชันสามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระจาก 3.65% เป็น 0.8% ภายใต้เงื่อนไข อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 12:1 กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เข้มข้น 3%v/v ใช้เวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 °C ได้ผลผลิตไบโอดีเซล 30.2% และหลังจากผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันได้ไบโอดีเซลสูงถึง 91.6% ภายใต้เงื่อนไข อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน 12:1 ใช้อุณหภูมิ 60 °C นาน 1 ชั่วโมง และเติมตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกปูทะเลเผา 5%wt

Guan-Yi et al. (2015) ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยการเผาแกลบที่อุณหภูมิ 400, 600, 800 °C นาน 4 ชั่วโมง พบปริมาณมีซิลิกา (SiO_2) จำนวนมาก แล้วนำมาผสมกับเปลือกไข่ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 800 °C นาน 4 ชั่วโมง ในอัตราส่วน 7:3 ทำการทดลองกับน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1 อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 65 °C นาน 4 ชั่วโมง และตัวเร่งปฏิกิริยา 7%wt ได้ไบโอดีเซล 91.5% และทำการเปรียบเทียบกับการใช้ CaO ทางการค้าได้ไบโอดีเซล 93.2% จากอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ณ อุณหภูมิ 65 °C นาน 3 ชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยา 5%wt และสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองกลับมาใช้ซ้ำได้ 8 ครั้ง พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาสังเคราะห์ยังคงให้ไบโอดีเซลมากกว่า 80% ส่วน CaO ทางการค้าให้ไบโอดีเซล 55% เนื่องจากแกลบเผามีองค์ประกอบของซิลิกอน (Si) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารดูดซับความชื้น ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้โดยการหลอมกับด่าง ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวนี้จะทำให้ไบโอดีเซลที่ได้มีความใสขึ้น แกลบและเปลือกไข่จึงเป็นตัวเร่งทางเลือกหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูง มีต้นทุนต่ำและเหมาะสมแก่การนำมาใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

Seik et al. (2015) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยจุ๊บแจงเผาที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาทางเทคนิค XRF พบว่ามีปริมาณ CaO มากกว่า 98% ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาทางเทคนิค XRD ที่พบว่าการเผาเปลือกหอยที่อุณหภูมิสูงสามารถเปลี่ยน $CaCO_3$ เป็น CaO ได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อนำมาทำปฏิกิริยาที่เงื่อนไขอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 12:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5%wt ทำปฏิกิริยา 6 ชั่วโมง ได้ผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุด 86.75% หลังสิ้นสุดปฏิกิริยานำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำได้ 3 ครั้ง ยังคงให้ผลผลิตไบโอดีเซลมากกว่า 70%

Wuttichai et al. (2016) ศึกษาการสังเคราะห์ CaO จากการเผาปูนขาวที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ทางเทคนิค XRD พบว่าในปูนขาวที่ทำการเผาด้วยอุณหภูมิ 700 °C พบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$, $CaCO_3$ และ CaO ปะปนอยู่ ในขณะที่อุณหภูมิการเผา 800 และ 900 °C มีปริมาณของ CaO เพิ่มมากขึ้น และเมื่อทำการวิเคราะห์ทางเทคนิค XRF พบว่าที่อุณหภูมิการเผาปูนขาว 800 °C มีปริมาณของ CaO สูงถึง 96.9% ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาทางเทคนิค XRD นำมาทำปฏิกิริยากับน้ำมันปาล์ม พบว่าสามารถให้ปริมาณไบโอดีสูงสุดถึง 97% จากเงื่อนไขอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 15:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 6%wt

อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 65 °C ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ที่การกวน 200 rpm หลังสิ้นสุดปฏิกิริยาทำการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกด้วยวิธีการกรอง ล้างตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเมทานอลและเฮกเซนแล้วนำกลับมาใช้ซ้ำ หลังจากใช้ซ้ำถึง 5 ครั้งยังคงได้ไบโอดีเซลมากกว่า 90% ได้ทำการเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาจากปูนขาวที่ไม่ได้ทำการเผา ณ เงื่อนไขการทดลองเดียวกัน พบว่ามีไบโอดีเซลเพียง 62.88% และต้องใช้เวลาการทำปฏิกิริยาถึง 6 ชั่วโมง จึงจะได้ไบโอดีเซลสูงถึง 90% นอกจากนี้ไบโอดีเซลที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากปูนขาวเผา 800 °C มีคุณสมบัติค่าความหนืด จุดวาบไฟ ค่าความเป็นกรด ค่าความหนาแน่น การกัดกร่อนทองแดง ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน EN 14214

Yie et al. (2015) ศึกษาการสังเคราะห์ CaO จากเปลือกไข่ไก่ และไข่นกกระจอกเทศ โดยทำการเผาที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากการศึกษาด้วยเทคนิคต่างๆพบว่าหลังการเผาเปลือกไข่ทั้งสองมีอนุภาคเล็กลง มีปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้น และเปลือกไข่นกกระจอกเทศมีปริมาณรูพรุนมากกว่าเปลือกไข่ไก่ มีการตั้งข้อสันนิษฐานว่าปริมาณรูพรุนจำนวนมากจะสามารถช่วยให้ปฏิกิริยาดำเนินได้เร็วขึ้น เมื่อนำมาทำปฏิกิริยากับน้ำมันพืชใช้แล้ว พบว่าเปลือกไข่นกกระจอกเทศ และเปลือกไข่ไก่ให้ผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดที่ 96% และ 94% ตามลำดับ ณ เงื่อนไขการทดลองตัวเร่งปฏิกิริยา 1.5%wt อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 12:1 ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 65 °C ที่การกวน 250 rpm หลังสิ้นสุดปฏิกิริยาทำการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกด้วยการปั่นเหวี่ยง ล้างด้วย n-hexane และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 °C เพื่อกลับมาใช้ซ้ำ หลังนำกลับมาใช้ซ้ำ 5 ครั้ง พบว่ายังคงให้ผลผลิตไบโอดีเซล 75% เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการใช้งานไปทำการวิเคราะห์ทางเทคนิค SEM พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากโครงสร้างมีกลีเซอรีนมาเกาะตามรูพรุนต่างๆ ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมลง และเมื่อนำผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้ไปทำการวิเคราะห์คุณสมบัติ เช่น ความหนืด จุดวาบไฟ ค่าซีเทน จุดหมอก เป็นต้น พบว่ามีค่าเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D6751

Ngoya et al. (2017) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้เปลือกไข่เผาที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากเทคนิคการวิเคราะห์ XRF พบว่ามีปริมาณ CaO 86.4% และ จากการวิเคราะห์ทางเทคนิค BET มีพื้นที่ผิวขนาด 30.7 m^2/g ทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 22.5:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3.5%wt เวลาในการทำปฏิกิริยา 5.30 ชั่วโมง อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 °C ที่การกวน 600 rpm ได้ปริมาณผลผลิต 91% ซึ่งเป็นไบโอดีเซล 95% หลังสิ้นสุดปฏิกิริยานำตัวเร่งกลับมาใช้ซ้ำ พบว่าการใช้ซ้ำถึง 10 ครั้ง ยังคงได้ผลผลิตไบโอดีเซลสูงถึง 91% นอกจากนี้ผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้ยังมีคุณสมบัติต่างๆ เป็นตามมาตรฐานการผลิตไบโอดีเซล

บทที่ 3
อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อผลิตไบโอดีเซล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO จากเปลือกหอยขมเผาด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจากน้ำมันพืชใช้แล้ว พร้อมทั้งทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้เปรียบเทียบกับค่าไบโอดีเซลมาตรฐาน ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงอุปกรณ์ และสารเคมี รวมถึงวิธีการดำเนินงานวิจัย เพื่อให้งานวิจัยเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ดังนี้

การเตรียมอุปกรณ์ และสารเคมี

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

1. วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาของการศึกษางานวิจัยในครั้งนี้ประกอบด้วย

1. เปลือกหอยขม ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางธรรมชาติ สามารถพบได้ตามแหล่งน้ำจืดทั่วไป รูปร่างเป็นกระเปาะเกือบเป็นทรงกลม มีเปลือกเกลียวกลมยอดแหลม เปลือกหนาและแข็ง ผิวชั้นนอกเป็นสีเขียวแก่ ฝาปิดเปลือกเป็นแผ่นกลม โดยงานวิจัยนี้ใช้เปลือกหอยขมที่มีอยู่ในแหล่งน้ำบริเวณตลาดป่าเหมือด ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่

2. เตาอบไล่ความชื้น (Hot oven air) ยี่ห้อ Memmert มีระบบหมุนเวียนอากาศแบบพัดลม สามารถตั้งอุณหภูมิได้สูงถึง 300 °C

3. เตาอบความร้อนสูงยี่ห้อ Electric furnace อุณหภูมิใช้งานสูงสุด 1,500 °C ลวดความร้อนทำจาก $MoSi_2$ สามารถ ควบคุมอุณหภูมิด้วยระบบไมโครคอนโทรลเลอร์

4. ถ้วยครูซิเบิล (Crucible) หรือถ้วยกระเบื้องใช้สำหรับบรรจุวัสดุที่จะใช้ในการตู้อบความร้อนสูง

5. โกร่งบดสาร (Mortar and Pestle) เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับบดสารให้ได้ขนาดที่เล็กลง หรือบดให้ละเอียด หรือใช้ผสมสารเคมีที่เป็นของแข็งเข้าด้วยกัน

6. ตะแกรงร่อน ขนาด 60 mesh หรือขนาด 0.250 mm เป็นเครื่องกรองสารเพื่อแยกสารที่มีความละเอียดและกากที่หยาบออกจากกัน

7. โถดูดความชื้น (Desiccator) ใช้สำหรับดูดความชื้นออกจากสารเคมีให้เหลือเฉพาะสารเคมี ไม่มีความชื้นหรือน้ำอยู่ในโมเลกุลของสาร ต้องใส่สารที่ใช้ดูดความชื้นหรือที่เรียกว่า ซิลิกาเจล (Silica gel) ลงด้านล่างของโถ

8. ซิลิกาเซล (Silica gel) เป็นสารสังเคราะห์ในรูปแบบซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide) สกัดจากทรายขาว ผสมกรดกำมะถัน มีลักษณะเป็นเม็ดกลม มีรูพรุน ทำให้ มีพื้นผิวในการดูดความชื้นประมาณ หรือประมาณ 40% ของน้ำหนักตัวเอง มีประสิทธิภาพสูงสุดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 25 °C หากอุณหภูมิสูงกว่านี้ ประสิทธิภาพใน การดูดความชื้นจะลดลงไปเรื่อยๆ และมีโอกาสที่จะคายความชื้นออกจากตัวเองเช่นกัน

โดยวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงดังภาพที่ 7

ภาพที่ 7 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

2. อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล และส่วนที่ 2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล ดังนี้

ส่วนที่ 1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล แสดงดังภาพที่ 8 โดยมีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

1.น้ำมันพืชใช้แล้ว (Waste Cooking Oil) เป็นน้ำมันที่ผ่านการใช้งานประกอบอาหารมาแล้ว โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้น้ำมันที่ได้จากการทอดมันฝรั่งของกลุ่มแม่บ้านเจดีย์แม่ครัว ตำบลแม่แฝกใหม่ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่

2. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่ผ่านการเผาจากเปลือกหอยขม ณ อุณหภูมิการเผา 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากการผ่านการร่อนด้วยตะแกรง มีลักษณะเป็นผงละเอียด สีขาว

3. เมทานอล (Methanol) เป็นของเหลวใส ระเหยง่าย เป็นพิษ นิยมใช้เป็นตัวทำละลาย และใช้เป็นเชื้อเพลิงในธรรมชาติ

ภาพที่ 8 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

ส่วนที่ 2 อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล แสดงดังภาพที่ 9 โดยมีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

1. บีกเกอร์ (Beaker) ใช้บรรจุสารเคมีเพื่อให้ความร้อน ผสมสาร หรือทำปฏิกิริยากัน มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกก้นแบน ปากแบะออกเล็กน้อยและมีจะงอยเพื่อช่วยในการเทสาร ขนาดของบีกเกอร์ที่พบได้โดยทั่วไป

2. เครื่องชั่งดิจิตอล รุ่น SF-400A ใช้วัดน้ำหนักของสาร ความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง

3. แท่งแก้วคนสาร (Stirring Rod) ใช้สำหรับการคนสารละลายให้ผสมเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสม่ำเสมอ หรือใช้เมื่อจะเทสารละลายจากภาชนะหนึ่งลงในภาชนะอีกชนิดหนึ่ง

4. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) คือเครื่องมือสำหรับวัดระดับความร้อน เมื่อได้รับความร้อนจะขยายตัว และหดตัวเมื่อคายความร้อน ของเหลวที่ใช้บรรจุในกระเปาะแก้วของเทอร์โมมิเตอร์คือปรอทหรือแอลกอฮอล์ที่ผสมกับสีแดง เมื่อได้รับความร้อนจะขยายตัวขึ้นไปตามหลอดแก้วเล็กๆ เหนือกระเปาะแก้ว

5. เครื่องทำความร้อนและกวนสาร (Hotplate) เป็นเครื่องคนสารละลาย โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำของแม่เหล็ก สามารถปรับอุณหภูมิและความเร็วของการกวนได้

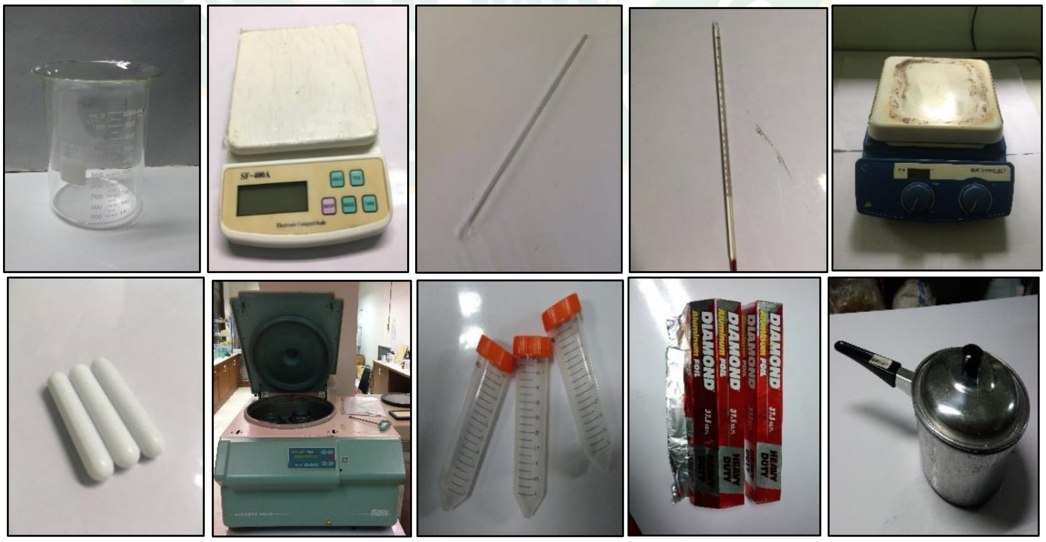
6. แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic) ใช้ร่วมกับเครื่องกวนสาร

7. เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) เป็นเครื่องมือพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับเร่งอัตราการตกตะกอนของอนุภาค (Particle) ที่ไมละลายออกจากของเหลว หรือใช้แยกของเหลวหลาย ๆ ชนิดที่มีความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ต่างกันออกจากกัน สามารถปรับอุณหภูมิและความเร็วรอบของการหมุนเหวี่ยงได้

8. หลอดหมุนเหวี่ยง (หลอด Centrifuge) แบบก้นแหลม ใช้สำหรับบรรจุสารที่ต้องการทำให้อนุภาคตกตะกอน โดยใช้ร่วมกับเครื่องหมุนเหวี่ยง

9. อลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminium Foil) สามารถป้องกันการสูญเสียน้ำการซึมผ่านของไขมันและน้ำมันได้ดีนอกจากนี้ยังป้องกันอากาศภายนอก และสิ่งแปลกปลอมเข้าไปสัมผัสกับวัสดุที่อยู่ภายในได้

10. หม้อ เป็นภาชนะบรรจุสาร ใช้สำหรับในการให้ความร้อนเพื่อให้ความร้อนมีอุณหภูมิสม่ำเสมอกัน



ภาพที่ 9 อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

3. อุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซล

อุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติโอดีเซล แสดงดังภาพที่ 10 โดยรายละเอียดต่างๆ มีดังนี้

1. บิวเรต (Buret) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการไทเทรต มีลักษณะเป็นหลอดแก้วที่มีขีดบอกปริมาตรและมีวาล์วสำหรับเปิด-ปิด เพื่อควบคุมการปล่อยสารละลายภายในหลอดที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

2. ขวดชมพู่ (Erlenmeyer Flask) ใช้สำหรับใส่สารละลายในการทดลองไทเทรตชัน (Titration) ใช้คู่กับอุปกรณ์อีกอย่างหนึ่งคือบิวเรต

3. กระบอกตวง (Cylinder) ใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดปริมาตรของของเหลวที่มีอุณหภูมิไม่สูงกว่าอุณหภูมิของห้องปฏิบัติการ

4. หลอดหยดสาร (Dropper) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับตวงของเหลวปริมาณน้อย ๆ โดยการนับจำนวนหยดของของเหลวที่หยดลงไป

5. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) 85% หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ด่างคลี่ เป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์

6. ไอโซโพรพิล แอลกอฮอล์ (Isopropyl Alcohol) หรือ IPA เป็นตัวทำละลายประสิทธิภาพสูงและมีความเป็นพิษน้อยกว่าตัวทำละลายชนิดอื่น

7. ฟีนอล์ฟทาลีน เป็นสารละลายใสไม่มีสีซึ่งจะเปลี่ยนเป็นสีชมพู เมื่อใช้ทดสอบ ความเป็นกรด-เบสของสารละลายที่มีค่า pH อยู่ระหว่าง 8.3-10

8. **เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH Meter) ยี่ห้อ IONIX รุ่น pH 1** โดยช่วงการวัดค่า 0-14 pH มีความแม่นยำ ±0.1 pH และ ±0.2C แสดงผลการวัดบนจอ LCD (แสดงผลทั้งค่า pH และ Temperature)

9. เครื่องวัดจุดวาบไฟ-จุดติดไฟ เป็นเครื่องสำหรับทดสอบหาจุดวาบไฟและจุดติดไฟของน้ำมันไบโอดีเซล ทำการทดสอบด้วยเครื่องมือ Cleveland Open Cup Apparatus (COC) ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D93

10. เครื่องวัดค่าความร้อน (Bomb Calorimeter) เป็นเครื่องทดสอบหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิง ทดสอบด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter ยี่ห้อ Essom รุ่น 2060/2070 ตามมาตรฐาน ASTM D240, D4809 และ D5865

11. ไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer) ส่วนมากทำจากแก้ว ปิดสนิททุกด้าน ด้านบนของไฮโดรมิเตอร์ เรียกว่า ส่วนก้าน (Stem) มีลักษณะเป็นหลอดยาวแคบๆ เป็นส่วนที่ใช้จับเมื่อจะจุ่มไฮโดรมิเตอร์ลงไปในสารละลายที่จะวัด บนก้าน มีเสกล บอกความหนาแน่นของของเหลว ด้านล่าง

เป็นกระเปาะ ปลายกระเปาะถ่วงด้วยตะกั่ว ปิดทับด้วย ขี้ผึ้งหรือ Wax โดยใช้ที่ช่วงการวัด 0.7-1 B° ที่ความละเอียด 0.1

12. เครื่อง GC-MS (Gas Chromatograph-Mass Spectrometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้เพื่อการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณที่ต้องการความแม่นยำสูง ใช้สำหรับวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ หรือวิเคราะห์ความเป็นน้ำมันไบโอดีเซล ทดสอบด้วยเครื่อง GC-MS Agilent Technologies รุ่น 7683B ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน EN 14103

13. เครื่องวิเคราะห์ความหนืด (Viscometer) เป็นเครื่องที่ใช้สำหรับทดสอบหาความหนืดและความหนาแน่นของปิโตรเลียม โดยใช้หลอด Capillary Viscometer ยี่ห้อ Cannon รุ่น No.37

ภาพที่ 10 อุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติโอดีเซล

การเตรียมและการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกหอยขม แสดงภาพที่ 11 สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

1. นำเปลือกหอยขมมาล้างน้ำให้สะอาด อบให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. นำเปลือกหอยขมไปเผาที่อุณหภูมิ 700, 800, และ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นบดให้ละเอียด แล้วทำการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 60 mesh

3. เก็บตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากข้อที่ 1 และ 2 ในโถดูดความชื้น (Desiccators) เพื่อป้องกันการสัมผัสกับอากาศ

ภาพที่ 11 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกหอยขม

2. การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

การศึกษาคุณลักษณะ และสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่ได้จากการเผาเปลือกหอยขม โดยทำการศึกษาจากเทคนิคดังนี้

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scaning Electron Microscope : SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก มีกำลังขยายสูง เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้น โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3000 เท่า ถึงระดับมากกว่า 100,000 เท่า เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของวัสดุ สร้างภาพโดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิว ทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM-Quanta400) **ยี่ห้อ** : FEI **รุ่น** : Quanta 400

2. การวิเคราะห์เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction) เป็นเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ หรือ X-Ray Diffractometer (XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สารประกอบและโครงสร้างผนึกของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในผลึกของวัสดุแต่ละชนิด เนื่องวัสดุมีสูตรทางเคมีเหมือนกัน แต่โครงสร้างต่างกันจะเกิดการเลี้ยวเบนที่มุมองศาต่างกัน ทดสอบด้วยเครื่อง XRD ยี่ห้อ Philips รุ่น X'Pert MPD

3. การวิเคราะห์ทางเทคนิค X-Ray Fluorescence Spectrometry หรือ เทคนิค XRF เป็นเทคนิคที่ใช้ในการหาชนิดและปริมาณของธาตุในสารตัวอย่าง อาศัยหลักการเรื่องรังสีเอ็กซ์ของตัวอย่าง โดยจะยิงรังสีเอ็กซ์เข้าไปในตัวอย่าง ธาตุต่างๆที่อยู่ในตัวอย่างจะดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ แล้วคายพลังงานออกมา โดยพลังงานที่คายหรือ Fluorescene ออกมานั้น จะมีค่าพลังงานขึ้นกับชนิดของธาตุที่อยู่ในตัวอย่างนั้นๆ จึงสามารถแยกได้ว่าในตัวอย่างที่ทดสอบนั้นมีธาตุอะไรอยู่บ้าง โดยใช้ Detector วัดค่าพลังงานที่ออกมาจากตัวอย่าง ทดสอบด้วยเครื่อง XRF ยี่ห้อ Philips รุ่น PW2400

ศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันพืชใช้แล้ว

ทำการศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำมันพืชใช้แล้ว ประกอบด้วยวิธีการทางเคมีและทางกายภาพ ดังนี้

1. ทำการวิเคราะห์หาค่ากรดไขมันอิสระ (FFA)

เนื่องจากปริมาณกรดไขมันอิสระที่สูงเกินไปจะส่งผลต่อกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ทำให้เกิดสบู่ หรือกลีเซอรีน ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จึงมีค่าลดลง การวิเคราะห์หาค่ากรดไขมันอิสระ แสดงดังภาพที่ 12 สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. ชั่งน้ำหนักน้ำมันตัวอย่าง 5 g และตวงไอโซโพรพิล 25 ml และหยดฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ 3 – 5 unit เขย่ารวมกันในขวดรูปชมพู่

2. เตรียมสารละลายด่างความเข้มข้น 0.1 N ใส่บิวเรตพร้อมเปิดไล่อากาศออกเพื่อให้พร้อมใช้งานและจดค่าเริ่มต้นเอาไว้

3. หยดสารละลายด่างจากบิวเรตลงในขวดรูปชมพู่พร้อมเขย่าให้เข้ากัน

4. จนกว่าน้ำมันจะเปลี่ยนเป็นสีชมพูหรือสีม่วงถาวร แล้วอ่านค่าสิ้นสุดที่บิวเรต

5. คำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระ (FFA) ดังแสดงในสมการที่ 6

$$\%FFA = \frac{V X N X A}{m} \qquad \text{สมการที่ 6}$$

เมื่อ *FFA* คือ กรดไขมันอิสระ (%)
V คือ ปริมาตรสารละลายด่างที่ใช้ไป (ml)
N คือ ความเข้มข้นของสารละลายด่าง (mol)
A คือ โมเลกุลของกรดไขมัน (g/mol)
m คือ น้ำหนักน้ำมันตัวอย่าง (g)

ภาพที่ 12 ทำการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ (FFA)

2. ทำการวิเคราะห์ความหนาแน่นของน้ำมัน

การวัดความหนาแน่นของน้ำมันพืชใช้แล้ว เป็นวิธีการศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันทางกายภาพ ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTMD1298 แสดงดังภาพที่ 13 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. ทำการให้ความเย็นแก่น้ำมันไบโอดีเซล โดยแช่ไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 15 °C
2. จากนั้นนำน้ำมันที่ผ่านการให้ความเย็นใส่ลงในกระบอกตวงขนาด 100 ml
3. ใช้ไฮโดรมิเตอร์ที่มีช่วงการวัด 700-1000 kg/m^3 ใส่ลงในกระบอกตวง โดยให้ไฮโดรมิเตอร์อยู่ตรงกลางของกระบอกตวง
4. บันทึกผลความหนาแน่นโดยอ่านจากรอยน้ำมันที่ขีดบนสุดของไฮโดรมิเตอร์

ภาพที่ 13 ทำการวัดความหนาแน่นของน้ำมันพืชใช้แล้ว

3. ทำการวิเคราะห์ค่าความหนืด

การศึกษาค่าความหนืดของน้ำมันพืชใช้แล้ว เป็นวิธีการศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันทางกายภาพ แสดงดังภาพที่ 14 สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. ทำการให้ความร้อนแก่น้ำมันที่อุณหภูมิ 40 °C

2. ใส่น้ำกลั่นลงในบีกเกอร์ขนาด 5 L พร้อมให้ความร้อนแก่น้ำกลั่นจนกระทั่งมีอุณหภูมิ 40 °C

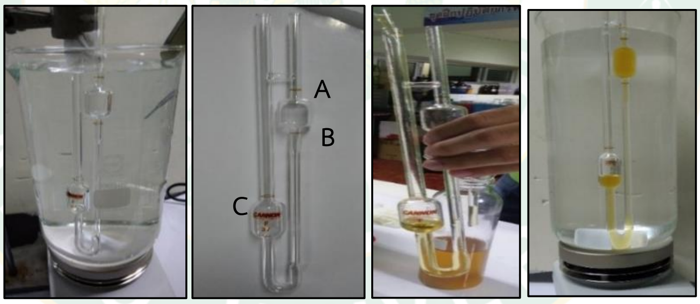
3. ติดตั้งหลอดวัดความหนืดชนิดคาปิลลารี่กับขาตั้งลงในบีกเกอร์ โดยแช่ไว้ในน้ำร้อนประมาณ 10 minute

4. ทำการปิเปตน้ำมันที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C ปริมาณ15 ml บรรจุลงในหลอดคาปิลลารี่ จนกระทั่งถึงขีด C ที่ด้านซ้ายของหลอด

5. ดูดน้ำมันให้ขึ้นมาถึงขีดที่จุด A ทางด้านขวาบน จากนั้นปล่อยให้น้ำมันไหลลงมายังจุด B พร้อมบันทึกเวลาจากจุด A มายังจุด B

6. คำนวณผลการวิเคราะห์ค่าความหนืด ดังแสดงในสมการที่ 7

$$\text{ค่าความหนืด (cSt)} = \text{เวลา (sec)} \times 0.958\ (mm^2/s^2) \qquad \text{สมการที่ 7}$$



ภาพที่ 14 ทำการวิเคราะห์ค่าความหนืด

การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

ทำการศึกษาปัจจัยที่มีความสำคัญในการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันกับน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดปัจจัยในการศึกษา 5 ปัจจัย ได้แก่

1. ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ CaO ที่ได้จากการเผาเปลือกหอยขมเผาที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

2. ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ระดับ ที่ 1-3%wt ต่อน้ำหนักของน้ำมัน

3. อัตราส่วนโดยมวลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว ศึกษาที่ 6:1, 9:1, และ 12:1

4. อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 60 °C

5. เวลาในการทำปฏิกิริยา ที่ 1-3 ชั่วโมง

วิธีการทดลอง

1. ทำการเตรียมน้ำมันสารตั้งต้นด้วยวิธีการกรอง และกำจัดความชื้นโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100-120 °C เป็นเวลา 30 minute

2. ให้ความร้อนแก่น้ำมันที่อุณหภูมิ 60 °C กวนและให้ความร้อนด้วย Hot plate & Stirrer

3. นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากเถ้าเปลือกหอยขมเผาที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt ผสมกับเมทานอลที่อัตราส่วน 6:1 เป็นเวลา 30 minute

4. จากนั้นเทลงในน้ำมันที่อุณหภูมิ 60 °C พร้อมทั้งควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง

4. ทำการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกด้วยวิธีการปั่นเหวี่ยง ที่ความเร็วรอบ 2500 rpm เป็นเวลา 10 minute

5. นำน้ำมันที่ผ่านการปั่นเหวี่ยงใส่กรวยแยก ตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการแยกตัวของไบโอดีเซล และกลีเซอรีน

6. ไบโอดีเซลที่ได้นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 75 °C เพื่อระเหยเอาเมทานอลออก

7. ทำการทดลองในข้อที่ 2-6 ซ้ำ โดยเปลี่ยนอุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 800 และ 900 °C ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 2-3%wt อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 9:1 และ 12:1 เวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 2-3 ชั่วโมง

8. ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซล ตามวิธีที่กำหนดไว้ในหัวข้อถัดไป

โดยวิธีการทดลองในข้างต้น สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 15

ภาพที่ 15 การผลิตไบโอดีเซล

การวิเคราะห์คุณสมบัติไบโอดีเซล

เนื่องจากในการวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยการสังเคราะห์ CaO จากเปลือกหอยขมเผาที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 ℃ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว ในการวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ จึงมีวิธีการเลือกตัวอย่างที่ผ่านคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้

1. ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลเบื้องต้น ได้แก่ ปริมาณผลผลิตของน้ำมันไบโอดีเซล ค่าความเป็นกรด ค่าความหนาแน่น ค่า pH และจุดวาบไฟ

2. จากนั้นจะเลือกตัวอย่างที่ผ่านคุณสมบัติของค่าความเป็นกรด (<0.5 mg KOH/g) และค่าความหนาแน่น (860-900 kg/m^3) ไปทำการวิเคราะห์ค่าความร้อน และปริมาณเมทิลเอสเทอร์ต่อไป

3. ตัวอย่างที่ผ่านคุณสมบัติค่าวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (>96.5%) นำไปทำการวิเคราะห์ค่าความหนืด

โดยวิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติไบดีเซลในข้างต้น วิธีการทดสอบสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. การคำนวณปริมาณผลผลิตของน้ำมันไบโอดีเซล

ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลเป็นการวัดผลผลิตโดยโมลต่อปริมาตรที่ได้หลังจากการทดลองสิ้นสุดลง โดยวิธีการคำนวณปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลสามารถทำการคำนวณดังสมการที่ 8 (สุรศิษฏ์, 2556)

$$\text{ปริมาณผลผลิตของไบโอดีเซล (\%)} = \frac{A}{B} \times 100 \qquad \text{สมการที่ 8}$$

เมื่อ *A* คือ น้ำหนักน้ำมันผลผลิตที่ได้จากการทดลอง (g)

B คือ น้ำหนักน้ำมันตั้งต้นก่อนทำปฏิกิริยา (g)

2. การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด

ค่าความเป็นกรดเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการกัดกร่อนของเครื่องยนต์ น้ำมันที่มีค่าความเป็นกรดสูงจะส่งผลให้เครื่องยนต์มีอายุการใช้งานสั้นลงได้ (ศูนย์บริการวิชาการที่ 3, 2553) โดยการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด ตามมาตรฐาน ASTM D664 แสดงดังภาพที่ 16 โดยวิธีการทดสอบสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. ทำการชั่งน้ำหนักน้ำมันตัวอย่าง 5 g เติมตวงไอโซโพรพิล 25 ml และหยดฟีนอล์ฟทาลีน 3 – 5 unit พร้อมเขย่ารวมกันในขวดรูปชมพู่

2. ทำการไทเทรตด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ความเข้มข้น 0.1 N ใส่บิวเรตพร้อมเปิดไล่อากาศออกเพื่อให้พร้อมใช้งาน และจดค่าเริ่มต้นเอาไว้

3. หยดสารละลายด่างจากบิวเรตลงในขวดรูปชมพู่พร้อมเขย่าให้เข้ากัน

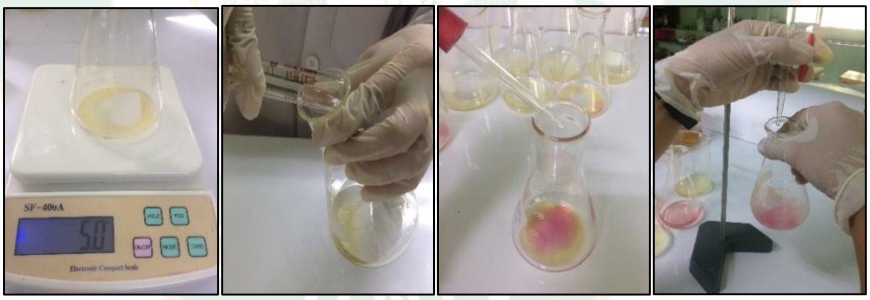
4. สังเกตสีของน้ำมันจะเปลี่ยนเป็นสีชมพูหรือสีม่วงถาวร หยุดทำการไทเทรต

5. บันทึกปริมาณสารไทเทรต

6. คำนวณค่าความเป็นกรด จะได้ค่าความเป็นกรด mg KOH/g แสดงดังสมการที่ 9

$$A.V. = \frac{56.1 \times N \times V}{m} \qquad \text{สมการที่ 9}$$

เมื่อ	*A.V.*	คือ	ค่าความเป็นกรด (mg KOH/g)
	N	คือ	ความเข้มข้นของสารละลายด่าง (N)
	V	คือ	ปริมาตรสารละลายด่างที่ใช้ไป (ml)
	m	คือ	น้ำหนักน้ำมันตัวอย่าง (g)



ภาพที่ 16 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด

3. การวิเคราะห์ความหนาแน่นของน้ำมัน

การวัดความหนาแน่นของน้ำมันพืชใช้แล้ว เป็นการศึกษาทางกายภาพ ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1298 โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้

1. ทำการให้ความเย็นแก่น้ำมันไบโอดีเซล โดยแช่ไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 15 °C

2. จากนั้นนำน้ำมันที่ผ่านการให้ความเย็นใส่ลงในกระบอกตวงขนาด 100 ml

3. ใช้ไฮโดรมิเตอร์ที่มีช่วงการวัด 700-1000 kg/m^3 ใส่ลงในกระบอกตวง โดยให้ไฮโดรมิเตอร์อยู่ตรงกลางของกระบอกตวง

4. บันทึกผลความหนาแน่นโดยอ่านจากรอยน้ำมันที่ขีดบนสุดของไฮโดรมิเตอร์

4. การวิเคราะห์ค่า pH

ค่า pH เป็นค่าที่แสดงความเป็นกรด-เบส ของสารที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาค่า pH โดยใช้เครื่องวัดพีเอชมิเตอร์ แสดงดังภาพที่ 17 โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้

1. ทำความสะอาดเซนเซอร์ของหัววัดด้วยน้ำกลั่น พร้อมทั้งทดสอบค่าคงที่ของพีเอชมิเตอร์ เช็ดให้แห้ง

2. จุ่มพีเอชมิเตอร์ให้ตัวเซนเซอร์สัมผัสกับน้ำมันไบโอดีเซล

3. รอจนกระทั่งค่าที่แสดงผลในหน้าจอหยุดนิ่ง ทำการบันทึกค่า pH ที่วัดได้

ภาพที่ 17 การวิเคราะห์ค่า pH

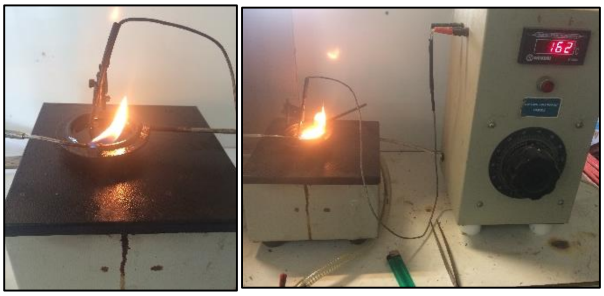
5. การวิเคราะห์จุดวาบไฟ

จุดวาบไฟเป็นจุดที่อุณหภูมิต่ำสุดที่ทำให้เชื้อเพลิงเกิดการระเหย มีจำนวนเพียงพอที่จะลุกติดไฟได้วูบหนึ่งแล้วดับเมื่อมีเปลวไฟผ่านเข้ามา โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้ แสดงดังภาพที่ 18

1. เทน้ำมันไบโอดีเซลใส่ในถ้วยของเครื่องวัดจุดวาบไฟ พร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิให้ปลายสัมผัสกับน้ำมันโดยตรง

2. ให้ความร้อนแก่น้ำมันไบโอดีเซล อุณหภูมิของน้ำมันจะสูงขึ้นเรื่อยๆ

3. สังเกตช่วงเวลาที่น้ำมันเกิดการวาบไฟ พร้อมบันทึกผลอุณหภูมิจุดวาบไฟ



ภาพที่ 18 การวิเคราะห์จุดวาบไฟ

6. การวิเคราะห์ค่าความร้อน

ค่าความร้อนของไบโอดีเซล วิเคราะห์โดยใช้เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb Calorimeter) หาค่าความร้อนของไบโอดีเซล แล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้

1. ชั่งน้ำมันมันตัวอย่าง 5 g ใส่ในถ้วยที่บรรจุในถ้วยจุดระเบิด
2. มัดลวดบอมบ์กับขาเหล็กของชุดบอมบ์ โดยใช้ความยาว 10 cm
3. จากนั้นนำถ้วยจุดระเบิด และขาเหล็กบอมบ์ที่มีลวดมัดไว้ใส่ลงในกระบอกบอมบ์
4. ทำการแล้วอัดแก๊สออกซิเจนปริมาณ 30 bar ลงในถ้วยกระบอกบอมบ์
5. เติมน้ำลงในเครื่องบอมบ์ โดยให้มีปริมาตรสูงเท่าขอบกระบอกบอมบ์
6. ป้อนข้อมูลน้ำหนักตัวอย่าง และความยาวของลวดลงในโปรแกรมบอมบ์ จากนั้นเริ่มทำการหาค่าความร้อน โดยกดปุ่มเปิดสวิตซ์ที่เครื่องบอมบ์ และกดปุ่ม Start ที่โปรแกรม
7. หลังสิ้นสุดการหาค่าความร้อนด้วยเครื่องบอมบ์ นำลวดที่เหลือจากการเผาไหม้มาวัดความยาว และป้อนลงในโปรแกรมเพื่อทำการคำนวณค่าความร้อนที่ทดสอบได้
8. บันทึกผลค่าความร้อนที่ได้จากเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์

7. การวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์

ปริมาณเมทิลเอสเทอร์เป็นค่าที่แสดงถึงความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ โดยใช้ Methyl heptadecanoate (C-17) เป็นสารละลายมาตรฐาน ทำการเตรียมโดยใช้ Methyl heptadecanoate จำนวน 0.5 g ละลายใน n-heptane 50 mg เป็นสารละลายมาตรฐานในการอ้างอิงของเครื่อง อุปกรณ์ที่ใช้มีคาปิลลารี่คอลัมน์ (ความยาวของคอลัมน์ 30 m X 0.25 mm (I.D.) มีความหนาของชั้นฟิล์ม 0.25 μm) ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 10 (พัทธนันท์, 2554)

$$C = \frac{\left(\sum A\right) - A_{EI}}{A_{EI}} \times \frac{C_{EI} \times V_{EI}}{m} \times 100\% \qquad \text{สมการที่ 10}$$

เมื่อ C คือ ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (%)

ΣA คือ พื้นที่ใต้กราฟทั้งหมดที่วิเคราะห์จากเครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟฟี 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)

8. การวิเคราะห์ค่าความหนืด

การศึกษาค่าความหนืดของน้ำมันไบโอดีเซล เป็นการศึกษาทางกายภาพ สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. ทำการให้ความร้อนแก่น้ำมันที่อุณหภูมิ 40 °C

2. ใส่น้ำกลั่นลงในบีกเกอร์ขนาด 5 L พร้อมให้ความร้อนแก่น้ำกลั่นจนกระทั่งมีอุณหภูมิ 40 °C

3. ติดตั้งหลอดวัดความหนืดชนิดคาปิลลารี่กับขาตั้งลงในบีกเกอร์ โดยแช่ไว้ในน้ำร้อนประมาณ 10 minute

4. ปิเปตนำน้ำมันที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C 15 mL บรรจุลงในหลอดคาปิลลารี่ จนกระทั่งถึงขีด C ที่ด้านซ้ายของหลอด

5. ดูดน้ำมันให้ขึ้นมาถึงขีดที่จุด A ทางด้านขวาบน จากนั้นปล่อยให้น้ำมันไหลลงมายังจุด B พร้อมบันทึกเวลาจากจุด A มายังจุด B

6. คำนวณผลการวิเคราะห์ค่าความหนืด ดังแสดงในสมการที่ 7

การนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำ

ทำการเลือกผลการวิเคราะห์ผลผลิตไบโอดีเซลที่มีปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่เป็นไปตามมาตรฐาน EN 14103 มาทำการทดลอง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเดิมซ้ำเรื่อยๆ วิธีการทดลอง ดังนี้

1. หลังสิ้นสุดปฏิกิริยาทำการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกวิธีการกรองด้วยกระดาษกรอง

2. นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่บนกระดาษกรองมาแช่ด้วยเมทานอล เพื่อชะล้างสารตกค้าง

3. ทำการกรองตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากเมทานอลด้วยกระดาษกรอง

4. นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการกรองจากเมทานอลไปทำการอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

5. นำเถ้าจากเปลือกหอยขมเผาผสมกับเมทานอล เป็นเวลา 30 minute จากนั้นเทลงในน้ำมันที่อุณหภูมิ 60 °C พร้อมทั้งควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ โดยอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองซ้ำนั้นเลือกจากเงื่อนไขที่มีปริมาณเมทิลเอสเทอร์มากกว่า 96.5%

6. ทำการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกด้วยวิธีการกรองด้วยกระดาษกรอง

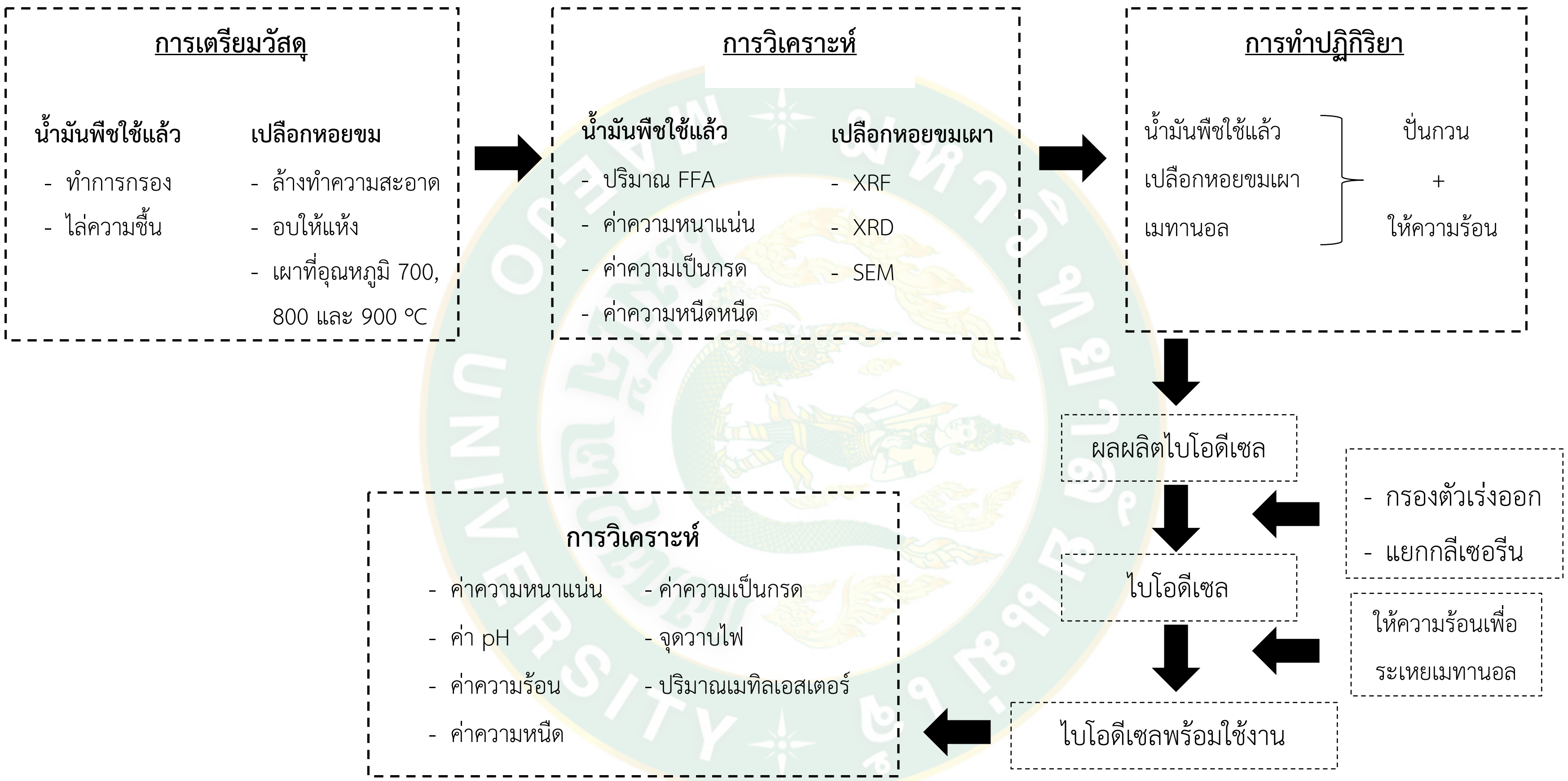
7. นำน้ำมันที่ได้จากการทำปฏิกิริยาใส่กรวยแยก ตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการแยกตัวของไบโอดีเซลและกลีเซอรีน

8. ไบโอดีเซลที่ได้นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 105 °C เพื่อระเหยเอาเมทานอลออก

9. ทำการทดลองการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำ จนกระทั่งตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเดิมไม่สามารถสังเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซลได้ต่อไป

10. ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซล ตามวิธีที่กำหนดไว้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติไบโอดีเซล ในบทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้เปลือกหอยขมตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้เปลือกหอยขมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

บทที่ 4
ผลและการอภิปรายผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้ CaO จากเปลือกหอยขมเผาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยแบ่งผลการศึกษาออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนที่ 2 การศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันพืชใช้แล้ว ส่วนที่ 3 การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ส่วนที่ 4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซล และส่วนที่ 5 การนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำ ในแต่ละส่วนสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการศึกษาคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่ได้จากการเผาเปลือกหอยขม ณ อุณหภูมิการเผา 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของเปลือกหอยขมเผา พบว่า เถ้าของเปลือกหอยขมที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ 700 °C จะมีสีเทาและมีเนื้อหยาบ ส่วนเถ้าของเปลือกหอยขมที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ 800 และ 900 °C จะมีสีขาวและมีเนื้อละเอียดกว่าที่อุณหภูมิการเผา 700 °C ดังแสดงในภาพที่ 20

(ก.) 700 °C (ข.) 800 °C (ค.) 900 °C

ภาพที่ 20 ลักษณะของเถ้าเปลือกหอยขมเผาที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ (ก.) 700, (ข.) 800 และ (ค.) 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการเผามีผลต่อสีของเถ้าเปลือกหอยขม เนื่องเปลือกหอยขมก่อนทำการเผามีสีดำ เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (700 °C) ทำให้สารอินทรีย์ที่สะสมอยู่ภายในเปลือกหอยขมเกิดการสลายตัวได้ไม่สมบูรณ์ เถ้าที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการเผาจึงยังคงมีสีเทาและมีเนื้อหยาบเป็นเม็ดเล็กๆ แต่เมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้น (800 และ 900 °C) สารอินทรีย์ที่สะสมอยู่ภายในเปลือกหอยขมเกิดการสลายตัวได้มากยิ่งขึ้น จึงส่งผลให้เถ้าที่ได้มีสีขาวและมีความละเอียดมากยิ่งขึ้น เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากทำการเผา พบว่ามีผลสอดคล้องกัน เนื่องจากที่อุณหภูมิการเผาต่ำ (700 °C) น้ำหนักของเถ้าเปลือกหอยขมจะลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่วนที่อุณหภูมิการเผาสูงขึ้นจะมีน้ำหนักของเถ้าเปลือกหอยขมลดลงจากเดิมค่อนข้างมาก ดังแสดงในตารางที่ 3 ทั้งนี้สาเหตุของการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดจากการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกหอยขมไปเป็นแคลเซียมออกไซด์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

ตารางที่ 3 ลักษณะทางกายภาพของเถ้าเปลือกหอยขมที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

อุณหภูมิการเผา (°C)	ลักษณะทางกายภาพของเปลือกหอยขมเผา			
	น้ำหนักก่อนการเผา (g)	น้ำหนักหลังการเผา (g)	สี	เนื้อ
700	100	89.84	เทา	เนื้อหยาบ
800	100	53.81	ขาว	เนื้อละเอียด
900	100	46.61	ขาว	เนื้อละเอียด

2. ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี

ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าเปลือกหอยขม ได้ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF เพื่อหาชนิดและปริมาณของธาตุในสารตัวอย่าง เทคนิค XRD เพื่อการวิเคราะห์สารประกอบและโครงสร้างผนึกของวัสดุ และเทคนิค SEM เพื่อศึกษาลักษณะสัณฐานของวัสดุในระดับจุลภาค โดยผลการวิเคราะห์สามารถอธิบายได้ดังนี้

1.) ผลการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของธาตุในสารตัวอย่าง (XRF)

จากการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของธาตุในเถ้าเปลือกหอยขมที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ 700-900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยเครื่อง XRF พบว่าในเถ้าเปลือกหอยขมมีองค์ประกอบธาตุหลัก คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ตามลำดับ โดยเถ้าเปลือกหอยขมที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ 700 °C มี

ปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ 59.499% แต่เมื่ออุณหภูมิการเผาเปลือกหอยขมเพิ่มขึ้นที่ 800 ℃ จะพบปริมาณแคลเซียมออกไซด์เพิ่มขึ้นเป็น 70.113% จึงกล่าวได้ว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้นปริมาณแคลเซียมออกไซด์จะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของสุภากร (สุภกร และคณะ, 2556) ในขณะเดียวกันที่อุณหภูมิการเผาเปลือกหอยขม 900 ℃ กลับพบว่ามีปริมาณแคลเซียมออกไซด์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (73.881%) แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิการเผา 800 ℃ เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์แคลเซียมออกไซด์จากแคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกหอยขม ทั้งนี้ปริมาณธาตุต่างชนิดต่างๆ จากการเผาเปลือกหอยขมแสดงดังตารางที่ 4

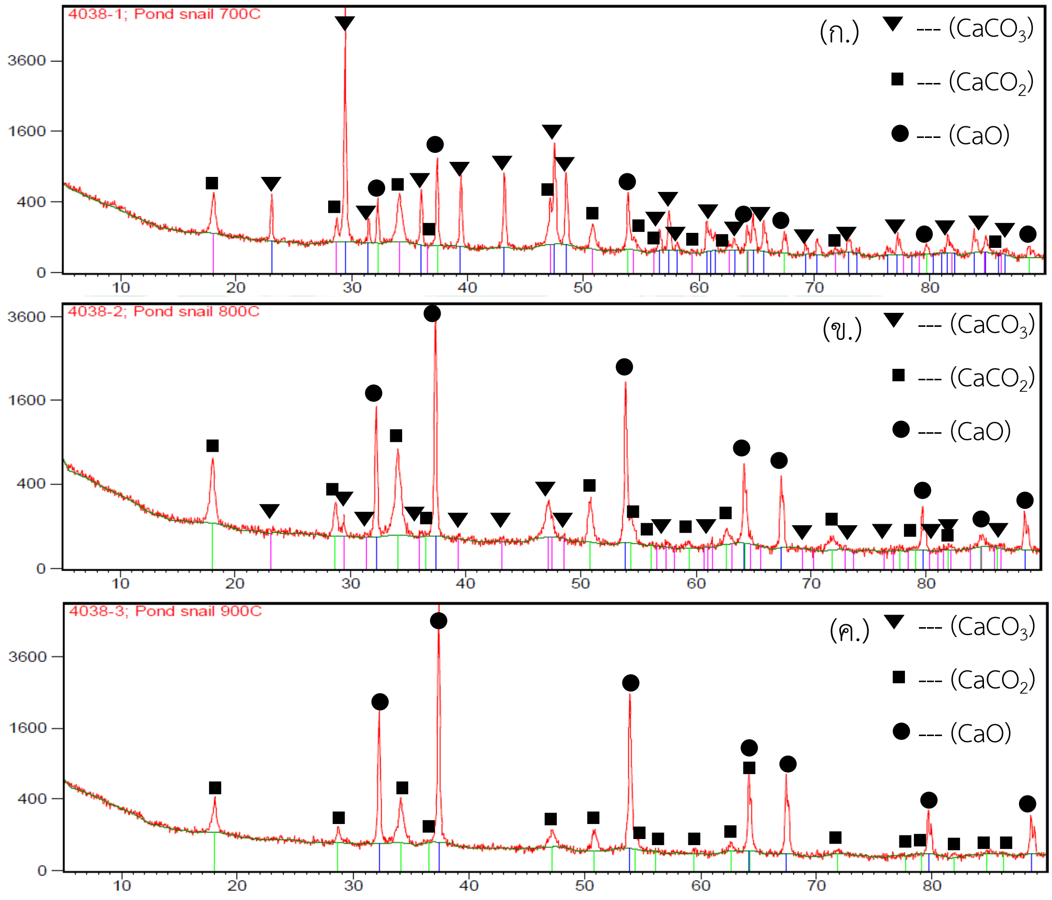
ตารางที่ 4 แสดงปริมาณธาตุจากการเถ้าของเปลือกหอยขมที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ 700, 800 และ 900 ℃ เป็นเวลา 4 h

สารประกอบ	อุณหภูมิการเผา 700 ℃	อุณหภูมิการเผา 800 ℃	อุณหภูมิการเผา 900 ℃
CaO (%)	59.499	70.113	73.881
MgO (%)	0.271	0.362	0.329
Al_2O_3 (%)	0.237	0.159	0.162
SiO_2 (%)	0.123	0.109	-

2.) ผลการวิเคราะห์สารประกอบและโครงสร้างผลึกของวัสดุด้วยเทคนิคการกระจายของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

เพื่อยืนยันถึงผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของธาตุในเถ้าเปลือกหอยขมโดยเทคนิค XRF จึงนำตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าของเปลือกหอยขมที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ 700-900 ℃ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง มาทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่อง XRD พบว่าในเปลือกหอยขมจะมีโครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นหลัก ซึ่งมีผลึกแบบอะราโกไนต์ (Aragonite) จะมีลักษณะคล้ายผลึกหกเหลี่ยมเป็นแท่งยาว ปลายเรียวแหลมเหมือนดินสอหรือที่เรียกว่าลักษณะแบบออร์โธรอมบิก (Orthorhombic) (สุภกร และคณะ, 2556) เมื่อทำการวิเคราะห์เถ้าของเปลือกหอยขมที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ 700 ℃ พบว่ายังคงมีตำแหน่งของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) เป็นผลมาจากอุณหภูมิการเผาต่ำจึงส่งผลให้การสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) เกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ โดยสามารถตรวจพบพีคที่ตำแหน่ง 29.43 °, 39.46 °, 43.23 °, 47.46 ° และ 48.53 ° (เปรียบเทียบกับฐานข้อมูล JCPDS เลขที่ 41- 1475) แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาเปลือกหอยขมเป็น 800 และ 900 ℃ พบว่าการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์มีความ

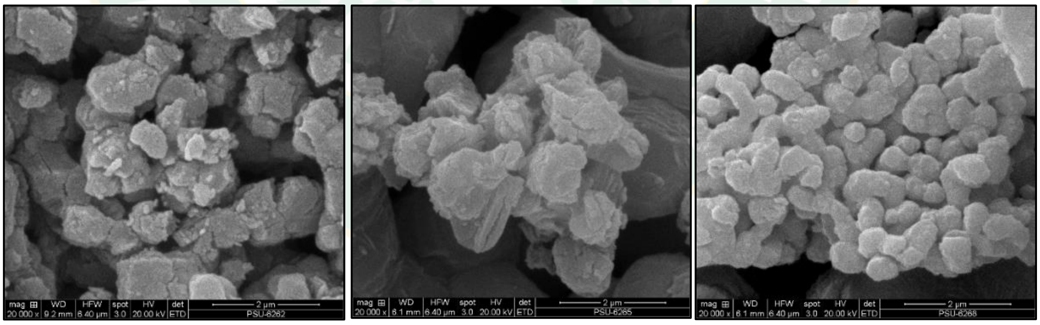
คล้ายคลึงกันที่ตำแหน่ง 32.23 °,37.41 °, 53.93 °, 64.26 °, 67.48 °, 79.1 ° และ 88.56 ° (เปรียบเทียบกับฐานข้อมูล JCPDS เลขที่ 41- 1475) ซึ่งตำแหน่งการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ดังกล่าวนั้นมีความสอดคล้องกับการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่ได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบ จากผลการทดสอบดังกล่าวจะเห็นว่าแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ในเปลือกหอยขมจะเกิดการสลายตัวเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิการเผาสูงขึ้น (สุภกร และคณะ, 2556; สุภกร และคณะ, 2558) ซึ่งเมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้นจะพบโครงสร้างผลึกของแคลเซียมออกไซด์ได้มากยิ่งขึ้น และยังพบว่ามีโครงสร้างผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตลดลง ทั้งยังสอดคล้องกับผลการศึกษาของ อัจฉรา และคณะ (2557) ที่กล่าวว่าแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) จะเกิดการสลายตัวเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ได้มากยิ่งขึ้นเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิมากกว่า 650 °C ผลการศึกษาโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าเปลือกหอยขมเผาที่อุณหภูมิ 700-900 °C ด้วยเครื่อง XRD แสดงภาพที่ 21



ภาพที่ 21 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ภายในเถ้าเปลือกหอยขมที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ (ก.) 700, (ข.) 800 และ (ค.) 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

3.) ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างภายนอกของวัสดุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

เมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวภายนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าของเปลือกหอยขมที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ 700-900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยเครื่อง SEM ผลปรากฏดังภาพที่ 22 (ก-ค) อนุภาคขนาด 2 µm กำลังขยาย 20,000 เท่า พบว่าเถ้าของเปลือกหอยขมที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ 700 และ 800 °C จะมีโครงสร้างที่คล้ายคลึงกันคือมีลักษณะเป็นเม็ดอนุภาคขนาดใหญ่ มีรอยขรุขระที่เกิดจากการสลายตัวของ $CaCO_3$ กระจายตัวอยู่บนพื้นผิว และมีรูพรุนขนาด 3.487 nm และ 3.933 nm ตามลำดับ ทั้งนี้เกิดจากความร้อนของอุณหภูมิการเผาส่งผลให้สารอินทรีย์ที่อยู่ภายในเปลือกหอยขมเกิดการสลายตัว และทำให้โครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) เปลี่ยนเป็นโครงสร้างของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาเปลือกหอยขมเป็น 900 °C พบว่าเถ้าที่ได้นั้นจะมีอนุภาคขนาดเล็กลง จับตัวเป็นก้อน และมีขนาดของรูพรุนเพิ่มขึ้นเป็น 5.426 nm เนื่องจากความร้อนในการเผาที่สูงขึ้นจะส่งผลให้อนุภาคมีขนาดเล็กลง และมีขนาดของรูพรุนกว้างขึ้น ทำให้รูพรุนที่มีขนาดใกล้เคียงกันรวมตัวกันเป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ขนาดของอนุภาคจึงเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน (สุรศิษฏ์, 2556) ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น (ศิริวัฒนา และคณะ, 2556ก; จักรพงศ์ และคณะ, 2556) ทั้งนี้อุณหภูมิการเผาที่สูงขึ้นจะทำให้อนุภาคมีความเปราะแตกหักได้ง่าย และสามารถบดละเอียดได้ง่ายกว่าเปลือกหอยเผาที่อุณหภูมิต่ำ (จักรพงศ์ และคณะ, 2556; สุภกร และคณะ, 2556) เนื่องจากมีรูพรุนกระจายอยู่บนพื้นผิวมากกว่าการเผาที่อุณหภูมิต่ำ



(ก.) 700 °C (ข.) 800 °C (ค.) 900 °C

ภาพที่ 22 ลักษณะพื้นผิวของเถ้าเปลือกหอยขมที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ (ก.) 700, (ข.) 800 และ (ค.) 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

การศึกษาคุณสมบัติเคมีและทางกายภาพของน้ำมันพืชใช้แล้ว

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำมันพืชใช้แล้ว เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซล โดยทำการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระด้วยวิธีการไทเทรท การวัดค่าความหนาแน่น การวัดค่าความเป็นกรด และการวัดค่าความหนืด พบว่ามีปริมาณกรดไขมันอิสระ (FFA) 0.49% ซึ่งเป็นไปมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงานที่กำหนดให้ปริมาณกรดไขมันอิสระก่อนทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชั่นควรมีค่าน้อยกว่า 3% (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน, 2552ข; จักรพงศ์ และคณะ, 2556) เนื่องจากจะส่งผลต่อปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้และปริมาณกลีเซอรีนที่เกิดขึ้นหลังสิ้นสุดการทำปฏิกิริยา ส่วนค่าความหนาแน่นเป็นค่าที่ระบุคุณสมบัติเบื้องต้นทางกายภาพของน้ำมันไบโอดีเซล โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1298 ที่อุณหภูมิ 15 °C ซึ่งกำหนดให้ค่าความหนาแน่นมีค่าอยู่ในช่วง 860-900 kg/m^3 จากการวิเคราะห์พบว่าน้ำมันพืชใช้แล้วมีค่าความหนาแน่น 920 kg/m^3 ในส่วนของค่าความเป็นกรดเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในไบโอดีเซล ทดสอบด้วยวิธีการไทเทรท ซึ่งทางกรมธุรกิจพลังงานได้กำหนดให้ค่าความเป็นกรดมีค่าน้อยกว่า 0.5 mg KOH/g เนื่องจากค่าความเป็นกรดในน้ำมันที่สูงเกินไปจะส่งผลให้ระบบจ่ายน้ำมันและเครื่องยนต์มีอายุการทำงานสั้นลง (ศูนย์บริการวิชาการที่ 3, 2553) จากการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของน้ำมันพืชใช้แล้วพบว่ามีค่า 1.07 mg KOH/g และค่าความหนืดเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการต้านทานการไหลและบอกถึงคุณสมบัติในการหล่อลื่นพื้นผิวใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D445 ที่อุณหภูมิ 40 °C โดยกรมธุรกิจพลังงานได้กำหนดให้ค่าความหนืดของน้ำมันไบโอดีเซลมีค่าในช่วง 3.5-5.0 cSt (ศูนย์บริการวิชาการที่ 3, 2553) จากการวิเคราะห์ค่าความหนืดของน้ำมันพืชใช้แล้วพบว่ามีค่าอยู่ที่ 47.85 cSt จากนั้นจึงนำน้ำมันพืชใช้แล้วที่ผ่านการวิเคราะห์ในข้างต้นมาทำการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด CaO จากเถ้าของเปลือกหอยขมที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

การศึกษาปริมาณผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้เปลือกหอยขมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

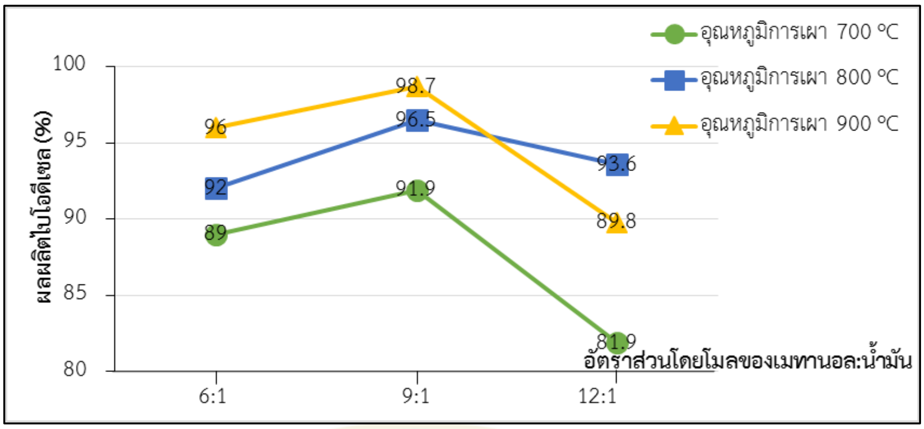
ในการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจากน้ำมันพืชใช้แล้ว ได้แก่ อุณหภูมิในการสังเคราะห์ CaO จากเปลือกหอยขม อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา และเวลาในการทำปฏิกิริยา สามารถอธิบายได้ไปนี้

1. ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน และอุณหภูมิการเผาเปลือกหอยขมที่มีต่อผลผลิตไบโอดีเซล

จากการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 6:1, 9:1 และ 12:1 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเปลือกหอยขมที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาของทุกอัตราส่วนคือ 2 ชั่วโมง โดยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือ 2%wt ทำการควบคุมอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 60 °C และมีอัตราการกวน 300 rpm ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 5 และภาพที่ 23

ตารางที่ 5 ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากการศึกษาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1, 9:1 และ 12:1 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยขมเผาด้วยอุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2%wt มีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง

อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	อุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%)	ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซล (%)
6:1	700	2	2%	89
6:1	800	2	2%	92
6:1	900	2	2%	96
9:1	700	2	2%	91.9
9:1	800	2	2%	96.5
9:1	900	2	2%	98.7
12:1	700	2	2%	81.9
12:1	800	2	2%	93.6
12:1	900	2	2%	89.8



ภาพที่ 23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้จากน้ำมันพืชใช้แล้วกับเมทานอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยขมเผาที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากการเติมปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2%wt ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง โดยทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1, 9:1 และ 12:1

จากภาพที่ 23 แสดงปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลจากการทำปฏิกิริยาอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1, 9:1 และ 12:1 จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยขมเผาที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C โดยเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันกับอุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 700 °C พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1, 9:1 และ 12:1 จะมีปริมาณผลิตไบโอดีเซลมากกว่า 80% โดยจะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดที่ 91.9% จากการทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1 และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิการเผา 800 °C พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1, 9:1 และ 12:1 จะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลมากกว่า 90% โดยที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1 จะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลสูงที่ 96.5% ในขณะที่อุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 900 °C พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1, 9:1 และ 12:1 จะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลมากกว่า 89% โดยจะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุด 98.7% จากการทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1 จากผลการศึกษาข้างต้น จะพบว่าที่อุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา 700, 800 และ 900 °C เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเพิ่มขึ้นจาก 6:1 เป็น 9:1 ปริมาณของผลผลิตไบโอดีเซลจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน และเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเพิ่มขึ้นเป็น 12:1 ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลกลับมีค่าลดลง เนื่องจากอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่เพิ่มขึ้นจนมากเกินไป จะทำให้ความสามารถในการละลายตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาจึงลดลง ส่งผลให้ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้มีค่าลดลง เกิดปริมาณสบู่เพิ่มขึ้น (Suchada et al., 2015) จึงกล่าวได้ว่าอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล

ต่อน้ำมันที่ให้ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดจากการศึกษาครั้งนี้คือ 9:1 ซึ่งคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Achanai et al. (2014) และ Guan et al., (2015) ที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่การศึกษาเดียวกัน

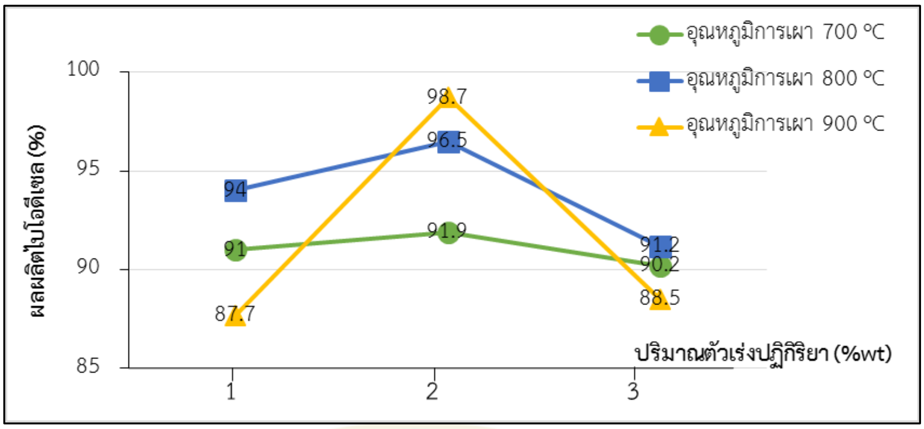
ทั้งนี้เมื่อทำการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยากับอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 6:1 พบว่าที่อุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา 700, 800 และ 900 °C จะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลมากกว่า 89% โดยจะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลจะมีค่าสูงสุดที่ 96% เมื่อใช้อุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 900 °C ในส่วนของการพิจารณาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1 ณ อุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา 700, 800 และ 900 °C จะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลมากกว่า 90% โดยการใช้อุณหภูมิที่เผาตัวเร่งปฏิกิริยา 900 °C จะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดที่ 98.7% และเมื่อทำการพิจารณาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 12:1 พบว่าที่อุณหภูมิการเผาของตัวเร่งปฏิกิริยา 700, 800 และ 900 °C จะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลมากกว่า 80% โดยที่อุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา 800 °C จะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลจะมีค่าสูงสุดที่ 93.6% จากผลการศึกษาข้างต้น พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 และ 9:1 จะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเผาที่อุณหภูมิ 900 °C ในขณะที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 12:1 จะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเผาที่อุณหภูมิ 800 °C จึงกล่าวได้ว่าอุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการศึกษาครั้งนี้คือ 900 °C ทำการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เงื่อนไขการศึกษาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 9:1 ในหัวข้อถัดไป

2. ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิการเผาเปลือกหอยขมที่มีต่อผลผลิตไบโอดีเซล

จากการศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเปลือกหอยขมที่เผาด้วยอุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ 1%wt, 2%wt และ 3%wt ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันคือ 9:1 ทำการควบคุมอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 60 °C และมีอัตราการกวน 300 rpm ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 6 และภาพที่ 24

ตารางที่ 6 ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ 1%wt, 2%wt และ 3%wt โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยขมเผา 700, 800 และ 900 ℃ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันคือ 9:1

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%)	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	อุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา (℃)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซล (%)
1	9:1	700	2	91
1	9:1	800	2	94
1	9:1	900	2	87.7
2	9:1	700	2	91.9
2	9:1	800	2	96.5
2	9:1	900	2	98.7
3	9:1	700	2	90.2
3	9:1	800	2	91.2
3	9:1	900	2	88.5



ภาพที่ 24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้จากน้ำมันพืชใช้แล้วกับเมทานอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยขมเผาที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากการเติมปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt, 2%wt และ 3%wt ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง โดยทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1

จากภาพที่ 24 แสดงปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่การใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt, 2%wt และ 3%wt จากการเผาเปลือกหอยขมที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C โดยเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยากับอุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 700 °C พบว่าที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt, 2%wt และ 3%wt จะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลมากกว่า 90% โดยที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2%wt นั้นจะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดที่ 91.90% และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิของการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา 800 °C พบว่าที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt, 2%wt และ 3%wt จะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลมากกว่า 91% โดยจะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดที่ 96.5% จากการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2% ในส่วนของการพิจารณาที่อุณหภูมิของการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 900 °C พบว่าจากการเติมปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt, 2%wt และ 3%wt นั้นจะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลมากกว่า 87% โดยที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2%wt จะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดที่ 98.7% จากผลการศึกษาข้างต้น พบว่าที่อุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา 700, 800 และ 900 °C เมื่อปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 1%wt เป็น 2%wt ส่งผลให้ปริมาณของผลผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเป็น 3%wt ปริมาณของผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้กลับมีค่าลดลง ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากตัวเร่งปฏิกิริยามีลักษณะเป็นของแข็ง และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากเกินไปส่งผลให้ความหนืดของของผสมระหว่างน้ำมันสารตั้งต้น เมทานอล และตัวเร่งปฏิกิริยา จะมีค่าเพิ่มขึ้น การกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ยาก ผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้จึงมีค่าลดลง (ณัฐชยา และคณะ, 2555) จึงกล่าวได้ว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการศึกษาครั้งนี้คือ 2%wt

ทั้งนี้เมื่อทำการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 1%wt พบว่าที่อุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา 700, 800 และ 900 °C จะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลมากว่า 87% โดยที่อุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา 800 °C จะสามารถให้ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลได้สูงสุดที่ 94% และเมื่อทำการพิจารณาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 2%wt พบว่าที่อุณหภูมิของการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา 700, 800 และ 900 °C จะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลมากว่า 91% โดยจะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดที่ 98.7% จากการใช้อุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 900 °C และจากการพิจารณาที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3%wt พบว่าที่อุณหภูมิของการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา 700 , 800 และ 900 °C จะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลมากว่า 88% โดยอุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 800 °C สามารถให้ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลได้สูงสุดที่ 91.2% จากผลการศึกษาข้างต้น พบว่าที่การใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt และ 3 %wt จะมีปริมาณไบโอดีเซลสูงสุดจากการใช้อุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 800 °C ส่วนที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2%wt จะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลสูงที่สุดจากการใช้อุณหภูมิในการเผาที่ 900 °C จากผลการศึกษาข้างต้นทำให้ทราบว่าที่การเติมปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2%wt ของทุกอุณหภูมิการเผาจะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลมากกว่า 95% และจะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดที่ 98.70% จากการใช้อุณหภูมิของการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 900 °C จึงทำการศึกษาระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยใช้เงื่อนไขการศึกษาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 9:1 และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 2%wt ในหัวข้อถัดไป

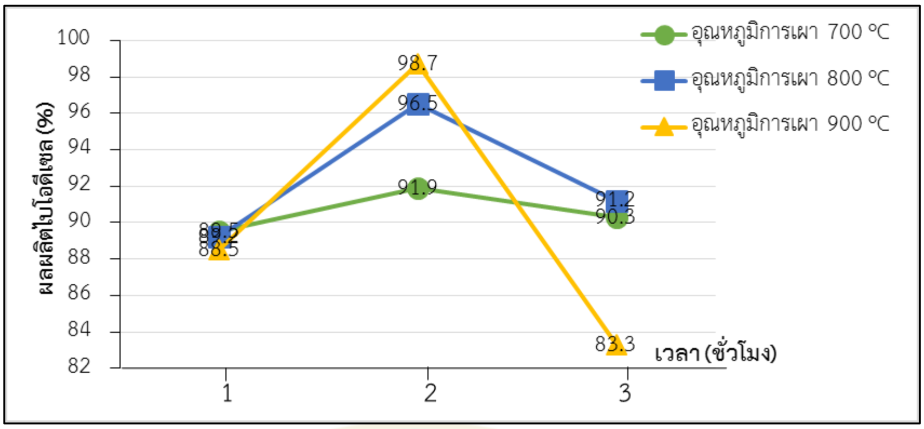
3. ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา และอุณหภูมิการเผาเปลือกหอยขมที่มีต่อผลผลิตไบโอดีเซล

จากการศึกษาระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 1, 2 และ 3 ชั่วโมง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเปลือกหอยขมที่เผาด้วยอุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ 2%wt อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันคือ 9:1 ทำการควบคุมอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 60 °C และมีอัตราการกวน 300 rpm ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 7 และภาพที่ 25

ตารางที่ 7 ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากการศึกษาระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 1, 2 และ 3 ชั่วโมง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยขมเผา 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ 2%wt ณ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน คือ 9:1

เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	อุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา (°C)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%)	ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซล (%)
1	9:1	700	2	89.5
1	9:1	800	2	89.2
1	9:1	900	2	88.5
2	9:1	700	2	91.9
2	9:1	800	2	96.5
2	9:1	900	2	98.7
3	9:1	700	2	90.3
3	9:1	800	2	91.2
3	9:1	900	2	83.3

MAEJO UNIVERSITY



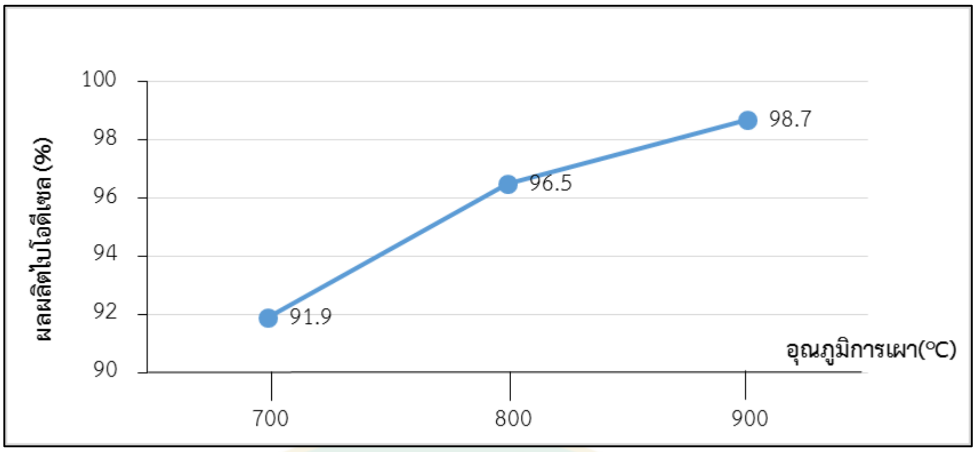
ภาพที่ 25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้จากน้ำมันพืชใช้แล้วกับเมทานอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยขมเผาที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากการเติมปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2%wt ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 1-3 ชั่วโมง โดยทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1

จากภาพที่ 25 แสดงปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่การใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 และ 3 ชั่วโมง จากการเผาเปลือกหอยขมที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C โดยเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยากับอุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 700 °C พบว่าที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง จะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลมากกว่า 89% โดยที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง สามารถให้ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดที่ 91.9% และเมื่อทำการพิจารณาที่อุณหภูมิการเผา 800 °C พบว่าที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง จะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลมากกว่า 89% โดยจะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดที่ 96.50% จากระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง และจากการพิจารณาที่อุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา 900 °C จะพบว่าที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 1, 2 และ 3 ชั่วโมง จะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลมากกว่า 83% โดยที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง สามารถให้ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดที่ 98.7% จากผลการศึกษาข้างต้น พบว่าที่อุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา 700, 800 และ 900 °C เมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 1 ชั่วโมง เป็น 2 ชั่วโมง จะส่งผลให้ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเป็น 3 ชั่วโมง ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้กลับมีค่าลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันนั้นเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับได้ การทำปฏิกิริยาที่ระยะเวลานานเกินไปจะส่งผลให้เกินสภาวะสมดุลของระบบ ปริมาณผลผลิตที่ได้จะมีค่าลดลง และเกิดปริมาณสบู่เพิ่มขึ้น (รุ่งทิพย์, 2557) จึงกล่าวได้ว่าระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการศึกษาครั้งนี้คือ 2 ชั่วโมง

ทั้งนี้เมื่อทำการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยากับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 1 ชั่วโมง พบว่าที่อุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา 700, 800 และ 900 °C จะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลมากกว่า 88% โดยการใช้อุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 700 และ 800 °C จะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นที่ประมาณ 89% และเมื่อทำการพิจารณาที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 2 ชั่วโมง พบว่าที่อุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา 700, 800 และ 900 °C จะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลมากกว่า 90% โดยที่อุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา 900 °C จะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดที่ 98.7% และจากการพิจารณาที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง จะพบว่าที่อุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา 700, 800 และ 900 °C จะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลมากกว่า 83% โดยการใช้อุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 700 และ 800 °C จะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ประมาณ 91% จากผลการศึกษาข้างต้น พบว่าที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง จะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดจากการใช้อุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทั้งสองอุณหภูมิ คือ 700 และ 800 °C ส่วนที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง อุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถให้ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดคือ 900 °C โดยจะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลสูงถึง 98.70% จึงทำการศึกษาเงื่อนไขของอุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถให้ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุด จากเงื่อนไขของการทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือ 2%wt และกำหนดให้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 2 ชั่วโมง ในหัวข้อถัดไป

4. ผลการศึกษาอุณหภูมิการเผาของตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการศึกษาอุณหภูมิของการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยขมที่ 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ 2%wt ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันคือ 9:1 ทำการควบคุมอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 60 °C และมีอัตราการกวน 300 rpm แสดงดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตไบโอดีเซลกับอุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

จากภาพที่ 26 แสดงปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลจากการทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1 ที่การใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2%wt ที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C พบว่าที่อุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสามอุณหภูมิจะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลมากกว่า 91% โดยปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลจะมีค่าสูงสุดที่ 98.7% จากการใช้อุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 900 °C ทั้งนี้จากผลการศึกษาในข้างต้นจะทำให้ทราบว่า ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิในการเผาปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 700-900 °C ในขณะเดียวกันเมื่อทำการพิจารณาที่อุณหภูมิการเผาของตัวเร่งปฏิกิริยา 800 °C จะพบว่าปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเผาที่อุณหภูมิ 900 °C เพียงเล็กน้อย (2%) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาในหัวข้อข้างต้นที่พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเปลือกหอยขมที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ 800 และ 900 °C จะมีปริมาณของ CaO 70.113% และ 73.881% ตามลำดับ และเมื่อนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้จึงมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น การใช้อุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 800 °C เพื่อสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด CaO จากเปลือกหอยขมจึงมีความเหมาะสมและมีการสิ้นเปลืองในด้านพลังงานที่น้อยกว่าการใช้อุณหภูมิในการเผาที่ 900 °C จึงกล่าวได้ว่าอุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 800 °C เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้

จากการศึกษาปริมาณผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้เปลือกหอยขมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากอุณหภูมิการเผา 800 °C จะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลสูงกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากอุณหภูมิการเผา 700 °C แต่ในขณะเดียวกันเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 900 °C ผลผลิตไบโอดีเซลจะมีค่า

เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากในเปลือกหอยขมมีส่วนประกอบหลักคือ $CaCO_3$ เมื่อได้รับความร้อนทำให้สารอินทรีย์ที่สะสมอยู่เกิดการสลายตัว จากนั้นจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบ CaO (สุภกร และคณะ, 2558) ปริมาณของสารประกอบ CaO จะเพิ่มขึ้น เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น (อัจฉรา และคณะ, 2557) จึงสอดคล้องกับผลการทดลองในข้างต้น แต่เนื่องจากผลการทดลองที่ได้ในการศึกษาครั้งนี้ ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเผาด้วยอุณหภูมิ 900 °C นั้นมีค่าสูงกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากอุณหภูมิการเผา 800 °C เพียงเล็กน้อย ในการศึกษาครั้งนี้จึงกล่าวการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากอุณหภูมิการเผา 800 °C เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ CaO จากเปลือกหอยขม โดยสภาวะที่เหมาะในการศึกษาครั้งนี้ที่ส่งผลให้ได้ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลสูง แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 สรุปสภาวะเบื้องต้นที่เหมาะสม เมื่อพิจารณาจากปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วกับเมทานอล โดยใช้เถ้าจากเปลือกหอยขมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

สภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตไบโอดีเซล	ปริมาณ (หน่วย)
อุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา	800 °C
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	2%wt
อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว	9:1
เวลาในการทำปฏิกิริยา	2 ชั่วโมง
อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	60 °C

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติไบโอดีเซล

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองประกอบด้วย การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่น ความเป็นกรด ค่า pH จุดวาบไฟ ค่าความร้อน ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ และค่าความหนืด โดยผลการวิเคราะห์สามารถอธิบายได้ดังนี้

การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้เปลือกหอยขมเผาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หลังสิ้นสุดการทำปฏิกิริยาจะนำน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดไปทำการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่น ความเป็นกรด ค่า pH จุดวาบไฟ โดยผลการวิเคราะห์ต่างๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของน้ำมันไบโอดีเซล

การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นเป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นทางกายภาพของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการทำปฏิกิริยาจากอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1, 9:1 และ 12:1 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเปลือกหอยขมที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากการเติมปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt, 2%wt และ 3%wt ทั้งนี้กำหนดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาคือ 1, 2 และ 3 ชั่วโมง ทำการควบคุมอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 60 °C และมีอัตราการกวน 300 rpm จากการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้ทั้งหมด โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1298 ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่น ของน้ำมันไบโอดีเซลที่การทดลองอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1, 9:1 และ 12:1

ลำดับ	อุณหภูมิการเผา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%)	ความหนาแน่น (kg/m^3)		
				อัตราส่วน 6:1	อัตราส่วน 9:1	อัตราส่วน 12:1
1	700	1	1	905	910	900
2		1	2	910	910	900
3		1	3	905	910	910
4		2	1	905	910	860
5		2	2	910	900	870
6		2	3	900	900	910
7		3	1	905	910	865
8		3	2	910	910	865
9		3	3	920	890	900
10	800	1	1	900	880	860
11		1	2	900	910	910
12		1	3	880	880	910
13		2	1	905	890	860

ตารางที่ 9 (ต่อ)

ลำดับ	อุณหภูมิการเผา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%)	ความหนาแน่น (kg/m^3)		
				อัตราส่วน 6:1	อัตราส่วน 9:1	อัตราส่วน 12:1
14		2	2	900	875	870
15		2	3	880	910	900
16	800	3	1	900	910	900
17		3	2	890	910	865
18		3	3	880	910	870
19		1	1	905	910	910
20		1	2	900	910	905
21		1	3	910	910	910
22		2	1	905	880	900
23	900	2	2	900	880	860
24		2	3	880	920	860
25		3	1	910	910	900
26		3	2	880	880	880
27		3	3	880	880	860

จากตารางที่ 9 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1, 9:1 และ 12:1 จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยขมที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C ที่การเติมปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt, 2%wt และ 3%wt ทั้งนี้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาคือ 1, 2 และ 3 ชั่วโมง พบว่าค่าความหนาแน่นของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้อยู่ในช่วง 860-920 kg/m^3 ทั้งนี้เมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความหนาแน่นของน้ำมันไบโอดีเซลโดยส่วนมากมีค่าลดลง เมื่อทำการพิจารณาที่อุณหภูมิการเผาของตัวเร่งปฏิกิริยา 700, 800 และ 900 °C จะพบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่อัตราส่วนเท่ากัน การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ 800 °C

จะมีผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นที่ผ่านมาตรฐานมากที่สุด โดยจะมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 880-900 kg/m^3 ซึ่งผลการวิเคราะห์ดังกล่าวเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D1298 ของกรมธุรกิจพลังงานที่กำหนดให้น้ำมันไบโอดีเซลควรมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 860-900 kg/m^3 (ศูนย์บริการวิชาการที่ 3, 2553)

2. ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของน้ำมันไบโอดีเซล

การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดเป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นทางเคมีของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการทำปฏิกิริยาจากอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1, 9:1 และ 12:1 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเปลือกหอยขมที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากการเติมปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt, 2%wt และ 3%wt ทั้งนี้กำหนดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาคือ 1, 2 และ 3 ชั่วโมง ทำการควบคุมอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 60 °C และมีอัตราการกวน 300 rpm จากการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้ทั้งหมด โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D664 ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของน้ำมันไบโอดีเซลที่การทดลองอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1, 9:1 และ 12:1

ลำดับ	อุณหภูมิการเผา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%)	ความเป็นกรด (mg KOH/g)		
				อัตราส่วน 6:1	**อัตราส่วน 9:1**	**อัตราส่วน 12:1**
1		1	1	0.77	0.88	0.22
2		1	2	0.67	0.67	0.22
3		1	3	0.65	0.77	0.34
4		2	1	0.55	0.99	0.34
5	700	2	2	0.9	0.67	0.33
6		2	3	0.43	0.9	0.34
7		3	1	0.55	0.34	0.22
8		3	2	0.33	0.34	0.22
9		3	3	0.86	0.34	0.22

ตารางที่ 10 (ต่อ)

ลำดับ	อุณหภูมิการเผา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%)	ความเป็นกรด (mg KOH/g)		
				อัตราส่วน 6:1	อัตราส่วน 9:1	อัตราส่วน 12:1
10		1	1	0.97	0.45	0.34
11		1	2	0.56	0.33	0.22
12		1	3	0.74	0.44	0.22
13		2	1	0.67	0.45	0.54
14	800	2	2	0.45	0.67	0.34
15		2	3	0.55	0.44	0.22
16		3	1	0.45	0.45	0.22
17		3	2	0.46	0.22	0.66
18		3	3	0.56	0.33	0.99
19		1	1	0.67	0.33	0.34
20		1	2	0.55	0.32	0.22
21		1	3	0.54	0.34	0.34
22		2	1	1.01	0.33	0.34
23	900	2	2	0.56	0.22	0.66
24		2	3	0.56	0.33	1.01
25		3	1	0.79	0.22	0.55
26		3	2	0.88	0.55	0.67
27		3	3	0.77	0.66	0.9

จากตารางที่ 10 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1, 9:1 และ 12:1 จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยขมเผาที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C ที่การเติมปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt, 2%wt และ 3%wt ทั้งนี้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาคือ 1, 2 และ 3 ชั่วโมง พบว่าค่าความเป็นกรด

อยู่ในช่วง 0.22-1 mg KOH/g ทั้งนี้เมื่อทำการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าค่าความเป็นกรดโดยส่วนมากจะมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการพิจารณาตัวเร่งปฏิกิริยาที่เผาด้วยอุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C จะพบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเดียวกัน การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ 800 °C จะมีการทดลองที่มีผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดที่เป็นไปตามมาตรฐานมากที่สุด โดยจะพบค่าความเป็นกรดที่เป็นไปตามมาตรฐานจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.22-0.46 mg KOH/g ซึ่งค่าความเป็นกรดในน้ำมันไบโอดีเซลเป็นตัวที่บ่งบอกถึงกรดไขมันอิสระที่ทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ (รุ่งทิพย์, 2557) โดยน้ำมันที่มีค่าความเป็นกรดมากเกินไปจะส่งผลให้ระบบจ่ายน้ำมันเกิดการกัดกร่อนเครื่องยนต์จะมีอายุการใช้งานสั้นลง (ศูนย์บริการวิชาการที่ 3, 2553) ทั้งนี้กรมธุรกิจพลังงานกำหนดให้น้ำมันไบโอดีเซลควรมีค่าเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D664 ที่กำหนดให้ความเป็นกรดควรมีค่าต่ำกว่า 0.5 mg KOH/g (ศูนย์บริการวิชาการที่ 3, 2553)

3. ผลการวิเคราะห์ค่า pH ของน้ำมันไบโอดีเซล

การวิเคราะห์ค่า pH เป็นค่าที่แสดงความเป็นกรด-เบส ในน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการทำปฏิกิริยาจากอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1, 9:1 และ 12:1 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเปลือกหอยขมที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากการเติมปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt, 2%wt และ 3%wt ทั้งนี้กำหนดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาคือ 1, 2 และ 3 ชั่วโมง ทำการควบคุมอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 60 °C และมีอัตราการกวน 300 rpm จากการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้ทั้งหมด โดยใช้เครื่องวัดพีเอชมิเตอร์ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ผลการวิเคราะห์ค่า pH ของน้ำมันไบโอดีเซลที่การทดลองอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1, 9:1 และ 12:1

ลำดับ	อุณหภูมิการเผา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%)	ค่า pH		
				อัตราส่วน 6:1	อัตราส่วน 9:1	อัตราส่วน 12:1
1	700	1	1	6.9	7.4	8.3
2		1	2	7.1	7.4	9.5
3		1	3	6.9	7.6	8
4		2	1	6.7	7	8.6

ตารางที่ 11 (ต่อ)

ลำดับ	อุณหภูมิการเผา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%)	ค่า pH		
				อัตราส่วน 6:1	**อัตราส่วน 9:1**	**อัตราส่วน 12:1**
5	700	2	2	6.4	7.6	7.9
6		2	3	7.3	8.3	7.8
7		3	1	7.6	8.7	8.5
8		3	2	8.5	8.4	8.7
9		3	3	7.5	8.6	8.7
10	800	1	1	7.3	9.1	9.8
11		1	2	7.8	8.4	8.4
12		1	3	8.8	9.6	9.4
13		2	1	6.7	7.9	8.8
14		2	2	8	8.1	9.8
15		2	3	10.5	8.3	8.5
16		3	1	8	8.8	8.6
17		3	2	7.6	8.7	10.1
18		3	3	8	8.5	10.5
19	900	1	1	8	8.7	8.6
20		1	2	8	8.2	7.9
21		1	3	7.7	8.4	6.7
22		2	1	8.5	10.2	7.5
23		2	2	7.9	9.6	8.4
24		2	3	8.3	8.2	7.9
25		3	1	7.5	9.7	7.5

ตารางที่ 11 (ต่อ)

ลำดับ	อุณหภูมิการเผา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%)	ค่า pH		
				อัตราส่วน 6:1	อัตราส่วน 9:1	อัตราส่วน 12:1
26	900	3	2	7.8	10.2	7.3
27		3	3	8.4	9.8	8.2

จากตารางที่ 11 แสดงผลการวิเคราะห์ค่า pH ของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1, 9:1 และ 12:1 จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยขมเผาที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C ที่การเติมปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt, 2%wt และ 3%wt ทั้งนี้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาคือ 1, 2 และ 3 ชั่วโมง พบว่าค่า pH ของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้อยู่ในช่วง 6.9-10.5 ทั้งนี้เมื่อทำการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้การทดลองโดยส่วนใหญ่นั้นมีค่า pH เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ 800 °C เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเบส ชนิดแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ อัจฉรา และคณะ (2557) ที่กล่าวว่าเมื่อปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบเพิ่มขึ้น ค่าความแรงของเบสจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

4. ผลการวิเคราะห์จุดวาบไฟของน้ำมันไบโอดีเซล

การวิเคราะห์จุดวาบไฟเป็นการวิเคราะห์จุดต่ำสุดของอุณหภูมิที่เชื้อเพลิงเกิดระเหยของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการทำปฏิกิริยาจากอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1, 9:1 และ 12:1 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเปลือกหอยขมที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากการเติมปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt, 2%wt และ 3%wt ทั้งนี้กำหนดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาคือ 1, 2 และ 3 ชั่วโมง ทำการควบคุมอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 60 °C และมีอัตราการกวน 300 rpm จากการวิเคราะห์จุดวาบไฟของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้ทั้งหมด โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D93 ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ผลการวิเคราะห์จุดวาบไฟของน้ำมันไบโอดีเซลที่การทดลองอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1, 9:1 และ 12:1

ลำดับ	อุณหภูมิการเผา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%)	จุดวาบไฟ (°C)		
				อัตราส่วน 6:1	อัตราส่วน 9:1	อัตราส่วน 12:1
1		1	1	>210	>200	>200
2		1	2	>210	>200	197
3		1	3	>210	>200	197
4		2	1	195	>200	169
5	700	2	2	179	182-183	178
6		2	3	180	180	>200
7		3	1	>200	>200	170
8		3	2	> 230	>200	175
9		3	3	>200	180	192-194
10		1	1	>200	170-172	173
11		1	2	180	>200	>200
12		1	3	184	162	>200
13		2	1	>210	172-173	169
14	800	2	2	>210	174	170
15		2	3	200	>200	183
16		3	1	175	>200	196
17		3	2	157	>200	199-169
18		3	3	165	>200	164
19		1	1	>200	>200	>200
20	900	1	2	176	>200	>200
21		1	3	>200	>200	>200

ตารางที่ 12 (ต่อ)

ลำดับ	อุณหภูมิการเผา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%)	จุดวาบไฟ (°C)		
				อัตราส่วน 6:1	อัตราส่วน 9:1	อัตราส่วน 12:1
22	900	2	1	200	173-175	>200
23		2	2	190	171	179
24		2	3	190	>200	175
25		3	1	> 230	>200	>200
26		3	2	169	179	182
27		3	3	158	172-173	171-172

จากตารางที่ 12 แสดงผลการวิเคราะห์จุดวาบไฟของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1, 9:1 และ 12:1 จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยขมเผาที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 °C ที่การเติมปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt, 2%wt และ 3%wt ทั้งนี้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาคือ 1, 2 และ 3 ชั่วโมง พบว่า จุดวาบไฟของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้ทุกการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 157-200 °C ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของ ASTM D93 ที่กำหนดให้จุดวาบไฟของน้ำมันไบโอดีเซลควรมีค่ามากกว่า 120 °C (ศูนย์บริการวิชาการที่ 3, 2553) โดยจุดวาบไฟและจุดติดไฟไม่มีผลต่อการให้กำลังของเครื่องยนต์ แต่เป็นตัวที่บ่งบอกถึงความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ต่อการเก็บรักษาหรือขนส่งน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งพบว่าจุดวาบไฟและจุดติดไฟของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้สูงกว่าน้ำมันดีเซล แสดงให้เห็นว่าการกักเก็บและขนส่งน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีความปลอดภัย (วิชณีย์ และคณะ ,[ม.ป.ป.])

ในส่วนของการวิเคราะห์ค่าความร้อน ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ และค่าความหนืดนั้น เพื่อให้การวิเคราะห์คุณสมบัติดังกล่าวของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้เป็นไปอย่างแม่นยำมากขึ้น ทางผู้วิจัยจึงทำการคัดเลือกเงื่อนไขของการศึกษาผลผลิตไบโอดีเซลที่มีคุณสมบัติของค่าความหนาแน่น และค่าความเป็นกรดที่มีค่าเป็นไปตามมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน แสดงดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อน ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ และค่าความหนืด

ลำดับ	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	อุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา (°C)	เวลาการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%)	ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซล (%)	ค่าความหนาแน่น (kg/m^3)	ค่าความเป็นกรด (mg KOH/g)	ค่าความร้อน (kJ/kg)	ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (%)	ค่าความหนืด (cSt)
1	6:1	700	2	3	89	900	0.43	48014	85.79	6.12
2		800	2	2	92	900	0.45	42684	94.90	7.18
3		800	3	1	95.9	900	0.45	31170	51.34	8.62
4		800	3	2	94.67	890	0.46	42430	97.95	7.03
5	9:1	700	3	3	89.9	890	0.34	38055	94.92	16.19
6		800	1	1	95.7	880	0.45	40.399	94.76	17.35
7		800	1	3	92.5	880	0.44	44656	98.19	6.42
8		800	2	1	94	890	0.45	37281	93.14	5.16
9		900	2	1	87.7	880	0.33	33700	97.92	6.5
10		900	2	2	98.7	880	0.2	32071	50.59	7.99

ตารางที่ 13 (ต่อ)

ลำดับ	อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน	อุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา (°C)	เวลาการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%)	ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซล (%)	ค่าความหนาแน่น (kg/m^3)	ค่าความเป็นกรด (mg KOH/g)	ค่าความร้อน (kJ/kg)	ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (%)	ค่าความหนืด (cSt)
11	12:1	700	1	1	89.6	900	0.22	30839	-	
12		700	1	2	89.2	900	0.22	31162	25.70	
13		700	2	1	92.4	860	0.34	34738	65.73	8.80
14		700	3	3	88.7	900	0.22	34800	19.84	
15		800	2	2	93.6	870	0.34	33558	85.79	6.12
16		800	2	3	90.4	900	0.22	34306	94.90	7.18
17		800	3	1	89.5	900	0.22	52600	51.34	8.62
18		900	2	1	92.7	900	0.34	42853	97.95	7.03

5. ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อน

จากตารางที่ 13 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความร้อน โดยค่าความร้อนเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิง (อัจฉรา และคณะ, 2557) จากการวิเคราะห์ค่าความร้อนของน้ำไบโอดีเซลที่ผลิตได้นี้ พบว่าค่าความร้อนมีค่าอยู่ในช่วง 31,000-53,000 kJ/kg ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM D4809 กำหนดให้ค่าความร้อนของน้ำมันไบโอดีเซลควรมีค่าประมาณ 46,000 kJ/kg (Ertan et al., 2014) ซึ่งเป็นค่าความร้อนที่สูงกว่าน้ำมันดีเซล (36,414.76 kJ/kg) (รอบรู้และรู้ทันพลังงานไทย, 2552) จากผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของไบโอดีเซลพบว่า โดยส่วนมากค่าความร้อนของไบโอดีเซลมีค่าสูงกว่าค่าความร้อนของน้ำมันดีเซล หากค่าความร้อนของไบโอดีเซลมีค่าสูงแสดงถึงคุณภาพที่ดีของเชื้อเพลิง (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2550ก) และเมื่อนำไปใช้งานกับเครื่องยนต์จะมีอัตราการสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิงต่ำกว่าการใช้น้ำมันดีเซล (วิชณีย์ และคณะ, [ม.ป.ป.]) ดังนั้นค่าความร้อนของน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้จึงมีอัตราการสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิงต่ำกว่าการใช้น้ำมันดีเซล

6. ผลการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์

จากตารางที่ 13 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ โดยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโทรเมทรี จากการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ของน้ำไบโอดีเซลที่ผลิตได้นี้ พบว่ามีค่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์ตั้งแต่ 20-98%wt โดยตามมาตรฐาน EN 14103 กำหนดให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ควรมีค่ามากกว่า 96.5%wt (ศูนย์บริการวิชาการที่ 3, 2553) ผลการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์นั้นจะเป็นข้อบ่งชี้ถึงความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล โดยผลการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่เป็นไปมาตรฐานจากการวิเคราะห์ในครั้งนี้จะพบว่ามีค่าที่ 97.95%wt, 98.19%wt และ 97.92%wt

7. ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืด

จากตารางที่ 12 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้ พบว่าผลผลิตไบโอดีเซลจะมีค่าความหนืดอยู่ในช่วง 5-17 cSt โดยตามมาตรฐาน ASTM D445 กำหนดให้น้ำมันไบโอดีเซลมีค่าความหนืดอยู่ในช่วง 3.5-5 cSt (ศูนย์บริการวิชาการที่ 3, 2553) ค่าความหนืดเป็นค่าที่สามารถบ่งบอกถึงการต้านทานการไหลของน้ำมันไบโอดีเซล และการฉีดให้ห้องเผาไหม้ทำให้เกิดเป็นฝอย ส่งผลให้การเผาไหม้ของเครื่องยนต์ไม่สมบูรณ์ เกิดเขม่าควันดำ และทำให้เกิดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (ศูนย์บริการวิชาการที่ 3, 2553) โดยผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดจะพบว่าทุกการทดลองจะมีค่าความหนืดสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนด เนื่องจากน้ำมันที่เป็นสารตั้งต้นในการทำ

ปฏิกิริยานั้นเป็นน้ำมันพืชใช้แล้ว และผลการศึกษาค่าความหนืดของน้ำมันพืชใช้แล้วก่อนการทำปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซลนั้นมีค่าสูงถึง 45.73 cSt อีกทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการศึกษาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด CaO ที่ได้จากการสังเคราะห์ของวัสดุเหลือทิ้งทางธรรมชาติ และเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยามีลักษณะเป็นของแข็งที่ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกับสารตั้งต้น การเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำมันสารตั้งต้นจึงเกิดขึ้นได้ยาก ทำให้ค่าความหนืดจึงยังมีค่าสูงเกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด

ผลการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำ

ในการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำนั้น ทางผู้วิจัยได้ทำการเลือกจากผลการทดลองปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่มีค่าเป็นไปตามมาตรฐาน EN 14103 ที่กำหนดให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ควรมีค่ามากกว่า 96.5% ดังแสดงในตารางที่ 12 นั่นคือเงื่อนไขการทดลองดังต่อไปนี้

1. การทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยขมเผา 800 °C ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2%wt เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง มีปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 97.95% และปริมาณผลผลิตไบโอดีเซล 94.67%

2. การทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1 ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยขมเผา 800 °C ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3%wt เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง มีปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 98.19% และปริมาณผลผลิตไบโอดีเซล 92.5%

3. การทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1 ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยขมเผา 900 °C ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1%wt เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง มีปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 97.92% และปริมาณผลผลิตไบโอดีเซล 87.7%

จากนั้นได้ทำการทดลองในเงื่อนไขดังกล่าวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเดิม 4 ครั้ง หลังจากสิ้นสุดการทำปฏิกิริยา ได้ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้ ดังแสดงในตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ผลคุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำ

อัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมัน	อุณหภูมิการเผา (°C)	เวลาการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%)	ครั้งที่	ปริมาณผลผลิต (%)	ค่าความหนาแน่น (kg/m^3)	ค่าความเป็นกรด (mg KOH/g)	pH	จุดวาบไฟ (°C)	ค่าความร้อน (kJ/kg)	ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (%)	ค่าความหนืด (cSt)
6:1	800	3	2	1	80.8	870	0.43	7.6	173	41301	96.54	5.82
				2	88.3	870	0.53	8	169	39523	69.27	5.7
				3	93.3	890	0.65	7.9	171	40896	43.08	6.4
				4	97.2	910	0.87	8.1	179	42113	17.13	6.9
9:1	800	1	3	1	87.3	870	0.34	8.9	165	43269	98.62	5.86
				2	95.7	870	0.43	9.3	171	41529	62.03	5.78
				3	90.8	905	1.1	9	169	45830	40.69	6.53
				4	92.1	910	1.23	9.5	180	45035	19.43	6.6
9:1	900	2	1	1	85.4	900	0.54	9.8	175	35697	97.88	6.08
				2	97.6	880	0.89	10	179	34961	53.14	6.28
				3	91.8	880	1.12	9.5	183	37603	38.53	7.9
				4	92.3	910	1.54	9.6	187	380130	12.68	8.3

จากตารางที่ 14 แสดงผลการศึกษาคุณสมบัติไบโอดีเซลจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำ 4 ครั้ง พบว่า ทุกการทดลองให้ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลมากกว่า 80% มีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 870-910 kg/m^3 มีค่าความเป็นกรดในช่วง 0.34-1.54 mg KOH/g ค่า pH มีค่าอยู่ในช่วง 7.6-10 มีจุดวาบไฟมากกว่า 150 °C มีค่าความร้อนอยู่ในช่วง 34,000-45,000 kJ/kg มีปริมาณเมทิลเอสเทอร์ตั้งแต่ 12-96% และมีค่าความหนืดในช่วง 5-8 cSt จากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติค่าความหนาแน่น และค่าความเป็นกรด พบว่าจะมีค่าสูงขึ้นจากเดิมเมื่อทำการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำรอบที่ 2 3 และ 4 ส่วนการวิเคราะห์ค่า pH จุดวาบไฟ และค่าความร้อนนั้น พบว่าทุกผลการวิเคราะห์จะมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ และค่าความหนืด พบว่าปริมาณเมทิลเอสเทอร์จะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำในรอบที่ 2 3 และ 4 ในขณะที่ค่าความหนืดจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น จากผลการศึกษาดังกล่าวทำให้ทราบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด CaO จากเปลือกหอยขมซ้ำๆ จะส่งผลให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์หรือค่าความบริสุทธิ์ของน้ำมันไบโอดีเซลลดลง และมีค่าต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนด อาจมีสาเหตุมาจากหลังสิ้นสุดการทำปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยานั้นถูกนำไปแช่ด้วยเมทานอล เพื่อทำการชะล้างกลีเซอรีนที่ตกค้างอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยา แต่เมทานอลที่ทำการแช่นั้นอาจชะล้างกลีเซอรีนที่ตกค้างอยู่ตามอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาไม่หมด และด้วยเหตุนี้เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาเดิมกลับมาใช้ซ้ำจึงส่งผลให้การทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำจึงมีค่าลดลงด้วยเช่นกัน และค่าความหนืดจึงมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องตัวเร่งปฏิกิริยาทำงานได้น้อยลง

ผลการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ของกระบวนการ

การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้เปลือกหอยขมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการวิเคราะห์จากต้นทุนในการผลิตตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดกระบวนการ โดยทำการเลือกผลการทดลองที่มีคุณสมบัติที่มีค่าผ่านมาตรฐานมากที่สุด คือ การทดลองจากเงื่อนไขการใช้อุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา 800 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ 3%wt ทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 60 °C และมีอัตราการกวน 300 rpm สามารถอธิบายรายละเอียดต่างๆได้ดังนี้

1. การวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตทางด้านไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตทางด้านไฟฟ้านั้น คำนวณการใช้ไฟฟ้าจากอุปกรณ์ในการผลิตไบโอดีเซลทุกส่วนของการผลิต โดยสามารถทำการคำนวณจากสูตรคำนวณค่าไฟฟ้า ดังสมการที่ 11 (บริษัท โซล่าฮับ จำกัด, 2559)

$$\text{สูตรในการคำนวณค่าไฟฟ้า} = \frac{\text{กำลังไฟฟ้า (W) X จำนวนชั่วโมง (h)}}{1{,}000} \qquad \text{สมการที่ 11}$$

1. การคำนวณต้นทุนในการผลิตทางด้านไฟฟ้า ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยขมเผาที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในการเผา 1 ครั้ง จะมีต้นทุนในการผลผลิตดังต่อไปนี้

1.1 เตาอบไล่ความชื้น มีกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 1,400 W โดยทำการอบไล่ความชื้นจากเปลือกหอยขมก่อนทำการเผาที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

$$\text{เตาอบไล่ความชื้น} = \frac{1{,}400 \text{ W X } 24 \text{ h}}{1{,}000} = 33.6 \text{ kWh}$$

1.2 เตาอบความร้อนสูง มีกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 4,000 W โดยทำการเผาเปลือกหอยขมที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

$$\text{เตาอบความร้อนสูง} = \frac{4{,}000 \text{ W X } 4 \text{ h}}{1{,}000} = 16 \text{ kWh}$$

เนื่องจาก การใช้เตาอบไล่ความชื้น 1 ครั้ง สามารถอบเปลือกหอยขมได้สูงถึง 500 g และการใช้เตาอบความร้อนสูง 1 ครั้ง ทำการเผาเปลือกหอยขม 100 g ที่อุณหภูมิการเผา 800 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง นั้นสามารถได้เถ้าของเปลือกหอยขม 53.81 g ในเงื่อนไขของการทดลองได้ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจากเถ้าเปลือกหอยขม 3%wt/ครั้ง (6 g/ครั้ง)

ดังนั้น ในการทดลองการผลิตไบโอดีเซล 1 ครั้ง ต้นทุนการผลิตทางด้านไฟฟ้าในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยขมมีค่าเท่ากับ (53.81/6=8 คือในการเผา 1 ครั้งจะใช้ตัวเร่งได้ 8 ครั้ง) , (33.6/5)+(16/8)) = 8.72 kWh

2. การคำนวณต้นทุนในการผลิตทางด้านไฟฟ้า ในการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน 1 ครั้ง มีต้นทุนในการผลผลิตตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 เครื่องทำความร้อนและกวนสาร มีเครื่องให้ความร้อนกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 1,000 W และมอเตอร์ในการกวนกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 15 W โดยทำการให้ความร้อนแก่น้ำมันพืชใช้แล้วเพื่อทำการไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 30 minute

$$\text{เครื่องทำความร้อนและกวนสาร} = \frac{1{,}000\ \text{W X } 0.5\ \text{h}}{1{,}000} = 0.5\ \text{kWh}$$

$$\text{มอเตอร์ในการกวน} = \frac{15\ \text{W X } 0.5\ \text{h}}{1{,}000} = 0.0075\ \text{kWh}$$

ดังนั้น กำลังไฟฟ้าในการไล่ความชื้นจากน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 0.5075 kWh

2.2 เครื่องทำความร้อนและกวนสาร มีเครื่องให้ความร้อนกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 1,000 W และมอเตอร์ในการกวนกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 15 W โดยทำการผลผลิตไบโอดีเซลที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

$$\text{เครื่องทำความร้อนและกวนสาร} = \frac{1{,}000\ \text{W X } 1\ \text{h}}{1{,}000} = 1\ \text{kWh}$$

$$\text{มอเตอร์ในการกวน} = \frac{1{,}000\ \text{W X } 1\ \text{h}}{1{,}000} = 0.015\ \text{kWh}$$

ดังนั้น กำลังไฟฟ้าในการผลผลิตไบโอดีเซล 1 ครั้ง เท่ากับ 1.015 kWh

2.3 เครื่องปั่นเหวี่ยง มีกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 1,800 W โดยทำการปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากไบโอดีเซลเป็นเวลา 15 minute

$$\text{เครื่องปั่นเหวี่ยง} = \frac{1{,}800\ \text{W X } 0.25\ \text{h}}{1{,}000} = 0.45\ \text{kWh}$$

ทั้งนี้ ในการปั่นเหวี่ยง 1 ครั้ง สามารถนำการทดลองการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลมาปั่นเหวี่ยงได้ 2 การทดลอง ดังนั้นในการปั่นเหวี่ยงน้ำมันไบโอดีเซล 1 การทดลอง จะมีค่าไฟฟ้าเท่ากับ 0.225 kWh

จะได้ กำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้เปลือกหอยขมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เท่ากับ 10.47 kWh ต่อการผลิต 1 ครั้ง และ เมื่อกำหนดราคาไฟฟ้าเท่ากับ 3.2484 Baht/kWh (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2560)

ดังนั้น ต้นทุนการผลิตทางด้านไฟฟ้าต่อการผลิต 1 ครั้ง เท่ากับ 34.01 Baht

2. การวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตทางด้านวัตถุดิบ

1. น้ำมันพืชใช้แล้วที่เป็นสารตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซลสามารถเก็บรวบรวมได้จากชุมชน จึงไม่มีค่าใช้จ่ายในส่วนนี้

2. เมทานอล 200 l เท่ากับ 160 kg ราคา 35.37 Baht/kg ในการผลิต 1 ครั้งใช้ 225 g คิดเป็นราคาเท่ากับ 7.96 Baht

ดังนั้น ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว 1 ครั้ง จากการใช้น้ำมันสารตั้งต้น 200 g จะมีต้นทุนในการผลิตทางด้านวัตถุดิบ คิดเป็นราคาเท่ากับ 7.96 Baht

3. การวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตทั้งหมด

3.1 การวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลต่อครั้ง

จากการวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตทางด้านไฟฟ้าและทางด้านวัตถุดิบของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้น้ำมันสารตั้งต้น 200 g สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. การใช้ไฟฟ้าในการเผาเปลือกหอยขม กำลังไฟฟ้า 8.72 kWh ราคา 28.33 Baht

2. เมทานอล 225 g ราคา 7.96 Baht

3. การผลิตไบโอดีเซล

- กำลังไฟฟ้าในการไล่ความชื้นจากน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 0.5075 kWh
- กำลังไฟฟ้าในการผลผลิตไบโอดีเซล 1 ครั้ง เท่ากับ 1.015 kWh
- กำลังไฟฟ้าในการปั่นเหวี่ยง 1 ครั้ง เท่ากับ 0.45/2 เท่ากับ 0.225 kWh

ราคา 5.68 Baht

ดังนั้น ต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้เปลือกหอยขมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากการใช้น้ำมันสารตั้งต้น 200 g มีค่าเท่ากับ 41.93 Baht โดยจะได้ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซล 185.6 g

3.2 การวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลต่อลิตร

ในขั้นต้นแสดงการวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้เปลือกหอบขมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากการใช้น้ำมันสารตั้งต้น 200 g และเมื่อทำการวิเคราะห์การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยมีการใช้ปริมาณน้ำมันสารตั้งต้น 1 l สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. การใช้ไฟฟ้าในการเผาเปลือกหอย 8.72 kWh ราคา 28.33 Baht

2. เมทานอล คิดเป็น 1039.5 g ราคา 36.78 Baht

3. การผลิตไบโอดีเซล

- กำลังไฟฟ้าในการไล่ความชื้นจากน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 0.5075 kWh
- กำลังไฟฟ้าในการผลผลิตไบโอดีเซล 1 ครั้ง เท่ากับ 1.015 kWh
- กำลังไฟฟ้าในการปั่นเหวี่ยง 3 ครั้ง เท่ากับ 0.45 x 3 เท่ากับ 1.35 kWh

ราคา 9.33 Baht

ดังนั้น ต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้เปลือกหอยขมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากการใช้น้ำมันสารตั้งต้น 1 l มีค่าเท่ากับ 77.44 Baht โดยจะได้ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซล 853.76 g

ในกรณีที่ต้องการผลผลิตไบโอดีเซล 1 l สามารถทำการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตได้ดังนี้

1. การใช้ไฟฟ้าในการเผาเปลือกหอย 8.72 kWh ราคา 28.33 Baht

2. เมทานอล คิดเป็น 1237.5 g ราคา 43.78 Baht

3. การผลิตไบโอดีเซล

- กำลังไฟฟ้าในการไล่ความชื้นจากน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 0.5075 kWh
- กำลังไฟฟ้าในการผลผลิตไบโอดีเซล 1 ครั้ง เท่ากับ 1.015 kWh
- กำลังไฟฟ้าในการปั่นเหวี่ยง 3 ครั้ง เท่ากับ 0.45 x 3 เท่ากับ 1.35 kWh

ราคา 9.33 Baht

ดังนั้น ต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้เปลือกหอยขมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากการใช้น้ำมันสารตั้งต้น 1,100 g มีค่าเท่ากับ 81.44 Baht โดยจะได้ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซล 1020.8 g หรือประมาณ 1.134 l

จากการวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้เปลือกหอยขมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะเห็นว่ายังคงมีต้นทุนในการผลิตที่สูง เนื่องจากมีการใช้ไฟฟ้าปริมาณมากจากกระบวนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยขม จึงส่งผลให้มีต้นทุนการผลิตสูง

หากพิจารณาข้อดีของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วนั้น จะพบว่าเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งจากครัวเรือน หรือชุมชนมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด เนื่องจากน้ำมันพืชใช้แล้วจะมีสารพิษประเภทอนุมูลอิสระ หากนำกลับมาใช้ซ้ำจะส่งผลเสียต่อสุขภาพ ทั้งยังเป็นวิธีการกำจัดน้ำมันพืชใช้แล้ว จากเดิมที่มีการกำจัดด้วยการเททิ้งลงสู่พื้นดินจะส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพของดินในระยะยาว

ได้ ในส่วนของเปลือกหอยขมนั้นสารถมพบได้ตามแหล่งน้ำทางธรรมชาติ หลังจากนำมาประกอบอาหาร เปลือกของหอยขมที่เหลือนั้นสามารถนำมาสังเคราะห์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลได้ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยขม โดยทำการเผาด้วยอุปกรณ์มีกำลังไฟฟ้าสูง ทำให้ต้นทุนในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาสูง หากทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีอยู่ในชุมชนเป็นแหล่งให้ความร้อน ต้นทุนการผลิตในด้านการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาอาจมีค่าลดลง

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้เปลือกหอยขมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาทดแทนน้ำมันดีเซลได้ในอนาคต

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเหลือทิ้ง โดยใช้ CaO จากเปลือกหอยขมเผาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยแบ่งผลการศึกษาออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนที่ 2 การศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันพืชใช้แล้ว ส่วนที่ 3 การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ส่วนที่ 4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซล และส่วนที่ 5 การนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำ โดยสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

สรุปผลงานวิจัย

1. การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสมแก่การสังเคราะห์ CaO จากเปลือกหอยขมคือ 800 °C เนื่องจากจะส่งผลให้เถ้าที่ได้มีลักษณะเป็นเนื้อละเอียด สีขาว และมีปริมาณของ CaO สูงถึง 70.113%

2. การศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันพืชใช้แล้ว เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้ทำการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระด้วยวิธีการไทเทรท ค่าความหนาแน่น ค่าความเป็นกรด และค่าความหนืด จากการศึกษาพบว่าน้ำมันพืชใช้แล้วมีปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.49% มีค่าความหนาแน่น 920 kg/m^3 ค่าความเป็นกรด 1.07 mg KOH/g และมีค่าความหนืดอยู่ที่ 47.85 cSt

3. การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยใช้เปลือกหอยขมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากผลการศึกษาการทำปฏิกิริยาที่เงื่อนไขของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 9:1 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยขมเผาที่อุณหภูมิ 800 °C ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3%wt เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง การควบคุมอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 60 °C และมีอัตราการกวน 300 rpm มีปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงสุดที่ 98.19% และมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลสูงถึง 92.5%

4. การวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยขม พบว่าไบโอดีเซลที่ได้มีคุณสมบัติเป็นไปตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงานงาน คือ มีค่าความหนาแน่น 880 kg/m^3 ค่าความเป็นกรด 0.44 mg KOH/g ค่า pH 9.6 จุดวาบไฟ 162 °C ค่าความร้อน 44,656 kJ/kg ในส่วนของค่าความหนืด พบว่ามีค่า 6.42 cSt ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่มาตรฐานเพียงเล็กน้อย แต่อยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้

5. การนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำ จากผลการศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำ 4 ครั้ง พบว่าทุกการทดลองจะมีปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลมากกว่า 80% และปริมาณเมทิลเอสเทอร์จะมีค่าลดลงทุกครั้งหลังจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำ ในขณะเดียวกันค่าความหนืดจะมีเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำในครั้งที่ 2 3 และ 4 เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้ซ้ำนี้ได้ผ่านกระบวนการล้างด้วยเมทานอล ทำให้กลีเซอรีนที่เกาะอยู่ตามรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นหลุดออกไปได้เพียงเล็กน้อย การทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเดิมซ้ำๆ จึงได้ค่าความบริสุทธิ์ หรือปริมาณเมทิลเอสเทอร์ลดลง

ข้อเสนอแนะ

1. การเก็บรักษาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิการเผาต่างๆ ควรเก็บในโถดูดความชื้น เพื่อป้องกันการสัมผัสกับอากาศ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้นั้นเป็นสารประกอบ CaO เมื่อมีการสัมผัสกับอากาศจะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ ทำให้ความบริสุทธิ์ของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าลดลง

2. ก่อนการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาทำปฏิกิริยาในขบวนการผลิตไบโอดีเซลควรทำการไล่ความชื้น หรือทำการอบที่อุณหภูมิ 105 °C อีกครั้งเพื่อให้เกิดความมั่นใจว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่จะใช้นั้นไม่มีความชื้นปะปนอยู่

3. เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทวิวิธพันธุ์ ก่อนทำปฏิกิริยากับน้ำมันสารตั้งต้นควรทำการผสมตัวเร่งปฏิกิริยากับเมทานอลทิ้งไว้ประมาณ 30 minute เพื่อให้สารประกอบในตัวเร่งปฏิกิริยาทำงานได้ดียิ่งขึ้น

4. การนำตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์มาใช้ ควรมีการผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์ เพื่อให้ตัวเร่งเกิดประสิทธิภาพการทำงานที่ดียิ่งขึ้น ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ได้อาจมีค่าสูงกว่า 96.5% ซึ่งจะมีค่าเป็นไปตามมาตรฐาน EN 14103

5. ในการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ซ้ำ ควรใช้สารที่สามารถละลาย หรือชะล้างสารอินทรีย์ เช่น สารอะซิโตน (Acetone) เพื่อชะล้างกลีเซอรีนที่เกาะอยู่ตามอนุภาคของรูพรุน

บรรณานุกรม

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน. 2550ก. **คู่มือบริหารจัดการพลังงานความร้อน**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://webkc.dede.go.th/testmax/node/244 (9 กันยายน 2560).

______. 2552ข. **รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาและจัดทำเครื่องต้นแบบผลิตไบโอดีเซล จากน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเมล็ดในปาล์ม ระดับชุมชน**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://webkc.dede.go.th/testmax/node/849 (4 เมษายน 2559).

______. 2558ค. **สถานการณ์พลังงานของประเทศไทย.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา www.dede.go.th/Thailand%20Alternative%20Energy%20Situation%202014.pdf (25 มีนาคม 2559).

เคยูไบโอดีเซล. 2555. **ความรู้เกี่ยวกับไบโอดีเซล**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.biodiesel.rdi.ku.ac.th/index.php?option=com_content&task=view&id=7&Itemid=12 (10 มกราคม 2559).

จักรพงศ์ ไชยบุรี. 2555. **การเปรียบเทียบการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา KFCa-Al และ KFSr-Al**. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา ครั้งที่ 17, 22-27.

จักรพงศ์ ไชยบุรี และพนิตา สุมานะตระกูล. 2556. **การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากกระดองปลาหมึก.** วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา ครั้งที่ 181-7.

ชวัสรัฏฐ์ นาคแสงจันทร์, อัมราวดี จันทร์ศรี อมรรัตน์ อินทร์นาง และการะเกด เทศศรี. 2558. **ตัวเร่งปฏิกิริยานาโนแคลเซียมออกไซด์ประสิทธิภาพสูงสาหรับการผลิตไบโอดีเซล.** วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา ปีที่ 20 (ฉบับที่ 1) มกราคม - มิถุนายน พ.ศ. 2558.

ฐานข้อมูลเรื่องยาสมุนไพร. 2553. **หอยขม**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://pasusat.com/%E0%B8%AB%E0%B8%AD%E0%B8%A2%E0%B8%82%E0%B8%A1/ (24 มิถุนายน 2559).

ณัฐชยา สังข์ทอง และอภิญญา โนนทิง. 2555. **การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีแคลเซียมเป็นพื้นฐาน**. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ธรรมศักดิ์ พันธุ์แสนศรี และ อนุกุล จันทร์แก้ว. 2553. **การศึกษาสมรรถณะเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กในการทำงานจริงโดยใช้ไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิง**. มหาวิทยาลัยแม่โจ้-แพร่ เฉลิมพระเกียรติ.

บริษัท โซล่าฮับ จำกัด. 2559. **การคำนวณค่าไฟฟ้า**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.solarhub.co.th/solar-information/solar-provision/354-electrical-estimate (8 กันยายน 2560).

บริษัท แพนด์ส นครหลวง จำกัด. [ม.ป.ป.]. **หินปูน ($CaCO_3$)**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.pandsgroup.com/th/limestone.htm (11 กรกฎาคม 2559).

บริษัท ภัทรกานต์ เทรดดิ้ง จำกัด. 2555. **แคลเซียมออกไซด์, Calcium Oxide, CaO, ปูนร้อน**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.pattarakan.com/product.php?id=4 (24 มิถุนายน 2559).

ไบโอดีเซล คืออะไร. [ม.ป.ป.]. **นิยามไบโอดีเซล.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://irrigation.rid.go.th/rid17/Myweb/machanical/bio.html (25 กุมภาพันธ์ 2559).

ปกรณ์ วินะยานุวัติคุณ. 2554. **เทคโนโลยีการเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพื่อการผลิตไบโอดีเซล**. วารสารวิจัยพลังงาน ปีที่ 8 ฉบับที่2554/2, 61-75 2554.

ปศุสัตว์.คอม. [ม.ป.ป.]. **หอยขมและการเลี้ยงหอยขม.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://pasusat.com/%E0%B8%AB%E0%B8%AD%E0%B8%A2%E0%B8%82%E0%B8%A1/ (24 มิถุนายน 2559).

พัทธนันท์ ภู่สกุล. 2554. **ศึกษาการใช้ CaO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการผลิตไบโอดีเซลโดยมีการป้อนกลับของแอลกอฮอล์**. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ภาคภูมิ วันเปี่ยม, นายศราวุธ คาแท่น และกานดิส สุดสาคร. 2555. **การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็ง La/Ca**. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. [ม.ป.ป.]. **ความหมายและประเภทของไบโอดีเซล**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.archive.lib.cmu.ac.thfullT2556chem40756pp_ch1.pdf (5 พฤศจิกายน 2558).

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. [ม.ป.ป.]**. การทบทวนทบทวนเอกสารเกี่ยวข้อง**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://digi.library.tu.ac.th/thesis/en/0407/03chapter2.pdf (26 มีนาคม 2559).

รุ่งทิพย์ ชัยเดช. 2557. **การผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันทอดใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมเมทอกไซด์**. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

โรงเรียนนาหนังพัฒนศึกษา. 2548. **ตัวเร่งปฏิกิริยา**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.thaigoodview.com/library/teachershow/nongkhai/onuma-b/chemical/sec01p16.htm (9 กรกฎาคม 2559).

รอบรู้และรู้ทันพลังงานไทย. 2552. **ค่าความร้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงและก๊าซ.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา www.gasthai.com/energy/article/html/130.html (9 กันยายน 2560).

วรรณนพ มั่นคง, รัตนชัย ไพรินทร์ และเก้ากันยา สุดประเสริฐ. 2557. **การผลิตไบโอดีเซลจากกากกาแฟโดยใช้แคลเซียมออกไซด์ของเปลือกปูเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา**. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, ปีที่ 44 ฉบับที่ 2, 557-580.

วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. [ม.ป.ป.]. **เมทานอล**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%80%E0%B8%A1%E0%B8%97%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%AD%E0%B8%A5 (11 กรกฎาคม 2559).

วิชณีย์ ออมทรัพย์สิน, วัชรี ศรีรักษา เพ็ญศิริ, จำรัสฉาย, วราวุธ ชูธรรมธัช และชาย โฆรวิส. [ม.ป.ป.]. **การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบ**. ศูนย์วิจัยปาล์มน้ำมันสุราษฎร์ธานี สำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตร เขตที่ 7.

วิชาการ.คอม. 2553ก. **สารประกอบอินทรีย์ที่มีธาตุออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.vcharkarn.com/lesson/1459 (11 มีนาคม 2559).

วิชาการ.คอม. 2556ข. **เมทานอล (Methanol)**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.vcharkarn.com/vcafe/211697 (11 กรกฎาคม 2559).

วิชาการ.คอม. 2556ค. **เอทานอล (Ethanol)**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.vcharkarn.com/varticle/40659 (11 กรกฎาคม 2559).

วิชาการ.คอม. 2556ง. **แอลกอฮอล์ (alcohol)**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.vcharkarn.com/varticle/41018 (11 กรกฎาคม 2559).

ศิริวัฒนา หัทสนธ์, รัตนชัย ไพรินทร์ และคณิต กฤษณังกูร. 2556ก. **การเปรียบเทียบการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO จากเปลือกหอยแครง และเปลือกปูทะเล ในการผลิตไบโอดีเซล**. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, ปีที่ 44 ฉบับที่ 2, 552-556.

______. 2556ข. **การผลิตไบโอดีเซลจากเปลือกทิวมะพร้าว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO จากเปลือกหอยแครง**. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, ปีที่ 44 ฉบับที่ 2, 361-364.

ศูนย์บริการวิชาการที่ 3. 2553. **เทคนิคการผลิตไบโอดีเซลให้ได้คุณภาพ**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www2.dede.go.th/bett/Activities/KM/BioDiesel%20Manual.pdf (27 ตุลาคม 2558).

ศูนย์วิจัยและพัฒนาประมงน้ำจืดสุราษฎร์ธานี. 2553. **การเลี้ยงหอยขม**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.fisheries.go.th/if-suratthani/web2/index.php?option=com_content&view=article&id=160:2010-02-19-03-30-02&catid=29:2010-01-28-07-27-06&Itemid=21 (27 มิถุนายน 2559).

ศูนย์สารสนเทศข้อมูลพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2557. **รายงานพลังงานทดแทนของประเทศไทย**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา www.dede.go.th/Thailand%20Alternative%20Energy%20Situation%202014.pdf (10 มีนาคม 2559).

สถาพร คำหอม. 2558. **เตาเผาอนุภาค**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.rsu.ac.th/engineer/che/news/News%20Data/เตาเผาอนุภาค.pdf (10 กรกฎาคม 2559).

สุภกร บุญยืน, พัชรพร เทียมปาน และสมลักษณ์ เรืองสุทธินฤภาพ. 2556. **การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์จากเปลือกหอยเหลือทิ้งเพื่อใช้เตรียมไบโอดีเซล**. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี,ปีที่ 21 ฉบับที่ 6 (ฉบับพิเศษ), 526-532.

สุภกร บุญยืน, มณฑา มาลัยทอง และอภิสิทธิ์ โพธิ์แก้ว. 2558. การสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกหอย. บทความวิจัย **Thai Journal of Science and Technology**,ปีที่ 4 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม-สิงหาคม,115-122.

สุรศิษฏ์ ดีสวัสดิ์. 2556. **การเตรียมและการทดลอบตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ที่ได้จากวัสดุเหลือใช้ทางเกษตรสำหรับการ**. สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.

สำนักงานคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง. 2553. **วิธีการตรวจสอบคุณภาพไบโอดีเซล.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.doeb.go.th/knowledge/data/test_biodiesel (26 มีนาคม 2559).

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2560. **อัตราค่าไฟฟ้าขายปลีก การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.eppo.go.th/index.php/th/electricity/electricity-bill/pea-rate (8 กันยายน 2560).

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. 2554. **ค่า pH คืออะไร?** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.nstda.or.th/vdo-nstda/sci-day-techno/4558-pH (4 กรกฎาคม 2559).

สำนักบริการคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2551. **พลังงานทดแทนคืออะไร?.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.ku.ac.th/e-magazine/jun51/know/know3.htm (9 กรกฎาคม 2559).

อัจฉรา อิ่มคำ พุฒคำ และอภิพงษ์ พุฒคำ. 2557. **การสังเคราะห์และคุณลักษณะของแคลเซียมออกไซด์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล**. Naresuan University Journal: Science and Technology 2014; 22(3) 29-46.

อาภาณี เหลืองนฤมิตชัย. 2549. **ไบโอดีเซล (Biodiesel)**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.vcharkarn.com/varticle/409 (10 มกราคม 2559).

Achanai Buasri, Phatsakon Worawanitchaphong, Sarinthip Trongyong and Vorrada Loryuenyong. 2014. Utilization of Scallop Waste Shell for Biodiesel Production from Palm Oil – Optimization Using Taguchi Method. **APCBEE Procedia**, 8, 216-221.

Asir Obadiah, Gnanadurai Ajji Swaroopa, Samuel Vasanth Kumar, Kenthorai Raman Jeganathan and Alagunambi Ramasubbu. 2012. Biodiesel production from Palm oil using calcined waste animal bone as catalyst. **Bioresource Technology**, 116, 512–516.

Ertan Alptekin, Mustafa Canakci and Huseyin Sanli. 2014. Biodiesel production from vegetable oil and waste animal fats in a pilot plant. **Waste Management**, 34, 2146–2154.

Gabriel Galván Muciño, Rubi Romero, Armando Ramírez, Sandra Luz Martínez, Ramiro Baeza-Jiménez and Reyna Natividad 2014. Biodiesel production from used cooking oil and sea sand as heterogeneous catalyst. **Fuel** , 138, 143–148.

Guan-Yi Chen, Rui Shana, Jia-Fu Shi and Bei-Bei Yan. 2015. Transesterification of palm oil to biodiesel using rice husk ash-based catalysts. **Fuel Processing Technology**, 133, 8-13.

International Energy Agency. 2016. **oil market report**. [Online]. Available. https://www.iea.org/Oilmarketreport/omrpublic/ (9 July 2016).

Kung-Tung Chen, Jian-Xun Wang, Yong-Ming Dai, Po-Hsiang Wang, Cyong-Ying Liou, Chia-Wei Nien, Jhong-Syuan Wu and Chiing-Chang Chen. 2013. Rice husk ash as a catalyst precursor for biodiesel production. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, 44(4), 622-629.

Márcia Cardoso Manique, Candice Schmitt Faccini, Bruna Onorevoli, Edilson Valmir Benvenutti and Elina Bastos Caramão. 2012. Rice husk ash as an adsorbent for purifying biodiesel from waste frying oil. **Fuel**, 92(1), 56-61.

Natarajan Girish, Subramania Pillai Niju, Khadhar Mohamed Meera Sheriffa Begum and Narayanan Anantharaman. 2013. Utilization of a cost effective solid catalyst derived from natural white bivalve clam shell for transesterification of waste frying oil. **Fuel**, 111, 653–658.

Ngoya Tshizanga, Elizabeth Funmilayo Aransiola and Oluwaseun Oyekola. 2017. Optimisation of biodiesel production from waste vegetable oil and eggshell ash. **South African Journal of Chemical Engineering**, 23, 145-156.

Niju, S., Meera, K. M., Begum, S. และAnantharaman, N. 2014. Modification of egg shell and its application in biodiesel production. **Journal of Saudi Chemical Society**, 18(5), 702-706.

RENEWABLE ENERGY WORLD. 2011. **Renewables Go Their Own Way.** [Online]. Available. http://www.renewableenergyworld.com/articles/print/volume-14/issue-2/energy-efficiency/is-the-cap-kaput.html (9 July 2016).

Seik Lih Lee, Yong Chen Wong, Yen Ping Tan and Sook Yan Yew. 2015. Transesterification of palm oil to biodiesel by using waste obtuse horn shell-derived CaO catalyst. **Energy Conversion and Management**, 93, 282–288.

Siamchemi.com. [ม.ป.ป.]. **เอทานอล/เอทิลแอลกอฮอล์**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.siamchemi.com/%E0%B9%80%E0%B8%AD%E0%B8%97%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%AD%E0%B8%A5/ (11 กรกฎาคม 2559)

Siwaporn Meejoo Smith, Chutima Oopathum, Vararut Weeramongkhonlert, Christopher B. Smith, Suwilai Chaveanghong, Pradudnet Ketwong and Supakorn Boonyuene. 2013. Transesterification of soybean oil using bovine bone waste as new catalyst. **Bioresource Technology**, 143, 686–690.

Suchada Sirisomboonchai, Maidinamu Abuduwayiti, 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.

THAI CERAMIC. 2552. **การทำแคลไซด์คืออะไร.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.thaiceramicsociety.com/topic_view.php?id=239 (10 กรกฎาคม 2559).

Viriya-Empikul, N., Krasae, P., Puttasawat, B., Yoosuk, B., Chollacoop, N. and Faungnawakij, K. 2010. Waste shells of mollusk and egg as biodiesel production catalysts. **Bioresour Technol**, 101(10), 3765-3767.

Wuttichai Roschat, Theeranun Siritanon, Boonyawan Yoosuk and Vinich Promarak. 2016. Biodiesel production from palm oil using hydrated lime-derived CaO as a low-cost basic heterogeneous catalyst. **Energy Conversion and Management**, 108, 459–467.

Yie Hua Tan, Mohammad Omar Abdullah, Cirilo Nolasco-Hipolito and Yun Hin Taufiq-Yap. 2015. Waste ostrich- and chicken-eggshells as heterogeneous base catalyst for biodiesel production from used cooking oil: Catalyst characterization and biodiesel yield performance. **Applied Energy**, 160, 58–70.

Ying Tang, Jingfang Xua, Jie Zhanga and Yong Lu. 2013. Biodiesel production from vegetable oil by using modified CaO as solid basic catalysts. **Journal of Cleaner Production**, 42, 198-203.

ภาคผนวก ก

การคำนวณหาปริมาณเมทานอลที่ต้องการใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

มหาวิทยาลัยแม่โจ้
แม่โจ้ ๒๔๘๘
MAEJO UNIVERSITY

1. การคำนวณหาปริมาณน้ำมันพืชใช้แล้วต่อเมทานอล

เมื่อกำหนดให้ มวลโมเลกุลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว = 256 g/mol

มวลโมเลกุลของเมทานอล = 32 g/mol

ตัวอย่างการคำนวณ การคำนวณอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว

- อัตราส่วน 6:1 (mol:mol) คิดเป็นกรัม = (6x32) : (1x256) (g/g)

= 0.75 : 1 g/g

จากการการทดลองใช้น้ำมันพืชใช้แล้ว 200 g

ดังนั้น เมทานอลที่ใช้มีค่า 0.75 x 200 = 150 g

- อัตราส่วน 9:1 (mol:mol) คิดเป็นกรัม = (9x32) : (1x256) (g/g)

= 1.125 : 1 g/g

จากการการทดลองใช้น้ำมันพืชใช้แล้ว 200 g

ดังนั้น เมทานอลที่ใช้มีค่า 1.125 x 200 = 225 g

- อัตราส่วน 12:1 (mol:mol) คิดเป็นกรัม = (12x32) : (1x256) (g/g)

= 1.5 : 1 g/g

จากการการทดลองใช้น้ำมันพืชใช้แล้ว 200 g

ดังนั้น เมทานอลที่ใช้มีค่า 1.5 x 200 = 300 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

ภาคผนวก ข

แสดงปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลอง

มหาวิทยาลัยแม่โจ้ MAEJO UNIVERSITY

ตารางภาคผนวกที่ 1 แสดงปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองตามอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 9:1 และ 12:1

ลำดับ	อุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (h)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%)	ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซล (%)		
				อัตราส่วน 6:1	อัตราส่วน 9:1	อัตราส่วน 12:1
1	700	1	1	89.6	87	89.6
2		1	2	89.3	89.5	89.2
3		1	3	89.3	91	78.5
4		2	1	89.5	91	92.4
5		2	2	89	91.9	81.9
6		2	3	89	90.2	88.3
7		3	1	92.63	91.2	83.1
8		3	2	91.56	90.3	82.8
9		3	3	85.52	89.9	88.7
10	800	1	1	92.4	95.7	81.9
11		1	2	92.6	89.2	87.1
12		1	3	91.8	92.5	91.2
13		2	1	92.5	94	91.4
14		2	2	92	96.5	93.6
15		2	3	91.2	91.2	90.4
16		3	1	95.91	92.8	89.5
17		3	2	94.67	91.2	88.7
18		3	3	95.16	90.9	92.7

MAEJO UNIVERSITY มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ตารางภาคผนวกที่ 1 (ต่อ)

ลำดับ	อุณหภูมิการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา (°C)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (h)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%)	ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซล (%)		
				อัตราส่วน 6:1	**อัตราส่วน 9:1**	**อัตราส่วน 12:1**
19		1	1	91.7	90.6	89.2
20		1	2	96.1	88.5	87.7
21		1	3	93	89.2	87.5
22		2	1	92.4	87.7	92.7
23	900	2	2	96	98.7	89.8
24		2	3	94.3	88.5	91.9
25		3	1	88.86	92.9	86.2
26		3	2	94.86	83.3	88.9
27		3	3	92.89	94	90.3

MAEJO UNIVERSITY

ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเทคนิค XRF

มหาวิทยาลัยแม่โจ้
MAEJO UNIVERSITY

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110
โทรศัพท์ 074-286904-7 โทรสาร 074-212813 อีเมล sec-all@group.psu.ac.th เว็บไซต์ http://www.sec.psu.ac.th

Scientific Equipment Center

วิสัยทัศน์: เป็นองค์กรภาครัฐที่เติบโตด้วยความมุ่งมั่นสู่การเป็นองค์กรที่มีสมรรถนะสูง
และยั่งยืนจากการให้บริการทดสอบด้วยเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

F-RES-003 ฉบับที่ 10 บังคับใช้ 02/05/59

รายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน:	R1796 / 59	**หน้า:**	1 / 2
เลขที่ใบขอใช้บริการฯ:	4040 / 59	**วันที่รับตัวอย่าง:**	6 ตุลาคม 2559
ชื่อและที่อยู่ลูกค้า:	นางสาวศศิประภา แก้วแดง วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 63 หมู่ 4 ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290		
ผู้ทดสอบ:	นายภาณุพงษ์ ลิ่มอุสันโน และนางสาวพัชรา ศุกลรัตน์		
วันที่ทำการทดสอบ:	10 ตุลาคม 2559		
วิธีการทดสอบ:	อ้างถึง WI-RES-XRF-001 และ WI-RES-XRF-002		
เครื่องมือทดสอบ:	X-ray fluorescence spectrometer, PW2400, PHILIPS, Netherlands		
เทคนิคการทดสอบ:	X-ray fluorescence spectrometry		
สภาวะการทดสอบ:	X-ray tube : Rh tube Application : GPSemiQ Objective : Semiquantitative measurement	X-ray path Sample preparation Scanning range	: Vacuum : Pressed powder : From O to U
สภาพตัวอย่าง:	บรรจุในถุงซิปล็อค		
รายละเอียดตัวอย่าง:	เปลือกหอยขมเผา บดเป็นผง	**จำนวน:**	3 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ: ดังแสดงในหน้าถัดไป

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จุฑาลักษณ์ พัฒนศักดิ์ภิญโญ)
รักษาการในตำแหน่งผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์
17 ตุลาคม 2559

__หมายเหตุ__ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110
โทรศัพท์ 074-286904-7 โทรสาร 074-212813 อีเมล sec-all@group.psu.ac.th เว็บไซต์ http://www.sec.psu.ac.th

วิสัยทัศน์: เป็นองค์กรภาครัฐที่เติบโตด้วยความมุ่งมั่นสู่การเป็นองค์กรที่มีสมรรถนะสูง และยั่งยืนจากการให้บริการทดสอบด้วยเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

F-RES-003 ฉบับที่ 10 บังคับใช้ 02/05/59

เลขที่รายงาน: R1796 / 59 **หน้า:** 2 / 2

ผลการทดสอบ:

ตัวอย่างที่ 1 : เปลือกหอยขมเผา 700 °C

ลำดับที่	สารประกอบ	ความเข้มข้น (%)
1	MgO	0.271
2	Al_2O_3	0.237
3	SiO_2	0.123
4	CaO	59.499

* ธาตุปริมาณต่ำ : Na Fe Sr, ผลการทดสอบได้ถูก normalize เป็น100 %
* ข้อมูลถูกจัดเก็บในโฟลเดอร์ \\server2\rawdata\XRF\Raw Data Customer\59\4xxx\4040

ตัวอย่างที่ 2 : เปลือกหอยขมเผา 800 °C

ลำดับที่	สารประกอบ	ความเข้มข้น (%)
1	MgO	0.362
2	Al_2O_3	0.159
3	SiO_2	0.109
4	CaO	70.113

* ธาตุปริมาณต่ำ : Na Fe Sr, ผลการทดสอบได้ถูก normalize เป็น100 %
* ข้อมูลถูกจัดเก็บในโฟลเดอร์ \\server2\rawdata\XRF\Raw Data Customer\59\4xxx\4040

ตัวอย่างที่ 3 : เปลือกหอยขมเผา 900 °C

ลำดับที่	สารประกอบ	ความเข้มข้น (%)
1	MgO	0.329
2	Al_2O_3	0.162
3	CaO	73.881

* ธาตุปริมาณต่ำ : Si Fe Sr, ผลการทดสอบได้ถูก normalize เป็น100 %
* ข้อมูลถูกจัดเก็บในโฟลเดอร์ \\server2\rawdata\XRF\Raw Data Customer\59\4xxx\4040

..........สิ้นสุดรายงานผลการทดสอบ..........

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเทคนิค XRD

มหาวิทยาลัยแม่โจ้
MAEJO UNIVERSITY

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110
โทรศัพท์ 074-286904-7 โทรสาร 074-212813 อีเมล sec-all@group.psu.ac.th เว็บไซต์ http://www.sec.psu.ac.th

วิสัยทัศน์: เป็นองค์กรภาครัฐที่เติบโตด้วยความมุ่งมั่นสู่การเป็นองค์กรที่มีสมรรถนะสูง
และยั่งยืนจากการให้บริการทดสอบด้วยเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

F-RES-003 ฉบับที่ 10 บังคับใช้ 02/05/59

รายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน:	R1801 / 59	**หน้า:**	1 / 2
เลขที่ใบขอใช้บริการฯ:	4038 / 59	**วันที่รับตัวอย่าง:**	6 ตุลาคม 2559
ชื่อและที่อยู่ลูกค้า:	นางสาวศศิประภา แก้วแดง วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 63 หมู่ 4 ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290		
ผู้ทดสอบ:	นายสุกิจ อติพันธ์		
วันที่ทำการทดสอบ:	11 ตุลาคม 2559		
วิธีการทดสอบ:	ตามรายละเอียดในวิธีปฏิบัติงานการใช้เครื่อง XRD (WI-RES-XRD-001)		
เครื่องมือทดสอบ:	X-ray Diffractometer, X'Pert MPD, PHILIPS, Netherlands		
เทคนิคการทดสอบ:	เอ็กซ์เรย์ ดิฟแฟรกชัน		
สภาวะการทดสอบ:	Objective: Phase identify	Sample preparation:	Pressed powder
	X-ray tube: Cu tube	X-ray generator:	40 kV & 30 mA
	Wavelength: 0.154 nm (CuK_α)	Scan program:	geo new-0.4
	Scan range (2θ): 5-90°	Step size (2θ):	0.05°
	Time/step: 1 sec	Scan speed:	3°/min
สภาพตัวอย่าง:	บรรจุในถุงซิปล็อค		
รายละเอียดตัวอย่าง:	เปลือกหอยขมเผา บดเป็นผง	**จำนวน:**	3 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ: ดังแสดงในหน้าถัดไป

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จุฑาลักษณ์ พัฒนศักดิ์ภิญโญ)
รักษาการในตำแหน่งผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์
17 ตุลาคม 2559

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110
โทรศัพท์ 074-286904-7 โทรสาร 074-212813 อีเมล sec-all@group.psu.ac.th เว็บไซต์ http://www.sec.psu.ac.th

วิสัยทัศน์: เป็นองค์กรภาครัฐที่เติบโตด้วยความมุ่งมั่นสู่การเป็นองค์กรที่มีสมรรถนะสูง
และยั่งยืนจากการให้บริการทดสอบด้วยเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

F-RES-003 ฉบับที่ 10 บังคับใช้ 02/05/59

เลขที่รายงาน: R1801 / 59 หน้า: 2 / 2

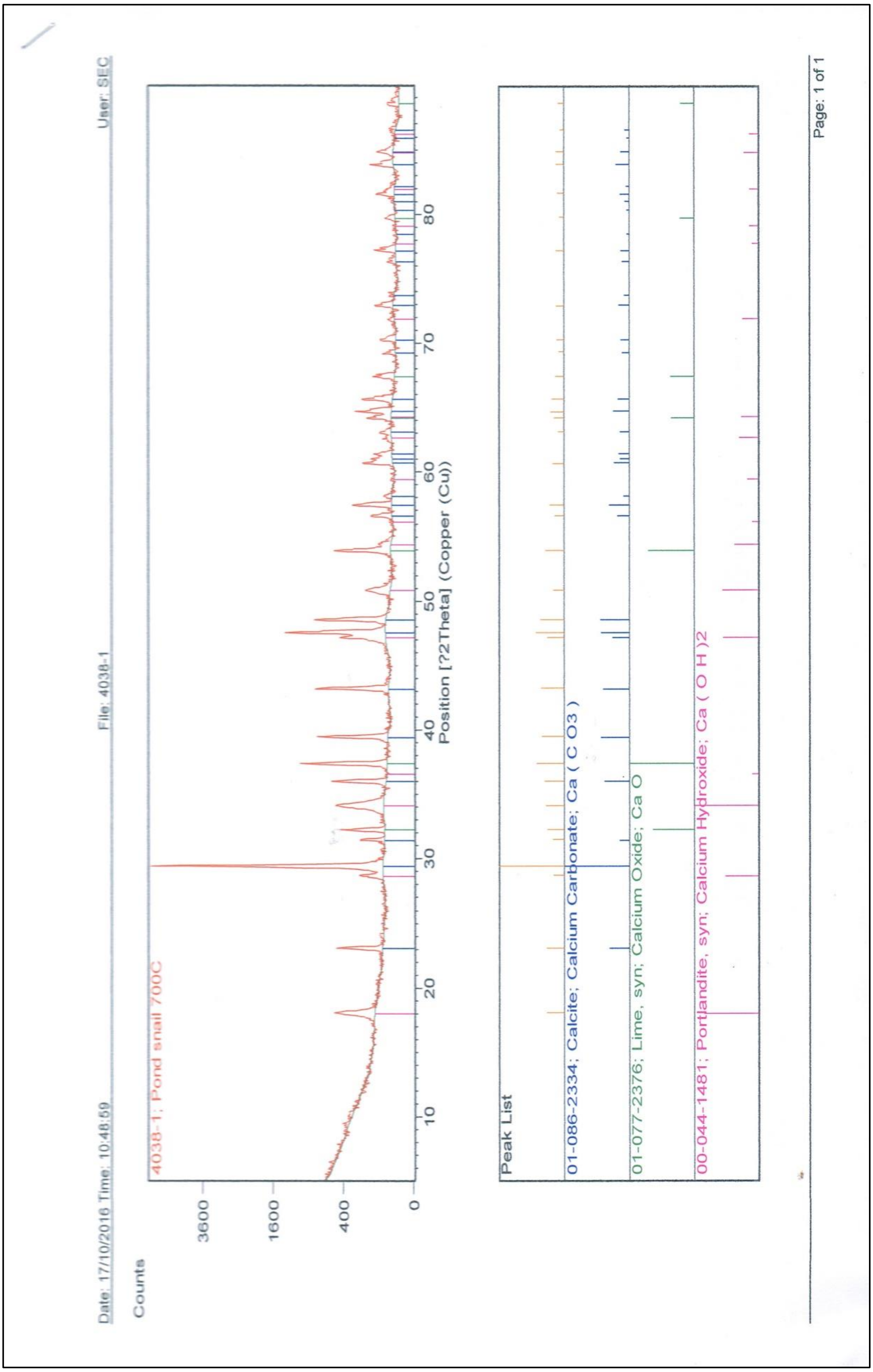
ผลการทดสอบ:

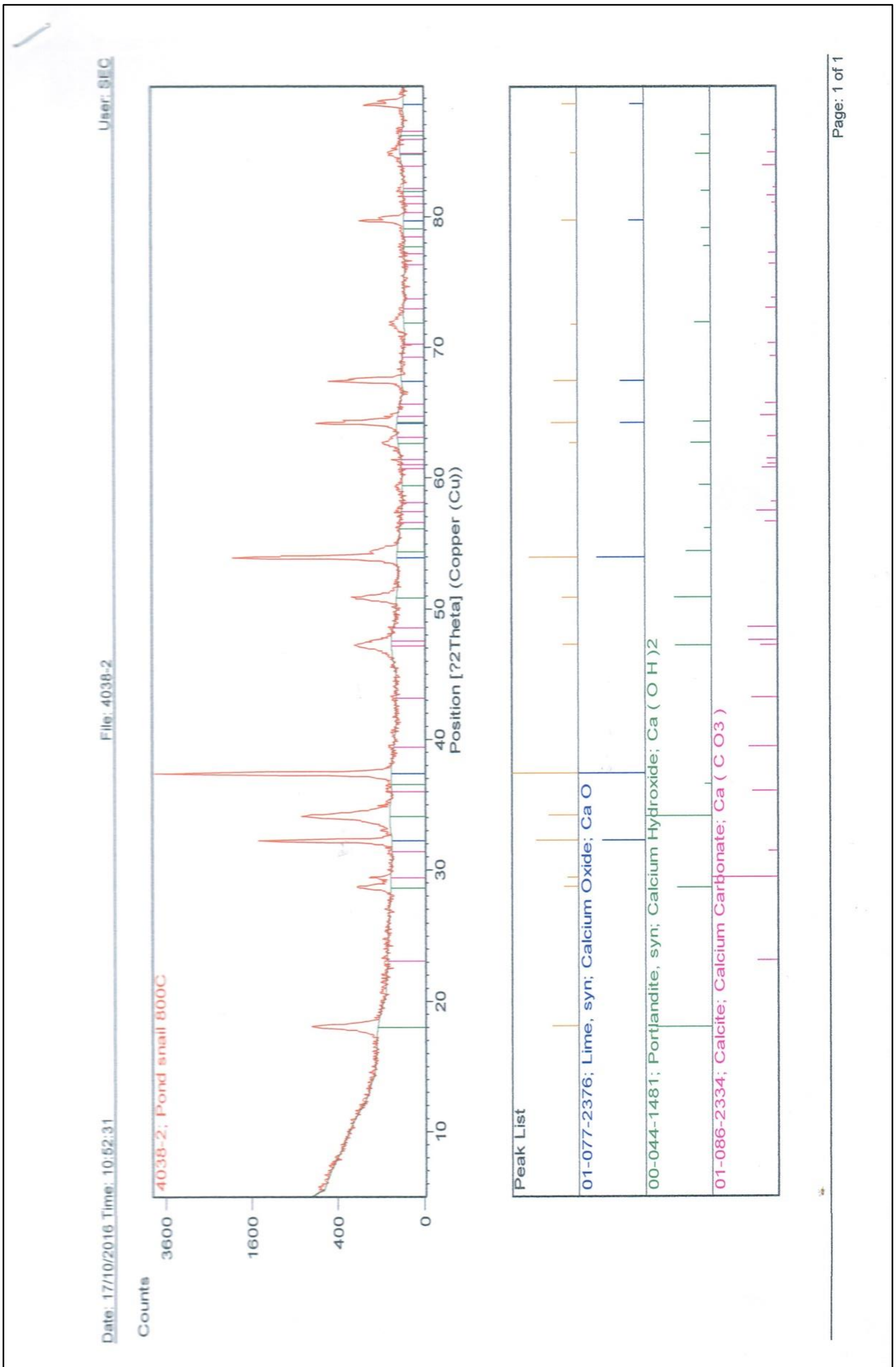
หมายเลข	ชื่อตัวอย่าง	JCPDF No.	Chemical Name	Chemical Formula
4038-1	เปลือกหอยขมเผา 700°C	01-086-2334	Calcite	$Ca(CO_3)$
		01-077-2376	Lime, syn	CaO
		00-044-1481	Portlandite, syn	$Ca(OH)_2$
4038-2	เปลือกหอยขมเผา 800°C	01-077-2376	Lime, syn	CaO
		00-044-1481	Portlandite, syn	$Ca(OH)_2$
		01-086-2334	Calcite	$Ca(CO_3)$
4038-3	เปลือกหอยขมเผา 900°C	01-077-2376	Lime, syn	CaO
		00-044-1481	Portlandite, syn	$Ca(OH)_2$

* รายละเอียดในเอกสารแนบจำนวน 3 ชุด และอ้างอิงโฟลเดอร์ rawdata\XRD\Customer\59\4038

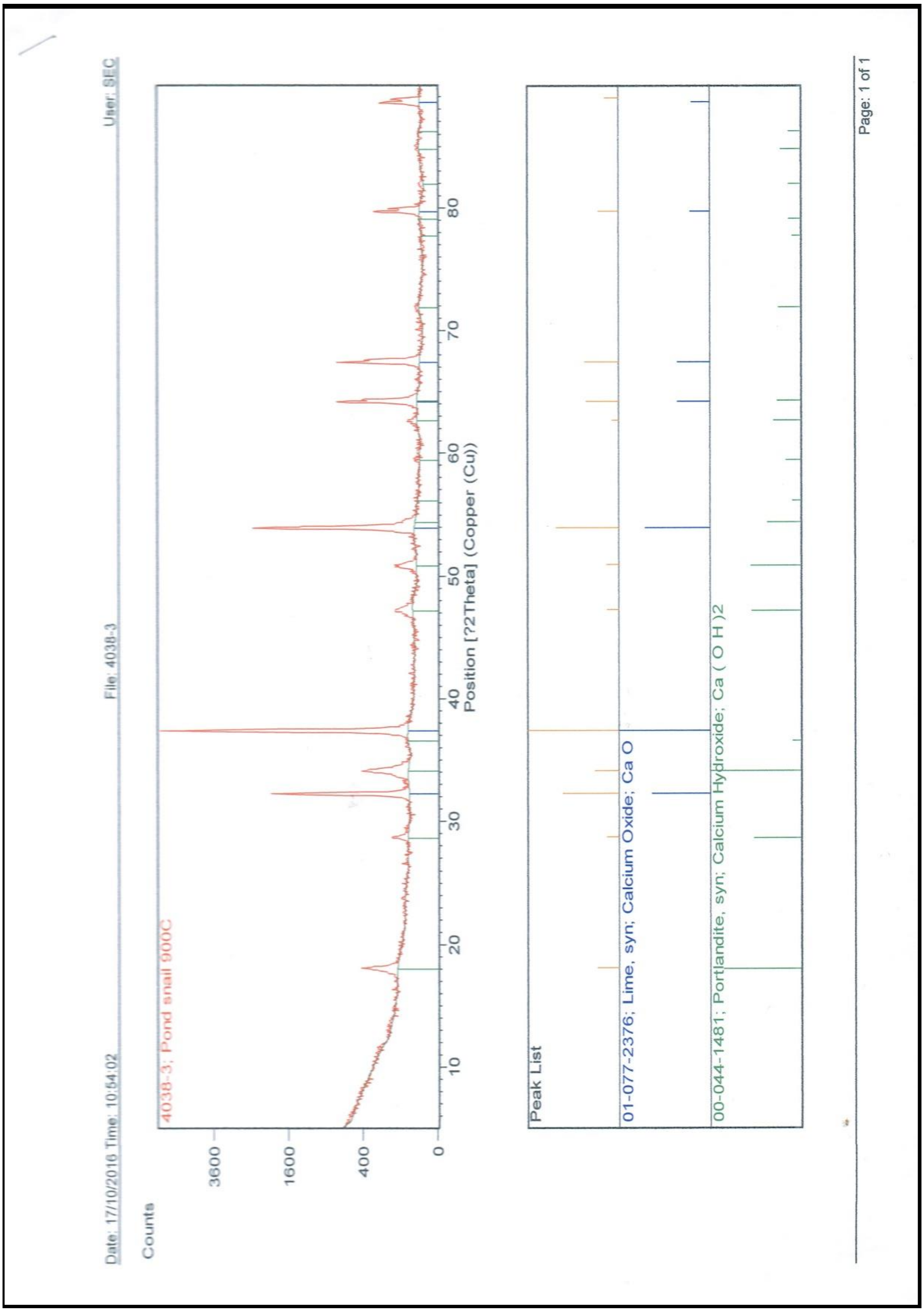
.....................................สิ้นสุดรายงานผลการทดสอบ.....................................

หมายเหตุ รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์


Date: 17/10/2016 Time: 10:48:59
File: 4038-1
User: SEC
Counts
3600
1600
400
0
4038-1; Pond snail 700C
10
20
30
40
50
60
70
80
Position [°2Theta] (Copper (Cu))
Peak List
01-086-2334; Calcite; Calcium Carbonate; Ca (C O3)
01-077-2376; Lime, syn; Calcium Oxide; Ca O
00-044-1481; Portlandite, syn; Calcium Hydroxide; Ca (O H)2
Page: 1 of 1



Date: 17/10/2016 Time: 10:52:31
File: 4038-2
User: SEC
Counts
4038-2; Pond snail 800C
3600
1600
400
0
10
20
30
40
50
60
70
80
Position [°2Theta] (Copper (Cu))
Peak List
01-077-2376; Lime, syn; Calcium Oxide; Ca O
00-044-1481; Portlandite, syn; Calcium Hydroxide; Ca (O H)2
01-086-2334; Calcite; Calcium Carbonate; Ca (C O3)
Page: 1 of 1


Date: 17/10/2016 Time: 10:54:02
File: 4038-3
User: SEC
Counts
3600
1600
400
0
4038-3; Pond snail 900C
10
20
30
40
50
60
70
80
Position [?2Theta] (Copper (Cu))
Peak List
01-077-2376; Lime, syn; Calcium Oxide; Ca O
00-044-1481; Portlandite, syn; Calcium Hydroxide; Ca (O H)2
Page: 1 of 1

ภาคผนวก จ

ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเทคนิค SEM

มหาวิทยาลัยแม่โจ้ MAEJO UNIVERSITY

Scientific Equipment Center

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

โทรศัพท์ 074-286904-7 โทรสาร 074-212813 อีเมล sec-all@group.psu.ac.th เว็บไซต์ http://www.sec.psu.ac.th

วิสัยทัศน์: เป็นองค์กรภาครัฐที่เติบโตด้วยความมุ่งมั่นสู่การเป็นองค์กรที่มีสมรรถนะสูง และยั่งยืนจากการให้บริการทดสอบด้วยเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

F-RES-003 ฉบับที่ 10 บังคับใช้ 02/05/59

รายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน:	R1805/59	**หน้า:**	1/1
เลขที่ใบขอใช้บริการฯ:	4118/59	**วันที่รับตัวอย่าง:**	12 ตุลาคม 2559
ชื่อและที่อยู่ลูกค้า:	น.ส.ศศิประภา แก้วแดง วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 63 ม.4 ต.หนองหาร อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290		
ผู้ทดสอบ:	นางพิสมัย ปิ่นศรีทอง		
วันที่ทำการทดสอบ:	13 ตุลาคม 2559		
วิธีการทดสอบ:	อ้างอิงตามวิธีปฏิบัติงาน WI-RES-SEM-Quanta-001 และ WI-RES-SEM-001		
เครื่องมือทดสอบ:	Scanning Electron Microscope, Quanta400, FEI, Czech Republic		
เทคนิคการทดสอบ:	ถ่ายภาพอิเล็กตรอนไมโครกราฟ		
สภาวะการทดสอบ:	Mode : High vacuum High Voltage : 20.00 และ 25.00 kV	Detector :	Everhart Thornley Detector (ETD)
สภาพตัวอย่าง:	บรรจุในถุงซิปล็อค		
รายละเอียดตัวอย่าง:	เปลือกหอยขมเผา บดเป็นผง	**จำนวน:**	3 ตัวอย่าง

ผลการทดสอบ:

ลำดับที่	ชื่อตัวอย่าง
1	เปลือกหอยขมเผา 700°C
2	เปลือกหอยขมเผา 800°C
3	เปลือกหอยขมเผา 900°C

ดัง CD แนบจำนวน 1 แผ่น ((อ้างอิงข้อมูล \\server2\rawdata\SEM-Quanta\2559\41xx_59\4118 Sasiprapa)

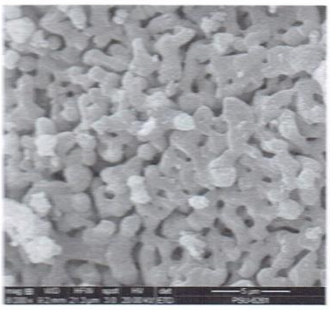
(นางสาวรัชนี ชันยิวา)

เลขานุการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

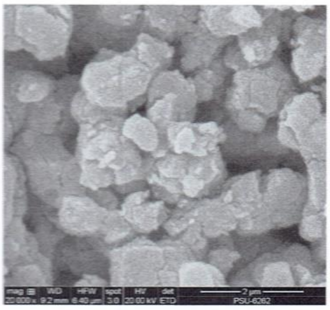
21 ตุลาคม 2559

<u>**หมายเหตุ**</u> รายงานผลการทดสอบนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น และรายงานผลการทดสอบนี้ต้องไม่ถูกทำสำเนาเพียงบางส่วน ยกเว้นทำทั้งฉบับ โดยไม่ได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทางศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

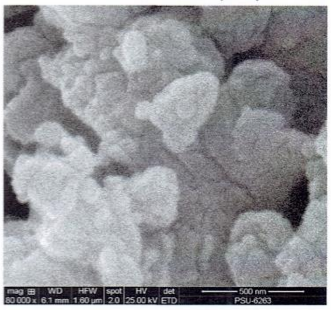
4118/59 Sasiprapa 1/1



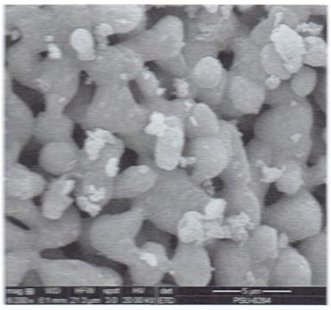
700C_001.tif



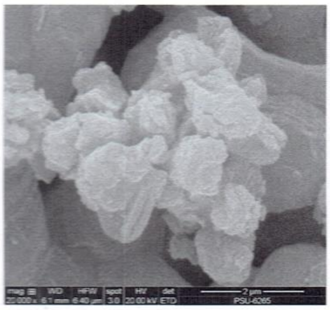
700C_002.tif



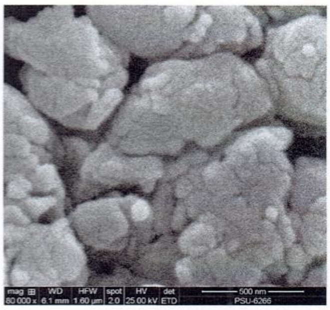
700C_003.tif



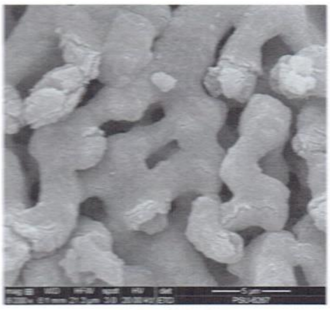
800C_001.tif



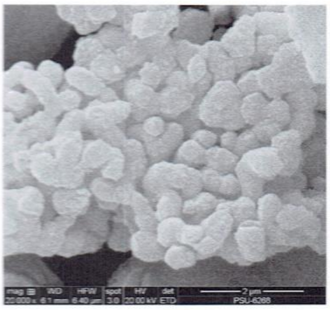
800C_002.tif



800C_003.tif



900C_001.tif



900C_002.tif

900C_003.tif

ภาคผนวก ฉ
บทความที่ได้เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

มหาวิทยาลัยแม่โจ้ MAEJO UNIVERSITY

สสอสก
TSHE
The 4th EnvironmentAsia
International Conference
Practical Global Policy and Environmental Dynamics
June 21-23, 2017, Bangkok, THAILAND
CONFERENCE
PROCEEDINGS
♦ Environmental Science and Technology
♦ Natural Resources Management
♦ Disaster and Sustainability
♦ Environmental Education and Health
♦ Environmental Management Tools
AirAsia

EnvironmentAsia
The 4th EnvironmentAsia International Conference

Synthesis of Calcium Oxide from River Snail Shell to a Catalyst in the Production of Biodiesel

Sasiprapha Kaewdaeng and Rotjapun Nirunsin*
School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai, Thailand

Abstract

This research aim to study synthesis of calcium oxide from river snail shell by calcination at 700, 800 and 900 °C for 4 h and used as catalysts in the biodiesel production. Calcium oxide fraction in calcined river snail shell was analyzed by X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). The XRF result showed the amount of calcium oxide that were 59.499%, 70.113% and 73.881%, when the calcination temperature were 700, 800 and 900 °C, respectively. It corresponded with the XRD pattern of 800 and 900 °C displayed the phase of calcium oxide. The SEM results exhibited that the particle was agglomerate, while the calcination temperature was increasing, the surface area of the river snail shell was porous, rough and fragile. The calcium oxide from each calcination temperature was utilized as a catalyst in the production of biodiesel. The biodiesel production from waste cooking oil and methanol in molar ratio of 6:1, reaction temperature 60-65°C for 3 h with 1-3 wt% of catalysts were studied. From transesterification reaction using calcined river snail shell as catalyst in 3 range of temperature. They were found that the calcination temperature at 800 °C, the catalyst amount 1% have maximum biodiesel yield. It was 95.91%. The properties of biodiesel, flash point, heat of combustion, acid value and methyl ester content were analyzed. The results found biodiesel from this research was qualified according to the standards of department of energy business. Therefore river snail shell was the natural waste material as source of calcium oxide. As a catalyst to produce biodiesel commercially in the future.

Keywords: calcination; calcium oxide; biodiesel; calcined river snail shell

1. Introduction

The increasing of population quantity and energy consumption are growing up and lead to the highly energy demand (I. Choedkiatsakul et al., 2013; Guanyi et al., 2014). At the same time, the quantity of oil reserves of the world are decreasing continuously (Achanai et al., 2014). Therefore, alternative energy technologies are interested at the present. Biodiesel is widely interesting alternative because of it could instead diesel fuel. Biodiesel are environmentally-friendly, helping to prevent global warming and air pollution (Jutika et al., 2014). Biodiesel can produced from

vegetable oils, animal fats and waste cooking oils (Márcia Cardoso Manique et al., 2012). Transesterification is the most commonly popular method for the biodiesel production as using homogeneous catalysts such as sodium hydroxide (NaOH) and potassium hydroxide (KOH) (Suchada et al., 2015; Xin et al 2010). The advantage of this method are high yield providing, inexpensive and short reaction time but these catalysts have problems about wastewater from washing in the process and contaminate with methoxide that happen when methanol mix with NaOH or KOH and surely that it is not good for researcher or person who produce biodiesel (Achanai et al., 2014; Suchada et al., 2015; S. Niju et al., 2014). For solving this problem, the study of biodiesel catalyst have started. Heterogeneous catalysts from many animal shell are interested such as egg shell, river snail shell and crab shell because of they can easily separate from biodiesel product and reduce amount of wastewater (Suchada et al., 2015; N. Viriya-empikul et al., 2010; Wuttichai et al., 2016). Calcium oxide (CaO) is one of the heterogeneous catalysts that synthesis from river snail shell. Therefore this research studied the heterogeneous catalyst type calcium oxide from river snail shell for biodiesel production from waste cooking oil with the transesterification process.

2. Experimental

2.1 Catalyst preparation and analysis

The river snail shell, sometimes known as the viviparidae that was a family of large operculated freshwater snails. It was classified in the group of Architaenioglossa, adult specimen with operculum, height: 3.45 cm, alive in water source ditch according to nature as illustrated in Figure 1 (Viviparidae, 2015).

Figure 1. River snail shell.

The river snail shell with a mass of (1 kg) was cleaned by washing thoroughly with water several times and then dried heat by hot air oven at 105 °. The resulting material were calcined in a muffle furnace under static air conditions at designated temperatures (700, 800 and 900 °C) for 4 h, then crushed of river snail shell to powder and filtered through a stainless steel sieve 60 mesh. The result of calcined river snail shell powder (CRSP) was 0.5 kg and stored in desiccator to avoid the reaction with air before used.

CRSP was analyzed the elemental chemical compositions by X-ray fluorescence (Philips, Netherlands) spectroscopy under vacuum condition for precise measurement. The characterization of the river snail shell-derived were analyzed by X-ray diffraction (XRD; Philips, Netherlands) coupled with Cu ka radiation (λ = 0.154 nm) generated at 40 kV and 30 mA, over a 2θ range from 5° to 90° with a step size of 0.05° at a scanning speed of 3° /min. The microstructures of CRSP was observed by scanning electron microscope (SEM). The SEM images and surface elemental analysis were recorded on a Quanta 400 (Czech Republic).

Waste cooking oil was filter and boiled for moisture removing at 105 °C for 30 min. Then free fatty acid analysis (FFA) by titration with standard based-solution, weigh 5 g oil into a flask, add 2-propanol 25 ml and fill 3-5 drop of Phenolphthalein. Dissolve 0.1 N potassium hydroxide solution (KOH) in a flask and shake until the solution changes into pink. Record the volume of KOH used. Calculate the FFA for estimate the proper amount of catalyst.

2.2 Transesterification reaction

A 200 ml waste cooking oil in a 500 ml. The methanol/oil molar ratios was 6:1 and used calcium oxide from CRSP as catalysts at temperature of 700, 800 and 900 °C. The amount of catalyst were 1-3% and experimental temperature was 60-65°C and stirred at 300 rpm for 3 h, using a hot plate controlled by a thermo regulator, the experiments were repeated 3 times. After the transesterification reaction finished, the catalysts or calcium oxide was separated from the mixture by centrifugation and the excessive amount of methanol was evaporated with heat at temperature 100 °C. The percentage yield was calculated using the following equation (1) (Natarajan et al., 2013).

$$Yield\,(\%) = \frac{(\text{Weight of biodiesel})}{(\text{Weight of oil})} \times 100 \qquad (1)$$

2.3 Biodiesel production properties

The research studied properties of biodiesel. They were analyzed by acid value (ASTM D664), density (ASTM D1298), flash point (ASTM D93), heat of combustion (ASTM D4809) 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 FAME of biodiesel samples was identified and then the peak areas were utilized to quantify the FAME content, using the following equation (2) (Vanessa et al., 2015).

$$C = \frac{(\sum A) - A_{EI}}{A_{EI}} \times \frac{C_{EI} \times V_{EI}}{m} \times 100 \qquad (2)$$

Where C = fatty acid methyl content (%); ΣA = 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 and discussion

3.1 Catalyst characterization

XRF analysis

The study of chemical compositions with XRF technique in CRSP at 700, 800 and 900 °C for 4 h. It was found at 700 °C, calcium in the shells transform into active calcium oxide catalyst 59.49%. When the calcined temperature increased to 800 °C, the amounts of calcium oxide was 70.11%. The result showed when temperature increased, more calcium carbonate ($CaCO_3$) completely transform to CaO (Supakorn et al., 2015). When calcium carbonate (CaCO3) was heated, the reaction produced carbon dioxide and calcium carbonate changed to calcium oxide as illustrated in equation (3) (Supakorn et al., 2015).

$$CaCO_3\ (s) \rightarrow CaO\ (s) + CO_2 \qquad (3)$$

It was found calcium oxide increased slightly from 70.11% to 73.88%. It refered to optimum of calcination temperature is 800 °C. The optimum temperature for the synthesis of calcium oxide from calcium carbonate in the CRSP. The XRF spectroscopy showed that CaO derived from $CaCO_3$ and was composed of CaO, *magnesium oxide* (MgO), aluminium oxide (Al_2O_3) and silicon dioxide (SiO_2) as shown in Table 1.

Table 1. Elemental chemical compositions of CRSP at 700-900 ºC for 4 h.

Element	Calcination 700 ºC	Calcination 800 ºC	Calcination 900 ºC
CaO (%)	59.499	70.113	73.881
MgO (%)	0.271	0.362	0.329
Al_2O_3 (%)	0.237	0.159	0.162
SiO_2 (%)	0.123	0.109	-

XRD analysis

The study of crystal structure with XRD technique at different calcination temperatures, XRD pattern of 700 °C, the calcium carbonate contained in the shell and converted to calcium oxide slightly. X-ray diffraction found that had many peaks of $CaCO_3$. The peaks at 2θ = 29.43 ° 39.46 ° 43.23 °, 47.46 °, and 48.53 ° as illustrated in Figure 2, while calcination temperature at 800 and 900 ºC showed CaO as a major peaks. The peaks at 2θ = 32.23 °, 37.41 °, 53.93 °, 64.26 °, 67.48 °, 79.1 ° and 88.56 °

were the characteristic as similar to the standard XRD pattern of CaO. As a result, it was concluded that the high temperature over 800 °C is required to completely convert calcium carbonate into calcium oxide. Thus calcium carbonate decomposition to change the calcium oxide when higher temperatures (Achanai et al., 2014; Supakorn et al., 2015).

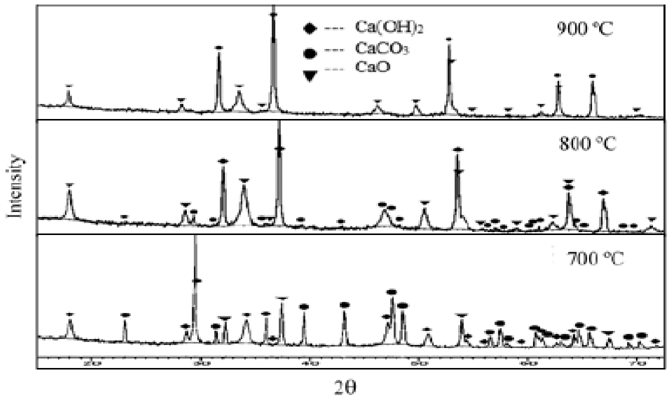


Figure 2. XRD patterns of the river snail shell catalysts calcined at 700-900 °C for 4 h.

SEM analysis

In studying on external structure of the calcined river snail shell with a scanning electron microscope (SEM) as illustrated in Figure 3 (a-c). The catalysts particles of size 5 µm at 6000 imaginable found that porous diffuse on the surface and the particles of size 2 µm at 20,000 imaginable as shown in Figure 3 (d-f) the calcination temperature 700-800 °C, the structure had more rough and many cracks on surface area. The increasing of calcination temperature at 900 °C. The particle was small size and agglomerate. The particle was a small size will result in catalysis surfaces having more exposure (Achanai et al., 2014; Chakkrapong et al., 2013). Calcination at higher temperature thus fragile, easily brittle fractures and can be easily crushed to calcination at a lower temperature (Supakorn et al., 2015; Chakkrapong et al., 2013).

3.2 Transesterification reaction

The analysis of free fatty acids (FFA) of waste cooking oil was 0.49%. From transesterification reaction using CRSP as catalyst of designated temperature found that the calcination temperature at 800 °C, catalyst amount 1% as catalyst for the theoretical methanol/oil ratio 6:1 have maximum biodiesel yield as shown in Fig.3. It was 95.91%. However, when the amount of catalyst was increased to 2%, the yield decreased to 94.67%, because of catalyst that had more solid contents it effect to

incomplete distribution. This results effected to difficult for reaction (Hatthason et al., 2013). In addition, an excessive catalyst would increase biodiesel viscosity and reduced the mass transfer of reactant that might be reversible reaction and reduced biodiesel yield (Chakkrapong et al., 2013). Effect of each conditions of designated temperature catalyst (700-900 °C) to the yield of biodiesel as shown in Figure 4

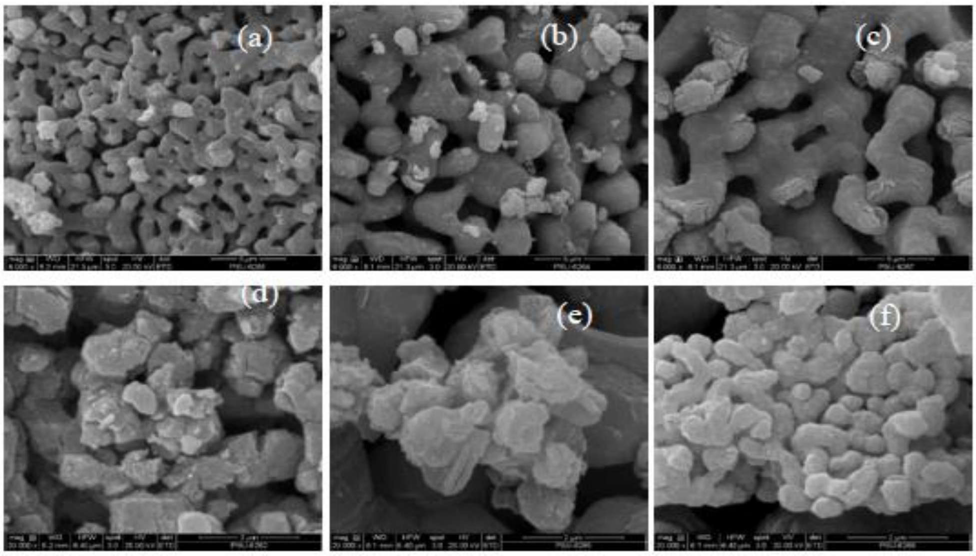


Figure 3 SEM images of the river snail shell catalysts calcined at 700-900 °C for 4 h; (a-c) with diameter of approximately 5 μm, and (d-f) with diameter of approximately 2 μm.

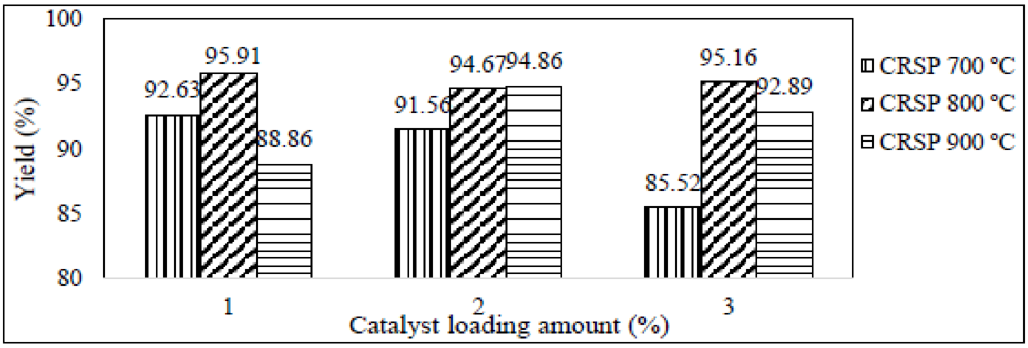


Figure 4 Effect of different designated temperature catalyst to biodiesel yield.

3.3 Biodiesel production properties

In studying biodiesel production by transesterification from waste cooking oil using CRSP at 700-900 °C, yield of all experiment had more 85%. The properties of biodiesel were tested, flash point, acid value, density heat of combustion as shown in table 2.

From table 2, the density were in range of 880-910 kg/m^3 and acid value ranges were 0.33-0.88 mg KOH/g. The density of biodiesels ASTM D1298 standard should be 860-900 kg/m^3 and the acid value of the ASTM D664 standard should be lower than 0.5 mg KOH/g (Department of Energy Business, Ministry of Energy, 2016). The result showed when the amount of catalyst were increased, it effected to decreasing of biodiesel density whereas acid value would increase that effected to corrode engine.

The flash point of biodiesel followed to standard value. The standard ASTM D93 was not less than 120 °C (Department of Energy Business, Ministry of Energy, 2016). The flash point of biodiesel from all experiment were higher than 150. The heat of combustion values of biodiesel followed to ASTM D4809 should around 40,000 kJ/kg which was slightly lower than that of petroleum diesel fuel (Ertan et al., 2014). The heat of combustion properties of biodiesel from all experiments were 31,000-42,000 kJ/kg. So, the proper condition would chosen from properties of experiment that passed standard value of density, acidity, flash points and heat of combustion and were analyzed for the amount of methyl ester by Gas Chromatograph.

Table 2. Biodiesel properties from waste cooking oil by tranesterification using CRSP.

No.	Catalyst (%)	Yield (%)	Density (kg/m^3)	Acid value (mg KOH/g)	Flash points (°C)	Heat of combustion (kJ/kg)
1.	CRSP 700 °C (1%)	92.63	920	0.55	220	31760
2.	CRSP 700 °C (2%)	91.56	910	0.33	> 230	32891
3.	CRSP 700 °C (3%)	85.52	905	0.86	> 230	35627
4.	CRSP 800 °C, (1%)	95.91	900	0.45	175	31170
5.	CRSP 800 °C, (2%)	94.67	890	0.46	157	41430
6.	CRSP 800 °C, (3%)	95.16	880	0.56	165	43022
7.	CRSP 900 °C, (1%)	88.86	910	0.55	>230	35925
8.	CRSP 900 °C, (2%)	94.86	880	0.88	169	36001
9.	CRSP 900 °C, (3%)	92.89	880	0.77	158	31940

From the results in Table 2, biodiesel properties of experiments No.4 and No.5 passed all the standard properties of the Department of Energy Business. They were chosen to analyzed percent of methyl ester by Gas Chromatography technique as shown in Table 3.

Table. 3 Properties of biodiesel product from 2 conditions.

No.	Catalyst (%)	Yield (%)	Density (kg/m³)	Acid value (mg KOH/ g)	Flash points (°C)	Heat of combustion (kJ/kg)	Methyl ester (%)
1	CRSP 800 °C, (1%)	95.91	900	0.45	175	31,170	81.34
2	CRSP 800 °C, (2%)	94.67	890	0.46	157	41,430	97.95

From Table.3, The experiment that using CRSP 800 °C of 1% catalyst, methyl ester was 81.34%, but in the experiment that using CRSP 800 °C of 2% catalyst, methyl ester was 97.95%, which was followed to the Department of Energy business standards determination value (more than 96.5%) (Department of Energy Business, Ministry of Energy, 2016) and their properties (density, acidity value, flash point, heat of combustion and methyl ester) followed to the Department of Energy's business standards too. The result showed using CRSP at 800 °C of 2% catalyst t in biodiesel production was optimum condition in study of biodiesel production by tranesterification using calcined river snail shell powder.

4. Conclusions

This research studied the synthesis of calcium oxide from calcined river snail shell, it found that at the higher temperature of calcination, the results showed calcium carbonate transform to calcium oxide active catalyst while temperature of calcination at 800 °C , it was not different for calcination of 900 °C. Therefore, the catalyst from calcined river snail shell could be the high potential catalyst and lead to the development of using catalyst from natural waste material as source of calcium oxide to biodiesel production well in the future.

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.

References

Achanai B, Phatsakon W, Sarinthip T, and Vorrada L. Utilization of Scallop Waste Shell for Biodiesel Production from Palm Oil - Optimization Using Taguchi Method. APCBEE Procedia 8, p. 216 – 221, 2014.

Chakkrapong C. and Panita S. Biodiesel Production from Palm Oil Using Cuttlebone as Catalyst. Burapha Sci. J. 18, 2, p. 1-7, 2013.

Choedkiatsakul I, Ngaosuwan K. and Assabumrungrat S. Application of heterogeneous catalysts for transesterification of refined palm oil in ultrasound-assisted reactor. Fuel Processing Technology 111, p. 22–28, 2013.

Department of Energy Business, Ministry of Energy. Biodiesel fuel quality standard, www.doeb.go.th/dtanotice

/cancle-diesel25-01-56.pdf (accessed December 2016).

Ertan A, Mustafa C and Huseyin S. Biodiesel production from vegetable oil and waste animal fats in a pilot plant. Waste Management 34, p.2146–2154, 2014.

Guanyi C, Rui S, Jiafu S. and Beibei Y. Ultrasonic-assisted production of biodiesel from transesterification of palm oil over ostrich eggshell-derived CaO catalysts. Bioresource Technology 171, p. 428–432, 2014.

Hatthason S, Pairintra R, and Krisnangkura K. Biodiesel Production from Coconut Oil Using CaO of Waste Cockle Shell as a Catalyst. Agricultural Sci. J. 44, p.361-364, 2013.

Jutika B, Lakhya J. K. and Dhanapati D. Transesterification of non edible feedstockwith lithiumincorporated egg shell derived CaO for biodiesel production. Fuel Processing Technology 122, p. 72–78, 2014.

Márcia C. M, Candice S.F, Bruna O, Edilson V. B. and Elina B. C. Rice husk ash as an adsorbent for purifying biodiesel from waste frying oil. Fuel 92, p. 56–61, 2012.

Natarajan G, Subramania P. N, Khadhar M. M. S. B. and Narayanan A. Utilization of a cost effective solid catalyst derived from natural white bivalve clam shell for transesterification of waste frying oil. Fuel 111, p. 653–658, 2013.

Niju S, Meera K.M. Begum S. and Anantharaman N. Modification of egg shell and its application in biodiesel production. Journal of Saudi Chemical Society 18, pp. 702-706, 2014.

Suchada S, Maidinamu A, Guoqing G, Chanatip S, Shawket A, Xiaogang H, Katsuki K. and Abuliti A. Biodiesel production from waste cooking oil using calcined scallop shell as catalyst. Energy Conversion and Management 95, p. 242–247, 2015.

Supakorn B, Monta M. and Apisit P. Decomposition Study of Calcium Carbonate in Shells. Thai Journal of Science and Technology, pp. 2015.

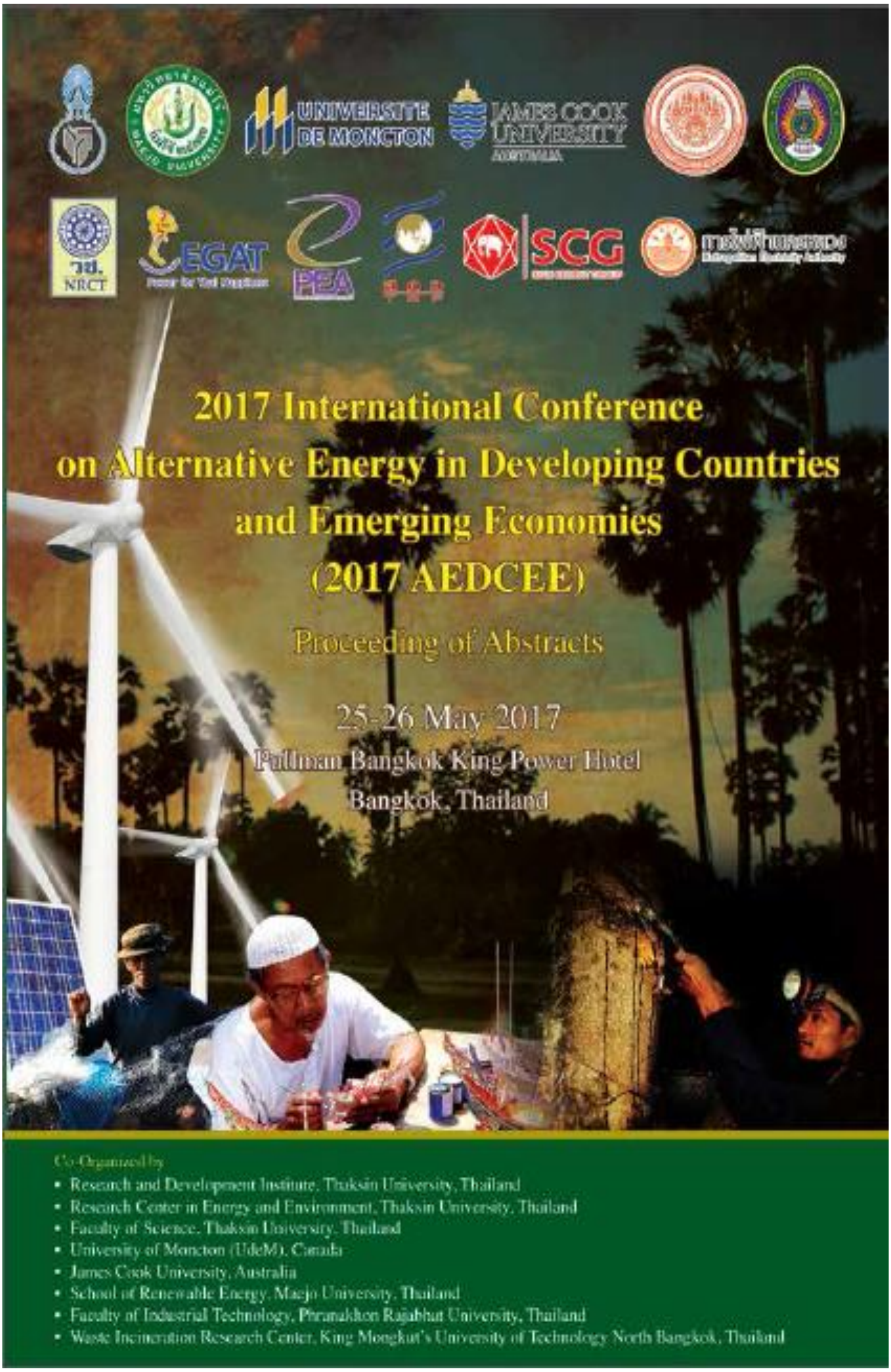
Vanessa F. de Almeida, Pedro J. García-Moreno, Antonio Guadix and Emilia M. Guadix. Biodiesel production from mixtures of waste fish oil, palm oil and waste frying oil: Optimization of fuel properties.Fuel Processing Technology 133, p. 152–160, 2015.

Viriya-empikul N, Krasae P, Puttasawat B, Yoosuk B, Chollacoop N. and Faungnawakij K. Waste shells of mollusk and egg as biodiesel production catalysts. Bioresource Technology, 101, pp. 3765-3767, 2010.

Viviparidae. (2015). Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Viviparidae.

Wuttichai R, Theeranun S, Boonyawan Y. and Vinich P. Biodiesel production from palm oil using hydrated lime-derived CaO as a low-cost basic heterogeneous catalyst. Energy Conversion and Management 108, p. 459–467, 2016.

Xin D, Zhen F. and Yun-hu L. Ultrasonic transesterification of Jatropha curcas L. oil to biodiesel by a two-step process. Energy Conversion and Management 51, p. 2802–2807, 2010.


UNIVERSITE DE MONCTON
JAMES COOK UNIVERSITY
EGAT
PEA
SCG
NRCT
2017 International Conference
on Alternative Energy in Developing Countries
and Emerging Economies
(2017 AEDCEE)
Proceeding of Abstracts
25-26 May 2017
Pullman Bangkok King Power Hotel
Bangkok, Thailand
Co-Organized by
• Research and Development Institute, Thaksin University, Thailand
• Research Center in Energy and Environment, Thaksin University, Thailand
• Faculty of Science, Thaksin University, Thailand
• University of Moncton (UdeM), Canada
• James Cook University, Australia
• School of Renewable Energy, Maejo University, Thailand
• Faculty of Industrial Technology, Phranakhon Rajabhat University, Thailand
• Waste Incineration Research Center, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand

2017 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies
25-26 May 2017 Pullman Bangkok King Power Hotel, Bangkok, Thailand

Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Energy Procedia 00 (2017) 000–000

Energy Procedia

www.elsevier.com/locate/procedia

2017 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies

Biodiesel production using calcium oxide from river snail shell ash as catalyst

Sasiprapha Kaewdaeng[a], Panlop Sintuya[b], and Rotjapun Nirunsin[a]

[a]*School of Renewable Energy, Maejo University, Thailand*
[b]*Institute of Product Quality and Standardization, Maejo University, Thailand*

Abstract

This objective of the research aim to study biodiesel production from used cooking oil using calcium oxide from river snail shell ash as catalyst in transesterification process. This catalyst was heterogeneous catalyst that could separate easily from product by filtration and reduced waste water from washing process in biodiesel production. Calcium oxide in this reseach was derived from calcined river snail shell ash at 800 °C for 4 h. The experiments were done under the reaction conditions of methanol/oil molar ratio of 6:1 9:1 and 12:1, 1-3 wt.% catalyst amount, reaction time of 1-3 h and a reaction temperature at 65 °C. Under optimal reaction conditions of a molar ratio of 9:1, 3 wt.% catalyst amount and reaction time of 1 h. This approach achieved 92.5% conversion to biodiesel. The characteristics of biodiesel from experiment were qualified according to the standard announce by the department of energy business, Ministry of Energy. This research was the one of biodiesel development method that used heterogeneous catalyst for sustainable in biodiesel production

© 2017 The Authors. Published by Elsevier Ltd.
Peer-review under responsibility of the Organizing Committee of 2017 AEDCEE.

Keywords: Biodiesel, tranesterification, heterogeneous, catalyst, calcium oxide.

* Corresponding author. Tel.: 0-818-056-659; fax: 0-538-75595.
E-mail address: rotjapun_energy@hotmail.com

1876-6102 © 2017 The Authors. Published by Elsevier Ltd.
Peer-review under responsibility of the Organizing Committee of 2017 AEDCEE.

2017 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies
25-26 May 2017 Pullman Bangkok King Power Hotel, Bangkok, Thailand

Nomenclature

Al_2O_3	Aluminium oxide	$CaCO_3$	Calcium carbonate	CaO	Calcium oxide
CRSSA	Calcined river snail shell ash	FAME	Fatty Acid Methyl Ester	FFA	Free Fatty Acid
KOH	Potassium hydroxide	MgO	Magnesium oxide	NaOH	Sodium hydroxide
SEM	Scanning Electron Microscope	XRD	X-ray diffraction	XRF	X-ray fluorescence

1. Introduction

At the present, the energy demand continuously increases because of the population growth and have led to search for an alternative fuel. [1,2] Biodiesel is an excellent alternative fuel for replace fossil fuel that could produce from renewable sources and it is biodegradable, nontoxic and environmental friendly and inexpensive. [3, 4]. The process of biodiesel production proceeds in transesterification of vegetable oils and animal fats with methanol in the presence of using homogeneous catalysts [5]. The homogeneous catalytic process has the yields is quite high, short reaction time [5, 6] such as Sodium hydroxide (NaOH) and Potassium hydroxide (KOH) which have good catalytic activity but they are some disadvantages, an inevitable production of wastewater from washing process and non-reusability of the catalysts [2,7]. For solving this problem, the heterogeneous catalytic process could be separate more easily from reaction products, reduction in the amount of wastewater produced and reusability such as MgO and CaO [5,6,8]. Calcium oxide (CaO) is one of the catalysts that are widely accepted because it has high basicity, can prepare from natural calcium carbonate ($CaCO_3$) such as eggshell, crab shell and clam shell. They were effectively as a heterogeneous catalyst for biodiesel production [4,6,9]with calcination method.

The objective of this research was demonstrate that the river snail shell with calcination at 800 °C for 4 h as a catalyst the production of biodiesel from waste cooking oil. The calcined river snail shell ash was confirmed as CaO by XRf, XRD and SEM. The effects of methanol/oil molar ratio, reaction time and amount of catalyst get biodiesel the according to the standard announce by the department of energy business, Ministry of Energy.

2. Materials and methods

2.1 Materials and catalyst preparation

The catalyst of this research was heterogeneous catalyst. It was river snail shell ash that starting with the process of washing the river snail shell and then dried in a hot air oven at 105 °C for 24 h. It was calcined in a muffle furnace under static air conditions at temperatures of 800 °C for 4 h. Calcined river snail shell ash (CRSSA) was crushed to fine powder and filtered through a stainless steel sieve 60 mesh, stored in a closed utensil to avoid the reaction with air.

The elemental chemical compositions of CRSSA were analyzed by X-ray fluorescence (PW 2400, Philips, Netherlands) spectroscopy under vacuum mode for precise measurement. The X-ray diffraction (XRD) characterization of the river snail shell-derived was analyzed (XRD; Philips, Netherlands) coupled with Cu ka radiation (λ = 0.154 nm) generated at 40 kV and 30 mA, over a 2θ range from 5° to 90° with a step size of 0.05° at a scanning speed of 3° /min. The microstructures of the catalysts by a scanning electron microscope (SEM). The SEM images and surface elemental analysis were recorded on a Quanta 400 (Czech Republic).

Used cooking oil was taken to filter and boiled for moisture removal at 105 °C for 30 min. Then free fatty acid was analyzed (FFA) according to the standard ASTM D5555-95 by titration with standard based-solution, took 5 g oil into a flask, added 2-propanol 25 ml and filled 3-5 drop of Phenolphthalein. After that, dissolved 0.1 N potassium hydroxide solution (KOH) in a flask and shake the mixture until the solution changes into pink color. The using amount of potassium hydroxide solution (KOH) was recorded. The percentage of free fatty acid was analysis (FFA) by calculation using the following equation (1) [10].

$$FFA(\%) = \frac{A \times N \times 25.6}{m} \quad (1)$$

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

2.2 Transesterification reaction

The transesterification was carried out in in laboratory scale in a 200 ml with methanol (molar ratio methanol to oil of 6:1, 9:1 and 12:1), catalyst (CaO)/oil weight ratio (1, 2 and 3 wt.%) , reaction times (1, 2 and 3 h) and a magnetic stirrer 300 rpm with hot plate at 65 °C controlled by a thermo regulator. After complete reaction, for separate the catalyst from the mixture, it was centrifuged at 2500 rpm for 15 min and the excessive amount of methanol was evaporated with heat at temperature 105 °C. The yield of the reaction could estimate using the following equation (2) [4].

$$Yield(\%) = \frac{(Weight_{Biodiesel})}{Weight_{Oil}} \times 100 \quad (2)$$

3.3 Biodiesel production properties

The research studied properties of biodiesel products from each conditions. They were analyzed by acid value (ASTM D664), density (ASTM D1298) , flash point (ASTM D93), heat of combustion (ASTM D4809) 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].

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

Where C = fatty acid methyl content (%); ΣA = 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 and discussion

3.1 Catalyst characterization

The chemical compositions of the catalyst were characterized by XRF technique in CRSSA at 800 °C for 4 h. The major mineralogical element component was CaO. Calcined river snail shell ash had concentration of 70.113 wt.% CaO, 0.362 wt.% MgO, 0.159 wt.% Al_2O_3 and 0.109 wt.% SiO_2.

XRD patterns of catalyst as shown in Fig 1. During calcinations, it was observed that CRSSA turned completely white in appearance, which indicated calcium carbonate had completely transform to calcium oxide (CaO) [6,12]. The peak for CRSSA appeared at 2θ of 32.23 °, 37.41 °, 53.93 °, 64.26 °, 67.48 °, 79.1 ° and 88.56 °, which were the characteristic peaks for CaO. The peaks obtained similarity with the standard pattern of CaO and consistent with characterized by XRF technique that showed high amount of CaO content.

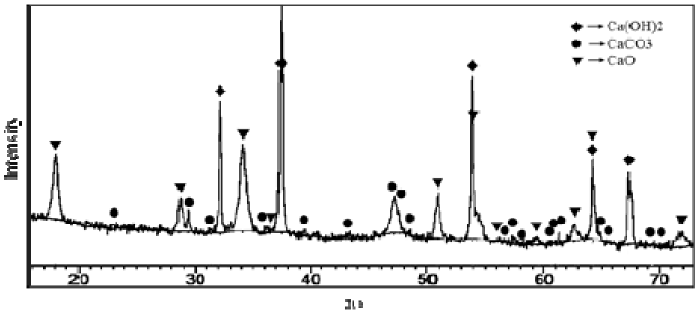


Fig. 1. XRD of the river snail shell calcined at 800 °C for 4 h.

The morphology of the obtained CaO was probed by SEM as shown in Fig. 2. The SEM images of CRSSA at 800 °C for 4 h, found the particles that were rough and crack with high porosity. Because, heat of burning effected to organic in CRSSA [6,13].

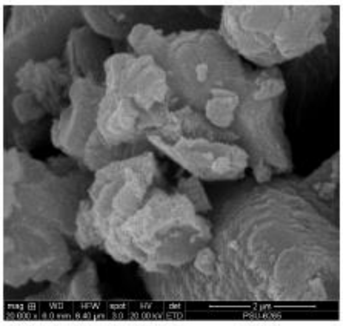


Fig. 2. SEM image of CRSSA at 800 °C for 4 h.

3.2 Transesterification reaction

Free fatty acids (FFA) of the used cooking oil should be less than 3% and in this experiment free fatty acids (FFA) of used cooking oil was 0.49 % [14]. From transesterification reaction using CaO derived from CRSSA as catalyst for the methanol/oil ratio 6:1, reaction time 3 h with catalyst loading amount of 1 wt.%, displayed highest percent yield of 95.91% as shown in Fig 3. When the catalyst loading amount increased to 2 and 3 wt.%, the percent yield would decrease because of the excessive catalyst affected to distribution of reactant in biodiesel reaction. [7,15]

However, after the methanol/oil ratio increased to 9:1, highest percent yield was 95.7% in reaction time 1 h at catalyst loading amount of 1 wt.%. On the other hand, reaction time increased to 2 and 3 h, catalyst loading amount of 1 wt.%, percent yield decreased as shown in Fig 3. It is reported that excess reaction time would reduce biodiesel percentage yield, because of reversible reaction of transesterification and increased more soap product. The yield of biodiesel has decreased [14,15].

For transesterification reaction, at the methanol/oil ratio was 12:1, reaction time 2 h, with catalyst loading amount from 1 to 2 wt.%. The percent yield were 91.4% to 93.6%, respectively. When catalyst loading amount was 3%, the percent yield became to 90.4% as shown in Fig 3. The results showed that at the same reaction time, increasing of amount catalyst affected to percent yield increasing, too. However, when the amount of catalyst was excessively, the percent yield would decrease. Due to the excessive amount of catalyst, the diffusion in using waste oil was more difficult and in the reaction, would get more soap easily [7,9].

From discussing on the methanol/oil ratio at 6:1, 9:1 and 12:1, at the same conditions (amount of catalyst and

reaction time), that most of the percent yield increased when methanol/oil ratio increased from 6:1 to 9:1 but the percent yield decreased when the methanol/ oil molar ratio was changed from 9:1 to 12:1. Because of the excess methanol will reduce the concentration catalyst. As a result, the catalyst reacted ineffectively [7], as shown in Fig. 3 in reaction time 1 h at a catalyst loading amount of 1 wt.%

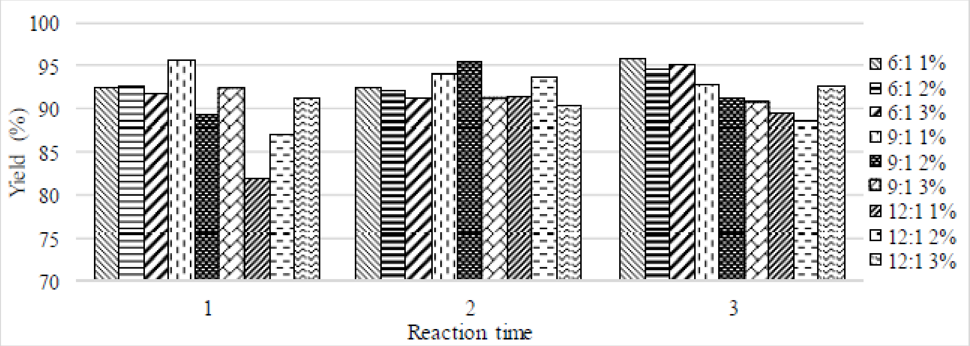


Fig.3 Effect of catalyst and reaction time on the biodiesel percent yield.

3.3 Biodiesel production properties

According to the standard announce by the department of energy business, Ministry of Energy determine qualified of biodiesel density should be 860-900 kg/m^3, acid value lower than 0.5 mg KOH/g, flash point value was higher than 120 °C [16], combustion values around 40,000 kJ/kg which was slightly lower than petroleum diesel fuel [17] and methyl ester yield value was higher than 96.5% [16].

From the density analysis, the biodiesel properties of CaO derived from CRSSA as catalyst using methanol/oil ratio 6:1 as shown in Table 2, with the density between 880-905 kg/m^3. It was found that when the catalyst loading amount increased from 1-3%, the density would became lower and it followed to J.M.Encinar [18], but at the methanol/oil ratio 9:1 and 12:1, the a catalyst loading amount 1%, the density were within the according to the standard announce by the department of energy business, Ministry of Energy and it revealed that the amount of catalyst effected to density value of biodiesel in direct variation.

The analysis of acid value, the methanol/oil ratio at 6:1 and 9:1 were shown in Table 2. When the amount of catalyst increased, the acid value of biodiesel would became lower whereas the methanol/oil ratio at 12:1 the results showed different because at the high proportion of methanol and oil, reaction time and amount of catalyst affected to acid value. An excessive methanol produced incomplete reaction and lead to shorter working time of the engine

In this study, the density, acid value, flashpoint of biodiesel were 880-910 kg/m^3 ,0.22-0.99 mg KOH/ and 150-210 °C, respectively and according to the standard announce by the department of energy business, Ministry of Energy as shown in Table 1.

Table1. Biodiesel properties of all condition (Methanol:Oil ratio at 6:1 9:1 and 12:1)

Methanol : Oil	h	Catalyst load	Yield (%)	Density kg/m^3	Acid value (mg KOH/g)	Flash points (°C)
6:1	1	1	92.4	900	0.97	200
		2	92.6	900	0.56	180
		3	91.8	880	0.74	184
	2	1	92.5	905	0.67	210
		2	92	**900**	**0.45**	210
		3	91.2	880	0.55	200

2017 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies
25-26 May 2017 Pullman Bangkok King Power Hotel, Bangkok, Thailand

Methanol : Oil	h	Catalyst load	Yield (%)	Density kg/m^3	Acid value (mg KOH/g)	Flash points (°C)
6:1	3	1	95.9	**900**	**0.45**	175
		2	94.67	**890**	**0.46**	157
		3	95.16	880	0.56	165
9:1	1	1	95.7	**880**	**0.45**	170
		2	89.2	910	0.33	200
		3	92.5	**880**	**0.44**	162
	2	1	94	**890**	**0.45**	172
		2	95.5	875	0.67	174
		3	91.2	910	0.44	200
	3	1	92.8	910	0.45	200
		2	91.2	910	0.22	200
		3	90.9	910	0.33	200
12:1	1	1	81.9	**860**	**0.34**	173
		2	87.1	910	0.22	200
		3	91.2	910	0.22	200
	2	1	91.4	860	0.54	169
		2	93.6	**870**	**0.34**	170
		3	90.4	**900**	**0.22**	183
	3	1	89.5	**900**	**0.22**	196
		2	88.7	865	0.66	166
		3	92.7	870	0.99	164

The proper conditions were chosen from properties of experiment that passed standard value of density, acid value and flash points were analyzed for the heat of combustion by bomb calorimeter as shown in Table 2.

Table 2. Biodiesel properties adding heat of combustion value

Methanol : Oil	h	Catalyst load	Yield (%)	Density kg/m^3	Acid value (mg KOH/g)	Flash points (°C)	Heat of combustion (kJ/kg)
6:1	2	2	92	**900**	**0.45**	>210	**42,684**
	3	1	95.9	**900**	**0.45**	175	**31,170**
	3	2	94.67	**890**	**0.46**	157	**42,430**
9:1	1	1	95.7	**880**	**0.45**	170	**40,399**
	1	3	92.5	**880**	**0.44**	162	**44,656**
	2	1	94	**890**	**0.45**	172	**37,281**
12:1	1	1	81.9	**860**	**0.34**	173	52,863
	2	2	93.6	**870**	**0.34**	170	**33,558**
	2	3	90.4	**900**	**0.22**	183	**34,306**
	3	1	89.5	**900**	**0.22**	196	52,600

The heat of combustion values of biodiesel followed to ASTM D4809 should around 40,000 kJ/kg which was slightly lower than that of petroleum diesel fuel [17]. Therefore, the 8 experiments from Table 3 were chosen for analysis fatty acid methyl ester (FAME) by GC-M. The results were shown in Table 3.

Table 3. Biodiesel properties adding FAME (%) value.

No.	Methanol : Oil	h	Catalyst load	Yield (%)	Density kg/m^3	Acid value (mg KOH/g)	Flash points (°C)	Heat of combustion (kJ/kg)	Methyl ester (%)
5	6:1	2	2	92	900	0.45	210	42,684	94.90
7		3	1	95.9	900	0.45	175	31,170	51.34
8		3	2	94.67	**890**	**0.46**	157	**42,430**	**97.95**
1	9:1	1	1	95.7	880	0.45	170	40,399	94.92
3		1	3	92.5	**880**	**0.44**	162	**44,656**	**98.19**
4		2	1	94	890	0.45	172	37,281	93.14
5	12:1	2	2	93.6	870	0.34	170	33,558	70.67
6		2	3	90.4	900	0.22	183	34,306	23.17

The fatty acids methyl esters of from waste cooking oil by transesterification using CaO calcined river snail shell ash were shown in Table 4. The highest FAME content were 97.95% from condition of methanol/oil molar ratio 6:1, a catalyst loading amount of 2 wt.% for 3 h and 98.12% from condition of the methanol/oil molar ratio 9:1, a catalyst loading amount of 3 wt.% for 1 h within the according to the standard announce by the department of energy business, Ministry of Energy (≥96.5%).

4. Conclusions

The CaO derived from calcined river snail shell ash (CRSSA) was a good heterogeneous base catalyst for transesterification of used cooking oil. After calcination at 800 °C, river snail shell derived catalysts CaO as confirmed by XRF and XRD. From the study, it was found that the best conditions to obtain a high FAME yield of 98.19% were a catalyst loading amount 3 wt.%, methanol/oil molar ratio 9:1, reaction temperature: 65 °C and reaction time 1 h. The produced biodiesel was compared with standards the properties density, acid value, flash point, heat of combustion and the chemical composition of the biodiesel was determined by GC–MS to the according to the standard announce by the department of energy business, Ministry of Energy.

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.

References

[1] I. Choedkiatsakul, K. Ngaosuwan, S. Assabumrungrat. Application of heterogeneous catalysts for transesterification of refined palm oil in ultrasound-assisted reactor
[2] S. Niju, K.M. Meera S. Begum, N. Anantharaman. Modification of egg shell and its application in biodiesel production. India: Tamilnadu; 2014.
[3] Márcia Cardoso Manique, Candice Schmitt Faccini, Bruna Onorevoli, Edilson Valmir Benvenutti and Elina Bastos Caramão. Rice husk ash as an adsorbent for purifying biodiesel from waste frying oil
[4] 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

[5] N. Viriya-empikul, P. Krasae, B. Puttasawat, B. Yoosuk, N. Chollacoop and K. Faungnawakij. Waste shells of mollusk and egg as biodiesel production catalysts.

[6] Achanai Buasri, Phatsakon Worawanitchaphong, Sarinthip Trongyong and Vorrada Loryuenyong. Utilization of Scallop Waste Shell for Biodiesel Production from Palm Oil - Optimization Using Taguchi Method.

[7] Suchada Sirisomboonchai, Maidinamu Abuduwayiti, Guoqing Guan, Chanatip Samart, Shawket Abliz, Xiaogang Hao, Katsuki Kusakabe and Abuliti Abudula. Biodiesel production from waste cooking oil using calcined scallop shell as catalyst

[8] Jutika Boro, Lakhya Jyoti Konwar and Dhanapati Deka. Transesterification of non edible feedstockwith lithiumincorporated egg shell derived CaO for biodiesel production.

[9] Wuttichai Roschat, Theeranun Siritanon, Boonyawan Yoosuk and Vinich Promarak. Biodiesel production from palm oil using hydrated lime-derived CaO as a low-cost basic heterogeneous catalyst

[10] Mankong W., Pairintra R. and Sudaprasert K. Biodiesel Production from Spent Coffee Grounds using Calcium Oxide of Crab-shell as Catalyst. Agricultural Sci. J. 45(2) (Suppl.): 577-580 (2014)

[11] Vanessa F. de Almeida, Pedro J. García-Moreno, Antonio Guadix and Emilia M. Guadix. Biodiesel production from mixtures of waste fish oil, palm oil and waste frying oil: Optimization of fuel properties. Fuel Processing Technology 133, p. 152–160, 2015.

[12] Supakorn Boonyuen, Monta Malaithong and Apisit Prokaew. Decomposition Study of Calcium Carbonate in Shells. Thai Journal of Science and Technology, pp. 2015.

[13] Supakorn Boonyuen, Pacharaporn Tieanpan and Somluck Ruangsuttinarupap. The Synthesis of Waste Mussel Shell for the Biodiesel Preparation. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 21 ฉบับที่ 6 (ฉบับพิเศษ) 2556

[14] Chakkrapong Chaiburi and Panita Sumanatrakul. Biodiesel Production from Palm Oil Using Cuttlebone as Catalyst. Burapha Sci. J. 18, 2, p. 1-7, 2013.

[15] Hatthason S, Pairintra R, and Krisnangkura K. Biodiesel Production from Coconut Oil Using CaO of Waste Cockle Shell as a Catalyst. Agricultural Sci. J. 44, p.361-364, 2013.

[16] Department of Energy Business, Ministry of Energy. Biodiesel fuel quality standard, www.doeb.go.th/dtanotice/cancle-diesel25-01-56.pdf (accessed December 2016).

[17] Ertan Alptekin, Mustafa Canakci and Huseyin Sanli. Biodiesel production from vegetable oil and waste animal fats in a pilot plant. Waste Management 34, p.2146–2154, 2014.

[18] J.M. Encinar, J.F. González, A. Pardal, G. Martínez, Rape oil transesterification over heterogeneous catalysts, Fuel Processing Technology 91 (2010) 1530–1536.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นางสาวศศิประภา แก้วแดง	
เกิดเมื่อ	20 ธันวาคม 2534	
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2556	ปริญญาตรี วิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาวิชาพลังงานทดแทน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
	พ.ศ. 2552	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเซนต์โยเซฟ นครสวรรค์ อำเภอเมือง จังหวัดนครสวรรค์

MAEJO UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยแม่โจ้
MAEJO UNIVERSITY