

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ก้อนแข็งทรงลูกบาศก์สำหรับผลิตไบโอดีเซล Fabrication of Cubic-like Shape Calcium Oxide Based-solid Catalyst for Biodiesel Production

ภาวิณี พงษ์วัน มัทธนา กะชา วินิช พรอมอาร์กษ์ และ ทวีศักดิ์ สูดยอดสุข*
ศูนย์อิเล็กทรอนิกส์สารอินทรีย์และพลังงานทดแทน ภาควิชาเคมี และศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190
*E-mail: tsudyoadsuk@yahoo.com

บทคัดย่อ

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลมีแนวโน้มที่จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์แคลเซียมออกไซด์ เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง สามารถแยกออกจากปฏิกิริยาได้ง่าย ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ในอุตสาหกรรมต้องมีรูปทรงและขนาดที่เหมาะสม งานวิจัยนี้ได้ขึ้นรูปตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์แคลเซียมออกไซด์ ให้มีลักษณะเป็นของแข็งทรงลูกบาศก์ขนาด 1 cm × 1 cm × 1 cm มีรูพรุนสูง มีความแข็งแรงเบสในช่วง 12.8-15.0 ทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มกับเมทานอลที่อุณหภูมิ 65 °C พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ให้ร้อยละการเกิดเมทิลเอสเทอร์ 97% ภายใต้สภาวะอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 18:1 เวลาดำเนินปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง

คำสำคัญ: ไบโอดีเซล ทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน แคลเซียมออกไซด์

Abstract

Biodiesel production tends to use a heterogeneous catalyst calcium oxide as it has high catalytic activity and is easily separated from the reactor. In this work, highly porous cubic-shaped calcium oxide with 1 cm × 1 cm × 1 cm dimensions were fabricated. The basic strength of the catalyst was in the range of 12.8-15.0. The catalyst was tested for activity in the transesterification of palm oil with methanol at 65 °C. Methyl esters were obtained in 97% yield under the reaction conditions: mole ratio of methanol to palm oil of 18:1 and 4 h reaction time.

Keywords: Biodiesel, Transesterification, Calcium oxide

1. บทนำ

ไบโอดีเซลจัดเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกที่ได้รับความสนใจศึกษากันอย่างมาก เนื่องจากผลิตจากแหล่งทรัพยากรหมุนเวียน เช่น น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ หรือสาหร่าย [1] ไบโอดีเซลเป็นสารประกอบเมทิลเอสเทอร์หรือเอทิลเอสเทอร์ สังเคราะห์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์จากแหล่งทรัพยากรหมุนเวียนข้างต้นกับแอลกอฮอล์ [2] ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันจำเป็นต้องมีตัวเร่งปฏิกิริยาเสมอ เพื่อช่วยให้เกิดผลิตภัณฑ์สมบูรณ์ และเร็วขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีทั้งชนิดเอกพันธ์และวิวิธพันธ์ ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์สำหรับ

เตรียมไบโอดีเซล ได้แก่ กรดซัลฟูริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น ให้ปริมาณไบโอดีเซลสูง แต่มีขั้นตอนการผลิตที่ยุ่งยาก ต้องกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยาออกโดยการล้างด้วยน้ำร้อนหลายๆ ครั้ง ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ที่มีสมบัติเป็นเบส อาจทำให้เกิดสบู่ และตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ที่เป็นกรดมีฤทธิ์กัดกร่อนสูงจึงไม่นิยมนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรม [3]

ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ให้ปริมาณไบโอดีเซลระดับปานกลางถึงสูง แต่ไบโอดีเซลที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง สามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกได้ง่าย ไม่ต้องมีกระบวนการล้างด้วยน้ำ ลดขั้นตอนและต้นทุนการผลิต

นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยารีดิวซ์ยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ทำให้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [4] จากการศึกษาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยารีดิวซ์หลายชนิดสำหรับเตรียมไบโอดีเซล เช่น แคลเซียมออกไซด์ (CaO) [5] แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) [6] โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K₂CO₃) [7] และซิงค์ออกไซด์ (ZnO) [8] เป็นต้น แคลเซียมออกไซด์เป็นสารประกอบที่มีปริมาณมาก และราคาถูก มีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ริเฟเคชันที่ดี เหมาะสมที่นำไปใช้ในการผลิตไบโอดีเซลในระดับอุตสาหกรรม [5] ตัวเร่งปฏิกิริยารีดิวซ์ที่ศึกษาในห้องปฏิบัติการส่วนใหญ่อยู่ในรูปของผงอนุภาคนาโน การนำอนุภาคนาโนตัวเร่งปฏิกิริยาไปใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในระดับอุตสาหกรรมไม่สามารถทำได้ ตัวเร่งปฏิกิริยารีดิวซ์ในระดับอุตสาหกรรมต้องมีรูปทรง เช่น แท่งทรงกระบอกหรือเม็ดกลม มีรูพรุน มีขนาดที่เหมาะสม ไม่ทำให้ความดันของรีแอกเตอร์ลดลงขณะดำเนินการผลิต และแยกออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย [9] เนื่องจากแคลเซียมออกไซด์มีจุดหลอมเหลวสูงถึง 2627 °C การขึ้นรูปโดยการเผาอบผงนี้ไม่สามารถทำได้โดยตรง

งานวิจัยนี้จึงพัฒนาการขึ้นรูปตัวเร่งปฏิกิริยารีดิวซ์แคลเซียมออกไซด์ให้มีรูปทรงคงตัว ขนาด รูพรุน และสามารถเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริเฟเคชันของน้ำมันปาล์มได้ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ผลิตไบโอดีเซลในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

น้ำมันปาล์ม (บริษัทล้ำสูง ประเทศไทย จำกัด มหาชน) ความเป็นกรดเท่ากับ 0.28 mg of KOH/g of oil เมธานอล (99.9% บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี) โซเดียมเตตระโบเรตเดคะไฮเดรต (95.5% บริษัท Merck ประเทศเยอรมัน) แคลเซียมคาร์บอเนต (99.0% บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี) แคลเซียมออกไซด์ (95% บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี) ซิลิกา (95% บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี) เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยารีดิวซ์ C1812 และ C2010 องค์ประกอบดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ร้อยละโดยน้ำหนักขององค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยารีดิวซ์ C1812 และ C2010

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ร้อยละโดยน้ำหนัก		
	CaCO ₃	CaO	SiO ₂
C1812	18.0	12.0	70.0
C2010	20.0	10.0	70.0

ผสมสารตั้งต้นให้เข้ากันโดยบอลมิลล์แบบแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ให้นำมาขึ้นรูปในแบบพลาสติกขนาด 1 cm × 1 cm × 1 cm อัดให้แน่นและกดผิวหน้าให้เรียบ จากนั้นเผาที่อุณหภูมิ 850 °C เป็นเวลา 30 นาที ภายใต้บรรยากาศปกติ

ศึกษาความแรงเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิคแฮมเมทท์อินดิเคเตอร์ [10] ใช้โบรมโมไธมอลบลู (pKa 7.1) ฟีนอลเรด (pKa 7.7) ฟีนอล์ฟธาลิน (pKa 9.5) ไธมอลฟธาลิน (pKa 10.1) อินดิโกคามีน (pKa 12.8) และ 4-ไนโตรอะนิลีน (pKa 15.0) ความแรงของเบสได้จากช่วงของ pKa ของอินดิเคเตอร์ที่เปลี่ยนสีถึงอินดิเคเตอร์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงสี ศึกษาองค์ประกอบเคมีโดยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรเมตรี เครื่อง MagiX PHILIPS ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี เครื่อง Spectrum RXI PERKIN ELMER ศึกษาโครงสร้างผลึกโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เครื่อง X'Pert-MDP PHILIPS ศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดอิเล็กตรอน (SEM) JSM 5410LV JEOL ทดสอบประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริเฟเคชัน โดยผสมตัวเร่งปฏิกิริยารีดิวซ์แคลเซียมออกไซด์ น้ำมันปาล์ม และเมธานอลในขวดกันกลมขนาด 250 mL ดังรูปที่ 1 ใช้อัตราส่วนโดยโมล เมธานอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 18:1 ดำเนินปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 65 °C หาปริมาณไบโอดีเซลโดยใช้เทคนิคโปรตอนเอ็นเอ็มอาร์ ¹H-NMR เครื่อง AVANCE300 BRUKER A.G. ใช้คลอโรฟอร์ม-d₃ เป็นตัวทำละลาย [11]



รูปที่ 1 การสังเคราะห์ไบโอดีเซลโดยตัวเร่งปฏิกิริยา
วิธีพินท์แคลเซียมออกไซด์

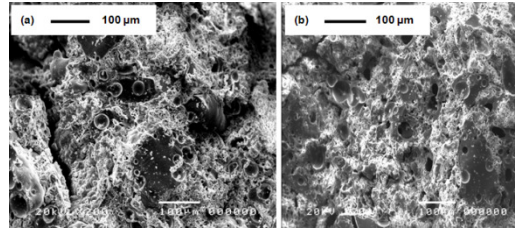
3. ผลการวิจัย

การขึ้นรูปตัวเร่งปฏิกิริยาวิธีพินท์แคลเซียมออกไซด์ ในงานวิจัยนี้อาศัยสมบัติการอ่อนตัวของโซเดียมเตตระโบเรตเคาะไฮเดรต ที่อุณหภูมิมากกว่า $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ โซเดียมเตตระโบเรตมีสถานะคล้ายแก้ว ไหลตัวได้ สามารถยึดอนุภาคซิลิกาและอนุภาคแคลเซียมออกไซด์เข้าด้วยกันทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาคงรูปอยู่ได้ แคลเซียมคาร์บอเนตเมื่อได้รับความร้อนสูงจะสลายตัวให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้เกิดรูพรุนในตัวเร่งปฏิกิริยา รูปที่ 2 แสดงลักษณะกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาวิธีพินท์แคลเซียมออกไซด์ที่เตรียมได้ มีลักษณะเป็นทรงลูกบาศก์ขนาด $1\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ ภาพโครงสร้างจุลภาคพื้นผิวจาก SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยา C1812 และ C2010 แสดงดังรูปที่ 3 พบว่าพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามีรูพรุนขนาดใหญ่ (macroporous) กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ



รูปที่ 2 ภาพถ่ายของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยา
วิธีพินท์แคลเซียมออกไซด์สำหรับเตรียมไบโอดีเซล

จากการศึกษาความแรงเบสโดยใช้เทคนิคแอมเมิท์อินดิเคเตอร์ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองมีความแรงของเบสอยู่ในช่วง 12.8-15.0 มีค่าใกล้เคียงกับความแรงของเบสของอนุภาคนาโนแคลเซียมออกไซด์ที่เตรียมโดยการเผาแคลเซียมคาร์บอเนตที่อุณหภูมิ $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะแก๊สฮีเลียม [5]



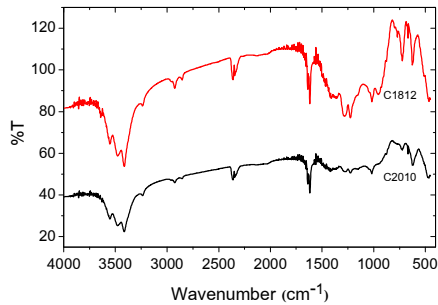
รูปที่ 3 ภาพ SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยา (a) C1812 และ (b) C2010

องค์ประกอบทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาสรุปดังตารางที่ 2 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา C1812 มีองค์ประกอบหลักเป็นอะตอมแคลเซียมประมาณร้อยละ 38.66 โดยน้ำหนัก และอะตอมของออกซิเจนร้อยละ 39.64 โดยน้ำหนัก ตัวเร่งปฏิกิริยา C2010 มีองค์ประกอบหลักเป็นอะตอมแคลเซียมร้อยละ 38.06 โดยน้ำหนัก และมีอะตอมของออกซิเจนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 39.84 โดยน้ำหนัก นอกจากนั้นยังพบธาตุอื่นๆ เจือปนอยู่ในปริมาณเล็กน้อย ไม่เกินร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้โบรอนเป็นธาตุที่มีน้ำหนักเบาจึงไม่สามารถตรวจวัดได้โดยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรเมตรี

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา

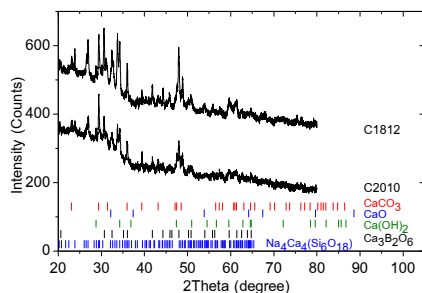
ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	
	C1812	C2010
Si	20.12	20.41
Ca	38.66	38.06
Al	0.50	0.48
Mg	0.47	0.53
P	0.35	0.41
Na	0.19	0.16
K	0.12	0.11
O	39.64	39.84

รูปที่ 4 แสดงสเปกตรากการดูดกลืนคลื่นอินฟราเรดของตัวเร่งปฏิกิริยา C1812 และ C2010 พบว่าสเปกตรากการดูดกลืนของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองแสดงแถบการสั่นของหมู่ฟังก์ชันที่ไม่แตกต่างกัน พบแถบการสั่นแบบยืดหดของ Ca-O ที่เลขคลื่น 630 cm^{-1} แถบการสั่นแบบยืดหดของ C=O ของคาร์บอเนตที่เลขคลื่น 1420 cm^{-1} แถบการสั่นแบบยืดหดของ Si-O-Si ที่เลขคลื่น 1100 cm^{-1} นอกจากนี้ยังพบแถบการสั่นแบบยืดหดของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซี -OH ที่เลขคลื่น $3400\text{-}3550\text{ cm}^{-1}$



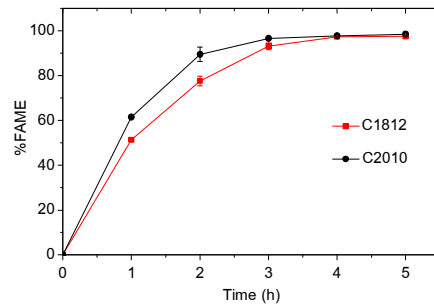
รูปที่ 4 สเปกตรากการดูดกลืนคลื่นอินฟราเรดของตัวเร่งปฏิกิริยา C1812 และ C2010

สเปกตรากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา C1812 และ C2010 แสดงดังรูปที่ 5 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองประกอบด้วยสารประกอบของโลหะแคลเซียม ได้แก่ CaCO_3 (JCPDS NO. 072-1937) CaO (JCPDS NO.077-2010) Ca(OH)_2 (JCPDS NO. 089-2779) $\text{Ca}_3\text{B}_2\text{O}_6$ (JCPDS NO. 048-1885) และ $\text{Na}_4\text{Ca}_4(\text{Si}_6\text{O}_{18})$ (JCPDS NO. 072-1937) แสดงให้เห็นว่าการเผาที่อุณหภูมิ 850 °C สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีส่วนระหว่างสารตั้งต้นได้



รูปที่ 5 สเปกตรากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา C1812 และ C2010 (I แทนตำแหน่งการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จาก JCPDS)

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นทรงลูกบาศก์ขนาด 1 cm × 1 cm × 1 cm (ดูรูปที่ 1) เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองมาทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมธานอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 18:1 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 65 °C ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ร้อยละการเกิดเมธิลเอสเทอร์ (%FAME) เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา C1812 และ C2010 อัตราส่วนโดยโมลเมธานอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 18:1 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 65 °C

พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา C2010 สามารถเร่งปฏิกิริยาได้สมบูรณ์เมื่อดำเนินปฏิกิริยา 3 ชั่วโมงเกิดไบโอดีเซล 97% ขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา C1812 ให้ร้อยละของการเกิดเมธิลเอสเทอร์เท่ากับ 93% ทั้งนี้ตัวเร่งปฏิกิริยา C2010 สามารถเร่งปฏิกิริยาได้เร็วกว่า C1812 อาจเนื่องจากปริมาณของแคลเซียมออกไซด์มีการกระจายตัวบนตัวรองรับที่สม่ำเสมอกว่าทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสแคลเซียมออกไซด์มากกว่า พบว่าเมื่อดำเนินปฏิกิริยา 4 ชั่วโมงตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองให้ร้อยละการเกิดเมธิลเอสเทอร์ใกล้เคียงกัน มีร้อยละการเกิดเมธิลเอสเทอร์มากกว่า 97% และมีแนวโน้มคงที่

จากการศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ผงอนุภาคนาโนแคลเซียมออกไซด์ของ Liu X. และคณะ [4] พบว่าเกิดเมธิลเอสเทอร์ 95% ที่เวลาดำเนินปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะอัตราส่วนโดยโมลเมธานอลต่อน้ำมัน 12:1 ตัวเร่งปฏิกิริยา 8 wt.% อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 65 °C

Kouzu M. และคณะ [5] ใช้ผงอนุภาคนาโนแคลเซียมออกไซด์เตรียมจากการเผาแคลเซียมคาร์บอเนตที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะแก๊สฮีเลียม มีความเป็นเบส 15.5-18.4 ทดสอบปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ที่อุณหภูมิ 65 °C ใช้อัตราส่วนโดยโมลเมธานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 12:1 เกิดไบโอดีเซล 93% เมื่อดำเนินปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง ขณะที่ Huaping Z. และคณะ [12] เตรียมไบโอดีเซลโดยใช้อนุภาคนาโนแคลเซียมออกไซด์ที่มีความเป็นเบสมากกว่า 26.5 เตรียมจากการแช่อนุภาคนาโนแคลเซียมออกไซด์ในสารละลายแอมโมเนียม

คาร์บอนเนต และเผาที่ 900 °C เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง ทดสอบปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน อัตราส่วนโดยโมล เมธานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9:1 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1.5 wt% ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 2.5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70 °C เกิดไบโอดีเซล 93%

เห็นได้ว่าความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้ใกล้เคียงกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีลักษณะเป็นผงอนุภาคระดับนาโนเมตร แต่มีอัตราเร็วปฏิกิริยาช้ากว่า เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา แคลเซียมออกไซด์ที่เตรียมได้ยังมีขนาดใหญเกินไป การพัฒนาที่กำลังดำเนินการ คือ การปรับเปลี่ยนขนาด ตัวเร่งปฏิกิริยาให้เล็กลง และมีรูปร่างที่เหมาะสมขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

4. สรุปและเสนอแนะ

สามารถเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยารูปร่างแผ่นเคลือบ ออกไซด์ของแข็งทรงลูกบาศก์ขนาด 1 cm × 1 cm × 1 cm มีรูพรุน มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันได้ดี เมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลเมธานอลต่อน้ำมัน ปาล์มเท่ากับ 18:1 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 65 °C ให้ร้อยละ การเกิดเมธิลเอสเทอร์มากกว่า 97% เมื่อดำเนินปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี (PERCH-CIC) สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ ทุนอุดหนุนจากสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

6. บรรณานุกรม

- [1] Knothe, G.; Gerpen, J. V. and Krahl, J. 2007. **The Biodiesel Handbook**. 2005. AOCs PRESS.
- [2] Ngamcharussrivichai, C.; Wiwatnimit, W. and Wangnoi, S. "Modified dolomites as catalysts for palm kernel oil transesterification." *J. Mol. Catal. A: Chem.* 276, 24-33.
- [3] Lotero, E.; Yijin, L.; Dora, E. L.; Kaewta, S.; David, A. B. and James, G. G. 2005, "Synthesis of Biodiesel via acid catalyst". *Ind. Eng. Chem. Res.* 4, 5353-5363.
- [4] Liu, X.; He, H.; Wang, Y.; Zhu, S. and Piao, X. 2008, "Transesterification of soybean oil to biodiesel using CaO as a solid base catalyst". *Fuel*. 87, 216-221.
- [5] Kouzu, M.; Kasuno, T.; Tajika, M.; Sugimoto, Y.; Yamanaka, S. and Hidaka, J. 2008, "Calcium oxide as a solid base catalyst for transesterification of soybean oil and its application to biodiesel production". *Fuel*. 87, 2798-2806.
- [6] Wang, L.; Yang, J. 2007, Transesterification of soybean oil with nano-MgO or not in supercritical and subcritical methanol. *Fuel*. 86, 328-333.
- [7] Lukic', I.; Krstic', J.; Jovanovic', D. and Skala, D. 2009, "Alumina/silica supported K₂CO₃ as a catalyst for biodiesel synthesis from sunflower oil". *Bioresour. Technol.* 100, 4690-4696.
- [8] Yang, Z. and Xie, W. 2007, "Soybean oil transesterification over zinc oxide modified with alkali earth metals". *Fuel Process. Technol.* 88, 631-638.
- [9] Wijngaarden, R. I. and et al. 1998. **Industrial Catalysis: Optimizing Catalysts and Processes**. Weinheim: Wiley-VCH.
- [10] Xie, W. and Huang, X. 2005, "Synthesis of biodiesel from soybean oil using heterogeneous KF/ZnO catalyst". *Catalysis Letters*. 107, 53-59.
- [11] Samart, C.; Chaiya, C. and Reubroycharoen, P. 2010, "Biodiesel production by methanolysis of soybean oil using calcium supported on mesoporous silica catalyst". *Energy. Convers. and Manag.* 51, 1428-1431.
- [12] Huaping, Z.; Zongbin, W.; Yuanxiong, C.; Ping, Z.; Shijie, D.; Xiaohua, L. and Zongqiang, M. 2006, "Preparation of Biodiesel Catalyzed by Solid Super Base of Calcium Oxide and Its Refining Process". *Chinese Journal of Catalysis*. 27, 391-396.