



การเพิ่มประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์แคลเซียมออกไซด์จากวัสดุเหลือใช้สำหรับการสังเคราะห์ไบโอดีเซล

จุฑาภรณ์ ชนะถาวร*

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09 8748 5459 อีเมล: winchana.jc@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.02.004

รับเมื่อ 21 กรกฎาคม 2563 แก้ไขเมื่อ 20 กันยายน 2563 ตอรับเมื่อ 30 กันยายน 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 9 กุมภาพันธ์ 2565

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

การผลิตไบโอดีเซลจากตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีทำให้มีต้นทุนที่สูง และยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปแบบตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์จากวัสดุเหลือทิ้งจากเปลือกไข่ไก่ เปลือกไข่เนกกระทา และเปลือกหอยนางรม เพื่อลดต้นทุนการผลิตและยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เริ่มต้นจากการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการบด และการเผาเพื่อเปลี่ยนแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ให้อยู่ในรูปของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สำหรับใช้ในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้ว จากนั้นทำการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการตรึง CaO บนตัวรองรับไบโอชาร์ด้วยวิธีการบดผสม ($\text{Ch-CaO}_{\text{mixed}}$) และวิธีการแพร่ซึม ($\text{Ch-CaO}_{\text{impregnate}}$) ผลการทดลองพบว่า CaO ที่ผลิตจากเปลือกไข่เนกกระทาให้ร้อยละผลได้สูงสุดในการผลิตไบโอดีเซล ที่สภาวะตัวเร่งปฏิกิริยาเปลือกไข่เนกกระทาปริมาณร้อยละ 3 อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 12 : 1 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ให้ร้อยละผลได้สูงสุด 87.14 ผลการทดลองการตรึง CaO บนตัวรองรับไบโอชาร์พบว่า สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลล์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด $\text{Ch-CaO}_{\text{impregnate}}$ ให้ปริมาณร้อยละผลได้สูงสุดเฉลี่ย 97.82 ซึ่งมีปริมาณเมทิลเอสเทอร์เป็นองค์ประกอบร้อยละ 98.3 และองค์ประกอบพื้นฐานโดยรวมของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานกรมธุรกิจพลังงาน

คำสำคัญ: ตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน แคลเซียมออกไซด์ วิธีการแพร่ซึม ไบโอดีเซล



Improvement of Efficiency of Calcium Oxide as a Heterogeneous Catalyst Derived from Material Waste for Biodiesel Production

Jutaporn Chanathaworn*

Faculty of School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 09 8748 5459, E-mail: winchana.jc@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.02.004

Received 21 July 2020; Revised 20 September 2020; Accepted 30 September 2020; Published online: 9 February 2022

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Biodiesel production via chemical catalytic conversion may lead to the high cost and a negative environmental impact. In this research, eco-friendly catalysts from chicken eggshell quail eggshell and oyster shell waste were used as heterogeneous catalyst to reduce cost of production. Firstly, an active CaO catalyst synthesis for converting CaCO_3 into CaO was prepared by crushing and calcining for biodiesel production from waste cooking oil. Next, the applications of biochar supported CaO catalysts was used to enhance the catalytic efficiency for biodiesel reaction. Ch-CaO_{mixed} and Ch-CaO_{impregnate} catalyst were prepared by mixed-grinding method and impregnation method, respectively. Under the optimal reaction condition, CaO from quail eggshell catalyst was the most effective catalyst for biodiesel production. The experimental results showed that using the quail eggshell catalyst loading at 3 wt%, methanol to oil molar ratio of 12 : 1, a reaction time of 2 h and temperature of 65 °C gave the maximum biodiesel yield of 87.14%. Biochar supported CaO could improve the catalyst efficiency for biodiesel production. The maximum yield of biodiesel produced was 97.82% under reaction conditions of Ch-CaO_{impregnate} with methyl ester of 98.3%. In the last phase of the study, the biodiesel properties were analyzed and it was found that the biodiesel properties meet the biodiesel standards issued by the Department of Energy Business.

Keywords: Catalyst, Tranesterification Reaction, Calcium Oxide, Impregnation Method, Biodiesel

Please cite this article as: J. Chanathaworn, "Improvement of efficiency of calcium oxide as a heterogeneous catalyst derived from material waste for biodiesel production," *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 3, pp. 770-781, Jul.-Sep. 2022 (in Thai).

1. บทนำ

ปัจจุบันอัตราการเพิ่มจำนวนประชากรสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง สอดคล้องกับอัตราการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ เป็นผลให้ปริมาณความต้องการพลังงานเพิ่มสูงขึ้น [1] โดยเฉพาะความต้องการพลังงานเชื้อเพลิงในรูปของน้ำมันสำเร็จรูปที่มีความต้องการปริมาณที่สูงเป็นสัดส่วนที่สำคัญในด้านการคมนาคมขนส่ง และภาคอุตสาหกรรมของประเทศ น้ำมันส่วนใหญ่มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ใช้แล้วหมดไป มีปริมาณสำรองที่ลดลง และมีแนวโน้มที่จะหมดไปในอนาคต นอกจากนี้ขั้นตอนการใช้งานเชื้อเพลิงฟอสซิลยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จากการผลักดันของหน่วยงานทางภาครัฐที่ให้การสนับสนุนการหาแหล่งพลังงานจากแหล่งใหม่เพื่อทดแทนแหล่งที่ใช้อยู่เดิม ทำให้ไบโอดีเซลเริ่มเข้ามามีบทบาทสำคัญเนื่องจากมีสมบัติที่คล้ายน้ำมันปิโตรเลียม สามารถนำมาใช้งานกับเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยไม่ต้องมีการดัดแปลงเครื่องยนต์ หรือมีการดัดแปลงเพียงเล็กน้อย [2], [3] ข้อดีของไบโอดีเซล คือ เป็นแหล่งพลังงานที่ได้จากพลังงานหมุนเวียน สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ การปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์หรือซัลเฟอร์ต่ำ ให้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ไอเสียที่ออกมาจึงมีคุณภาพที่ดีกว่าการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซล จึงเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ดังนั้นงานวิจัยด้านไบโอดีเซลจึงได้รับความสนใจอย่างมากในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา [4]

ไบโอดีเซลเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่มีสารประกอบอินทรีย์ประเภทไตรกลีเซอไรด์โดยใช้กรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เปลี่ยนโมเลกุลน้ำมันให้เป็นแอลคิลเอสเทอร์ (Alkyl Ester) [5] ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีที่เป็นเนื้อเดียวกับตัวทำละลาย หรือเรียกว่า ตัวเร่งแบบเอกพันธ์ (Homogeneous Catalysts) เช่น เบสหรือกรด ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะแตกต่างจากตัวทำละลาย หรือเรียกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous Catalysts) เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งที่มีฤทธิ์เป็นกรดหรือเบส ตัวเร่งปฏิกิริยานาโนแบบวิวิธพันธุ์ หรือการใช้ของเหลวยิ่งยวด (Supercritical Fluid) เป็น

ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาแต่ใช้พลังงานสูง และมีกระบวนการที่ยุ่งยากในการทำผลิตภัณฑ์ให้บริสุทธิ์ [6]

โดยทั่วไปจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งเป็นตัวเร่งแบบเอกพันธ์ เนื่องจากละลายได้เร็วในตัวทำละลายเมทานอล จึงเกิดปฏิกิริยาได้ไว และเร็วกว่าการใช้กรด [7] แต่ข้อเสียของตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนี้ คือ ต้นทุนทางด้านตัวเร่งปฏิกิริยา และการละลายเป็นเนื้อเดียวกับตัวทำละลาย และเจือปนในผลิตภัณฑ์ ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการใช้น้ำล้างผลิตภัณฑ์ ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในกระบวนการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ และใช้น้ำในปริมาณมากในขั้นตอนการล้าง น้ำล้างปนเปื้อนสารเคมีส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตามมา หรือสิ้นเปลืองพลังงานในขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้น ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ที่สกัดได้จากธรรมชาติจึงเข้ามามีบทบาทในการลดขั้นตอนที่กล่าวมา ช่วยลดต้นทุน และปัญหาการปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม [8] คินสภาพได้ง่ายและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ มีฤทธิ์ในการกัดกร่อนน้อย [9] แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสประเภทของแข็งที่สกัดได้จากธรรมชาติ เช่น เปลือกไข่ เปลือกหอย กระดุกสัตว์ ที่มีแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) เป็นเป็นองค์ประกอบหลักสูงถึงร้อยละ 94 แมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO₃) และแคลเซียมฟอสเฟต (CaP) ร้อยละ 1 และสารอินทรีย์ต่างๆ ประมาณร้อยละ 4 [10] CaCO₃ เมื่อได้รับความร้อนที่สูงเพียงพอ (700–1,000 องศาเซลเซียส) หรือการแคลไซน์ (Calcination) จะทำให้โครงสร้างเปลี่ยนเป็น CaO [11] CaO สังเคราะห์ได้จากวัสดุเหลือทิ้ง เช่น จากการใช้เปลือกไข่เหลือทิ้งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์ม [12] ตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยแครงเหลือทิ้งในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลือง [13] ซึ่งคาดว่าตัวเร่ง CaO จากธรรมชาติจะสามารถนำมาใช้ทดแทนตัวเร่งปฏิกิริยาในเชิงพาณิชย์สำหรับการผลิตไบโอดีเซลได้ และนอกจากจะใช้ประโยชน์ในรูปของตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของเสียเหลือทิ้งได้อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตาม CaO บางชนิดยังมีข้อจำกัดในการใช้งาน เช่น การเกิดเจลได้ง่ายในเมทานอล และมีพื้นที่

ผิวจำเพาะ (Active Site) ต่ำ ทำให้ประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง [14], [15]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งที่มีฤทธิ์เป็นเบส โดยการสังเคราะห์ CaO จากวัสดุเหลือทิ้งจากธรรมชาติ 3 ชนิด คือ เปลือกไข่ไก่ เปลือกไขนกก กระทา และเปลือกหอยนางรม เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยา หาชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาและสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่เกี่ยวข้อง และทำการเพิ่มประสิทธิภาพของ CaO ในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ด้วยวิธีการตรึง CaO บนตัวรองรับไบโอชาร์ด้วยวิธีการบดผสม (Mixed-grinding) และการแพร่ซึม (Impregnation) เพื่อศึกษาปริมาณร้อยละไบโอดีเซลผลได้ วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพพื้นฐานและสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลตามมาตรฐานกรมธุรกิจพลังงาน

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 การเตรียมแคลเซียมออกไซด์ (CaO)

เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจากวัสดุเหลือทิ้ง โดยการนำเปลือกไข่ไก่ เปลือกไขนกกกระทา และเปลือกหอยนางรม มาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำยาซักล้าง และล้างด้วยน้ำ โดยเปลือกไข่ไก่ และเปลือกไขนกกกระทาลอกเอาเยื่อบริเวณเปลือกด้านในออก กำจัดกากโปรตีนที่ปนเปื้อนด้วยวิธีการต้มในสารละลาย NaOH ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตรเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำสะอาด และตามด้วยน้ำกลั่น ตากแดด และนำมาบดให้ละเอียด ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 100 ไมโครเมตร อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเผา (Calcination) ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ต่อนาที ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น (Desiccator) เพื่อป้องกันความชื้นก่อนนำมาใช้งาน วิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction; XRD) เครื่อง X'Pert MPD, Philips, Netherlands โดยใช้ CuK (ความยาวคลื่น 0.154 นาโนเมตร ที่ 40 กิโลโวลต์ 30 มิลลิแอมป์ ช่วง 5–90° อัตราการเพิ่ม 0.05° คำนวณขนาด

โครงสร้างผลึกด้วยสมการเชียร์เรอร์ (Scherrer Equation) ดังสมการที่ (1)

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (1)$$

เมื่อ β = ความกว้างของพีคที่ครึ่งหนึ่งของความสูง

K = ค่าคงที่ซึ่งสัมพันธ์กับรูปร่างของผลึก (0.9)

λ = ความยาวคลื่นของรังสีที่ใช้

θ = ค่ามุมของแบรกก์ (Bragg's Angle)

2.2 การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ทำการวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid; FFA) ด้วยวิธีการไทเทรต ในน้ำมันพืชใช้แล้ว ก่อนการทำปฏิกิริยา ให้ความร้อนน้ำมันพืชใช้แล้วที่อุณหภูมิ 100–105 องศาเซลเซียส เพื่อระเหยน้ำออก เป็นเวลา 30 นาที ทำการศึกษาผลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกไข่ไก่ เปลือกไขนกกกระทา และเปลือกหอยนางรม ร้อยละ 1–4 โดยน้ำหนักต่อปริมาณผลผลิตไบโอดีเซล ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันที่ 6 : 1–15 : 1 ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง ให้ความร้อนบนเครื่องกวนสารละลาย ที่อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส กวนผสมอย่างต่อเนื่องด้วยความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ทำการคัดเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ค่าร้อยละผลสูงสุดมาศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยวิธีการตรึง CaO บนตัวรองรับไบโอชาร์

2.3 การเพิ่มประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการตรึง CaO บนตัวรองรับไบโอชาร์

2.3.1 การเตรียมตัวรองรับไบโอชาร์ (Biochar)

ไบโอชาร์สำหรับใช้เป็นตัวรองรับเป็นผลพลอยได้จากการผลิตไบโอเอทิลจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของชานอ้อยที่อุณหภูมิในการย่อยสลาย 500–550 องศาเซลเซียส ซึ่งมีปริมาณถ่านเป็นองค์ประกอบร้อยละ 7.17 มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 74.25 ตารางเมตร/กรัม สัดส่วนองค์ประกอบของธาตุหลักเป็น CHO ร้อยละ 98.72 รองลงมา คือ Si ร้อยละ 0.72 ก่อน

ทำการทดลองทำการเตรียมไบโอชาร์เพื่อใช้เป็นตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา (Biochar-supported Catalyst) ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ที่คัดเลือกจากประสิทธิภาพการผลิตไบโอดีเซลสูงที่สุด ทำการกระตุ้นไบโอชาร์ด้วยการใช้สารละลาย KOH ความเข้มข้น 7 โมลาร์ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยา [15] เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำการศึกษาวิธีการตรึง CaO บนตัวรองรับไบโอชาร์ ด้วยวิธีการเตรียมที่แตกต่างกัน 2 วิธี คือ วิธีการบดผสม และวิธีการแพร่ซึม

2.3.2 การตรึง CaO บนตัวรองรับไบโอชาร์ด้วยวิธีการบดผสม

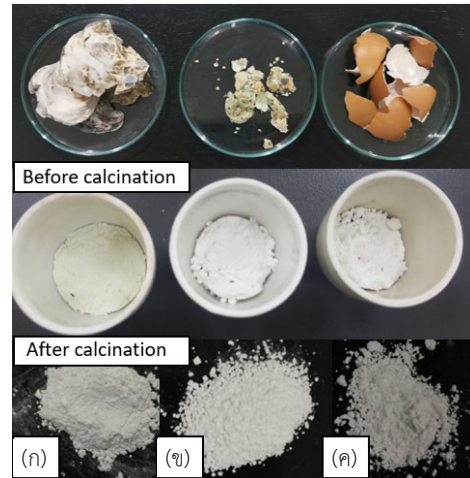
บด CaO ผสมกับไบโอชาร์ที่ผ่านการกระตุ้นเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวแล้ว ในอัตราส่วน 1 : 1 โดยใช้ครกหินอ่อน จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO บนตัวรองรับไบโอชาร์ด้วยวิธีการบดผสม (Ch-CaO_{mixed})

2.3.3 การตรึง CaO บนตัวรองรับไบโอชาร์ด้วยวิธีแพร่ซึม

ทำการเตรียมสารผสม โดยใช้ CaO 20 กรัม ในตัวทำละลายสารละลายเจือจางของกรดไนตริก หยดสารผสมที่เตรียมได้ลงบนตัวรองรับไบโอชาร์ที่ผ่านการกระตุ้นเพิ่มพื้นที่ผิวแล้ว โดยปริมาตรของสารละลายผสมที่ใช้มีปริมาณเท่ากับปริมาตรของรูพรุนทั้งหมดของตัวรองรับหรือน้อยกว่าเล็กน้อย จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อระเหยตัวทำละลาย ทำการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO บนตัวรองรับไบโอชาร์ด้วยวิธีการแพร่ซึม (Ch-CaO_{impregnated})

2.3.4 กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ตรึงบนตัวรองรับไบโอชาร์

นำ Ch-CaO_{mixed} และ Ch-CaO_{impregnated} มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เริ่มจากการให้ความร้อนน้ำมันพืชใช้แล้วที่อุณหภูมิ 100–105 องศาเซลเซียส เพื่อระเหยน้ำออก เป็นเวลา 30 นาที สังเคราะห์ไบโอดีเซลโดยการคัดเลือกปริมาณอัตราส่วนเมทานอล ต่อน้ำมัน อุณหภูมิ และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่ให้ปริมาณร้อยละผลได้สูงสุดจากการทดลองก่อนหน้า กวนผสม



รูปที่ 1 ตัวเร่งปฏิกิริยา (ก) เปลือกหอยนางรม (ข) เปลือกไข่นกกระทา (ค) เปลือกไข่ไก่

อย่างต่อเนื่องด้วยความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ทำการหาค่าร้อยละผลผลิตไบโอดีเซล และวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพพื้นฐานตามมาตรฐาน ASTM เช่น ค่าความหนืด (Viscosity) ความหนาแน่น (Density) จุดติดไฟ (Fire Point) จุดวาบไฟ (Flash Point) และค่าความเป็นกรด ทำการทดลอง 3 ซ้ำ นำผลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย

3. ผลการทดลอง

3.1 ลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาจากธรรมชาติ

ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกไข่ไก่ เปลือกไข่นกกระทา และเปลือกหอยนางรม ก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 1 พบว่า หลังการให้ความร้อนด้วยการเผาทำให้สีของตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปก่อนการเผาเปลือกไข่ไก่ และเปลือกไข่นกกระทามีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว และเมื่อผ่านการให้ความร้อนสีผงมีความขาวมากขึ้น ส่วนเปลือกหอยนางรมก่อนการเผาจะเป็นผงละเอียดค่อนข้างเล็กล็กน้อย หลังการเผาจะเปลี่ยนเป็นผงสีขาว และนอกจากนี้การให้ความร้อนส่งผลให้น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง ค่าร้อยละน้ำหนักที่หายไปของเปลือกไข่ไก่ เปลือกไข่นกกระทา และเปลือกหอยนางรมคิดเป็นร้อยละ

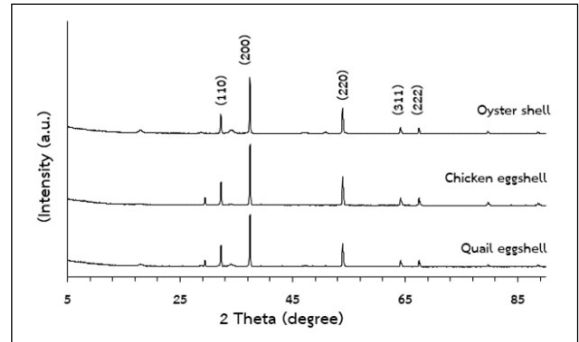
8.12, 10.41 และ 14.05 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงของสีและน้ำหนักหลังการให้ความร้อนเนื่องจากการสลายตัวของ CaCO_3 อยู่ในรูปของ CaO และบางส่วนเกิดจากการสลายไปของสารอินทรีย์เป็นเอน

ผลการวิเคราะห์สารประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเปลือกไข่ไก่ เปลือกไข่นกกระทา และเปลือกหอยนางรม ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิด มี CaO เป็นสารประกอบหลักในสัดส่วนร้อยละ 77-87 ดังตารางที่ 1 ซึ่งเปลือกหอยนางรมมีสัดส่วนของ CaO สูงสุดถึงร้อยละ 87 การมีองค์ประกอบของ CaO เป็นส่วนใหญ่ แสดงให้เห็นว่าการให้ความร้อนหรือการแคลไซน์ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยน CaCO_3 ให้อยู่ในรูปของ CaO

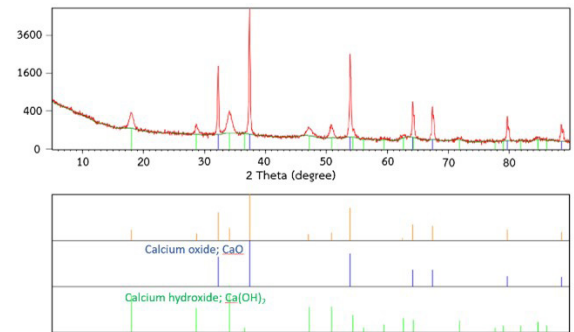
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค XRD เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกเพื่อยืนยันลักษณะการเกิดสารประกอบ CaO ดังรูปที่ 2 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ยืนยันได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิด มี CaO เป็นองค์ประกอบหลัก สามารถตรวจพบพีคที่ตำแหน่ง 32.2° , 37.4° , 53.9° , 64.1° และ 67.4° ซึ่งเป็นตำแหน่งการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่สอดคล้องกับสารประกอบ CaO [16] และนอกจากนี้พบว่ามีโครงสร้างผลึกของ CaCO_3 ตรวจพบพีคที่ตำแหน่ง 29.4° , 39.4° , 43.1° และ 47.3° ของตัวเร่งปฏิกิริยาเปลือกไข่ไก่และเปลือกไข่นกกระทา

ตารางที่ 1 องค์ประกอบและสัดส่วนสารประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาจากธรรมชาติ

Sample	Component	Ratio (%)
Chicken Eggshell	CaO	77
	Ca(OH) ₂	9
	CaCO ₃	14
Quail Eggshell	CaO	80
	Ca(OH) ₂	4
	CaCO ₃	16
Oyster Shell	CaO	87
	Ca(OH) ₂	13



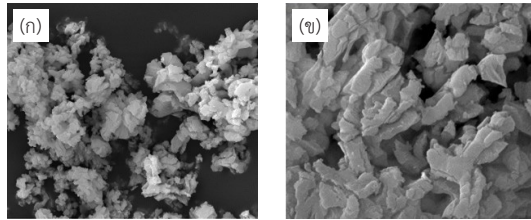
รูปที่ 2 XRD Pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง



รูปที่ 3 XRD Pattern ของเปลือกหอยนางรมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเปลือกหอยนางรมนอกจากตรวจพบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่สอดคล้องกับการมี CaO เป็นองค์ประกอบหลักแล้ว ยังตรวจพบพีคของ Ca(OH)_2 บางส่วน ที่ตำแหน่ง $2\theta = 28^\circ$ [17] ดังรูปที่ 3 จากการคำนวณขนาดโครงสร้างผลึกด้วยสมการเชียร์เรอร์ดังสมการที่ (1) ที่ความกว้างที่ความสูงครึ่งหนึ่งของพีค (Full Width at Half Maximum; FWHM) และตำแหน่งมุมของแบรกก์พบว่า ขนาดโครงสร้างผลึกของเปลือกหอยนางรมมีขนาดใหญ่ที่สุด ขนาดโครงสร้างผลึกเฉลี่ย 12-15 นาโนเมตร รองลงมาคือ เปลือกไข่ไก่และเปลือกไข่นกกระทามีขนาดโครงสร้างผลึกเฉลี่ยใกล้เคียงกัน ประมาณ 9-10 นาโนเมตร

ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค BET ของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิด หลังการเผาที่อุณหภูมิ



รูปที่ 4 ลักษณะพื้นผิวของเปลือกไขนกกระทาที่กำลังขยาย 3,000 เท่า (ก) และ 10,000 เท่า (ข)

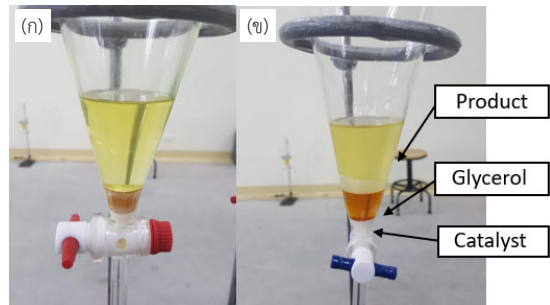
900 องศาเซลเซียส พบว่า เปลือกไขนกกระทามีพื้นที่ผิวสูงที่สุด คือ 70.42 ตารางเมตร/กรัม รองลงมา คือ เปลือกหอยนางรมและเปลือกไข่ไก่ มีพื้นที่ผิว 59.62 และ 42.73 ตารางเมตร/กรัม ตามลำดับ

เปลือกไขนกกระทามีพื้นที่ผิวการทำปฏิกิริยาสูงสุด จึงนำมาวิเคราะห์เพื่อดูลักษณะพื้นผิวสัณฐานด้วยเทคนิค SEM ดังรูปที่ 4 พบว่า โครงสร้างพื้นผิวของไขนกกระทามีรอยขรุขระ อาจเป็นผลมาจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ในเปลือกไข่ อันเนื่องมาจากการได้รับความร้อนจากการเผาที่อุณหภูมิสูง และบางส่วนเกิดจากการสลายตัวของสารประกอบ CaCO_3 เป็นสารประกอบ CaO

จากการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid; FFA) ของน้ำมันปาล์มที่ผ่านการใช้แล้ว โดยผ่านการใช้งานในรูปแบบการทอดเพียงครั้งเดียว ปริมาณ FFA ถือว่าเป็นปัจจัยสำคัญในการสังเคราะห์ไบโอดีเซล ซึ่งหากมีค่ามากกว่าร้อยละ 2.0–2.5 จะทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นน้อยลง และเกิดปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันเป็นไขสบู่ในผลิตภัณฑ์ จากการวิเคราะห์ FFA ของน้ำมันที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการทดลองพบว่า มีปริมาณกรดไขมันอิสระร้อยละ 1.96 สามารถผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเบสได้โดยตรง ไม่ต้องผ่านการลด FFA ด้วยกรด และตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ที่นำมาใช้ในการทดลองยังมีสมบัติทนต่อปริมาณกรดไขมันอิสระ และน้ำในน้ำมันได้ดี โอกาสเกิดสบู่้น้อยกว่าการใช้ตัวเร่งแบบเอกพันธ์ที่ละลายเป็นเนื้อเดียวกับตัวทำปฏิกิริยา [18]

3.2 อิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์

รูปที่ 5 เป็นลักษณะของไบโอดีเซลจากการใช้ตัวเร่ง

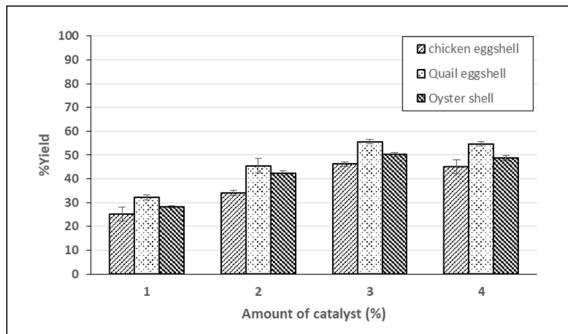


รูปที่ 5 ชั้นของผลิตภัณฑ์ ระหว่างรอกแยกชั้น (ก) การแยกชั้นสมบูรณ์ (ข)

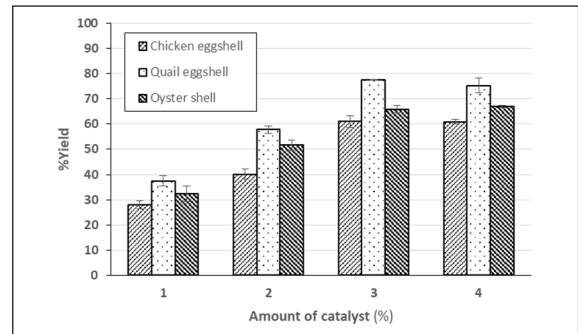
ปฏิกิริยา CaO รูปที่ 5 (ก) ตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ระหว่างรอกตะกอน รูปที่ 5 (ข) สังเกตเห็นการแยกเป็นชั้น 3 ชั้น อย่างชัดเจน ชั้นบนสุดเป็นผลิตภัณฑ์ ชั้นกลางเป็นกลีเซอรอล ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยา และชั้นล่างสุดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา CaO สามารถไหลทางด้านล่างเพื่อแยกกลีเซอรอล และตัวเร่งปฏิกิริยาออกโดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการการล้าง

จากการทดลองที่อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เวลาการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง ดังรูปที่ 6 พบว่าทุกสภาวะการทดลอง เปลือกไขนกกระทาให้ร้อยละผลได้สูงสุด รองลงมา คือ เปลือกหอยนางรมและเปลือกไข่ไก่ ตามลำดับ ทั้งนี้ปัจจัยสำคัญขึ้นอยู่กับปริมาณสัดส่วน CaO ที่เป็นองค์ประกอบในพื้นที่ผิวจำเพาะในการทำปฏิกิริยา และขนาดโครงสร้างผลึกในการทำปฏิกิริยา เปลือกไขนกกระทามีปริมาณ CaO และพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงและขนาดโครงสร้างผลึกที่เหมาะสม ทำให้โอกาสในการผลักดันปฏิกิริยาไปข้างหน้าค่อนข้างสูง

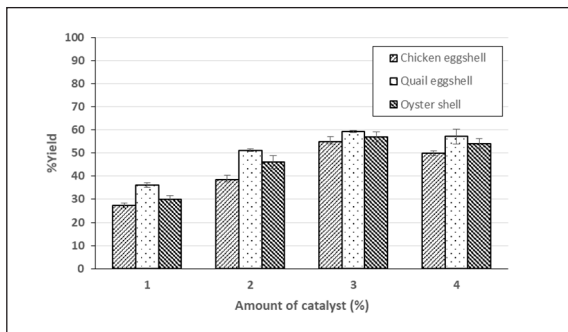
จากการศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1–4 ปริมาณผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 ให้ปริมาณร้อยละผลได้สูงสุด ซึ่งที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6 : 1 รูปที่ 6 (ก) ให้ร้อยละผลได้สูงสุด 55.61, 50.21 และ 46.24 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเปลือกไขนกกระทา เปลือกหอยนางรมและเปลือกไข่ไก่ ตามลำดับ ซึ่งเพิ่มขึ้นจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 มีปริมาณร้อยละผลได้ 45.53 42.45 และ 34.11 ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณตัวเร่ง



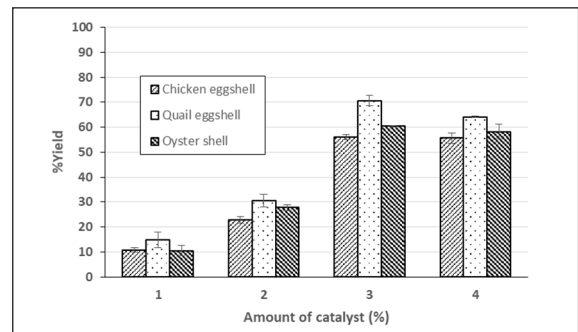
(ก) เมทานอลต่อน้ำมัน (6 : 1) โดยโมล



(ค) เมทานอลต่อน้ำมัน (12 : 1) โดยโมล



(ข) เมทานอลต่อน้ำมัน (9 : 1) โดยโมล



(ง) เมทานอลต่อน้ำมัน (15 : 1) โดยโมล

รูปที่ 6 ผลของชนิดและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน (ก) 6 : 1 (ข) 9 : 1 (ค) 12 : 1 และ (ง) 15 : 1 โดยโมล

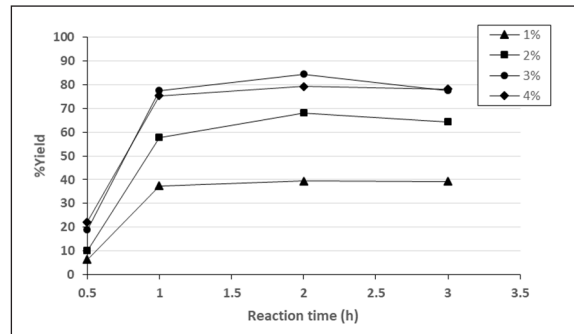
ปฏิกิริยาเป็นการเพิ่มพื้นที่และบริเวณเร่งปฏิกิริยา (Active Site) ในการทำปฏิกิริยา ส่งผลให้สารตั้งต้นเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์มากขึ้น เมื่อมีการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจนถึงจุดสมดุล หากยังมีการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา จะส่งผลให้ปริมาณผลิตภัณฑ์น้อยลง ทั้งนี้สาเหตุมาจากการมีปริมาณตัวเร่งที่มากเกินไปจนจุดสมดุลจะทำให้สารตั้งต้นมีความหนืดสูงขึ้น โอกาสในการเข้าทำปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นเกิดขึ้นได้น้อย ทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ลดลง [19] การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 1 ให้ปริมาณร้อยละผลได้น้อยที่สุด คือ 32.22, 28.15 และ 25.12 จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเปลือกไข่จนกระทั่งเปลือกหอยนางรม และเปลือกไข่ไก่ ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่น้อยเกินไป ทำให้มีบริเวณเร่งปฏิกิริยาน้อย ส่งผลให้การเร่งปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้น้อย โอกาสในการผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาไปข้างหน้าไปเป็นผลิตภัณฑ์จึงน้อยลง และในสภาวะการทดลองที่มีการใช้อัตราส่วนโดยโมลของ

เมทานอลต่อน้ำมัน 9 : 1, 12 : 1 และ 15 : 1 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับอัตราส่วน 6 : 1 จากการศึกษ้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน ในช่วง 6 : 1– 5 : 1 ซึ่งปริมาณเมทานอลต่อน้ำมันเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดผลิตภัณฑ์ จากสมการการเกิดไบโอดีเซล การเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ 1 โมล ต้องใช้ปริมาณเมทานอล 3 โมล ในการเกิดผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้ปริมาณการใช้ที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับชนิดของสารตั้งต้นที่ใช้ จากการทดลองพบว่า แนวโน้มการเกิดผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณเมทานอลเพิ่มขึ้น เนื่องจากเพิ่มการผลักดันปฏิกิริยาให้ไปข้างหน้า การทดลองที่ปริมาณเมทานอลต่อน้ำมัน 12 : 1 เป็นสภาวะที่ให้ปริมาณร้อยละผลได้สูงสุด จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเปลือกไข่จนกระทั่งเปลือกหอยนางรม และเปลือกไข่ไก่ ให้ปริมาณร้อยละผลได้ 65.88 และ 61.01 ตามลำดับที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3

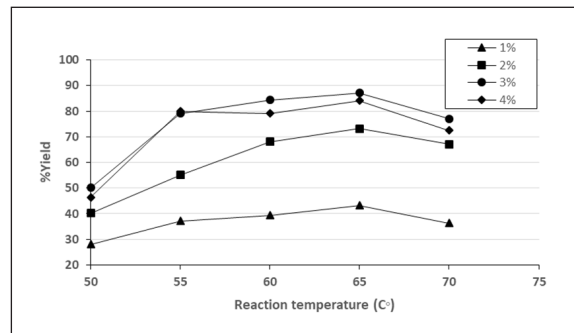


[รูปที่ 6 (ค)] ซึ่งมีปริมาณผลิตภัณฑ์มากกว่าที่อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 9 : 1 ให้ปริมาณร้อยละผลได้ 59.24, 57.01 และ 55.02 จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเปลือกไข่นกกระทา เปลือกหอยนางรม และเปลือกไข่ไก่ [รูปที่ 6 (ข)] แต่เมื่อมีการเพิ่มปริมาณจนเกินจุดสมดุลของการเกิดปฏิกิริยาจะส่งผลให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ลดลง เนื่องมาจากปฏิกิริยาการเกิดนั้นเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ ทำให้การมีปริมาณเมทานอลที่มากเกินไปส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาค่าเงินไปในทิศทางย้อนกลับที่ปริมาณเมทานอลต่อน้ำมัน 15 : 1 [รูปที่ 6 (ง)] จึงให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ลดลง ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเป็นไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อมีการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน

ทำการคัดเลือกชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา และสภาวะที่ดีที่สุดมาทำการทดลองการศึกษาอิทธิพลของเวลาต่อร้อยละผลได้ ในช่วง 0.5–3.0 ชั่วโมง ทำการทดลองที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1–4 ของเปลือกไข่นกกระทา ที่อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน 12 : 1 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 7 จากการทดลองพบว่า เวลาส่งผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ ซึ่งผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่นานขึ้นทำให้โมเลกุลของสารตั้งต้นมีโอกาสเกิดการชนกัน และมีโอกาสสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยามากยิ่งขึ้นทำให้โอกาสในการเกิดเป็นผลิตภัณฑ์จึงเพิ่มสูงขึ้น ช่วงเวลาที่เหมาะสมที่ให้อ้อยละผลได้สูงสุด คือที่เวลาการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง แต่เมื่อมีการเพิ่มระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเกินจากจุดสมดุล ส่งผลให้อ้อยละผลได้ลดลง เนื่องจากในช่วงแรกของการทำปฏิกิริยานั้นปฏิกิริยาจะเกิดอย่างรวดเร็วจากนั้นอัตราการเกิดจะเริ่มลดลงจนเข้าสู่สภาวะสมดุลในเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อมีการเพิ่มระยะเวลาที่นานขึ้นเลยจุดสมดุล ทำให้เกิดการฟอร์มตัวของกลีเซอรอลและอิมัลชันในผลิตภัณฑ์ [1] ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความหนืดสูงขึ้นส่งผลต่อความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ ร้อยละผลได้สูงสุดที่เวลาทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเปลือกไข่นกกระทาร้อยละ 3 ให้ปริมาณร้อยละผลได้สูงสุด 84.32 และลดลงเป็น 77.54 เมื่อมีการเพิ่มระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเป็น 3 ชั่วโมง



รูปที่ 7 ผลของเวลาต่อปริมาณร้อยละผลได้ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเปลือกไข่นกกระทาร้อยละ 1-4 โดยน้ำหนัก

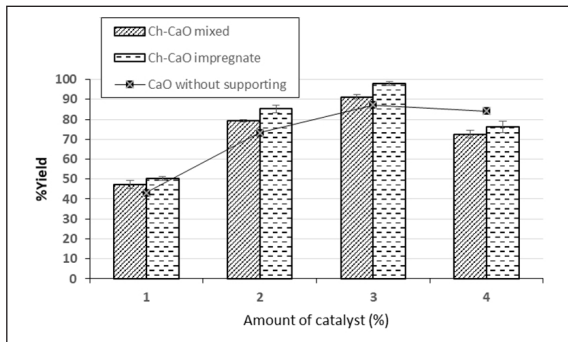


รูปที่ 8 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณร้อยละผลได้ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเปลือกไข่นกกระทาร้อยละ 1-4 โดยน้ำหนัก

จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลผลิต ดังรูปที่ 8 จากการทดลองอุณหภูมิมีผลต่อปริมาณการเกิดผลิตภัณฑ์ ซึ่งอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาที่ใช่จะต้องควบคุมให้ใกล้เคียงกับจุดเดือดของตัวทำละลาย [20] ผลการศึกษาอุณหภูมิในช่วง 50–70 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณร้อยละผลได้สูงขึ้น ร้อยละผลได้สูงสุดที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ให้อ้อยละผลได้ 87.14 ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเปลือกไข่นกกระทาร้อยละ 3

3.3 ผลของการเพิ่มประสิทธิภาพ CaO บนตัวรองรับไบโอชาร์

ผลของการเพิ่มประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยา CaO จากเปลือกไข่นกกระทาด้วยวิธีการบดผสม (Ch-CaO_{mixed}) และการแพร่ซึม (Ch-CaO_{impregnate}) ของตัวเร่งปฏิกิริยาบน



รูปที่ 9 ผลของ CaO บนตัวรองรับไบโอชาร์ต่อปริมาณร้อยละผลได้ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1-4 โดยน้ำหนัก

ตัวรองรับไบโอชาร์ เปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีการใช้ตัวรองรับ ดังรูปที่ 9 ที่ปริมาณร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยา 1-4 อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 12 : 1 ที่อุณหภูมิเร่งปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่า วิธีการตั้งตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ที่แตกต่างกันส่งผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ต่างกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีการตั้งบนตัวรองรับพบว่า การตั้ง CaO บนตัวรองรับให้ปริมาณผลผลิตที่สูงกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่เป็นตัวรองรับ เนื่องมาจากการตั้งบนตัวรองรับทำให้ CaO เกิดการกระจายตัวเข้าไปในรูพรุนและพื้นผิวของวัสดุรองรับทำให้มีตำแหน่งของบริเวณเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น [3] การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ch-CaO_{impregnate} เกิดผลิตภัณฑ์สูงสุด ให้ร้อยละผลได้ 97.82 ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 ปริมาณผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ch-CaO_{mixed} เป็นร้อยละ 4.35 และเปรียบเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่เป็นตัวรองรับคิดเป็นร้อยละ 12.26 ตามลำดับ และเมื่อมีการเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ร้อยละผลได้ลดลง เนื่องจากการมีปริมาณมากเกินไปจุดสมดุลส่งผลต่อความหนืดของสารตั้งต้นทำให้ขัดขวางการผลักดันปฏิกิริยาไปข้างหน้า ปริมาณผลิตภัณฑ์จึงลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ผ่านมาพบว่า มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากธรรมชาติสูงถึงร้อยละ 6 ให้ร้อยละผลผลิตเพียงร้อยละ 87 [18] และการทดลองของ Lakhya และคณะ ได้ทำการตั้งเปลือกหอยบนตัวรองรับ

ไบโอชาร์พบว่า ให้ปริมาณไบโอดีเซลร้อยละ 91.4 [21] ดังนั้นการไม่ใช้ตัวรองรับให้ร้อยละผลผลิตที่ต่ำกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการตั้งบนตัวรองรับ

นำผลิตภัณฑ์สถานะที่ให้ร้อยละผลได้สูงที่สุดมาทำการวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานเบื้องต้นพบว่า มีปริมาณเมทิลเอสเทอร์ร้อยละ 98.3 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานการเป็นไบโอดีเซล (>ร้อยละ 96.5) ค่าความเป็นกรด เท่ากับ 0.23 มิลลิกรัม KOH/กรัม ค่าความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส เท่ากับ 4.35 เซนติสโตกส์ ความหนาแน่น 0.86 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งโดยรวมสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานการเป็นไบโอดีเซลของกรมธุรกิจพลังงาน [22] และจากการวิเคราะห์สมบัติการเป็นเชื้อเพลิงด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์พบว่า มีค่าความร้อน 36.5 เมกกะจูล/กิโลกรัม ค่าจุดวาบไฟ และจุดติดไฟ 126 และ 135 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

4. อภิปรายผลและสรุป

จากการทดลองการเตรียม CaO จากเปลือกไข่ไก่ เปลือกไขนกระทา และเปลือกหอยนางรม ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เวลา 5 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกพบว่า มี CaO เป็นองค์ประกอบยืนยันจากพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สอดคล้องกับชนิดของสารประกอบ CaO ที่มีมุม 2θ ความเข้มพีคสูงสุดที่ 37.4° CaO ที่เตรียมจากเปลือกไขนกระทาให้ร้อยละผลได้ในการผลิตไบโอดีเซลสูงสุด รองลงมาคือ เปลือกหอยนางรม และเปลือกไข่ไก่ ตามลำดับ จากการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน ระยะเวลา และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ส่งผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์ เมื่อเพิ่มปริมาณของปัจจัยตั้งที่กล่าวมาจะส่งผลให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น แต่เมื่อมีการเพิ่มจนเลยจุดสมดุลจะส่งผลให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ลดน้อยและเป็นไปในทิศทางเดียวกันในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิดที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน 12 : 1 อุณหภูมิและเวลาการทำปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส และ 2 ชั่วโมง เป็นสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของตัวเร่งปฏิกิริยา



ให้ปริมาณร้อยละผลได้ 87.14 ผลของการเพิ่มประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาดังวิธีข้างต้น CaO บนตัวรองรับไบโอชาร์พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Ch-CaO_{impregnate} ให้ปริมาณร้อยละผลได้สูงสุด 97.82 สูงกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Ch-CaO_{mixed} ให้ร้อยละผลได้ 91.22 แต่เมื่อเปรียบเทียบกับไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา CaO บนตัวรองรับ ให้ปริมาณร้อยละผลได้เพียง 87.14 ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 จากการวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานการเป็นไบโอดีเซลพบว่า สมบัติโดยรวมผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน แสดงให้เห็นว่า CaO จากธรรมชาติที่ผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อนสูงสามารถนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลได้ และวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาดังวิธีข้างต้น ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไบโอดีเซลทำให้ช่วยผลักดันปฏิกิริยาไปข้างหน้า เพิ่มปริมาณผลิตภัณฑ์ให้สูงขึ้น การศึกษาวิจัยในครั้งนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการผลิตไบโอดีเซลได้นอกจากเป็นการเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งแล้วยังช่วยลดต้นทุนทางด้านพลังงานในกระบวนการแยกผลิตภัณฑ์แล้วยังช่วยลดมลพิษทางด้านสิ่งแวดล้อมจากน้ำล้างได้อีกทางหนึ่งด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ในการสนับสนุนอุปกรณ์และสถานที่สำหรับการทำงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Muhdarina, A. Linggawati, S. Anita, and T. A. Amri, "Preparation and characterization of calcium oxide heterogeneous catalyst derived from anadaragranosashell for biodiesel synthesis," in *Proceedings ICoSE Conference*, 2016, pp. 1–8.
- [2] M. E. Borges and L. Diaz, "Recent developments on heterogeneous catalysts for biodiesel production by oil esterification and transesterification reactions: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 2839–2849, 2012.
- [3] W. Xie and H. Li, "Alumina-supported potassium iodide as a heterogeneous catalyst for biodiesel production from soybean oil," *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, vol. 255, pp. 1–9, 2006.
- [4] M. Risfidian, A. S. K. Anggraini, and A. Lesbani, "Calcium oxide catalyst based on quail eggshell for biodiesel synthesis from waste palm oil," *Journal of Pure and Applied Chemistry Research*, vol. 7, no. 2, pp. 130–139, 2018.
- [5] A. Macarioa, G. Giordano, B. Onidab, D. Cocinab, A. Tagarelli, and A. M. Giuffrid, "Biodiesel production process by homogeneous/heterogeneous catalytic system using an acid–base catalyst," *Applied Catalysis*, vol. 378, pp. 160–168, 2010.
- [6] B. Thangaraj, P. R. Solomon, B. Muniyandi, S. Ranganathan, and L. Lin, "Catalysis in biodiesel production—a review," *Clean Energy*, vol. 3, pp. 2–23, 2019.
- [7] H. Fukuda, A. Kondo, and H. Noda, "Biodiesel fuel production by transesterification of oils," *Journal of Bioscience Bioengineering*, vol. 92, pp. 405–416, 2001.
- [8] W. Xie, X. Huang, and H. Li, "Soybean oil methyl esters preparation using NaX zeolites loaded with KOH as a heterogeneous catalyst," *Bioresource Technology*, vol. 98, pp. 936–939, 2007.
- [9] A. A. Refaat, "Different techniques for the production of biodiesel from waste vegetable oil," *International Journal Environmental Science Technology*, vol. 7, pp. 183–213, 2010.
- [10] R. Ahmad, R. Rohazriny, and N. Ibrahim, "Properties of waste eggshell as calcium oxide catalyst," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 754,

- pp. 171–175, 2015.
- [10] R. Ahmad, R. Rohazriny, and N. Ibrahim, “Properties of waste eggshell as calcium oxide catalyst,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 754, pp. 171–175, 2015.
- [12] N. W. Supriyanto, P. Puspitasari, and A. A. Permanasari, “Synthesis and characterization of CaO/CaCO₃ from quail eggshell waste by solid state reaction process,” in *AIP Conference Proceedings 2120*, 2019, pp. 1–6.
- [13] R. Risso, P. Ferraz, S. Meireles, and I. Fonseca. “Highly active CaO catalysts from waste shells of egg, oyster and clam for biodiesel production,” *Applied Catalysis*, vol. 567, pp. 56–64, 2018.
- [14] H. Liu, L. Y. Su, and L. B. Zou, “Biodiesel production catalyzed by cinder support CaO/KF particle catalyst,” *Fuel*, vol. 97, pp. 651–657, 2012.
- [15] Y. Tang, M. Meng, J. Zhang, and Y. Lu, “Efficient preparation of biodiesel from repeseed oil over modified Cao,” *Applied Energy*, vol. 88, pp. 2735–2739, 2011.
- [16] R. Mohadi, A. Sueb, K. Anggraini, and A. Lesbani, “Calcium oxide catalyst based on quail eggshell for biodiesel synthesis from waste palm oil,” *Journal of Pure and Applied Chemistry Research*, vol. 7, no. 2, 130–139, 2018.
- [17] N. Viriya-empikul, P. Krasae, B. Puttasawat, B. Yoosuk, N. Chollacoop, and K. Faungnawakij, “Waste shells of mollusk and egg as biodiesel production catalysts,” *Bioresource Technology*, vol. 101, pp. 3765–3767, 2010.
- [18] R. Wuttichai and K. Janeya, “Biodiesel production process from crude palm oil using calcium oxide derived from cockle shells as economical and green catalyst science and technology,” *Science and Technology*, vol. 20, pp. 94–106, 2018.
- [19] J. Chanathaworn and K. Phumivanichakit, “Effect of coffee silverskin and spent coffee ground on properties of biomass pellet fuel,” *RMUTP Research Journal Science and Technology*, vol. 13, pp. 78–89, 2019.
- [20] A. Gorji, “A review on the biodiesel production, key parameters in transesterification reaction, its effects on the environment and human health,” *Journal of Biodiversity and Environmental Science*, vol. 7, pp. 220–226, 2015.
- [21] L. J. Konwar, S. Chutia, J. Boro, R. Kataki, and D. Deka, “Biochar supported cao as heterogeneous catalyst for biodiesel production,” *International Journal of Innovative Research and Development*, vol. 1, pp. 186–195, 2012.
- [22] Department of Energy Business, Ministry of Energy, “The characteristics of biodiesel for agricultural engines,” Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of energy, 2006.