



เตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟสำหรับการผลิตไบโอดีเซลแบบไหลต่อเนื่อง

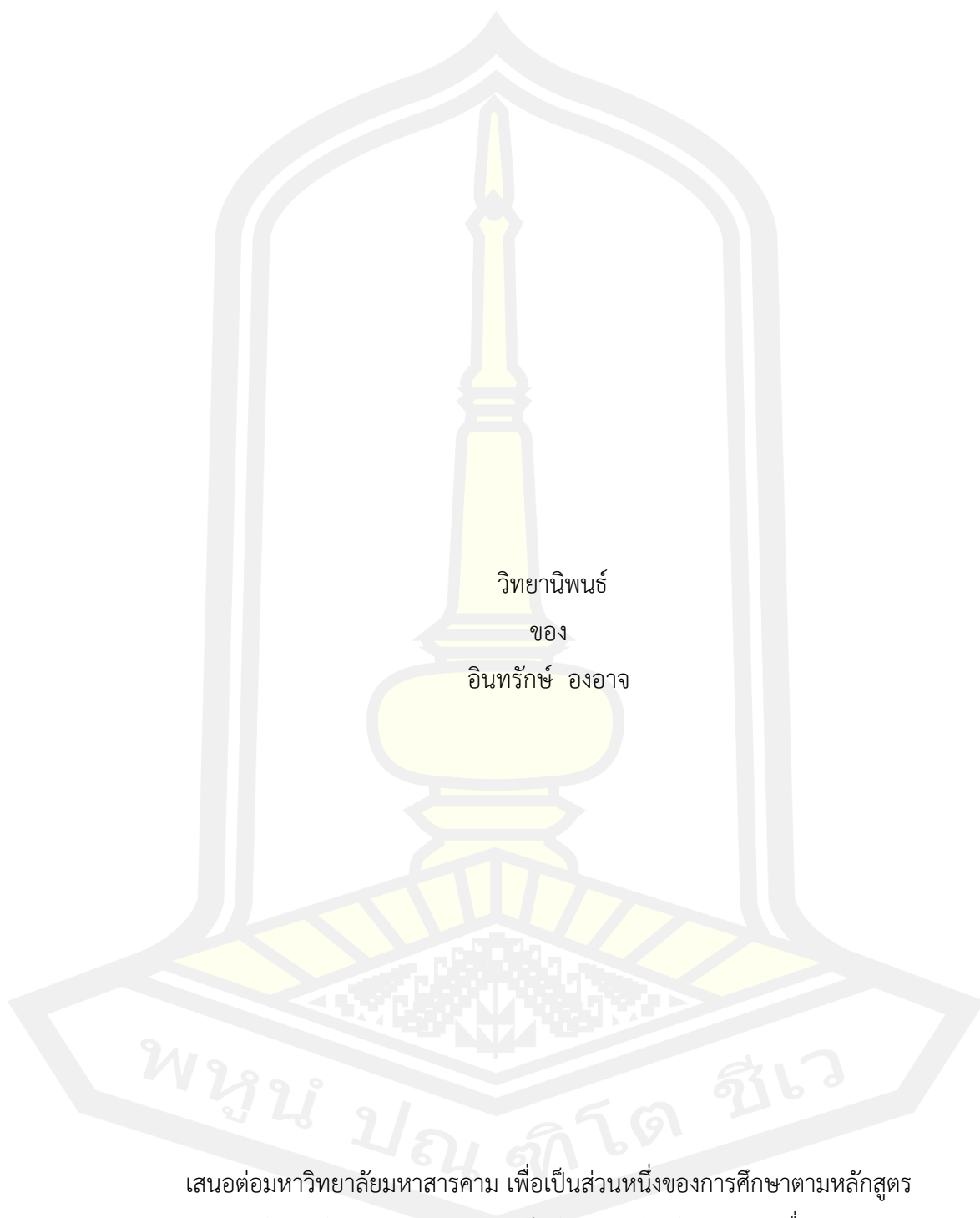
วิทยานิพนธ์
ของ
อินทร์รักษ์ ่องอาจ

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มิถุนายน 2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

เตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟสำหรับการผลิตไบโอดีเซลแบบไหลต่อเนื่อง



เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มิถุนายน 2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

A Microwave Reactor for Continuous Flow Biodiesel Production

Intarak Ongart

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Master of Engineering (Mechanical Engineering)

June 2022

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายอินทร์กษ ่องอาจ
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. อำไพศักดิ์ ทิบุญมา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รศ. ดร. อติศักดิ์ ปัตติยะ)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ณัฐพล ภูมิสะอาด)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	เตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟสำหรับการผลิตไบโอดีเซลแบบไหลต่อเนื่อง		
ผู้วิจัย	อินทร์ักษ์ ่องอาจ		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์ รองศาสตราจารย์ ดร. อติศักดิ์ ปัตติยะ		
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2565

บทคัดย่อ

จากวิกฤตการณ์พลังงานที่เกิดขึ้นในประเทศไทย น้ำมันไบโอดีเซลเป็นทางน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือกที่ผลิตจากแหล่งทรัพยากรหมุนเวียน เช่นน้ำมันจากพืช หรือไขมันจากสัตว์ ไม่มีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมและเครื่องยนต์ ไบโอดีเซลซึ่งเป็นหนึ่งในพลังงานทดแทนที่สำคัญตามลำดับงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการศึกษาผลได้ร้อยละของเมทิลเอสเอสเทอร์ โดยมีเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อนโดยใช้น้ำมันปาล์ม (ROL) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสัดส่วนโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ที่ 6:1 โดยทำการไหลผ่านไมโครเวฟกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ (600 และ 800 วัตต์) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (1 นาที และ 2 นาที) อุณหภูมิของน้ำมันปาล์ม (60 และ 80 องศาเซลเซียส) ที่ส่งผลได้ของเมทิลเอสเอสเทอร์และสมบัติของเมทิลเอสเอสเทอร์

จากผลการทดสอบพบว่า ในช่วงอุณหภูมิ 2 ระดับคือ 60 และ 80 องศาเซลเซียส โดยการใช้กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเอสเทอร์เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 76.70-77.15 ถึง 80.47-86.31 การเพิ่มกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟโดยการแผ่รังสีความร้อนที่กำลัง 800 วัตต์ จะทำให้การไหลของน้ำมันไบโอดีเซลทำปฏิกิริยาได้ดีกว่า 600 วัตต์ เนื่องจากปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่ทำความร้อน ดังนั้นการแผ่รังสีไมโครเวฟที่ระยะเวลานานกว่าส่งผลให้การทำปฏิกิริยาได้ดีกว่า ผลได้ของเมทิลเอสเอสเทอร์เพิ่มขึ้นและคุณสมบัติของเมทิลเอสเอสเทอร์สอดคล้องกับเกณฑ์มาตรฐานไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเอสเทอร์ที่กรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน กำหนดไว้

คำสำคัญ : ไบโอดีเซล, เตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟ, ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน, เมทิลเอสเอสเทอร์, ชนิดไหลต่อเนื่อง, น้ำมันปาล์ม

TITLE	A Microwave Reactor for Continuous Flow Biodiesel Production		
AUTHOR	Intarak Ongart		
ADVISORS	Assistant Professor Jindaporn Jamradloedluk , Ph.D. Associate Professor Adisak Pattiya , Ph.D.		
DEGREE	Master of Engineering	MAJOR	Mechanical Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2022

ABSTRACT

Due to energy crisis, Biodiesel is an alternative fuel produced from renewable resources. such as vegetable oil or animal fat no negative effect on environment and engine Biodiesel, which is one of the important renewable energy respectively.

The this research, Studies on the percentage of methyl esters with a microwave reactor as a heat source Palm oil (ROL), potassium hydroxide (KOH) was used as a catalyst The mole ratio between methanol to oil and catalyst content is 6:1 by flowing through the microwave, the power is at (600 and 800 watts) Reaction time (1 minute and 2 minutes) Palm oil temperature (60°C and 80°C) Effects of methyl esters and properties of methyl esters

The results show it was found that In two temperature ranges, 60°C and 80°C by using a power of 800 watts The yield percentage of methyl ester increased in the range 76.70-77.15 to 80.47-86.31. Increasing the power of the microwave by radiating heat at 800 watts. Will make the biodiesel flow react better than 600 watts. This is because the transesterification reaction is a heated reaction. Therefore, the longer the microwave radiation, the better the reaction time. The yield of methyl ester was increased and the properties of methyl ester were in line with the methyl ester biodiesel standard specified by the Department of Energy. The Ministry of Energy has set

Keyword : Biodiesel, Microwave, Transesterification, Methyl ester, Continuous Flow,
Palm Oil



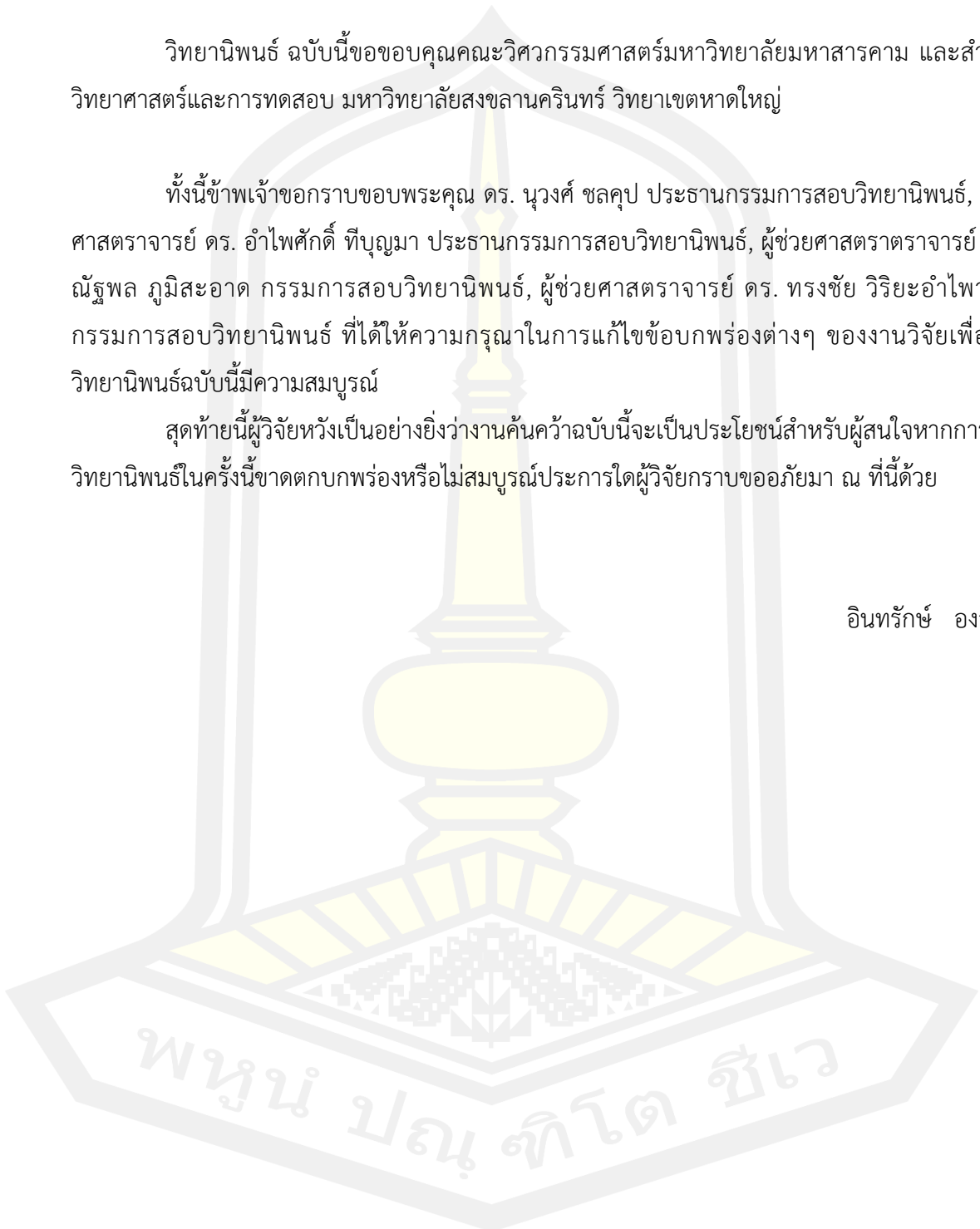
กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ ฉบับนี้ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และสำนักวิทยาศาสตร์และการทดสอบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ทั้งนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ดร. นวรงค์ ชลคุป ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์, รองศาสตราจารย์ ดร. อำไพศักดิ์ ทีบุญมา ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพล ภูมิสะอาด กรรมการสอบวิทยานิพนธ์, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความกรุณาในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของงานวิจัยเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานค้นคว้าฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจหากการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ขาดตกบกพร่องหรือไม่สมบูรณ์ประการใดผู้วิจัยกราบขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

อินทรีรักษ์ งามอาจ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ช
สารบัญ	ซ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพประกอบ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.5 สถานที่ดำเนินงานวิจัย	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ความหมายของไบโอดีเซล	6
2.2 ประวัติความเป็นมาของไบโอดีเซล	6
2.3 ชนิดของวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล	7
2.4 น้ำมันปาล์ม	8
2.5 อุตสาหกรรมไบโอดีเซล	9
2.6 รังสีไมโครเวฟ	9
2.7 ลักษณะเฉพาะและประโยชน์ของไมโครเวฟ	10
2.8 ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification)	11

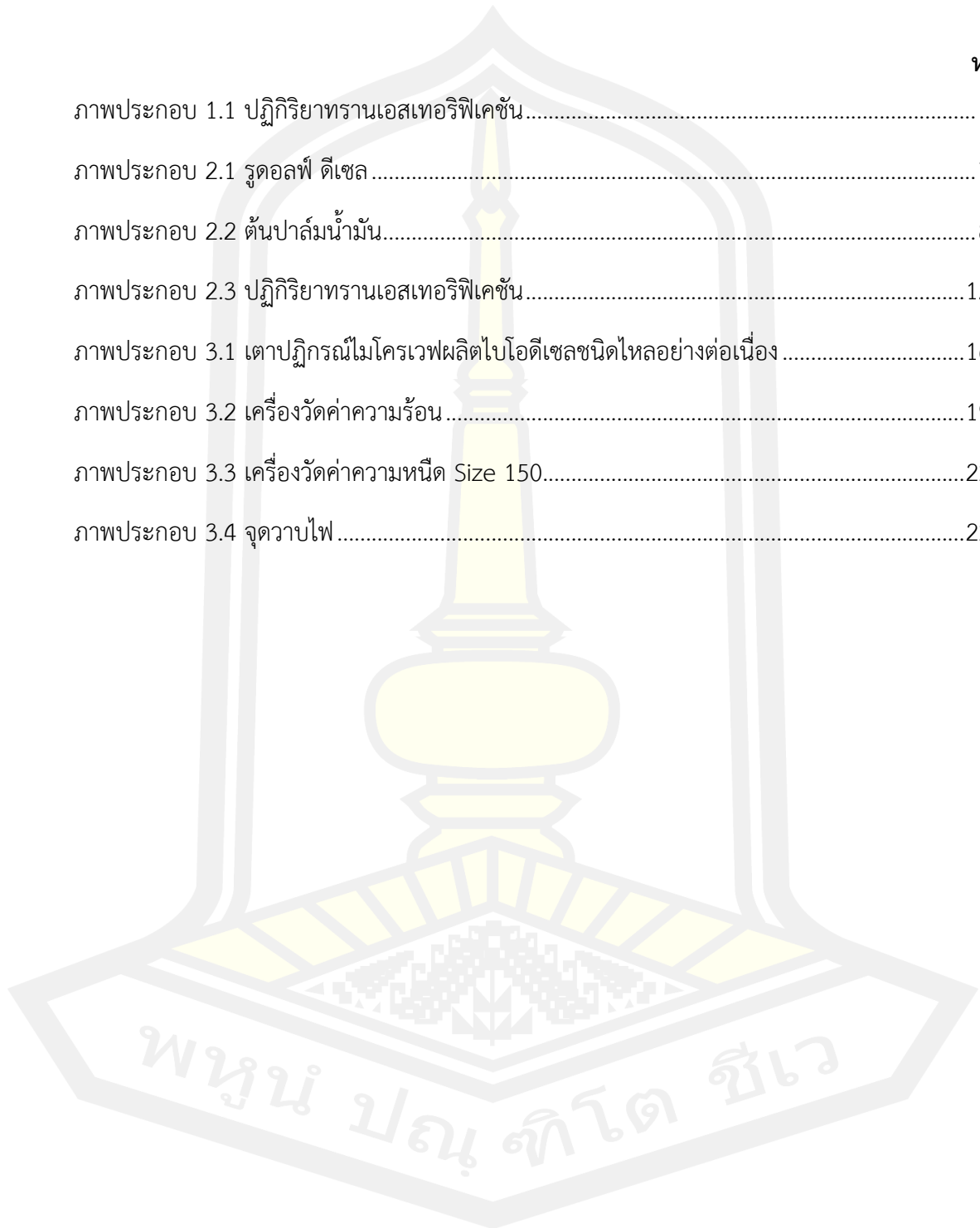
2.9 เมทิลเอสเทอร์ (Methyl Ester)	13
2.10 คุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซล	14
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14
บทที่ 3 วิธีดำเนินการศึกษา.....	16
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้.....	16
3.2 วิธีการทดลอง.....	17
3.3 การวิเคราะห์สมบัติของเมทิลเอสเทอร์	18
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	27
4.1 อิทธิพลของรังสีไมโครเวฟที่ส่งผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์.....	27
4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์	27
4.3 อิทธิพลของระยะเวลาที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์.....	28
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	32
5.1 สรุปผลการทดลอง	32
5.2 ข้อเสนอแนะ	33
บรรณานุกรม	34
ภาคผนวก	38
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ.....	39
ภาคผนวก ข ตารางข้อมูล	41
ภาคผนวก ค ภาพประกอบ	49
ประวัติผู้เขียน	68

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 2.1 สมบัติและค่าความร้อนของพืชแต่ละชนิด.....	7
ตาราง 2.2 ความหนาแน่นของคลื่นวิทยุความมาตรฐานความปลอดภัยของ ANSI.....	11
ตาราง 2.3 ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซล.....	14
ตาราง 3.1 ลำดับการทดลองที่สภาวะต่างๆ.....	18
ตาราง 4.1 อิทธิพลของปัจจัยต่างๆที่ส่งผลกระทบต่อร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์.....	29
ตาราง 4.2 สมบัติของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่สภาวะการทดลองต่างๆ	30
ตาราง ข.1 ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์.....	38
ตาราง ข.2 ข้อมูลประกอบการวิเคราะห์สมบัติความหนืดของเมทิลเอสเทอร์ที่สภาวะต่างๆ.....	39
ตาราง ข.3 ข้อมูลประกอบการวิเคราะห์สมบัติความหนาแน่นของเมทิลเอสเทอร์ที่สภาวะต่างๆ.....	40
ตาราง ข.4 ข้อมูลประกอบการวิเคราะห์สมบัติจุดวาบไฟของเมทิลเอสเทอร์ที่สภาวะต่างๆ.....	41
ตาราง ข.5 ข้อมูลประกอบวิเคราะห์สมบัติค่าจุดชนของเมทิลเอสเทอร์ที่สภาวะต่างๆ.....	42
ตาราง ข.6 ข้อมูลประกอบวิเคราะห์สมบัติค่าจุดไหลเทของเมทิลเอสเทอร์ที่สภาวะต่างๆ.....	43
ตาราง ข.7 ข้อมูลประกอบวิเคราะห์สมบัติค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110°C ของเมทิลเอสเทอร์ที่สภาวะต่างๆ.....	44
ตาราง ข.8 ข้อมูลประกอบวิเคราะห์สมบัติค่าความร้อนของเมทิลเอสเทอร์ที่สภาวะต่างๆ.....	45

สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 1.1 ปฏิบัติการทรานเอสเทอริฟิเคชัน.....	1
ภาพประกอบ 2.1 รูดอล์ฟ ดีเซล	7
ภาพประกอบ 2.2 ต้นปาล์มน้ำมัน.....	8
ภาพประกอบ 2.3 ปฏิบัติการทรานเอสเทอริฟิเคชัน.....	12
ภาพประกอบ 3.1 เตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟผลิตไบโอดีเซลชนิดไหลอย่างต่อเนื่อง	16
ภาพประกอบ 3.2 เครื่องวัดค่าความร้อน	19
ภาพประกอบ 3.3 เครื่องวัดค่าความหนืด Size 150.....	23
ภาพประกอบ 3.4 จุกวาล์วไฟ	23



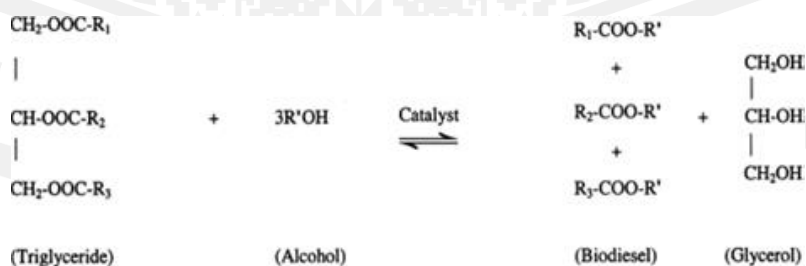
บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

จากวิกฤตราคาน้ำมันปาล์มตกต่ำตั้งแต่ปลายปี 2560 ทำให้รัฐบาลเร่งรัดนโยบายการเพิ่มสัดส่วนการผสมไบโอดีเซลในน้ำมันดีเซล ซึ่งเดิมมีการผสมอยู่ที่สัดส่วนไม่เกินร้อยละ 7 และในปี 2561 ได้เริ่มมีการใช้น้ำมัน B20 ซึ่งมีไบโอดีเซลผสมในสัดส่วนร้อยละ 20 สำหรับรถบรรทุกขนาดใหญ่ เพื่อเพิ่มอุปสงค์การใช้น้ำมันปาล์มที่ล้นตลาด ทำให้มียอดใช้ไบโอดีเซลรวมทั้งสิ้นราว 4.3 ล้านลิตร/วัน จากปริมาณการใช้น้ำมันดีเซล 65.8 ล้านลิตร/วัน อย่างไรก็ตามกำลังการผลิตไบโอดีเซลรวมทั้งประเทศในปี 2561 อยู่ที่ 7.7 ล้านลิตร/วัน จึงจำเป็นต้องหามาตรการเพื่อเพิ่มอุปสงค์ในการใช้ไบโอดีเซล กระทรวงพลังงานจึงมีเป้าหมายการเพิ่มสัดส่วนไบโอดีเซลในน้ำมันดีเซลทั่วไปจากร้อยละ 7 เป็น 10 ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มคุณภาพไบโอดีเซล เพื่อให้ได้การยอมรับจากบริษัทผู้ผลิตเครื่องยนต์ (กระทรวงพลังงาน, 2561) ทั้งนี้ในแผนการพัฒนากำลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 – 2579 กำหนดเป้าหมายการใช้ไบโอดีเซลที่ 14 ล้านลิตร/วัน ภายในปี 2579 (กรมพัฒนากำลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2558)

ไบโอดีเซล (Biodiesel) เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือกที่ผลิตได้จากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ผ่านปฏิกิริยาเคมีที่เรียกว่า “ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน” ซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิที่เหมาะสม ได้ผลผลิตหลักออกมาเป็น “แอลคิลเอสเทอร์ (ไบโอดีเซล)” และได้กลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้ (Ma and Hanna, 1999) โดยในทางทฤษฎีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันคือ 3:1 (ดูรูปที่ 1)



ภาพประกอบ 1.1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

ที่มา: Ma and Hanna. 1999

น้ำมันไบโอดีเซลในทางวิชาการเรียกว่าน้ำมันที่ผลิตจากน้ำมันพืชชนิดต่างๆ หรือน้ำมันปรุงอาหารแล้วนำมาแปรสภาพผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน สุทธิ นิเซ็ง (2563)

เมทิลเอสเตอ์ (Methyl Ester) ค่าเมทิลเอสเตอ์ คือ ปริมาณโมเลกุลเมทิลเอสเตอ์ หรือไบโอดีเซล ค่าที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานบ่งชี้ว่าการผลิตไบโอดีเซลทำให้ได้โมเลกุลไบโอดีเซลมากตามเกณฑ์ โมเลกุลหรือสารอื่นๆ ที่ปะปนมาจะมีน้อย ซึ่งทำให้ไบโอดีเซลมีคุณสมบัติในทุกๆ ด้านดีตามไปด้วย สายฝน เกียวสำพันธ์ (2563) การนำไปใช้จะให้ผลด้านประสิทธิภาพ การสึกหรอ เชื้อเพลิง หรือคุณสมบัติอื่นๆ ในทางที่ดีทั้งหมดใช้ระบุความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล วิธีทดสอบใช้ตาม EN14103 ซึ่งตรวจวัด โดยใช้เทคนิคโครมาโตกราฟีและผลที่ได้ต้องให้ค่าต่ำกว่า 96.5 %wt การรณ พงสุวรรณรักษ์ (2562)

ไบโอดีเซลเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือกที่ผลิตจากแหล่งทรัพยากรหมุนเวียน เช่น น้ำมันจากพืช หรือไขมันจากสัตว์ ดังนั้นจึงไม่ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม ไบโอดีเซลสามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่ต้องปรับแต่ง อีกทั้งยังช่วยรักษาสภาพเครื่องยนต์ให้ใช้งานได้นานกว่า เนื่องจากออกซิเจนในไบโอดีเซลจะช่วยให้การสันดาปที่สมบูรณ์กว่าน้ำมันดีเซล (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2553)

ปัจจุบันในการผลิตไบโอดีเซลส่วนใหญ่จะใช้กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันกับแอลกอฮอล์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับจุดเดือดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ โดยนิยมใช้ความร้อนแก่ระบบด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electrical heater) อย่างไรก็ตามการให้ความร้อนด้วยวิธีดังกล่าวต้องใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่นาน จึงได้มีการศึกษาวิจัยในการทำคลื่นรังสีประเภทต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้เพื่อลดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเช่น รังสีไมโครเวฟ รังสีอัลตราโซนิกและรังสีอินฟราเรด เป็นต้น (Azcan and Danisman, 2008) ที่ผ่านมามีการศึกษาวิจัยในการนำรังสีไมโครเวฟมาใช้ในการช่วยเร่งกระบวนการผลิตไบโอดีเซล เช่น ประเมษฐ์ สิทธิสันต์ (2553) ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลแบบไหลต่อเนื่องโดยใช้เครื่องไมโครเวฟตามบ้านเรือน ในการผลิตไบโอดีเซลในงานวิจัยนี้ใช้สบูดำทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันต่อยวทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่อัตราส่วนโดยโมลของเอทานอลต่อน้ำมัน 1:10.2 เวลาในการทำปฏิกิริยา 31 วินาที และโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1.3 % โดยน้ำหนัก เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากผลการศึกษาพบว่า ได้ปริมาณผลได้ของไบโอดีเซลร้อยละ 96.5 % จุดช่นตัว 4 °C จุดไหลเท 1 °C ค่าความหนืด 4.2 cSt. จุดวาบไฟ 154 °C และค่าความร้อน 37.76 kJ/g ซึ่งคุณสมบัติที่ได้สอดคล้องตามมาตรฐานไบโอดีเซลของกรมธุรกิจพลังงาน การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เทคนิคไมโครเวฟนั้น (Shakinass A. et al., 2010) ได้ใช้เทคนิคโดยทั่วไป ได้ % ผลผลิตที่ดีที่สุดสำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำโดยใช้อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน 7.5:1 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (1.5%)

และเวลาในการทำปฏิกิริยาหนึ่งชั่วโมงโดยรักษาอุณหภูมิปฏิกิริยาไว้ที่ 65 °C ผลการวิจัยพบว่าการประยุกต์ใช้ พลังงานไมโครเวฟด้วยคลื่นความถี่วิทยุเป็นเส้นทางที่รวดเร็วและง่ายดาย โดยข้อดีของการเพิ่มอัตราเกิดปฏิกิริยาและปรับปรุงกระบวนการแยกสาร เวลาในการทำปฏิกิริยาลดลงเหลือ 2 นาที แทนที่จะเป็น 150 นาที เพราะการใช้เทคนิคไมโครเวฟ ไม่จำเป็นต้องมีการปรับสภาพก่อน วิธีการนี้ยังช่วยให้สามารถใช้วัตถุดิบที่มีกรดไขมันอิสระสูงซึ่งรวมถึงน้ำมันสบู่ดำ อย่างไรก็ตามสิ่งนี้จะต้องควบคุมเวลา มิฉะนั้นผลผลิตอาจได้รับผลกระทบ ในการใช้ศักยภาพพลังงานไมโครเวฟสำหรับการผลิตไบโอดีเซล (Veera Ganeswar Gude et al., 2013) จากการสกัดน้ำมันถั่วเหลือง กระบวนการทรานเอสเทอริฟิเคชันโดยรวมลำดับปฏิกิริยา 3 ปฏิกิริยาต่อเนื่องกันและสามารถเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับได้ซึ่งกลีเซอรินจะก่อตัวเป็นตัวกลาง โดยให้โมเลกุลเอสเทอร์หนึ่งโมเลกุลในแต่ละขั้นตอนปฏิกิริยาปริมาณสัมพันธ์ต้องใช้ไตรกลีเซอริน 1 โมล และแอลกอฮอล์ 3 โมล อย่างไรก็ตามปริมาณแอลกอฮอล์ที่มากเกินไปถูกใช้เพื่อเพิ่มผลผลิตของออคิลเอสเทอร์ โดยการเปลี่ยนสมดุลไปสู่การก่อตัวของเอสเทอร์และเพื่อให้เฟสแยกตัวจากกลีเซอรอลที่เกิดขึ้นเป็นผลพลอยได้ ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการทรานเอสเทอริฟิเคชันเรียกว่า “ไบโอดีเซล” หลังจากนั้น (Xulin Xiang et al., 2017) ได้ทำการแผ่รังสีไมโครเวฟช่วยเพิ่มผลผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปรุงอาหารที่ใช้แล้วโดยมีเถาถ่านหินดัดแปลงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การศึกษาครั้งนี้เปิดเผยว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยถ่านหินดัดแปลงสามารถเพิ่มผลผลิตไบโอดีเซลโดยมีไมโครเวฟทำหน้าที่ช่วยเร่งปฏิกิริยา ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดที่ 94.91% โดยอัตราส่วนของโมลอยู่ที่ 9.67:1 ถ่านหินที่ดัดแปลงสามารถเร่งปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชัน ได้ผลผลิตมากกว่า 90% หลังจากการทดลองใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 8 ครั้ง การทบทวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ไมโครเวฟช่วย (Behzed khedri et al., 2012) การผลิตไบโอดีเซลสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการเพิ่มกำลังไมโครเวฟช่วยสภาวะการผลิตไบโอดีเซลที่เหมาะสมที่สุดกำลังไมโครเวฟอยู่ระหว่าง 300-700 วัตต์ อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไบโอดีเซลอยู่ในช่วง 55-65 °C เวลาตอบสนองที่เหมาะสมอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 7 นาที โดยการใช้อัตราส่วนต่อโมล 6:1 สรุปได้ว่าความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตไบโอดีเซลอยู่ระหว่าง 1 และ 1.3 (A.G. Baloch et al., 2021) ได้มีศึกษาการประยุกต์ใช้การสังเคราะห์ไมโครเวฟในการผลิตไบโอดีเซล มุ่งเน้นไปที่การเพิ่มผลผลิตไบโอดีเซลและเน้นวิธีสังเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยไมโครเวฟผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและความสำคัญของไบโอดีเซล

จากการศึกษาจะเห็นได้ว่า การนำคลื่นรังสีไมโครเวฟชนิดไหลอย่างต่อเนื่องมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนให้กับ กระบวนการทรานเอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันพืชเพื่อผลิตไบโอดีเซลนั้นสามารถลดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชันได้ รวมถึงยังได้ปริมาณผลได้และสมบัติของไบโอดีเซลในเกณฑ์ที่น่าพอใจ ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการพัฒนาระบบไบโอดีเซลประเภทจากกระบวนการทรานเอสเทอริฟิเคชันจากน้ำมันพืชด้วยโดยใช้รังสีไมโครเวฟชนิดไหลอย่างต่อเนื่องเป็น

แหล่งกำเนิดความร้อน โดยได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อปริมาณผลได้และสมบัติของไบโอดีเซลที่ได้

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อพัฒนาและทดสอบเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟสำหรับการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง
- 1.2.2 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณผลได้และสมบัติของไบโอดีเซล

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 ใช้เครื่องไมโครเวฟขนาด 800 วัตต์ที่ใช้ตามบ้านเรือนเป็นแหล่งให้ความร้อน โดยมีการใช้น้ำมันปาล์ม (ROL) 200 กรัมต่อครั้ง
- 1.3.2 ระบบการผลิตเมทิลเอสเทอร์โดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งกำเนิดความร้อน
- 1.3.3 ใช้น้ำมันปาล์ม (ROL) และเมทานอลเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล และใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
- 1.3.4 สภาวะในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ได้แก่ สัดส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม (ROL) 6:1 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม (ROL)
- 1.3.5 ปัจจัยที่การศึกษาได้แก่ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (60 และ 80 องศาเซลเซียส) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาไหลผ่านไมโครเวฟอย่างต่อเนื่อง (1 และ 2 นาที) กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ (600 และ 800 วัตต์) ค่าอัตราการไหลของสารทำปฏิกิริยา (34.94 มิลลิลิตรต่อนาที)
- 1.3.6 สมบัติของเมทิลเอสเทอร์ที่การศึกษา ได้แก่ ความหนืด ความหนาแน่น ค่าความร้อน จุดวาบไฟ ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จุดขุ่นและจุดไหลเท

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้ระบบผลิตไบโอดีเซลซึ่งใช้รังสีไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อน
- 1.4.2 เป็นแนวทางในการส่งเสริมการผลิตและใช้ไบโอดีเซลซึ่งเป็นพลังงานทดแทน

1.5 สถานที่ดำเนินงานวิจัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ และศูนย์เครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัย
มหาสารคาม

สำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขต
หาดใหญ่



เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลชนิดไหลอย่างต่อเนื่องด้วยรังสีไมโครเวฟโดยใช้รังสีไมโครเวฟที่เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนเพื่อช่วยในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโพแทสเซียม ได้มีกระบวนการผลิตซึ่งเป็นพลังงานทดแทนจากการสูญเสียรายได้โดยการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศและไม่เป็นผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 ความหมายของไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล คือ พลังงานทดแทนที่ผลิตจากพืชหรือไขมันที่ได้มาจากสัตว์ มาสกัดเป็นน้ำมันดีเซลโดยผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน (Tranesterification) ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแอลกอฮอล์ (Ethanol) และมีกลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้ ในการทำปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่า ทรานเอสเทอร์ฟิเคชันนั้นมีวัตถุประสงค์ในการผลิตหากเป็นน้ำมันปาล์มดิบจะต้องผ่านกระบวนการแยกยางเหนียวและลดกรดให้มีกรดไขมันอิสระที่เหมาะสมและจะนำไปขจัดน้ำออกโดยการให้ความร้อนในอุณหภูมิที่เหมาะสม

2.2 ประวัติความเป็นมาของไบโอดีเซล

น้ำมันไบโอดีเซล ถูกคิดค้นและนำมาทดลองโดยวิศวกรชาวเยอรมันได้นำมาทดลองใช้ในเครื่องยนต์เป็นผลสำเร็จครั้งแรกเมื่อวันที่ 10 สิงหาคม ค.ศ.1893 โดย “รูดอล์ฟ ดีเซล” (Rudolf C. Diesel: 1858 – 1913) วิศวกรชาวเยอรมัน ผู้ประดิษฐ์เครื่องยนต์ที่มีชื่อว่า “ดีเซล” ซึ่งเป็นผลสำเร็จในปี 1893 และจดสิทธิบัตรในถัดมาโดยการทดลองได้นำเครื่องยนต์ลูกสูบเดี่ยวที่ทำจากเหล็กยาว 3 เมตร ซึ่งมีล้อเฟืองติดอยู่ที่ฐานมาทดลองใช้กับน้ำมันไบโอดีเซล ที่ทำมาจากเมล็ดถั่วเหลืองสำเร็จเป็นครั้งแรกของโลกในเมืองฮักส์บวร์กประเทศเยอรมนี และเพื่อเป็นการระลึกถึงความสำเร็จในครั้งนั้น จึงทำให้วันนี้ถูกกำหนดให้เป็นวันไบโอดีเซลระหว่างประเทศในเวลาต่อมา



ภาพประกอบ 2.1 รูดอล์ฟ ดีเซล

ที่มา : (Posted, 2011)

หลังจากดีเซลได้ทดลองโซวีนในประเทศเยอรมันในปีค.ศ. 1893 และได้้นำไบโอดีเซลที่ทำมาจากน้ำมันถั่วมาทดลองกับเครื่องยนต์อีกครั้งในงานเวิร์ลด์ แฟร์ที่กรุงปารีส ประเทศฝรั่งเศสในปี ค.ศ. 1898 ทั้งนี้เขาเชื่อว่าไบโอดีเซลนี้จะป็นน้ำมันที่เหมาะสมกับเครื่องยนต์มากที่สุดในอนาคต

2.3 ชนิดของวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล

ในการผลิตไบโอดีเซล สามารถนำวัตถุดิบหลายชนิดมาผ่านกระบวนการทางเคมี วัตถุดิบแต่ละชนิดมีปริมาณราคาที่แตกต่างกัน และองค์ประกอบของน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ชนิดนั้นๆ ในแต่ละพื้นที่ที่เหมาะสมแก่การผลิตมีการปลูกพืชหลายชนิดแตกต่างกันไป เช่น ปาล์มน้ำมันที่มีการปลูกมากในประเทศไทยโซนภาคใต้และประเทศมาเลเซียส่วนพืชชนิดอื่นๆ แตกต่างกันไปจะพบได้เยอะในโซนยุโรป เป็นต้น

ตาราง 2.1 สมบัติและค่าความร้อนของพืชแต่ละชนิด

น้ำมัน	ความถ่วงจำเพาะ (ที่ 21°C)	ความหนืด (ที่ 21°C) (cSt)	ค่าความร้อน (kJ/kg)
ถั่วเหลือง	0.918	57.2	39,350
ทานตะวัน	0.918	60.0	39,490
มะพร้าว	0.915	51.9	37,540
ถั่วลิสง	0.914	67.1	39,470
ปาล์ม	0.898	88.6	39,550
เมล็ดในปาล์ม	0.904	66.3	37,720
เมล็ดสบู่ดำ	0.915	36.9 (วัดที่ 38°C)	39,000
น้ำมันดีเซล	0.845	3.8	46,800

ที่มา: (ชานนท์ โพธิ์เจริญ, 2550)

2.4 น้ำมันปาล์ม

น้ำมันปาล์มคือ น้ำมันชนิดหนึ่งที่ใช้วัตถุดิบจากผลปาล์ม น้ำมันปาล์มผลิตจากเนื้อปาล์ม ผ่านกรรมวิธีสำหรับใช้บริโภคด้วยกระบวนการผลิตที่มีคุณภาพด้วยเทคโนโลยีระบบ ICE Condensing จึงทำให้ได้น้ำมันบริสุทธิ์ มีสีเหลือง ใสสะอาด และอุดมไปด้วยคุณค่า มีวิตามินอี ที่เหมาะในการประกอบอาหารประเภทผัดและทอด มีราคาต่ำกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่น ผลิตได้เองในประเทศ ดังนั้น การใช้ประโยชน์จากปาล์มน้ำมันจะก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่มและรายได้ของประเทศ น้ำมันปาล์ม (Palm oil) ได้จากผลปาล์ม 2 ส่วนคือ

- 1.จากเปลือกหุ้มภายนอก (measocarp) น้ำมันที่ได้เรียกว่า น้ำมันจากเนื้อเมล็ดปาล์ม (palm oil)
- 2.จากเนื้อในของเมล็ด (palm kernel) น้ำมันที่ได้เรียกว่า น้ำมันจากเมล็ดปาล์ม (palm kernel oil) ซึ่งมีน้ำมันร้อยละ 44-48 เปอร์เซนต์



ภาพประกอบ 2.2 ต้นปาล์มน้ำมัน

น้ำมันปาล์มดิบ หรือ CPO เมื่อเข้าสู่ระบบอุตสาหกรรมจะสามารถนำไปผลิตได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ โรงงานกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ และโรงงานผลิตไบโอดีเซลโดยน้ำมันดิบจะเข้าสู่โรงงานกลั่น ร้อยละ 70 ที่เหลือร้อยละ 30 จะเข้าสู่โรงงานผลิตไบโอดีเซล

เมื่อน้ำมันปาล์มดิบเข้าสู่โรงกลั่น จะได้ผลิตภัณฑ์ 2 ตัวคือ กรดไขมันปาล์ม (FFA) คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 5 ของน้ำมันปาล์มดิบทั้งหมด และน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (RBO Palm Oil) ร้อยละ 95 ของน้ำมันปาล์มดิบทั้งหมด ซึ่งน้ำมันปาล์มน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ยังไม่สามารถบริโภคในครัวเรือนได้ แต่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น นมข้นหวาน บะหมี่ ขนมหกรอบ และไอศกรีม เป็นต้น

สำหรับโครงสร้างอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันของประเทศไทย สามารถสรุปได้ว่า น้ำมันปาล์มดิบหรือ CPO ร้อยละ 100 นั้น จะนำไปสู่อุตสาหกรรมหลักๆ 3 ประเภทได้แก่ การผลิตไบโอดีเซล ผลิตน้ำมันพืช อุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมที่ไม่ใช่อาหาร โดยเป็นการผลิตไบโอดีเซลร้อยละ 38 ผลิตน้ำมันพืชและอุตสาหกรรมอาหาร ร้อยละ 51 และอุตสาหกรรมที่ไม่ใช่อาหารร้อยละ 11 (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2556)

2.5 อุตสาหกรรมไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลไม่มีปริมาณกำมะถัน และไม่มีสารอโรมาติก จึงเป็นเชื้อเพลิงสะอาด ช่วยลดมลพิษทางอากาศได้มาก โดยลดปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ลดไฮโดรคาร์บอนรวม ลดฝุ่นละอองและลดควันดำได้ แต่เพิ่มไนโตรเจนออกไซด์สูงกว่าน้ำมันดีเซล ลดการปลดปล่อยเรือนกระจกเพราะผลิตจากพืช ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากย่อยสลายได้เองในธรรมชาติ

การผสมไบโอดีเซลในระดับร้อยละ 1-2 สามารถช่วยเพิ่มดัชนีการหล่อลื่นให้กับน้ำมันดีเซลได้ มีการเผาไหม้ที่ดีเนื่องจากในไบโอดีเซลมีออกซิเจนผสมอยู่ร้อยละ 10 ทำให้การผสมระหว่างอากาศกับน้ำมันมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และเป็นการเพิ่มอัตราส่วน ปริมาณอากาศต่อน้ำมันได้เป็นอย่างดี

เป็นการช่วยเหลือเกษตรกรภายในประเทศ โดยการเพิ่มมูลค่าพืชผลการเกษตรและสร้างงานในชนบท ด้วยการสร้างตลาดพลังงานไว้รองรับผลผลิตทางการเกษตรที่เหลือจากการบริโภค ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่สามารถผลิตขึ้นจากพืชผลทางการเกษตรภายในประเทศจึงช่วยประหยัดเงินตราต่างประเทศในการนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศเป็นการเสริมความมั่นคงและเสถียรภาพ ด้านพลังงานของประเทศ ลดผลกระทบต่อวิกฤตพลังงานซึ่งมีผลกระทบต่อประเทศอย่างสูง (กรมธุรกิจพลังงาน, 2553)

2.6 รังสีไมโครเวฟ

คลื่นรังสีไมโครเวฟ หมายถึง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่อยู่ในช่วง 0.3 – 300 กิกะเฮิรตซ์ (GHz) และความยาวคลื่น 1 เมตร ถึง 1 มิลลิเมตรคลื่นรังสีไมโครเวฟมีคุณสมบัติเป็นกลุ่มและมีความเป็นแม่เหล็กไฟฟ้าในทางตรงข้ามกับคลื่นแสง (ส่วนหนึ่งของแสงเลเซอร์) คลื่นรังสีไมโครเวฟจะประพาดตัวอยู่ในกฎของแสงและสามารถเคลื่อนที่ ดูดซับ หรือสะท้อนกลับ

การใช้รังสีไมโครเวฟนั้น สามารถใช้เครื่องไมโครเวฟโดยทั่วไปมาดัดแปลงโดยเจาะรูด้านบน ติดตั้งคอนเดนเซอร์เพื่อให้ไอที่ลอยออกไปเกิดการควบแน่นตกลงมาภายในป้องกันเมทานอลหรือไบโอดีเซลระเหยออกไป (Yan et al., 2008.) ทั้งยังให้ความร้อนได้สูงสุด 800 วัตต์ ทำให้สังเคราะห์ไบโอดีเซลได้ในเวลาอันสั้น โดยทั่วไปการแผ่รังสีไมโครเวฟจะไปกระตุ้นโมเลกุลและไอออนโดยการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้โมเลกุลหรือไอออนมีขั้วเกิดการหมุนอย่างรวดเร็ว และเกิดความร้อนต่อเนื่อง จากแรงเสียดทานอิทธิพลของกำลังคลื่นไมโครเวฟส่งผลกระทบต่อผลได้ในการใช้กำลังคลื่นไมโครเวฟที่ต่ำในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันจะส่งผลกระทบต่อปริมาณผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ในปริมาณที่สูงกว่าการใช้กำลังคลื่นไมโครเวฟที่สูงกว่าจะได้ผลของเมทิลเอสเทอร์ที่ต่ำ บัณฑิต วิจารณ์อารยานนท์. (2559)

จากการทดลองที่กำลังคลื่นไมโครเวฟ 800 วัตต์อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 นาที เป็นสถานะที่ทำให้ได้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในปริมาณที่สูงมากกว่าถึง ร้อยละ 98.10 ซึ่งเมื่อจะพิจารณาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อเมทิลเอสเทอร์ในสถานะนี้ปฏิกิริยาเคมีถูกเร่งโดยกำลังคลื่นไมโครเวฟประกอบกับการควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 60 องศาเซลเซียสจึงสามารถเร่งปฏิกิริยาทางเคมี และส่งผลให้ได้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่สูง

2.7 ลักษณะเฉพาะและประโยชน์ของไมโครเวฟ

ไมโครเวฟนอกจากมีคุณสมบัติที่เคลื่อนที่ได้เร็วเพราะเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแล้วยังมีคุณสมบัติที่เด่นๆ อีกหลายประการ จึงทำให้ไมโครเวฟถูกนำมาใช้ประโยชน์ในงานด้านต่างๆ มากมาย หลายด้าน คุณสมบัติเหล่านี้ ได้แก่ การมีความถี่สูงกว่า 1 GHz ซึ่งหมายถึงความยาวคลื่นจะสั้นกว่า 30 cm ในย่านไมโครเวฟสัญญาณรบกวนที่มนุษย์สร้างขึ้น (man-made noise) มีระดับต่ำเมื่อเทียบกับย่านความถี่ต่ำกว่าโครงสร้างโมเลกุลของวัตถุหลายๆชนิดสามารถดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟได้เป็นอย่างดี คุณสมบัติเด่นประการที่ (1) และประการที่ (2) นับว่ามีประโยชน์มากสำหรับการใช้ระบบสื่อสารและระบบเรดาร์ (Radar) ในระบบเรดาร์นั้นเพื่อให้การตรวจจับมีความละเอียดสูง เมนเบีม (main beam) ของสายอากาศจำเป็นต้องมีเบีมวิธที่จะขึ้นอยู่กับขนาดของสายอากาศ สำหรับการใช้งานด้านไฟฟ้าสื่อสารนั้นการที่ความถี่คลื่นพาห้สูงขึ้นจะทำให้มีแบนด์วิธสำหรับส่งข่าวสารมากกว้างขึ้น เช่น ถ้าความถี่คลื่นพาห้เป็น 4 GHz และระบบมีแบนด์วิธ 5% ก็จะหมายถึงจะมีแบนด์วิธที่ใช้งานได้ 200 MHz สำหรับคุณสมบัติประการที่ (3) คือการที่โมเลกุลของสารต่างๆสามารถดูดกลืนพลังงานของคลื่นไมโครเวฟนั้นจะใช้ประโยชน์ได้หลายด้านด้วยกัน การใช้ประโยชน์ที่ใกล้ชิดกับชีวิตในสังคมปัจจุบันมากที่สุดคือการนำมาทำเป็นเตาไมโครเวฟที่ใช้อุ่นหรือปรุงอาหาร เตา

ไมโครเวฟจะอาศัยการกระตุ้นให้โมเลกุลของน้ำในอาหารเกิดการสั่นสะเทือนซึ่งจะสร้างความร้อนขึ้น ทำให้อาหารสุกได้ข้อดีของการให้ความร้อนแบบนี้คือความร้อนจะเกิดภายในเนื้อในของอาหารซึ่งจะต่างจากการให้ความร้อนโดยการนำความร้อนหรือการพาความร้อนทั่วไป ลักษณะพิเศษนี้ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ได้มากมาย นอกจากการใช้งานในลักษณะที่ทำให้เกิดความร้อนแล้วยังสามารถใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างของแร่ธาตุและสารประกอบต่างๆ

การใช้ไมโครเวฟอย่างหนึ่งในสังคมมนุษย์ที่ว่าสิ่งใดที่ใช้ประโยชน์ได้มากมักจะอันตรายในตัวเอง ยกตัวอย่างเช่น เลเซอร์กำลังสูงสามารถใช้ตัดแผ่นเหล็กได้ ก็จะมาอันตรายต่อร่างกายคนเรามากถ้าไปโดนเข้าโดยตรง โดยเฉพาะถ้าเอาดวงตาไปเล็งแสงนั้นเข้า คลื่นไมโครเวฟถึงแม้จะมีความหนาแน่นของพลังงานไม่สูงเท่าแสงเลเซอร์แต่ก็ทำอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ได้โดยเฉพาะคลื่นไมโครเวฟที่ออกจากเรดาร์กำลังสูง ตารางที่ 2.2 แสดงตัวเลขของความหนาแน่นกำลังงานของคลื่นวิทยุความถี่ต่างๆ ที่จะต้องควบคุมไว้ไม่ให้เป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ จากตารางจะเห็นได้ว่าช่วงความถี่ 30-1,500 MHz ความหนาแน่นกำลังงานจะต่ำ เนื่องจากเป็นช่วงความถี่ที่เป็นอันตรายต่อเยื่อและอวัยวะของร่างกายได้ง่าย ดังนั้นผู้ทำเกี่ยวกับคลื่นวิทยุจึงควรระมัดระวังในเรื่องความปลอดภัย โดยหลีกเลี่ยงไม่อยู่ในบริเวณที่มีกำลังคลื่นสูง หรือหลีกเลี่ยงโดยทำงานอยู่ในห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic shielded room)

ตาราง 2.2 ความหนาแน่นของคลื่นวิทยุตามมาตรฐานความปลอดภัยของ ANSI

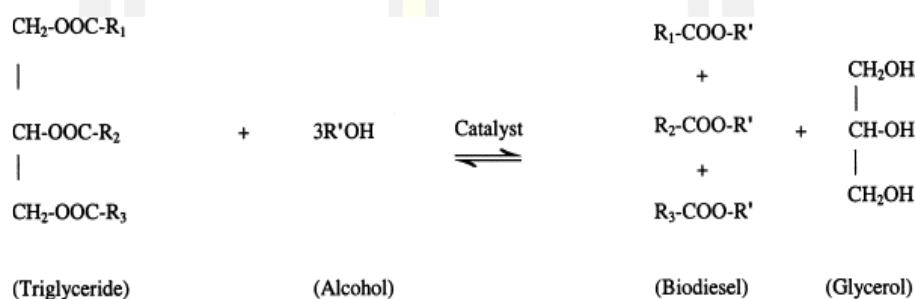
ความถี่ (MHz)	ความหนาแน่นกำลัง (mW/cm ²)
0.3-3	100
3-30	90/f ²
30-300	1.0
300-1,500	f/300
1,500-100,000	5.0

หมายเหตุ: f คือความถี่ที่มีหน่วยเป็น MHz

ที่มา: (บัณฑิต โรจน์อารยานนท์, 2559)

2.8 ปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification)

แม้ว่ากระบวนการในการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากกรดไขมัน (Fatty acid methyl ester: FAME) ไม่จำเป็นต้องใช้ความดันหรืออุณหภูมิที่สูงแต่จำเป็นต้องมีตัวเร่งปฏิกิริยา มีงานวิจัยอย่างต่อเนื่องในการหาตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ ที่เหมาะสมก่อนที่จะใส่ที่เป็นตัวเร่ง โดยทั่วไปตัวทำปฏิกิริยาจะต้องปราศจากน้ำ เพื่อหลีกเลี่ยงกระบวนการเกิดสบู่ ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ ดังนั้นปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต้องเติมจึงแปรตามชนิดของน้ำมันที่ใช้ เพื่อลดปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ จึงจำเป็นที่จะต้องทำการวัดค่าปริมาณกรดไขมันอิสระก่อน



ภาพประกอบ 2.3 ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน

ที่มา: Ma and Hanna. 1999

น้ำมันไบโอดีเซลในทางวิชาการเรียกว่าน้ำมันที่ผลิตจากน้ำมันพืชชนิดต่างๆ หรือน้ำมันปรุงอาหารแล้วนำมาแปรสภาพผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยการเติมแอลกอฮอล์ เช่น เอทานอล หรือเมทานอล และตัวเร่งปฏิกิริยาเช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ภายใต้สภาวะที่มีอุณหภูมิสูงเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างของน้ำมันจาก Triglycerides เป็น Organic Acid Esters เรียกว่า ไบโอดีเซลและเมทิลเอสเตอร์ได้ออกมาอีกด้วยซึ่งเป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมยา เครื่องสำอาง เป็นต้น ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำมันในเรื่องความหนืดให้เหมาะสมกับการใช้งานกับเครื่องยนต์ดีเซลและเพิ่มค่าซีเทนของน้ำมัน

ปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน แบ่งออกเป็น 6 ประเภทได้แก่

1) น้ำหรือความชื้น การที่มีความชื้นในไขมันจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันหรือน้ำมันโดยที่น้ำและด่างจะเป็นสาเหตุให้เกิดสบู่ และสบู่ที่เกิดขึ้นจะปนกับเอสเทอร์และกลีเซอรินที่ได้ ทำให้สารละลายผสมทั้งสองชนิดมีความหนืดสูงขึ้นส่งผลให้การแยกกลีเซอรินออกจากเอสเทอร์ทำได้ยากขึ้น วิธีป้องกันคือ แอลกอฮอล์ ไขมัน หรือน้ำมันควรมีน้ำหรือความชื้นปนอยู่น้อยที่สุดหรือไม่มีเลยเพื่อให้ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันเกิดได้สมบูรณ์

2) ตัวเร่งปฏิกิริยา กระบวนการนี้ส่งผลให้เมทิลเอสเทอร์ลดลงและมีภาวะแทรกซ้อนในการแยกสารและการทำให้ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีทั้งกรดและเบสแต่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสเนื่องจากเบสมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงและทำให้ผลดี

ที่อุณหภูมิต่ำกว่า ที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในกรณีที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ควรเป็นโซเดียมเอธีออกไซด์ หรือโซเดียมเมธีออกไซด์ ซึ่งจะมีประสิทธิภาพมากกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ สำหรับปฏิกิริยาที่เป็นกรด พบว่ามีข้อเสียหลายประการ ได้แก่ ภาวะที่ใช้อย่างน้อยมีความทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดอัตราส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันที่ใช้ต้องสูง อุณหภูมิสูงและใช้เวลานานในการทำปฏิกิริยา

3) เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะมีค่าสูงในระยะแรกของปฏิกิริยาและจะลดลงเมื่อเวลามากขึ้น ทำให้เกิดการแยกชั้นระหว่างไบโอดีเซลและกลีเซอรอล

4) อุณหภูมิ ในปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันอุณหภูมิมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นด้วยเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงทำให้แอลกอฮอล์ทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิที่ใช้สูงเกินจุดเดือดของแอลกอฮอล์จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงเนื่องจากการสูญเสียแอลกอฮอล์ในระหว่างทำปฏิกิริยา

5) ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้กล่าวคือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่ำและสูงเกินไปจะทำให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่ำ ดังนั้น ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจะมีค่าหนึ่งที่ค่าหนึ่งเท่านั้น นอกจากนี้ถ้าปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่ามากจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เกินมาไปทำปฏิกิริยากับน้ำมัน ทำให้เกิดปฏิกิริยาซาปอนิฟิเคชันหรือการเกิดสบู่ขึ้นเอง

6) สัดส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน สัดส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันมีผลต่อปริมาณของทรานเอสเทอร์ฟิเคชันที่เกิดขึ้นโดยตามทฤษฎีสัดส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันเท่ากับ 6:1 ในทางปฏิบัติจะต้องใช้ปริมาณของแอลกอฮอล์มากกว่าในทางทฤษฎีเพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

2.9 เมทิลเอสเทอร์ (Methyl Ester)

ค่าเมทิลเอสเทอร์ คือ ประมาณโมเลกุลเมทิลเอสเทอร์หรือไบโอดีเซล ค่าที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานบ่งชี้ว่าการผลิตไบโอดีเซลทำได้โมเลกุลไบโอดีเซลมากตามเกณฑ์ โมเลกุลหรือสารอื่นๆ ที่ปะปนมาจะมีน้อย ซึ่งทำให้ไบโอดีเซลมีคุณสมบัติในทุกๆ ด้านดีตามไปด้วย

การนำไปใช้จะให้ผลด้านประสิทธิภาพ การสึกหรอ เขม่าควัน หรือคุณสมบัติอื่นๆ ในทางที่ดีทั้งหมดใช้ระบุความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล วิธีทดสอบใช้ตาม EN14103 ซึ่งตรวจวัด โดยใช้เทคนิคโครมาโตกราฟีและผลที่ได้ต้องให้ค่าต่ำกว่า 96.5 %wt เทคนิคโครมาโตกราฟี (Chromatography) เป็นการแยกสารมากกว่า 1 ชนิดที่ผสมอยู่ให้ออกจากกันโดยอาศัยคุณสมบัติที่แตกต่างกันของสารต่างชนิด 2 ชนิด คุณสมบัติคือความสามารถในการละลายตัวในการทำละลายที่ไม่เท่ากันและ

ความสามารถในการดูดซับด้วยตัวดูดซับไม่เท่ากันหลักการคือ สารที่ละลายได้ดีและถูกดูดซับได้น้อยจะเคลื่อนที่ซึมผ่านตัวดูดซับได้เร็วและไกล ส่วนสารละลายได้ไม่ดี และถูกดูดซับได้มากจะเคลื่อนที่ซึมผ่านตัวดูดซับได้น้อยและสั้นกว่าดังนั้นการทำให้โคมกราฟีจะใช้ตัวทำละลายและตัวดูดซับเข้าช่วย

วิธีการก็นำตัวทำละลาย เช่น น้ำอีเทอร์เอทานอลหรือสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เป็นต้น ผสมลงในสารที่ต้องการทดสอบแล้วใช้ตัวดูดซับเข้าสัมผัสเพื่อดูดซับสารแต่ละชนิดจะสามารถละลายและถูกดูดซับเข้าไปได้

2.10 คุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซล

ตาราง 2.3 ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซล

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ		วิธีทดสอบ
1	เมทิลเอสเตอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (Methyl Ester, %wt.)	ไม่ต่ำกว่า	96.5	EN 14103
2	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 °C (กิโลกรัม ลูกบาศก์เมตร) (Density at 15°C kg/m ³)	ไม่ต่ำกว่าและไม่ สูงกว่า	860 900	ASTM D 1298
3	ค่าความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 °C (เซนติสโตกส์) (Viscosity at 40°C cSt)	ไม่ต่ำกว่าและไม่ สูงกว่า	3.5 5.0	ASTM D 445
4	จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส) (Flash Point, °C)	ไม่ต่ำกว่า	120	ASTM D 93
5	ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 °C ชั่วโมง (Oxidation Stability) hr.	ไม่ต่ำกว่า	10	EN 14112
6	จุดขุ่น (Cloud point:CP, °C)	ไม่สูงกว่า	16	ASTM D 2500
7	จุดไหลเท (Pour point:PP, °C)	ไม่สูงกว่า	10	ASTM D 97

ที่มา : (ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน 2556)

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลผลิตได้จากน้ำมันที่ได้จากพืช หรือไขมันที่ได้จากสัตว์ โดยใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในการผลิตนั้นสามารถผลิตขึ้นเองในครัวเรือนจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วนำไปผลิตเป็นน้ำมันไบโอดีเซลได้ การผลิตเป็นอุตสาหกรรมนั้นจะเป็นการใช้ไขมันปาล์ม เป็นน้ำมันพืชที่มีราคาถูกและหาได้ง่ายตามท้องตลาด กระบวนการผลิตจากน้ำมันปาล์มโดยใช้เครื่องกวนและไมโครเวฟนั้นได้มีการทดลองใช้อัตราส่วนเมทานอลและค่าตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ที่ 3,6,9 และ 12 ของอัตราส่วนน้ำมันนั้นได้มีการค้นพบว่าเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 0.15% เป็น 0.30% เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำมันเมื่อเปรียบเทียบกับผลได้เพิ่มขึ้นเพียง 4% เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 0.50% เป็น 0.70% ของเปอร์เซ็นต์น้ำมันที่ได้จะได้ผลเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นเพียง 2% (Choedkiatsakul et al., 2013) การนำรังสีไมโครเวฟ มาใช้ในการผลิตไบโอดีเซลได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์ไบโอดีเซลที่มีการนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็ง (CaO) จากน้ำมันสุปุดำชนิดหยาบได้มีการสังเคราะห์อยู่ 2 ขั้นตอนได้แก่ การสังเคราะห์แบบ เอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification) และ ทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน (Hanif et al., 2014) การนำของแข็งมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ที่ได้จากเปลือกไข่ไก่ เปลือกไขนกกระทา หอยทาก เปลือกกุ้ง หอยนางรม หอยแมลงภู่ เปลือกหอยแครง กระดุกปลา กระดุกแกะ และลิ้นทะเล ไม่เพียงแต่สามารถกำจัดของเสียออกจากน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์และยังลดค่าใช้จ่ายเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาอื่นได้ด้วยการผสมผสานพลังงานรังสีไมโครเวฟเข้ากับปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันแบบดั้งเดิมสามารถทำปฏิกิริยากับสารตัวทำลายเพิ่มลดความต้องการของตัวเร่งปฏิกิริยาอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันอัตราส่วนของปฏิกิริยาและอุณหภูมิของปฏิกิริยา ขั้นตอนการทรานเอสเทอร์ฟิเคชันใช้ไมโครเวฟ (Elma Transsonic T-460 type, Germany ความจุ: 2 ลิตรความถี่ 35 kHz กำลังไฟฟ้า 35 วัตต์) กระบวนการเชิงกลในการทดลองเบื้องต้นพบว่าจำเป็นต้องใช้เวลาที่เท่ากันเพื่อที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ (Guanyi et al., 2014) ในการศึกษาที่มีอัตราส่วน 4,5:1 หรือ 6:1 มีความเหมาะสมในการขับเคลื่อนปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยมีอัตราผลตอบแทนที่ยอมรับได้คือ 93.5% นอกจากนี้ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน อัลตราซาวด์ทำปฏิกิริยากับน้ำมันและแอลกอฮอล์อาจเกิดขึ้นเนื่องจากการผสมทางกายภาพที่รุนแรง (Edith et al., 2014)

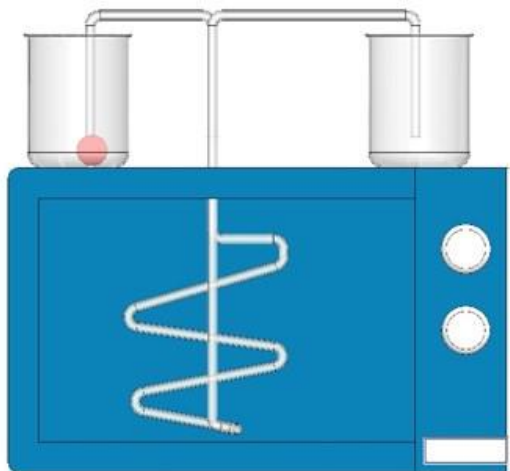
จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า การใช้ไมโครเวฟผลิตไบโอดีเซลชนิดใดอย่าง ต่อเนื่องที่ผ่านมาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อนสามารถลดระยะเวลาการทำปฏิกิริยาได้จริง ดังนั้นการวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการศึกษาออกแบบและสร้างระบบผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งให้ความร้อนรวมถึงศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อปริมาณผลได้และสมบัติของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการศึกษา

ในการศึกษาเรื่องราวต่างๆ ของการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ไมโครเวฟเป็นการทำปฏิกิริยา มีส่วนประกอบและอุปกรณ์ในการดำเนินงานตามขั้นตอน และทฤษฎีพื้นฐาน ซึ่งเป็นการเตรียมการให้ถูกต้องตามกระทรวงพลังงานและคุณสมบัติตามมาตรฐานไบโอดีเซลที่ได้กำหนดขึ้น กระบวนการทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน ให้สารทำปฏิกิริยาไหลผ่านอย่างต่อเนื่องในขั้นตอนการทำทรานเอสเทอร์ฟิเคชันนี้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้



ภาพประกอบ 3.1 เตาปฏิกิริยาไมโครเวฟผลิตไบโอดีเซลชนิดไหลอย่างต่อเนื่อง

- 3.1.1 น้ำมันปาล์ม
- 3.1.2 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)
- 3.1.3 เมทานอลความเข้มข้น 99.99 เปอร์เซ็นต์
- 3.1.4 เครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟ
- 3.1.5 เครื่องผลิตไบโอดีเซล
- 3.1.6 เครื่องชั่งน้ำหนักยี่ห้อ Ohaus รุ่น PA4102 ความละเอียด ± 0.01

3.1.7 ชุดควบคุมอุณหภูมิ

3.1.8 ปีกเกอร์ขนาด 250 และ 600 มิลลิลิตร

3.1.9 กรวยแยกสาร ขนาด 500 มิลลิลิตร

3.1.10 แท่งคนสาร

3.1.11 กระดาษกรอง (เบอร์ 1) ยี่ห้อ Whatman Cat No 1001

3.1.12 นาฬิกาจับเวลา

3.1.13 ท่อสายยางใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 7 มิลลิเมตร

3.1.14 ปืนดูดน้ำมัน

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 ชั่งน้ำมันปาล์ม 200 กรัม ลงในปีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตรแล้วอุ่นน้ำมันปาล์มให้ได้ อุณหภูมิเริ่มต้นตามกำหนด จากนั้นนำโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ใส่ลงในเมทานอลตามสัดส่วนที่กำหนด (1% โดยน้ำหนัก) แล้วผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 2 นาที เพื่อให้เกิดสารละลายเมทอกไซด์

3.2.2 เปิดปั๊มซึ่งควบคุมการไหลโดยการปรับกระแสและแรงดันที่จ่ายให้กับปั๊มจากเครื่อง (Power supply DC) เพื่อป้อนสารตั้งต้นให้ไหลไปตามท่อทางผ่านท่อปฏิกรณ์คอยล์แก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 7 มิลลิเมตร ยาว 200 เซนติเมตร ที่อยู่ภายในห้องปฏิกรณ์ไมโครเวฟ เพื่อทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน จากนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จะไหลออกมาตามท่อทางออกไปรวมกันที่ภาชนะรองรับเพื่อรอทำการแยกเมทิลเอสเทอร์ออกจากผลิตภัณฑ์อื่นๆ ก่อนนำเมทิลเอสเทอร์ไปผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ต่อไป

3.2.3 นำน้ำมันไบโอดีเซลไปทำการล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อกำจัดสารเคมีที่ตกค้างออกจากน้ำมันไบโอดีเซล โดยการล้างด้วยน้ำกลั่นประมาณ 100-200 ml กวนเพื่อให้น้ำเข้าไปล้างน้ำมันประมาณ 20 นาที แล้วทิ้งไว้ให้น้ำมันเกิดการลอยตัวแยกออกจากน้ำ เหนือออกแล้วอุ่นเอาน้ำออกจากน้ำมัน 100-120 °C เป็นเวลา 5 นาที

3.2.4 นำผลิตภัณฑ์เก็บในขวดใสสาร แล้วชั่งน้ำหนักเพื่อหาปริมาณผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ตามตารางที่ 2.3

3.2.5 ในการทดลอง ได้ศึกษา 3 ปัจจัย และปัจจัยละ 2 ระดับ ได้แก่ กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ 600 และ 800 วัตต์ อุณหภูมิเริ่มต้นในการทำปฏิกิริยา 60 และ 80 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 และ 2 นาที โดยออกแบบการทดลองเต็มรูปแบบ (Full factorial) โดยทำการทดลองสภาวะละ 2 ซ้ำ

ตาราง 3.1 ลำดับการทดลองที่สภาวะต่างๆ

ลำดับการทดลอง	ปัจจัย		
	กำลังไฟฟ้าของ ไมโครเวฟ (W)	เวลา (m)	อุณหภูมิเริ่มต้น (°C)
1	600	1	60
2			80
3		2	60
4			80
5	800	1	60
6			80
7		2	60
8			80

3.3 การวิเคราะห์สมบัติของเมทิลเอสเทอร์

3.3.1 ความหนาแน่น (Density)

3.3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์

- 1) เมทิลเอสเทอร์ปริมาตร 30 มิลลิลิตร
- 2) เครื่องชั่งน้ำหนักยี่ห้อ Ohaus รุ่น PA413 ความละเอียด ± 0.001 กรัม
- 3) กระบอกตวง ขนาด 25 มิลลิลิตร

3.3.1.2 วิธีการทดลอง

- 1) ชั่ง กระบอกตวง เปล่า
- 2) นำเมทิลเอสเทอร์ที่ต้องการทราบค่าความหนาแน่นใส่ในกระบอกตวง
- 3) แล้วนำเมทิลเอสเทอร์ที่ใส่ในกระบอกตวง ไปชั่งเพื่อหาน้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์
- 4) นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นตามสมการที่ 1

$$\text{ความหนาแน่นของสาร} = \frac{\text{น้ำหนักของสาร (กรัม)}}{\text{ปริมาตรของสาร (มิลลิลิตร)}}$$

เป็นค่าที่ระบุคุณสมบัติเบื้องต้นทางกายภาพของไบโอดีเซล ทดสอบตามวิธี ASTM D1298 ซึ่งผลที่ได้จะได้ค่าไม่ต่ำกว่า 860 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์ เมตร และไม่สูงกว่า 900 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์ เมตรที่อุณหภูมิห้องการวัดค่าความหนาแน่นนี้ ทำการวัดค่าโดยใช้อุปกรณ์กระบอกตวงประมาณ 3 ใน 4 ของกระบอกตวงโดยเอียงกระบอกตวง ตวงให้น้ำมันไหลลงไปตามผนังของกระบอกตวงเพื่อป้องกันการเกิดฟองอากาศ รอให้ฟองอากาศที่เกิดขึ้นลอยขึ้นมาที่ผิวหน้าของน้ำมัน แล้วทำการกำจัดออกวางกระบอกตวงให้อยู่ในแนวตั้งรักษาอุณหภูมิของน้ำมันให้คงที่ที่อุณหภูมิห้องจากนั้นอ่านค่าที่ขีดอุปกรณ์วัดความหนาแน่น

3.3.2 ค่าความร้อน



ภาพประกอบ 3.2 เครื่องวัดค่าความร้อน

3.3.2.1 สารเคมี

Benzoic acid ชนิดเม็ด พร้อมค่าความร้อนมาตรฐาน

3.3.2.2 วัสดุและอุปกรณ์

- 1) เมทิลเอสเทอร์ปริมาตร 1 มิลลิลิตร
- 2) บอมป์แคลอรีมิเตอร์และประกอบด้วย 1341 Calorimeter พร้อมมอเตอร์และสายพาน ลูกบอมป์ ถังน้ำ ที่จุดการสันดาปพร้อมสายไฟ เทอร์โมมิเตอร์แบบอ่านค่าเป็นตัวเลขพร้อมนาฬิกาจับเวลา
- 3) ถังออกซิเจน 1 ถัง พร้อมสายต่อออกซิเจนเข้ากับบอมป์
- 4) เครื่องชั่งน้ำหนักยี่ห้อ Ohaus รุ่น PA4102 ความละเอียด ± 0.01 กรัม
- 5) หลอดฉีดยาชนิดแก้ว มีสเกลวัดปริมาตร
- 6) ลวดจุดระเบิดยาวประมาณ 10 เซนติเมตร

7) น้ำกลั่น

3.3.2.3 วิธีการทดลอง

1) ขั้นตอนการเตรียมการทดสอบ

1.1) จัดตั้งอุปกรณ์ทดลองบนโต๊ะที่แข็งแรงและเรียบ และไม่วางใกล้อุปกรณ์ที่มีการแผ่ความร้อน

1.2) ใส่ตัวอย่างเมทิลเอสเทอร์ประมาณ 1 ซีซี ลงในถ้วยของชุดการทดลอง แล้วนำถ้วยทดลองไปใส่ไว้ในขायิตที่ฝาของบอมบ์

1.3) ตวงน้ำกลั่นใส่ลงในถังน้ำของชุดทดลอง 2,000 มิลลิลิตร โดยอุณหภูมิของน้ำควรต่ำกว่าอุณหภูมิห้องไม่เกิน 1.5 องศาเซลเซียส

1.4) ตัดลวด Parr 45C10 ของชุดทดลองยาว 10 เซนติเมตร เข้ากับหัวอิเล็กทรอนิกส์ โดยให้อยู่ใกล้กับผิวหน้าเชื้อเพลิง แต่ห้ามสัมผัสกับเชื้อเพลิงหรือถ้วยทดลอง

1.5) ใส่น้ำกลั่น 1 หยดลงในบอมบ์เพื่อช่วยดูดกลืนไอ แล้วปิดฝาบอมบ์ให้แน่น

1.6) เติมออกซิเจนผ่านสายเติมเข้าสู่บอมบ์ช้าๆ จนได้ความดันประมาณ 30 atmosphere (atm) (ห้ามเติมออกซิเจนเกิน 40 atm) ในระหว่างนี้ให้หลีกเลี่ยงการใช้มือสัมผัสกับบอมบ์โดยตรงเพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนจากมือสู่บอมบ์ ให้ใช้ปากคีบจับแทน

2) ขั้นตอนการทดสอบ

2.1) นำบอมบ์ที่เตรียมเสร็จแล้วค่อยๆ หย่อนลงในถังน้ำโดยใช้ปากคีบจับ สังเกตฟองอากาศที่รั่วไหลจากบอมบ์ ถ้ามีห้ามทำการทดลองต่อ ให้นำมาแก้ไขซ่อมแซมก่อน

2.2) ต่อสายไฟ 2 เส้นเข้าที่หัวบอมบ์แล้วปิดฝาแคลอรีมิเตอร์ เปิดสวิตช์มอเตอร์เพื่อทำการกวนน้ำ

2.3) เปิดสวิตช์เทอร์โมมิเตอร์และทำการวัดอุณหภูมิทุกๆ 1 นาที เป็นเวลา 5 นาที แล้วบันทึกอุณหภูมิไว้

2.4) กดสวิตช์จุดระเบิดเมื่อเข้าสู่นาทีที่ 6 ให้ไฟสีแดงติดจนกระทั่งดับจึงปล่อยมือ แล้ววัดอุณหภูมิทุกๆ 1 นาที จนกว่าอุณหภูมิจะขึ้นสูงสุด (ประมาณนาทีที่ 13 ถึง 15)

2.5) เมื่ออุณหภูมิลดลงวัดอุณหภูมิทุกๆ 1 นาที เป็นเวลา 5 นาทีแล้วบันทึกค่าอุณหภูมิไว้

2.6) นำบอมบ์ออกจากแคลอรีมิเตอร์เปิดวาล์วระบายความดัน แล้วจึงนำลวดที่เหลือออกมาวัดความยาว หากมีเชื้อเพลิงเหลือ (เผาไหม้ไม่หมด) ให้ทำการทดลองใหม่

2.7) ทำความสะอาดอุปกรณ์แล้วนำผลที่ได้มาคำนวณหาค่าความร้อนตามสมการ

ค่าความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการ (2) และ (3)

$$H_g = \frac{tW - e_1 - e_2 - e_3}{m} \dots\dots\dots (2)$$

เมื่อ H_g = ค่าความร้อน (Gross of combustion) (แคลอรี/กรัม)

T = อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทดลอง (อุณหภูมิสูงสุด – อุณหภูมิก่อนที่จะทำการจุด-ระเบิด) องศาเซลเซียส

W = ค่าพลังงานของลูกบอมบ์ที่ได้จากการทำ Standardization (แคลอรี/องศา-เซลเซียส)

e_1 = ค่าความร้อนจากกรดไนตริก โดยทั่วไปจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0

e_2 = ค่าความร้อนจากกรดซัลฟูริก โดยทั่วไปจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0

e_3 = ค่าความยาวของหลอดจุดระเบิดที่เหลือจากการจุดระเบิด (เซนติเมตร)

มาคูณ 2.3 (แคลอรี)

สูตรการหาค่า W ในการ Standardization ด้วย Benzoic acid

$$W = \frac{Hm + e_1 + e_3}{T} \dots\dots\dots (3)$$

เมื่อ W = ค่าพลังงานของลูกบอมบ์ที่ได้จากการทำการ Standardization

H = ค่าความร้อนของ Benzoic acid ซึ่งมีค่าคงที่ เท่ากับ 6,318 แคลอรี/กรัม

m = น้ำหนักของ Benzoic acid (กรัม)

e_1 = ค่าความร้อนจากกรดไนตริก

e_3 = ค่าความร้อนจากหลอด โดยนำหลอดเริ่มต้น (10 เซนติเมตร) หักลบจากหลอดที่เหลือมาคูณ 2.3 (แคลอรี)

T = อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทดลอง (อุณหภูมิสูงสุด – อุณหภูมิก่อนที่จะทำการจุด-ระเบิด) ของ Benzoic acid (องศาเซลเซียส)

3.3.3 ความหนืด (Viscosity)

3.3.3.1 วัสดุและอุปกรณ์

- 1) เมทิลเอสเทอร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร

- 2) เครื่องวัดความหนืด ยี่ห้อ Huher
- 3) Viscometer เบอร์ 150 (ค่าคงที่ 0.034505 cSt/s)
- 4) ปีเปต
- 5) ลูกยาง
- 6) นาฬิกาจับเวลา

3.3.3.2 วิธีการทดลอง

- 1) ปีเปตเมทิลเอสเทอร์ใส่ใน Viscometer ปริมาตร 10 มิลลิลิตร
- 2) ปรับอุณหภูมิของน้ำใน Viscometer bath ให้ได้ 40 องศาเซลเซียส
- 3) นำ Viscometer ไปแช่ใน Viscometer bath
- 4) ปลอ่ยให้เมทิลเอสเทอร์ไหลอย่างอิสระภายใต้แรงดึงดูด โดยเริ่มจับเวลาเมื่อส่วนบนของเมทิลเอสเทอร์ไหลถึงจุดจับเวลาจุดแรก และเมื่อถึงจุดจับเวลาจุดที่สองให้บันทึกค่าเวลาเป็นวินาที
- 5) นำค่าเวลาที่ได้ไปคูณกับค่าคงที่ของ Viscometer ค่าที่ได้จะเป็นค่า Kinematic-viscosity มีหน่วยเป็นเซนติสโตก (cSt) ดังสมการ 4

$$V = Ct \quad (4)$$

โดยที่ V = Kinematic viscosity มีหน่วยเป็น cSt (Centistokes หรือ mm^2/s)

C = ค่าคงที่ของ Viscometer มีหน่วยเป็น cSt/s

T = Flow time มีหน่วยเป็น วินาที (s)

ความหนืดในน้ำมันมีความสำคัญมากในการใช้งาน เครื่องยนต์เพราะเป็นตัวบอกถึงความสามารถในการต้านทานการไหลและบอกถึงคุณสมบัติในการหล่อลื่นพื้นผิว ใช้วิธีทดสอบตาม ASTM D445 ซึ่งผลที่ได้ให้ค่าในช่วง 3.5-5.0 (เซนติสโตกส์, cSt) ณ อุณหภูมิ 40°C วิธีการทำการทดสอบกระทำโดยใช้เครื่องมือวัดความหนืด (Viscometer)



ภาพประกอบ 3.3 เครื่องวัดค่าความหนืด Size 150

ใช้หลักการให้ของเหลวไหลผ่านช่องแคบๆ ที่ออกแบบและปรับตั้ง (Calibrated) ตามมาตรฐานแล้วแล้วจับเวลาที่ของเหลวไหลผ่านช่องแคบนั้น แล้วนำค่าเวลาไปคำนวณ คำนวณหาค่าความหนืดในน้ำมันดิบที่มีค่าความหนืดสูงเกินไป จะส่งผลให้จ่าย น้ำมันเข้าจุดระเบิดให้ห้องเผาไหม้กระจายตัวไม่ดี มีผลต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยตรง ทำให้เผาไหม้ไม่สมบูรณ์เกิดเขม่า อีกทั้งยังสิ้นเปลืองน้ำมันการตรวจวัดความหนืด

3.3.4. จุดวาบไฟ (Flash Point)

ค่าจุดวาบไฟของเมทิลเอสเทอร์ โดยใช้มาตรฐาน ASTM- D93 ซึ่งจะเป็นการทดสอบแบบ Cleveland Open Cup



ภาพประกอบ 3.4 จุดวาบไฟ

3.3.4.1 วัสดุและอุปกรณ์

- 1) เมทิลเอสเทอร์ ปริมาตร 30 มิลลิลิตร
- 2) เตาให้ความร้อน
- 3) Crucible
- 4) ดาตาสีคเกอร์ ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DXA100 DAQATANDARD ความละเอียด ± 0.1 องศาเซลเซียส
- 5) เทอร์โมคัปเปิล
- 6) ขาดั่ง

3.3.4.2 วิธีการทดลอง

- 1) ใส่เมทิลเอสเทอร์ลงในถ้วยกระเบื้องทนไฟให้ถึงระดับที่กำหนดไว้บริเวณขอบด้านในถ้วย
- 2) ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลโดยให้ปลายสายด้านหนึ่งของเทอร์โมคัปเปิลจุ่มลงในเมทิลเอสเทอร์ และอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับดาตาสีคเกอร์
- 3) จุดเปลวไฟเล็กๆ ที่จุดล่อ
- 4) เปิดสวิตช์เตาไฟ เพื่อความร้อนแก่เมทิลเอสเทอร์
- 5) เมื่อมีการลุกไหม้และดับเป็นครั้งแรกเมื่อใด แสดงได้ถึงจุดวาบไฟ แล้วให้บันทึกอุณหภูมิที่วัดได้จากดาตาสีคเกอร์ขณะนั้นทันที
- 6) เมื่อมีการเกิดไฟลุกไหม้ของเมทิลเอสเทอร์ แสดงได้ถึงจุดติดไฟ แล้วให้บันทึกอุณหภูมิที่วัดได้จากดาตาสีคเกอร์ขณะนั้นทันที

อุณหภูมิต่ำสุดที่เชื้อเพลิงเกิดระเหย มีจำนวนเพียง พอที่จะจุดติดไฟได้วูบหนึ่งแล้วดับ เมื่อมีเปลวไฟผ่านเข้ามา ให้ใช้วิธีตาม ASTM D93 (Pensky Martens Closed Cup Tester) ซึ่งผลที่ได้ต้องให้ค่าไม่ต่ำกว่า 120°C วิธีการทดสอบใช้อุปกรณ์ และวิธีของ Pensky Martens ใช้ถ้วยปิด (Closed Cup) ต่อกับตัวจุดประกายไฟ และน้ำหล่อเย็น เพื่อป้องกันความร้อนจากการติดไฟที่สูงขึ้น สารทดสอบจะถูกเติมเข้าจะถูกเติมเข้าในถ้วยปิดแล้ว ให้ความร้อนสูงขึ้นพร้อมการกวนเพื่อให้สารระเหยขึ้นอุณหภูมิที่สารติดลุกเป็นไฟจะเป็นค่าจุดวาบไฟที่วัดได้

การกำหนดจุดวาบไฟที่สูงขึ้นนี้ทำให้ต้องกำจัดแอลกอฮอล์โดยเฉพาะเมทานอล ออกไปจากไบโอดีเซลให้หมด จุดวาบไฟนั้นนอกจากจะใช้ประเมินการจุดติดไฟของผลิตภัณฑ์ แล้วยังเป็นดัชนีที่บอกถึงความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ที่เกิดการเผาไหม้อีกด้วย โดยสรุปแล้วจุด วาบไฟมีความสำคัญในแง่ความปลอดภัยในการเก็บรักษา และขนส่งผลิตภัณฑ์น้ำมันเชื้อเพลิง

3.3.5. ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110°C

การวิเคราะห์ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110°C (ASTM-14112)

วิธีการวิเคราะห์

- 1) วิธีการทดสอบหาค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยเครื่อง Rancimat ตามมาตรฐาน EN 14112 คือการให้อากาศไหลผ่านไหลผ่านไบโอดีเซลหรือเมทิลเอสเทอร์ที่อัตราการไหลคงที่ (10 ลิตร/ชั่วโมง) ที่อุณหภูมิเฉพาะ (100 องศาเซลเซียส)
- 2) ในระหว่างที่ไบโอดีเซลเกิดการออกซิเดชันจะปล่อยไอของสารที่เกิดขึ้นใหม่รวมทั้งอากาศด้วย
- 3) ทั้งไอของสารและอากาศจะไหลผ่านไปยังขวดที่ใส่น้ำซึ่งเป็นน้ำ DI หรือน้ำกลั่น และมีขั้วอิเล็กโทรดสำหรับวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) การเชื่อมต่ออยู่กับอุปกรณ์การวัดและบันทึกผล
- 4) เครื่องจะเริ่มบันทึกเมื่อค่าการนำไฟฟ้าเริ่มเพิ่มขึ้นเนื่องจากสารตัวอย่างถูกออกซิไดซ์จนเกิดการสลายตัวเป็นไอของกรดและถูกดูดซับในน้ำได้

3.3.6. จุดขุ่น (Cloud point)

การวิเคราะห์จุดขุ่น (ASTM-D2500)

วิธีการวิเคราะห์

- 1) เขย่าตัวอย่างแล้วเทใส่หลอดแก้วทดสอบเท่ากับขีดบอกระดับ (45 มิลลิลิตร)
- 2) ปิดฝาพร้อมกับจุกก๊อกและใส่เทอร์โมมิเตอร์โดยให้ตำแหน่งช่วง capillary ของเทอร์โมมิเตอร์ต่ำกว่าผิวของตัวอย่าง
- 3) อุณหภูมิให้ได้อุณหภูมิให้ได้ 45°C แล้วปล่อยให้อุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิห้องให้ควบคุมการลดลงของอุณหภูมิตัวอย่างดังนี้

เมื่ออุณหภูมิตัวอย่างได้ย้ายจากหลอดแก้วสู่อ่างแอลกอฮอล์

27°C	0°C
9°C	-18°C
-6°C	-33°C
-24°C	-51°C
-42°C	-69°C

หมายเหตุ : การปรับอุณหภูมิอ่างแอลกอฮอล์ใช้น้ำแข็งแห้งใส่ฝาเปิดอ่าง เปิดมอเตอร์ขับใบกวนให้ระดับอุณหภูมิในอ่างสม่ำเสมอ

4) ทุกๆอุณหภูมิ 1°C ที่ลดลงให้ยกหลอดแก้วขึ้นจากอ่างทดสอบในแนวตั้งสังเกตความขุ่น(การก่อตัวของไข)จากด้านบนของหลอดแก้ว ถ้ายังไม่เต็มพื้นที่ก้นหลอดให้คืนหลอดแก้วลงอ่างเหมือนเดิม(ขั้นตอนนี้ไม่เกิน3วินาที)

5) ถ้าพบว่าจุดขุ่นเต็มพื้นที่ก้นหลอดแก้วให้บันทึกอุณหภูมินั้นไว้และรายงานผลเป็นจุดขุ่นส่วนความแตกต่างจุดขุ่นก็คือ อุณหภูมิที่น้ำมันเริ่มขุ่น

3.3.7 จุดไหลเท Pour point

การวิเคราะห์หาจุดไหลเท (Pour point; ASTM-D97)

1) เขย่าตัวอย่าง และเทใส่หลอดแก้วทดสอบเท่าขีดบอกระดับ (45ml) เสียบ

Thermometer 5C

2) อุ่นตัวอย่างให้ได้ 45°C และย้ายตัวอย่างสู่อ่างน้ำ 24°C (หรือตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง)

3) ให้ควบคุมการลดลงของอุณหภูมิตัวอย่างดังนี้

เมื่ออุณหภูมิตัวอย่างได้ย้ายหลอดแก้วลงสู่อ่างแอลกอฮอล์

1. 27°C	0°C
2. 9°C	-18°C
3. -6°C	-33°C
4. -24°C	-51°C
5. -42°C	-69°C

หมายเหตุ : การปรับอุณหภูมิอ่างแอลกอฮอล์ใช้น้ำแข็งแห้งใส่ทางฝาเปิดอ่างเปิดมอเตอร์ขับใบกวนให้ระดับอุณหภูมิในอ่างสม่ำเสมอ

4) เมื่ออุณหภูมิของตัวอย่างได้ 9°C เหนือจุดไหลเท (คาดการณ์) ให้ยกหลอดแก้วขึ้นจากอ่างทดสอบเอียงหลอดแก้ว ถ้าตัวอย่างยังไหลได้ให้คืนหลอดแก้วลงสู่อ่างเหมือนเดิม (ขั้นตอนนี้ไม่เกิน 3 วินาที)

5) การกระทำซ้ำเหมือนข้อ4. ทุกๆ อุณหภูมิตัวอย่างที่ลดลง 3°C จนกระทั่งพบว่าตัวอย่างเป็นไขแข็งตัว(100%)ให้เอียงหลอดแก้วในแนวระนาบต่อเนื่อง 5 วินาทีถ้าตัวอย่างไม่มีการไหลตัวให้หยุดการทดสอบ

6) รายงานผลจุดไหลเท = อุณหภูมิสุดท้ายที่ตัวอย่างเป็นไข +3°C

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลโดยใช้เตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟชนิดไหลอย่างต่อเนื่องโดยใช้ไขมันปาล์มและสารเร่งปฏิกิริยาได้แก่ เมทานอลโดยมีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ร้อยละ 1 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโมลระหว่างน้ำมันต่อเมทานอลในอัตราส่วน 6:1 ได้ทำการศึกษาทั้งหมด 3 ปัจจัย เพื่อหาค่าร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ จากนั้นนำเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ

4.1 อิทธิพลของรังสีไมโครเวฟที่ส่งผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

น้ำมันไบโอดีเซลที่ไหลผ่านไมโครเวฟถูกนำมาใช้เป็นกระบวนการทรานเอสเทอริฟิเคชันโดยใช้มันเข้าสู่ไมโครเวฟภายในบรรจุท่อแก้วชุดเพื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายเมทิลแอลกอฮอล์กับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งกระบวนการผลิตโดยใช้เครื่องไมโครเวฟนี้สามารถปรับกำลังไฟฟ้าได้ 4 ระดับคือ 90, 360, 600, และ 800 วัตต์ ในการศึกษาครั้งนี้ใช้กำลังไฟฟ้า 2 ระดับ คือ 600 และ 800 วัตต์ ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว การเพิ่มกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นและผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ที่เพิ่มขึ้น (Choedkiatsakul et al., 2015) โดยเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟจาก 300 วัตต์ เป็น 700 วัตต์ ทำได้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มจาก 90% เป็น 97%

อย่างไรก็ตาม สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ จากตารางที่ 4.1 พบว่า การเพิ่มกำลังไฟฟ้าจาก 600 W เป็น 800 W ทำให้อุณหภูมิได้ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p > 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องจากการ เปิด-ปิด ไมโครเวฟอย่างรวดเร็วทำให้อุณหภูมิในไมโครเวฟไม่สม่ำเสมอมีผลต่อผลได้ของเมทิลเอสเทอร์

4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อร้อยละของเมทิลเอสเทอร์

อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาก็เป็นหนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการทรานเอสเทอริฟิเคชัน ซึ่งในทางทฤษฎี (Hong et al., 2016) อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจาก 40 องศาเซลเซียส เป็น 70 องศาเซลเซียส ทำให้ผลได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจาก 83.5% เป็น 94.9% การใช้อุณหภูมิที่สูงมากเกินไปส่งผลให้การทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชันเปลี่ยนเป็นระลอกไม่สามารถทำปฏิกิริยาต่อน้ำมัน เนื่องจากอุณหภูมิเริ่มต้นที่สูงเกินไป (Yan et al., 2014.)

สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ไม่ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา แต่ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิเริ่มต้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (60 และ 80 องศาเซลเซียส) ซึ่งจากผลการทดลองในตาราง 4.1 พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิเริ่มต้นจาก 60 เป็น 80 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ลดลงจาก 80.24 เป็น 78.32, 82.84 เป็น 77.31, 77.14 เป็น 80.48, และ 86.31 เป็น 76.70 ทั้งนี้อาจเนื่องจากว่าอุณหภูมิที่สูงจะส่งผลกระทบต่อการระเหยของแอลกอฮอล์ ซึ่งจุดเดือดของแอลกอฮอล์ (เมทานอล) อยู่ที่ 64.5 องศาเซลเซียส

4.3 อิทธิพลของระยะเวลาที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์

เมื่อพิจารณาระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา พบว่าการเพิ่มระยะเวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาจากเวลา 1 นาที่ เป็นเวลา 2 นาที่ มีแนวโน้มให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ส่งผลให้สารทำปฏิกิริยาอยู่ในไมโครเวฟเป็นระยะเวลานานขึ้น ทำให้เกิดการทำให้ปฏิกิริยาที่สมบูรณ์มากขึ้น ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์สูงขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Shakinaz และคณะ ที่ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟโดยพบว่า กระบวนการทำปฏิกิริยา 2 นาที่ผลได้ของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นแทนที่จะเป็น 150 นาที่ (Shakinaz A. et al., 2010)

ทั้งนี้สภาวะที่ให้ปริมาณผลได้ของเมทิลเอสเทอร์สูงสุด คือ ที่กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ 800 วัตต์ อุณหภูมิเริ่มต้น 60 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 นาที่ ซึ่งจะให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 86.31%

คลื่นไมโครเวฟจะเข้าไปช่วยสั่นโมเลกุลของออกซิเจนในน้ำมันพืชและเอทานอลทำให้น้ำมันพืชและเอทานอลร้อนขึ้นในระยะเวลาสั้นกว่าการให้ความร้อนแบบปกติและสามารถลดเวลาในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันลงเหลือเพียง 30 วินาที และผลได้ของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น วีรชัย เลิศสถาพรสุข (2549) การถ่ายเทความร้อนในช่องไมโครเวฟเป็นการเปลี่ยนแปลงความหนืดของน้ำมันที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลและความสม่ำเสมอของสารตั้งต้น อย่างไรก็ตามสิ่งนี้ต้องควบคุมเวลามิฉะนั้นอาจได้รับผลกระทบในการใช้ศักยภาพพลังงานไมโครเวฟสำหรับการผลิตไบโอดีเซล (Gude et al., 2012)

ตาราง 4.1 อิทธิพลของปัจจัยต่างๆที่ส่งผลกระทบต่อร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์

ลำดับการทดลอง	ปัจจัย			ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์
	กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ (วัตต์)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิเริ่มต้น (°C)	เฉลี่ย
1	600	1	60	80.24±0.78 ^{abc}
2			80	78.32±1.26 ^{ab}
3		2	60	82.84±2.01 ^c
4			80	77.31±1.94 ^{ab}
5	800	1	60	77.14±1.03 ^{ab}
6			80	80.48±1.77 ^{bc}
7		2	60	86.31±1.44 ^d
8			80	76.70±0.86 ^a

*หมายเหตุ ตัวอักษรที่แตกต่างกันในสดมภ์เดียวกัน คือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (p<0.05)

4.4 สมบัติของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่สภาวะการทดลองต่างๆ

เมื่อน้ำมันไบโอดีเซลหรือเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากทุกสภาวะการทดลองไปทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลเบื้องต้น ได้แก่ ค่าความหนืด ค่าความหนาแน่น จุดวาบไฟ จุดชุน จุดไหลเท ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส และค่าความร้อน ได้ข้อมูลดังแสดงในตาราง 4.2

ตาราง 4.2 สมบัติของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่สภาวะการทดลองต่างๆ

ปัจจัย			คุณสมบัติของเมทิลเอสเทอร์		
กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ เริ่มต้น (°C)	ค่าความหนืด (cSt)	ค่าความหนาแน่น (kg/m ³)	จุดวาบไฟ (°C)
600	1	60	4.22±0.02 ^a	884.23±0.03 ^a	169±1.0 ^g
		80	4.25±0.01 ^a	854.77±0.02 ^b	156±0.0 ^d
	2	60	4.54±0.02 ^a	861.69±0.02 ^e	165.5±0.5 ^f
		80	4.35±0.05 ^a	868.85±0.03 ^f	140.5±0.0 ^a
800	1	60	5.11±0.13 ^b	873.92±0.02 ^h	145±0.0 ^c
		80	5.26±0.08 ^{bc}	861.35±0.02 ^d	164±0.0 ^e
	2	60	5.78±0.08 ^d	861.25±0.03 ^c	143±0.0 ^b
		80	5.84±0.63 ^{cd}	872.33±0.02 ^g	143±0.0 ^b

ตาราง 4.2 คุณสมบัติของเมทิลเอสเทอร์ในสภาวะต่างๆ (ต่อ)

ปัจจัย			คุณสมบัติของเมทิลเอสเทอร์			
กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ เริ่มต้น (°C)	จุดชุน °C	จุดไหลเท °C	ค่าเสถียรภาพ (h)	ค่าความร้อน Cal/g
600	1	60	15±0.0 ^a	7.5±0.5 ^a	25.20±0.96 ^e	9,459.78 ^{bc}
		80	14.5±0.5 ^a	8±0.0 ^a	18.87±0.99 ^d	9,420.25 ^{bc}
	2	60	15±0.0 ^a	7.5±0.5 ^a	15.19±1.35 ^b	9,406.29 ^{bc}
		80	14.5±0.5 ^a	8±0.0 ^a	19.02±0.92 ^d	9,314.51 ^{ab}
800	1	60	14.5±0.5 ^a	7.5±0.5 ^a	10.00±0.43 ^a	9,520.48 ^c
		80	15±0.0 ^a	8±0.0 ^a	9.26±1.21 ^a	9,235.65 ^a
	2	60	14.5±0.5 ^a	7±0.0 ^a	18.13±0.42 ^d	9,422.65 ^{bc}
		80	14.5±0.5 ^a	7±0.0 ^a	17.16±0.65 ^c	9,498.19 ^c

*หมายเหตุ ตัวอักษรที่แตกต่างกันในสัณฐานเดียวกัน คือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (p<0.05)

จากการวิเคราะห์สมบัติของเมทิลเอสเทอร์ พบว่า ค่าความหนืด ความหนาแน่น ค่ากริเซอรินทั้งหมด จุดขุ่น จุดไหลเท และเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 °C มีค่าอยู่ในช่วง 4.22 - 5.84 เซ็นติสโตกส์, 854.77 – 884.23 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร, 140.5 - 169 องศาเซลเซียส, 16.78 – 19.83 เปอร์เซนต์, 14.5 – 15 องศาเซลเซียส, 7 – 8 องศาเซลเซียส และ 9.26 – 25.20 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าความหนืดที่มีบางสภาวะการทดลองให้เมทิลเอสเทอร์ที่มีค่าความหนืดสูงกว่าเกณฑ์เล็กน้อย



สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การผลิตไบโอดีเซลชนิดไหลอย่างต่อเนื่องโดยเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟทำปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์โดยมีกำลังไฟฟ้า ระยะเวลา และอุณหภูมิเป็นตัวกำหนดในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6 : 1 เพื่อทำการศึกษาค้นคว้าร้อยละและสมบัติของเมทิลเอสเทอร์ สามารถสรุปผลการทดลองและมีข้อเสนอแนะดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ระบบผลิตไบโอดีเซลที่พัฒนาขึ้น สามารถผลิตไบโอดีเซลได้ในปริมาณสูงสุด 34.94 มิลลิลิตรต่อนาที่

5.1.2 สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน คือ กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ 800 วัตต์ ระยะเวลาในการไหลผ่านเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟ 2 นาที อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จะได้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงสุดร้อยละ 86.31

5.1.3 ค่าความหนาแน่น จุดวาบไฟ จุดชุน จุดไหลเท และค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 °C ของเมทิลเอสเทอร์ที่มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กรมธุรกิจพลังงานได้กำหนดไว้ ค่าความหนืดสูงกว่าเกณฑ์เล็กน้อย

5.1.4 กำลังวัตต์ในไมโครเวฟต่างกัน 200 วัตต์ ระยะเวลาในการ เปิด-ปิด ไมโครเวฟจะให้ความร้อนไม่สม่ำเสมอส่งผลให้ผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ไม่ต่างกัน

5.1.5 เมื่อเพิ่มระยะเวลาอยู่ในไมโครเวฟจาก 1 นาที เป็น 2 นาที รังสีไมโครเวฟช่วยให้เพิ่มผลได้ของเมทิลเอสเทอร์

5.1.6 อุณหภูมิเพิ่มขึ้นผลได้มีแนวโน้มลดลงหรือไม่ต่างกันเนื่องจากจุดเดือดของแอลกอฮอล์อยู่ที่ 64.5 °C และไม่เอื้ออำนวยหากใช้อุณหภูมิสูงเกินไปมีผลต่อการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน

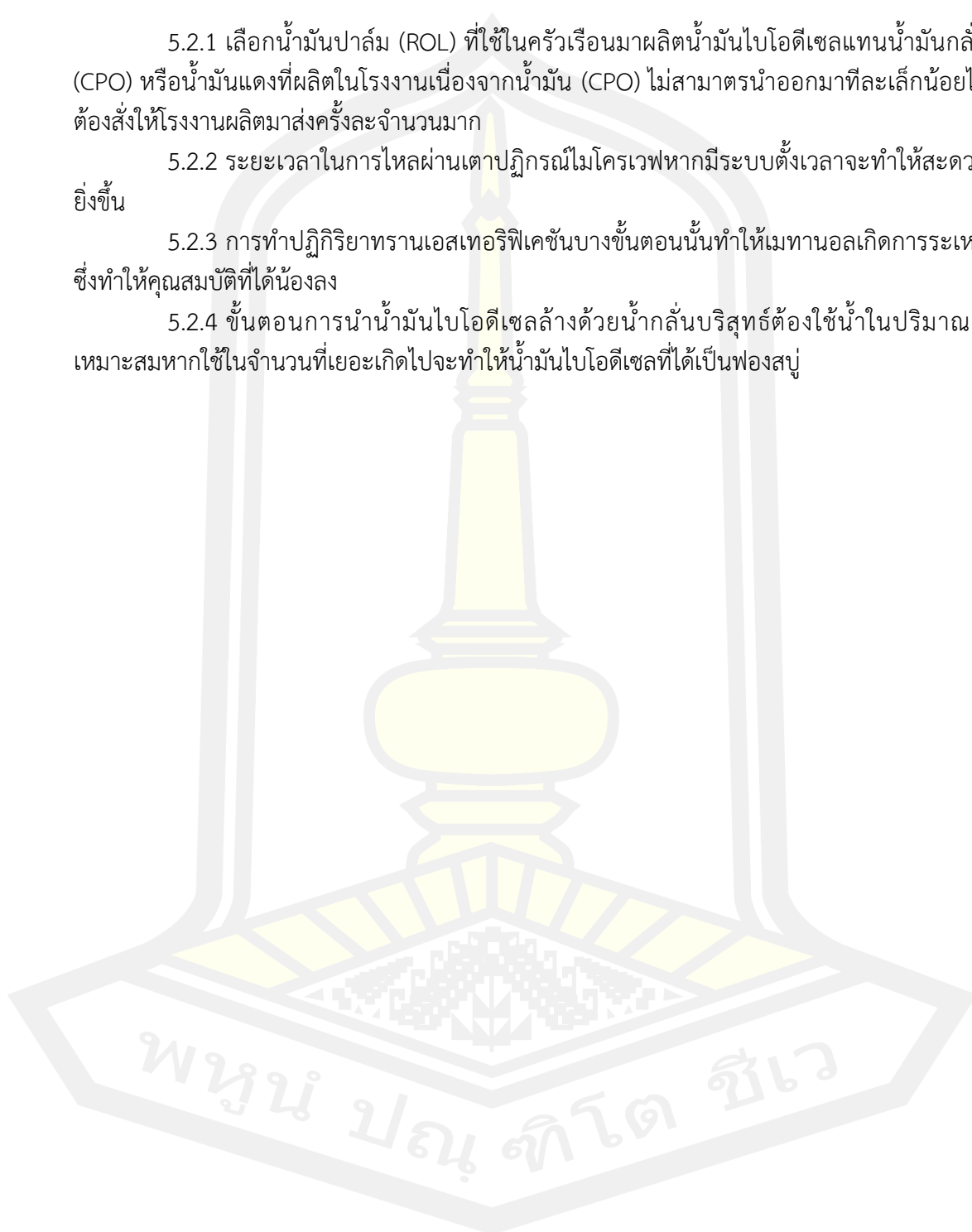
5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เลื่อนน้ำมันปาล์ม (ROL) ที่ใช้ในครัวเรือนมาผลิตน้ำมันไบโอดีเซลแทนน้ำมันกลั่น (CPO) หรือน้ำมันแดงที่ผลิตในโรงงานเนื่องจากน้ำมัน (CPO) ไม่สามารถนำออกมาที่ละเล็กลน้อยได้ ต้องสั่งให้โรงงานผลิตมาส่งครั้งละจำนวนมาก

5.2.2 ระยะเวลาในการไหลผ่านเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟหากมีระบบตั้งเวลาจะทำให้สะดวกยิ่งขึ้น

5.2.3 การทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันบางขั้นตอนนั้นทำให้เมทานอลเกิดการระเหยซึ่งทำให้คุณสมบัติที่ได้น้อยลง

5.2.4 ขั้นตอนการนำน้ำมันไบโอดีเซลล้างด้วยน้ำกลั่นบริสุทธิ์ต้องใช้น้ำในปริมาณที่เหมาะสมหากใช้ในจำนวนที่เยอะเกินไปจะทำให้ไขมันไบโอดีเซลที่ได้เป็นฟองสบู่



บรรณานุกรม



พูน ปณ จิต ชีเว

บรรณานุกรม

- กระทรวงพลังงาน. 2561. *แผนบริหารจัดการน้ำมันเชื้อเพลิง พ.ศ. 2561-2580* กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2558. *แผนการพัฒนาน้ำมันทดแทนและทางเลือก พ.ศ. 2558-2579*. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน
- กรมธุรกิจพลังงาน. (2553). คู่มือองค์ความรู้เรื่องการการศึกษาดูงานเกี่ยวกับการผลิตและผลผลิตจากไบโอดีเซลตามแผนจัดการความรู้(KM Action Plan). กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2553). คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.
- การุญ พิงสุวรรณรักษ์. (2562). การปรับปรุงคุณภาพน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลรอบต่ำ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ชานนท์ โพธิ์เจริญ. (2550). การพัฒนาเครื่องผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสุญต์ขนาดเล็กโดยการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- ธาดา ทรัพย์พิพัฒนา. (2558). ปัจจัยสำคัญของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อการผลิตไบโอดีเซล. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- บัณฑิต โรจน์อารยานนท์. (2559). วิศวกรรมไมโครเวฟ. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปรเมษฐ์ สิทธิสันต์. (2553). การผลิตไบโอดีเซลแบบกึ่งต่อเนื่องจากกระบวนการทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันสุญต์ที่มีการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน. 2556. *กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันไบโอดีเซล*. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.
- วีรัชย์ เลิศสถาพรสุข. (2549). การใช้รังสีไมโครเวฟเร่งการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง และผลกระทบของการใช้ไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซลกำเนิดไฟฟ้าขนาด 100 kW. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- สายฝน เกียวสัมพันธ์. (2563). *การตรวจสอบความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ในไบโอดีเซลด้วยทินเลเยอร์โครมาโทกราฟี*. วารสารวิชาการโรงเรียนนายเรือดำนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสุหัตถ์ นิเช็ง. (2563). การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันในน้ำเสียชุมชน เทศบาลเขาชุมช้าง จังหวัดสงขลา. วิทยาลัยรัตนภูมิ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
- สำนักงานส่งเสริมเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. (2556). *โครงการสร้างความร่วมมือด้านอุตสาหกรรมกับประเทศเพื่อนบ้าน (ยุทธศาสตร์การพัฒนาความร่วมมือด้านอุตสาหกรรม ภายใต้กรอบโครงการพัฒนาเขตเศรษฐกิจสามฝ่าย อินโดนีเซีย-มาเลเซีย-ไทย: IMT-GT)*.

สมชาย พัวจินดาเนตร. (2555). *การผลิตและตรวจสอบคุณภาพของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้ว ที่มีกรดไขมันอิสระแตกต่างกัน*. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Azcan Nezihe, & Danisman Aysegul. (2008). Microwave assisted transesterification of rapeseed oil. *Fuel*, 87(10–11), 1781–1788.

Baloch, A. G., Shaukat Ali Mazari, Nazia Hossain, Pooja Takkalkar, Abdul Sattar Jatoti, Sabzoi Nizamuddin, Humair Ahmed Baloch, M. T. H. Siddiqui, Sundus Saeed Qureshi, N. M. Mubarak, and Rashid Abro. 2021. “Application of Microwave Synthesis in Biodiesel Production.” Pp. 623–41 in *Green Sustainable Process for Chemical and Environmental Engineering and Science*. Elsevier.

Choedkiatsakul, L., Ngaosuwan, K., Cravotto, G., & Assabumrungrat, S. (2013). Application of heterogeneous catalysts for transesterification of refined palm oil in ultrasound-assisted reactor. *Fuel Processing Technology*, 111, 22–28.

Edith Martinez-Guerra, & Veera Gnanaswar Gude. (2014). Transesterification of used vegetable oil catalyzed by barium oxide under simultaneous microwave and ultrasound irradiations. *Energy Conversion and Management*, 88, 633–640.

Gnanaswar Gude, Veera, Prafulla Patil, Edith Martinez-Guerra, Shuguang Deng, and Nagamany Nirmalakhandan. 2013. Microwave Energy Potential for Biodiesel Production.

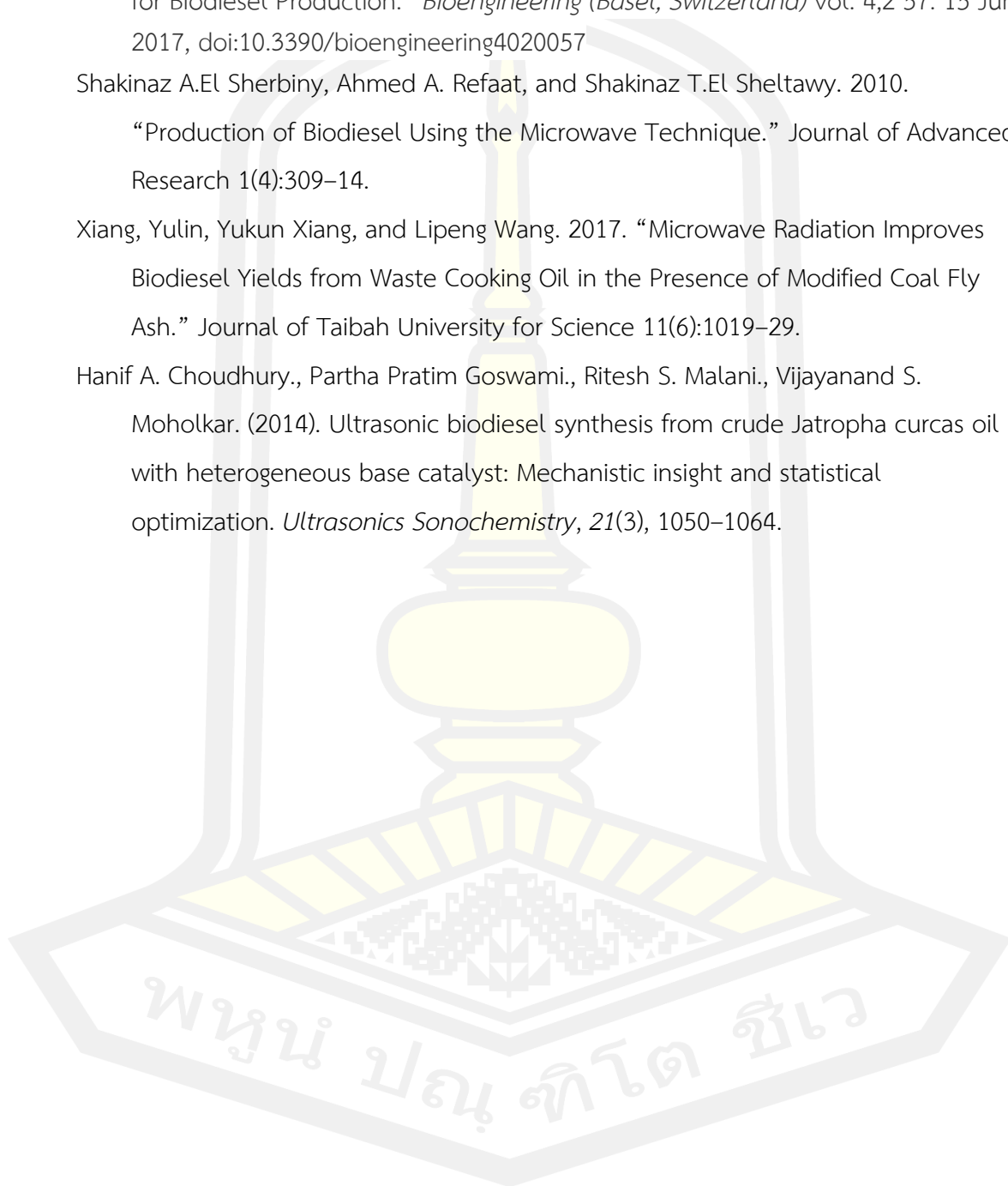
Guanyi Chen., Rui Shan., Jiafu Shi., Beibei Yan. 2014. “Ultrasonic-Assisted Production of Biodiesel from Transesterification of Palm Oil over Ostrich Eggshell-Derived CaO Catalysts.” *Bioresource Technology* 171:428–32.

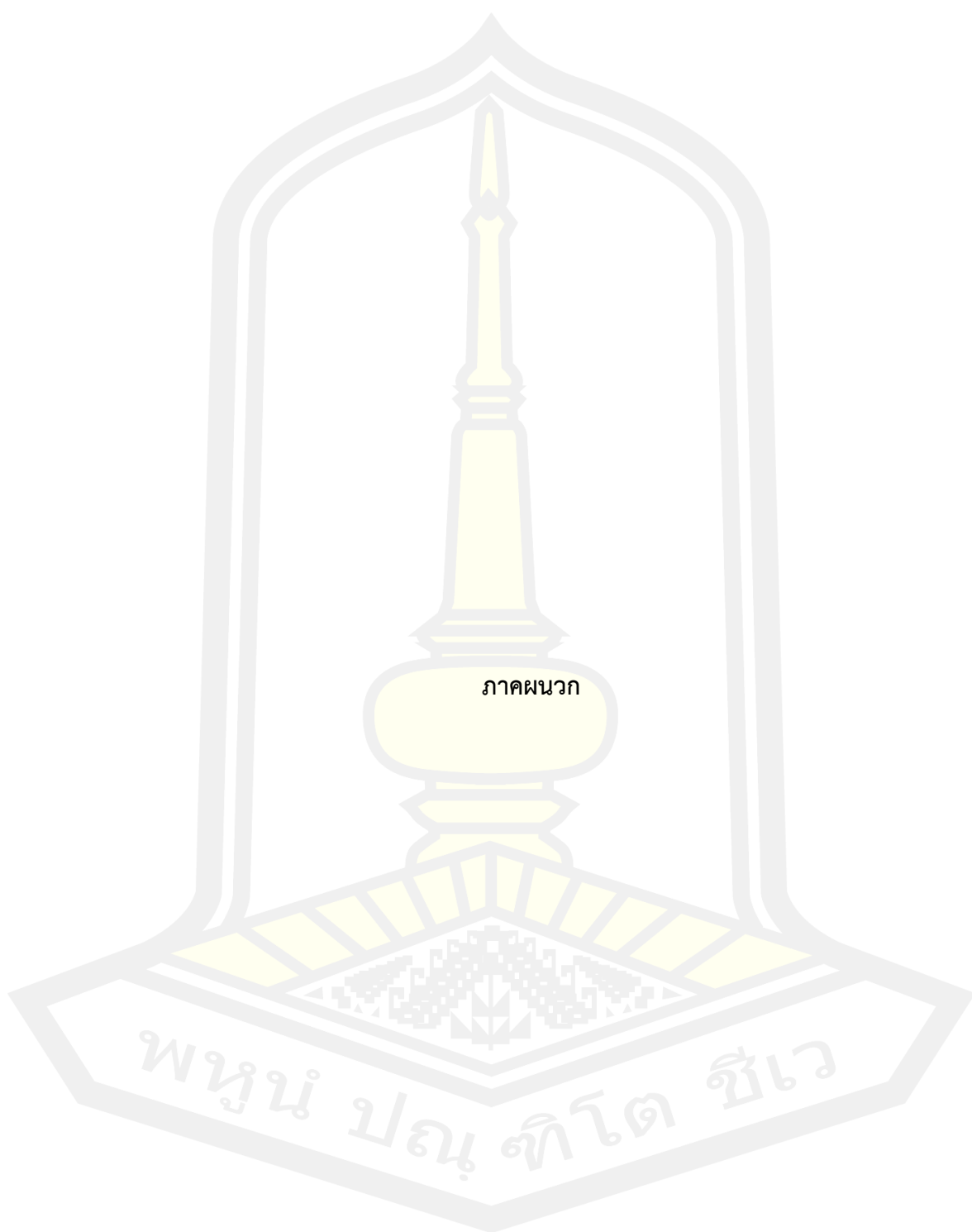
Gude, V. G., Patil, P., & Deng, S. (2012). Microwave energy potential for large scale biodiesel production. *World Renewable Energy Forum, WREF 2012, Including World Renewable Energy Congress XII and Colorado Renewable Energy Society (CRES) Annual Conferen*, 1(c), 751–759.

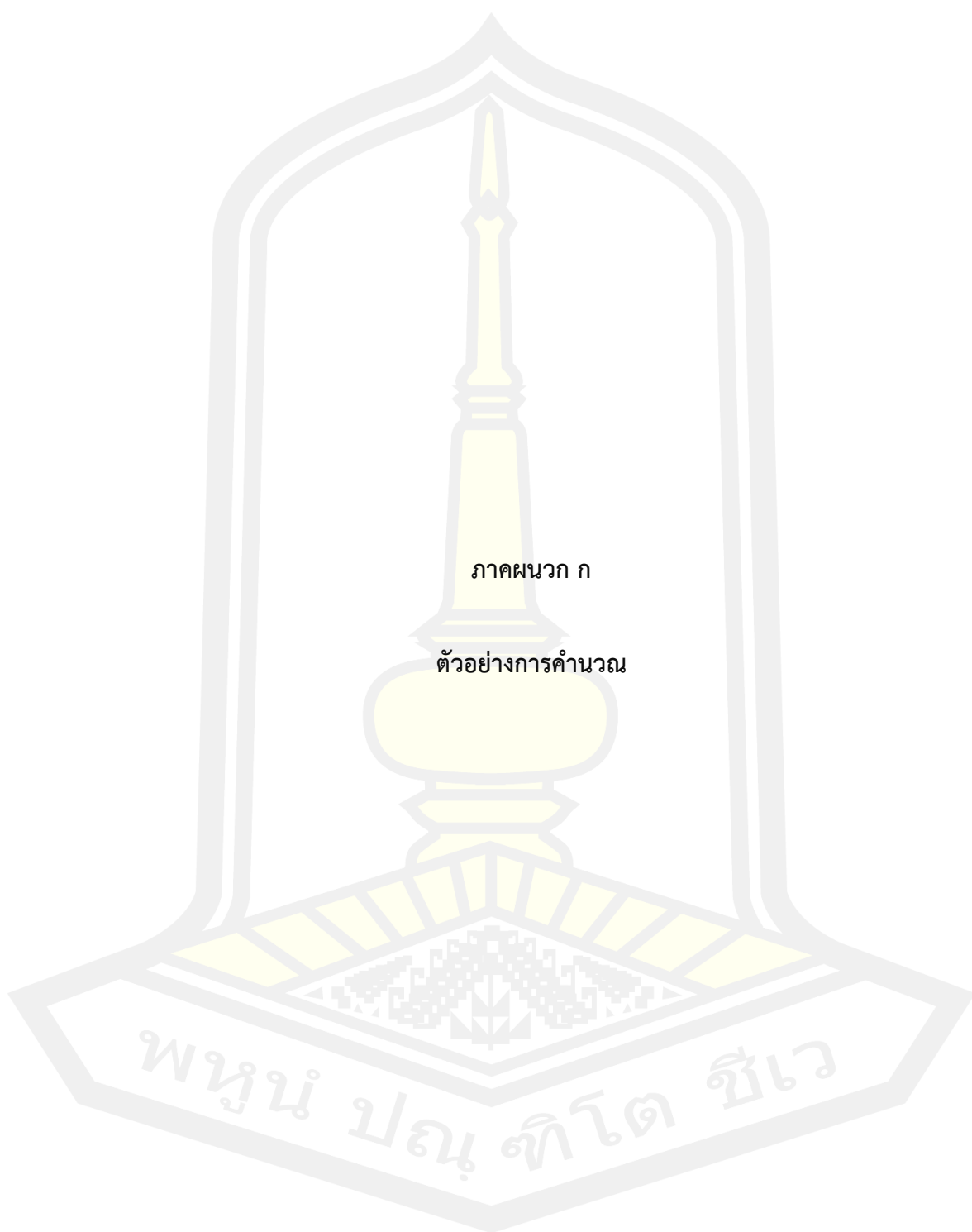
In Kwon Hong, Hyeon Jeon, Hyungjin Kim, Seung Bum Lee. 2016. *Preparation of waste cooking oil baser biodiesel using microwave irradiation energy*, j. Ind. Eng. Chem. 42 (2016) 107-112

Khedri, Behzad, Mostafa Mostafaei, and Seyed Mohammad Safieddin Ardebili. 2019. “A Review on Microwave-Assisted Biodiesel Production.” *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects* 41(19):2377–95.

- Ma, F. and Hanna, M.A. 1999 Biodiesel Production: A Review. *Bioresource Technology*, 70, 1-15. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00025-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00025-5)
- Nomanbhay, Saifuddin, and Mei Yin Ong. “A Review of Microwave-Assisted Reactions for Biodiesel Production.” *Bioengineering (Basel, Switzerland)* vol. 4,2 57. 15 Jun. 2017, doi:10.3390/bioengineering4020057
- Shakinaz A.El Sherbiny, Ahmed A. Refaat, and Shakinaz T.El Sheltawy. 2010. “Production of Biodiesel Using the Microwave Technique.” *Journal of Advanced Research* 1(4):309–14.
- Xiang, Yulin, Yukun Xiang, and Lipeng Wang. 2017. “Microwave Radiation Improves Biodiesel Yields from Waste Cooking Oil in the Presence of Modified Coal Fly Ash.” *Journal of Taibah University for Science* 11(6):1019–29.
- Hanif A. Choudhury., Partha Pratim Goswami., Ritesh S. Malani., Vijayanand S. Moholkar. (2014). Ultrasonic biodiesel synthesis from crude *Jatropha curcas* oil with heterogeneous base catalyst: Mechanistic insight and statistical optimization. *Ultrasonics Sonochemistry*, 21(3), 1050–1064.







ตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ (%Yield)

จาก
$$\%Yield = \frac{\text{น้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ (g)}}{\text{น้ำหนักน้ำมันพืชที่ใช้ทำปฏิกิริยา (g)}} \times 100\%$$

ตัวอย่างข้อมูลจาก (ตาราง ข 1)

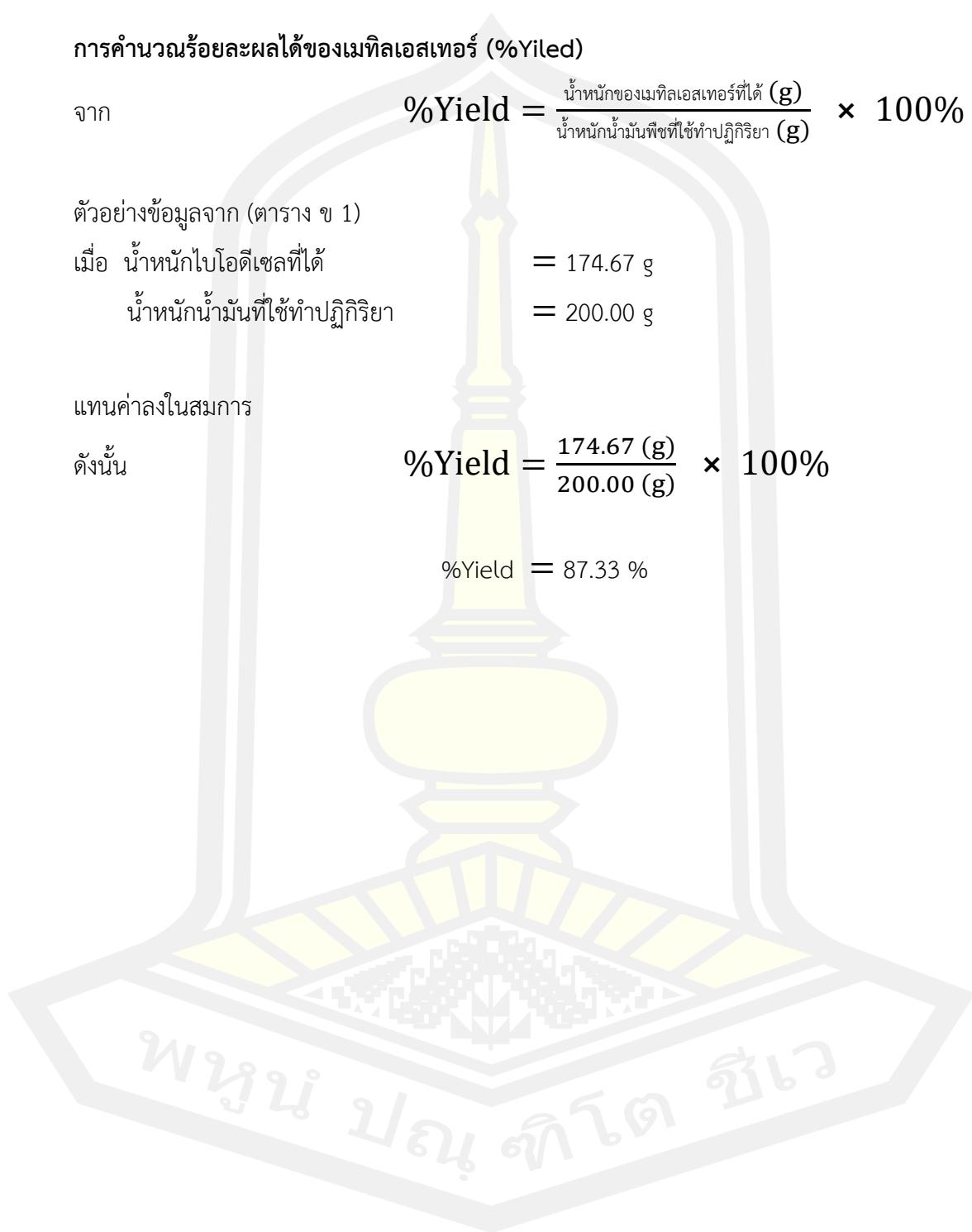
เมื่อ น้ำหนักไบโอดีเซลที่ได้ $= 174.67 \text{ g}$

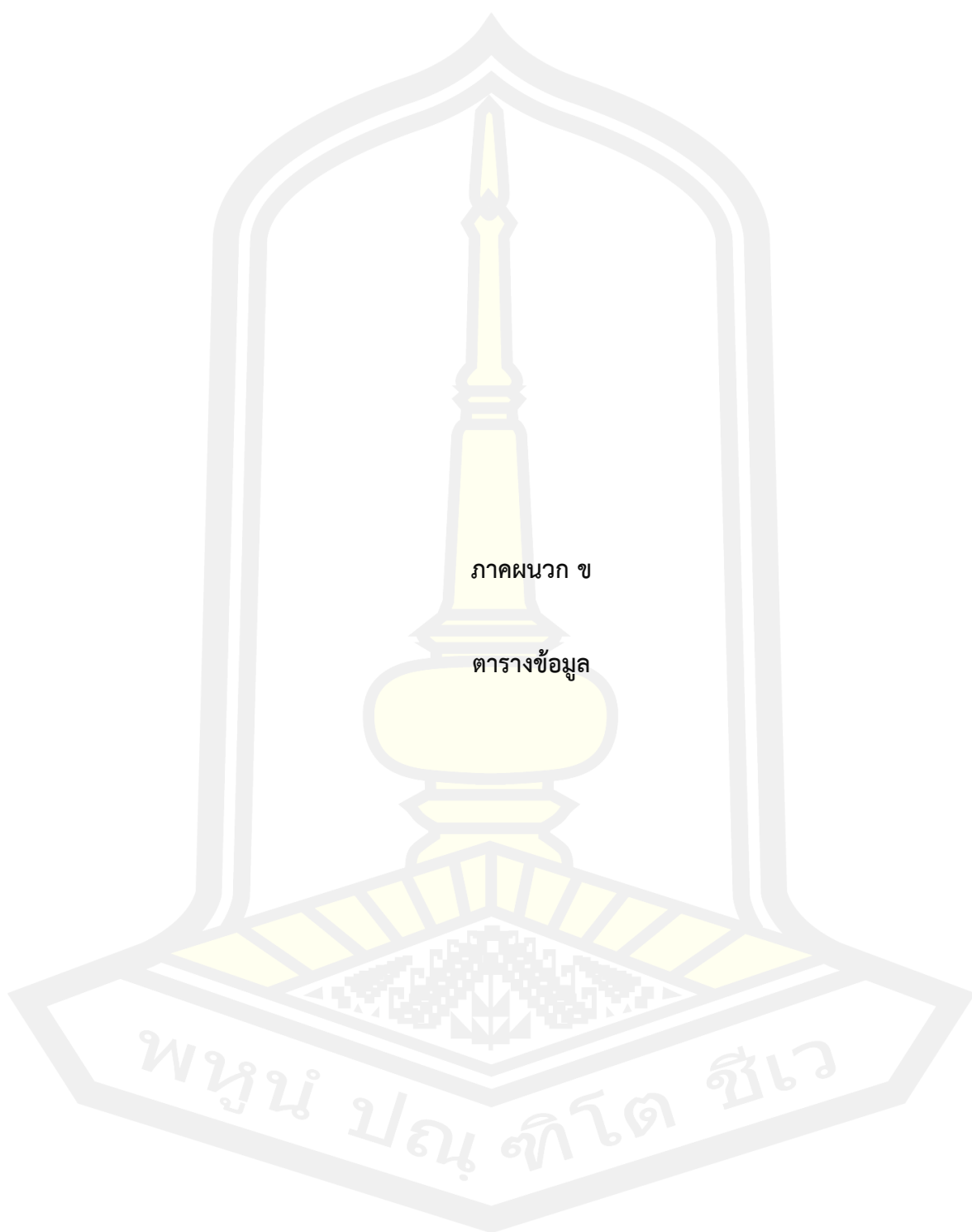
น้ำหนักน้ำมันที่ใช้ทำปฏิกิริยา $= 200.00 \text{ g}$

แทนค่าลงในสมการ

ดังนั้น
$$\%Yield = \frac{174.67 \text{ (g)}}{200.00 \text{ (g)}} \times 100\%$$

$$\%Yield = 87.33 \%$$





ตาราง ข.1 ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์

ลำดับการ ทดลอง	ปัจจัย			น้ำหนักน้ำมัน (กรัม)	น้ำหนักเมทิลเอสเทอร์ (กรัม)		ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์		
	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
1	600	1	60	200	159.36	161.58	79.68	80.79	80.24±0.78 ^{abc}
2	600	1	80	200	158.42	154.87	79.21	77.43	78.32±1.26 ^{ab}
3	600	2	60	200	162.84	168.52	81.42	84.26	82.84±2.01 ^c
4	600	2	80	200	151.88	157.36	75.94	78.68	77.31±1.94 ^{ab}
5	800	1	60	200	152.82	155.73	76.41	77.86	77.14±1.03 ^{ab}
6	800	1	80	200	163.47	158.44	81.73	79.22	80.48±1.77 ^{bc}
7	800	2	60	200	174.67	170.59	87.33	85.29	86.31±1.44 ^d
8	800	2	80	200	152.18	154.62	76.09	77.31	76.70±0.86 ^a

ตาราง ข.2 ข้อมูลประกอบการวิเคราะห์สมบัติความหนืดของเมทิลเอสเทอร์ที่สภาวะต่างๆ

ลำดับการทดลอง	ปัจจัย			รายการทดสอบ	วิธีการทดสอบ	ค่ามาตรฐาน	ผลการทดสอบครั้งที่ 1	ผลการทดสอบครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)						
1	600	1	60	ค่าคงที่ของ (Viscosity at 40 °C)	ASTM-D445	3.5-5	4.21 cSt	4.23 cSt	4.22±0.02 ^a
2	600	1	80	ค่าคงที่ของ (Viscosity at 40 °C)	ASTM-D445	3.5-5	4.25 cSt	4.26 cSt	4.25±0.01 ^a
3	600	2	60	ค่าคงที่ของ (Viscosity at 40 °C)	ASTM-D445	3.5-5	4.53 cSt	4.55 cSt	4.54±0.02 ^a
4	600	2	80	ค่าคงที่ของ (Viscosity at 40 °C)	ASTM-D445	3.5-5	4.37 cSt	4.32 cSt	4.35±0.05 ^a
5	800	1	60	ค่าคงที่ของ (Viscosity at 40 °C)	ASTM-D445	3.5-5	5.05 cSt	5.18 cSt	5.11±0.13 ^b
6	800	1	80	ค่าคงที่ของ (Viscosity at 40 °C)	ASTM-D445	3.5-5	5.22 cSt	5.30 cSt	5.26±0.08 ^{bc}
7	800	2	60	ค่าคงที่ของ (Viscosity at 40 °C)	ASTM-D445	3.5-5	5.74 cSt	5.82 cSt	5.78±0.08 ^d
8	800	2	80	ค่าคงที่ของ (Viscosity at 40 °C)	ASTM-D445	3.5-5	5.85 cSt	5.22 cSt	5.84±0.63 ^{cd}

ตาราง ข.3 ข้อมูลประกอบการวิเคราะห์สมบัติความหนาแน่นของเมทิลเอสเทอร์ที่สภาวะต่างๆ

ลำดับการทดลอง	ปัจจัย			น้ำหนักเมทิลเอสเทอร์ (กรัม)			ปริมาณ ขวดพี คนอมิเตอร์ (ml)	ค่าความหนาแน่น (kg/m ³)			ค่าเฉลี่ย
	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลา (นาท.)	อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
1	600	1	60	159.47	159.45	159.52	200	848.24	848.20	848.25	884.23±0.03 ^a
2	600	1	80	157.28	157.26	157.29	200	854.78	854.75	854.79	854.77±0.02 ^b
3	600	2	60	162.96	162.95	162.96	200	861.70	861.68	861.71	861.69±0.02 ^e
4	600	2	80	152.05	152.02	152.07	200	868.85	868.82	868.87	868.85±0.03 ^f
5	800	1	60	152.94	152.92	152.94	200	873.94	873.93	873.90	873.92±0.02 ^h
6	800	1	80	164.52	164.50	164.52	200	861.36	861.33	861.36	861.35±0.02 ^d
7	800	2	60	173.98	173.98	173.97	200	861.28	861.26	861.22	861.25±0.03 ^c
8	800	2	80	154.40	154.42	154.41	200	872.31	872.35	872.33	872.33±0.02 ^g

ตาราง ข.4 ข้อมูลประกอบการวิเคราะห์สมบัติจุดวาบไฟของเมทิลเอสเทอร์ที่สภาวะต่างๆ

ลำดับ การ ทดลอง	ปัจจัย			รายการทดสอบ	วิธีการทดสอบ	ค่ามาตรฐาน	ผลการทดสอบครั้งที่ 1	ผลการทดสอบครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ (°C)						
1	600	1	60	จุดวาบไฟ (Flash Point)	ASTM-D445	ไม่ต่ำกว่า 120 °C	169°C	170°C	169±1.0 ^g
2	600	1	80	จุดวาบไฟ (Flash Point)	ASTM-D445	ไม่ต่ำกว่า 120 °C	156°C	156°C	156±0.0 ^d
3	600	2	60	จุดวาบไฟ (Flash Point)	ASTM-D445	ไม่ต่ำกว่า 120 °C	165°C	166°C	165.5±0.5 ^f
4	600	2	80	จุดวาบไฟ (Flash Point)	ASTM-D445	ไม่ต่ำกว่า 120 °C	141°C	140°C	140.5±0.0 ^a
5	800	1	60	จุดวาบไฟ (Flash Point)	ASTM-D445	ไม่ต่ำกว่า 120 °C	145°C	145°C	145±0.0 ^c
6	800	1	80	จุดวาบไฟ (Flash Point)	ASTM-D445	ไม่ต่ำกว่า 120 °C	164°C	164°C	164±0.0 ^e
7	800	2	60	จุดวาบไฟ (Flash Point)	ASTM-D445	ไม่ต่ำกว่า 120 °C	143°C	143°C	143±0.0 ^b
8	800	2	80	จุดวาบไฟ (Flash Point)	ASTM-D445	ไม่ต่ำกว่า 120 °C	143°C	143°C	143±0.0 ^b

ตาราง ข.5 ข้อมูลประกอบวิเคราะห์สมบัติค่าจุดขุ่นของเมทิลเอสเทอร์ที่สภาวะต่างๆ

ลำดับ การ ทดลอง	ปัจจัย			รายการทดสอบ	วิธีการทดสอบ	ค่ามาตรฐาน	ผลการ ทดสอบ ครั้งที่ 1	ผลการทดสอบครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (C°)						
1	600	1	60	จุดขุ่น (Cloud Point)	ASTM-D2500	ไม่สูงกว่า 10 หรือ 16	15°C	15°C	15±0.0 ^a
2	600	1	80	จุดขุ่น (Cloud Point)	ASTM-D2500	ไม่สูงกว่า 10 หรือ 16	15°C	14°C	14.5±0.5 ^a
3	600	2	60	จุดขุ่น (Cloud Point)	ASTM-D2500	ไม่สูงกว่า 10 หรือ 16	15°C	15°C	15±0.0 ^a
4	600	2	80	จุดขุ่น (Cloud Point)	ASTM-D2500	ไม่สูงกว่า 10 หรือ 16	14°C	15°C	14.5±0.5 ^a
5	800	1	60	จุดขุ่น (Cloud Point)	ASTM-D2500	ไม่สูงกว่า 10 หรือ 16	14°C	15°C	14.5±0.5 ^a
6	800	1	80	จุดขุ่น (Cloud Point)	ASTM-D2500	ไม่สูงกว่า 10 หรือ 16	15°C	15°C	15±0.0 ^a
7	800	2	60	จุดขุ่น (Cloud Point)	ASTM-D2500	ไม่สูงกว่า 10 หรือ 16	15°C	14°C	14.5±0.5 ^a
8	800	2	80	จุดขุ่น (Cloud Point)	ASTM-D2500	ไม่สูงกว่า 10 หรือ 16	15°C	14°C	14.5±0.5 ^a

ตาราง ข.6 ข้อมูลประกอบวิเคราะห์สมบัติค่าจุดไหลเทของเมทิลเอสเทอร์ที่สภาวะต่างๆ

ลำดับ การ ทดลอง	ปัจจัย			รายการทดสอบ	วิธีการทดสอบ	ค่ามาตรฐาน	ผลการทดสอบ ครั้งที่ 1	ผลการทดสอบ ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ (C°)						
1	600	1	60	จุดไหลเท(Pour Point)	ASTM-D97	ไม่สูงกว่า 10	7°C	8°C	7.5±0.5 ^a
2	600	1	80	จุดไหลเท(Pour Point)	ASTM-D97	ไม่สูงกว่า 10	8°C	8°C	8±0.0 ^a
3	600	2	60	จุดไหลเท(Pour Point)	ASTM-D97	ไม่สูงกว่า 10	8°C	7°C	7.5±0.5 ^a
4	600	2	80	จุดไหลเท(Pour Point)	ASTM-D97	ไม่สูงกว่า 10	8°C	8°C	8±0.0 ^a
5	800	1	60	จุดไหลเท(Pour Point)	ASTM-D97	ไม่สูงกว่า 10	7°C	8°C	7.5±0.5 ^a
6	800	1	80	จุดไหลเท(Pour Point)	ASTM-D97	ไม่สูงกว่า 10	8°C	8°C	8±0.0 ^a
7	800	2	60	จุดไหลเท(Pour Point)	ASTM-D97	ไม่สูงกว่า 10	7°C	7°C	7±0.0 ^a
8	800	2	80	จุดไหลเท(Pour Point)	ASTM-D97	ไม่สูงกว่า 10	7°C	7°C	7±0.0 ^a

ตาราง ข.7 ข้อมูลประกอบวิเคราะห์สมบัติค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110°C ของเมทิลเอสเทอร์ที่สภาวะต่างๆ

ลำดับ การ ทดลอง	ปัจจัย			รายการทดสอบ	วิธีการทดสอบ	ค่ามาตรฐาน	ผลการทดสอบ ครั้งที่ 1	ผลการทดสอบ ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย (h)
	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ (°C)						
1	600	1	60	ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110°C	EN 15751	ไม่ต่ำกว่า 10	25.68	24.72	25.20±0.96 ^e
2	600	1	80	ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110°C	EN 15751	ไม่ต่ำกว่า 10	18.37	19.36	18.87±0.99 ^d
3	600	2	60	ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110°C	EN 15751	ไม่ต่ำกว่า 10	15.85	14.53	15.19±1.35 ^b
4	600	2	80	ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110°C	EN 15751	ไม่ต่ำกว่า 10	19.48	18.56	19.02±0.92 ^d
5	800	1	60	ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110°C	EN 15751	ไม่ต่ำกว่า 10	9.78	10.21	10.00±0.43 ^a
6	800	1	80	ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110°C	EN 15751	ไม่ต่ำกว่า 10	8.65	9.86	9.26±1.21 ^a
7	800	2	60	ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110°C	EN 15751	ไม่ต่ำกว่า 10	18.78	19.20	18.13±0.42 ^d
8	800	2	80	ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110°C	EN 15751	ไม่ต่ำกว่า 10	16.83	17.48	17.16±0.65 ^c

ตาราง ข.8 ข้อมูลประกอบวิเคราะห์สมบัติค่าความร้อนของเมทิลเอสเทอร์ที่สภาวะต่างๆ

ลำดับการทดลอง	ปัจจัย			Sd	ค่าความร้อนครั้งที่1 (cal/g)	ค่าความร้อนครั้งที่2 (cal/g)	ค่าเฉลี่ย
	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลา (นาท)	อุณหภูมิ (°C)				
1	600	1	60	39.30	9,487.37	9,432.18	9,459.78 ^{bc}
2	600	2	60	11.47	9,428.36	9,412.14	9,420.25 ^{bc}
3	600	1	80	45.64	9,438.57	9,374.02	9,406.29 ^{bc}
4	600	2	80	40.92	9,285.57	9,343.44	9,314.51 ^{ab}
5	800	1	60	73.78	9,468.31	9,572.66	9,520.48 ^c
6	800	2	60	93.24	9,301.59	9,169.72	9,235.65 ^a
7	800	1	80	116.43	9,340.03	9,504.68	9,422.65 ^{bc}
8	800	2	80	76.14	9,444.35	9,552.03	9,498.19 ^c

ตาราง ข.9 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน

รายการ	ข้อกำหนด	ค่ากำหนด	วิธีทดสอบ
1	เมทิลเอสเทอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (Methyl ester, % wt)	ไม่ต่ำกว่า 96.5	EN 14103
2	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15°C (กิโลกรัม/ ลูกบาศก์เมตร) (Density at 15°C, kg/m ³)	ไม่ต่ำกว่า 860 และไม่สูงกว่า 900	ASTM D 1298
3	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 °C (เซนติสโตกส์) (viscosity at 40 °C, cSt)	ไม่ต่ำกว่า 3.5 และไม่สูงกว่า 5.0	ASTM D 445
4	จุดวาบไฟ °C (Flash point, °C)	ไม่ต่ำกว่า 120	ASTM D 93
5	กำมะถัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (Sulphur, %wt)	ไม่สูงกว่า 0.0010	ASTM D 2622
6	กากถ่าน (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (ร้อยละ10ของกากถ่านที่เหลือจากการกลั่น) (Carbon residue, on 10% Distillation Residue, %wt)	ไม่สูงกว่า 0.03	ASTM D 4530
7	จำนวนซีเทน (Cetane number)	ไม่ต่ำกว่า 51	ASTM D 613
8	เถ้าซัลเฟส (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (Sulphated ash, %wt)	ไม่สูงกว่า 0.02	ASTM D 874
9	น้ำ (มิลลิกรัม/กิโลกรัม) (Water, mg/kg)	ไม่สูงกว่า 500	EN ISO12937
10	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด (มิลลิกรัม/กิโลกรัม) (Total contaminate, mg/kg)	ไม่สูงกว่า 24	EN 12662
11	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper strip corrosin)	ไม่สูงกว่า หมายเลข 1	ASTM D 130

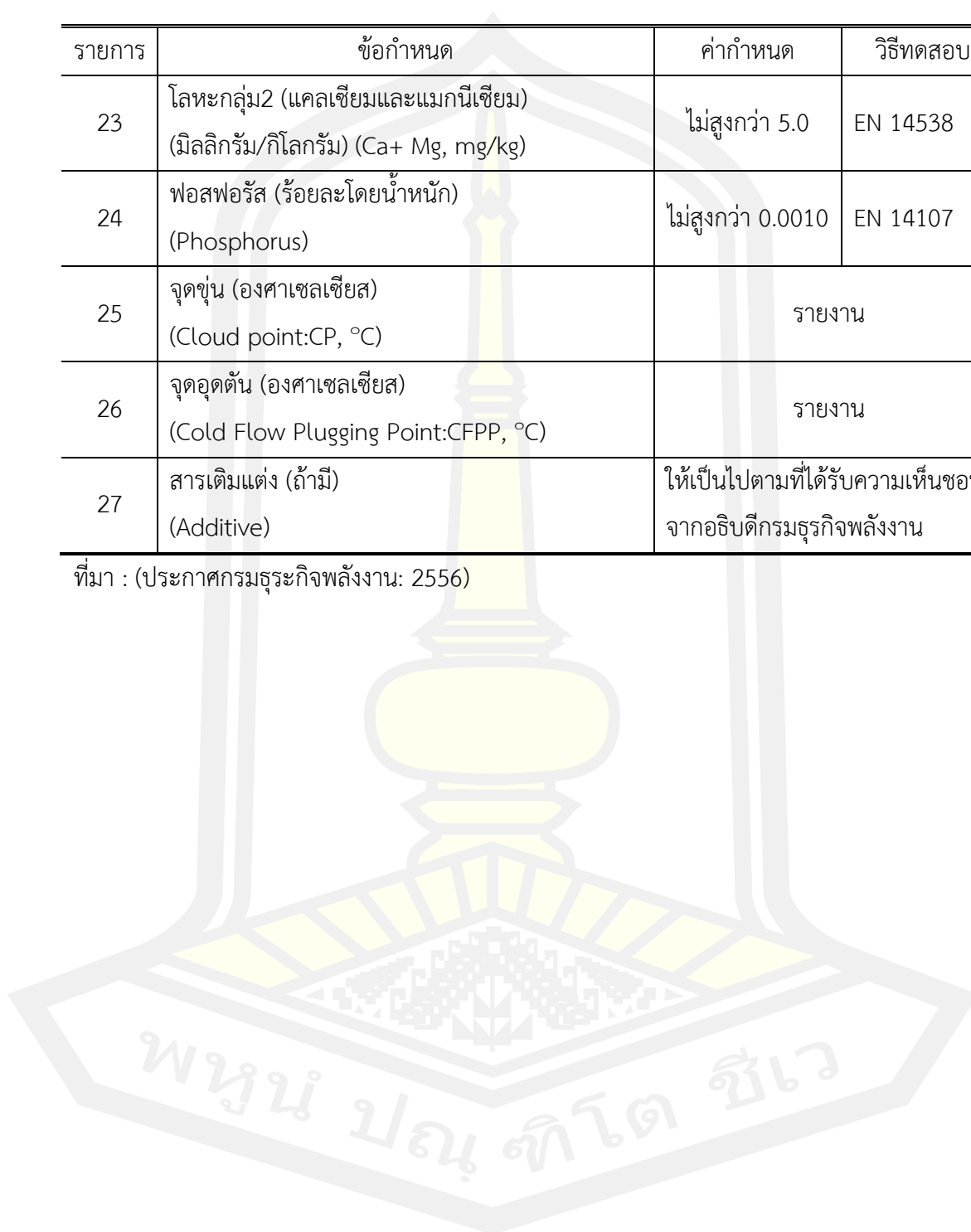
ตาราง ข 9 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (ต่อ)

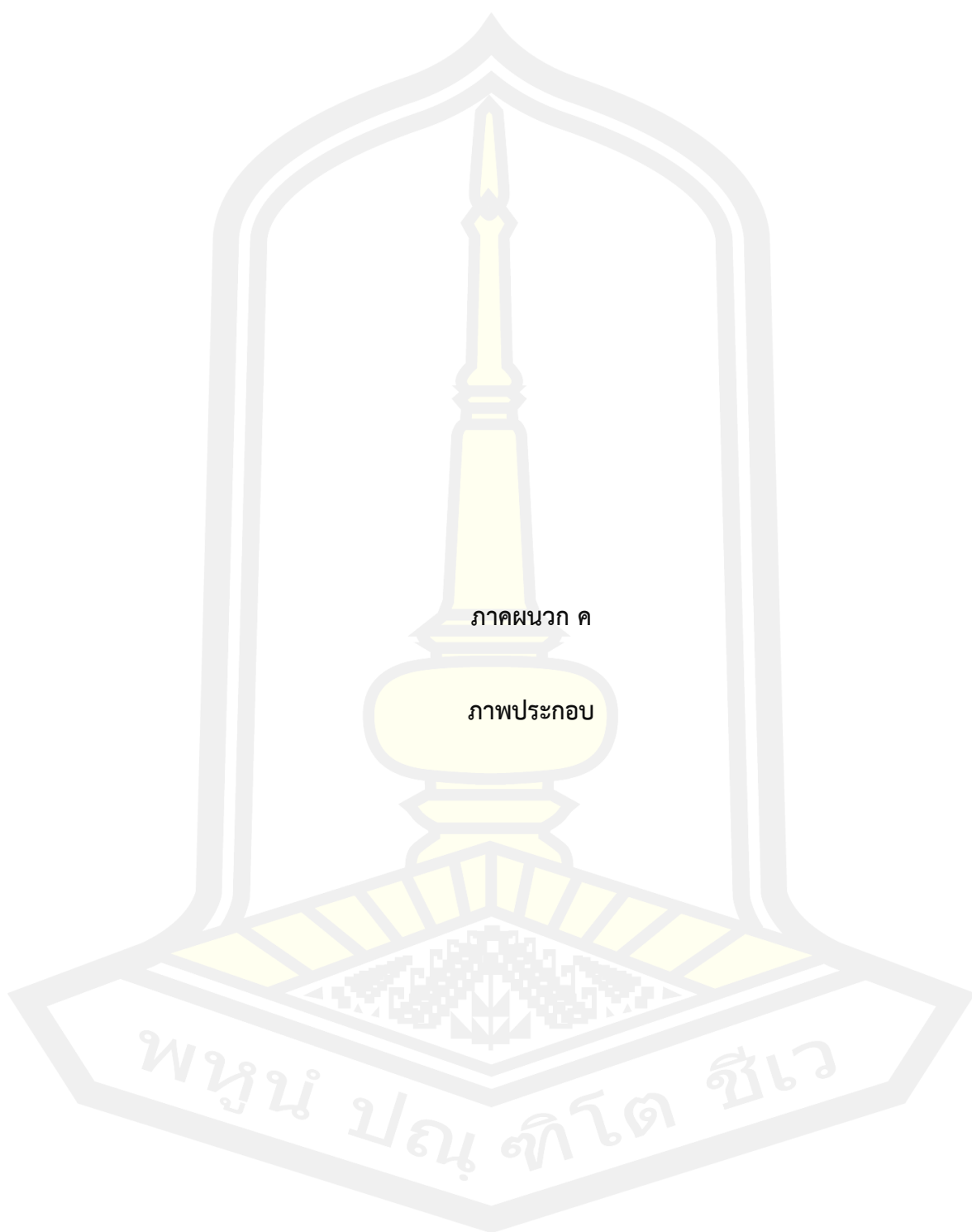
รายการ	ข้อกำหนด	ค่ากำหนด	วิธีทดสอบ
12	ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 °C, ชั่วโมง (Oxidation stability at 110 °C, hours)	ไม่ต่ำกว่า 10	EN 14112
13	ค่าความเป็นกรด (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม) (Acid value, mg KOH/g)	ไม่สูงกว่า 0.50	ASTM D 664
14	ค่าไอโอดีน (กรัมไอโอดีน/100กรัม) (Iodine value, g Iodine/100 g)	ไม่สูงกว่า 120	EN 14111
15	กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (Linolenic acid methyl ester, %wt)	ไม่สูงกว่า 12.0	EN 14103
16	เมทานอล (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (Methanol, %wt)	ไม่สูงกว่า 0.20	EN 14110
17	โมโนกรีเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (Monoglyceride, %wt)	ไม่สูงกว่า 0.70	EN 14105
18	ไดกรีเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (Diglyceride, %wt)	ไม่สูงกว่า 0.20	EN 14105
19	ไตรกรีเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (Triglyceride, %wt)	ไม่สูงกว่า 0.20	EN 14105
20	กลีเซอรินอิสระ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (Free glycerine, %wt)	ไม่สูงกว่า 0.20	EN 14105
21	กรีเซอรินทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (Total glycerine, %wt)	ไม่สูงกว่า 0.25	EN 14105
22	โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม) (มิลลิกรัม/กิโลกรัม) (Na+ K, mg/kg)	ไม่สูงกว่า 5.0	EN 14538

ตาราง ข 9 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (ต่อ)

รายการ	ข้อกำหนด	ค่ากำหนด	วิธีทดสอบ
23	โลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม) (มิลลิกรัม/กิโลกรัม) (Ca+ Mg, mg/kg)	ไม่สูงกว่า 5.0	EN 14538
24	ฟอสฟอรัส (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (Phosphorus)	ไม่สูงกว่า 0.0010	EN 14107
25	จุดขุ่น (องศาเซลเซียส) (Cloud point:CP, °C)	รายงาน	
26	จุดอุดตัน (องศาเซลเซียส) (Cold Flow Plugging Point:CFPP, °C)	รายงาน	
27	สารเติมแต่ง (ถ้ามี) (Additive)	ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบ จากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน	

ที่มา : (ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน: 2556)





ภาพประกอบ ค.1 ทดสอบสถิติร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์

Yield

Duncan^a

Condition	N	Subset for alpha = .05			
		1	2	3	4
8.00	2	76.7000			
5.00	2	77.1350	77.1350		
4.00	2	77.3100	77.3100		
2.00	2	78.3200	78.3200		
1.00	2	80.2350	80.2350	80.2350	
6.00	2		80.4750	80.4750	
3.00	2			82.8400	
7.00	2				86.3100
Sig.		.055	.067	.125	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 2.000.

Descriptives

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
1.00	2	80.2350	.78489	.55500	73.1831	87.2869	79.68	80.79
2.00	2	78.3200	1.25865	.89000	67.0115	89.6285	77.43	79.21
3.00	2	82.8400	2.00818	1.42000	64.7972	100.8828	81.42	84.26
4.00	2	77.3100	1.93747	1.37000	59.9025	94.7175	75.94	78.68
5.00	2	77.1350	1.02530	.72500	67.9230	86.3470	76.41	77.86
6.00	2	80.4750	1.77484	1.25500	64.5287	96.4213	79.22	81.73
7.00	2	86.3100	1.44250	1.02000	73.3497	99.2703	85.29	87.33
8.00	2	76.7000	.86267	.61000	68.9492	84.4508	76.09	77.31
Total	16	79.9156	3.38169	.84542	78.1136	81.7176	75.94	87.33

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	154.525	7	22.075	10.380	.002
Within Groups	17.013	8	2.127		
Total	171.538	15			

ภาพประกอบ ค.2 ทดสอบสถิติร้อยละผลได้ของค่าความหนืด

Descriptives

Viscosity

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
1.00	2	4.2200	.01414	.01000	4.0929	4.3471	4.21	4.23
2.00	2	4.2550	.00707	.00500	4.1915	4.3185	4.25	4.26
3.00	2	4.5400	.01414	.01000	4.4129	4.6671	4.53	4.55
4.00	2	4.3450	.03536	.02500	4.0273	4.6627	4.32	4.37
5.00	2	5.1150	.09192	.06500	4.2891	5.9409	5.05	5.18
6.00	2	5.2600	.05657	.04000	4.7518	5.7682	5.22	5.30
7.00	2	5.7800	.05657	.04000	5.2718	6.2882	5.74	5.82
8.00	2	5.5350	.44548	.31500	1.5325	9.5375	5.22	5.85
Total	16	4.8813	.60819	.15205	4.5572	5.2053	4.21	5.85

Viscosity

Duncan^a

Method1	N	Subset for alpha = .05			
		1	2	3	4
1.00	2	4.2200			
2.00	2	4.2550			
4.00	2	4.3450			
3.00	2	4.5400			
5.00	2		5.1150		
6.00	2		5.2600	5.2600	
8.00	2			5.5350	5.5350
7.00	2				5.7800
Sig.		.104	.402	.132	.173

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 2.000.

ANOVA

Viscosity

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	5.333	7	.762	28.350	.000
Within Groups	.215	8	.027		
Total	5.548	15			

ภาพประกอบ ค.3 ทดสอบสถิติร้อยละผลได้ของค่าความหนาแน่น

Density

Duncan^a

Method	N	Subset for alpha = .05							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1.00	3	848.2300							
2.00	3		854.7733						
7.00	3			861.2533					
6.00	3				861.3500				
3.00	3					861.6967			
4.00	3						868.8467		
8.00	3							872.3300	
5.00	3								873.9233
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

Descriptives

Density

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
1.00	3	848.2300	.02646	.01528	848.1643	848.2957	848.20	848.25
2.00	3	854.7733	.02082	.01202	854.7216	854.8250	854.75	854.79
3.00	3	861.6967	.01528	.00882	861.6587	861.7346	861.68	861.71
4.00	3	868.8467	.02517	.01453	868.7842	868.9092	868.82	868.87
5.00	3	873.9233	.02082	.01202	873.8716	873.9750	873.90	873.94
6.00	3	861.3500	.01732	.01000	861.3070	861.3930	861.33	861.36
7.00	3	861.2533	.03055	.01764	861.1774	861.3292	861.22	861.28
8.00	3	872.3300	.02000	.01155	872.2803	872.3797	872.31	872.35
Total	24	862.8004	8.34218	1.70284	859.2778	866.3230	848.20	873.94

ANOVA

Density

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1600.608	7	228.658	449819.5	.000
Within Groups	.008	16	.001		
Total	1600.616	23			

ภาพประกอบ ค.4 ทดสอบสถิติร้อยละผลได้ของจุดวาบไฟ

Descriptives

Flash

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
1.00	2	169.5000	.70711	.50000	163.1469	175.8531	169.00	170.00
2.00	2	156.0000	.00000	.00000	156.0000	156.0000	156.00	156.00
3.00	2	165.5000	.70711	.50000	159.1469	171.8531	165.00	166.00
4.00	2	140.5000	.70711	.50000	134.1469	146.8531	140.00	141.00
5.00	2	145.0000	.00000	.00000	145.0000	145.0000	145.00	145.00
6.00	2	164.0000	.00000	.00000	164.0000	164.0000	164.00	164.00
7.00	2	143.0000	.00000	.00000	143.0000	143.0000	143.00	143.00
8.00	2	143.0000	.00000	.00000	143.0000	143.0000	143.00	143.00
Total	16	153.3125	11.42348	2.85587	147.2254	159.3996	140.00	170.00

Flash

Duncan^a

Method1	N	Subset for alpha = .05						
		1	2	3	4	5	6	7
4.00	2	140.5000						
7.00	2		143.0000					
8.00	2		143.0000					
5.00	2			145.0000				
2.00	2				156.0000			
6.00	2					164.0000		
3.00	2						165.5000	
1.00	2							169.5000
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 2.000.

ANOVA

Flash

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1955.938	7	279.420	1490.238	.000
Within Groups	1.500	8	.188		
Total	1957.438	15			

ภาพประกอบ ค.5 ทดสอบสถิติร้อยละผลได้ของจุดชุ่ม

Descriptives

Cloud								
	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
1.00	2	15.0000	.00000	.00000	15.0000	15.0000	15.00	15.00
2.00	2	14.5000	.70711	.50000	8.1469	20.8531	14.00	15.00
3.00	2	15.0000	.00000	.00000	15.0000	15.0000	15.00	15.00
4.00	2	14.5000	.70711	.50000	8.1469	20.8531	14.00	15.00
5.00	2	14.5000	.70711	.50000	8.1469	20.8531	14.00	15.00
6.00	2	15.0000	.00000	.00000	15.0000	15.0000	15.00	15.00
7.00	2	14.5000	.70711	.50000	8.1469	20.8531	14.00	15.00
8.00	2	14.5000	.70711	.50000	8.1469	20.8531	14.00	15.00
Total	16	14.6875	.47871	.11968	14.4324	14.9426	14.00	15.00

Cloud

Duncan^a

Method1	N	Subset for alpha = .05
		1
2.00	2	14.5000
4.00	2	14.5000
5.00	2	14.5000
7.00	2	14.5000
8.00	2	14.5000
1.00	2	15.0000
3.00	2	15.0000
6.00	2	15.0000
Sig.		.422

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 2.000.

ANOVA

Cloud					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.938	7	.134	.429	.859
Within Groups	2.500	8	.313		
Total	3.438	15			

ภาพประกอบ ค.6 ทดสอบสถิติร้อยละผลได้ของจุดไหลเท

Descriptives

Pour									
	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum	
					Lower Bound	Upper Bound			
1.00	2	7.5000	.70711	.50000	1.1469	13.8531	7.00	8.00	
2.00	2	8.0000	.00000	.00000	8.0000	8.0000	8.00	8.00	
3.00	2	7.5000	.70711	.50000	1.1469	13.8531	7.00	8.00	
4.00	2	8.0000	.00000	.00000	8.0000	8.0000	8.00	8.00	
5.00	2	7.5000	.70711	.50000	1.1469	13.8531	7.00	8.00	
6.00	2	8.0000	.00000	.00000	8.0000	8.0000	8.00	8.00	
7.00	2	7.0000	.00000	.00000	7.0000	7.0000	7.00	7.00	
8.00	2	7.0000	.00000	.00000	7.0000	7.0000	7.00	7.00	
Total	16	7.5625	.51235	.12809	7.2895	7.8355	7.00	8.00	

Pour

Duncan^a

Method1	N	Subset for alpha = .05
		1
7.00	2	7.0000
8.00	2	7.0000
1.00	2	7.5000
3.00	2	7.5000
5.00	2	7.5000
2.00	2	8.0000
4.00	2	8.0000
6.00	2	8.0000
Sig.		.067

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 2.000.

ANOVA

Pour					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	2.438	7	.348	1.857	.202
Within Groups	1.500	8	.188		
Total	3.938	15			

ภาพประกอบ ค.7 ทดสอบสถิติร้อยละผลได้ของค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 °C, ชั่วโมง (Oxidation stability at 110 °C, hours)

Descriptives

Stable

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
1.00	2	25.2000	.67882	.48000	19.1010	31.2990	24.72	25.68
2.00	2	18.8650	.70004	.49500	12.5754	25.1546	18.37	19.36
3.00	2	15.1900	.93338	.66000	6.8039	23.5761	14.53	15.85
4.00	2	19.0200	.65054	.46000	13.1751	24.8649	18.56	19.48
5.00	2	9.9950	.30406	.21500	7.2632	12.7268	9.78	10.21
6.00	2	9.2550	.85560	.60500	1.5677	16.9423	8.65	9.86
7.00	2	18.9900	.29698	.21000	16.3217	21.6583	18.78	19.20
8.00	2	17.1550	.45962	.32500	13.0255	21.2845	16.83	17.48
Total	16	16.7088	5.06122	1.26531	14.0118	19.4057	8.65	25.68

Stable

Duncan^a

Method1	N	Subset for alpha = .05				
		1	2	3	4	5
6.00	2	9.2550	15.1900	17.1550	18.8650	25.2000
5.00	2	9.9950				
3.00	2					
8.00	2					
2.00	2				18.8650	
7.00	2				18.9900	
4.00	2				19.0200	
1.00	2					
Sig.		.287	1.000	1.000	.824	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 2.000.

ANOVA

Stable

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	380.871	7	54.410	129.194	.000
Within Groups	3.369	8	.421		
Total	384.240	15			

ภาพประกอบ ค.8 ทดสอบสถิติร้อยละผลได้ของค่าความร้อน

Descriptives

HHV								
	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
1.00	2	9459.7750	39.02522	27.59500	9109.1473	9810.4027	9432.18	9487.37
2.00	2	9420.2500	11.46927	8.11000	9317.2027	9523.2973	9412.14	9428.36
3.00	2	9406.2950	45.64374	32.27500	8996.2022	9816.3878	9374.02	9438.57
4.00	2	9314.5050	40.92027	28.93500	8946.8510	9682.1590	9285.57	9343.44
5.00	2	9520.4850	73.78659	52.17500	8857.5388	10183.4312	9468.31	9572.66
6.00	2	9235.6550	93.24617	65.93500	8397.8714	10073.4386	9169.72	9301.59
7.00	2	9422.3550	116.42513	82.32500	8376.3167	10468.3933	9340.03	9504.68
8.00	2	9498.1900	76.14126	53.84000	8814.0879	10182.2921	9444.35	9552.03
Total	16	9409.6888	104.37118	26.09279	9354.0733	9465.3042	9169.72	9572.66

HHV

Duncan^a

Condition	N	Subset for alpha = .05		
		1	2	3
6.00	2	9235.6550		
4.00	2	9314.5050	9314.5050	
3.00	2		9406.2950	9406.2950
2.00	2		9420.2500	9420.2500
7.00	2		9422.3550	9422.3550
1.00	2		9459.7750	9459.7750
8.00	2			9498.1900
5.00	2			9520.4850
Sig.		.291	.089	.167

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 2.000.

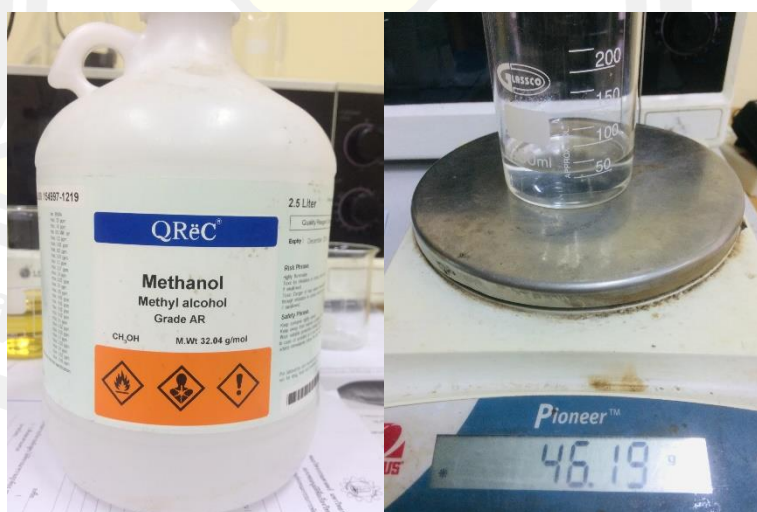
ANOVA

HHV

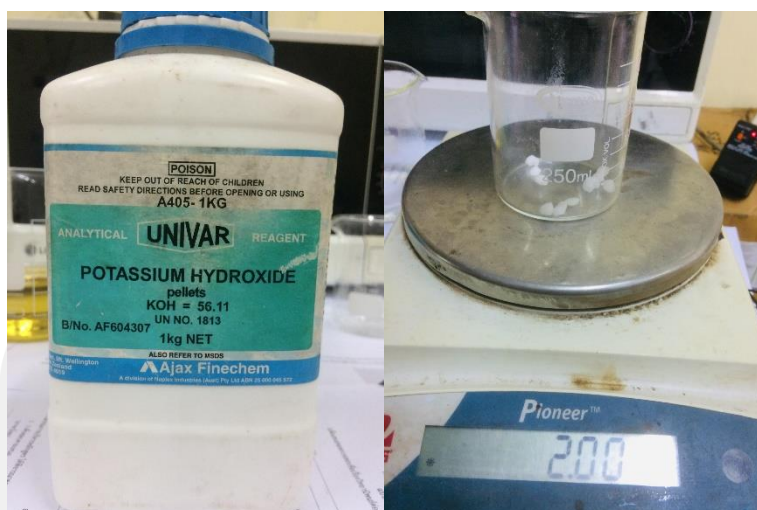
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	124496.2	7	17785.170	3.657	.045
Within Groups	38903.944	8	4862.993		
Total	163400.1	15			



ภาพประกอบ ค.9 น้ำมันปาล์ม (ROL)



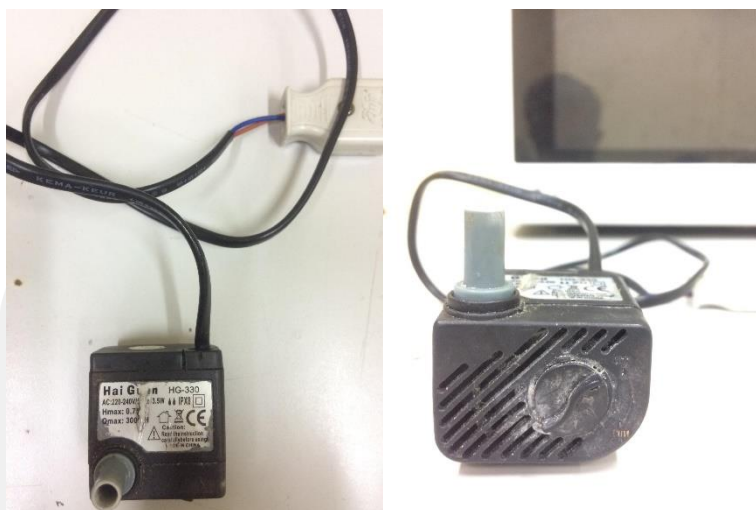
ภาพประกอบ ค.10 เมทานอล



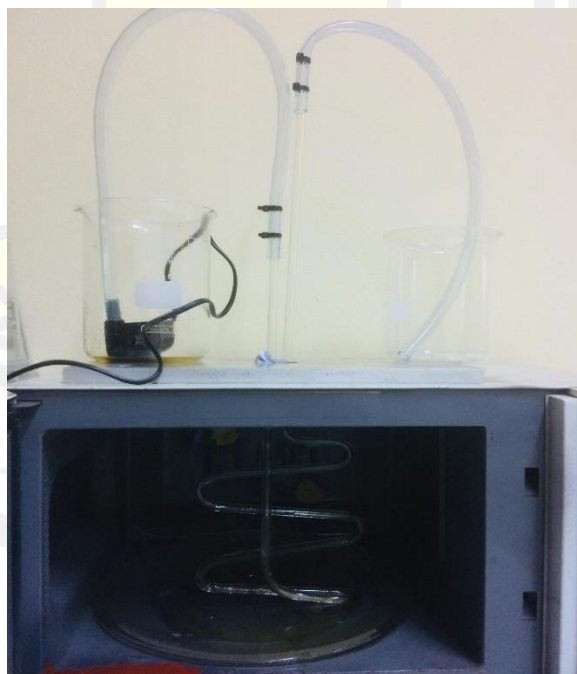
ภาพประกอบ ค.11 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)



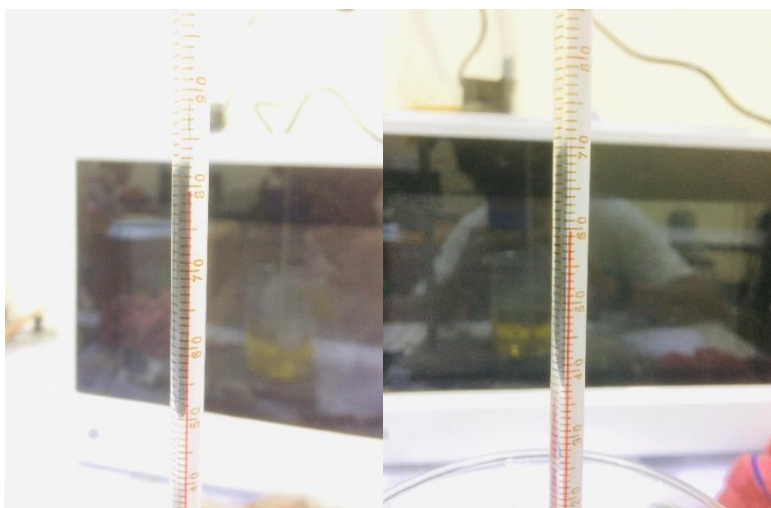
ภาพประกอบ ค.12 ส่วนผสมน้ำมันปาล์ม (ROL) 200 g. เมทานอล 46 g. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2



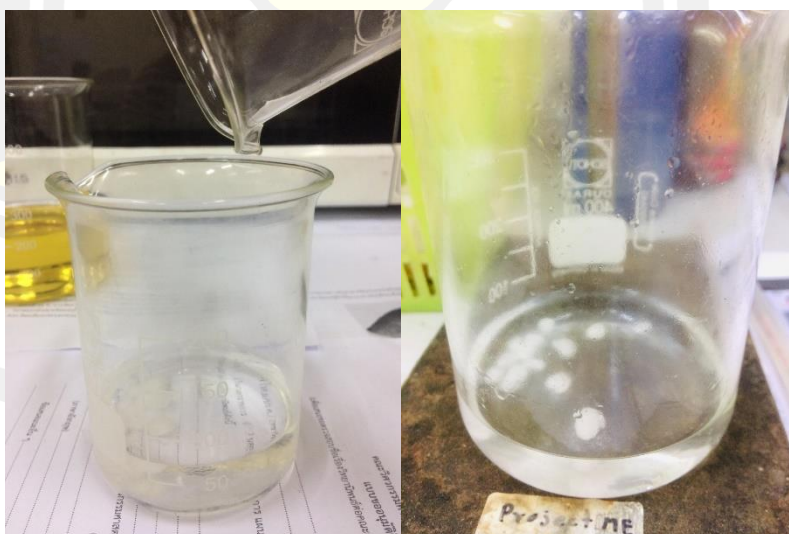
ภาพประกอบ ค.13 ปั๊มขนาด HG-330



ภาพประกอบ ค.14 เครื่องไมโครเวฟปรับแต่งใส่แท่งแก้วเพื่อให้ไขมันไหลผ่าน



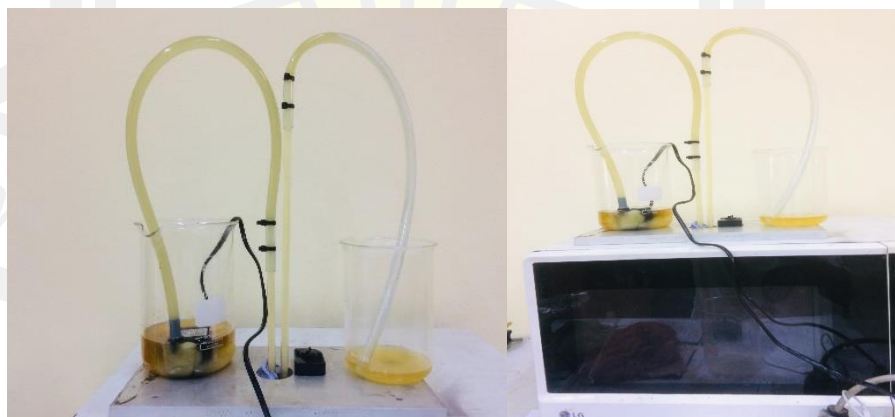
ภาพประกอบ ค.15 กำหนดอุณหภูมิน้ำมันปาล์ม (ROL) ที่ 60 องศาเซลเซียสและ 80 องศาเซลเซียส



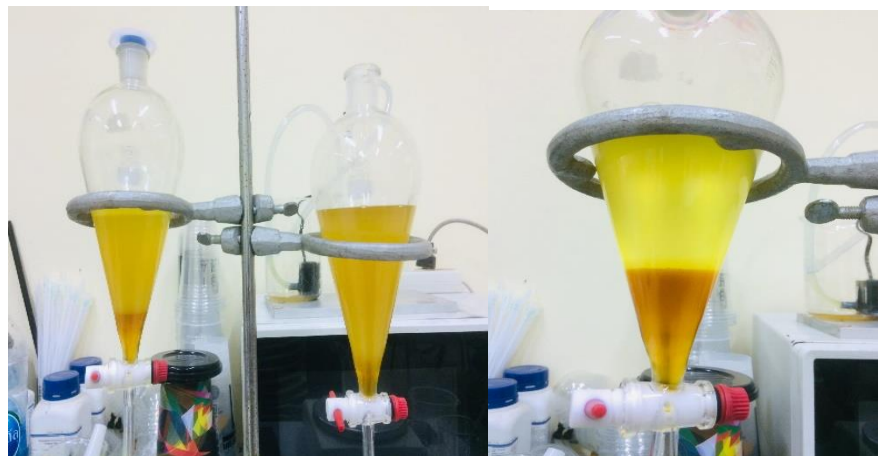
ภาพประกอบ ค.16 กวนเมทานอล+โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์



ภาพประกอบ ค.17 เทส่วนผสมเมทานอลและโพแทสเซียมลงในน้ำมันปาล์ม (ROL) ที่อุ่นในอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสและ 80 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบ ค.18 ติดตั้งปั๊มและเปิดให้น้ำมันไหลผ่านรังสีไมโครเวฟอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลา 1 นาทีและ 2 นาที



ภาพประกอบ ค.19 เทใส่ภาชนะไว้ 3-7 นาที เพื่อทำการทรานเอสเทอร์ฟิเคชันแยกสารระหว่างกริเซอรินและน้ำมันไบโอดีเซล



ภาพประกอบ ค.20 นำไบโอดีเซลที่ได้จากการทรานเอสเทอร์ฟิเคชันมาล้างน้ำด้วยน้ำกลั่นบริสุทธิ์ในปริมาณที่เหมาะสมแล้วนำไปอุ่นเพื่อเอาน้ำที่ตกค้างออกจากรันน้ำมัน



ภาพประกอบ ค.21 น้ำมันใบโหระพาที่ได้ใส่ภาชนะเพื่อหาค่าคุณสมบัติต่อไป



ภาพประกอบ ค.22 เครื่องวัดค่าความร้อน



ภาพประกอบ ค.23 เครื่องวัดค่าจุดติดไฟ



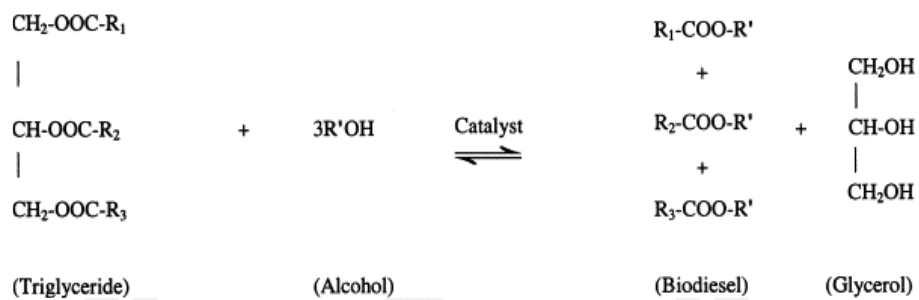
ภาพประกอบ ค.24 เครื่องวัดค่าความหนืด Size 150



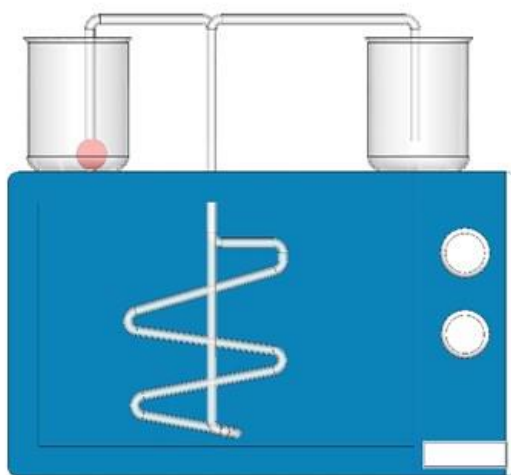
ภาพประกอบ ค.25 รูดอล์ฟดีเซล วิศวกรผู้คิดค้นชาวเยอรมัน



ภาพประกอบ ค.26 ต้นปาล์มน้ำมัน



ภาพประกอบ ค.27 ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน



ภาพประกอบ ค.28 ไมโครเวฟที่ใช้ผลิตน้ำมันไบโอดีเซลชนิดไหลอย่างต่อเนื่อง

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายอินทร์รักษ์ ่องอาจ
วันเกิด วันที่ 29 เมษายน พ.ศ. 2529
สถานที่เกิด โรงพยาบาลทุ่งตะโก จังหวัดชุมพร
สถานที่อยู่ปัจจุบัน เลขที่ 56/3 หมู่ที่ 1 ตำบลช่องไม้แก้ว อำเภอทุ่งตะโก จังหวัดชุมพร
รหัสไปรษณีย์ 86220
ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2548 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนทุ่งตะโกวิทยา
พ.ศ. 2551 วิทยาลัยเทคนิคชุมพร
พ.ศ. 2557 ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.)
สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องจักรกลเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
พ.ศ. 2565 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชา
วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูน ปณ จิต ชีวะ