Research Article
Journal of Advanced Development in Engineering and Science
Vol. 14 ● No. 39 • January - April 2024

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเหลือทิ้งโดยใช้ถ่านเปลือกส้มโอที่เคลือบด้วย KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

Biodiesel Production from Used Oils with Char Based Catalyst from Pomelo Peel Impregnated with KOH as a Catalyst

เอกราชันย์ ไชยชนะ[1,2] ธนัญญา เสาวภาคย์[1,2] กัญจน์รัตน์ สุขรัตน์[1,2]
ชลสิทธิ์ ขันทอง[1] ตฤณ ปฐมนิธิภิญโญ[2] และ อดิศักดิ์ จตุรพิรีย์[1,2]*
Ekrachan Chaichana[1,2], Thannunya Saowapark[1,2], Kanrat Sukrat[1,2],
Chonlasit Khanthong[1], Trin Pathomnithipinyo[2]
and Adisak Jaturapiree[1,2]*

Received: 15 July 2023
Revised: 16 November 2023
Accepted: 27 January 2024

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้จะเป็นการนำถ่านที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสเปลือกส้มโอมาใช้ประโยชน์ด้วยการนำมาเป็นตัวรองรับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) แล้วนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชัน โดยศึกษาปัจจัยต่างๆคืออัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันต่อเมทานอล อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาระบบ (เอกพันธุ์และวิวิธพันธุ์) และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันต่อเมทานอลที่ดีที่สุดเป็น 1:6 อุณหภูมิที่ใช้เป็น 60 $^{\circ}$C เวลา 1 ชั่วโมง ในระบบตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์ที่มีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักให้ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดเป็น 90.01 ส่วนในระบบตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ที่มีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เคลือบฝังอยู่บนตัวรองรับถ่านที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสเปลือก

[1]ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม นครปฐม ประเทศไทย 73000
[1]Department of chemistry, Faculty of science and technology, Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom, Thailand 73000
[2]ศูนย์วิจัยวัสดุธรรมชาติและผลิตภัณฑ์จากวัสดุธรรมชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม นครปฐม 73000
[2]Research Center of Natural Materials and Natural Products, Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom, Thailand 73000
*ผู้นิพนธ์ประสานงาน (Corresponding author) e-mail:adisak@webmail.npru.ac.th

ส้มโอที่มีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เคลือบอยู่ปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนักให้ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดเพียง 87.38 แต่อย่างไรก็ตามตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์นั้นจะมีความเหมาะสมในการผลิตจริงมากกว่าเนื่องจากสามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกมาจากระบบได้ง่ายกว่า ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำไบโอดีเซลที่ผลิตจากระบบตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ที่มีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักไปวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่อง GC-MS พบว่าไบโอดีเซลที่ได้ประกอบด้วยเมทิลเอสเตอร์หลายชนิด ได้แก่ methyl oleate, methyl palmitate, methyl stearate, metyl palmitelaidate และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานไบโอดีเซลพบว่าไบโอดีเซลที่ได้นี้มีสมบัติต่างๆ ได้แก่ ความหนาแน่น ความหนืด จุดวาบไฟ ค่าความเป็นกรด เป็นไปตามมาตรฐานของยุโรป (EN 14214) และมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงานกระทรวงพลังงาน

คำสำคัญ: ถ่านชาร์ ไพโรไลซิส เปลือกส้มโอ ไบโอดีเซล ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์

ABSTRACT

This research utilizes pomelo peel char obtained from the pyrolysis process as a catalytic support for KOH by introducing it into the biodiesel production from the used oils via the tranesterification. Various parameters were studied including the ratio of methanol and used oil, temperature,time, amounts of catalysts, and types of catalytic systems (homogeneous and heterogenous). It was found that the optimized condition for the production was at the oil to methanolratioof 1:6, 60°C, 1 hour and 2 wt.% KOH with the homogeneous system, giving the highest biodiesel yield of 90.01 %. For the heterogeneous system, the highest yield was obtained with 4 wt.% KOH of catalyst, giving biodiesel yield of 87.38 %. Nevertheless, the heterogeneous catalysts are more suitable for practical production due to easier catalyst separation. Therefore, the chemical components of the biodiesel produced from the heterogeneous catalysts with 4 % wtKOH was then analyzed with the GC-MS for its chemical composition, which included methyl oleate, methyl palmitate, methyl stearate, metyl palmitelaidate. In addition, this biodiesel had the properties i.e. density, viscosity, flash point and acidity meeting the European standard of biodiesel (EN 14214) and the standard of the Department of Energy Business, Ministry of Energy.

Keywords: char; pyrolysis; pomelo skin; biodiesel; heterogeneous catalyst

บทนำ

ไบโอดีเซลเป็นสารประกอบโมโนอัลคิลเอสเตอร์ (Mono-Alkyl Ester) ซึ่งเป็นผลผลิตจากการนำน้ำมันจากพืชหรือไขมันสัตว์ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทไตรกลีเซอไรด์มาทำปฏิกิริยาที่เรียกว่าทรานเอสเทอริฟิเคชัน (Transesterifcation) กับแอลกอฮอล์ (Alcohol) และมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดหรือเบสซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าว

นอกจากจะได้ผลผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เอสเทอร์ (Ester) แล้วยังได้ผลิตภัณฑ์พลอยได้เป็นกลีเซอรอล (Glycerol) อีกด้วย (สมการ 1) ไบโอดีเซลสามารถผลิตทั้งจากน้ำมันพืชและไขมันสัตว์ เช่นปาล์ม มะพร้าว ถั่วเหลือง ทานตะวัน เมล็ดเรพ สบู่ดำ สาหร่าย น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ที่ใช้แล้ว เป็นต้น [1, 2] น้ำมันพืชใช้แล้วเป็นวัตถุดิบที่น่าสนใจสำหรับนำมาผลิตเป็นไบโอดีเซลเนื่องจากมีราคาที่ต่ำกว่าเกือบ 4 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันจากพืชน้ำมัน เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง เป็นต้น [3] เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของไบโอดีเซลที่ได้จากพืชชนิดต่างๆ เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง กับน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วพบว่ามีสมบัติใกล้เคียงกัน [4, 5] ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลนั้นมีปัจจัยหลายๆอย่างที่ส่งผลต่อปริมาณและคุณภาพของน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้ [6, 7] อาทิเช่น อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันต่อแอลกอฮอล์ซึ่งจะมีการศึกษาอัตราส่วนน้ำมันต่อแอลกอฮอล์ตั้งแต่ 1:3 - 1:24 ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ตั้งแต่ 0.2 – 9% โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักของน้ำมัน อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาตั้งแต่ 30 - 120 $^{\circ}$C และเวลาตั้งแต่ 0.5 – 3 ชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้ปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชันนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทได้แก่ เอกพันธุ์ วิวิธพันธุ์และเอนไซม์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในขณะนี้ได้แก่การใช้ตัวเร่งแบบเอกพันธุ์ที่มีสถานะเช่นเดียวกันกับสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์มีสมบัติเป็นเบส ได้แก่โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ระบบการเร่งปฏิกิริยาแบบนี้จะมีข้อดีที่สารที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีราคาถูกและสามารถเร่งปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว แต่มีข้อเสียที่กระบวนการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากระบบทำได้ยากและผลิตภัณฑ์ที่ได้ต้องล้างด้วยน้ำปริมาณมาก [3] ดังนั้นในปัจจุบันได้มีนักวิจัยหลายๆท่านพยายามที่จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์เนื่องจากสามารถแยกออกจากระบบได้ง่ายกว่า เช่นถ่านกัมมันต์จากไม้ [8] โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่เคลือบบนถ่านที่ได้จากเปลือกถั่ว [9] อะลูมินาที่เคลือบอยู่บนซิงค์อ๊อกไซด์ (ZnO) [10] ซีโอไลท์ [11] เป็นต้น

กระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนหนึ่งที่จะนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ด้วยการให้ความร้อนในสภาวะปลอดแก๊สออกซิเจนเพื่อเปลี่ยนวัสดุชีวมวลนั้นให้กลายผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด ได้แก่ แก๊ส น้ำมันชีวภาพ และถ่านชาร์ โดยผลิตภัณฑ์หลักที่ต้องการจะเป็นน้ำมันชีวภาพ ส่วนแก๊สและถ่านชาร์จะเป็นเพียงผลพลอยได้ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีการวิเคราะห์สมบัติของถ่านชาร์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสพบว่ามีผิวขรุขระ พื้นที่ผิวสูงและมีรูพรุน ดังนั้นจึงมีงานวิจัยหลายๆงานที่พยายามนำถ่านชาร์ที่ได้จากกระบวนไพโรไลซิสวัสดุชีวมวลไปใช้ประโยชน์ [12] อาทิเช่น ปุ๋ยสารดูดซับสีและโลหะหนัก ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ วัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับการนำไปเป็นตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยานั้นก็มีการใช้ในหลายๆปฏิกิริยา [13] เช่น ปฏิกิริยาไพโรไลซิสสำหรับผลิตน้ำมันชีวภาพ ปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชันในการผลิตไบโอดีเซล กระบวนผลิตสารสำคัญจากชีวมวล เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้จะเป็นการนำมาถ่านชาร์ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสเปลือกส้มโอซึ่งผู้วิจัยได้ทำมาก่อนหน้านี้ [14] มาใช้ประโยชน์ด้วยการนำมาเป็นวัสดุรองรับของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ผ่านวิธีการเคลือบผิวและนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในรูปแบบตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (ต่างวัฏภาค) ด้วยปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชัน

$$\text{Triglycerides} + 3\ \text{AlcoholAlkyl} \xrightarrow[\text{catalyst}]{} \text{ester(biodiesel)} + \text{Glycerol} \qquad (1)$$

วิธีดำเนินการวิจัย

1.การเตรียมน้ำมันใช้แล้ว

นำน้ำมันใช้แล้วมากรอง ต้มไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาทีจากนั้นนำไปวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระ (Free fatty acid value, %FFA) โดยค่า %FFA ของน้ำมันนั้นต้องน้อยกว่า 3% จึงจะนำมาใช้ผลิตไบโอดีเซลต่อไปได้ เนื่องจากในกรณีที่ค่า %FFA มีค่ามากกว่า 3 จะทำให้ปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชันเกิดขึ้นได้ยาก [15]

2.การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาในงานวิจัยนี้จะแบ่งเป็น 2 ประเภทได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์ ได้แก่ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โดยก่อนนำมาใช้ผลิตไบโอดีเซลนั้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะต้องถูกนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น (Desiccator) เป็นเวลาอย่างน้อย 1 สัปดาห์ ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์จะเตรียมขึ้นโดยเริ่มจากการเตรียมสารละลายซึ่งจะเป็นการนำโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 10 กรัมมาละลายในน้ำ 15 มิลลิลิตร จากนั้นนำถ่านเปลือกส้มโอที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส [14] จำนวน 10 กรัมไปแช่ในสารละลายที่อุณหภูมิห้อง ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสจนแห้ง จากนั้นนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อรอการใช้งานต่อไป จากการเตรียมข้างต้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จะเป็น KOH เคลือบฝังอยู่บนผิวถ่านเปลือกส้มโอจากอัตราส่วนการเคลือบ (impregnation ratio) ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ 1:1 ($g_{KOH}/g_{ถ่าน}$) ทำให้ KOH ที่เคลือบบนผิวถ่านคิดเป็นเป็นร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้

3.ขั้นตอนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาปัจจัยของการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลระบบและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา โดยจะเริ่มจากชั่งน้ำมันใช้แล้วจำนวน 50 กรัมเติมเมทานอลโดยให้อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่ใช้ศึกษาได้แก่ 1:3, 1:6, 1:9, 1:12 และ 1:15 เติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ศึกษาได้แก่ 0.5, 1, 1.5 และ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ KOH ต่อน้ำหนักของน้ำมันใช้แล้วใส่ลงในขวดก้นกลม หลังจากนั้นทำการรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิใช้ศึกษาได้แก่ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลาที่อุณหภูมิใช้ศึกษาได้แก่ 0.5, 1, 2 และ 3 ชั่วโมงจากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาแยกกลีเซอรอลและไบโอดีเซลออกจากกันโดยทำการกำจัดกลีเซอรอลที่ปะปนอยู่ในไบโอดีเซลด้วยน้ำอุ่นอุณหภูมิประมาณ 40 องศาเซลเซียสแล้วทำการแยกน้ำกับไบโอดีเซลออกจากกันโดยใช้กรวยแยกกรองไบโอดีเซลที่ได้แล้วนำไปต้มไล่ความชื้นที่ 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที เก็บผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขวดที่มีฝาปิดมิดชิด

4.การวิเคราะห์หาสมบัติของไบโอดีเซล

4.1 ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซล (Biodiesel Yield, %) สามารถคำนวณจากปริมาณไบโอดีเซลที่สามารถผลิตได้จากสมการ

$$\text{ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซล}(\%) = \frac{\text{น้ำหนักไบโอดีเซล (g)}}{\text{น้ำหนักน้ำมันใช้แล้วก่อนทำปฏิกิริยา (g)}} \quad (2)$$

4.2 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพนำไบโอดีเซลที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพต่างๆเช่นความหนาแน่น) Density, ASTM D(1298, ความหนืด) Viscosty, ASTM D (445จุดวาบไฟ) Flash Point, ASTM D(93

4.3 วิเคราะห์สมบัติทางเคมีนำไบโอดีเซลที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติทางเคมีต่างๆ เช่นปริมาณของกรดไขมันอิสระ) Free fatty acid, AOAC) ค่าความเป็นกรด) Acid Value, ASTM D664) รวมทั้งวิเคราะห์องค์ประกอบของไบโอดีเซลด้วยเครื่อง GC-MS

ผลการวิจัย

ในการงานวิจัยนี้จะแบ่งผลการวิจัยเป็น 3 ส่วน ส่วนที่หนึ่งจะเป็นการศึกษาและวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากการนำ KOH ไปเคลือบบนถ่านเปลือกส้มโอ ส่วนที่สองจะเป็นการศึกษาปัจจัยต่างๆ ของการผลิตที่มีผลต่อร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้ ซึ่งได้แก่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันต่อเมทานอล อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการผลิต นอกจากนี้จะมีการศึกษาเปรียบเทียบร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้จากการผลิตระหว่างระบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผลิตขึ้นจาก KOH เคลือบบนถ่านเปลือกส้มโอกับKOH (ไม่ได้เคลือบ) ส่วนที่สามจะเป็นการนำไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากปัจจัยการผลิตที่ดีที่สุดและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา KOH เคลือบอยู่บนถ่านเปลือกส้มโอ ไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี รวมทั้งเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ได้แก่ ความหนาแน่น ความหนืด จุดวาบไฟ ค่าความเป็นกรด กับมาตรฐานไบโอดีเซลที่นิยมใช้ ได้แก่ มาตรฐานไบโอดีเซลของยุโรป (EN14241) และมาตรฐานไบโอดีเซลของกรมธุรกิจพลังงาน

1. การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

1.1 การวิเคราะห์ด้วย FTIR

เมื่อวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็น KOH เคลือบอยู่บนถ่านเปลือกส้มโอเปรียบเทียบกับถ่านเปลือกส้มโอที่ไม่ได้เคลือบด้วยเทคนิค FTIR (ภาพที่1) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็น KOH เคลือบอยู่บนถ่านเปลือกส้มโอจะปรากฏพีคแสดงหมู่ฟังก์ชันต่างๆมากกว่าและชัดเจนกว่า สำหรับพีคที่แตกต่างชัดเจนคือตำแหน่งที่ 3144 cm^{-1} ซึ่งจะเป็นหมู่ O-H stretching ของ KOH และพีคที่ 1470-1350 และ 729 เป็นพีคแสดงถึงหมู่ K-O ของ KOH ส่วนพีคที่ตำแหน่ง 1704 cm^{-1} เป็นสัญญานจาก C=O stretching vibration ในสารกลุ่มแอลดีไฮด์เอสเทอร์และคีโตนพีคที่ตำแหน่ง 1595 cm^{-1} มาจาก C=C stretching vibration ในสารกลุ่มอะโรมาติกที่มักพบในวัสดุคาร์บอนเช่นถ่านกัมมันต์ [16-17]

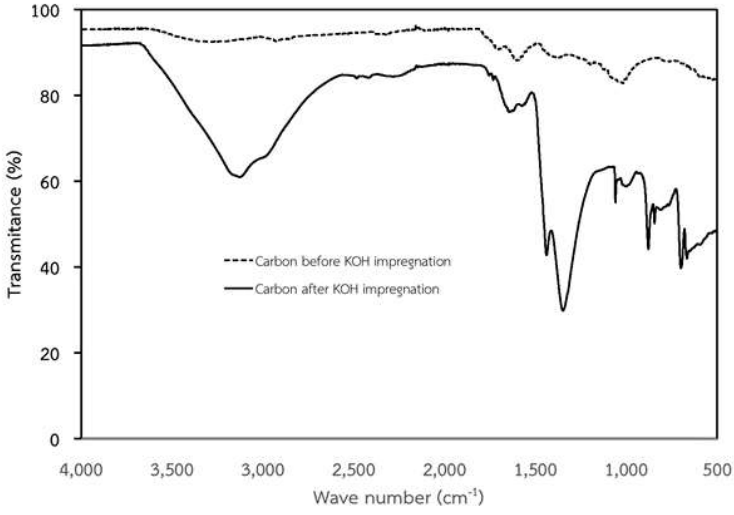

Figure 1 FTIR spectra of pomelo peel and KOH-impregnated activated carbon produced from pomelo peel

1.2 การวิเคราะห์ด้วย SEM

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลในงานวิจัยนี้เตรียมจากการเคลือบฝัง KOH ลงบนผงถ่านเปลือกส้มโอซึ่งจากการสังเกตด้วยตาพบว่าลักษณะภายนอกของถ่านยังคงเหมือนเดิมแต่เมื่อนำไปตรวจสอบด้วยเครื่อง SEM จะพบสัณฐานวิทยาของถ่านเปลือกส้มโอที่เคลือบด้วย KOH มีการเปลี่ยนแปลงดังภาพที่ 2 (a) และ (b) โดยจะเห็นลักษณะของสารหลอมเคลือบที่พื้นผิวของถ่านเมื่อตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุที่พื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิค SEM/EDX สำหรับพื้นที่ผิวที่ทำการสุ่มเลือกแสดงดังภาพที่ 2 (c) จะพบองค์ประกอบของธาตุโพแทสเซียมที่พื้นผิวตัวอย่างที่ทำการสุ่มเลือกในกรอบสี่เหลี่ยมรูป 2 (b) โดยพบว่าปริมาณโพแทสเซียมกระจายอยู่ทั่วทั้งพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

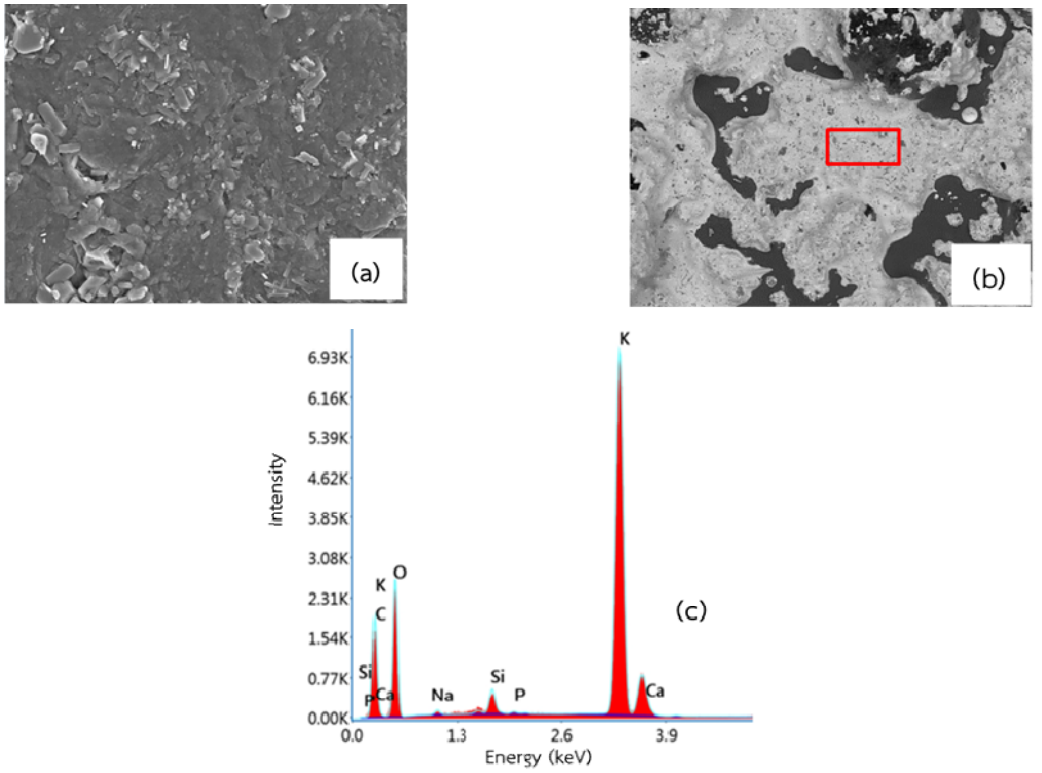

Figure 2 SEM morphology of (a) activated carbon produced from pomelo peel
(b) KOH-impregnated activated carbon produced from pomelo peel and
(c) SEM/EDX KOH-impregnated activated carbon produced from pomelo peel

2. การวิเคราะห์หาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล

ในการทดลองหาปัจจัยที่เหมาะสมนี้ ในแต่ละการทดลองจะใช้ตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่าง โดยค่าที่ได้จะถูกนำมาคำนวณค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแล้วนำไปพลอตกราฟแท่งแสดงดังภาพที่ 3-5

2.1 อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันต่อเมทานอล

อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันต่อเมทานอลเป็นปัจจัยที่สำคัญมากในการผลิตไบโอดีเซลเนื่องจากเป็นปัจจัยที่สามารถเพิ่มและลดปริมาณไบโอดีเซลที่เกิดขึ้น การทดลองนี้จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น KOH ที่ยังไม่ได้เคลือบความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยมวลของน้ำมันใช้แล้ว (2% wt KOH) เวลา 1 ชั่วโมง อุณหภูมิ 60 $^{\circ}$C ที่อัตราส่วนโดยมวลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:3, 1:6, 1:9, 1:12 และ 1:15 พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:6 มีร้อยละผลผลิตไบโอดีเซล (biodiesel yield) สูงสุดเท่ากับ 90.02

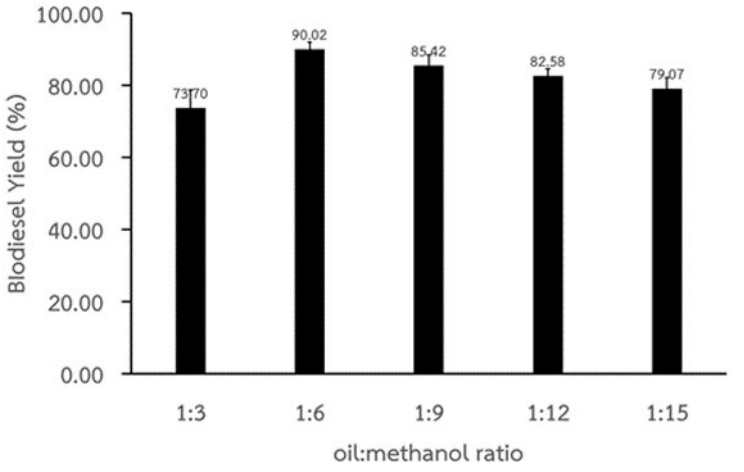

Figure 3 Effect of molar ratio of oil and methanol on biodiesel yield

2.2 อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา

อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อปริมาณของไบโอดีเซลที่ได้ ในการทดลองนี้จะใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลกับน้ำเป็น 1:6 ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น KOH ที่ยังไม่ได้เคลือบ 2% wt ที่อุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 4 ซึ่งพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมได้แก่ที่ 60 $^{\circ}$C เนื่องจากมีร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดเท่ากับ 90.15

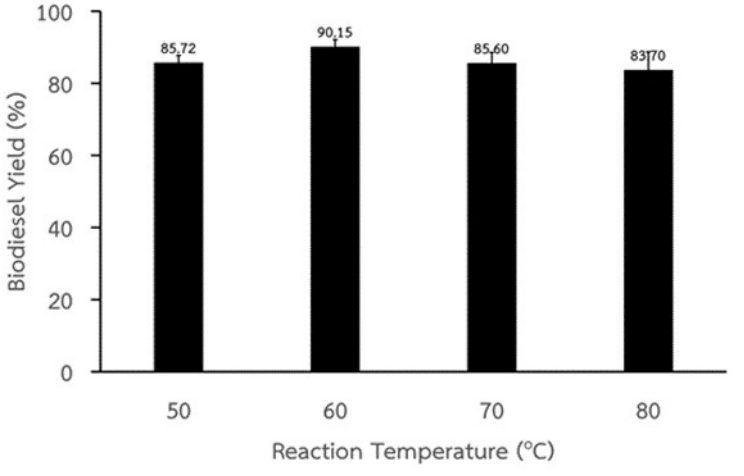

Figure 4 Effect of reaction temperature on biodiesel yield

2.3 เวลาในการเกิดปฏิกิริยา

จากการทดลองผลของเวลาที่มีต่อปริมาณการผลิตไบโอดีเซล แสดงดังภาพที่ 5 โดยในการทดลองนี้ใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันกับเมทานอลเป็น 1: 6 อุณหภูมิเป็น 60 องศาเซลเซียสตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็น 2 % wt KOHที่ไม่ได้เคลือบ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ได้แก่ 0.5, 1, 2 และ 3 ชั่วโมงพบว่าเวลาที่ใช้ในทำปฏิกิริยาได้ดีที่สุดคือเวลาประมาณ 1 ชั่วโมงเนื่องจากมีค่าร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดเท่ากับ 90.21

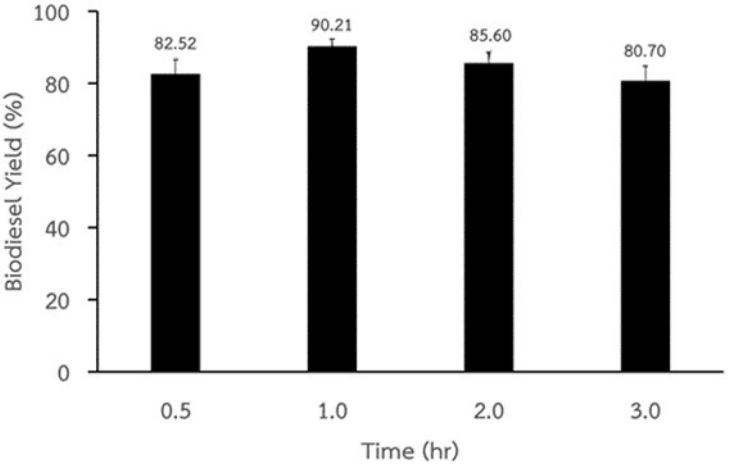

Figure 5 Effect of reaction time on biodiesel yield

จากผลการทดลองการหาปัจจัยที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดพบว่า ที่อัตราส่วนระหว่างโดยโมลของน้ำมันกับเมทานอลเป็น 1:6 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา1ชั่วโมงเป็นปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด หลังจากนั้นจะเป็นการศึกษาการนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจาก KOH เคลือบอยู่บนถ่านเปลือกส้มโอไปใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

3. ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการทดลองนี้จะพยายามใช้ประโยชน์จากถ่านเปลือกส้มโอซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเปลือกส้มโอ โดยนำมาใช้เป็นตัวรองรับของ KOH ผ่านวิธีการเคลือบผิวและนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการผลิตไบโอดีเซลในรูปแบบตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (ต่างวัฏภาค) ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ที่เตรียมได้กับระบบตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์ (สารทั้งหมดอยู่ในวัฏภาคเดียวกัน) โดยทั้งสองระบบทำการควบคุมปริมาณ KOH ให้เท่ากัน (1-5 wt% เทียบกับปริมาณน้ำมันใช้แล้ว) สำหรับตัวเร่งในระบบเอกพันธุ์จะคำนวณปริมาณ KOH ที่ใช้โดยตรงและใส่ลงไปในระบบส่วนตัวเร่งในระบบวิวิธพันธุ์ (C/KOH) นั้นจะคำนวณปริมาณ KOH โดยเทียบจากปริมาณที่คาดว่าจะมีบนผิวถ่าน ซึ่งจากการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจะใช้อัตราส่วนผสมระหว่างปริมาณถ่านเปลือกส้มโอต่อ KOH เป็น 1:1 โดยน้ำหนักทำให้บนผิวถ่านจะมีปริมาณ KOH เท่ากับ 50 wt% ดังนั้นผู้วิจัยจะใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านเปลือกส้มโอที่เคลือบ KOH ลงไปในระบบ 2 wt% เพื่อให้มีปริมาณ KOH เท่ากับ 1 wt % โดยผลการทดลองเปรียบเทียบผลของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองระบบแสดงดังภาพที่ 6

จากภาพที่ 6 พบว่าระบบตัวเร่งเอกพันธุ์ (KOH) โดยเฉลี่ยจะให้ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลสูงกว่าระบบตัวเร่งวิวิธพันธุ์ (C/KOH) อย่างไรก็ตามพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองระบบมีแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาคล้ายคลึงกันคือจะให้ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดที่ความเข้มข้น KOH ค่าหนึ่งและจะลดลงมาหลังจากนั้น โดยในระบบเอกพันธุ์ให้ค่าร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดที่ KOH เท่ากับ 2 wt% ส่วนในระบบวิวิธพันธุ์จะให้ค่าร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดที่ KOH เท่ากับ 4 wt% จะเห็นได้ว่าแม้ระบบวิวิธพันธุ์จะให้ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลต่ำกว่าระบบเอกพันธุ์เล็กน้อยโดยต้องใช้ปริมาณ KOH มากกว่าเพื่อให้ได้ปริมาณผลผลิตสูงสุด (4 wt% ต่อ2 wt%) อย่างไรก็ตามระบบวิวิธพันธุ์มีข้อดีในการคัดแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่ายช่วยลดการปนเปื้อนของผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลได้ ซึ่งระบบที่ได้ทำการศึกษาอาจจะมีการหลุดของ KOH ออกจากตัวรองรับอยู่บ้างแต่จะต่ำกว่าระบบเอกพันธุ์ที่มีการใส่ KOH โดยตรง ดังนั้นการทดลองขั้นต่อไปจะเป็นการเลือกนำไบโอดีเซลจากการผลิตได้ในระบบตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ที่ 4 % wt KOH มาวิเคราะห์องค์ประกอบ

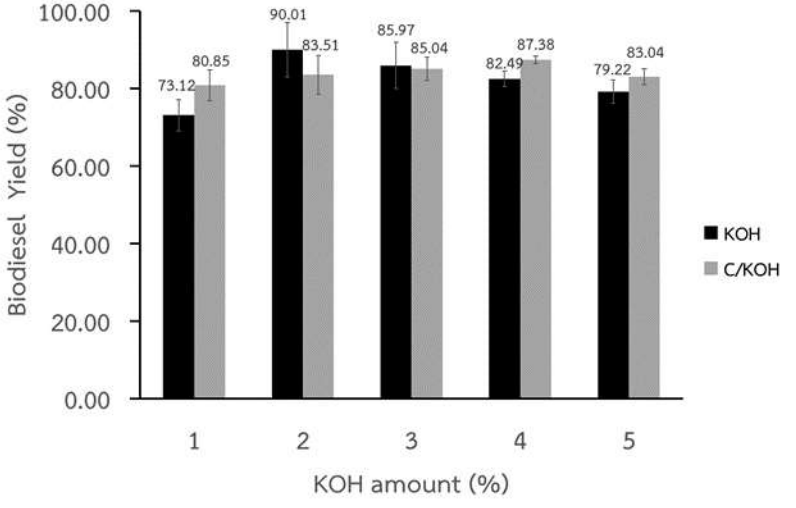

Figure 6 Effect of type and amount of catalyst on biodiesel yield

4. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของไบโอดีเซล

เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของไบโอดีเซลที่ได้จากการกระบวนผลิตด้วยระบบตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ที่ 4 % wt KOH ด้วยเครื่อง GC-MS แสดงดังตารางที่ 1 พบว่าไบโอดีเซลที่ได้มีองค์ประกอบเป็นสารหลายๆ ชนิดปนกันและสารเหล่านั้นจะเป็นสารเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมันหลายชนิด ซึ่งสามารถเรียงตามปริมาณจากมากไปน้อยตามลำดับได้ดังนี้ Methyl oleate, Methyl Palmitate, Methyl stearate, Methyl palmitelaidate, Methyl tetradacanoate, Methyl laurate ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากรดไขมันในน้ำมันใช้แล้วได้เกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชันและได้ถูกเปลี่ยนเป็นเมทิลเอสเตอร์

Table 1 Chemical composition of biodiesel

Retention time (min)	Area (%)	Compound	Chemical formula
17.66	0.07	Methyl laurate	$C_{13}H_{26}O_2$
22.05	0.57	Methyl tetradacanoate	$C_{15}H_{30}O_2$
26.29	3.92	Methyl palmitelaidate	$C_{17}H_{32}O_2$
26.76	23.77	Methyl Palmitate	$C_{17}H_{34}O_2$
30.99	64.66	Methyl oleate	$C_{19}H_{36}O_2$
31.46	7.01	Methyl stearate	$C_{19}H_{38}O_2$

5. สมบัติทางกายภาพและเคมีของไบโอดีเซล

งานวิจัยเกี่ยวกับไบโอดีเซลในปัจจุบันนอกจากจะพยายามผลิตให้ได้ปริมาณมากที่สุดหรือมีผลผลิตร้อยละสูงสุดแล้วยังต้องพยายามทำไบโอดีเซลที่ได้ให้มีสมบัติต่างๆอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ในการทดลองนี้จะนำไบโอดีเซลที่ได้จากการกระบวนผลิตด้วยระบบตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ที่ 4 % wt KOH มาทดสอบสมบัติทางกายภาพและเคมี ได้แก่ ความหนาแน่น (Density) ความหนืด (Viscosity) จุดวาบไฟ (Flash point) ค่าความเป็นกรด (Acid value) พร้อมทั้งนำค่าการทดสอบที่ได้ไปเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานไบโอดีเซลของยุโรป (EN14214) กับมาตรฐานไบโอดีเซลของกรมธุรกิจพลังงานแสดงดังตารางที่ 2 พบว่าไบโอดีเซลที่ผลิตได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

Table 2 Properties of biodiesel

	Unit	European standard (EN14214)	Department of Energy Business standard	This work
Density	kg/m^3	872-878	860-900	897
Viscosity	mm^2/s	3.5-5.0	3.5-5.0	4.25
Flash point	^oC	>101	>120	179
Acid value	mg KOH/g	Max 0.5	Max 0.5	0.49

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้เตรียมขึ้นจากงานวิจัยนี้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ที่มี KOH เคลือบอยู่บนถ่านเปลือกส้มโอ โดยเมื่อพิจารณาจากเทคนิค FTIR เปรียบเทียบระหว่างถ่านเปลือกส้มโอที่ยังไม่ได้เคลือบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากการนำ KOH ไปเคลือบบนถ่านเปลือกส้มโอ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้มีหมู่ฟังก์ชันต่างๆมากขึ้นและชัดเจนขึ้นและพบหมู่ฟังก์ชั่นที่สำคัญได้แก่หมู่ K-O นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากภาพถ่าย SEM จะพบเห็นสารเคลือบอยู่บนผิวถ่านเปลือกส้มโอและเมื่อสแกนด้วยเทคนิค EDS พบว่าสารที่เคลือบนั้นมีธาตุโพแทสเซียมเป็นองค์ประกอบ จากผลการทดลองข้างต้นจึงสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นมี KOH เคลือบอยู่ หลังจากการเตรียมและวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้แล้วจะเป็นการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการผลิต โดยปัจจัยที่ใช้ศึกษาได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันต่อเมทานอล

อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งในการศึกษาปัจจัยต่างๆ เหล่านี้จะใช้ระบบตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์ (สารทั้งหมดอยู่ในวัฏภาคเดียวกัน) โดยใช้ตัวเร่งเป็น KOH พบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของเมทานอลร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งถึงอัตราส่วน 1:6 หลังจากนั้นจะลดลง ซึ่งผลดังกล่าวน่าจะเกิดขึ้นเนื่องจากเมื่อในปฏิกิริยามีเมทานอลมากเกินพอ กลีเซอรีนที่เป็นผลพลอยได้กระบวนการผลิตจะไปละลายในเมทานอลที่เกินพอนี้ ทำให้เกิดการขัดขวางการทำงานระหว่างเมทานอลกับตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลจึงทำให้ผลผลิตร้อยละลดลง [18-19] ส่วนผลของอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาพบว่าที่อุณหภูมิต่ำจะเกิดปฏิกิริยาไม่ดีเนื่องจากผลของพลังงานที่ต่ำทำให้เกิดปฏิกิริยาได้น้อย แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเมทานอลจะเกิดการเดือดและเปลี่ยนไปเป็นแก๊สทำให้ปริมาณสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาลดน้อยลง ทำให้ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลลดลง [6] โดยในการทดลองนี้ที่ 60 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่ดีที่สุด ส่วนผลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาพบว่าเมื่อใช้เวลานานขึ้นร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลก็จะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งจะสูงสุดที่เวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลจะลดลง เนื่องจากในช่วงแรกเมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาปฏิกิริยาก็จะเกิดได้มากขึ้นทำให้ผลิตไบโอดีเซลได้มากขึ้นแต่หลังจากเลยเวลาที่เหมาะสมแล้วปฏิกิริยาจะเกิดย้อนกลับทำให้ไบโอดีเซลที่ได้ลดลงจึงทำให้ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลลดลง [20] ดังนั้นจึงสรุปว่าปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซลในการทดลองนี้ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันต่อเมทานอลที่ดีที่สุดเป็น 1:6 อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาเป็น 60 องศาเซลเซียสและเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเป็น 1 ชั่วโมง หลังจากที่ได้ปัจจัยในการผลิตไบโอดีเซลแล้ว การทดลองขั้นต่อไปเป็นการนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ที่มี KOH เคลือบอยู่บนถ่านเปลือกส้มโอไปผลิตไบโอดีเซล โดยใช้ปัจจัยในการผลิตไบโอดีเซลที่เหมาะสมที่หามาได้จากตอนต้น เปรียบเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์ที่มี KOH เพียงอย่างเดียว พบว่าระบบตัวเร่งเอกพันธุ์โดยเฉลี่ยจะให้ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลสูงกว่าระบบตัวเร่งวิวิธพันธุ์ซึ่งเป็นไปตามหลักการ เนื่องจากระบบเอกพันธุ์เป็นระบบที่สารอยู่ในวัฏภาคเดียวกันจะมีความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยามากกว่าและเกิดจากผลด้านลบของตัวรองรับในระบบวิวิธพันธุ์ (negative supporting effect) [21] ที่ของแข็งในระบบจะขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาและการที่ KOH ยึดเกาะอยู่บนถ่านจะทำให้ตำแหน่งว่องไว (active site) เข้าถึงได้ยาก รวมถึงความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาลดลงจากการเกิดอันตรกิริยาอยู่กับพื้นผิวของถ่าน

อย่างไรก็ตามพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองระบบมีแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาคล้ายคลึงกันคือจะให้ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดที่ความเข้มข้น KOH ค่าหนึ่งและจะลดลงมาหลังจากนั้น ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์เมื่อเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยา การทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นทำให้ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาให้มากขึ้นไปเรื่อยๆจนมากเกินพอ ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลจะลดลงเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากเกินพอนี้อาจจะไปทำปฏิกิริยากับ triglycerides หรือ FFA ในน้ำมันเกิดเป็นสบู่มากขึ้น ซึ่งจะเกิดการฟอร์มตัวเป็นอิมัลชั่นส่งผลทำให้ความหนืดในระบบเพิ่มขึ้นจึงทำให้ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลลดลง [22] ส่วนในระบบตัวเร่งแบบวิวิธพันธุ์การเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาอาจมารวมกัน ซึ่งจะทำให้พื้นที่ในการช่วยเร่งปฏิกิริยาลดลงและทำให้เกิดการต้านทานการส่งผ่านมวลเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความหนืด [23-24] โดยในการทดลองนี้ระบบเอกพันธุ์ให้ค่าร้อยละผลผลิตสูงสุดไบโอดีเซลที่ KOH เท่ากับ 2 wt% และมีค่าร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดเป็น 90.01 ส่วนในระบบวิวิธพันธุ์จะให้ค่าร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดที่ KOH เท่ากับ 4 wt% และมีค่าร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดเป็น 87.38 จะเห็นได้ว่าแม้ในระบบวิวิธพันธุ์จะให้ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลต่ำกว่าระบบเอกพันธุ์เล็กน้อยโดยลดมาประมาณ 3% แต่ต้องใช้ปริมาณ KOH

มากกว่าเพื่อให้ได้ปริมาณผลผลิตสูงสุด (4 wt% ต่อ 2 wt%) อย่างไรก็ตามระบบวิวิธพันธุ์มีข้อดีในการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่ายจึงทำให้ช่วยลดการปนเปื้อนของผลิตภัณฑ์ แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้ในระบบที่ทำการศึกษานี้อาจจะมีการหลุดออกของ KOH ออกจากตัวรองรับอยู่บ้าง แต่จะต่ำกว่าระบบเอกพันธุ์ที่มีการใส่ KOH ลงไปในระบบโดยตรง ดังนั้นจากเหตุผลข้างต้นในการทดลองต่อมาจึงนำไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากระบบวิวิธพันธุ์ที่ KOH เท่ากับ 4 wt% ไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบและหาค่าสมบัติต่างๆทั้งทางกายภาพและเคมี พบว่าเมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบด้วย GC-MS จะมีเมทิลเอสเตอร์หลายชนิดเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ Methyl oleate, Methyl Palmitate, Methyl stearate, Methyl tetradacanoate, Methyl laurate ส่วนสมบัติต่างๆทั้งทางกายภาพและเคมีนั้นเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานไบโอดีเซลพบว่าไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองนี้สมบัติต่างๆ ได้แก่ ความหนาแน่น (density) ความหนืด (viscosity) จุดวาบไฟ (Flash point) ค่าความเป็นกรด (Acid value) เป็นไปตามมาตรฐานทั้งที่เป็นมาตรฐานยุโรป (EN14214) กับมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน

สำหรับการศึกษานี้ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นของความเป็นไปได้ในการใช้ประโยชน์ของถ่านเปลือกส้มโอซึ่งพบว่าสามารถนำมาใช้ได้ ดังนั้นจะได้ทำการศึกษาและปรับปรุงการใช้งานให้มีประสิทธิภาพและมีความเหมาะสมกับกระบวนการผลิตให้ดียิ่งขึ้นไปในอนาคต

References

[1] Tippayawong, N & Sittisun, P. (2012). Continuous-Flow Transesterification of Crude Jatropha Oil with Microwave Irradiation. *Scientia Iranica B*. 19(5), 1324-1328.

[2] Jon, V.G. (2005). Biodiesel Processing and Production. *Fuel Processing Technology*, 86(10), 1097-1107.

[3] Yaakob, Z., et al. (2013). Overview of the Production of Biodiesel from Waste Cooking Oil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 184–193.

[4] Talebian-Kiakalaieh, A., et al. (2013). A Review on Novel Processes of Biodiesel Production from Waste Cooking Oil. *Applied Energy*, 104, 683-710.

[5] Enweremadu, C. C. & Mbarawa, M. M. (2009). Technical Aspects of Production and Analysis of Biodiesel from Used Cooking Oil - A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2205-2224.

[6] Verma, P & Sharma,M.P. (2016). Review of Process Parameters for Biodiesel Production from Different Feed Stocks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1063–1071.

[7] Gebremariam, S. N. & Marchetti, J. M. (2017). Biodiesel Production Technologies: Review. *AIMS Energy*, 5(3), 425-457.

[8] Narowska, B. E., et al. (2020). Application of Activated Carbon to Obtain Biodiesel from Vegetable Oils. *Catalysts*, 10(9), 1049-1062.

[9] Taslim, T., et al. (2018). Preparation of Activated Carbon-Based Catalyst from Candlenut Shell Impregnated with KOH for Biodiesel Production. *Key Engineering Materials*, 777, 262-267.

[10] Asri, N. P., et al. (2018). Alumina Supported Zinc Oxide Catalyst for Production of

Biodiesel from Kesambi Oil and Optimization to Achieve Highest Yields of Biodiesel. *Euro - Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 3, 3(2018).

[11] Fawaz, E. G., et al. (2021). Hierarchical Zeolites as Catalysts for Biodiesel Production from Waste Frying Oils to Overcome Mass Transfer Limitations. *Molecules*, 26(16), 4879.

[12] Al-Rumaihi, A., et al. (2022). A Review of Pyrolysis Technologies and Feedstock: A Blending Approach for Plastic and Biomass Towards Optimum Biochar Yield. *Renewable and Sustainable Energy Review*s, 167, 112715.

[13] Lee, J., et al. (2017). Biochar as a Catalyst. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 70-79.

[14] Bo-ongcharoenlab, K., et al. (2023). Effect of Particle Size of Rice-Husk Derived Silica on the Pyrolysis of Pomelo Peels. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 18(3), 473-484.

[15] Patil, P. D. & Deng, S. (2009). Optimization of Biodiesel Production from Edible and Non-Edible Vegetable Oils. *Fuel*, 88(7), 1302-1306.

[16] Hossain, M., et al. (2021). Box–Behnken Design-Based Optimization for Biodiesel Production from Waste Cooking Oil using Mahogany (*Swietenia macrophylla*) Fruit Shell Derived Activated Carbon as a Heterogeneous Base Catalyst. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 133, 117–138.

[17] Joshi, S. & Pokharel, B. P. (2013). Preparation and Characterization of Activated Carbon from Lapsi (*Choerospondias axillaris*) Seed Stone by Chemical Activation with Potassium Hydroxide. *Journal of the Institute of Engineering*, 9(1), 79–88.

[18] Keihani, M., et al. (2018). Biodiesel Production from Chicken Fat Using Nano-calcium Oxide Catalyst andImproving the Fuel Properties via Blending with Diesel. *Physical Chemistry Research*, 6(3), 521-529.

[19] Musa, I. A. (2016). The Effects of Alcohol to Oil Molar Ratios and the Type of Alcohol on Biodiesel Production using Transesterification Process. *Egyptian Journal of Petroleum*. 25(1), 21-31.

[20] Lakshmana, N. R., et al. (2015). Optimized Parameters for Production of Biodiesel from Fried Oil. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 2(6), 62-65.

[21] Jamnongphol.,S., et al. (2020). Rice Husk-Derived Silica as a Support for Zirconocene/ MMAO Catalyst in Ethylene Polymerization. *Waste and Biomass Valorization*, 11, 769–779.

[22] Chhetri, A. B., et al. (2008). Waste Cooking Oil as an Alternate Feedstock for Biodiesel Production. *Energies,* 1(1), 3-18.

[23] Kusmiyati, K., et al. (2019). Biodiesel Production from Reutealis Trisperma Oil Using KOH Impregnated Eggshell as a Heterogeneous. *Catalyst Energies*, 12(19), 3714.

[24] Sneha, E. M., et al. (2015). Biodiesel Production from Waste Cooking Oil Using KBr Impregnated CaO as Catalyst. *Energy Conversion and Management*, 91, 442–450.