

ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์สำหรับไบโอดีเซลน้ำมันปาล์ม และน้ำมันใช้แล้ว

Solid Base Catalysts for Palm Biodiesel and Waste Cooking Oil Biodiesel.

สุภกร บุญยืน สมลักษณ์ เรืองสุทธินฤภาพ ยูภา อำนวยภาณิช ทศนีย์ ทัทกรี

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ศูนย์รังสิต อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12121

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในน้ำมันปาล์มและน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้วเพื่อผลิตไบโอดีเซล และสภาวะที่ใช้ศึกษาเป็นการให้ความร้อนแบบต่อเนื่องเป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่า การใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ให้ร้อยละของผลได้ FAME (Fatty Acid Methyl Ester) หรือไบโอดีเซล 96.33%, 86% ในน้ำมันปาล์มและน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้วตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับออกไซด์ของโลหะชนิดอื่น ๆ นั้น ให้ร้อยละของผลได้ FAME ต่ำกว่า 50% ดังนั้นแคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ที่ดีที่สุดในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน แต่เนื่องจากน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้วมีปริมาณของกรดไขมันอิสระอยู่มาก ทำให้เมื่อใช้แคลเซียมออกไซด์ซึ่งมีค่าความเป็นเบสมากจึงเกิดปฏิกิริยาสะปอนิฟิเคชันขึ้นได้ ผลผลิตเป็นสบู่ ดังนั้นการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้วควรทำผ่านปฏิกิริยา 2 ขั้นตอน คือ ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันเพื่อกำจัดกรดไขมันอิสระ และตามด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันตามลำดับ เพื่อเป็นการป้องกันการเกิดสบู่ และเป็นการส่งผลทำให้ได้ร้อยละของผลได้ FAME มากขึ้นด้วย อีกทั้งแคลเซียมออกไซด์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์นั้น สามารถนำกลับมาใช้งานซ้ำได้

คำสำคัญ: ไบโอดีเซล แคลเซียมออกไซด์ ตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็ง

Abstract

This research aimed to investigate solid base catalyst for biodiesel, transesterification of palm oil and waste cooking oil with methanol refluxing for 4 hours. Using calcium oxide as a solid base catalyst for transesterification of both palm oil and waste cooking oil gave the percentage yield of FAME (fatty acid methyl ester) up to 96.33% and 86%, respectively. Comparing with others metal oxide catalyst, all percentage yields of FAME were below 50%. Indicating calcium oxide is the best solid base catalyst for transesterification methyl ester. Owing to waste cooking oil contained more amount of free fatty acid, so free fatty acid can form soap from saponification process with calcium oxide, resulting the lower methyl ester conversion. Two steps biodiesel processes (esterification and transesterification) can help reduce the labile free fatty acid and improve the conversion of methyl ester. Furthermore, the solid catalyst calcium oxide can be reuse for several times.

Keywords: Biodiesel, Calcium Oxide, Solid Catalyst.

1. บทนำ

(Introduction)

จากวิกฤตการณ์น้ำมันที่แพงขึ้นในปัจจุบัน และภาวะการขาดแคลนน้ำมันซึ่งใช้เป็นเชื้อเพลิง มีแนวโน้มว่าในอนาคตอันใกล้โลกของเราจะมีปริมาณน้ำมันไม่เพียงพอต่อความต้องการของประชากรทั่วโลก เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในการประกอบกิจกรรมต่าง ๆ ดังนั้นในขณะนี้หลายประเทศทั่วโลก รวมทั้งหลาย ๆ หน่วยงานในประเทศไทยกำลังตื่นตัวในการหาแหล่งพลังงานแหล่งใหม่ เพื่อทดแทนน้ำมันที่กำลังจะหมดไป โดยแหล่งพลังงานที่เป็นที่สนใจ และกล่าวถึงมากที่สุดขณะนี้คือ น้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งน้ำมันไบโอดีเซลเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับดีเซล แต่ให้การเผาไหม้ที่สะอาดกว่า ไอเสียที่ออกมามีคุณภาพที่ดีกว่า ทั้งนี้เพราะออกซิเจนในไบโอดีเซลมีมากถึงประมาณมากกว่าถึง 11% จึงช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ทำให้ลดมลพิษต่าง ๆ ลงได้

กระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลนั้นส่วนใหญ่นิยมทำโดยผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ทรานเอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) โดยการทำปฏิกิริยาของน้ำมันจากพืชหรือน้ำมัน/ไขมันที่ได้จากสัตว์ กับแอลกอฮอล์ โดยมีเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ และได้ผลิตภัณฑ์เป็น เอสเตอร์ (Ester) และผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้ คือ กลีเซอรอล (Glycerol) ซึ่งจะเรียกชนิดของไบโอดีเซลแบบเอสเตอร์นี้ตามชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา แต่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในทรานเอสเทอริฟิเคชันนั้น จะก่อให้เกิดน้ำเสียที่เกิดจากขบวนการล้างน้ำมันไบโอดีเซล และน้ำดังกล่าวจะมีสมบัติเป็นเบส ซึ่งส่งผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อม ปัจจุบันมีการศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยารววิพันธ์ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการใช้ตัวเร่งเบสชนิดของแข็ง โดยน้ำมันที่ผ่านขบวนการดังกล่าวจะไม่ต้องผ่านการล้างน้ำ จึงเป็นการลดปัญหาน้ำเสียที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยารววิพันธ์ยังสามารถ

แยกออกจากน้ำมันไบโอดีเซลได้ง่าย รวมทั้งยังสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์นั้นกลับมาใช้งานซ้ำได้

ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้มีการศึกษาการใช้แคลเซียมออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งชนิดเบสในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลือง พบว่าให้ผลผลิตของน้ำมันไบโอดีเซลประมาณ 95 % [1], การใช้ซิงค์ออกไซด์ผสมกับแลนทานัมออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งชนิดเบสในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลือง พบว่าให้ผลผลิตของน้ำมันไบโอดีเซลน้ำมันถั่วเหลืองสูงถึง 96 % [2]

ในปี พ. ศ. 2552 ยังมีงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้สารประกอบออกไซด์ของโลหะจำพวกแคลเซียม แบเรียม แมกนีเซียม และแลนทานัม เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันชนิดเบสในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ได้จากการสกัดออกจากเมล็ดพืชพบว่าให้ผลผลิตของน้ำมันไบโอดีเซลที่แตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับความแรงของตัวเร่งปฏิกิริยาเบสที่เลือกใช้ ซึ่งการเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน รวมทั้งขึ้นกับชนิดของน้ำมันที่นำมาศึกษา อย่างไรก็ตามสมบัติของไบโอดีเซลที่ได้มีสมบัติใกล้เคียงกับการใช้เบสโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาตามที่ได้เคยมีรายงานไว้ [3,4]

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มและน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ของแข็งชนิดเบส เช่นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และออกไซด์ของโลหะบางชนิด (TiO₂, MgO และ CaCO₃) เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด ที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ใน

การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มและน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้ว นอกจากนี้ยังศึกษาสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีของไบโอดีเซลที่เตรียมได้

2. วัสดุและระเบียบวิธีวิจัย

(Materials and Research Methodology)

การตรวจวัดค่าความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งชนิดเบส โดยวิธีการ Indicator method [1] เริ่มต้นจากชั่งตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดมา 0.0500 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร จากนั้น เติมน้ำกลั่นไป 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน แล้วเติมอินดิเคเตอร์ (methylene blue หรือ phenolphthalein) 3-4 หยด เขย่าให้เข้ากัน และทิ้งไว้ประมาณ 2 ชั่วโมง โดยทำการเขย่าเป็นระยะ ๆ สังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีที่เกิดขึ้น และรายงานความแรงของเบสที่ศึกษา

การไทเทรตหาปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันชนิดต่าง ๆ เริ่มต้นจากชั่งโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) มา 0.5644 กรัม ละลายด้วย 2-propanol นำสารละลายข้างต้นเติมลงใน ขวดวัดปริมาตร (volume metric flask) ขนาด 100 ml จากนั้นปรับปริมาตร ด้วย 2-propanol จะได้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มาตรฐานที่มีความเข้มข้น 5.6440 mg/ml ($\sim 1.0079 \times 10^{-1}$ M) แล้วจึง ชั่งน้ำมัน มา 1.0000 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ เติมน้ำ 2-propanol 5 มิลลิลิตร และ phenolphthalein indicator 2 หยด ลงในขวดรูปชมพู่ข้างต้น จากนั้นเขย่าให้เข้ากัน ไทเทรตสารละลายที่ได้ ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มาตรฐานที่เตรียมไว้ โดยสังเกตสีชมพูอ่อนที่จุดยุติทำการทดลองซ้ำอีกสองครั้งแล้วคำนวณหาค่าเฉลี่ยของกรดไขมันอิสระในน้ำมันแต่ละชนิด

การใช้แคลเซียมออกไซด์และออกไซด์ของโลหะชนิดต่าง ๆ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งชนิดเบสในกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มและน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้วชนิดต่าง ๆ เริ่มต้นจากช่วงตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณ 3%wt ของน้ำมัน ลงในขวดก้นกลม ขนาด 50 หรือ 100 มิลลิลิตร เติมนีเมทานอล 10.13 มิลลิลิตรแล้วทำการรีฟลักซ์ ที่อุณหภูมิประมาณ 70 °C แล้วเติมน้ำมัน 20 กรัม ลงไป (ในการทดลองใช้อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา:เมทานอล:น้ำมันในอัตราส่วน 0.3:4:10) ทำการรีฟลักซ์ต่อที่อุณหภูมิเดิมเป็นเวลา 4 ชั่วโมง กรองตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากน้ำมันด้วยการกรองระบบสุญญากาศ จากนั้นระเหยเมทานอลที่เหลือออกจากน้ำมัน และตั้งน้ำมันที่ได้ไว้ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้ไบโอดีเซลและกลีเซอรอลแยกชั้นกันอย่างสมบูรณ์ แยกน้ำมันไบโอดีเซลออกจากกลีเซอรอล และตรวจวัดค่าความเป็นเบสของไบโอดีเซลที่ได้โดยใช้ Universal indicator

น้ำมันที่ได้และผ่านการกรองทำความสะอาดแล้วจะถูกศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของน้ำมันไบโอดีเซล [4] เปรียบเทียบตามวิธีมาตรฐาน เช่น ความหนาแน่น (Density, ASTM D 1298) ความหนืด (Viscosity, ASTM D445) จุดขุ่นตัว (Cloud Point, ASTM D 2500) และจุดไหลเท (Pour Point, ASTM D 97) จุดวาบไฟ (Flash Point, ASTM D 93) และวิเคราะห์ปริมาณการเปลี่ยนเป็นไบโอดีเซลโดยเทคนิค ¹H-NMR Spectroscopy

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

(Results and Discussions)

จากการทดสอบหาค่าความแรงของการเป็นเบส (H_-) ของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดที่ใช้ในการ

ทดลอง โดยใช้วิธีการ Indicator method พบว่าแคลเซียมออกไซด์ (CaO) มีค่าความแรงของการเป็นเบสที่สูง คือ อยู่ในช่วง $13.8 < H_- < 18.4$ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) มีค่าความแรงของการเป็นเบสปานกลาง คือ อยู่ในช่วง $7.2 < H_- < 9.8$ และกลุ่มสุดท้ายคือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) มีค่าความแรงของการเป็นเบสที่ค่อนข้างต่ำ คือ $H_- < 7.2$ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยฉบับก่อนหน้า [1] จากค่าความแรงของความเป็นเบสดังแสดงนี้อาจจะเป็นแนวทางในการคัดเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในขั้นตอนต่อไป

น้ำมันแต่ละชนิดจะมีปริมาณของกรดไขมันอิสระที่แตกต่างกัน และจากการทดสอบหาปริมาณกรดไขมันอิสระ พบว่าน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้ว มีปริมาณของกรดไขมันอิสระมากที่สุด เท่ากับ 13.07 mg KOH/g เมื่อเทียบกับน้ำมันปาล์มซึ่งมีค่าความเป็นกรดเท่ากับ 2.28 mg KOH/g กรดไขมันอิสระที่พบในน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้วเกิดจากปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ รวมทั้งมีสารที่เกิดจากการประกอบอาหารหลายชนิด เช่น สารพีเอเอช (Polycyclic aromatic hydrocarbon, PAHs) สารเอนพีเอเอช (Nitropolycyclic aromatic hydrocarbon, NPAHs) และสารประกอบโพลาร์ต่างๆ เป็นต้น [5] จากการใช้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และโลหะบางชนิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งชนิดเบสในกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันสำหรับผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้วชนิดต่าง ๆ พบว่า ได้ร้อยละการเปลี่ยนเป็นไบโอดีเซล (% Conversion) มีค่าค่อนข้างสูง 96.33% และ 86.00% สำหรับน้ำมันปาล์ม และ น้ำมันใช้แล้วตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 1

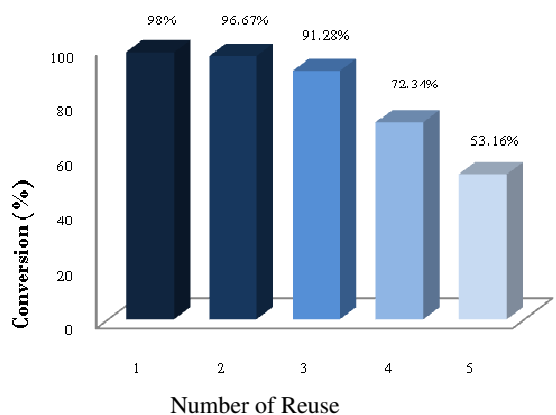
จากผลการทดลองพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นเบสต่ำ เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ แคลเซียมคาร์บอเนต และแมกนีเซียมออกไซด์ไม่สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ โดยจะให้ร้อยละการเปลี่ยนเป็นไบโอดีเซลได้น้อยเมื่อเทียบกับกรณีของแคลเซียมออกไซด์ (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณร้อยละการเปลี่ยนเป็นไบโอดีเซลของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ ในน้ำมัน

ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา	น้ำมันปาล์ม	น้ำมันใช้แล้ว
TiO ₂	44.51	44.33
CaCO ₃	42.82	43.00
MgO	39.88	40.60
CaO	96.33	86.00

ปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันและเกลือบางส่วนที่ปนเปื้อน เกิดปฏิกิริยาเป็นสบู่ พบมากในการใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะแยกเป็น 3 ชั้น โดยชั้นล่างสุดเป็นกลีเซอรอล (มีความหนาแน่นมาก) ชั้นถัดขึ้นมาเป็นสบู่ที่เกิดขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาสaponification และชั้นบนสุดเป็นน้ำมันไบโอดีเซลที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน แต่สำหรับกรณีการใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไม่พบว่ามีกรเกิดเป็นสบู่และน้ำมันไบโอดีเซล ที่เตรียมได้มีสมบัติเป็นกลาง จึงไม่มีความจำเป็นต้องล้างด้วยน้ำ ทำให้สามารถลดปริมาณน้ำทิ้งในระบบได้สอดคล้องกับงานวิจัยที่เคยมีรายงานไว้ [6] ในงานวิจัยนี้ยังได้ทดลองนำตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์กลับมาใช้ใหม่พบว่ายังมีประสิทธิภาพดี สามารถให้

ผลผลิตการเปลี่ยนเป็นไบโอดีเซลมากกว่า 90% จนกระทั่งถึงการใช้งานครั้งที่สามจึงจะทำให้ประสิทธิภาพลดลง ดังแสดงในรูปที่ 1 นอกจากนี้สมบัติทางกายภาพของไบโอดีเซลที่เตรียมได้ ทั้งจากน้ำมันปาล์มและน้ำมันใช้แล้วให้ผลสอดคล้องกับมาตรฐานไบโอดีเซล ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 1 แสดงประสิทธิภาพการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด แคลเซียมออกไซด์

ตารางที่ 2 แสดงสมบัติทางกายภาพของไบโอดีเซลที่ได้

สมบัติทางกายภาพ	มาตรฐานไบโอดีเซล [7]	ไบโอดีเซลน้ำมันปาล์ม	ไบโอดีเซลน้ำมันใช้แล้ว
ความหนาแน่น (Kg/L)	0.8600- 0.9000	0.8788	0.8772
ความหนืด (Cst)	3.500 ถึง 5.000	4.8079	4.5902
จุดขุ่นตัว (°C)	-3.0 ถึง 12.0	11.0	9.5
จุดไหลเท (°C)	-15.0 ถึง 10.0	8.0	6.0
จุดวาบไฟ (°C)	มากกว่า 120	174	188

4. สรุปผล

(Conclusions)

ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับค่าความแรงของการเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยา

นั้น ๆ ถ้าตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าความแรงของการเป็นเบสมาก ก็จะสามารถในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิชั่นมาก ในงานวิจัยนี้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งชนิดเบสที่มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชั่นมากที่สุด โดยให้ %Conversion ของน้ำมันไบโอดีเซลมากถึง 96.33% และ 86.00% ในน้ำมันปาล์มและน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้วตามลำดับ การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้ว ซึ่งเป็นน้ำมันที่มีปริมาณของกรดไขมันอิสระค่อนข้างมาก ควรผ่านกระบวนการทำปฏิกิริยา 2 ขั้นตอน คือ ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชั่นโดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วจึงตามด้วย ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชั่นตามลำดับ เพื่อเพิ่มปริมาณการเปลี่ยนเป็นน้ำมันไบโอดีเซล และลดการเกิดสบู่จากปฏิกิริยาสaponifiเคชั่น สำหรับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งชนิดเบสกับการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชั่นในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลนั้นพบว่าได้น้ำมันที่มีสมบัติเป็นกลางจึงไม่จำเป็นต้องล้างน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้ด้วยน้ำสะอาดรวมทั้งยังสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้งานซ้ำได้ โดยในงานวิจัยนี้พบว่าสามารถนำแคลเซียมออกไซด์ (CaO) กลับมาใช้งานซ้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพได้สูงถึง 3 ครั้ง และสมบัติทางกายภาพของไบโอดีเซลที่เตรียมได้สอดคล้องกับค่ากำหนดมาตรฐานไบโอดีเซล

5. บรรณานุกรม

(References)

[1] สุภกร บุญยืน และอ้อยใจ ทองเนอ, การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของไบโอดีเซลจากวัตถุดิบต่าง ๆ, วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 16 (2); น. 1-6, 2551.

[2] Emin, S.U., Mert, T., Erol, S., Transesterification of *Nannochloropsis oculata* Microalga's Lipid to Biodiesel on Al_2O_3 Supported CaO and MgO Catalysts, Bioresource Technology, Vol. 100, pp. 2828-2831, 2009.

[3] Ayhan, D., Biodiesel from Waste Cooking Oil Via Base-catalytic and Supercritical Methanol Transesterification, Energy Conversion and Management, Vol. 50, pp. 923-927, 2009.

[4] Grandos, M., Alonso, D.M., Alba-Rubio, A.C., Maiscal, R., Ojeda, M. and Brettes, P., Transesterification of Triblyceride by CaO: Increase of the Reaction Rate by Biodiesel Addition, Energy&Fuels, Vol. 23, pp.2259-2263, 2009.

[5] Ma, F., Milford, A.H., Biodiesel Production: A Review, Bioresource Technology, Vol. 70, pp. 1-15, 1999.

[6] Mônica, C.G. A., Diana, C.S. A., Célio L.C.Jr., José, S.-G., Josefa, M. M.-R., Ramón, M.-T., Enrique, R.-C., Antonio, J.-L., Pedro, M.-T., Transesterification of Ethyl Butyrate with Methanol Using MgO/CaO Catalysts, Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, Vol. 300, pp. 19-24, 2009.

[7] Ramadhas, A.S., Jayaraj, S., Muraleedharan, C., Biodiesel Production from High FFA Rubber Seed Oil, Fuel, Vol. 84, 335-340, 2005.