



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชัน ดีเซล-น้ำ ด้วยระบบไฮโดรไดนามิกคavitเทชันแบบโรเตอร์และสเตเตอร์

Production of diesel-water emulsion fuel using rotor-stator hydrodynamic cavitation

อภิเชษฐ์ เลขวิริยะกุล, กิตตินันท์ มลิวรรณ และ กฤษ สมนึก*

Apichet Legwiriyaikul, Kittinan Maliwan and Krit Somnuk*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla

Received: 04/09/62

Received: 26/11/62

Accepted: 11/12/62

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชื้อเพลิงอิมัลชัน ดีเซล-น้ำ ที่ผลิตด้วยเครื่องไฮโดรไดนามิกคavitเทชันแบบโรเตอร์และสเตเตอร์ เพื่อนำไปวิเคราะห์ความคงตัว ขนาดหยดอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 1000 เท่า และค่าการกระจายของขนาดอนุภาค (poly dispersity index, PDI) ของเชื้อเพลิงอิมัลชันด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร ในการศึกษาได้ออกแบบโรเตอร์ที่มีตัวแปรอิสระคือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ (4–6 mm) และอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะกับความลึกของรูเจาะ (0.6–1.0) โดยระยะห่างระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์เท่ากับ 10 mm ความสูงของโรเตอร์เท่ากับ 46 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางของโรเตอร์เท่ากับ 70 mm เพื่อนำไปผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชัน ดีเซล-น้ำ ซึ่งประกอบด้วย น้ำมันดีเซลเท่ากับ 80 vol.% น้ำเท่ากับ 10 vol.% สารลดแรงตึงผิวชนิด Span80 เท่ากับ 5 vol.% และสารลดแรงตึงผิวชนิด Tween80 เท่ากับ 5 vol.% (สูตร D80W10S5T5) โดยอัตราการไหลของสารผสมเข้าเครื่องไฮโดรไดนามิกคavitเทชันเท่ากับ 10.5 L/hr ที่ความเร็วรอบโรเตอร์เท่ากับ 4000 rpm จากผลการทดลองพบว่า โรเตอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะเท่ากับ 4 mm และอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะกับความลึกเท่ากับ 0.8 และ 1.0 สามารถผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชัน ดีเซล-น้ำ ที่มีระยะเวลาความเสถียรภาพสูงสุดเท่ากับ 60 วัน มีขนาดหยดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 3 μm และค่าการกระจายของขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 285 และ 271 nm ตามลำดับ ดังนั้นการใช้ไฮโดรได-

นามิกควิเทชั่นสามารถผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชัน ดีเซล-น้ำ ในขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรได้ ซึ่งมีข้อดี คือ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์และลดก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากเครื่องยนต์ได้ เช่น ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ เป็นต้น

คำสำคัญ : เชื้อเพลิงอิมัลชัน ไฮโดรไดนามิกควิเทชั่น ความคงตัวของเชื้อเพลิงอิมัลชัน ขนาดหยดอนุภาค

Abstract

In this study, the diesel-water emulsion fuels were studied using a rotor-stator type of hydrodynamic cavitation. The phase stability of emulsion fuel was observed the phase separation time. The nanoemulsions have dispersed liquid droplet which the mean droplet size of emulsion fuel was analyzed using the microscope and poly dispersity index (PDI), respectively. The parameters of the hole diameter (4–6 mm) and the ratio between diameter and hole depth (0.6–1.0) were investigated the mean droplet size of emulsion fuel. The fixed parameters were the distance between rotor and stator of 10 mm, the height of rotor of 46 mm, the diameter of rotor of 70 mm. The diesel-water emulsion fuel consisted of 80 vol.% diesel, 10 vol.% water, 5 vol.% Span80, 5 vol.% Tween80 (D80W10S5T5), which produced using the rotor-stator type of hydrodynamic cavitation under the condition was 10.5 L/hr mixture flow rate and 4000 rpm speed of rotor. The results showed that the maximum stability for emulsifiers of diesel-water blend in the homogenized state were about sixty days. The average droplet size and PDI were less than 3 μm , 285 nm and 271 nm respectively, when 4 mm of diameter of rotor, 0.8 and 1.0 of ratio between diameter and hole depth were operated. Thus, the nanoemulsion of diesel-water blend can be produced using of rotor-stator type of hydrodynamic cavitation. The advantages of nanoemulsion were the improvement of combustion efficiency and the reduction of nitrogen oxide in the exhaust gas.

Keywords : emulsion fuel; hydrodynamic cavitation; phase stability; droplet size

*ติดต่อ: krit.s@psu.ac.th, 0-7428-7227

1. บทนำ

ปัจจุบันทั่วโลกใช้น้ำมันดีเซลในภาคอุตสาหกรรมและภาคขนส่งในปริมาณมาก 4600 ล้านลิตร/วัน [1] และสถานการณ์การใช้น้ำมันระหว่างเดือนมกราคมถึงกุมภาพันธ์ ปี 2562 มีปริมาณการใช้น้ำมันดีเซล

เฉลี่ยเท่ากับ 69.13 ล้านลิตร/วัน [2] เนื่องจากการเติบโตทางเศรษฐกิจและปริมาณรถยนต์ดีเซลที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดมลพิษที่มาจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในเครื่องยนต์ เช่น ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์

(NO_x) และฝุ่นละออง (particulate matter, PM) ซึ่งก๊าซไนโตรเจนออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับละอองน้ำในชั้นบรรยากาศทำให้เกิดปรากฏการณ์ฝนกรดที่ส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงได้ปรับปรุงน้ำมันดีเซลเพื่อลดการปลดปล่อยมลพิษ โดยใช้น้ำเข้าไปผสมกับน้ำมันดีเซลเพื่อช่วยลดปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์และลดปริมาณฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง [3,4] เนื่องจากน้ำซึ่งเป็นเฟสภายในของน้ำมันดีเซลจะแตกตัวออกเป็นละอองส่งผลให้ช่วยลดอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญทำให้ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ลดลง [3–8] อย่างไรก็ตามน้ำที่ผสมกับน้ำมันดีเซลจะพบปัญหาความคงตัวของเชื้อเพลิง เช่น ที่มวิจยของ Ghannam and Selim (2009) ได้ศึกษาความคงตัวของเชื้อเพลิงอิมัลชัน ดีเซล-น้ำ ซึ่งไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว โดยมีตัวแปรควบคุมคือ ปริมาณน้ำมันดีเซลเท่ากับ 80 vol.% และปริมาณน้ำเท่ากับ 20 vol.% พบว่าสูญเสียความคงตัวของเชื้อเพลิงภายในระยะเวลา 10 min และที่มวิจยของ Norazni *et al.* (2017) ได้ศึกษาความคงตัวของเชื้อเพลิงอิมัลชัน ดีเซล-น้ำ ซึ่งไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว โดยมีตัวแปรอิสระคือ ปริมาณน้ำเท่ากับ 5 และ 10 vol.% พบว่าสูญเสียความคงตัวของเชื้อเพลิงภายในระยะเวลาไม่เกิน 3 min ด้วยเหตุผลดังกล่าวนักวิจัยส่วนใหญ่จึงได้มุ่งเน้นศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มระยะเวลาความเสถียรภาพด้วยการเติมสารลดแรงตึงผิว (surfactant) เช่น ที่มวิจยของ Schalbart *et al.* (2010) ได้ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำโดยใช้สารลดแรงตึงผิวชนิด Span60 และ Tween60 ที่มีปริมาณสารลดแรงตึงผิวรวมเท่ากับ 6 wt.% ที่มีค่าสัดส่วน

ระหว่างส่วนที่ชอบน้ำกับส่วนที่ชอบน้ำมัน (hydrophile-lipophile balance, HLB) เท่ากับ 11.6 ซึ่งใช้ปริมาณน้ำมันชนิดเตตระเดเคน (tetradecane) ในการผสมเท่ากับ 20 wt.% และปริมาณน้ำเท่ากับ 74 wt.% พบว่าสามารถผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชันที่มีความเสถียรภาพเป็นระยะเวลา 6 เดือน และที่มวิจยของ Scholz and Keck (2015) ได้ศึกษากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำโดยใช้สารลดแรงตึงผิวชนิด Span80 และ Tween80 ที่มีปริมาณสารลดแรงตึงผิวรวมเท่ากับ 5 wt.% และค่า HLB เท่ากับ 9.6 ซึ่งใช้ปริมาณน้ำมันไตรกลีเซอไรด์ในการผสมเท่ากับ 5 wt.% และปริมาณน้ำเท่ากับ 90 wt.% พบว่าสามารถผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชันที่มีความเสถียรภาพระยะเวลาเท่ากับ 90 วัน และที่มวิจยของ Elsanusi *et al.* (2017) ได้ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชัน ดีเซล-น้ำ-ไบโอดีเซล โดยใช้สารลดแรงตึงผิวชนิด Span80 และ Tween80 ที่มีปริมาณสารลดแรงตึงผิวรวมเท่ากับ 2 vol.% และค่า HLB เท่ากับ 8.2 ซึ่งใช้ปริมาณน้ำดีเซลเท่ากับ 93 vol.% และปริมาณน้ำเท่ากับ 5 vol.% พบว่าสามารถผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชันที่มีความเสถียรภาพระยะเวลาเท่ากับ 87 วัน จากงานวิจัยที่กล่าวมาทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าการใช้สารลดแรงตึงผิวร่วม (co-surfactant) เช่น Span และ Tween สามารถช่วยเพิ่มระยะเวลาความเสถียรภาพของเชื้อเพลิงอิมัลชันได้

ปัจจุบันมีการวิจัยเกี่ยวกับการผสมเชื้อเพลิงอิมัลชัน ดีเซล-น้ำ ด้วยเทคโนโลยี กวนผสม ฮอโมจีไนซ์แบบความเร็วสูง คลื่นเสียงอัลตราโซนิก และไฮโดรไดนามิกคาวิตेशन ในส่วนของเทคโนโลยีการผสม ที่มวิจยของ Mura *et al.* (2012) ได้ศึกษากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชัน ดีเซล-น้ำ ซึ่งใช้สาร

ทำอิมัลชันชนิดเดียวคือ สารลดแรงตึงผิวชนิด Span 83 ที่มีค่า HLB เท่ากับ 3.7 โดยใช้การผสมด้วยวิธีการกวน (stirring) ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 400 rpm เป็นระยะเวลา 60 min โดยมีตัวแปรควบคุมคือ ปริมาณน้ำเท่ากับ 30 wt.% และกำหนดตัวแปรอิสระคือ ปริมาณน้ำมันเท่ากับ 60, 65 และ 67.5 wt.% และปริมาณสารลดแรงตึงผิวเท่ากับ 2.5, 5 และ 10 wt.% ผลการศึกษาพบว่าที่ปริมาณน้ำมัน 60 wt.% และปริมาณสารลดแรงตึงผิวเท่ากับ 10 wt.% จะมีขนาดหยดอนุภาคเท่ากับ 2 μm ที่มีระยะเวลาความเสถียรภาพเท่ากับ 1 วัน และมีทีมวิจัยที่สนใจศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชันด้วยเครื่องฮอโมจีไนซ์แบบความเร็วสูง เช่น ทีมวิจัยของ Vigneswaran *et al.* (2018) ได้ศึกษากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชันดีเซล-น้ำ ซึ่งใช้สารทำอิมัลชันชนิดเดียวคือ สารลดแรงตึงผิว Triton X-100 ที่มีค่า HLB เท่ากับ 13.4 โดยใช้การผสมด้วยเครื่องฮอโมจีไนซ์แบบความเร็วสูงที่ความเร็วรอบเท่ากับ 15000 rpm เป็นระยะเวลา 15 min โดยมีปริมาณน้ำมันเท่ากับ 89.8 vol.% ปริมาณน้ำเท่ากับ 10 vol.% และปริมาณสารทำอิมัลชันเท่ากับ 0.2 vol.% สามารถผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชันที่มีความเสถียรภาพเป็นระยะเวลา 28 วัน และการประยุกต์ใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกเพื่อผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชัน มีงานวิจัยของ Bidita *et al.* (2016) ได้ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชัน ดีเซล-น้ำ ซึ่งใช้สารทำอิมัลชันคือ สารลดแรงตึงผิว Triton X-100 ที่มีค่า HLB เท่ากับ 13.4 โดยใช้การผสมด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกที่มีความถี่ 20 kHz กำลังคลื่นเสียงเท่ากับ 500 W เป็นระยะเวลา 10 min ที่อุณหภูมิ 25°C และกำหนดตัวแปรอิสระคือ ปริมาณน้ำในช่วง

0.5–0.9 vol.% และปริมาณสารทำอิมัลชันในช่วง 0.25–0.4 vol.% ผลการศึกษาพบว่า ที่ปริมาณน้ำเท่ากับ 0.9 vol.% และปริมาณสารทำอิมัลชันเท่ากับ 0.4 vol.% จะมีขนาดหยดอนุภาคเท่ากับ 17 nm และมีระยะเวลาความเสถียรภาพเท่ากับ 16 วัน ในงานวิจัยนี้สนใจการใช้หลักไฮโดรไดนามิกคาวิตेशनเพื่อการผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชัน พบว่าปัจจุบันเครื่องไฮโดรไดนามิกคาวิตेशनที่นิยมใช้ในระดับห้องปฏิบัติการและระดับอุตสาหกรรม แบ่งออกเป็น 5 ประเภท ได้แก่ (1) แบบแผ่นออริฟิส (2) แบบท่อเวน-ทური (3) ฮอโมจีไนซ์แบบความดันสูง (4) ฮอโมจีไนซ์แบบความเร็วสูงและ (5) แบบโรเตอร์และสเตเตอร์ ซึ่งเครื่องไฮโดรไดนามิกคาวิตेशनนำไปประยุกต์ใช้กับงานมากมาย เช่น กระบวนการบำบัดน้ำเสียในโรงงาน [15] กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ [16] การผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชัน [17,18] และกระบวนการผลิตไบโอดีเซล [19,20] และเมื่อพิจารณาในการนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมเพื่อออกแบบการผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชันแบบต่อเนื่อง ไฮโดรไดนามิกคาวิตेशनประเภทที่ 5 คือ แบบโรเตอร์และสเตเตอร์ จะมีความเหมาะสมกว่าประเภทอื่นๆ และจากที่ได้ทบทวนเอกสารปัจจุบันยังไม่พบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเชื้อเพลิง ดีเซล-น้ำ ด้วยไฮโดรไดนามิกคาวิตेशनแบบโรเตอร์และสเตเตอร์ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จึงต้องการออกแบบและสร้างไฮโดรไดนามิกคาวิตेशन และได้ศึกษาตัวแปรอิสระของโรเตอร์คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะและอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะกับความลึกของรูเจาะ ตัวแปรควบคุมคือ ความเร็วรอบเท่ากับ 4000 rpm ระยะห่างระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์เท่ากับ 10 mm ความสูง

และเส้นผ่านศูนย์กลางของโรเตอร์เท่ากับ 46 และ 70 mm ตามลำดับ ที่ส่งผลต่อขนาดหยดอนุภาค ภายในและระยะเวลาความเสถียรภาพของเชื้อเพลิง อิมัลชัน ดีเซล-น้ำ

2. วัสดุและสารเคมี

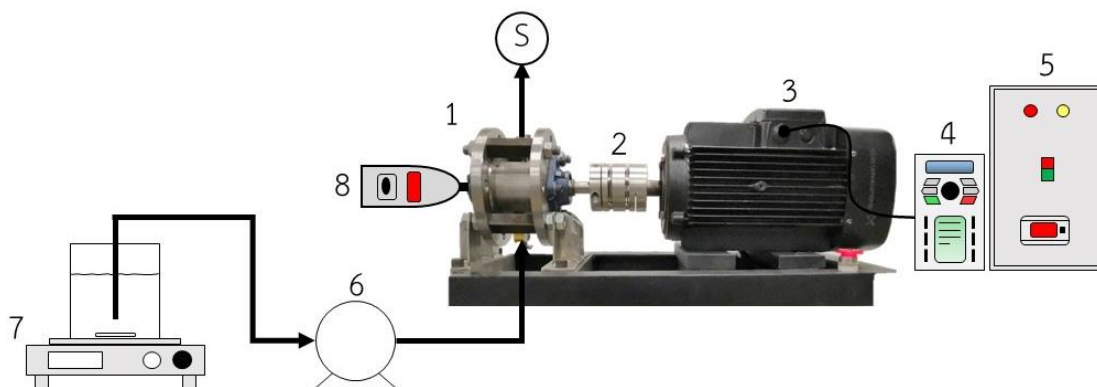
2.1. วัตถุดิบและสารเคมี

วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้สำหรับผลิตเชื้อเพลิง อิมัลชันมี 4 ชนิดคือ น้ำมันดีเซลบี7 (diesel B7) จะประกอบด้วยน้ำมันดีเซล 93 vol.% ผสมกับน้ำมันไบโอดีเซล 7 vol.% ซึ่งความหนาแน่นของน้ำมันดีเซลเท่ากับ 890 kg/m^3 และความหนืดเท่ากับ 1.8 cSt น้ำผ่านเครื่องกรอง (Ultra flow, model: UB 6 SF) และใช้สารลดแรงตึงผิวชนิด Span80 และ Tween80 โดยมีค่าสัดส่วนระหว่างส่วนที่ชอบน้ำกับส่วนที่ชอบน้ำมัน (hydrophile-lipophile balance, HLB) มีค่าเท่ากับ 4.3 และ 15 ตามลำดับ

2.2. เครื่องมือการทดลอง

2.2.1. ระบบไฮโดรไดนามิกคavitेशन

ระบบไฮโดรไดนามิกคavitेशन ดังแสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วย (1) เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรไดนามิกคavitेशन (hydrodynamic cavitation reactor) มีส่วนประกอบที่สำคัญสองส่วนคือ โรเตอร์ (rotor) มีลักษณะเป็นทรงกระบอกตันบริเวณผิวเจาะรูและสเตเตอร์ (stator) (2) คัปปลิงแบบแผ่นเหล็กสปริง (double disc coupling) (3) มอเตอร์สามเฟส (Grundfos, model: MG112MB) (4) อินเวอร์เตอร์ (Emerson, model: M201) (5) ตู้ควบคุม (6) ป้อนสารเคมี (Grundfos, model: DDA17-7) (7) เครื่องกวนสารละลายชนิดใช้สนามแม่เหล็ก (magnetic stirrer, model: RCT B S104) และ (8) เครื่องวัดความเร็วรอบ (tachometer, model: DT2236B) อุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์ขนาดหยดอนุภาค (droplet size) ของเชื้อเพลิงอิมัลชันซึ่งมีขนาดเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1000–10000 nm คือ กล้องจุลทรรศน์ (OLYMPUS, model: CX23) และในการวิเคราะห์ขนาดหยดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.6–10000 nm ได้ใช้เครื่องวัดขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร (Zetasizer Nano ZS, model: ZEN3600)



รูปที่ 1 ระบบไฮโดรไดนามิกคavitेशन

- (1) เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรไดนามิกควิเทชัน (2) คัปปลิง (3) มอเตอร์สามเฟส (4) อินเวอร์เตอร์ (5) ตู้ควบคุม (6) บั๊มสารเคมี (7) เครื่องกวนสารละลายชนิดใช้สนามแม่เหล็ก (8) เครื่องวัดความเร็วรอบและ (S) วาล์วเก็บตัวอย่าง

3. วิธีการทดลอง

3.1. การผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชัน ดีเซล-น้ำ ด้วยระบบไฮโดรไดนามิกควิเทชัน

การเตรียมเชื้อเพลิงอิมัลชันก่อนเข้าเครื่องไฮโดรไดนามิกควิเทชันมี 2 ขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนที่ (1) นำน้ำมันดีเซลเท่ากับ 800 mL (80 vol.%) น้ำเท่ากับ 100 mL (10 vol.%) และสารลดแรงตึงผิว Span80 เท่ากับ 50 mL (5 vol.%) ใส่สารทั้งสามชนิดลงในบีกเกอร์ขนาด 2000 mL และผสมทันทีด้วยเครื่องกวนสารละลายที่ความเร็วรอบเท่ากับ 1300 rpm เป็นระยะเวลา 10 min และในขั้นตอนที่ (2) นำสารลดแรงตึงผิวชนิด Tween80 เท่ากับ 50 mL (5 vol.%) ผสมเข้าไปในสารผสมจากขั้นตอนที่ 1 และทำการกวนผสมทันทีที่ความเร็วรอบ 1300 rpm เป็นระยะเวลา 10 min โดยการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิด Span80 และ Tween80 ที่มีปริมาณรวมเท่ากับ 10 vol.% จะมีค่า HLB เท่ากับ 9.6 จากนั้นจะนำสารผสมที่เตรียมไว้เข้าไปผสมภายในเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรไดนามิกควิเทชัน ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยภายในเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรไดนามิกควิเทชัน มีโรเตอร์ที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกตันและบริเวณผิวของโรเตอร์จะเจาะรูรอบซึ่งได้แสดงตำแหน่งและขนาดของรูเจาะในรูปที่ 2 รูเจาะดังกล่าวทำให้เกิดความดันสถิตภายในรูเจาะลดลงต่ำกว่าความดันไฮโดรสแตติกทำให้เกิดปรากฏการณ์ควิเทชันภายในรูเจาะ ซึ่งในการทดลองจะทำการ

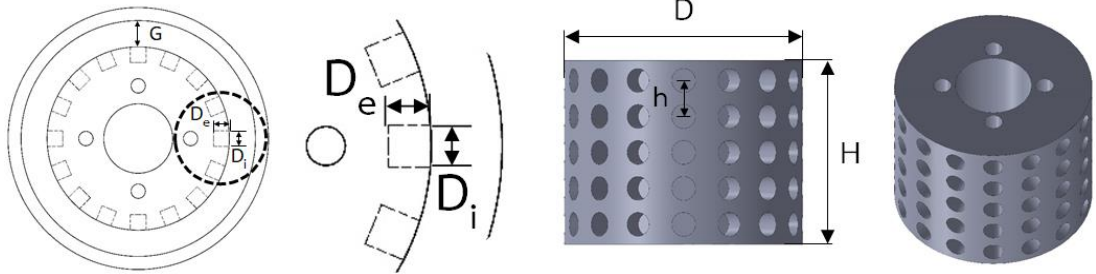
แปรค่า เส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ (D_r) และอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะกับความลึกของรูเจาะ (D_e) สำหรับการผสมภายในเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรไดนามิกควิเทชันจะควบคุมความเร็วรอบโรเตอร์เท่ากับ 4000 rpm ซึ่งจะปรับความถี่ของมอเตอร์เพื่อให้ได้ค่าความเร็วรอบที่ต้องการด้วยอินเวอร์เตอร์และสารผสม D80W10S5T5 (80 vol.% diesel, 10 vol.% water, 5 vol.% Span80 และ 5 vol.% Tween80) ถูกควบคุมอัตราส่วนเชิงปริมาตร และสารผสมจะถูกป้อนด้วยปั๊มสารเคมีที่อัตราการไหลเท่ากับ 10.5 L/hr ดังนั้นระยะเวลาของสารผสมไหลผ่านชุดเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรไดนามิกควิเทชันประมาณเท่ากับ 60 sec หลังจากสารผสมจะไหลออกทางด้านข้างของสเตเตอร์ และทำการจับเวลาประมาณ 90 sec เพื่อให้เชื้อเพลิงอิมัลชันเกิดการผสมกันอย่างสมบูรณ์ จากนั้นจึงเก็บตัวอย่างเชื้อเพลิงอิมัลชันที่บริเวณทางออก จากนั้นนำเชื้อเพลิงไปวิเคราะห์ความเสถียรภาพ (stability) เมื่อเวลาผ่านไป 1, 3, 5, 7 และ 9 วัน ขนาดหยดอนุภาคของเชื้อเพลิงอิมัลชันจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์และเครื่องมือเครื่องวัดขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร

3.2. การออกแบบโรเตอร์

ในการออกแบบและศึกษาลักษณะของโรเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อนำไปผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชัน จะศึกษาตัวแปรอิสระ 2 ตัวแปรคือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ

(D_i) อยู่ในช่วง 4–6 mm อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของรูเจาะกับความลึกของรูเจาะ (Ratio of D_i to D_e, R) อยู่ในช่วง 0.6–1.0 และมีตัวแปรควบคุม 4 ตัวแปรคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโรเตอร์ (D)

เท่ากับ 70 mm ความสูงของโรเตอร์ (H) เท่ากับ 46 mm ระยะห่างระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์ (G) เท่ากับ 10 mm และระยะห่างระหว่างรูเจาะ (h) เท่ากับ 9 mm



รูปที่ 2 ลักษณะโรเตอร์ที่ใช้ในการผลิตเชิ้อเพลิงอิมัลชัน

(D_i เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ D_e ความลึกของรูเจาะ G ระยะห่างระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์ D ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโรเตอร์ H ความสูงของโรเตอร์ h ระยะห่างระหว่างรูเจาะ)

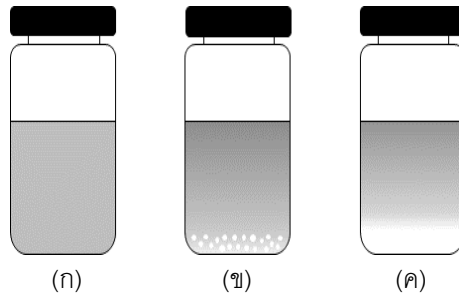
4. ผลการศึกษาและวิจารณ์

เชิ้อเพลิงอิมัลชันที่ผลิตด้วยโรเตอร์ 6 ชนิด สามารถจำแนกลักษณะเชิ้อเพลิงอิมัลชันได้ 3 ประเภท คือ (1) เชิ้อเพลิงอิมัลชันเฟสเดียว (clear liquid single phase) ซึ่งลักษณะทางกายภาพเป็นสารแขวนลอยเนื้อเดียวกันสีขาว โดยเฟสภายใน (หยดน้ำ) จะกระจายอยู่ในเฟสภายนอก (น้ำมัน) ดังแสดงในรูปที่ 3(ก) เมื่อระยะเวลาผ่านไป เชิ้อเพลิงอิมัลชันดังกล่าวมีพฤติกรรมเปลี่ยนเป็นเชิ้อเพลิงอิมัลชันประเภทที่ 2 คือ เฟสเจล (gel phase) สีขาวขุ่นที่เกิดจากหยดอนุภาคน้ำที่กระจายตัวอยู่ในน้ำมันเริ่มเกิดการรวมตัวและเกาะบริเวณด้านล่างของขวดเก็บตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 3(ข) หลังจากนั้นระยะเวลาประมาณ 2–3 วัน พฤติกรรมของเฟสน้ำและน้ำมันจะเกิดการแยกชั้นกันอย่างชัดเจนเนื่องจากสารลดแรงตึงผิวซึ่งทำหน้าที่เป็นฟิล์มห่อหุ้มหยดอนุภาคน้ำเกิดการรวมตัวกันหรือระบบอิมัลชันพยายามกลับสู่สภาวะที่มีพลังงานต่ำที่สุด [21] ดังนั้นหยดอนุภาคน้ำที่ไม่มีฟิล์มห่อหุ้มจะ

เกิดการรวมตัวกันและเกิดการแยกชั้นในเวลาต่อมา ดังแสดงในรูปที่ 3(ค) หรือเรียกว่าเชิ้อเพลิงอิมัลชันประเภทสองเฟส (clear liquid two phase) ซึ่งได้สรุปผลการทดลองการแยกเฟสเชิ้อเพลิงอิมัลชัน ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าเชิ้อเพลิงอิมัลชันที่ผลิตด้วยโรเตอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะเท่ากับ 4 mm ที่อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะกับความลึกของรูเจาะ (R) เท่ากับ 0.6 (โรเตอร์ชนิด A) มีเสถียรภาพของเฟสเป็นระยะเวลาเท่ากับ 24 วัน และโรเตอร์ชนิด B และ C ซึ่งมีค่าอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะกับความลึกของรูเจาะ เท่ากับ 0.8 และ 1.0 มีเสถียรภาพของเฟสมากกว่า 60 วัน และเชิ้อเพลิงอิมัลชันที่ผลิตด้วยโรเตอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะเท่ากับ 6 mm ที่อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะกับความลึกของรูเจาะเท่ากับ 0.6 (โรเตอร์ชนิด D) 0.8 (โรเตอร์ชนิด E) และ 1 (โรเตอร์ชนิด F) มีความเสถียรภาพของเฟสเป็นระยะเวลาเท่ากับ 15 วัน

18 วัน และ 17 วัน ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าค่าอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะกับความลึกของรูเจาะส่งผลต่อระยะเวลาความเสถียรภาพของเชื้อเพลิงอิมัลชันที่ผลิตได้ โดยที่ค่าอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะกับความลึกของรูเจาะเท่ากับ 0.6 จะมีระยะเวลาความเสถียรภาพน้อยกว่า 0.8 และ 1.0 ดังนั้นโรเตอร์ชนิด B และ C จะให้ประสิทธิภาพการผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชันมากกว่าชนิดอื่นๆ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Abbaszadeh *et al.* (2018) ที่ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องไฮโดรไดนามิกคาวีเทชันแบบโรเตอร์และสเตเตอร์ พบว่าความลึกของรูเจาะที่ลดลงจะสามารถผลิตปริมาณเอทิลเอสเทอร์ได้มากขึ้น ที่ความเร็วรอบโรเตอร์เท่ากับ 3000 rpm ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความลึกของรูเจาะที่มากเกินไปจะทำให้ความรุนแรงในการผสมของสารลดลงและได้แสดงขนาดหยดอนุภาคที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 1000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งจะเห็นการเปลี่ยนแปลงขนาดหยดอนุภาคขนาดของเชื้อเพลิงอิมัลชันที่ผลิตด้วยโรเตอร์ชนิด B และ C ในระยะ 1–3 วันแรก นับจากวันที่ผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชันเสร็จสิ้น หยดอนุภาคจะไม่เกิดการรวมตัวกันเนื่องจากสารลดแรงตึงผิวจะทำหน้าที่เป็นฟิล์มห่อหุ้มหยดอนุภาคน้ำเพื่อป้องกันการเกิดการรวมหยดอนุภาคน้ำ [21] ซึ่งขนาดใหญ่ไม่เกิน $1\ \mu\text{m}$ ในระยะเวลา 5–7 วัน บางตำแหน่งของหยดอนุภาคเริ่มเกิดการรวมตัวกันซึ่งมีขนาดไม่เกิน $2\ \mu\text{m}$ และระยะเวลา 9 วัน ในบางตำแหน่งของหยดอนุภาคเริ่มเกิดการรวมตัวกันและหยดอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับจากรูปในระยะเวลาที่ผ่านมา ซึ่งมีขนาดหยดอนุภาค

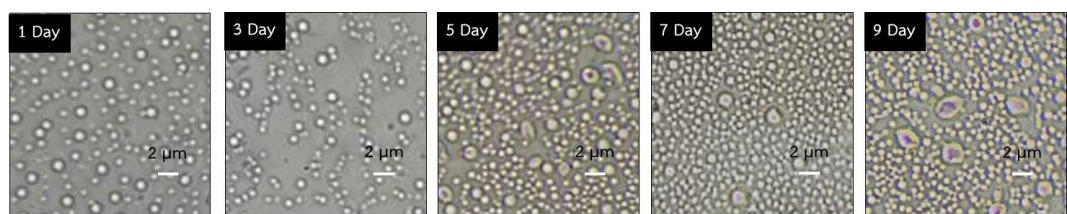
ประมาณ $2\ \mu\text{m}$ อย่างไรก็ตามที่ระยะเวลา 9 วันเชื้อเพลิงอิมัลชันยังคงมีลักษณะทางกายภาพเป็นสารแขวนลอยเนื้อเดียวกันและได้นำเชื้อเพลิงอิมัลชันที่ผลิตด้วยโรเตอร์ทั้ง 6 ชนิด ไปหาค่าการกระจายตัวของอนุภาค (poly dispersity index, PDI) ด้วยเครื่องขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร พบว่าที่ระยะเวลาไม่เกิน 24 hr เชื้อเพลิงอิมัลชัน ดีเซล-น้ำ ที่ผลิตด้วยโรเตอร์ชนิด A B C D E และ F มีขนาดหยดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ $334 \pm 2\ \text{nm}$ $285 \pm 6\ \text{nm}$ $271 \pm 7\ \text{nm}$ $298 \pm 2\ \text{nm}$ $283 \pm 3\ \text{nm}$ และ $291 \pm 5\ \text{nm}$ ตามลำดับ ดังนั้นระบบไฮโดรไดนามิกคาวีเทชันสามารถผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชัน ดีเซล-น้ำ (D80W10S5T5) ได้ในระดับนาโนเมตร ที่มีลักษณะทางกายภาพเป็นสารแขวนลอยเนื้อเดียวกัน โดยที่เฟสภายใน (หยดน้ำ) จะมีขนาดหยดอนุภาคเฉลี่ยในช่วง 100–1000 nm [22] กระจายอยู่ในเฟสภายนอก (น้ำมัน) และการที่เฟสภายใน (น้ำ) กระจายอยู่ในเฟสภายนอก (น้ำมัน) ในระดับนาโนเมตรจะมีข้อดีสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ คือ น้ำที่เป็นเฟสภายในของเชื้อเพลิงอิมัลชันสามารถช่วยลดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ซึ่งเป็นก๊าซไอเสียที่เกิดขึ้นจากเผาไหม้ของเชื้อเพลิงภายในเครื่องยนต์ได้ เนื่องจากน้ำที่เป็นเฟสภายในจะเกิดการระเบิดและแตกตัวออกเป็นละอองส่งผลให้ช่วยลดอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ทำให้ปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ลดลง [23] และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงภายในเครื่องยนต์ [24] ซึ่งเชื้อเพลิงอิมัลชันจะมีคุณสมบัติดังนี้ ความหนาแน่นเท่ากับ $873\ \text{kg/m}^3$ จุดวาบไฟเท่ากับ $65\ ^\circ\text{C}$ และค่าความร้อนเท่ากับ $39670\ \text{kJ/kg}$



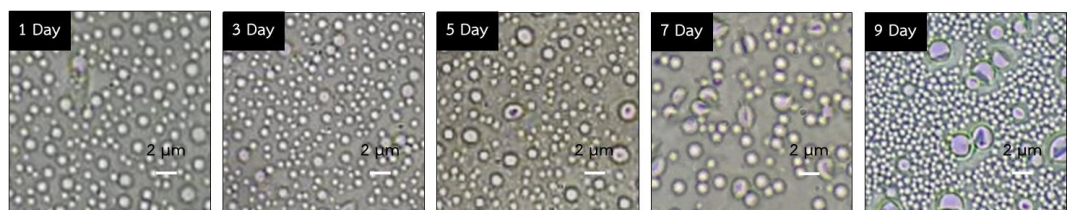
รูปที่ 3 การจำแนกลักษณะเชื้อเพลิงอิมัลชันที่ผลิตด้วยโรเตอร์ (ก) เชื้อเพลิงอิมัลชันเฟสเดียว
(ข) เชื้อเพลิงอิมัลชันเฟสเจ็ดและ (ค) เชื้อเพลิงอิมัลชันสองเฟส

ตารางที่ 1 การออกแบบและผลการทดลองโรเตอร์เพื่อผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชัน

Type	D_i (mm)	Ratio of D_i to D_e	Stability time (Day)	Z-average (nm)
A	4	0.6	24	334 ± 2
B	4	0.8	60	285 ± 6
C	4	1.0	60	271 ± 7
D	6	0.6	15	298 ± 2
E	6	0.8	18	283 ± 3
F	6	1.0	17	291 ± 5



(ก)



(ข)

รูปที่ 4 ขนาดหยดอนุภาคของเชื้อเพลิงอิมัลชัน (ก) คือ ขนาดหยดอนุภาคของเชื้อเพลิงอิมัลชันที่ผลิตด้วยโรเตอร์ชนิด B และ (ข) คือ ขนาดหยดอนุภาคของเชื้อเพลิงอิมัลชันที่ผลิตด้วยโรเตอร์ชนิด C

5. สรุป

การผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชัน ดีเซล-น้ำ ด้วยโรเตอร์ 6 ชนิด ซึ่งได้ศึกษาตัวแปรอิสระคือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ (D_r) และอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะกับความลึกของรูเจาะ (R) และได้กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโรเตอร์เท่ากับ 70 mm ความสูงของโรเตอร์เท่ากับ 46 mm ระยะห่างระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์เท่ากับ 10 mm และระยะห่างระหว่างรูเจาะเท่ากับ 9 mm โดยมีระยะเวลาในการผสมผ่านเครื่องไฮโดรไดนามิกควิเทชันเท่ากับ 60 sec ที่ความเร็วรอบ 4000 rpm สามารถผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชัน (D80W10S5T5) ประกอบด้วย น้ำมันดีเซลเท่ากับ 80 vol.% น้ำเท่ากับ 10 vol.% สารลดแรงตึงผิวชนิด Span80 เท่ากับ 5 vol.% และสารลดแรงตึงผิวชนิด Tween80 เท่ากับ 5 vol.% ที่มีระยะเวลาความเสถียรภาพเท่ากับ 60 วัน และในขณะอนุภาคระดับนาโนเมตรได้ ด้วยโรเตอร์ชนิด B และ C ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะเท่ากับ 4 mm และอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะกับความลึกของรูเจาะเท่ากับ 0.8 และ 1 นอกจากนี้ค่าตัวแปรไร้มิติ คือ อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ (D_r) กับความลึกของรูเจาะ (D_e) ที่ศึกษาจะสามารถนำไปปรับใช้ในการเพิ่มหรือลดขนาดของเครื่องไฮโดรไดนามิกควิเทชันเพื่อให้มีความเหมาะสมในระดับอุตสาหกรรมและระดับชุมชน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ภายใต้โครงการการพัฒนาพลังงานทดแทนและการประยุกต์ใช้ ในชุมชนสีเขียว และ

ทุนอุดหนุนวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สัญญาเลขที่ ENG-62-2-7-02-0247S ที่ได้สนับสนุนทุน

วิจัย และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนสถานที่ในการทำวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานพลังงานสากล (International Energy Agency, IEA) (สื่อออนไลน์). [เข้าถึงเมื่อ 14 พฤษภาคม 2561]. เข้าถึงได้จาก : <https://www.iea.org/oilmarketreport/reports/> 2019/.
- [2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. สถานการณ์การใช้ น้ำมัน และ ไฟฟ้าของ ไทย (สื่อออนไลน์). [เข้าถึงเมื่อ 14 พฤษภาคม 2562]. สืบค้นจาก : [http://www.eppo.go.th/index.php/th/energy-information/situation-oil-electric?orders\[publishUp\]=publishUp&search=1](http://www.eppo.go.th/index.php/th/energy-information/situation-oil-electric?orders[publishUp]=publishUp&search=1).
- [3] Ithnin AM, et al. An overview of utilizing water-in-diesel emulsion fuel in diesel engine and its potential research study. Journal of the Energy Institute 2014; 87: 273–88.
- [4] Vellaiyan S, Amirthagadeswaran KS. The role of water-in-diesel emulsion and its additives on diesel engine performance and emission levels: A retrospective review. Alexandria Engineering Journal 2016; 55: 2463–72.

- [5] Vigneswaran R, et al. Experimental investigation of unmodified diesel engine performance, combustion and emission with multipurpose additive along with water–indiesel emulsion fuel. *Energy Conversion and Management* 2018; 172: 370–80.
- [6] Bidita BS, et al. Preparation, characterization and engine performance of water in diesel nanoemulsions. *Journal of the Energy Institute* 2016; 89: 354–65.
- [7] Scarpete D, et al. Effect of water content in diesel–water emulsified fuel on diesel engine performance. *International Scientific Journal*. 2013; 1: 25-8.
- [8] Noor El-Din MR, et al. Performance and exhaust emissions of a diesel engine using diesel nanoemulsions as alternative fuels. *Egyptian Journal of Petroleum* 2019; 28(2): 197-204.
- [9] Ghannam MT, Selim MYE. Stability Behavior of Water–in–Diesel Fuel Emulsion. *Petroleum Science and Technology* 2009; 27: 396–411.
- [10] Norazni SA, et al. Stability behavior of non–surfactant water–indiesel emulsion fuel using microscopic observation [Internet]. *MATEC Web of Conferences*; 2017 [cited 2016 December 16]. Available from: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179001059>.
- [11] Schalbart P, et al. Formation of tetradecane nanoemulsion by low–energy emulsification methods. *International journal of refrigeration* 2010; 33: 612–24.
- [12] Scholz P, Keck CM. Nanoemulsions produced by rotor–stator high speed stirring. *International Journal of Pharmaceutics* 2015; 482: 110–7.
- [13] Elsanusi OA, et al. Experimental Investigation on a Diesel Engine Fueled by Diesel–Biodiesel Blends and their Emulsions at Various Engine Operating Conditions. *Applied Energy* 2017; 203: 582–93.
- [14] Mura E, et al. Study of the microexplosion temperature of water in oil emulsion droplets during the Leidenfrost effect. *Experimental Thermal and Fluid Science* 2012; 43: 63–70.
- [15] Chakinala AG, et al. Industrial wastewater treatment using hydrodynamic cavitation and heterogeneous advanced Fenton processing. *Chemical Engineering Journal* 2009; 152: 498–502.
- [16] Patil PN, et al. Intensification of biogas production using pretreatment based on hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry* 2016; 3: 79–86.
- [17] Ramisetty KA, et al. Novel Approach of Producing Oil in Water Emulsion Using Hydrodynamic Cavitation Reactor.

- Industrial & Engineering Chemistry Research 2014; 53: 16508–15.
- [18] Carpenter J, et al. Low pressure hydrodynamic cavitating device for producing highly stable oil in water emulsion: Effect of geometry and cavitation number. Chemical Engineering and Processing 2017; 116: 97–104.
- [19] Mayvan AA, et al. Intensification of Continuous Biodiesel Production from Waste Cooking Oils Using Shockwave Power Reactor: Process Evaluation and Optimization through Response Surface Methodology (RSM). Energies 2018; 11(10): 1-13.
- [20] Ghayal D, et al. Optimization of biodiesel production in a hydrodynamic cavitation reactor using used frying oil. Ultrasonics Sonochemistry 2013; 20: 322–8.
- [21] ขวัญจิต อึ้งโพธิ์. อิมัลชันทางเภสัชกรรม. ภาควิชาเทคโนโลยีเภสัชกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์: สงขลา; 2554.
- [22] Mason TG, et al. Nanoemulsions: formation, structure, and physical properties. Journal of physics: condensed matter 2006; 18: 635–66.
- [23] Ahmed MI, et al. An overview of utilizing water-in-diesel emulsion fuel in diesel engine and its potential research study. Journal of the Energy Institute 2014; 87: 273–88.
- [24] Prakash R, et al. Experimental studies on combustion, performance and emission characteristics of diesel engine using different biodiesel bio oil emulsions. Journal of the Energy Institute 2016; 88: 64–75.