การเพิ่มความบริสุทธิ์ไบโอดีเซลที่สังเคราะห์จากน้ำมันปาล์มโดยการล้างด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค

อมราภรณ์ แก้วชะฎา*
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร อาหาร และสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ธนพร ไวพานิชการ
นักศึกษา ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร อาหาร และสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2555-2000 ต่อ 4721 อีเมล: akaewchada@yahoo.com
รับเมื่อ 26 มิถุนายน 2557 ตอบรับเมื่อ 7 ตุลาคม 2557
DOI: 10.14416/j.kmutnb.2014.10.001 © 2015 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

ไบโอดีเซลเป็นพลังงานทดแทนที่มีแนวโน้มการใช้งานที่เพิ่มปริมาณขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในกระบวนการผลิตนั้นมักใช้การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้ด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นต้องผ่านการล้างสิ่งเจือปนที่ไม่ต้องการออกจากไบโอดีเซลก่อนการนำไปผสมกับน้ำมันดีเซลเพื่อใช้ในเครื่องยนต์ต่อไป ขั้นตอนการล้างจึงเป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญของกระบวนการผลิตไบโอดีเซล งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้ช่องจุลภาคในการล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำ โดยศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนระหว่างน้ำล้างและไบโอดีเซล (0.8:1.0-10.0:1.0) อุณหภูมิ (อุณหภูมิห้อง -60 องศาเซลเซียส) และเวลาของการสัมผัส (2-10 วินาที) ที่มีต่อความสามารถในการล้าง เมื่อเปรียบเทียบกับการล้างแบบใช้กรวยแยกซึ่งต้องใช้เวลาประมาณ 15 ชั่วโมง พบว่าสำหรับการล้างแบบขั้นตอนเดียวพบว่าการล้างที่อุณหภูมิห้องให้สัดส่วนการกำจัดไฮดรอกไซด์ต่อมิลลิลิตรไบโอดีเซลดีที่สุด แต่ไม่สามารถทำให้ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำล้างก่อนและหลังการล้างมีค่าใกล้เคียงกันได้ จึงต้องใช้การล้างแบบ 2 ขั้นตอน และแบบ 3 ขั้นตอน สำหรับการล้างแบบ 3 ขั้นตอน สามารถใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำล้างต่อไบโอดีเซลเพียง 2.4:1.0 โดยใช้เวลาการสัมผัสรวม 6 วินาที และสามารถใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำล้างต่อไบโอดีเซล 3.0:1.0 โดยใช้เวลาการสัมผัสรวม 12 วินาที สำหรับการล้างแบบ 2 ขั้นตอน ไบโอดีเซลที่ผ่านการล้างโดยใช้ช่องจุลภาคมีคุณสมบัติพื้นฐาน (ความหนืด ความหนาแน่น จุกหมอกควัน จุดไหลเท และค่าความเป็นกรด) ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน

คำสำคัญ: ไบโอดีเซล ช่องจุลภาค การเพิ่มความบริสุทธิ์

การอ้างอิงบทความ: อมราภรณ์ แก้วชะฎา และ ธนพร ไวพานิชการ, "การเพิ่มความบริสุทธิ์ไบโอดีเซลที่สังเคราะห์จากน้ำมันปาล์มโดยการล้างด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 25, ฉบับที่ 1, หน้า 127-135, ม.ค. - เม.ย. 2558. http://dx.doi.org/10.14416/j.kmutnb.2014.10.001

Purification of Biodiesel Synthesized from Palm Oil by Washing in a Microtube Reactor

Amaraporn Kaewchada*
Assistant Professor, Department of Agro-Industrial, Food and Environmental Technology, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

Tanaporn Waipanichakarn
Student, Department of Agro-Industrial, Food and Environmental Technology, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0-2555-2000 Ext. 4721, E-mail: akaewchada@yahoo.com
Received 26 June 2014; Accepted 7 October 2014
DOI: 10.14416/j.kmutnb.2014.10.001 © 2015 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

The utilization trend of biodiesel, an alternative energy, has been continuingly increased. The production process included transesterification by using acid or base catalyst. The product must then be washed thoroughly in order to remove impurities from biodiesel before being blended with diesel fuel for diesel engine. Therefore, washing step is an important process for biodiesel production. This research applied a microtube for washing biodiesel with deionised water. The study concentrated on the effect of volumetric ratio between water and biodiesel at 0.8:1.0-10.0:1.0, with the room temperature at 60 degree C and the contact time at 2-10 seconds on the washing performance. The experiment compared with the normal washing requiring approximately 15 hours using separator funnel. Results from the single-step washing suggested that biodiesel washing should be performed at room temperature. However, the single-step washing could not decrease the pH value difference. Therefore, 2-step and 3-step washing were applied. For the 3-step washing, the volumetric ratio was 2.4:1.0 with the total contact time of 6 seconds. The 2-step washing required a slightly higher ratio of 3.0:1.0 and the total contact time of 12 seconds. Moreover, the basic fuel properties (viscosity, density, cloud point, pouring point, and pH value) of the purified biodiesel met the standard of Department of Energy Business.

Keywords: Biodiesel, Microtube, Purification

Please cite this article as: A. Kaewchada and T. Waipanichakarn, "Purification of Biodiesel Synthesized from Palm Oil by Washing in a Microtube Reactor," *J. KMUTNB*, Vol. 25, No. 1, pp. 127-135, Jan. - Apr. 2015 (in Thai). http://dx.doi.org/10.14416/j.kmutnb.2014.10.001

1. บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการในการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้น ประกอบกับปริมาณของน้ำมันปิโตรเลียมที่ขุดเจาะได้นั้นมีแนวโน้มที่จะหมดไปในอนาคต จึงอาจทำให้เกิดปัญหาการขาดแคลนน้ำมันเชื้อเพลิงและวัตถุดิบในการผลิต อีกทั้งราคาน้ำมันดิบในต่างประเทศก็มีแนวโน้มสูงขึ้นเนื่องจากปัญหาทางการเมืองในต่างประเทศ ส่งผลให้ราคาน้ำมันเชื้อเพลิงมีแนวโน้มสูงขึ้น ในปี พ.ศ. 2554 ราคาขายปลีกน้ำมันดีเซลเฉลี่ยต่อปี 29.44 บาท ปี พ.ศ. 2555 ราคาขายปลีกน้ำมันดีเซลเฉลี่ยต่อปี 33.17 บาท และในปี พ.ศ. 2556 ก็มีแนวโน้นที่จะสูงขึ้น [1] จึงมีความพยายามค้นหาแหล่งพลังงานทดแทนทางเลือกอื่นๆ ซึ่งรวมไปถึงไบโอดีเซลด้วยเช่นกัน

กรรมวิธีที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ เช่น กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อน (Thermal Cracking or Pyrolysis) เป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยใช้ความร้อนสูงถึง 450-850 องศาเซลเซียสภายใต้สภาวะอับอากาศหรือออกซิเจน [2] ในระบบนี้อาจมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยในการสลายพันธะในโครงสร้างโมเลกุลของสารตั้งต้นให้กลายเป็นสารผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ [3] ได้แก่ อัลเคน อัลคีน กรดคาร์บอกซิลิก อะโรมาติกและผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส วัตถุดิบที่นำมาใช้ได้คือน้ำมันพืช ไขสัตว์ กรดไขมัน ซากสิ่งมีชีวิต เป็นต้น นอกจากนี้ไบโอดีเซลสามารถผลิตได้จากกระบวนการทางเคมี คือปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ซึ่งสามารถใช้สารตั้งต้นน้ำมันที่แตกต่างกันได้ เช่น น้ำมันเมล็ดเรพ [4] น้ำมันคาโนลา [5] น้ำมันจากเมล็ดสบู่ดำ น้ำมันจากเมล็ดฝ้าย [6] และน้ำมันพืชใช้แล้ว [7] เป็นต้น โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนมากมักเลือกใช้สารประกอบอัลคอกไซด์และไฮดรอกไซด์ของโลหะอัลคาไลน์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [8] การใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะนิยมใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) หรืออาจจะใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ ได้ผลิตภัณฑ์คือเอสเทอร์และกลีเซอรอล [9] เมื่อแยกกลีเซอรอลออกหลังจากทำปฏิกิริยาแล้วจะได้ไบโอดีเซลที่ยังคงมีสารตกค้างอื่นปะปนอยู่ เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยา สบู่ แอลกอฮอล์และกลีเซอรอลที่หลงเหลืออยู่บางส่วน หากนำไปใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลจะทำให้เกิดความเสียหายได้ ดังนั้นการเพิ่มความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลจึงถือเป็นกระบวนการหนึ่งที่สำคัญในการผลิตไบโอดีเซล ตามมาตรฐาน EN 14130 ของกรมธุรกิจพลังงานไบโอดีเซลต้องมีค่าความบริสุทธิ์ของเมทิลเอสเทอร์ไม่ต่ำกว่า 96.5 เปอร์เซ็นต์

การเพิ่มความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้แมกนีเซียมซิลิเกตเป็นสารดูดซับ การใช้แผ่นเมมเบรนเป็นตัวกรอง การประยุกต์ใช้ดินพอกในกระบวนการล้างไบโอดีเซล [10] เป็นต้น ซึ่งวิธีการต่างๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้นนี้มีขั้นตอนวิธีการที่ค่อนข้างยุ่งยากและต้องลงทุนสูง วิธีที่จะทำได้สะดวกคือการใช้น้ำเป็นตัวชะล้าง (Water Washing) เนื่องจากน้ำเป็นของเหลวที่ไม่สามารถรวมตัวกับไบโอดีเซล แต่สามารถชะล้างสิ่งสกปรกออกมาได้ อย่างไรก็ตามการใช้น้ำเป็นตัวชะล้างก็ยังคงพบปัญหาตามมาคือ การล้างจนกระทั่งได้ไบโอดีเซลที่มีความบริสุทธิ์ตามมาตรฐานที่กำหนด จะต้องใช้น้ำปริมาณมาก ใช้เวลานานในการล้าง และทำให้เกิดปัญหาน้ำเสียตามมา จึงมีงานวิจัยต่างๆ ที่สนใจศึกษาการเพิ่มความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลด้วยวิธีต่างๆ เพื่อลดปริมาณน้ำที่ใช้ในการล้างไบโอดีเซล

ในระบบการล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำนั้นจะเกิดการถ่ายโอนมวลข้ามจากวัฏภาคไบโอดีเซลไปยังวัฏภาคน้ำ พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคนับเป็นตัวกำหนดอัตราการถ่ายโอนมวลดังกล่าว หากมีพื้นผิวสัมผัสต่อปริมาตรสูงจะทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลได้ดี อุปกรณ์ที่ใช้ล้างไบโอดีเซลจะส่งผลโดยตรงต่อการสร้างพื้นผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคและความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล การเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การกวนผสมด้วยใบกวน (Agitation) การใช้อุปกรณ์ช่วยผสมแบบอยู่กับที่ (Static Mixer) หรือการใช้แรงสั่นสะเทือนความถี่สูง (Ultrasonic Vibration) เป็นต้น ช่องจุลภาคนับเป็นอุปกรณ์

แบบใหม่ที่ช่วยให้เกิดพื้นผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคได้ดี มีลักษณะเป็นช่องขนาดเล็กกว่า 1 มิลลิเมตร สามารถรองรับกำลังการผลิตที่สูงได้โดยการเพิ่มจำนวนช่อง (Numbering up) โดยปรากฏการณ์ของการถ่ายโอน และหรือปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในแต่ละช่องนั้นเหมือนกัน ยกตัวอย่าง Peiyong และคณะ [6] ศึกษาการสังเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยน้ำมันที่สกัดจากเมล็ดฝ้ายเป็นน้ำมันตั้งต้นโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนล โดยได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตัวช่วยในการผสมต่างชนิดกัน Zhenzhong และคณะ [x] ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันระหว่างน้ำมันถั่วเหลืองกับเมทานอลโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคที่มีรูปทรงทางเรขาคณิตเป็นรูปฟันปลาเป็นต้น

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำโดยใช้ช่องจุลภาค ตัวแปรที่ศึกษาคืออัตราส่วนระหว่างไบโอดีเซลต่อน้ำล้าง เวลาของการสัมผัส และอุณหภูมิ รวมทั้งจำนวนครั้งการล้าง จากนั้นทำการวัดคุณสมบัติเบื้องต้นตามเกณฑ์มาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน

2. วัตถุดิบและวิธีการทดลอง

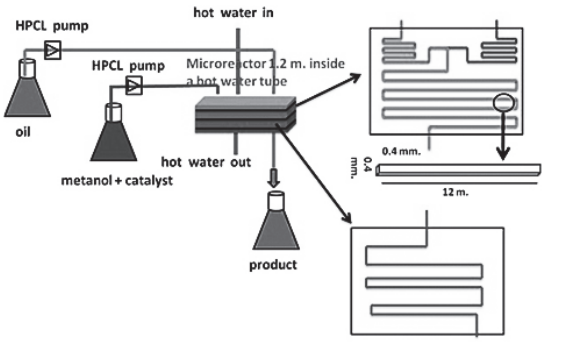
2.1 วัตถุดิบ

น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ยี่ห้อมรกต เมทานอล AR Grade จาก Merck ฟีนอล์ฟทาลีน AR Grade จาก Ajax Finechem Pty Ltd. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ AR grade จาก Quality Reagent Chemical Product ไอโซโพรพานอล AR Grade จาก Merck และน้ำกลั่นปราศจากประจุ

2.2 วิธีการทดลอง

2.2.1 การสังเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค

ติดตั้งท่อขนาดเล็กสำหรับนำสารเข้าทำปฏิกิริยาทั้งสองสาย (สายหนึ่งสำหรับเมทานอลและอีกสายหนึ่งสำหรับน้ำมันปาล์ม) โดยนำปลายท่อด้านหนึ่งของแต่ละสายต่อกับปั๊มแรงดันสูง และปลายท่ออีกด้านหนึ่งต่อกับช่องจุลภาคขนาดพื้นที่หน้าตัด 0.4 มม. × 0.4 มม. ความยาว 1.2 ม. เพื่อให้เกิดการผสมกันของเมทานอล ตัวเร่งปฏิกิริยาและน้ำมันปาล์ม พร้อมทั้งติดตั้งท่อสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ออกจากช่องจุลภาค ระบบนี้มีการควบคุมอุณหภูมิโดยติดตั้งท่อน้ำร้อนจากปั๊มน้ำร้อนเข้าสู่แผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนที่ประกบอยู่กับแผ่นช่องจุลภาค (รูปที่ 1) สภาวะที่ใช้สังเคราะห์ไบโอดีเซลคือ อัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 6:1 ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมัน ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 วินาที เมื่อได้ผลิตภัณฑ์ในปริมาณที่ต้องการแล้วนำไปใส่ในกรวยแยก ทำการไขกลีเซอรอลที่อยู่ชั้นล่างออก จากนั้นนำเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ไปศึกษาการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ต่อไป



รูปที่ 1 การสังเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค

2.2.2 การเพิ่มความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล

2.2.2.1 การล้างไบโอดีเซลด้วยกรวยแยก

นำไบโอดีเซลที่แยกกลีเซอรอลออกแล้วปริมาณ 100 มิลลิลิตรใส่ในกรวยแยกขนาด 200 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำกลั่นปราศจากประจุ (Deionized Water) อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ในกรวยแยก เขย่าและตั้งทิ้งไว้ 15 นาที จากนั้นไขน้ำล้างด้านล่างออกเพื่อนำไปวัดค่าความเป็นกรด-เบส และทำซ้ำจนกระทั่งค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำล้างมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงในการล้างครั้งถัดไป

2.2.2.2 การล้างไบโอดีเซลโดยเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค

ระบบอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาการล้างไบโอดีเซลนี้เป็นระบบที่คล้ายคลึงกับระบบที่ใช้สังเคราะห์ไบโอดีเซล แต่สารป้อนทั้งสองคือน้ำกลั่นปราศจากประจุและไบโอดีเซลที่ต้องการล้าง การดำเนินงานของระบบเริ่มจากการป้อนไบโอดีเซลที่แยกกลีเซอรอลแล้วและน้ำกลั่นปราศจากประจุเข้าไปในช่องจุลภาคโดยปรับอัตราส่วนของไบโอดีเซลต่อน้ำ DI ด้วยการกำหนดอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ปั๊มแรงดันสูงตามที่ต้องการ เมื่อได้ผลิตภัณฑ์ออกทางปลายท่อแล้วนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที เพื่อแยกน้ำล้างออกจากไบโอดีเซล วัดค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำล้าง ทำซ้ำจนกระทั่งค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำล้างเท่ากับค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำกลั่นปราศจากประจุ

2.2.3 วัดขนาดหยดวัฏภาคของไบโอดีเซล

หยดของผสมที่ออกมาจากปลายท่อทางออกของช่องจุลภาคลงบนกระจกสไลด์ปิดทับด้วยกระจกปิดสไลด์ แล้วนำไปส่องกล้องจุลทรรศน์โดยใช้กำลังขยาย 400 เท่า จากนั้นบันทึกภาพหยดวัฏภาคของไบโอดีเซลที่ได้จากสภาวะดำเนินการต่างๆไว้เพื่อเปรียบเทียบ

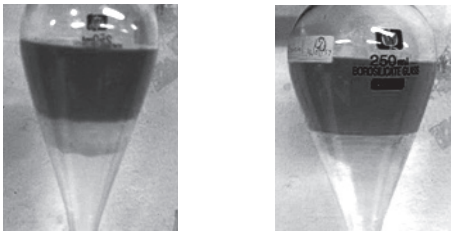
2.2.4 ศึกษาคุณสมบัติของไบโอดีเซล

นำไบโอดีเซลที่ผ่านการล้างแล้วมาตรวจสอบคุณสมบัติเบื้องต้น ได้แก่ ค่าความหนืดตามมาตรฐาน ASTM D 445 ค่าความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM D 1298 ค่าความเป็นกรดตามมาตรฐาน ASTM D 664 จุดหมอกควันและจุดไหลเทตามมาตรฐาน 6751

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 การล้างไบโอดีเซลด้วยกรวยแยก

เมื่อไบโอดีเซลแยกชั้นกับน้ำล้างแล้วจะได้สารละลายที่แบ่งออกได้เป็น 3 ชั้น (ดังรูปที่ 2 a) ชั้นล่างสุดมีลักษณะสีใส ชั้นกลางมีลักษณะขาวขุ่นคล้ายสบู่ และชั้นบนสุดคือไบโอดีเซลมีลักษณะสีเหลืองขุ่นเล็กน้อย เมื่อทำการล้างไบโอดีเซลต่อไปจนกระทั่งน้ำล้างไบโอดีเซล



(a) (b)

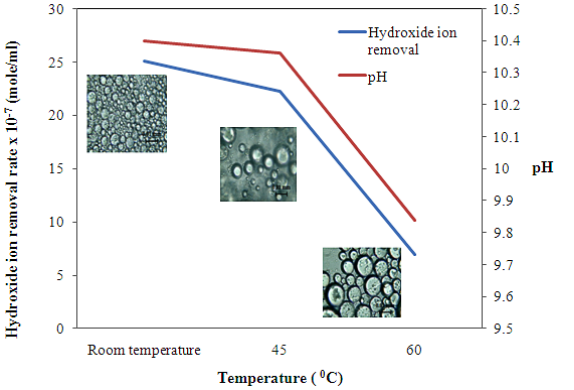
รูปที่ 2 การล้างไบโอดีเซลด้วยกรวยแยก: (a) การล้างไบโอดีเซลครั้งที่ 1 (b) การล้างไบโอดีเซลครั้งที่ 20

มีค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับขณะก่อนนำมาล้างไบโอดีเซล พบว่าสารละลายจะแบ่งออกเป็น 2 ชั้นอย่างชัดเจน (ดังรูปที่ 2 b) ชั้นล่างมีลักษณะเป็นสีใส และชั้นบนเป็นไบโอดีเซลมีสีเหลืองใส ทำการล้างทั้งหมด 20 ครั้ง แต่ละครั้งใช้ปริมาณน้ำล้าง 100 มิลลิลิตรต่อไบโอดีเซล 200 มิลลิลิตร ดังนั้นปริมาณน้ำที่ใช้ทั้งหมด 2 ลิตร คิดเป็นอัตราส่วนปริมาตรระหว่างน้ำล้างและไบโอดีเซล 10:1 และใช้เวลาในการล้างไบโอดีเซลทั้งหมดประมาณ 15 ชั่วโมง

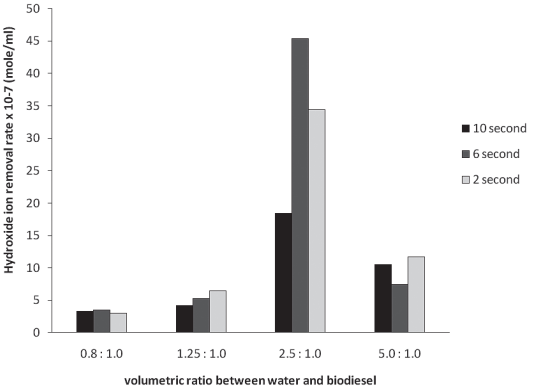
3.2 การล้างไบโอดีเซลด้วยช่องจุลภาค

3.2.1 ผลของอุณหภูมิ

เพื่อเปรียบเทียบกับผลการล้างไบโอดีเซลในหัวข้อ 3.1 จึงกำหนดอัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างน้ำล้างและไบโอดีเซลเป็น 10:1 สำหรับชุดการทดลองแรกของการล้างไบโอดีเซลโดยใช้ช่องจุลภาค และศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิการล้างไบโอดีเซลโดยใช้ช่องจุลภาคที่อุณหภูมิห้อง 45 และ 60 องศาเซลเซียส เวลาในการสัมผัส 2.10 วินาที ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 3 แกนตั้งด้านขวาเป็นค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำที่ได้หลังการล้างไบโอดีเซล พบว่าค่าความเป็นกรด-เบสมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการล้างให้สูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เมื่อคำนวณสัดส่วนปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนต่อปริมาณไบโอดีเซลจะได้เป็นแนวโน้มเดียวกัน ทั้งนี้สอดคล้องกับการสังเกตขนาดหยดวัฏภาคที่เกิดขึ้น (แสดงในรูปเล็กที่วางอยู่ในรูปที่ 3 สำหรับผลการทดลองแต่ละอุณหภูมิ) กล่าวคือที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3 ผลของอุณหภูมิต่อความเป็นกรดเบสของน้ำล้าง (อัตราส่วนของน้ำล้างต่อไบโอดีเซล 10:1)



รูปที่ 4 ผลของอัตราส่วนระหว่างน้ำล้างต่อไบโอดีเซลที่มีต่อการกำจัดไฮดรอกไซด์ไอออน

เมื่อทั้งไบโอดีเซลและน้ำผสมกันในช่องจุลภาค ได้เป็นหยดวัฏภาคขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับหยดวัฏภาคที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งได้หยดวัฏภาคที่มีขนาดเล็กลงตามลำดับ คาดว่าเป็นผลจากความหนืดที่ลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งทำให้การถ่ายโอนมวลจากวัฏภาคไบโอดีเซลไปยังน้ำจึงเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วเนื่องจากมีพื้นที่ผิวระหว่างวัฏภาคปริมาณมาก ส่งผลให้น้ำล้างมีค่าความเป็นกรด-เบสที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นการล้างไบโอดีเซลที่อุณหภูมิห้องจึงทำได้ดีกว่าที่อุณหภูมิสูง ทั้งนี้การเกิดผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคน้ำและน้ำมันนั้นมีข้อจำกัดจากระบบที่ใช้เป็นอย่างมาก เช่น การเขย่า การกวนด้วยใบกวน ฯลฯ จะเห็นได้ว่าการอาศัยจุดเด่นของช่องจุลภาคที่ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสามารถช่วยลดระยะเวลาที่ต้องใช้ในการล้างไบโอดีเซลลงได้มากเมื่อเปรียบเทียบกับการล้างแบบทั่วไป

3.2.2 ผลของอัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างน้ำล้างต่อไบโอดีเซล

ด้วยลักษณะการสัมผัสระหว่างน้ำล้างและไบโอดีเซลในช่องจุลภาคที่เกิดเป็นหยดวัฏภาคขนาดเล็กละเอียด จึงศึกษาความเป็นไปได้ที่จะลดปริมาณน้ำที่ต้องใช้ล้างไบโอดีเซลลงโดยทำการทดลองล้างไบโอดีเซลด้วยอัตราส่วนระหว่างน้ำล้างต่อไบโอดีเซลในช่วง 0.8:1.0 ถึง 5.0:1.0 ทั้งหมดทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4 พบว่าการล้างโดยใช้ที่อัตราส่วนระหว่างน้ำล้างต่อไบโอดีเซลเดียวกันแต่มีเวลาในการสัมผัสแตกต่างกัน (อัตราการไหลรวมแตกต่างกัน) ส่งผลต่อสัดส่วนปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนต่อปริมาณไบโอดีเซลเพียงเล็กน้อย ยกเว้นกรณีที่สัดส่วนระหว่างน้ำล้างต่อไบโอดีเซลเป็น 2.5:1.0 ซึ่งให้ผลการล้างที่แตกต่างกันมาก สำหรับที่เวลาการสัมผัส 6 วินาที ให้ค่าสัดส่วนการกำจัดไฮดรอกไซด์สูงถึง 45 โมลต่อมิลลิลิตรไบโอดีเซล ทั้งนี้ที่สภาวะดังกล่าวเกิดหยดวัฏภาคที่มีขนาดเล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่อัตราส่วนเดียวกันแต่เวลาการสัมผัสเป็น 2 และ 10 วินาที

จากผลการทดลองข้างต้น เป็นการล้างไบโอดีเซลในขั้นตอนเดียว ซึ่งไม่สามารถจะทำให้ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำล้างเป็นกลางได้ จึงนำสภาวะที่สามารถกำจัดไฮดรอกไซด์ไอออนได้ดีที่สุดมาศึกษาต่อโดยใช้การล้างแบบอนุกรม 3 ขั้นตอน คือ ไบโอดีเซลที่ผ่านการล้างจากขั้นตอนที่ 1 จะถูกนำมาล้างด้วยน้ำกลั่นปราศจากประจุใหม่ในขั้นตอนที่ 2 เมื่อแยกไบโอดีเซลออกจะนำไปล้างอีกครั้งในขั้นตอนที่ 3 โดยศึกษาถึงผลกระทบของอัตราส่วนระหว่างน้ำล้างต่อไบโอดีเซลและเวลาของการสัมผัสที่มีต่อความเป็นกรด-เบสของน้ำล้าง ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 1 พบว่าการล้างไบโอดีเซลในทุกๆ

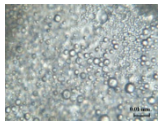
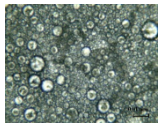
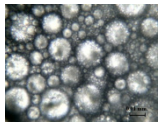
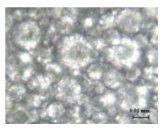
อัตราส่วนระหว่างน้ำล้างต่อไบโอ-ดีเซลจะต้องทำการล้างถึงสามครั้ง จึงจะทำให้ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำล้างมีค่าเท่าหรือใกล้เคียงกับค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำกลั่นปราศจากประจุ ยกเว้นที่อัตราส่วน 2.5:1.0 ที่อัตราการไหล 1.92(1.37:0.55) มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าสามารถใช้การล้างไบโอดีเซลเพียงสองครั้งเท่านั้น อย่างไรก็ตาม สัดส่วนปริมาณเชิงปริมาตรของน้ำล้างที่ต้องใช้ทั้งหมดต่อไบโอดีเซลคือ 5.0:1.0 แต่ถ้าพิจารณาที่อัตราส่วนน้ำล้างต่อไบโอดีเซล 0.8:1.0 พบว่าต้องทำการล้าง 3 ครั้ง ทำให้ปริมาณน้ำล้างทั้งหมดต่อไบโอดีเซลเท่ากับ 2.4:1.0 โดยปริมาตร อย่างไรก็ตาม การล้างแบบ 3 ขั้นตอนทำให้ต้องมีการแยกวัฏภาคน้ำและน้ำมันภายหลังการล้างถึง 3 ครั้งตามไปด้วย

ตารางที่ 1 การล้างไบโอดีเซลแบบ 3 ขั้นตอนที่อุณหภูมิห้อง

น้ำล้าง : ไบโอดีเซล	อัตราการไหลระหว่างน้ำล้าง : ไบโอดีเซล (มิลลิลิตร : นาที)	เวลาที่ใช้ล้าง (วินาที)	ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำล้าง		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0.8 : 1.0	1.15	10	10.61	7.83	7.04
0.8 : 1.0	1.92	6	10.64	7.46	7.03
0.8 : 1.0	5.76	2	10.58	7.77	7.04
1.25 : 1.0	1.15	10	10.52	7.68	7.03
1.25 : 1.0	1.92	6	10.62	7.50	7.03
1.25 : 1.0	5.76	2	10.71	7.44	7.02
2.5 : 1.0	1.15	10	10.87	7.07	7.03
2.5 : 1.0	1.92	6	11.26	7.02	7.02
2.5 : 1.0	5.76	2	11.14	7.06	7.02
5.0 : 1.0	1.15	10	10.32	7.06	7.02
5.0 : 1.0	1.92	6	10.17	7.16	7.02
5.0 : 1.0	5.76	2	10.37	7.16	7.02

เวลาการสัมผัสระหว่างน้ำล้างและไบโอดีเซลมีความสัมพันธ์กับขนาดของระบบการล้าง การล้างที่ใช้เวลาการสัมผัสน้อยจะทำให้ได้ระบบที่มีขนาดเล็กกว่า เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราการป้อนเดียวกัน จากผลการทดลองที่ผ่านมาจะเห็นว่าการล้างในครั้งที่ 1 ด้วยอัตราส่วนระหว่างน้ำล้างต่อไบโอดีเซล 2.5:1.0 จะให้ผลการกำจัดไฮดรอกไซด์ได้ดีที่สุด ดังนั้นชุดการทดลองถัดไปคือการล้างแบบ 2 ขั้นตอน คือขั้นแรกเป็นการใช้อัตราส่วนดังกล่าว ส่วนในขั้นที่ 2 เป็นการล้างด้วยสัดส่วนระหว่างน้ำล้างต่อไบโอดีเซลในช่วง 0.5:1.0 ถึง 0.3:1.0 ทั้งนี้เพื่อให้ปริมาณน้ำรวมของการล้างทั้ง 2 ขั้นตอนจะไม่เกิน 3.0:1.0 โดยเวลาในการสัมผัสของทั้ง 2 ขั้นตอนเป็น 6 วินาที ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2 พบว่าการล้างไบโอดีเซลครั้งที่สองด้วยอัตราส่วน 0.5:1.0 สามารถล้างไบโอดีเซลให้น้ำล้างมีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่าหรือใกล้เคียงกับน้ำกลั่นปราศจากประจุ แต่ที่อัตราส่วน 0.4:0.1 และ 0.3:1.0 ไม่สามารถล้างไบโอดีเซลให้สะอาดได้ โดยเมื่อพิจารณาขนาดหยดวัฏภาค จะสังเกตุเห็นว่าขนาดหยดวัฏภาคที่เกิดขึ้นที่อัตราส่วน 0.5:1.0 นั้นค่อนข้างเล็กและมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างเห็นได้ชัดตามการลดลงของอัตราส่วนเป็น 0.4:0.1 และ 0.3:1.0 ตามลำดับ จึงทำให้การถ่ายโอนมวลของไฮดรอกไซด์จากไบโอดีเซลไปยังน้ำเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วเมื่อใช้อัตราส่วน 0.5:1.0 สำหรับการล้างในขั้นที่ 2

ตารางที่ 2 การล้างไบโอดีเซลด้วยช่องจุลภาคแบบ 2 ขั้นตอน

น้ำล้าง : ไบโอดีเซล	ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำล้าง		ขนาดหยดวัฏภาค
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	
2.5:1.0	11.23	-	
0.5:1.0	-	7.02	
0.4:1.0	-	7.30	
0.3:1.0	-	7.71	

หมายเหตุ : ศึกษาที่อุณหภูมิห้อง และเวลาการสัมผัส 6 วินาที

ดังนั้นจะต้องใช้ปริมาณน้ำล้างทั้งหมดต่อไบโอดีเซลเป็น 3.0:1.0 ใช้เวลารวม 12 วินาที

3.3 คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผ่านการทำบริสุทธิ์โดยใช้กรวยแยกและเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค

เมื่อนำไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ซึ่งผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันมาทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ความหนืด ความหนาแน่น จุดไหลเท จุดหมอกควัน และค่าความเป็นกรด ตามมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าไบโอดีเซลที่ผลิตได้ มีคุณสมบัติเบื้องต้นผ่านตามมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ผลิตได้เปรียบเทียบกับมาตรฐานไบโอดีเซล

คุณสมบัติ	B1	B2	B3	ไบโอดีเซลตามมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน	
				อัตราสูงต่ำ	วิธีทดสอบ
ความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส (มล.^{2}ต่อวินาที)	4.72	4.72	4.72	3.5-5.0	ASTM D 445
ความหนาแน่นที่ 15 องศาเซลเซียส (กก.ต่อ เมตร^3)	875	874	870	860-900	ASTM D 1298
จุดหมอกควัน (องศาเซลเซียส)	8	8	6	-3-12	ASTM D 6751
จุดไหลเท (องศาเซลเซียส)	6	7	5	-15-10	ASTM D 6751
ค่าความเป็นกรด (มก.KOH ต่อกรัมน้ำมัน)	0.11	0.11	0.11	ไม่สูงกว่า 0.5	ASTM D 664

หมายเหตุ : B1: ล้างด้วยกรวยแยก
B2: ล้างด้วยช่องจุลภาคโดยการล้าง 2 ขั้นตอน (2.5:1.0 และ 0.5:1.0)
B3: ล้างด้วยช่องจุลภาคโดยการล้าง 3 ขั้นตอน (0.8:1.0 ทั้ง 3 ขั้นตอน)

4. อภิปรายผลและสรุป

ผลการล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำนั้นขึ้นอยู่กับระบบที่ใช้ทำการล้าง พบว่าต้องใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำล้างต่อไบโอดีเซลเป็น 10:1.0 และใช้เวลาในการล้าง 15 ชั่วโมง สำหรับการใช้กรวยแยก การใช้ช่องจุลภาคสามารถช่วยลดอัตราส่วนดังกล่าวลงเหลือ 2.4:1.0 และใช้เวลาการสัมผัส 6 วินาที (ล้าง 3 ขั้นตอนโดยใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำล้างต่อไบโอดีเซล 0.8:1.0 แต่ละขั้นตอนใช้เวลาในการสัมผัส 2 วินาที) และสามารถใช้การล้างด้วยช่องจุลภาคโดยใช้อัตราส่วน 3.0:1.0 เวลาที่ใช้ในการล้าง 12 วินาที (การล้างขั้นตอนที่ 1 ใช้อัตราส่วน 2.5:1.0 เวลาในการล้าง 6 วินาที และการล้างขั้นตอนที่ 2 ใช้อัตราส่วน 0.5:1.0 เวลาที่ในการล้าง 6 วินาที) อัตราส่วนปริมาณน้ำล้างต่อไบโอดีเซลนี้ใกล้เคียงกับการล้างไบโอดีเซลในระดับอุตสาหกรรม แต่ใช้เวลาในการล้างน้อยลงมาก นอกจากนี้ยังพบว่าไบโอดีเซลผ่านการล้างทั้ง 3 วิธีมีคุณสมบัติเบื้องต้นผ่านตามมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่สนับสนุนงบประมาณการทำวิจัย และขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร อาหาร และสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] Department of Energy Business, *Characteristics and quality of biodiesel (methyl ester of fatty acid)*, 2007.

[2] N.O.V. Sonntag, "Reactions of fats and fatty acids," *Bailey's industrial oil and fat products 4th ed*. 1: 99, D. Swern, New York: John Wiley & Sons, 1979.

[3] P.B. Weisz, W.O. Haag, and P.G. Rodeweld, "Catalytic production of high grade fuel (gasoline) from biomass compound by shape-delective catalysi," *Science*, vol. 206, pp. 57-58, 1979.

[4] K.G. Georgogianni, A.K. Katsoulidis, P.J. Pomonis, G. Manos, and M.G. Kontominas, "Transesterification of rapeseed oil for the production of biodiesel using homogeneous and heterogeous catalysis," *Fuel Processing Technology*, vol. 90, pp. 1016-1022, 2009.

[5] R. Jachuck, G. Pherwani, and S. M. Gorton, "Green engineering: continuous production of biodiesel using an alkaline catalyst in an intensified narrow channel reactor," *Journol of Environmental Monitoring*, vol. 11, pp. 642-647, 2009.

[6] P. Sun, B. Wang, J. Yao, L. Zhang, and N. Xu, "Fast Synthesis of Biodiesel at High Throughput in Microstructured Reactors," *Ind. Eng. Chem. Res*, vol. 49, pp. 1259-1264, 2010.

[7] Y. Tanawannapong, A. Kaewchada, and A. Jaree, "Biodiesel production from waste cooking oil in a microtube reactor," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 19, pp. 37-41, 2013.

[8] U. Schuchardt, R. Sercheli, and R.M. Vargas, "Transesterification of Vegetable Oils: a Review," *Journal of the Brazilian Chemical Society*, vol. 9, no. 1, pp. 199-210, 1998.

[9] F. Ma and M.A. Hanna, "Biodiesel production: a review," *Bioresource Technology*, vol. 70, pp. 1-15, 1999.

[10] C. Maneerat, "Application of bleaching earth on biodiesel washing process," in *Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON 2009)*, Thailand January 14-16, 2009.

[11] Z. Wen, X. Yu, S.T. Tu, J. Yan, and E. Dahlquist, "Intensification of biodiesel synthesis using zigzag micro-channel reactors," *Bioresource Technology*, vol. 100, pp. 3054-3060, 2009.