

การใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์บนตัวรองรับถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวางเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว

Using Potassium Hydroxide Supported on Activated Carbon from *Terminalia catappa* fruit as Catalysts for Production of Biodiesel from Used Vegetable Oil

ปัญญา มณีจักร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต

E-mail: panya.m@rsu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์บนตัวรองรับถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวาง (KOH/AC) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ ปัจจัยต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกับเมทานอล 1:5-1:20 โดยใช้ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1-3 โดยน้ำหนักน้ำมัน อุณหภูมิ 80±5 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 1.5-5 ชั่วโมง แล้วศึกษาลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของน้ำมันก่อน และหลังการผลิตไบโอดีเซล จากการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (GC-FID) พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมัน:เมทานอล 1:15 ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์บนตัวรองรับถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้น ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง สามารถผลิตไบโอดีเซลได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เท่ากับร้อยละ 91.05 ค่าความหนืดลดลงจากเริ่มต้น 102.5 ไปเป็น 3.61 cSt ค่าความหนาแน่นเท่ากับ 866.0 Kg/m³ จุดวาบไฟ 167 องศาเซลเซียส ค่ากรดเท่ากับ 0.46 mg KOH/g และค่าไอโอดีนเท่ากับ 2.08 g I₂/100 g น้ำมัน ซึ่งค่าความหนาแน่น ค่าความหนืด ค่ากรด และค่าไอโอดีนของไบโอดีเซลที่ผลิตได้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน

คำสำคัญ: ไบโอดีเซล ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ ถ่านกัมมันต์

ABSTRACT

The aim of this research was to prepare biodiesel from used vegetable oils via transesterification reaction using catalysts-supported activated carbon from *Terminalia catappa* fruit, potassium hydroxide associated with activated carbon (KOH/AC). Factors including molar ratios of oil to methanol were 1:5 - 1:20, amount of catalysts 1 - 3 wt% KOH of the oil. Temperature was controlled at 80 ± 5 °C and the reaction time of 1.5 - 5 hours. Physical and chemical properties of oil and biodiesel were studied. Percentage of fatty acid methyl ester (%FAME) was measured from gas chromatography (GC-FID). It was found from GC-FID that the biodiesel gave 91.05% FAME when using the ratio of oil to methanol of 1:15 with 3wt% KOH of the oil and reaction time 2 hours. Moreover, reduced product viscosity from an initial of 102.5 cSt to a value of 3.61 cSt, the density of 866.0 kg/m³, flash point 167 °C free fatty acid concentrations of 0.46 mg KOH/g and iodine number of 2.08 g I₂/100 g oil were detected. All values followed the standard values.

KEYWORDS: Biodiesel, Heterogeneous catalyst, Activated carbon

บทนำ

ปัจจุบันประชาคมโลกกำลังประสบปัญหาปริมาณน้ำมันดิบที่ลดลง ไม่เพียงพอกับความต้องการในอนาคต และยังมีอัตราการใช้น้ำมันค่อนข้างสูง โดยเฉพาะน้ำมันดีเซลซึ่งใช้สำหรับเครื่องยนต์ในทางเกษตรกรรม และอุตสาหกรรม ประเทศไทยต้องใช้เงินเป็นจำนวนมาก เพื่อนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศไทยในแต่ละปี จึงมีงานวิจัยเพื่อค้นหาแหล่งพลังงานทดแทนน้ำมันไบโอดีเซลที่มีคุณสมบัติคล้ายกับน้ำมันดีเซล เป็นพลังงานหมุนเวียนที่ไม่หมดและยังเป็นเชื้อเพลิงสะอาดสามารถสังเคราะห์ได้จากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ ปัญหาของการนำน้ำมันพืชหรือสัตว์มาใช้แทนน้ำมันดีเซลเลยไม่ได้ คือ การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ น้ำมันพืชและสัตว์มีความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซลซึ่งเกิดจากน้ำมันประกอบด้วยไตรกลีเซอไรด์เป็นจำนวนมาก ซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบหัวฉีดและกระบอกสูบของเครื่องยนต์ได้ ดังนั้นจะต้องลดค่าความหนืดของน้ำมันลงโดยการเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของน้ำมันด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันกับแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล หรือ เอทานอล มีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกรดหรือเบส จะเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันไปเป็นสารแอลคิลเอสเทอร์หรือที่เรียกว่า ไบโอดีเซล ซึ่งมีคุณสมบัติอื่น ๆ ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล (พิสมัย และลลิตา, 2552)

การผลิตไบโอดีเซลสามารถผลิตจากน้ำมันพืชที่ผ่านหรือไม่ผ่านการใช้งาน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์และวิวิธพันธ์ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถใช้ทั้งชนิดกรดและเบส กรดที่นิยมใช้คือกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ส่วนเบสที่นิยมใช้คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) (Agarwal et al., 2012) ได้มีงานวิจัยที่เปรียบเทียบการใช้น้ำมันพืชที่ผ่านและไม่ผ่านการใช้งานมาเป็นสารตั้งต้นในการผลิต รวมทั้งเปรียบเทียบการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดและเบสในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล (พรทิพา, 2557; พงษ์สุตา, 2557) พบว่าน้ำมันที่ผ่านและไม่ผ่านการใช้งานสามารถผลิตน้ำมันไบโอดีเซลได้ในปริมาณที่ไม่แตกต่างกัน และตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดจะต้องใช้อุณหภูมิสูงและใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานกว่า ข้อดีของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด คือ ไม่ต้องกำจัดกรดไขมันอิสระออกก่อนการทำปฏิกิริยา ซึ่งถ้าใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส เมื่อมีกรดไขมันอิสระเป็น

จำนวนมากกว่าร้อยละ 5 จะทำให้เกิดสบู่ในขบวนการผลิต จึงต้องกำจัดกรดไขมันออกก่อน

การเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์และวิวิธพันธ์ มีความแตกต่างกันในขบวนการล้างตัวเร่งออกจากไบโอดีเซล ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์จะต้องใช้น้ำในปริมาณมากในการทำให้ไบโอดีเซลมีสภาวะเป็นกลาง เนื่องจากเกิดปัญหาการละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จึงมีงานวิจัยที่เลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ นำตัวเร่งปฏิกิริยาผสมกับตัวรองรับชนิดต่าง ๆ เช่น ถ่านกัมมันต์ จากกะลามะพร้าว (ไชยยันต์, 2551) (Fadhil et al., 2016) อะลูมินา (Agarwal et al., 2012) ซีโอไลท์ (Srilatha et al., 2012) เป็นต้น ซึ่งสามารถลดการใช้น้ำล้างไบโอดีเซลลง ได้มีงานวิจัยที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์บนตัวรองรับถ่านกัมมันต์ (พงษ์สุตา, 2557) สารละลายกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) และ กรดซัลฟูริกบนตัวรองรับถ่านกัมมันต์ ใช้ปัจจัยต่างๆ ในการศึกษา ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันกับเมทานอล 1:15 และ 1:20 ใช้ปริมาณกรดและเบส ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักน้ำมัน เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง (ไชยยันต์, 2551) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีถ่านกัมมันต์เป็นตัวรองรับสามารถลดปริมาณน้ำที่ใช้ในการล้างไบโอดีเซล ได้น้อยกว่าถึง 2 เท่า ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากลูกหูกวาง (ปัญญา, 2555) เนื่องจากถ่านกัมมันต์ทางการค้ามีราคาค่อนข้างสูง จึงมีความคิดที่จะใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากผลิตผลจากต้นไม้เช่นต้นหูกวาง เพื่อเพิ่มมูลค่าของลูกหูกวางซึ่งยังไม่มีกรนำมาลูกหูกวางมาใช้ประโยชน์มากนัก ในปี พ.ศ. 2558 ผู้วิจัยได้ทำงานวิจัยเพื่อสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้งานแล้ว โดยเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาเบสแก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยมีถ่านกัมมันต์เป็นตัวรองรับ (ปัญญา, 2558) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์บนตัวรองรับถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้น ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมัน:เมทานอล 1:20 สามารถผลิตไบโอดีเซลได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ เท่ากับร้อยละ 88.35 ซึ่งค่าความหนาแน่น ค่าความหนืด และค่าไอโอดีนของไบโอดีเซลที่ผลิตได้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน ยกเว้นค่ากรด ซึ่งในงานวิจัยดังกล่าวใช้ชุดรีฟลักซ์แบบคอลัมน์เดียว ใช้น้ำประปาเป็นน้ำหล่อเย็น ซึ่งมีผลทำให้ใช้ปริมาณเมทานอลมากเกินไป รวมทั้ง

เวลาในการรีฟลักซ์ครั้งที่ 3 ชั่วโมง ซึ่งด้วยปริมาณตัวเร่งที่ใช้ถ้าเพิ่มเวลาในการรีฟลักซ์ก็น่าจะทำให้ได้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์มากกว่านี้ ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ โดยเปรียบเทียบปริมาณเมทิลเอสเทอร์หรือไบโอดีเซลที่เกิดขึ้น โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์บนตัวรองรับถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวาง และเปรียบเทียบปริมาณเบสที่ใช้ในการผลิตในอัตราส่วนร้อยละ 1, 1.5 2 และ 3 โดยน้ำหนักของน้ำมัน เปรียบเทียบปริมาณเมทิลเอสเทอร์จากการใช้ปริมาณเมทานอลในอัตราส่วนที่ต่างกันคือ 1:5 1:10 1:15 และ 1:20 โดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอล เปรียบเทียบเวลาในการทำปฏิกิริยา 1.5-5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 80±5 องศาเซลเซียส (Chongkhong et al., 2007) และศึกษาสมบัติทางกายภาพของไบโอดีเซล เช่น ความหนาแน่น และ ความหนืด จุดวาบไฟ จุดเริ่มไหล จุดหมอก และศึกษาสมบัติทางเคมี เช่น ปริมาณกรดไขมันอิสระ ค่าสะaponนิฟิเคชัน และ ค่าไอโอดีนนมเบอร์ของไบโอดีเซล

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์บนตัวรองรับถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวาง จากนั้นหาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล เช่นอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน และเวลาที่เหมาะสม
2. เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้

ประโยชน์ที่ได้รับ

1. พัฒนาการกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์บนตัวรองรับถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวาง
2. สามารถนำน้ำมันพืชที่ใช้แล้วมาเพิ่มคุณค่าทางเศรษฐกิจ รวมทั้งการนำวัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติมาเพิ่มคุณค่าด้วยการผลิตถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวาง

วิธีดำเนินการวิจัย

1. อุปกรณ์และสารเคมี

- 1) น้ำมันพืชที่ผ่านการใช้แล้ว ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้เป็นน้ำมันปาล์ม ที่ผ่านการใช้ทอดไก่ ยี่ห้อทานตะวัน ร้านค้าหลังมหาวิทยาลัยรังสิต
- 2) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) (AR grade, Fluka)
- 3) เมทานอล (CH_3OH) (99.9% AR grade, Alibaba)
- 4) ถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวาง นำลูกหูกวางมาอบให้แห้งที่ 100 องศาเซลเซียส เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง จากนั้นบดและร่อนให้มีขนาด 400 mesh กระตุ้นด้วยกรดซัลฟูริกร้อยละ 50 โดยมวล อัตราส่วนกรดต่อถ่าน 3:1 โดยมวล เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง ล้างจนเป็นกลาง อบที่ 100 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง (ปัญญา, 2555)
- 5) เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Shimadzu GC-17A, FID)

2. วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันพืชที่ผ่านการใช้งาน

- 1) วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ
วิเคราะห์ค่าความหนาแน่น วิเคราะห์ค่าความหนืดด้วยเครื่อง viscometer (Cole Parmer, Basic)
- 2) วิเคราะห์สมบัติทางเคมี
วิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ (AOAC, 1995) วิเคราะห์ค่าสะaponนิฟิเคชัน (AOAC, 1995) และ วิเคราะห์ค่าไอโอดีน (EN14111)

3. การสังเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

- 1) การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ บนตัวรองรับถ่านกัมมันต์ผสมถ่านกัมมันต์ต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วน 1:1.5 1:2 และ 1:3 โดยมวล โดยละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยน้ำปริมาณเล็กน้อยจากนั้นเติมถ่านกัมมันต์ 10 กรัม คนให้เข้ากันแล้วนำไปอบ ที่ 105 องศาเซลเซียส จนแห้ง

2) สังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยเปรียบเทียบปริมาณเบส อัตราส่วนโดยมวลของเมทานอลต่อน้ำมัน และเวลา

2.1 ชั่งน้ำมันน้ำมันพืชที่ผ่านการใช้งานแล้ว 50.00 กรัม ใส่ในขวดก้นกลมขนาด 500 มิลลิลิตร เติมตัวเร่งปฏิกิริยาตามอัตราส่วนที่เตรียมไว้ในขั้นตอน 1)

2.2 เติมเมทานอลในอัตราส่วน 1:5, 1:10, 1:15., 1:20 (น้ำมันพืช:เมทานอลโดยโมล)

2.3 จากนั้นนำไปรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 80 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5, 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง

2.4 ต่อเข้ากับชุดอุปกรณ์การสังเคราะห์ไบโอดีเซล รีฟลักซ์ตามสภาวะที่กำหนด โดยใช้ น้ำหล่อเย็นอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ต่อคอลัมน์ 2 ชั้น เมื่อรีฟลักซ์ครบตามเวลาที่กำหนด ตั้งของผสมที่ได้ให้เย็นกรองของผสมด้วยการกรองดูค นำของผสมที่กรองได้ใส่กรวยแยก ตั้งไว้ให้เกิดการแยกชั้นของเมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล และไขชั้นล่างซึ่งเป็นกลีเซอรอลออกล้างเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ด้วยน้ำอุ่นอุณหภูมิ 50±5 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดกลีเซอรอล เมทานอล เบส และสิ่งเจือปนออก เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากขั้นตอนนี้มีสีเหลืองขุ่น นำเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ไป ระเหยน้ำออกด้วยเครื่องอังไอน้ำอุณหภูมิ 100±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง จนเมทิลเอสเทอร์มีสีเหลืองใส เก็บเมทิลเอสเทอร์ เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี โดยการทดลองจะแยกเปรียบเทียบปัจจัยดังนี้

- เปรียบเทียบปริมาณเมทานอลในอัตราส่วน 1:5 1:10 1:15 และ 1:20 (น้ำมันพืช:เมทานอล โดยโมล) กับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 1.5 และ 2 โดยมวล เวลารีฟลักซ์ 3 ชั่วโมง

- เปรียบเทียบเวลาในการรีฟลักซ์ 1.5 2 3 4 และ 5 ชั่วโมง กับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 1.5 2 และ 3 โดยมวล ปริมาณเมทานอล 1:15 (น้ำมันพืช:เมทานอล โดยโมล)

- เปรียบเทียบปริมาณเมทานอลในอัตราส่วน 1:5, 1:10 และ 1:15 (น้ำมันพืช:เมทานอล โดยโมล) กับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 โดยมวล เวลารีฟลักซ์ 3 ชั่วโมง

4. วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้

1) วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ

วิเคราะห์ค่าความหนาแน่น วิเคราะห์ค่าความหนืดด้วยเครื่อง viscometer จุดวาบไฟ (Flash Point) ASTM D93 จุดหมอก(Cloud Point) ASTM D2500 จุดเริ่มไหล (Pour Point) ASTM D97

2) วิเคราะห์สมบัติทางเคมี

วิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ (AOAC, 1995) วิเคราะห์ค่าสะaponนิไฟเคชัน (AOAC, 1995) และ วิเคราะห์ค่าไอโอดีน (EN14111)

5. การวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลด้วยวิธีมาตรฐาน EN 14103

วิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี รุ่น Shimadzu GC-17A, flame ionization detector (FID) ความยาวของคอลัมน์ (DB wax) 30 m, เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.32 mm ดีเทคเตอร์แบบ Frame ionization detection (FID) ใช้อุณหภูมิที่ ดีเทคเตอร์ 250 องศาเซลเซียส ใช้ฮีเลียมเป็นแก๊สพาด้วยอัตรา 2 mL/min การฉีดสารตัวอย่างกระทำโดย โหมดแยก (Split mode) ด้วยอัตราการแยกคือ 27 mL/min เพิ่มอุณหภูมิจนเป็น 150 °C เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิ 3°C/min จนถึง 190 องศาเซลเซียส คงที่เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิ 3°C/min จนถึง 220 องศาเซลเซียส คงที่เป็นเวลา 10 นาที

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. ลักษณะทางกายภาพและเคมีของน้ำมันพืชที่ผ่านการใช้งาน

น้ำมันพืชที่ผ่านการใช้งานแล้วเป็นน้ำมันปาล์มที่ผ่านการใช้ทอดไก่ ลักษณะทางกายภาพ น้ำมันพืชมีความหนืดสูงมีสีน้ำตาลเข้ม มีกลิ่นเหม็นหืน นำน้ำมันพืชนี้มาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ และวิเคราะห์สมบัติทางเคมีได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 1

จากตารางที่ 1 พบว่าน้ำมันที่ผ่านการใช้งานจะมีค่าความหนาแน่นและค่าความหนืดสูงกว่าน้ำมันปาล์มดิบเล็กน้อย เป็นเพราะในการทอดน้ำมันได้รับอุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน น้ำที่ออกจากอาหาร เกิดปฏิกิริยา

ไฮโดรไลซิสกับไตรกลีเซอไรด์เป็นกรดไขมันอิสระ จึงทำให้ค่ากรดของน้ำมันสูงขึ้น

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของน้ำมันพืชที่ผ่านการใช้งาน

สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมี	น้ำมันปาล์มดิบเกรด A ผลิตไบโอดีเซลตามมาตรฐาน (พืสมัย และลลิตา, 2552)	น้ำมันปาล์มที่ผ่านการใช้งาน
ค่าความหนาแน่น (kg/m ³)	921-925	933.4
ค่าความหนืด (cSt) (25°C)	80-90	102.5
ค่ากรด (mgKOH/g)	< 11	4.85
กรดไขมันอิสระ (% FFA)	< 5	2.22
สะปอนนิฟิเคชัน (mgKOH/g)	190-209	199.34
ค่าไอโอดีน (g of I ₂ /100 g oil)	< 200	1.93

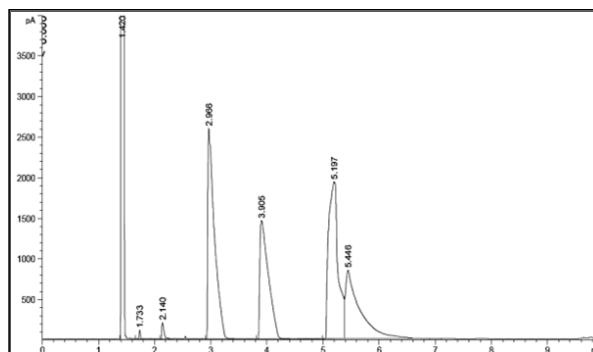
กรดไขมันอิสระจะมีหมู่คาร์บอกซิลิก เป็นหมู่ที่มีขั้วในโมเลกุล เมื่อกรดไขมันอิสระมากขึ้น จึงเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลทำให้น้ำมันมีความหนืดและความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

จากค่าสะปอนนิฟิเคชัน กรดไขมันอิสระ และค่าไอโอดีนของน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้วเทียบกับค่ามาตรฐาน (Sengpracha et al., 2012) พบว่าน้ำมันปาล์มที่ผ่านการใช้งานแล้วมีค่าสะปอนนิฟิเคชันอยู่ในช่วงของน้ำมันปาล์ม แสดงว่าน้ำมันปาล์มที่ผ่านการใช้งานแล้วยังคงมีปริมาณไตรกลีเซอไรด์ไม่แตกต่างจากน้ำมันปาล์มดิบเกรด A ค่ากรดไขมันอิสระและค่าไอโอดีนของน้ำมันที่ผ่านการใช้งานมีค่าอยู่ในเกณฑ์การควบคุม ดังนั้นน้ำมันที่ผ่านการใช้งานนี้สามารถนำมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

2. ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (FAME) โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (GC-FID)

จากการวิเคราะห์ไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มที่ผ่านการใช้งาน ทุกปัจจัยพบว่าจะประกอบไปด้วยเมทิลเอสเทอร์ 6 ชนิด คือ C12:0 C14:0 C16:0

C18:0 C18:1 และ C18:2 (รูปที่ 1 และตารางที่ 2) ซึ่งตรงกับงานวิจัยอื่น (Sengpracha et al., 2012)



รูปที่ 1 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันที่ผ่านการใช้งานโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 3 ของน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีถ่านกัมมันต์เป็นตัวรองรับ ที่อัตราส่วนโดยโมล ของน้ำมันต่อเมทานอล 1:15 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง

ตารางที่ 2 แสดงตัวอย่างปริมาณเมทิลเอสเทอร์ของไบโอดีเซลที่ได้จากน้ำมันที่ผ่านการใช้งาน โดยใช้ KOH ร้อยละ 3 ของน้ำหนักน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีถ่านกัมมันต์เป็นตัวรองรับ ที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอล 1:15 เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง

Peak NO.	Name	Retention time	Area	%FAME
1	Heptane	1.420	1577630	-
2	C12:0	1.733	532.70	0.81
3	C14:0	2.140	20541.5	31.33
4	C16:0	2.966	15513.0	23.66
5	C17:0	3.905	12779.0	-
	ref. peak			
6	C18:0	5.197	9206.89	14.04
7	C18:1, C18:2	5.446	13901.3	21.21
				91.05

3. ปริมาณอัตราส่วนโดยโมลน้ำมัน : เมทานอลที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล

เนื่องจากในงานวิจัยที่ผ่านมา (ปัญญา, 2558) ในการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้น้ำมันพืชที่ผ่านการใช้งานที่ผลิตจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 1.5 และ 2 ของน้ำหนักโดยมีถ่านกัมมันต์รองรับ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมัน: เมทานอล 1:5

1:10 1:15 และ 1:20 นำไปวิเคราะห์ปริมาณเมทิล เอสเทอร์ พบว่าอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมัน: เมทานอล ที่เหมาะสมคือ 1:20 ซึ่งใช้เมทานอลเป็นจำนวนมาก ในงานวิจัยนี้จึงเปลี่ยนชุดรีฟลักซ์ใหม่โดยใช้น้ำหล่อเย็น อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส และคอลัมน์ 2 ชุด ทำการทดลองซ้ำแล้วนำมาวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตจากน้ำมันที่ผ่านการใช้งาน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์ มีถ่านกัมมันต์รองรับ และอัตราส่วนโดยโมล ของน้ำมันต่อเมทานอลต่างๆ เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง

อัตราส่วน โดยโมล น้ำมัน : เมทานอล	ตั้งเร่งปฏิกิริยา KOH มีถ่านกัมมันต์ (wt%)	ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (% FAME) (n=3) $\bar{x} \pm sd$
	1	32.55±0.25
1:5	1.5	41.25±0.32
	2	52.23±0.21
1:10	1	52.36±0.28
	1.5	62.71±0.12
	2	69.55±0.23
	1	60.13±0.22
1:15	1.5	74.21±0.24
	2	84.53±0.23
1:20	1	60.33±0.23
	1.5	70.63±0.20
	2	79.25±0.26

จากตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ จากการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยมีถ่านกัมมันต์เป็นตัวรองรับอัตราส่วนต่างๆ พบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:15 จะได้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงกว่าอัตราส่วน 1:5 1:10 และ 1:20 ทุกความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทฤษฎีปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน อัตราส่วนของไตรกลีเซอไรด์ต่อเมทานอลเป็น 1:3 โดยโมลที่สภาวะสมดุล แต่เนื่องจากจุดเดือดของเมทานอล (64.7 องศาเซลเซียส) ต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการรีฟลักซ์ (80±5 องศาเซลเซียส) ทำให้เมทานอลบางส่วนระเหยออกไปจากระบบ จึงต้องใช้เมทานอลปริมาณที่มากขึ้น อีกประการหนึ่งคือเมื่อเพิ่มปริมาณเมทานอลสูงขึ้น ทำให้ระบบถูกรบกวน สมดุลจะปรับตัว

เพื่อลดปริมาณเมทานอลตามหลักของเลอชาเตอลิเยร์ เกิดผลิตภัณฑ์เป็นเมทิลเอสเทอร์ และกลีเซอรอลมากขึ้น จากผลการทดลองอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่เหมาะสมจึงเป็น 1:15 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่น้อยกว่าที่เคยรายงานไว้ ทั้งนี้เป็นเพราะการเปลี่ยนชุดรีฟลักซ์ใหม่ที่ทำให้เมทานอลหายจากระบบได้น้อยลง

การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยมีถ่านกัมมันต์เป็นตัวรองรับที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักน้ำมัน และใช้อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมัน:เมทานอล 1:15 ที่อุณหภูมิ 80±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมงสามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้ปริมาณมากกว่าทุกสภาวะ ดังนั้นในการทดลองต่อไปจะเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีถ่านกัมมันต์เป็นตัวรองรับเพื่อหาปริมาณตัวเร่ง ปริมาณเมทานอล และเวลาในการรีฟลักซ์ ที่เหมาะสมต่อไป เพื่อให้ได้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์มากที่สุด

4. ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและเวลาที่เหมาะสมในการผลิตเมทิลเอสเทอร์

สังเคราะห์ไบโอดีเซลโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมัน:เมทานอล 1:15 จากน้ำมันพืชที่ผ่านการใช้งาน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1.5 2 และ 3 ของน้ำหนักน้ำมัน ที่มีถ่านกัมมันต์เป็นตัวรองรับ ซึ่งในแต่ละการทดลองจะใช้อุณหภูมิ 80±5 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1.5 2 3 4 และ 5 ชั่วโมง (ตัวเร่งปฏิกิริยา โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มากกว่าร้อยละ 3 ของน้ำหนักน้ำมันไม่สามารถทำได้เพราะไม่เป็นของแข็ง) ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตจากน้ำมันที่ผ่านการใช้งาน โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยมีถ่านกัมมันต์เป็นตัวรองรับเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อัตราส่วน และเวลาต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ (% FAME)		
	KOH 1.5 %	KOH 2 %	KOH 3 %
1.5	49.00	70.73	77.04
2	65.82	76.84	91.05
3	67.35	86.53	77.07
4	75.05	76.22	71.71
5	76.66	66.57	69.49

พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักน้ำมัน สามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ ในปริมาณสูงสุด (ร้อยละ 76.66) ที่เวลา 5 ชั่วโมง ร้อยละ 2 ของน้ำหนักน้ำมัน สามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ในปริมาณ สูงสุด (ร้อยละ 86.53) ที่เวลา 3 ชั่วโมง และที่ร้อยละ 3 ของ น้ำหนักน้ำมัน สามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ในปริมาณสูงสุด (ร้อยละ 91.05) ที่เวลา 2 ชั่วโมงตามลำดับ แสดงว่าถ้าใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่มี ความเข้มข้น สูงขึ้นจะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยลง เพื่อจะทำให้เกิด ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์

5. ปริมาณอัตราส่วนโดยโมลของ น้ำมัน:เมทานอล ต่างๆ ที่เหมาะสมในการผลิตเมทิลเอสเทอร์

เพื่อเป็นการหาปริมาณเมทานอลที่เหมาะสมในการ วิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ ที่ได้จากน้ำมันที่ผ่านการ ใช้ งานแล้ว จึงปรับอัตราส่วนโดยโมลของ น้ำมัน:เมทานอลเป็น 1:5 1:10 และ 1:15 โดยใช้ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่มี ถ่านกัมมันต์เป็นตัวรองรับร้อยละ 3 ของน้ำหนักน้ำมันเป็น ตัวเร่งปฏิกิริยา เวลาในการรีฟลักซ์เป็น 2 ชั่วโมง ได้ผลการ ทดลองดังแสดงในตารางที่ 5

พบว่าเมื่อลดอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมัน : เมทานอลเป็น 1:5 และ 1:10 ส่งผลให้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ ลดลง แสดงว่าในกระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ ที่ได้จาก การทดลองนี้ จะต้องใช้ปริมาณเมทานอล ที่อัตราส่วนโดย โมลน้ำมันต่อเมทานอล 1:15 จึงจะเพียงพอต่อการผลิตเมทิล เอสเทอร์ ซึ่งมากกว่าอัตราส่วนโดยทฤษฎีมาก ทั้งนี้อาจเป็น เพราะยังมีเมทานอลบางส่วนระเหยหายไปจากระบบใน ระหว่างทำการรีฟลักซ์

ตารางที่ 5 ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ ที่ได้จากน้ำมันที่ผ่านการ ใช้ งานแล้วที่อัตราส่วนโดยโมลของ น้ำมัน:เมทานอลต่างๆ

อัตราส่วนโดยมวล น้ำมัน:เมทานอล	ปริมาณเมทิลเอสเทอร์
	(%FAME) $\bar{x} \pm sd (n=3)$
1:5	53.06 \pm 0.02
1:10	75.19 \pm 0.03
1:15	91.05 \pm 0.02

6. การทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของ น้ำมันไบโอดีเซล

นำน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้ที่สภาวะที่ดีที่สุด คือ ใช้ น้ำมันพืชที่ใช้แล้วเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์ บนตัวรองรับถ่านกัมมันต์ร้อยละ 3 โดย น้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมัน:เมทานอล 1:15 ที่อุณหภูมิ 80 \pm 5 องศาเซลเซียส เวลาในการผลิต 2 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและ สมบัติทางเคมีของไบโอดีเซลที่ได้จากน้ำมันพืชที่ใช้งาน แล้ว โดยใช้ น้ำมันต่อเมทานอลเป็น 1:15 อัตราส่วนโดย โมลตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ บนตัว รองรับถ่านกัมมันต์ร้อยละ 3 ของน้ำหนักน้ำมันเวลาใน การรีฟลักซ์ 2 ชั่วโมง

สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมี	ค่ามาตรฐาน น้ำมันไบโอดีเซลของ กรมธุรกิจพลังงาน*	น้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้
ค่าความหนาแน่น (kg/m ³)	860-900	866
ค่าความหนืด(cSt) (25°C)	3.50 – 5.0	3.61
จุดวาบไฟ (°C)	>120	167
จุดเริ่มไหล (°C)	-15 – 10	8
จุดหมอก (°C)	-3 - 12	10
ค่ากรด (mgKOH/g)	< 0.5	0.46
กรดไขมันอิสระ (% FFA)	<0.23	0.21
สะปอนนิฟิเคชัน (mgKOH/g)	-	196.73
ค่าไอโอดีน (g of I ₂ /100 g oil)	< 120	2.08

หมายเหตุ * ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน พ.ศ. 2559

พบว่าการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลด้วยสภาวะนี้ สามารถลดค่าความหนืดของน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้ว 102.5 cSt ไปเป็นค่าความหนืดของน้ำมันไบโอดีเซล 3.61 cSt เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เปลี่ยน เอสเทอร์โมเลกุลใหญ่ ไตรกลีเซอไรด์ไปเป็นเอสเทอร์ โมเลกุลเล็ก เมทิลเอสเทอร์ และจากการทดลองยังพบว่า ค่าความหนาแน่น ค่าความหนืด จุดวาบไฟ จุดเริ่มไหล จุก หมอก ค่ากรด ค่ากรดไขมันอิสระ และค่าไอโอดีนของ

ไบโอดีเซลที่ผลิตได้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบปริมาณเมทิลเอสเทอร์กับงานวิจัยอื่น

งานวิจัย	สภาวะการผลิต	%FAME
งานวิจัยนี้	KOH บนถ่านกัมมันต์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมัน:เมทานอล 1:15 อุณหภูมิ 80± 5°C เวลา 2 ชั่วโมง	91.05
Fadhil et al. (2016)	CH ₃ COOK บนถ่านกัมมันต์ร้อยละ 2.50 โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมล ของน้ำมัน:เมทานอล 1:9 อุณหภูมิ 65°C เวลา 150 นาที	93.21
Agarwal et al. (2012)	KOH บนอะลูมินาร้อยละ 15 โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมัน:เมทานอล 1:9 อุณหภูมิ 70°C เวลา 2 ชั่วโมง	96.8
Li et al. (2012)	Anion resin ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมัน:เมทานอล 1:8 อุณหภูมิ 60°C เวลา 1 ชั่วโมง	92.82
ไชยยันต์ และคณะ (2551)	KOH บนถ่านกัมมันต์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมัน:เมทานอล 1:20 ที่อุณหภูมิ 60± 5°C เวลา 3 ชั่วโมง	98.97

สรุปผลการวิจัย

การผลิตไบโอดีเซลโดยน้ำมันปาล์มที่ใช้งานแล้ว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์บนตัวรองรับถ่านกัมมันต์ที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมล ของน้ำมัน:เมทานอล 1:15 ที่อุณหภูมิ 80± 5 องศาเซลเซียส เวลาในการผลิต 2 ชั่วโมง สามารถผลิตไบโอดีเซลได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ 91.05 มีค่าความหนาแน่น 866.0 Kg/m³ ค่าความหนืด 3.61 cSt จุดวาบไฟ 167 องศาเซลเซียส ค่ากรด 0.46 mg KOH/g และค่าไอโอดีน 2.08 g I₂/100 g น้ำมันพบว่าค่าต่าง ๆ ของไบโอดีเซลที่ผลิตได้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน

ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการรี ฟลักซ์ เพื่อลดปัญหาในการสูญหายของเมทานอล ศึกษาและพัฒนาถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวางให้สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อีก

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณสุรชัย กาญจนาคม ที่ช่วยอนุเคราะห์ในการตรวจวิเคราะห์ค่าเมทิลเอสเทอร์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี สาขาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต ที่กรุณาให้ความสะดวกในการใช้อุปกรณ์ตลอดระยะเวลาการดำเนินงาน

เอกสารอ้างอิง

- ไชยยันต์ ไชยยะ วราภรณ์ ธนะกุลรังสรรค์ ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ. 2551. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วโดยการใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์. รายงานการวิจัยโครงการทุนวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ. หน้า 4-23.
- ปัญญา มณีจักร. 2555. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวาง. วารสารวิชาการสมาคมสถาบันอุดมศึกษาเอกชนแห่งประเทศไทย. 18(1) : 119–128.
- ปัญญา มณีจักร. 2558. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสแก่บนตัวรองรับถ่านกัมมันต์. การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยรังสิต ประจำปี 2558. ปทุมธานี. หน้า 68-77.
- พิสมัย เจนวนิชปัญจกุล และลลิตา อัตนโธ. 2552. รอบรู้เรื่องราวไบโอดีเซล. พิมพ์ครั้งที่ 2. ปทุมธานี: สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.
- พงศ์สุดา พงอ้อ. 2557. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดียมไฮดรอกไซด์บนตัวรองรับถ่านกัมมันต์. การประชุมวิชาการระดับชาติวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีครั้งที่ 2. 21 มีนาคม 2557. ปทุมธานี มหาวิทยาลัยรังสิต. หน้า 69 – 77.

- พรทิมา ทองวิจิตร. 2557. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริกบนตัวรองรับถ่านกัมมันต์. การประชุมวิชาการระดับชาติวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ครั้งที่ 2. 21 มีนาคม 2557. ปทุมธานี มหาวิทยาลัยรังสิต. หน้า 61 – 68.
- Fadhil, A.B., Aziz, M.A. and Altamer, M.H. 2016. Potassium acetate supported on activated carbon for transesterification of new non-edible oil, bitter almond oil. **Fuel**. 170: 130–140.
- Agarwal, M., Chauhan, G., Chaurasia, S.P. and Singh, K. 2012. Study of catalytic behavior of KOH as homogeneous and heterogeneous catalyst for biodiesel production. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**. 43 : 89 – 94.
- Chongkhong, S., Tongurai, C., Chetpattananondh, P. and Bunyakan C. 2007. Biodiesel production by esterification of palm fatty acid distillate. **Biomass and Bioenergy**. 31: 563-568
- Li, J., Fu, Y.J., Wang, W., Luo, M., Zhao, C.J. and Zu, Y.G. 2012. Biodiesel production from yellow horn (*Xanthoceras sorbifolia* Bunge.) seed oil using ion exchange resin as heterogeneous catalyst. **Bioresource Technology**. 108: 112-118.
- Sengpracha, W., Agustin, M.B. and Phutdhawong, W. 2012. A survey on the fatty acid composition of commercial palm oil in Thailand. **Chemical Science Transactions**. 1(3): 612-617.
- Srilatha, K., Prabhavathi Devi, B.L.A., Lingaiah, N., Prasad, R.B.N. and Sai Prasad, P.S. 2012. Biodiesel production from used cooking oil by two-step heterogeneous catalyzed process. **Bioresource Technology**. 119: 306-311.