การผลิตไบโอดีเซลชนิดไหลอย่างต่อเนื่องด้วยการให้ความร้อนจากไมโครเวฟ
Continuous flow biodiesel production using microwave heating

อินทรักษ์ องอาจ[1], อดิศักดิ์ ปัตติยะ[2], จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์[3*]
Intarak Ongart[1], Adisak Pattiya[2], Jindaporn Jamradloedluk[3*]

Received: 22 May 2022 ; **Revised**: 7 June 2022 ; **Accepted**: 14 June 2022

บทคัดย่อ
งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการผลิตไบโอดีเซลชนิดไหลอย่างต่อเนื่องโดยใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งความร้อน ปาล์มน้ำมันถูกเปลี่ยนเป็นเมทิลเอสเทอร์ผ่านการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้โพแทสเซียมไฮดร็อกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1% ทั้งนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ (600 และ 800 วัตต์) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (1 นาที และ 2 นาที) และอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำมันปาล์ม (60 และ 80 องศาเซลเซียส) ที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของไบโอดีเซล (เมทิลเอสเทอร์) และจากผลการศึกษา พบว่า การเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาส่งผลให้ปริมาณผลได้ของเมทิลเอสเทอร์สูงขึ้น ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิเริ่มต้นในการทำปฏิกิริยาส่งผลให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ลดลง และการเพิ่มกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟไม่ได้ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ยังพบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน คือ ที่กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ 800 วัตต์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 นาที และอุณหภูมิเริ่มต้น 60 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้ได้ปริมาณผลได้ของเมทิลเอสเทอร์สูงสุด (86.13%) สำหรับสมบัติของเมทิลเอสเทอร์ ได้แก่ ความหนาแน่น จุดวาบไฟ และจุดขุ่น มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่กรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน กำหนด

คำสำคัญ: น้ำมันปาล์ม ไบโอดีเซล ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน เมทิลเอสเทอร์ ไมโครเวฟ

Abstract
Continuous flow biodiesel production using microwaves as a heat source is proposed. Palm oil was converted into methyl ester via transesterification using potassium hydroxide (KOH) as a catalyst. Methanol to oil molar ratio and catalyst amount were set at 6:1 and 1%wt, respectively. Influences of microwave power (600 and 800 W), reaction time (1 and 2 min), and initial temperature (60 and 80°C) on yield of biodiesel (methyl ester, ME) were experimentally studied. The experimental results indicated that the longer reaction time led to a higher ME yield while the initial. However, influence of microwave power was not significant. The highest yield (86.31%) was found at microwave power of 800 W, reaction time of 2 min and initial temperature of 60°C. Properties in terms of density, flash point, and cloud point were in the acceptable ranges of biodiesel (methyl ester of fatty acid) standard set by Department of Energy Business, Ministry of Energy, Thailand.

Keywords: Biodiedel, Methyl ester, Microwave, Palm oil, Transesterification

[1] นิสิตปริญญาโท, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, มหาสารคาม, 44150
[2] รองศาสตราจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, มหาสารคาม, 44150
[3] ผู้ช่วยศาสตราจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, มหาสารคาม, 44150
[1] Master Degree, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Maha Sarakham, 44150
[2] Associate Professor, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Maha Sarakham, 44150
[3] Assistant Professor, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Maha Sarakham, 44150
* Corresponding author, e-mail: jindaporn.msu@gmail.com

บทนำ

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) ทั้งนี้ในแผนการพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579 กำหนดเป้าหมายการใช้ไบโอดีเซลที่ 14 ล้านลิตร/วัน ภายในปี 2579 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2558)

ไบโอดีเซล (Biodiesel) เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือกที่ผลิตได้จากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ผ่านปฏิกิริยาเคมีที่เรียกว่า “ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน” ซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิที่เหมาะสม ได้ผลผลิตหลักออกมาเป็น “แอลคิลเอสเทอร์ (ไบโอดีเซล)” และได้กลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้ (สุห์ดี นิเซ็ง, 2563) โดยในทางทฤษฎีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันคือ 3:1 (Figure 1)

Figure 1 Transesterification reaction
ที่มา: Ma & Hanna, 1999

เนื่องจากไบโอดีเซลเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่ผลิตจากวัสดุชีวภาพ ดังนั้นจึงไม่ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม ไบโอดีเซลสามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่ต้องปรับแต่ง อีกทั้งยังช่วยรักษาสภาพเครื่องยนต์ให้ใช้งานได้นานกว่า เนื่องจากออกซิเจนในไบโอดีเซลจะช่วยให้การสันดาปที่สมบูรณ์กว่าน้ำมันดีเซล (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2553) สำหรับน้ำมันที่สามารถนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซลนั้นจะมีสมบัติเบื้องต้นและราคาที่แตกต่างกันไป ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิต โดยจะนิยมใช้น้ำมันที่ต่างกันตามศักยภาพของแต่ละพื้นที่ เช่น ประเทศสหรัฐอเมริกานิยมใช้ถั่วเหลืองซึ่งมีการปลูกเป็นจำนวนมาก ยุโรปนิยมใช้เมล็ดเรพและเมล็ดทานตะวัน สำหรับประเทศไทยนิยมใช้น้ำมันที่ได้จากปาล์มน้ำมันเนื่องจากมีการปลูกในโซนภาคใต้ของประเทศเป็นจำนวนมาก สมบัติของน้ำมันประเภทต่างๆ แสดงไว้ใน Table 1

Table 1 Properties of various vegetable oil

Oil	Specific gravity (at 21°C)	Viscosity (at 21°C) (cSt)	Calorific value (kJ/kg)
Soybean	0.918	57.2	39,350
Sun flower	0.918	60.0	39,490
Coconut	0.915	51.9	37,540
Peanut	0.914	67.1	39,470
Palm	0.898	88.6	39,550
Palm seed	0.904	66.3	37,720
Jatropha seed	0.915	36.9 (at 38°C)	39,000
Diesel	0.845	3.8	46,800

ที่มา: (ชานนท์ โพธิ์เจริญ, 2550)

โดยทั่วไปในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมักจะใช้เมทานอลเป็นสารทำปฏิกิริยาเนื่องจากสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีและราคาย่อมเยา ในส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้คือตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดด่าง เพราะสามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาได้เป็นอย่างดี และตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดด่างที่นิยมใช้ ได้แก่ โซเดียมไฮดร็อกไซด์ (NaOH) และโพแทสเซียมไฮดร็อกไซด์ (KOH) เนื่องจากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่จำเป็นต้องใช้ความร้อน โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ จุดเดือดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ ซึ่งตามปกติแล้วมักให้ความร้อนกับระบบด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Electrical heater) อย่างไรก็ตามการให้ความร้อนด้วยวิธีดังกล่าวต้องใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่นาน จึงได้มีการศึกษาวิจัยในการนำคลื่นรังสีประเภทต่างๆ มาประยุกต์ใช้เพื่อลดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา เช่น ไมโครเวฟ อัลตราโซนิก และอินฟราเรด เป็นต้น (Nezihe & Aysegul, 2008)

คลื่นรังสีไมโครเวฟ หมายถึง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่อยู่ในช่วง 0.3-300 กิกะเฮิรตซ์ (GHz) และความยาวคลื่น 1 เมตร ถึง 1 มิลลิเมตร คลื่นรังสีไมโครเวฟมีคุณสมบัติเป็นกลุ่มและมีความเป็นแม่เหล็กไฟฟ้าในทาง

ตรงข้ามกับคลื่นแสง (ส่วนหนึ่งของแสงเลเซอร์) คลื่นรังสีไมโครเวฟจะประพฤติตัวอยู่ในกฎของแสงและสามารถเคลื่อนที่ ดูดซับหรือสะท้อนกลับ การนำรังสีไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ในการกระบวนการผลิตไบโอดีเซลนั้น สามารถใช้เครื่องไมโครเวฟโดยทั่วไปมาดัดแปลงโดยการเจาะรูด้านบนติดตั้งคอนเดนเซอร์เพื่อให้ไอที่ลอยออกไปเกิดการควบแน่นแล้วตกลงมา เป็นการป้องกันเมทานอลหรือไบโอดีเซลไม่ให้ระเหยออกไป (Chen *et al*., 2014) โดยทั่วไปการแผ่รังสีไมโครเวฟจะไปกระตุ้นโมเลกุลไอออนโดยการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้โมเลกุลหรือไอออนมีขั้วเกิดการหมุนอย่างรวดเร็วและเกิดความร้อนต่อเนื่องจากแรงเสียดทาน

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาวิจัยในการนำรังสีไมโครเวฟมาใช้ในการช่วยเร่งกระบวนการผลิตไบโอดีเซล เช่น (ปรเมษฐ์ สิทธิสันติ์, 2553) ได้ทำการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลแบบไหลต่อเนื่องโดยใช้เครื่องไมโครเวฟตามบ้านเรือน โดยการนำสบู่ดำมาทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันต่อด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันต่อเมทานอล 1:10.2 เวลาในการทำปฏิกิริยา 31 วินาที และใช้โซเดียมไฮดร็อกไซด์ความเข้มข้น 1.3% โดยน้ำหนัก เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากผลการศึกษาพบว่า ได้ปริมาณผลได้ของไบโอดีเซล 96.5% และไบโอดีเซลที่ได้มีจุดขุ่น 4°C จุดไหลเท 1°C ความหนืด 4.2 cSt จุดวาบไฟ 154°C และค่าความร้อน 37.76 kJ/g ซึ่งสมบัติของไบโอดีเซลที่ได้สอดคล้องตามมาตรฐานไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ที่กรมธุรกิจพลังงานกำหนด

สำหรับน้ำมันสบู่ดำ ยังได้มีการศึกษาการนำไมโครเวฟ 800 วัตต์ มาใช้ในการช่วยเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 7.5:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา โพแทสเซียมไฮดร็อกไซด์ 1.5% เปรียบเทียบกับกรณีการให้ความร้อนด้วยวิธีดั้งเดิมซึ่งควบคุมอุณหภูมิที่ 65°C จากผลการศึกษา พบว่า ไมโครเวฟสามารถช่วยลดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 150 นาที เป็น 2 นาที (Shakinaz *et al*., 2010)

นอกจากนี้ยังได้มีการนำไมโครเวฟ 600 วัตต์ มาช่วยเพิ่มผลผลิตไบโอดีเซลในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันใช้แล้วโดยมีเถ้าถ่านหินดัดแปลง (Modified coal fly ash) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การศึกษาครั้งนี้พบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 9.67:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านหินดัดแปลง 3.99% และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 1.5 ชั่วโมง ทำให้ได้ปริมาณผลได้ของไบโอดีเซลสูงสุดที่ 94.91% และเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมาใช้ซ้ำ 8 ครั้ง พบว่า ปริมาณผลได้ของไบโอดีเซลยังคงมากกว่า 90% (Xiang & Wang, 2017)

นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษารวบรวมผลงานวิจัยเกี่ยวกับการนำไมโครเวฟมาช่วยในการเร่งปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ซึ่งพบว่า เพื่อให้ได้ปริมาณผลได้ของไบโอดีเซลสูงสุด ช่วงสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา ได้แก่ กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ 300-700 วัตต์ อุณหภูมิ 55-65 °C เวลาตอบสนอง 1-7 นาที และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (NaOH หรือ KOH) 1-1.3% โดยน้ำหนัก (Khedri *et al*., 2019)

วัตถุประสงค์

1. พัฒนาและทดสอบเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟสำหรับการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง

2. ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณผลได้และสมบัติของไบโอดีเซล

วัสดุอุปกรณ์การวิจัย

Figure 2 Microwave reactor for producing continuous flow biodiesel

สำหรับงานวิจัยนี้ เครื่องผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ความร้อนจากไมโครเวฟได้พัฒนามาจากเครื่องไมโครเวฟที่ใช้ตามบ้านเรือนทั่วไป โดยทำการติดตั้งท่อแก้วขดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร ความยาว 150 เซ็นติเมตร และขดทำมุม 20 องศา โดยเครื่องไมโครเวฟนี้สามารถปรับกำลังไฟฟ้าได้ 4 ระดับคือ 90, 360, 600 และ 800 วัตต์ และมีความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าตามความถี่ ดังแสดงใน Table 2

Table 2 Power density of microwave at different frequencies

Frequency (MHz)	Power density (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 (บัณฑิต โรจน์อารยานนท์, 2559)

น้ำมันปาล์มยี่ห้อมรกต เมทานอลความบริสุทธิ์ 99% (QRëC) และโพแทสเซียมไฮดร็อกไซด์ (UNIVAR)

วิธีการวิจัย

ขั้นตอนและกระบวนการทดลอง

1. ชั่งน้ำมันปาล์ม 200 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร แล้วอุ่นน้ำมันปาล์มให้ได้อุณหภูมิเริ่มต้นตามกำหนด จากนั้นนำโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ใส่ลงในเมทานอลตามสัดส่วนที่กำหนด (1% โดยน้ำหนัก) แล้วกวนผสมให้เข้ากัน เป็นเวลา 2 นาที เพื่อให้เกิดเป็นสารละลายเมท็อกไซด์

2. เปิดปั๊มซึ่งควบคุมการไหลโดยการปรับกระแสแรงดันที่จ่ายให้กับปั๊ม (Power supply DC) เพื่อป้อนสารตั้งต้น (น้ำมันปาล์มและสารละลายเมท็อกไซด์) ให้ไหลไปตามท่อทางผ่านท่อปฏิกรณ์คอยล์แก้วที่อยู่ภายในห้องปฏิกรณ์ไมโครเวฟเพื่อทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน จากนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จะไหลออกมาตามท่อทางออก ไปรวมกันที่ภาชนะรองรับเพื่อรอทำการแยกเมทิลเอสเทอร์ออกจากผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ก่อนนำเมทิลเอสเทอร์ไปผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ต่อไป (Figure 3)

3. นำไบโอดีเซลที่ได้ไปล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อกำจัดสารเคมีที่ตกค้าง โดยใช้น้ำกลั่นปริมาตร 100-200 ml กวนเพื่อให้น้ำเข้าไปล้างน้ำมันเป็นเวลา 20 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการแยกตัว เทส่วนน้ำออก จากนั้นจึงนำส่วนผลิตภัณฑ์ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100-120°C เป็นเวลา 5 นาที เพื่อระเหยน้ำที่คงค้างออก

4. นำผลิตภัณฑ์เก็บในขวดใส่สาร แล้วชั่งน้ำหนักเพื่อหาปริมาณผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ตาม Table 3

5. ทำการทดลองซ้ำตามการออกแบบการทดลองใน Table 4 โดยทำการทดลองสภาวะละ 2 ซ้ำ

Figure 3 Biodiesel production process

Table 3 Standard of biodiesel (methyl ester of fatty acid) set by Department of Energy Business, Ministry of Energy, Thailand

No.	Properties	Ranges		Test methods
1	Methyl ester (%wt)	Not less than	96.5	EN 14103
2	Density at 15 °C (kg/m3)	Not lower than and higher than	860 900	ASTM D 1298
3	Viscosity at 40 °C (CSt)	Not lower than and higher than	3.5 5.0	ASTM D 445
4	Flash point (°C)	Not lower than	120	ASTM D 93
5	Oxidation Stability at 110 °C (hr)	Not less than	10	EN 15751
6	Cloud point	Not higher than	16	ASTM D 2500
7	Pour point	Not higher than	10	ASTM D 97

ที่มา: (ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน, 2556)

Table 4 Experimental design

Lab. No.	Factors		
	Microwave power (W)	Time (min)	Initial temperature (°C)
1	600	1	60
2			80
3		2	60
4			80
5	800	1	60
6			80
7		2	60
8			80

แผนการทดลอง

การศึกษานี้วางแผนการทดลองแบบ Factorial in CRD ในวิธีการศึกษา โดยวิเคราะห์ทางสถิติแบบ Two-way analysis of variance วิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธีการใช้โปรแกรม SPSS และกำหนดค่าความเชื่อมั่นทางสถิติที่ $p<0.05$ ดังปรากฏใน Table 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลด้วยเตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟชนิดไหลอย่างต่อเนื่องโดยใช้น้ำมันปาล์มและเมทานอล โดยมีโพแทสเซียมไฮดร็อกไซด์ (KOH) ร้อยละ 1 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของ 3 ปัจจัย (กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และอุณหภูมิเริ่มต้น) ที่มีต่อร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ และได้ทดสอบสมบัติต่างๆ ของเมทิลเอสเทอร์ (ไบโอดีเซล) ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาที่สภาวะต่างๆ ได้ข้อมูลดังแสดงใน Table 5

Table 5 Yield of methyl ester at different transesterification conditions

No.	Factors			ME yield
	Microwave power (W)	Time (min)	Initial temperature (°C)	Average
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% ($p<0.05$)

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยใช้โปรแกรม SPSS วิเคราะห์ความแตกต่างของของค่าเฉลี่ยด้วยวิธีนำข้อมูลป้อนใส่โปรแกรม SPSS หาค่าเฉลี่ยที่ได้ออกมาเป็น a,b,c,d และกำหนดความเชื่อมั่นทางสถิติที่ $p>0.05$

อิทธิพลของกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ

ในการศึกษานี้ได้ใช้กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ 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 สำหรับงานวิจัยนี้ พบว่า การเพิ่มกำลังไฟฟ้าจาก 600 วัตต์ เป็น 800 วัตต์ ทำให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p>0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องจากว่า กำลังไฟฟ้าทั้งสองระดับมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

อิทธิพลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

เมื่อพิจารณาระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา พบว่า การเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 1 นาที เป็น 2 นาที ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากว่า การเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาส่งผลให้สารทำปฏิกิริยาอยู่ในไมโครเวฟเป็นระยะเวลาที่นานขึ้น ทำให้เกิดการทำปฏิกิริยาที่สมบูรณ์มากขึ้น ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์สูงขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Shakinas *et al*. (2010) ซึ่งเป็นการศึกษาการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม โดยใช้ไมโครเวฟ 300-700 วัตต์ ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 และ 1.3% ซึ่งพบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 1 นาที เป็น 7 นาที ทำให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มจาก 90.04% เป็น 98.85%

อิทธิพลของอุณหภูมิเริ่มต้น

อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาถือเป็นหนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ซึ่งในทางทฤษฎี (Hong *et al*., 2016) อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจาก 40 องศาเซลเซียส เป็น 70 องศาเซลเซียส ทำให้ผลได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจาก 83.5% เป็น 94.9% การใช้อุณหภูมิที่สูงมากมักส่งผลให้การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเปลี่ยนเป็นละอองไม่สามารถทำปฏิกิริยาต่อน้ำมัน เนื่องจากอุณหภูมิเริ่มต้นที่สูงเกินไป (Chen *et al*., 2014.)

สำหรับในงานวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา แต่ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิเริ่มต้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (60 และ 80 องศาเซลเซียส) ซึ่งจากผลการทดลองในตาราง 5 พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิเริ่มต้นจาก 60 เป็น 80 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ปริมาณผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ลดลงจากร้อยละ 77.14-86.31 เป็นร้อยละ 76.70-80.48 ทั้งนี้อาจเนื่องจากว่าอุณหภูมิที่สูงจะส่งผลกระทบต่อการระเหยของแอลกอฮอล์ ซึ่งจุดเดือดของแอลกอฮอล์ (เมทานอล) อยู่ที่ 64.5°C

สมบัติของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ

จากการเพิ่มกำลังไฟฟ้า 600 เป็น 800 วัตต์ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 1 นาที เป็น 2 นาที และใช้อุณหภูมิ

ตั้งต้น 60°C ส่งผลให้ค่าคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลเป็นไปตามที่กรมธุรกิจพลังงานกำหนด เมื่อนำน้ำมันไบโอดีเซลหรือเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากทุกสภาวะการทดลองไปทดสอบสมบัติเบื้องต้น ดังแสดงใน Table 6 พบว่าค่าความหนืด ความหนาแน่น จุดขุ่น จุดไหลเท และเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 °C มีค่าอยู่ในช่วง 4.22 - 5.84 CSt, 854.77 - 884.23 kg/m^3, 140.5 - 169°C, 16.78 - 19.83%, 14.5 - 15°C, 7 - 8°C และ 9.26 - 25.20 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าความหนืดและค่าเสถียรภาพต่อการเกิดออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 °C ในบางสภาวะการทดลองมีค่าสูงกว่าเกณฑ์เล็กน้อย ในขณะที่สมบัติอื่นๆ เป็นไปตามมาตรฐานลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน ที่กรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงานกำหนด

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาผลการผลิตไบโอดีเซลที่พัฒนาขึ้น สามารถผลิตไบโอดีเซลได้ในปริมาณสูงสุด 34.94 มิลลิลิตรต่อนาที การเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาส่งผลให้ปริมาณผลได้ของเมทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิเริ่มต้นในการทำปฏิกิริยาส่งผลให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ลดลง และกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟไม่ได้ส่งผลกระทบต่อร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์อย่างมีนัยสำคัญ โดยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทำปฏิกิริยา คือ กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ 800 วัตต์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 นาที และอุณหภูมิเริ่มต้น 60 องศาเซลเซียส ซึ่งจะได้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงสุดเท่ากับร้อยละ 86.31

Table 6 Properties of methyl ester obtained from different transesterification conditions

Factors			Properties of methyl ester						
Microwave power (W)	Time (min)	Initial temperature (°C)	Viscosity (cSt)	Desity (kg/m^3)	Flash point (°C)	Cloud point (°C)	Pour point (°C)	Oxidation Stability (hr.)	Calorific value (Cal/g)
600	1	60	4.22±0.02^{a}	884.23±0.03^{a}	169±1.0^{g}	15±0.0^{a}	7.5±0.5^{a}	25.20±0.96^{e}	9,459.78^{bc}
		80	4.25±0.01^{a}	854.77±0.02^{b}	156±0.0^{d}	14.5±0.5^{a}	8±0.0^{a}	18.87±0.99^{d}	9,420.25^{bc}
	2	60	4.54±0.02^{a}	861.69±0.02^{e}	165.5±0.5^{f}	15±0.0^{a}	7.5±0.5^{a}	15.19±1.35^{b}	9,406.29^{bc}
		80	4.35±0.05^{a}	868.85±0.03^{f}	140.5±0.0^{a}	14.5±0.5^{a}	8±0.0^{a}	19.020.92^{d}	9,314.51^{ab}
800	1	60	5.11±0.13^{b}	873.92±0.02^{h}	145±0.0^{c}	14.5±0.5^{a}	7.5±0.5^{a}	10.00±0.43^{a}	9,520.48^{c}
		80	5.26±0.08^{bc}	861.35±0.02^{d}	164±0.0^{e}	15±0.0^{a}	8±0.0^{a}	9.26±1.21^{a}	9,235.65^{a}
	2	60	5.78±0.08^{d}	861.25±0.03^{c}	143±0.0^{b}	14.5±0.5^{a}	7±0.0^{a}	18.13±0.42^{d}	9,422.65^{bc}
		80	5.84±0.63^{cd}	872.33±0.02^{g}	143±0.0^{b}	14.5±0.5^{a}	7±0.0^{a}	17.16±0.65^{c}	9,498.19^{c}

* หมายเหตุ ตัวอักษรที่แตกต่างกันในสดมภ์เดียวกัน คือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p<0.05$)

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงพลังงาน. (2561). *แผนบริหารจัดการน้ำมันเชื้อเพลิง พ.ศ. 2561-2580*. กระทรวงพลังงาน.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2558). *แผนการพัฒนาพลังงานทดแทนและทางเลือก พ.ศ. 2558-2579*. กระทรวงพลังงาน.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2553). *คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน*. กระทรวงพลังงาน.

ชานนท์ โพธิ์เจริญ. (2550). *การพัฒนาเครื่องผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสบู่ดำขนาดเล็กโดยการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ. วท.ด.* มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

บัณฑิต โรจน์อารยานนท์. (2559). *วิศวกรรมไมโครเวฟ*. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน. (2556). *กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันไบโอดีเซล*. กระทรวงพลังงาน.

ปรเมษฐ์ สิทธิสันติ์. (2553). *การผลิตไบโอดีเซลแบบกึ่งต่อเนื่องจากกระบวนการทรานเอสเตอริฟิเคชันของน้ำมันสบู่ดำที่มีการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ*. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สุห์ดี นิเซ็ง. (2563). *การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันในน้ำเสียชุมชน เทศบาลเขารูปช้าง จังหวัดสงขลา*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย.

Chen, G., Shan, R., Shi, J., & Yan, B. (2014). Ultrasonic-assisted production of biodiesel from transesterification of palm oil over ostrich eggshell-derived CaO catalysts. *Bioresource Technology, 171*, 428-32.

Choedkiatsakul., I., K. Ngaosuwan, S. Assabumrungart., S. Mantegna, and G. Cravotto. (2015). *Biodiesel production in a novel continuous flow microwave reactor*. *Renewable Energy, 83*, 25-29. Doi:10.1016/j.renene.2015.04.012.

Hong, I., Jeon, H., Kim, H. & Lee, S. (2016). Preparation of waste cooking oil baser biodiesel using microwave irradiation energy. *J. Ind. Eng. Chem, 42*, 107-112.

Nezihe, A. & Aysegul, D. (2008). Microwave assisted transesterification of repe seed oil. *Fuel, 87* (10-11), 1781-88.

Khedri, Behzad, Mostafaei, M. & Ardebili, S. (2019). A review on microwave-assisted biodiesel production. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects,* 41 (19), 2377-95.

Ma, F. & Hanna, M.A. (1999). Biodiesel production: A review. *Bioresource Technology, 70*, 1-15. https://doi.org/10.1016/S0960-8524 (99) 00025-5.

Shakinaz, A.El. Sherbiny, Ahmed, A. Refaat, & Shakinaz, T. & El Sheltawy. (2010). Production of Biodiesel Using the Microwave Technique. *Journal of Advanced Research, 1* (4), 309-14.

Xiang, Y., Yukun X., & Lipeng, W. (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.