



คุณภาพของเชื้อเพลิงผสมระหว่างน้ำมันดีเซลกับน้ำมันชีวภาพและอิมัลซิไฟเออร์หรือเอทานอลโดยใช้วิธีปั่นผสมความเร็วรอบสูงและการใช้คลื่นอัลตราโซนิก

Quality of blended fuel prepared by mixing of diesel, bio-oil and emulsifier or ethanol using high speed and ultrasonic mixing

อาคม ปะหลามานิต^{1*} พรทิพย์ คงภักดี² ปฏิภาณ สกุกกิจ³ และ ธรณิศวรรี ดีทยาพา⁴

¹บัณฑิตวิทยาลัยสหวิทยาการระบบพลังงาน มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

²สาขาการจัดการพลังงานอย่างยั่งยืน คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

³สาขาเทคโนโลยีพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

⁴ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

Arkorn Palamanit^{1*} Phonthip Khongphakdi² Patipan Sakulkit³ and Thoranis Deethayat⁴

¹Interdisciplinary Graduate School of Energy Systems, Prince of Songkla University Hat Yai, Songkhla, 90110 Thailand

²Sustainable Energy Management Program, Faculty of Environmental Management, Prince of Songkla University Hat Yai, Songkhla, 90110 Thailand

³Energy Technology Program, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, 90110 Thailand

⁴Department of Mechanical engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, 50200 Thailand

*Corresponding Author, E-mail: arkorn.p@psu.ac.th

Received: 2 August 2019 | Revised: 1 May 2020 | Accepted: 11 June 2020

บทคัดย่อ

การใช้น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสชีวมวลกับเครื่องยนต์โดยตรงนั้นยังมีข้อจำกัด เช่น น้ำมันชีวภาพมีความหนืด ความเป็นกรด และปริมาณน้ำสูง ในขณะที่มีค่าความร้อนต่ำ ดังนั้นการนำน้ำมันชีวภาพมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงผสมโดยการผสมร่วมกับน้ำมันดีเซลจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ แต่อย่างไรก็ตามการผลิตเชื้อเพลิงผสมให้ได้คุณภาพดีนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น วิธีการผสม เงื่อนไขการผสม รวมทั้งชนิดของสารอิมัลซิไฟเออร์และตัวทำละลาย ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณภาพของเชื้อเพลิงผสมระหว่างน้ำมันดีเซลกับน้ำมันชีวภาพและอิมัลซิไฟเออร์หรือเอทานอลโดยใช้วิธีการปั่นผสมความเร็วรอบสูงและการใช้คลื่นอัลตราโซนิก น้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสชีวมวลปาล์มน้ำมันและผ่านการลดปริมาณน้ำถูกนำมาผสมกับน้ำมันดีเซลในสัดส่วน 5:90-94 (wt.) ผสมกับอิมัลซิไฟเออร์ Span80 หรือ Tween80 ร้อยละ 1-5 (wt.) ในกรณีของการผสมด้วยเอทานอลใช้ร้อยละ 1-5 (wt.) การผสมใช้วิธีปั่นผสมที่ความเร็วรอบสูงและการผสมโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกที่ความถี่ 20 kHz ตามระยะเวลาที่กำหนด คุณภาพของเชื้อเพลิงผสมพิจารณาจากการแยกเฟสหลังการผสมและในระหว่างการเก็บรักษา รวมทั้งการวิเคราะห์ทางองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธีแบบละเอียด (Ultimate analysis) และการทดสอบหาสมบัติของเชื้อเพลิงผสมประกอบด้วยความหนืด จุดไหลเท จุดขุ่นมัวและจุดวาบไฟ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณเถ้า ความหนาแน่น และค่าความร้อนสูง ผลการศึกษาพบว่า วิธีการผสม ชนิดอิมัลซิไฟเออร์ และสัดส่วนอิมัลซิไฟเออร์ส่งผลต่อคุณภาพการผสมทั้งหลังผสมเสร็จและในระหว่างการเก็บตัวอย่าง การผสม

โดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกทำให้คุณภาพการผสมดีกว่าการผสมด้วยเครื่องปั่นความเร็วรอบสูง การใช้ Span80 เป็นอิมัลซิไฟเออร์ทำให้เชื้อเพลิงผสมเกิดการแยกเฟสได้ช้ากว่าการใช้ Tween80 ที่ทุกอัตราส่วนผสม การใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายระหว่างน้ำมันดีเซลกับน้ำมันชีวภาพทำให้เชื้อเพลิงผสมมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันหลังผสมเสร็จดีกว่าการใช้อิมัลซิไฟเออร์ แต่เชื้อเพลิงผสมที่ใช้เอทานอลเกิดการแยกเฟสได้เร็วกว่าเชื้อเพลิงผสมที่ใช้อิมัลซิไฟเออร์ การทดสอบหาสมบัติของเชื้อเพลิงผสมเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลพบว่าเชื้อเพลิงผสมมีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล ยกเว้นสีของเชื้อเพลิงผสมที่มีสีเข้มมากยิ่งขึ้นตามสีของน้ำมันชีวภาพ

ABSTRACT

The application of bio-oil obtained from biomass pyrolysis process with engine has limitations due to bio-oil has high viscosity and acidity, and high water content, while its heating value is low. Therefore, utilization of bio-oil in the form of blended fuel prepared by mixing with diesel is one of interesting way. However, producing of blended fuel with a good quality depends on many factors such as mixing methods, mixing conditions, type of emulsifiers and additives. Thus, the aim of this study was to investigate the quality of blended fuel prepared by mixing of diesel, bio-oil and emulsifiers or mixing of diesel, bio-oil and ethanol by using high speed and ultrasonic mixing methods. The bio-oil obtained from pyrolysis process of oil palm biomass was reduced the water content and then it was mixed with diesel at ratio of 5:90-94 % (wt.). The Span80, Tween80 or ethanol were used as emulsifiers and surfactant at the mixing ratio of 1-5 % (wt.). The prepared sample was mixed by high-speed blender and ultrasonic waves at frequency of 20 kHz. The quality of the blended fuel was determined in terms of phase separation both after mixing and during storage. The ultimate analysis, viscosity, pour point, cloud point, flash point, pH, ash content, density and higher heating value were also determined. The results showed that mixing methods, type of emulsifiers and mixing ratios had effects on the mixing quality both after mixing and during storage. Preparation of blended fuel by using ultrasonic waves provided the mixing quality better than using of high speed blender. The phase separation of blended fuel prepared by Span80 was slower than the use of Twee80 at all mixing ratios. The blended fuel that was mixed with ethanol had the mixing quality better than the use of emulsifiers. But, the blended fuel prepared with ethanol had the phase separation faster than using of emulsifiers. The determination of blended fuel properties revealed that the fuel property of blended fuel was similar to the diesel, except the color which was darker, following the color of bio-oil.

คำสำคัญ: เชื้อเพลิงผสม พลังงานทดแทน น้ำมันชีวภาพ อิมัลซิไฟเออร์ เอทานอล อัลตราโซนิก

Keywords: Alternative energy, Blended fuel, Bio-oil, Emulsifier, Ethanol, Ultrasonic

บทนำ

การขยายตัวทางด้านคมนาคมและการขนส่งทำให้การใช้เชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากรายงานสถานการณ์การใช้พลังงานของประเทศไทยปี 2560 พบว่า ประเทศไทยมีการจัดหาน้ำมันดิบอยู่ที่ 1,222 พันบาร์เรลต่อวัน ซึ่งเพิ่มขึ้นจากปีก่อนร้อยละ 10.2 น้ำมันดิบดังกล่าวนี้ถูกกลั่นเป็นน้ำมันสำเร็จรูปสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลว 139.8 ล้านลิตรต่อวัน (ไม่รวมการใช้เป็นวัตถุดิบในปิโตรเคมี) ซึ่งเพิ่มขึ้น

ร้อยละ 2.0 จากปีก่อนหน้า น้ำมันสำเร็จรูปที่ประเทศไทยใช้ประกอบด้วย น้ำมันดีเซล น้ำมันเบนซินและก๊าซโซฮออล น้ำมันเครื่องบิน และน้ำมันเตา โดยมีปริมาณการใช้ 63.8 30.1 18.4 และ 5.8 ล้านลิตรต่อวัน ตามลำดับ ซึ่งจากข้อมูลดังกล่าวนี้จะเห็นได้ว่าการใช้น้ำมันดีเซลมีปริมาณมากที่สุดถึงร้อยละ 45.64 การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงดังกล่าวที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ประเทศไทยต้องนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ประเทศสูญเสียเงินรายได้ให้กับต่างประเทศปริมาณมากต่อปี

นอกจากนี้การใช้ไขมันเพลิงที่ได้จากเชื้อเพลิงฟอสซิลยังส่งผลทำให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน รวมทั้งการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดฝนกรด และการปลดปล่อยเขม่าที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ยังส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชน

โดยทั่วไปน้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงหลักที่ใช้มากในภาคการขนส่ง การทำเกษตรกรรม และการทำประมง ในกรณีของการทำเกษตรกรรมนั้นมีการใช้เครื่องยนต์ดีเซลความเร็วรอบต่ำด้วยวัตถุประสงค์ที่หลากหลาย เช่น การใช้เป็นเครื่องต้นกำลังให้กับเครื่องสูบน้ำ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า รวมทั้งเครื่องจักรกลการเกษตร สำหรับกรณีของการทำประมงนั้นมีการใช้เครื่องยนต์ดีเซลกับเรือประมงขนาดใหญ่ ดังนั้นจากปัญหาดังกล่าวการใช้เชื้อเพลิงทดแทนเพื่อลดการพึ่งพาน้ำมันดีเซล นอกจากจะช่วยลดการสูญเสียรายได้ออกนอกประเทศแล้ว ยังช่วยลดปัญหาโลกร้อนซึ่งจะก่อให้เกิดความมั่นคงและยั่งยืนด้านพลังงานอีกทางหนึ่ง นอกจากนี้จากนโยบายของรัฐบาลที่ได้สนับสนุนให้มีการใช้พลังงานทดแทนหรือพลังงานทางเลือกเพิ่มมากขึ้น โดยลดการจัดเก็บเงินเข้ากองทุนน้ำมันเชื้อเพลิงเพื่อเป็นการจูงใจให้ประชาชนหันมาใช้พลังงานทดแทนมากขึ้น และมีนโยบายที่ส่งเสริมให้มีการวิจัยเพื่อพัฒนาพลังงานทดแทนที่อยู่ในรูปเชื้อเพลิงเหลวซึ่งจะนำมาใช้แทนน้ำมันดีเซล โดยเฉพาะการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลและการผลิตน้ำมันชีวภาพ ซึ่งน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวชนิดหนึ่งที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสชีวมวล ซึ่งประเทศไทยมีศักยภาพสูงสำหรับการใช้เชื้อเพลิงชีวภาพจากชีวมวล สำหรับภาคใต้ของไยนั้นมีชีวมวลจากปาล์มน้ำมันปริมาณมากทั้งในส่วนของกะลาปาล์ม ทะลายปาล์มเปล่า เส้นใยปาล์ม ต้นปาล์ม และทางใบปาล์ม การนำชีวมวลดังกล่าวมาเปลี่ยนรูปเป็นน้ำมันชีวภาพจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากน้ำมันชีวภาพมีความหนาแน่นพลังงานค่อนข้างสูง จัดเก็บและขนส่งได้ง่าย และประยุกต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวได้ (Palamanit et al., 2019; Shrivastava et al., 2020) แต่อย่างไรก็ตามน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสมีคุณภาพที่ไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดชีวมวล ชนิดเตาปฏิกรณ์ รูปแบบของการไพโรไลซิส และเงื่อนไขการดำเนินการ ด้วยปัจจัยดังกล่าวนี้ทำให้ได้น้ำมันชีวภาพที่มีสมบัติแตกต่างกันทั้งในด้าน ความหนืด จุดหวน

ไฟ ความเป็นกรด ค่าความร้อน และองค์ประกอบทางเคมี โดยทั่วไปน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจะมีค่าความหนืด ความเป็นกรด และปริมาณน้ำสูง ในขณะที่ค่าความร้อนต่ำ ดังนั้นทำให้ไม่สามารถใช้น้ำมันชีวภาพกับเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยตรง (Xiu and Shahbazi, 2012; Lin et al., 2016; Liang et al., 2018; Farooq et al., 2019; Chandran et al., 2020)

การปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil upgrading) สำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์ดำเนินการได้โดยกระบวนการทางเคมีหรือเคมีความร้อน นอกจากนี้การใช้น้ำมันชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงร่วมกับน้ำมันดีเซลก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับลดการพึ่งพาน้ำมันดีเซล แต่อย่างไรก็ตามด้วยสมบัติของน้ำมันชีวภาพที่แตกต่างกับน้ำมันดีเซลทำให้ไม่สามารถผสมกันได้โดยตรง การผสมน้ำมันชีวภาพกับน้ำมันดีเซลจึงจำเป็นต้องใช้สารลดแรงตึงผิว (Surfactants) ตัวทำละลายร่วม (Co-solvents) หรืออิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifiers) (Ikura et al., 2003; Weerachanchai et al., 2009; Hsieh et al., 2014; Leng et al., 2015; Lin et al., 2016; Chong et al., 2017; Lin et al., 2019; Leng, 2019; Liu et al., 2019; Shahzeb Khan et al., 2019; Farooq et al., 2020) เอทานอลหรือแอลกอฮอล์เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกชนิดหนึ่งที่มีการสนับสนุนให้ใช้ในประเทศไทย โดยนำเอทานอลมาผสมกับน้ำมันเบนซินและดีเซลในสัดส่วนที่เหมาะสม ในกรณีของการใช้แอลกอฮอล์ผสมกับน้ำมันดีเซลนั้นช่วยลดปริมาณการปลดปล่อยเขม่าควัน ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และก๊าซกลุ่ม NO_x ซึ่งแอลกอฮอล์ผสมกับน้ำมันดีเซลได้ถึงร้อยละ 20 โดยไม่ต้องปรับแต่งเครื่องยนต์ (Nguyen and Honnery, 2008; Karabektas and Hosoz, 2009; Bhimani et al., 2013; Yahuza and Dandakouta, 2015; Gnanamoorthi and Devaradjane, 2015; Yuan et al., 2018; Niculescu et al., 2019; Yu, 2019) สำหรับกรณีของการผสมน้ำมันชีวภาพกับแอลกอฮอล์นั้นช่วยปรับปรุงสมบัติด้านค่าความร้อน ค่าความหนืด และค่าความเป็นกรด รวมทั้งช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพของน้ำมันชีวภาพ (Karabektas and Hosoz, 2009; Weerachanchai et al., 2009; Pozarlik et al., 2016; de Luna et al., 2017; Niculescu et al., 2019) การใช้เอทานอล (Ethanol) หรือบิวทานอล (Butanol) เป็นตัวทำละลายน้ำมันชีวภาพในน้ำมันดีเซลยังช่วยปรับปรุงสมบัติด้าน

ความหนืด ความหนาแน่น จุดไหลเท และค่าความร้อนของเชื้อเพลิงผสม โดยสัดส่วนของตัวทำละลายส่งผลอย่างนัยสำคัญต่อความเป็นเนื้อเดียวกันของเชื้อเพลิงผสม นอกจากนี้ Hsieh et al. (2014), Liang et al. (2018) และ Farooq et al. (2019) ได้ศึกษาคุณภาพของเชื้อเพลิงผสมระหว่างน้ำมันชีวภาพกับน้ำมันดีเซลโดยใช้อิมัลซิไฟเออร์ 2 ชนิด ได้แก่ Span 80 และ Tween 80 ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน ผลการศึกษาพบว่า ชนิดและสัดส่วนของอิมัลซิไฟเออร์ส่งผลต่อความเป็นเนื้อเดียวกันของเชื้อเพลิงผสม

นอกจากปัจจัยดังกล่าวแล้ว วิธีการผสมก็เป็นหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อความเป็นเนื้อเดียวกันของเชื้อเพลิงผสมทั้งหลังผสมเสร็จและในระหว่างการเก็บรักษา งานวิจัยก่อนหน้านี้นส่วนใหญ่ใช้วิธีการผสมแบบดั้งเดิม ซึ่งเป็นการผสมโดยการปั่นผสมด้วยความเร็วรอบต่ำและใช้ระยะเวลาการผสมนาน ดังนั้นการใช้วิธีปั่นผสมด้วยเครื่องปั่นผสมความเร็วรอบสูง (เกิน 10000 rpm) และการผสมโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิค (Somnuk et al., 2013; Delmas and Barthe, 2015; Farooq et al., 2020; Hansen et al., 2020) ก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ผลิตเชื้อเพลิงผสมระหว่างน้ำมันชีวภาพและน้ำมันดีเซล เพื่อปรับปรุงคุณภาพการผสม

ดังนั้นด้วยเหตุผลดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงผสม ซึ่งเตรียมจากน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสชีวมวลปาล์ม น้ำมันชีวภาพที่ได้ถูกนำมาลดความชื้นและผสมกับน้ำมันดีเซลร่วมกับการใช้ Span 80 และ Tween 80 เป็นอิมัลซิไฟเออร์หรือใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายโดยใช้วิธีปั่นผสมด้วยความเร็วรอบสูงและการผสมด้วยคลื่นอัลตราโซนิค คุณภาพและสมบัติของเชื้อเพลิงผสมที่เตรียมได้จากเงื่อนไขต่างๆ พิจารณาจากความเป็นเนื้อเดียวกันทั้งหลังผสมเสร็จและในระหว่างการเก็บรักษา สมบัติของเชื้อเพลิงเหลว และองค์ประกอบทางเคมี

วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. การเตรียมวัตถุดิบ

งานวิจัยนี้ใช้น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสชีวมวลปาล์มน้ำมันซึ่งประกอบด้วยลำต้นปาล์ม (Oil palm trunks; OPT) ทางใบปาล์ม (Oil palm fronds; OPF) และทะลายปาล์มเปล่า (Empty fruit bunches;

EFB) ของเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสชีวมวลดังกล่าวถูกนำมาผสมรวมกัน และลดความชื้นโดยการอบด้วยตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 60 °C จนกระทั่งตัวอย่างมีปริมาณน้ำประมาณร้อยละ 50 (wt.) น้ำมันดีเซล (Diesel; D) ซึ่งจากสถานีจำหน่ายน้ำมันเชื้อเพลิงของบริษัท Shell ซึ่งตั้งอยู่ในอำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา อิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้ประกอบด้วยสแปน 80 (Span 80: S) ยี่ห้อ SIGMA ผลิตที่ประเทศสหรัฐอเมริกา และทวิน 80 (Tween 80: T) ยี่ห้อ AppliChem Panreac ผลิตที่ประเทศเยอรมัน ในส่วนของเอทานอลที่ใช้มีความเข้มข้นร้อยละ 99.9 (Ethanol 99.9%: E) ยี่ห้อ QReC ผลิตที่ประเทศนิวซีแลนด์

2. วิธีดำเนินการทดลอง

2.1 การเตรียมเชื้อเพลิงผสม เงื่อนไขการเตรียมเชื้อเพลิงผสมในงานวิจัยนี้มี 3 ส่วนหลัก ประกอบด้วย (1) Span80 น้ำมันดีเซล และน้ำมันชีวภาพ (2) Tween80 น้ำมันดีเซล และน้ำมันชีวภาพ และ (3) เอทานอล น้ำมันดีเซล และน้ำมันชีวภาพ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทดลองที่ความเข้มข้นของน้ำมันชีวภาพเพียงร้อยละ 5 (wt.) เนื่องจากต้องการประเมินความเป็นไปได้ทางเทคนิคในเบื้องต้น สำหรับรูปตัวอย่างวัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 1 และรายละเอียดการเตรียมเชื้อเพลิงผสมแต่ละเงื่อนไขแสดงดังตารางที่ 1

2.2 การผสมโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิค การศึกษานี้ผสมเชื้อเพลิงผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยคลื่นอัลตราโซนิคโดยใช้เครื่อง Ultrasonic bio system homogenization รุ่น AKVR BT-40620K/1000 W ยี่ห้อ ACME-KORN ผลิตที่ประเทศไทย ซึ่งเครื่องดังกล่าวนี้จ่ายคลื่นอัลตราโซนิคที่ความถี่ 20 kHz เพื่อทำให้อนุภาคหรือโมเลกุลของสารละลายเกิดการสั่นและรวมตัวกันเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อของเหลวได้รับคลื่นที่รุนแรงส่งผลทำให้เกิดกระจายตัวของอนุภาคของของเหลวอย่างสม่ำเสมอ การศึกษานี้ใช้ปริมาตรของของเหลว 30 มิลลิลิตร และระยะเวลาการจ่ายคลื่นอัลตราโซนิค 30 วินาที

2.3 การผสมโดยใช้เครื่องปั่นผสมความเร็วรอบสูง การผสมด้วยเครื่องปั่นผสมความเร็วรอบสูงดำเนินการโดยใช้เครื่อง Multi-function blender รุ่น BL316 ยี่ห้อ DENPA ผลิตที่ประเทศจีน ในส่วนของปั่นผสมนั้นใช้ปั่นผสมแบบใบเดี่ยว ซึ่งเครื่องปั่นผสมดังกล่าวนี้ติดตั้งมอเตอร์ที่มีความเร็วรอบ 17,000 rpm ทำให้ของเหลวเกิดการกระจายตัวของโมเลกุลอย่าง

สม่ำเสมอในขณะที่ปั่นผสม ตัวอย่างที่ใช้มีปริมาตร 30 มิลลิลิตร และปั่นผสมเป็นระยะเวลา 3 นาที

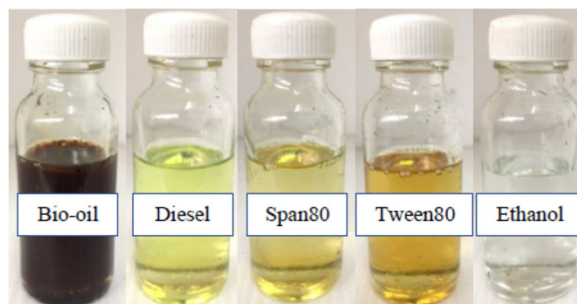
สำหรับการทดสอบคุณภาพของเชื้อเพลิงผสมได้ ดำเนินการทันทีหลังผสมเสร็จ เพื่อป้องกันการแยกเฟสของเชื้อเพลิงผสม

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการเตรียมเชื้อเพลิงผสม

Mixing conditions	Compositions (%., wt.)				
	Span80	Tween80	Ethanol	Diesel	Bio-oil
S1:D94:B5	1	-	-	94	5
S3:D92:B5	3	-	-	92	5
S5:D90:B5	5	-	-	90	5
T1:D94:B5	-	1	-	94	5
T3:D92:B5	-	3	-	92	5
T5:D90:B5	-	5	-	90	5
E1:D94:B5	-	-	1	94	5
E3:D92:B5	-	-	3	92	5
E5:D90:B5	-	-	5	90	5

S, T, D และ E หมายถึง Span80, Tween80, Diesel และ Ethanol ตามลำดับ

ตัวเลขที่อยู่หลังตัวอักษรภาษาอังกฤษ หมายถึง ร้อยละของส่วนผสมนั้นๆ ซึ่งแสดงเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt.)



รูปที่ 1 ตัวอย่างวัตถุดิบต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย

2.4 การทดสอบสมบัติของวัตถุดิบและเชื้อเพลิงผสม

ความหนาแน่น การวิเคราะห์ความหนาแน่นของของเหลว (Density) ได้วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D4052 ซึ่งทำการวิเคราะห์โดยการชั่งน้ำหนักของตัวอย่างเทียบกับปริมาตร และคำนวณหาความหนาแน่นจากสมการที่ (1)

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

เมื่อ ρ = ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

m = มวล (กิโลกรัม)

V = ปริมาตร (ลูกบาศก์เมตร)

การวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีแบบละเอียด

(Ultimate analysis) การวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีแบบละเอียดเป็นวิธีการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุพื้นฐาน

ที่มีอยู่ในวัตถุดิบหรือตัวอย่างซึ่งประกอบด้วยปริมาณคาร์บอน (Carbon) ไฮโดรเจน (Hydrogen) ไนโตรเจน (Nitrogen) และซัลเฟอร์ (Sulfur) ซึ่งวิเคราะห์หาด้วยเครื่อง CHNS Analyzer รุ่น FLASH 2000 ยี่ห้อ Thermo Scientific ผลิตที่ประเทศ Italy และวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D4239 และ EN15104 ในส่วนของปริมาณออกซิเจน (Oxygen) คำนวณหาจากความแตกต่าง

ค่าความร้อน (Heating value) ทดสอบหาโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ค่าความร้อน (Bomb calorimeter) รุ่น C5000 ยี่ห้อ IKA® Werke ผลิตที่ประเทศ Germany และวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM EN14918 ผลการทดสอบที่ได้รายงานเป็นค่าความร้อนสูง (Higher heating value, HHV)

จุดวาบไฟ (Flash Point) ทดสอบหาโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์จุดวาบไฟ (Closed flash point tester) ยี่ห้อ Herzog ผลิตที่ประเทศไทย และวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D93

จุดไหลเท (Pour Point) ทดสอบหาโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์จุดไหลเท (Pour and cloud point analyzer) ยี่ห้อ Herzog ผลิตที่ประเทศไทย และวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D97

จุดขุ่นมัว (Cloud point) ทดสอบหาโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์จุดขุ่นมัวของเชื้อเพลิงเหลว (Pour and cloud point analyzer) ยี่ห้อ Herzog ผลิตที่ประเทศไทย และวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D2500

ความหนืด (Viscosity) ทดสอบหาโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ความหนืด (Viscometer) ยี่ห้อ Julabo ผลิตที่ประเทศอังกฤษ และวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D445 ผลการทดสอบที่ได้รายงานอยู่ในหน่วยของ cSt

ความเป็นกรด-ด่าง (pH value) ทดสอบหาโดยเครื่องมือ (pH meter) รุ่น FG20 ยี่ห้อ Fivego ผลิตที่ประเทศ Switzerland ก่อนการทดสอบได้มีการหาความคลาดเคลื่อนของเครื่องกับสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐานที่มีค่าพีเอช 4 7 และ 10 ตามลำดับ

ปริมาณของแข็ง (Solids content) ทดสอบหาตามมาตรฐาน ASTM D7579 โดยการกรองตัวอย่างของเหลวผ่านกระดาษกรองเบอร์ 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร และใช้เอทานอลทำละลาย ร่วมกับการใช้ Vacuum Pump รุ่น WP6122050 ยี่ห้อ Millipore ผลิตที่ประเทศ France เพื่อให้เกิดสภาพสุญญากาศในอุปกรณ์กรอง จากนั้นนำกระดาษกรองไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง และคำนวณหาสัดส่วนของปริมาณของแข็งจากน้ำหนักของตัวอย่างที่ทดสอบ

ปริมาณเถ้า (Ash content) ในของเหลวทดสอบหาด้วยวิธีการเผาที่อุณหภูมิ 775 °C เป็นเวลา 30 นาที ในเตาเผา Fisher scientific รุ่น 1075126 ยี่ห้อ Thermo Scientific ตามมาตรฐาน ASTM D482-03 และคำนวณหาปริมาณเถ้าจากน้ำหนักของตัวอย่างก่อนและหลังให้ความร้อน

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

1. สมบัติและองค์ประกอบของวัตถุดิบ

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบสมบัติและวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ ผลการทดสอบและวิเคราะห์พบว่า องค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของน้ำมันดีเซล อิมัลซิไฟเออร์ เอทานอล และน้ำมันชีวภาพ คือคาร์บอน ซึ่งตัวอย่างวัตถุดิบดังกล่าวมีปริมาณคาร์บอนอยู่ในช่วงร้อยละ 51.78-85.17 (wt.) น้ำมันดีเซลมีปริมาณคาร์บอนสูงสุด ถัดมาเป็น Span80 ในขณะที่น้ำมันชีวภาพมีปริมาณคาร์บอนสูงกว่า Tween80 และเอทานอล ปริมาณไฮโดรเจนของวัตถุดิบมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 6.99-13.42 (wt.) โดยที่น้ำมันชีวภาพมีปริมาณไฮโดรเจนต่ำสุด เนื่องจากผลิตจากชีวมวลซึ่งโดยปกติชีวมวลมีปริมาณไฮโดรเจนต่ำ ในส่วนของปริมาณออกซิเจนพบว่า ตัวอย่างวัตถุดิบมีปริมาณออกซิเจนอยู่ในช่วงร้อยละ 1.41-35.55 (wt.) น้ำมันชีวภาพมีปริมาณออกซิเจนต่ำกว่า Tween80 และเอทานอล สำหรับปริมาณไนโตรเจนและซัลเฟอร์พบว่า วัตถุดิบมีปริมาณไนโตรเจนและซัลเฟอร์ต่ำซึ่งเป็นสมบัติที่ดีของเชื้อเพลิงเหลวสำหรับการเผาไหม้ เนื่องจากช่วยลดปริมาณการเกิด SO_x และ NO_x การที่วัตถุดิบมีปริมาณของคาร์บอนและไฮโดรเจนสูงส่งผลทำให้มีค่าความร้อนสูง (HHV) สูงเช่นกัน ดังเช่นกรณีของน้ำมันดีเซล และ Span80 (42.04 และ 35.67 MJ/kg ตามลำดับ) ในขณะที่น้ำมันชีวภาพมีค่าความร้อนสูงค่อนข้างต่ำ (16.74 MJ/kg) เนื่องจากมีปริมาณของไฮโดรเจนน้อย ในขณะที่มีปริมาณออกซิเจนค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่า ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพมีค่าอยู่ในช่วง 15.07-38.84 MJ/kg ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล ชนิดเครื่องปฏิกรณ์ และเงื่อนไขการผลิต น้ำมันชีวภาพ (Lin et al., 2016; Liang et al., 2018; Lin et al., 2019; Farooq et al., 2019) การทดสอบสมบัติ ของเชื้อเพลิงเหลวซึ่งประกอบด้วยความหนืด (Viscosity) จุดวาบไฟ (Flash point) จุดไหลเท (Pour point) และจุดขุ่นมัว (Cloud point) ของวัตถุดิบ พบว่า Span80, Tween80 และน้ำมันชีวภาพมีความหนืดสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ซึ่งเป็นข้อจำกัดสำหรับการใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลว น้ำมันดีเซลที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าความหนืด 3.23 cSt ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 1.7-4.3 cSt (Weerachanchai et al., 2009; Prakash et al., 2011; Prakash et al., 2013; Liang et al., 2018; Lin et al., 2019) ในส่วนของน้ำมันชีวภาพ

และอิมัลซิไฟเออร์มีความหนืดอยู่ในช่วง 14.07-304 cSt ซึ่งมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซลและเอทานอลมาก น้ำมันดีเซลมีค่าจุดไหลเทค่อนข้างสูงกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ เนื่องจากน้ำมันดีเซลมีค่าความหนืดต่ำ น้ำมันชีวภาพไม่สามารถทดสอบหาจุดวาบไฟได้ เนื่องจากน้ำมันชีวภาพที่ใช้ยังคงมีปริมาณน้ำค่อนข้างสูง (ประมาณร้อยละ 50 wt.) และไม่สามารถวัดค่าความขุ่นมัวได้ เนื่องจากสีของน้ำมันชีวภาพที่มีลักษณะสีเข้มเป็นน้ำตาลดำ ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพมีค่าต่ำกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น เนื่องจากปริมาณน้ำและปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพสูง (Lin et al., 2016; Farooq et al., 2019) การทดสอบหาปริมาณของแข็งในวัตถุดิบแต่ละชนิดพบว่า น้ำมันชีวภาพมีปริมาณของแข็งที่ผสมอยู่ร้อยละ 5.62 (wt.) ในขณะที่วัตถุดิบอื่นๆ มีปริมาณของแข็งต่ำมาก น้ำมันชีวภาพมีค่า pH 3.57 ซึ่งมีสภาพเป็นกรดสูง ซึ่งเป็นข้อจำกัดอีกส่วนหนึ่งของน้ำมันชีวภาพสำหรับการใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรง เนื่องจากทำให้เกิดการกัดกร่อนในระบบบักเก็บ ระบบจ่ายเชื้อเพลิง และระบบเผาไหม้ การทดสอบหาค่าความหนาแน่นพบว่า Span80 มีค่าความหนาแน่นค่อนข้างใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล และในส่วนของ Tween80 ซึ่งเป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่มีความหนาแน่นค่อนข้างสูง และมีค่าใกล้เคียงกับค่าความหนาแน่นของน้ำมันชีวภาพ

2. คุณภาพการผสมของเชื้อเพลิงผสม

2.1 คุณภาพของเชื้อเพลิงผสมระหว่าง Span80

น้ำมันดีเซล และน้ำมันชีวภาพ รูปที่ 2 (ก) และ (ข) แสดงลักษณะของเชื้อเพลิงผสมระหว่าง Span80 น้ำมันดีเซล และน้ำมันชีวภาพหลังการผสมเสร็จและที่ระยะเวลาการเก็บต่างๆ โดยใช้เครื่องปั่นผสมความเร็วรอบสูงและใช้คลื่นอัลตราโซนิกตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่า สัดส่วนของน้ำมันดีเซลและ Span80 รวมทั้งวิธีการผสมส่งผลต่อคุณภาพการผสม และการแยกเฟสของเชื้อเพลิงผสมในระหว่างการเก็บ การผสมโดยใช้ Span80 ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1 น้ำมันดีเซลร้อยละ 94 และปั่นผสมด้วยเครื่องปั่นความเร็วรอบสูง ทำให้เชื้อเพลิงผสมมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันหลังผสมเสร็จ แต่สำหรับกรณีของการใช้ Span80 ร้อยละ 3 และ 5 พบว่า หลังผสมตัวอย่างเสร็จเกิดสารแขวนลอยอย่างชัดเจน ซึ่งสารแขวนลอยดังกล่าวนี้เป็นส่วนของ Span80 ที่ไม่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกับของเหลวส่วนอื่น แต่เมื่อพิจารณาการแยกเฟสของเชื้อเพลิงผสมในระหว่างการเก็บที่ระยะเวลา 6-24 ชั่วโมง พบว่า การใช้ Span80 ร้อยละ 1 ส่งผล

ทำให้เกิดการแยกชั้นหรือแยกเฟสของของเหลวเร็วกว่าการใช้ Span80 ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 และ 5 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นผลได้ชัดเจนเมื่อระยะเวลาการเก็บผ่านไป 12 ชั่วโมง ผลดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มสัดส่วนของ Span80 ส่งผลทำให้เชื้อเพลิงผสมแยกเฟสได้ช้าลง ในขณะที่เกิดการแขวนลอยได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

สำหรับในกรณีของเชื้อเพลิงผสมที่ผสมโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกพบว่า การผสมโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกทำให้เชื้อเพลิงผสมมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันหลังผสมเสร็จ ซึ่งแตกต่างกับการใช้วิธีปั่นผสมอย่างชัดเจน เนื่องจากการผสมโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกที่ความถี่สูงช่วยทำให้อนุภาคหรือโมเลกุลของเหลวส่วนต่างๆ เกิดการแตกตัวและผสมกันได้อย่างทั่วถึง ซึ่งเป็นผลจากการเกิดคาวิเทชัน (Cavitation) ในระหว่างการผสม (Delmas and Barthe, 2015) ผลดังกล่าวนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Farooq et al. (2020) เมื่อพิจารณาการแยกเฟสของเชื้อเพลิงผสมในระหว่างการเก็บพบว่า การใช้ Span80 ที่สัดส่วนร้อยละ 1 ส่งผลทำให้เชื้อเพลิงผสมเกิดการแยกเฟสได้เร็วกว่าการใช้ Span80 ที่สัดส่วนร้อยละ 3 และ 5 ในกรณีของการใช้ Span80 สัดส่วนร้อยละ 1 ซึ่งสังเกตเห็นการแยกเฟสที่ชัดเจนเมื่อระยะเวลาการเก็บผ่านไป 6 ชั่วโมง แต่ในกรณีสัดส่วนร้อยละ 3 นั้นเกิดการแยกเฟสที่ค่อนข้างชัดเจนเมื่อระยะเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง สำหรับในส่วนของการใช้สัดส่วนร้อยละ 5 พบว่า เชื้อเพลิงผสมยังคงค่อนข้างมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันเมื่อระยะเวลาการเก็บผ่านไป 24 ชั่วโมง

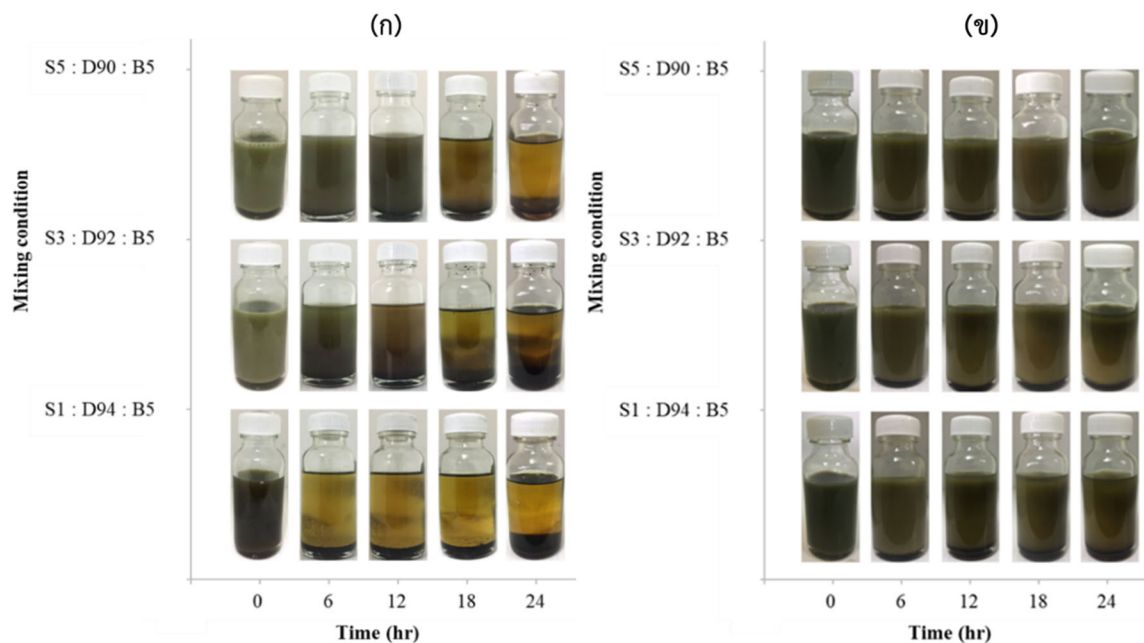
สำหรับการสังเกตพฤติกรรมของการแยกเฟสของเชื้อเพลิงผสมพบว่า น้ำมันชีวภาพเกิดการแยกเฟสออกจาก Span80 และน้ำมันดีเซล โดยแยกเฟสอยู่ด้านล่างสุด เนื่องจากมีความหนาแน่นสูงกว่า Span80 และน้ำมันดีเซล โดย Span80 กับน้ำมันดีเซลยังคงอยู่ในรูปของเหลวผสมเนื่องจากมีค่าความหนาแน่นค่อนข้างใกล้เคียงกัน และนอกจากนี้ยังพบว่าสีของน้ำมันดีเซลเปลี่ยนจากสีเหลืองใสเป็นสีน้ำตาลแดงเข้ม ซึ่งบ่งบอกถึงการละลายขององค์ประกอบทางเคมีบางส่วนของน้ำมันชีวภาพในน้ำมันดีเซล ผลในส่วนนี้ได้แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของ Span80 และวิธีการผสมส่งผลต่อการแยกเฟสของเชื้อเพลิงผสมอย่างชัดเจน การแยกเฟสของเชื้อเพลิงผสมจะเกิดซ้ำที่เงื่อนไขการผสม S5:D90:B5 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีปริมาณ Span80 สูงกว่าอัตราส่วนอื่นๆ การเพิ่มขึ้นของปริมาณ Span80 ทำให้

เชื้อเพลิงผสมเกิดการแยกเฟสซ้ำ เนื่องจาก Span80 มีความหนืดสูง มีสมบัติเป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ดีและมีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกับดีเซลซึ่งทำให้เกิดการแยกเฟสของเชื้อเพลิงผสมซ้ำกว่าอิมัลซิไฟเออร์ชนิดอื่น อีกทั้ง Span80 ยังเป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีค่า

Hydrophilic-lipophilic balance (HLB) เท่ากับ 4.3 จึงช่วยทำให้น้ำมันชีวภาพซึ่งมีน้ำผสมอยู่เกิดการกระจายตัวในน้ำมันดีเซลได้ดี (Lin et al., 2016; Liang et al., 2018; Farooq et al., 2019)

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบหาสมบัติและวิเคราะห์องค์ประกอบของวัตถุดิบ

Property	Diesel	Span80	Tween80	Ethanol	Bio-oil
Ultimate analysis (% wt., dry basis)					
Carbon	85.17±0.15	70.76±0.03	58.78±0.02	51.53±0.06	63.37±0.35
Nitrogen	>0.01	>0.01	>0.01	>0.01	0.86±0.04
Hydrogen	13.42±0.00	10.63±0.11	9.56±0.04	12.92±0.11	6.99±0.10
Oxygen	1.41±0.15	18.61±0.05	31.66±0.08	35.55±0.05	29.64±0.31
Sulphur	>0.01	>0.01	>0.01	>0.01	>0.04
Viscosity at 40 °C (cSt)	3.23	304	188.27	1.02	14.07
Flash Point (°C)	70	185	NA	30	NA
Pour Point (°C)	-1	-16	-16	-40	-13
Cloud Point (°C)	9	NA	NA	NA	NA
Solid content (% wt.)	0.14±0.08	0.49±0.40	0.46±0.12	0.07±0.03	5.62±1.37
pH	7.59±0.22	6.07±0.07	9.4±0.44	8.15±0.07	3.57±0.06
Ash content (% wt.)	0.13±0.03	0.09±0.02	0.08±0.02	0.04±0.02	2.99±0.06
Density (kg/m ³)	874.80±4.23	894.40±2.19	987.42±2.93	745.00±1.82	977.80±3.21
HHV (MJ/kg)	42.04±0.83	35.67±0.10	29.25±0.07	25.08±0.60	16.74±0.44

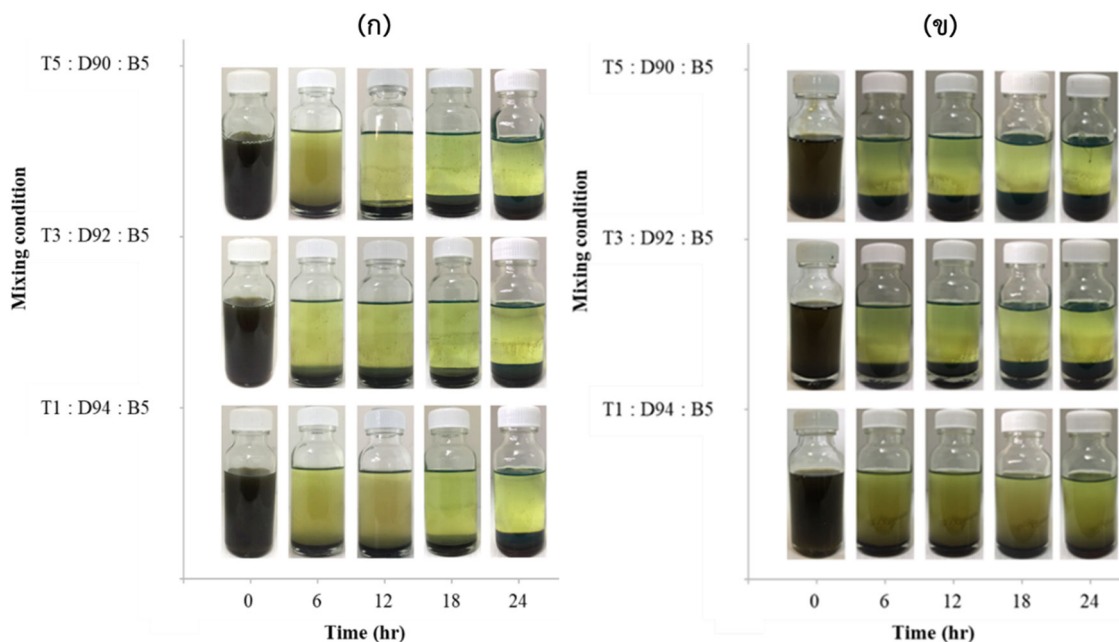


รูปที่ 2 ลักษณะของเชื้อเพลิงผสมที่ใช้ Span80 หลังผสมเสร็จและในระหว่างการเก็บ (ก) การผสมด้วยเครื่องปั่นผสมความเร็วรอบสูง (ข) การผสมโดยใช้คัตลินอัลตราโซนิค

2.2 คุณภาพของเชื้อเพลิงผสมระหว่าง Tween80

น้ำมันดีเซล และน้ำมันชีวภาพ รูปที่ 3 (ก) และ (ข) แสดงลักษณะของเชื้อเพลิงผสมระหว่าง Tween80 น้ำมันดีเซล และน้ำมันชีวภาพหลังการผสมเสร็จและที่ระยะเวลาการเก็บต่างๆ โดยใช้เครื่องปั่นผสมความเร็วรอบสูงและการใช้คลื่นอัลตราโซนิก จากรูปดังกล่าวจะเห็นได้ว่าสัดส่วนของ Tween80 และวิธีการผสมไม่ส่งผลต่อคุณภาพการผสมหลังผสมเสร็จอย่างชัดเจน และไม่ส่งผลต่อคุณภาพด้านความเป็นเดียวกันของเชื้อเพลิงผสมในระหว่างการเก็บ เมื่อพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพและการแยกเฟสของเชื้อเพลิงผสมดังแสดงตามรูปดังกล่าวจะเห็นได้ว่าหลังผสมเสร็จเชื้อเพลิงผสมค่อนข้างเป็นเนื้อเดียวกัน แต่มีการกระจายอนุภาคของ Tween80 และน้ำมันชีวภาพในดีเซลบ้างเล็กน้อย ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะของเหลวที่มีสารแขวนลอยหรือที่เรียกว่าอิมัลชัน หลังเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง เชื้อเพลิงผสมเกิดการแยกเฟสออกจากกันอย่างชัดเจนที่ทุกเงื่อนไขการผสม โดยที่น้ำมันชีวภาพและ Tween80 เกิดการแยกเฟสออกจากน้ำมันดีเซลไปอยู่ส่วนล่าง เนื่องจากน้ำมันชีวภาพและ Tween80 มีความหนาแน่นสูงกว่าน้ำมันดีเซลค่อนข้างมาก

นอกจากนี้ Tween80 ยังมีค่า HLB สูงกว่า Span80 (ค่า HLB ของ Tween80 เท่ากับ 15) ซึ่งทำให้ Tween80 เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีสมบัติเป็น Hydrophilic นอกจากนี้สาร Polyethylene glycol (PEG) ใน Tween 80 ยังมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าสาร Sorbitan ใน Span 80 ส่งผลทำให้คุณภาพการผสมของเชื้อเพลิงผสมที่ใช้ Span80 ดีกว่าการใช้ Tween80 (Lin et al., 2016) และเมื่อพิจารณาสีของเชื้อเพลิงผสมพบว่า สีของเชื้อเพลิงผสมหลังแยกชั้นหรือแยกเฟสมีลักษณะเป็นสีเหลืองและผสมน้ำตาลเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการละลายขององค์ประกอบทางเคมีบางส่วนของน้ำมันชีวภาพในน้ำมันดีเซล และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนของอิมัลซิไฟเออร์หรือ Tween80 ที่มีผลต่อการแยกเฟสของเชื้อเพลิงผสมพบว่า การผสมเชื้อเพลิงผสมที่เงื่อนไข T1:D94:B5 ซึ่งมีปริมาณ Tween80 ในปริมาณน้อยกว่าอัตราส่วนอื่นๆ ส่งผลทำให้เชื้อเพลิงผสมเกิดการแยกเฟสได้ช้ากว่าเงื่อนไขอื่นๆ ทั้งกรณีของการผสมด้วยเครื่องปั่นผสมและการใช้คลื่นอัลตราโซนิก ผลในส่วนนี้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของ Tween80 ทำให้เชื้อเพลิงผสมเกิดการแยกเฟสเร็วขึ้น เนื่องจากสมบัติของ Tween80 ดังได้กล่าวไว้แล้วก่อนหน้านี้



รูปที่ 3 ลักษณะของเชื้อเพลิงผสมที่ใช้ Tween80 หลังผสมเสร็จและในระหว่างการเก็บ (ก) การผสมด้วยเครื่องปั่นผสมความเร็วรอบสูง (ข) การผสมโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก

2.3 คุณภาพของเชื้อเพลิงผสมระหว่าง เอทานอล น้ำมันดีเซล และน้ำมันชีวภาพ รูปที่ 4 (ก) และ (ข) แสดงลักษณะของเชื้อเพลิงผสมระหว่างเอทานอล น้ำมันดีเซล และน้ำมันชีวภาพ ที่เงื่อนไขการผสมต่างๆ หลังผสมเสร็จและในระหว่างการเก็บรักษา โดยการผสมด้วยเครื่องปั่นความเร็วรอบสูงและการใช้คลื่นอัลตราโซนิค ผลการศึกษาพบว่า สัดส่วนของเอทานอลและวิธีการผสมส่งผลต่อคุณภาพการผสมทั้งหลังผสมเสร็จและในระหว่างการเก็บรักษา ในกรณีของเชื้อเพลิงผสมที่ผสมด้วยเครื่องปั่นความเร็วรอบสูงนั้นเชื้อเพลิงผสมหลังผสมเสร็จมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันที่ทุกความเข้มข้นของเอทานอล เนื่องจากเอทานอลมีสมบัติในการละลายดีเซลและน้ำมันชีวภาพให้เป็นเนื้อเดียว (Pozarlik et al., 2016; Omar et al., 2019) แต่เมื่อเก็บรักษาตัวอย่างไว้ 6 ชั่วโมง การแยกเฟสของเชื้อเพลิงผสมเริ่มสังเกตเห็นได้ชัดเจน และที่ระยะเวลาการเก็บนานขึ้นในขณะที่สัดส่วนของเอทานอลเพิ่มขึ้น การแยกเฟสของเชื้อเพลิงผสมจะเกิดขึ้นอย่างชัดเจน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Weerachanchai et al. (2009) และ Pozarlik et al. (2016) เนื่องจากองค์ประกอบของสารทั้งที่มีขั้วและไม่มีขั้วในเอทานอล น้ำมันชีวภาพ และน้ำมันดีเซลที่ต่างกัน สำหรับในกรณีของการผสมโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิคพบว่า การใช้คลื่นอัลตราโซนิคทำให้คุณภาพการผสมดีกว่าการใช้เครื่องปั่นผสมความเร็วรอบสูง ในกรณีดังกล่าวนี้การเพิ่มความสัดส่วนของเอทานอลส่งผลทำให้เชื้อเพลิงผสมเกิดการแยกเฟสที่ช้าลง ซึ่งแตกต่างกับกรณีของการใช้วิธีปั่นผสม ผลดังกล่าวนี้เกิดจากการใช้คลื่นอัลตราโซนิคช่วยให้ส่วนของผสมเกิดการแตกตัวขนาดเล็กและรวมตัวเป็นของเหลวเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้น

เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพและการแยกเฟสของเชื้อเพลิงผสมดังแสดงตามรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิงผสมหลังผสมเสร็จมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน และของเหลวมีสีน้ำตาลดำ เนื่องจากสีของน้ำมันชีวภาพที่มีลักษณะเข้ม เมื่อเก็บรักษาเป็นระยะเวลาต่างๆ เชื้อเพลิงผสมเกิดการแยกเฟสออกจากกันในช่วง 6 ชั่วโมงแรก สำหรับการปั่นผสม เนื่องจากเอทานอลมีความหนืดต่ำและมีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำมันดีเซลและน้ำมันชีวภาพ โดยน้ำมันชีวภาพเกิดการแยกเฟสลงไปอยู่ชั้นล่างเนื่องจากมีความหนาแน่นสูง ในขณะที่เอทานอลแยกเฟสไปอยู่ด้านบนเนื่องจากมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำมันดีเซลและน้ำมันชีวภาพ การพิจารณาสีของเชื้อเพลิงผสมหลังแยกเฟสพบว่า สีของน้ำมันดีเซล

เปลี่ยนจากสีเหลืองใสเป็นสีน้ำตาลแดงเข้มซึ่งบ่งบอกถึงการละลายขององค์ประกอบทางเคมีบางส่วนของน้ำมันชีวภาพในดีเซล อัตราส่วนที่เกิดการแยกเฟสช้าหลังจากผสมคือ E5:D90:B5 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของเอทานอลช่วยให้เชื้อเพลิงผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี เนื่องจากดีเซลและน้ำมันชีวภาพสามารถละลายได้ดีในสารละลายเอทานอล โดยปกติเอทานอลหรือแอลกอฮอล์ผสมได้ดีกับน้ำมันชีวภาพ เนื่องจากเอทานอลช่วยลดแรงดึงผิวของน้ำมันชีวภาพ (Weerachanchai et al., 2009; de Luna et al., 2017) นอกจากนี้เอทานอลหรือแอลกอฮอล์ยังช่วยปรับปรุงค่าความร้อนและความเป็นกรดของเชื้อเพลิงผสมให้ดีขึ้น (Suppos et al., 1997; Weerachanchai et al., 2009; Pozarlik et al., 2016; Liang et al., 2018) ดังนั้นอัตราส่วนที่มีเอทานอลสูงจึงสามารถคงรูปในรูปของเชื้อเพลิงผสมได้นานได้นานกว่าอัตราส่วนอื่นๆ นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบคุณภาพของเชื้อเพลิงผสมหลังผสมเสร็จและในระหว่างการเก็บรักษาพบว่า การใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายส่งผลทำให้ได้เชื้อเพลิงผสมที่มีคุณภาพการผสมดีกว่าการใช้ Tween80 และ Span80

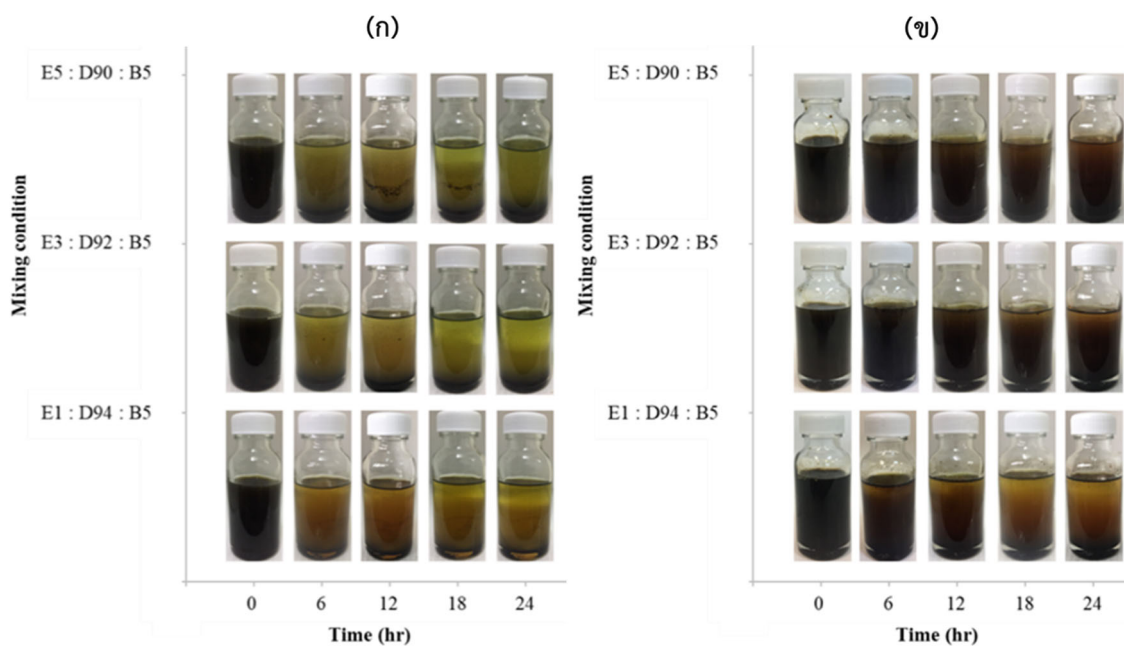
3. สมบัติและองค์ประกอบของเชื้อเพลิงผสม

ผลการทดสอบหาสมบัติและองค์ประกอบของเชื้อเพลิงผสมแสดงดังตารางที่ 3 ซึ่งในส่วนนี้ได้มีการทดสอบหาสมบัติและวิเคราะห์หาองค์ประกอบของเชื้อเพลิงผสมที่ผสมภายใต้เงื่อนไข S5:D90:B5, T1:D94:B5 และ E5:D90:B5 และใช้วิธีการผสมแบบใช้คลื่นอัลตราโซนิค เนื่องจากเป็นเงื่อนไขผสมที่ทำให้เชื้อเพลิงผสมมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันหลังผสมเสร็จ ผลการทดสอบหาสมบัติและวิเคราะห์หาองค์ประกอบของเชื้อเพลิงผสมพบว่า องค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของเชื้อเพลิงผสมคือ คาร์บอนและไฮโดรเจน เชื้อเพลิงผสมมีปริมาณคาร์บอนไฮโดรเจน และออกซิเจน อยู่ในช่วงร้อยละ 80.90-83.16, 12.37-12.86 และ 3.84-6.50 (wt.) เชื้อเพลิงผสมมีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่าน้ำมันดีเซลเล็กน้อย เนื่องจาก Span80, Tween80 เอทานอล และน้ำมันชีวภาพ มีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่าน้ำมันดีเซล การผสมน้ำมันดีเซลกับอิมัลซิไฟเออร์ หรือเอทานอล และน้ำมันชีวภาพภายใต้สัดส่วนที่กำหนดทำให้ปริมาณไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงผสมลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล เมื่อพิจารณาค่าความร้อนสูง (HHV) ของเชื้อเพลิงผสมพบว่าเชื้อเพลิงผสมมีค่าความร้อนสูงอยู่ในช่วง 42.12-43.83 MJ/kg ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล ในส่วนของปริมาณซัลเฟอร์และ

ไนโตรเจนในเชื้อเพลิงผสมพบว่า เชื้อเพลิงผสมมีปริมาณซัลเฟอร์และไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ปริมาณซัลเฟอร์และไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นนั้นเกิดจากไนโตรเจนและซัลเฟอร์ของน้ำมันชีวภาพ การที่เชื้อเพลิงผสมมีปริมาณไนโตรเจนและซัลเฟอร์ต่ำจะทำให้ SO_x และ NO_x ที่เกิดจากการเผาไหม้มีปริมาณน้อย

การพิจารณาสมบัติของเชื้อเพลิงผสมซึ่งประกอบด้วย ความหนืด จุดไหลเท จุดวาบไฟ และจุดขุ่นมัว พบว่า การใช้ Span80 และ Tween80 เป็นอิมัลซิไฟเออร์ส่งผลทำให้เชื้อเพลิงผสมมีความหนืดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากความหนืดของอิมัลซิไฟเออร์ดังกล่าวมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล แต่ในกรณีที่ใช้เอทานอลพบว่า เชื้อเพลิงผสมมีความหนืดลดลงเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากเอทานอลมีความหนืดต่ำกว่าดีเซล การเพิ่มปริมาณ

อิมัลซิไฟเออร์ส่งผลทำให้ค่าความหนืดของเชื้อเพลิงผสมมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอิมัลซิไฟเออร์มีค่าความหนืดสูง (Liang et al., 2018; Hansen et al., 2020) เชื้อเพลิงผสม E5:D90:B5 มีค่าความหนืดต่ำ ค่าจุดไหลเทที่ลดลง และมีจุดวาบไฟที่อุณหภูมิห้อง (Room temperature, RT) เนื่องจากน้ำมันชีวภาพและน้ำมันดีเซลสามารถละลายได้ดีในเอทานอล (สายโซ่ยาวของอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนของเอทานอลทำให้สามารถเกิดการละลายได้ดีในน้ำมันดีเซลและน้ำมันชีวภาพ) ในส่วนของค่าความขุ่นมัวของเชื้อเพลิงผสมนั้นไม่สามารถวัดได้เนื่องจากสีของน้ำมันชีวภาพที่มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้ม ค่าความเป็นกรด-ด่างของเชื้อเพลิงผสมค่อนข้างต่ำ เนื่องจากน้ำมันชีวภาพมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงและอิมัลซิไฟเออร์



รูปที่ 4 ลักษณะของเชื้อเพลิงผสมที่ใช้อทานอลหลังผสมเสร็จและในระหว่างการเก็บ (ก) การผสมด้วยเครื่องปั่นผสมความเร็วรอบสูง (ข) การผสมโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิค

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบหาสมบัติและวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงผสม

Property	E5:D90:B5	S5:D90:B5	T1:D94:B5
Ultimate analysis (% wt.)			
Carbon	80.90±0.28	83.16±0.29	82.70±0.95
Nitrogen	0.11±0.00	0.12±0.00	0.11±0.00
Hydrogen	12.37±0.07	12.80±0.03	12.86±0.12
Oxygen	6.50±1.35	3.84±0.31	4.25±1.07
Sulphur	0.13±0.01	0.08±0.00	0.07±0.00
Viscosity at 40 °C (cSt)			
	2.97	3.55	3.66
Flash point (°C)			
	RT	74	70
Pour point (°C)			
	0	2	-1
Cloud point (°C)			
	NA	NA	NA
Solid content (% wt.)			
	0.20±0.07	0.17±0.10	0.13±0.13
pH			
	3.63±0.35	3.37±0.08	2.94±0.15
Ash content (% wt.)			
	0.01±0.00	0.02±0.00	0.01±0.00
Density (kg/m ³)			
	893.40±5.76	931.12±6.42	950.83±5.38
HHV (MJ/kg)			
	42.12±0.68	43.83±0.17	43.57±0.59

RT หมายถึง Room temperature

NA หมายถึง Not available

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาคุณภาพ สมบัติ และองค์ประกอบของเชื้อเพลิงผสม ซึ่งผสมระหว่างน้ำมันดีเซล น้ำมันชีวภาพและอิมัลซิไฟเออร์ (Span80 และ Tween80) หรือเอทานอล ภายใต้สัดส่วนที่กำหนดโดยใช้วิธีปั่นผสมด้วยเครื่องปั่นความเร็วรอบสูงและการผสมโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิค ผลการศึกษานี้ได้แสดงให้เห็นว่าชนิดและสัดส่วนของอิมัลซิไฟเออร์ และเอทานอล รวมทั้งวิธีการผสมส่งผลต่อคุณภาพของเชื้อเพลิงผสมหลังผสมเสร็จและในระหว่างการเก็บรักษา การผสมโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิคทำให้เชื้อเพลิงผสมสามารถผสมกันได้ดีกว่าการใช้วิธีปั่นผสมความเร็วรอบสูง ซึ่งสามารถสังเกตได้โดยตรงจากลักษณะปรากฏหรือความเป็นเนื้อเดียวกันของเชื้อเพลิงผสม นอกจากนี้การผสมด้วยคลื่นอัลตราโซนิคยังทำให้เชื้อเพลิงผสมแยกเฟสได้ช้ากว่าการปั่นผสม ในส่วนผลของชนิดอิมัลซิไฟเออร์หรือตัวทำละลาย พบว่าการผลิตเชื้อเพลิงผสมโดยใช้ Span80 เป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่สัดส่วนร้อยละ 5 (wt.) น้ำมันดีเซลร้อยละ 90 (wt.) และน้ำมันชีวภาพร้อยละ 5 (wt.) (S5:D90:B5) ทำให้เชื้อเพลิงผสมมีคุณภาพการผสมดีที่สุดในหลังผสมเสร็จและในระหว่างการเก็บรักษา แต่อย่างไรก็ตามเชื้อเพลิงผสมเกิดการแยกเฟสเมื่อระยะเวลาการเก็บนานขึ้น ในกรณีของเชื้อเพลิงผสมที่ใช้

เอทานอลเป็นส่วนผสม พบว่าเงื่อนไขการผสมที่เหมาะสมคืออัตราส่วน E5:D90:B5 ซึ่งที่เงื่อนไขดังกล่าวนี้ทำให้เชื้อเพลิงผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันได้ดีกว่าการใช้ Span80 ที่สัดส่วนเดียวกัน การผลิตเชื้อเพลิงผสมที่เงื่อนไขดังกล่าวทำให้ได้เชื้อเพลิงผสมซึ่งมีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนภายใต้โครงการเครือข่ายพันธมิตรมหาวิทยาลัยเพื่อการวิจัย คลัสเตอร์พลังงานจากเงินกองทุนวิจัย มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

- Bhimani, S., Alvarado, J. L., Annamalai, K. and Marsh, C. (2013). Emission characteristics of methanol-in-canola oil emulsions in a combustion chamber. *Fuel* 113: 97-106.
- Chandran, R., Kaliaperumal, R., Balakrishnan, S., Britten, A. J., MacInnis, J. and Mkandawire, M. (2020). Characteristics of bio-oil from continuous fast pyrolysis of *Prosopis juliflora*. *Energy* 190: 116387.
- Chong, Y. Y., Thangalazhy-Gopakumar, S., Ng, H. K., Ganesan, P. B., Gan, S., Lee, L. Y., Manickavel, V. S. A. R., Ong, C.M. and Hinai, H.S.R.A. (2017). Emulsification of bio-oil and

- diesel. *Chemical Engineering Transactions* 56: 1801-1806.
- Delmas, H. and Barthe, L. (2015). 25-Ultrasonic mixing, homogenization, and emulsification in food processing and other applications. *Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound* 757-791.
- de Luna, M. D. G., Cruz, L. A. D., Chen, W.-H., Lin, B.-J. and Hsieh, T.-H. (2017). Improving the stability of diesel emulsions with high pyrolysis bio-oil content by alcohol co-surfactants and high shear mixing strategies. *Energy* 141: 1416-1428.
- Farooq, A., Shafaghat, H., Jae, J., Jung, S.-C. and Park, Y.-K. (2019). Enhanced stability of bio-oil and diesel fuel emulsion using Span 80 and Tween 60 emulsifiers. *Journal of Environmental Management* 231: 694-700.
- Farooq, A., Lee, H. W., Jae, J., Kwon, E.E. and Park, Y.-K. (2020). Emulsification characteristics of ether extracted pyrolysis-oil in diesel using various combinations of emulsifiers (Span 80, Atlox 4916 and Zephyrym PD3315) in double reactor system. *Environmental Research* 184: 109267.
- Gnanamoorthi, V. and Devaradjane, G. (2015). Effect of compression ratio on the performance, combustion and emission of di diesel engine fueled with ethanol-Diesel blend. *Journal of the Energy Institute* 88(1): 19-26.
- Hansen, S., Mirkouei, A. and Diaz, L. A. (2020). A comprehensive state-of-technology review for upgrading bio-oil to renewable or blended hydrocarbon fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 118: 109548.
- Hsieh, C.-T., Lin, P.-H. and Lai, J.-H. (2014). An Emulsification Method of Bio-oils in Diesel. *China steel technical report* 27: 78-82.
- Ikura, M., Stanculescu, M. and Hogan, E. (2003). Emulsification of pyrolysis derived bio-oil in diesel fuel. *Biomass and Bioenergy* 24: 221 – 232.
- Karabektas, M. and Hosoz, M. (2009). Performance and emission characteristics of a diesel engine using isobutanol-diesel fuel blends. *Renewable Energy* 34: 1554-1559.
- Leng, L., Yuan, X., Chen, X., Huang, H., Wang, H., and Li, H. (2015). Characterization of liquefaction bio-oil from sewage sludge and its solubilization in diesel microemulsion. *Energy* 82: 218-228.
- Leng, L. (2019). Biosurfactant rhamnolipid assisted micro-emulsification of bio-oil components in diesel. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects* 41(7): 829-843.
- Liang, J., Qian, Y., Yuan, X., Leng, L., Zeng, G., Jiang, L., Shao, J., Luo, Y., Ding, X., Yang, Z. and Li, X. (2018). Span80/Tween80 stabilized bio-oil-in-diesel micro-emulsion: Formation and combustion. *Renewable Energy* 126: 774-782.
- Lin, B.-J., Chen, W.-H., Budzianowski, W. M., Hsieh, C.-T. and Lin, P.-H. (2016). Emulsification analysis of bio-oil and diesel under various combinations of emulsifiers. *Applied Energy* 178: 746-757.
- Lin, B.-J., Chen, W.-H., Hsieh, T.-H., Ong, H. C., Show, P. L. and Naqvi, S.R. (2019). Oxidative reaction interaction and synergistic index of emulsified pyrolysis bio-oil/diesel fuel. *Renewable Energy* 136: 223-234.
- Liu, K., Zhao, W., Guo, T., Lei, Q., Guan, Y., Wang, D., Cui, M., Fu, S., Zhao, J., Zong, Z. and Wei, X. (2019). Emulsification and Performance Measurement of Bio-oil with Diesel. *Waste and Biomass Valorization* (in press)
- Nguyen, D. and Honnery, D. (2008). Combustion of bio-oil ethanol blends at elevated pressure. *Fuel* 87(2): 232-243.
- Niculescu, R., Clenci, A. and Iorga-Siman, V. (2019). Review on the Use of Diesel-Biodiesel-Alcohol Blends in Compression Ignition Engines. *Energies* 12(7): 1194.
- Omar, S., Alsamaq, S., Yang, Y. and Wang, J. (2019). Production of renewable fuels by blending bio-oil with alcohols and upgrading under supercritical conditions. *Frontiers of Chemical Science and Engineering* 13(4): 702-717.
- Palamanit, A., Khongphakdi, P., Tirawanichakul, Y. and Phusunti, N. (2019). Investigation of yields and qualities of pyrolysis products obtained from oil palm biomass using an agitated bed pyrolysis reactor. *Biofuel Research Journal* 24: 1065-1079.
- Pozarlik, A. K., Bijl, A., van Alst, N., Pander, R., Bramer, E. A. and Brem, G. (2016). Combustion of Pyrolysis Oil Blends with Diesel Fuel in a Micro Gas Turbine. 24th European Biomass Conference and Exhibition, 6-9 June 2016, Amsterdam, The Netherlands. 693-697.
- Prakash, R., Singh, R. K. and Murugan, S. (2011). Performance and Emission Studies in a Diesel Engine Using Bio Oil-Diesel

- Blends. International Conference on Environmental Science and Technology 6: 1-6.
- Prakash, R., Singh, R. K. and Murugan, S. (2013). Use of biodiesel and bio-oil emulsions as an alternative fuel for direct injection diesel engine. *Waste and Biomass Valorization* 4(3): 475-484.
- Shahzeb Khan, M., Rafiq, M., Sookrah, V. and Thomson, M.J. (2019). Effect of Dewatering Wood-Derived Fast Pyrolysis Oil on Its Fuel Properties for Power Generation. *Energy and Fuels* 33(12): 12403-12420.
- Shrivastava, P., Khongphakdi, P., Palamanit, A., Kumar, A. and Tekasakul, P. (2020). Investigation of physicochemical properties of oil palm biomass for evaluating potential of biofuels production via pyrolysis processes. *Biomass Conversion and Biorefinery* (in press).
- Somnuk, K., Smithmaitrie, P. and Prateepchaikul, G. (2013). Two-stage continuous process of methyl ester from high free fatty acid mixed crude palm oil using static mixer coupled with high-intensity of ultrasound. *Energy Conversion and Management* 75: 302-310.
- Suppos, G., Bryan, M., Regehr, E. V. and Rui, Y. (1997). Ignition delay time analysis of pyrolysis oil. In: Overend RP, Chomet E, editors. *Third biomass conference of the Americas*. Elsevier Science Limited. 869.
- Weerachanchai, P., Tangsathitkulchai, C. and Tangsathitkulchai, M. (2009). Phase behaviors and fuel properties of bio-oil-diesel-alcohol blends. *International Journal of Chemical and Molecular Engineering* 3: 8.
- Xiu, S. and Shahbazi, A. (2012). Bio-oil production and upgrading research: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(7): 4406-4414.
- Yahuza, I. and Dandakouta, H. (2015). A Performance Review of Ethanol-Diesel Blended Fuel Samples in Compression-Ignition Engine. *Journal of Chemical Engineering & Process Technology* 6: 1-6.
- Yuan, X., Ding, X., Leng, L., Li, H., Shao, J., Qian, Y., Huang, H., Chen, X. and Zeng, G. (2018). Applications of bio-oil-based emulsions in a DI diesel engine: The effects of bio-oil compositions on engine performance and emissions. *Energy* 154: 110-118.
- Yu, Y. (2019). Experimental study on effects of ethanol-diesel fuel blended on spray characteristics under ultra-high injection pressure up to 350 MPa. *Energy* 186: 115768.

