

การใช้ส่วนกลั่นกรดไขมันที่ผ่านการเอทานอลิซิสบางส่วน โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นส่วนผสมดีเซล/ดีโซฮอล

Use of Partially Non-Catalyzed Ethanolyzed Palm Fatty Acid Distillate as Diesel/Diesohol Extenders

ศุภวุฒิ เปี่ยมเจริญสุข¹ ศุภกิจ เอียดตรง² ปริญญ์ หม่อมพิบูลย์^{1,3} ฐานันดรศักดิ์ เทพญา¹
และ ชีระยุทธ หลีวีจิตร^{1*}

Suppawoot Piamcharoensuk¹, Suppakit Eiadtrong², Parinya Mompiboon^{1,3}, Thanansak Theppaya¹
and Theerayut Leevijit^{1*}

Received: 24 April 2022, Revised: 3 August 2022, Accepted: 26 August 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมส่วนกลั่นกรดไขมันเอสเตอร์ไฟด์บางส่วน (PEPFAD) โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อใช้เป็นส่วนผสมดีเซล/ดีโซฮอล โดย PEPFAD ถูกเตรียมโดยการทำปฏิกิริยาสวนกลั่นกรดไขมันที่มีกรดไขมันอิสระสูง (≥ 90 wt.%) กับเอทานอลชนิดไม่มีน้ำ (AHe) ในถังปฏิกรณ์แบบกะ ที่สัดส่วนโดยโมล 1:1 อุณหภูมิ 289°C และความดัน 72 บาร์ เป็นเวลา 60 นาที ผลิตภัณฑ์สุดท้ายของ PEPFAD ที่ได้มีองค์ประกอบหลักเป็นเอทิลเอสเตอร์ 71.6 wt.% และกรดไขมันอิสระ 26.8 wt.% และองค์ประกอบอื่น ๆ อีก 1.6 wt.% ผลการศึกษาเสถียรภาพเฟสระยะยาวของเชื้อเพลิงผสมโดยเก็บเชื้อเพลิงไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 90 วัน พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถผสมกับดีเซลหมุนเร็วเกรดการค้า (CHSD) เป็นเชื้อเพลิงเหลวผสม 2 ส่วน CHSD-PEPFAD ได้สูงสุด 40 wt.% และสามารถผสมเป็นเชื้อเพลิงเหลวผสม 3 ส่วน CHSD-PEPFAD-AHe หรือดีโซฮอล ได้สูงสุด 80 wt.% อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาเพิ่มเติมจากผลการทดสอบคุณสมบัติการเป็นของเหลวและการไหลที่อุณหภูมิค่าที่สำคัญ พบว่ามีเชื้อเพลิงผสมที่น่าสนใจสำหรับการใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล 2 สูตร คือ PEPFAD30 และ PEPFAD50AHe10

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

¹ Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand.

² สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและหุ่นยนต์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช 80161

² Department of Mechanical and Robotic Engineering, School of Engineering and Technology, Walailak University, Tha Sala, Nakhon Si Thammarat 80161, Thailand.

³ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช อำเภอเมืองนครศรีธรรมราช จังหวัดนครศรีธรรมราช 80280

³ Division of Mechanical Engineering, Faculty of Industrial Technology, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University, Mueang Nakhon Si Thammarat, Nakhon Si Thammarat 80280, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): leetheerayut@yahoo.com

(ตัวเลขที่ตามหลัง PEPFAD และ AhE คือสัดส่วนการผสมกับดีเซลในหน่วย wt.%) สำหรับการทดสอบใช้งานเบื้องต้นในเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียว ยี่ห้อคูโบต้า รุ่น RT100DI PLUS เปรียบเทียบกับดีเซลบนแท่นทดสอบ โดยเปลี่ยนแปลงภาระในช่วง 1.28-6.40 kW ที่ความเร็วรอบสูงคงที่ 2,200 rpm พบว่า เชื้อเพลิงผสมที่น่าสนใจทั้ง 2 สูตรนี้สามารถใช้งานในเครื่องยนต์ได้ดีเช่นเดียวกับดีเซล โดยมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรคและประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคใกล้เคียงหรือสูงกว่าดีเซลเล็กน้อย

คำสำคัญ: ส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม, กรดไขมันโมเลกุลยาว, เอทานอลไร้สี, เชื้อเพลิงทดแทนดีเซล, ดีโซฮอล

ABSTRACT

This work studied the preparation of partially esterified palm fatty acid distillate (PEPFAD) by non-catalyzed to use as diesel/diesohol extenders. In this article, PEPFAD was prepared by reacting of palm fatty acid distillate containing high free fatty acids (≥ 90 wt.%) with anhydrous ethanol (AhE) in a batch reactor at molar ratio of 1:1, temperature of 289°C , and pressure of 72 bar for 60 min. The obtained final product of PEPFAD mainly contained ethyl esters of 71.6 wt.% and free fatty acids of 26.8 wt.% with other remaining constitutes of 1.6 wt.%. The important studied results of long-term phase behavior of blended fuels kept at room temperature for 90 days found that the product was able to be blended with commercial high speed diesel (CHSD) as binary liquid CHSD-PEPFAD blends up to the maximum portion of 40 wt.% and as disohol of ternary liquid CHSD-PEPFAD-AhE blends up to the maximum portion of 80 wt.%. However, as further considering based on the tested results of important fluidity and cold flow properties, it was found that two formulae of the blends were interested for using as the alternative diesel including PEPFAD30 and PEPFAD50AhE10, the number following PEPFAD and AhE is the blending portion of wt.% with diesel. For preliminary utilization test compared with diesel on a test bench, a single-cylinder diesel engine model KUBOTA RT100 DI PLUS was used for testing under varying loads in the range of 1.28 to 6.40 kW at the constant high engine speed of 2200 rpm. It was found that both blends of interest were able to well operate the test engine as same as diesel with similar or slightly higher brake specific fuel consumption and brake thermal efficiency.

Key words: palm fatty acid distillate, palm tall oil monoacids, ethanolysis, diesel substitute, diesohol

บทนำ

จากสถานการณ์การใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามรายงานของ International Energy Agency (IEA) ที่คาดการณ์ว่า โลกจะมีความต้องการพลังงานเพิ่มขึ้นสูงถึง 50% ภายในปี ค.ศ. 2030 ซึ่ง

พลังงานเกือบทั้งหมดเป็นพลังงานฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมันดิบ และก๊าซธรรมชาติ เสมือนเป็นพลังงานสิ้นเปลืองที่มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องสวนทางกับความต้องการที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ราคาปรับตัวเพิ่มขึ้น โดยดีเซลเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์จากการกลั่นน้ำมันดิบ

ที่มีความสำคัญ เนื่องจากการใช้งานกับรถบรรทุกขนาดใหญ่ รถไฟ เรือ และอุปกรณ์เครื่องยนต์อื่นที่ต้องการกำลังสูง สำหรับประเทศไทยพบว่ามีการใช้เชื้อเพลิงดีเซลสูงถึง 47% จากการใช้น้ำมันทั้งหมดในปี พ.ศ.2564 (Department of Energy Business Ministry of Energy, 2021) จึงมีการศึกษาวิจัยจากทั่วโลกเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ทดแทน เช่น การผลิตไบโอดีเซล การใช้น้ำมันพืชโดยผ่านกระบวนการคัดแปลงโมเลกุลเล็กน้อย และนำมาผสมกับดีเซลเป็นเชื้อเพลิงผสมสองส่วน (Binary blends) หรือการผสมสามส่วน (Ternary blends) ระหว่าง ดีเซล-น้ำมันพืช/ไบโอดีเซล-แอลกอฮอล์ เรียกว่า “ดีโซฮอล์” (Yilmaz and Vigil, 2014; Leevijit *et al.*, 2017) ซึ่งสามารถใช้งานได้จริงในเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่ต้องปรับแต่งเครื่องยนต์ นอกจากนี้ ยังพบว่าการใช้ดีโซฮอล์สามารถลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมลพิษอื่น ๆ สู่ชั้นบรรยากาศได้อย่างมีนัยสำคัญ (He *et al.*, 2003; Atabani *et al.*, 2012) อย่างไรก็ตาม การผลิตดีโซฮอล์ที่ผสมสองส่วนระหว่างดีเซลกับแอลกอฮอล์ยังมีข้อด้อยที่สำคัญ คือ 1) คุณลักษณะความเป็นขั้วของแอลกอฮอล์และความไม่เป็นขั้วของดีเซล เมื่อผสมกันจะทำให้เกิดการแยกชั้น 2) ค่าซีเทนต่ำกว่าดีเซลมาก 3) ความหนืดน้อยกว่าดีเซล 4) คุณสมบัติด้านอื่น ๆ ต่ำกว่าดีเซล เช่น ความหนาแน่น ค่าความร้อน จุดวาบไฟ เป็นต้น จากข้อด้อยข้างต้นที่เป็นข้อจำกัดจึงมีการเติมสารอิมัลซิไฟเออร์เพื่อปรับปรุงการใช้งานให้เทียบเท่าดีเซล (Lapuerta *et al.*, 2010; Eiadtrong *et al.*, 2019) โดยสหรัฐอเมริกามีการวิจัยพัฒนาสารอิมัลซิไฟเออร์ควบคู่กับการกำหนดแผนนโยบายที่จะนำไปใช้ในเชิงการค้า เช่น บริษัท Pure energy corporation (PEC) ใช้สารอิมัลซิไฟเออร์ 2-5 vol.% กับเอทานอล 10-15 vol.% และบริษัท AAE Technologies ใช้สารอิมัลซิไฟเออร์ 1 vol.% และ 1.25

vol.% กับเอทานอล 7.7 vol.% และ 10 vol.% (Eiadtrong *et al.*, 2019) ในขณะที่ประเทศไทยเคยมีการศึกษาการใช้ดีโซฮอล์เป็นเชื้อเพลิงทดแทนดีเซลที่เป็นความร่วมมือระหว่างบริษัท ปตท. บริษัทรถยนต์ฟอร์ด และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTECT) โดยผสมสารอิมัลซิไฟเออร์ที่นำเข้า 1 vol.% และเอทานอล 10 vol.% (Srithammarong, 2003) อย่างไรก็ตาม การนำสารอิมัลซิไฟเออร์จากต่างประเทศมีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้น การผลิตสารอิมัลซิไฟเออร์จากวัตถุดิบการเกษตรภายในประเทศจึงเป็นทางเลือกที่สำคัญสำหรับการพัฒนาและวิจัยเชื้อเพลิงดีโซฮอล์

ประเทศไทยมีการวิจัยและพัฒนาสารอิมัลซิไฟเออร์สำหรับผลิตดีโซฮอล์จากวัตถุดิบทางการเกษตร เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงานควบคู่กับการใช้ประโยชน์จากผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ซึ่งหากสามารถใช้จริงในเชิงพาณิชย์จะส่งผลให้ราคาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรปรับตัวเพิ่มขึ้นตามกลไกตลาดอย่างยั่งยืนในอนาคต โดยในปี พ.ศ. 2559 มีการศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้กรดไขมันปาล์มโมเลกุลยาวที่ได้จากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม (PFAD) ที่เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ราคาถูกจากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มบริโภคมาใช้เป็นส่วนผสมทดแทนดีเซลได้สูงสุด 10 wt.% และเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์สำหรับผลิตดีโซฮอล์จากเอทานอลไม่มีน้ำ/มีน้ำ และบิวทานอลชนิดไม่มีน้ำได้สูงสุด 40-50 wt.% สามารถคงลักษณะทางกายภาพเป็นของเหลวระยะยาวและมีคุณสมบัติเชื้อเพลิงเทียบเท่าดีเซล (Eiadtrong, 2016; Eiadtrong *et al.*, 2019)

ดังนั้น เพื่อเพิ่มศักยภาพกรดไขมันปาล์มโมเลกุลยาวจากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม งานวิจัยนี้จึงใช้กระบวนการเอทานอลิซิสบางส่วนที่สภาวะการทำปฏิกิริยาอุณหภูมิสูงและความดันสูงโดยไม่ใช้

ตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็น ส่วนกลั่นกรดไขมันพาล์มเอสเทอร์ไฟฟ้างส่วน (Partially Esterified Palm Fatty Acid Distillate: PEPFAD) ที่มีองค์ประกอบหลักเป็นเอทิลเอสเทอร์และกรดไขมันอิสระ เพื่อใช้เป็น ส่วนผสมทดแทนดีเซลและสารอิมัลซิไฟเออร์สำหรับผลิตดีโซฮอล์ต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

ส่วนกลั่นกรดไขมันพาล์ม (PFAD) ซื้อมาจากบริษัท สุขสมบูรณ์น้ำมัน พืชจำกัด ตำบลห้างสูง อำเภอหนองใหญ่ จังหวัดชลบุรี มีองค์ประกอบเป็น กรดไขมันอิสระ ไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ 93.8, 1.9, 2.2 และ 2.1 wt.% ตามลำดับ ดีเซลหมุนเร็วเกรดการค้า (CHSD) (ผสมเมทิลเอสเทอร์ 6-7

vol.%) ซื้อมาจากปั๊มน้ำมันบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ตำบลคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา และเอทานอลชนิดไม่มีน้ำเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% (AhE) ซื้อมาจากบริษัท แกรททิทูคอินฟินิท จำกัด (มหาชน)

ในงานวิจัยนี้มีวิธีการดำเนินงาน 4 ขั้นตอนหลัก คือ 1) การเตรียมส่วนกลั่นกรดไขมันพาล์มเอสเทอร์ไฟฟ้างส่วนด้วยกระบวนการเอทานอลิซิสโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2) การศึกษาพฤติกรรมเฟสที่อุณหภูมิห้องระยะยาวของเชื้อเพลิงผสม CHSD-PEPFAD-AhE 3) การศึกษาคุณสมบัติการเป็นของเหลวและการไหลที่สำคัญของเชื้อเพลิงผสม และ 4) การทดสอบใช้งานเชื้อเพลิงผสมที่น่าสนใจในเครื่องยนต์เบื้องต้นเปรียบเทียบกับดีเซลบนแท่นทดสอบ ดังสรุปขั้นตอนการศึกษา ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปขั้นตอนการศึกษาของงานวิจัย

ขั้นตอนการศึกษา		การศึกษาของแต่ละขั้นตอน		
1. การเตรียม PEPFAD ด้วย กระบวนการเอทานอลิซิสโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	1.1 ล้าง PFAD	1.2 เตรียมผสมวัตถุดิบ PFAD และ AhE ที่ อัตราส่วนโดยโมล 1:1	1.3 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 275 °C ความดัน 70 บาร์ เป็นเวลา 60 นาที	1.4 อุ่นได้ แอลกอฮอล์ อุณหภูมิ ~120 °C เป็นเวลา 30 นาที
2. พฤติกรรมเฟสระยะยาวของเชื้อเพลิงผสม CHSD-PEPFAD-AhE	2.1 เตรียมเชื้อเพลิงผสมน้ำหนักรวม 10.0 กรัม ที่สัดส่วนของแต่ละองค์ประกอบ ในช่วง 0-100 wt.% (ที่ทุก ๆ ช่วง การผสม 10 wt.%)	2.2 วางนึ่งที่อุณหภูมิห้อง (อุณหภูมิรายวันอยู่ในช่วง 22-34 °C) เป็นเวลา 90 วัน เพื่อสังเกตพฤติกรรมเฟสระยะยาว		
3. คุณสมบัติการเป็นของเหลวและการไหลที่สำคัญของเชื้อเพลิงผสม	3.1 คุณสมบัติการเป็นของเหลวและการไหลที่สำคัญ ได้แก่ 1) จุดจุด 2) จุดไหลเท และ 3) ความหนืดจลนศาสตร์	3.2 เลือกเชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติการเป็นของเหลวและการไหลผ่านมาตรฐาน HSD และ AED	3.3 ศึกษาคุณสมบัติเชื้อเพลิงที่สำคัญเพิ่มเติม ได้แก่ 1) ความหนาแน่น 2) ค่าความร้อน และ 3) ค่าซีเทน	

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ขั้นตอนการศึกษา		การศึกษาของแต่ละขั้นตอน	
4. การทดสอบใช้งานเชื้อเพลิงผสมที่นำเสนอในเครื่องยนต์เบื้องต้นเปรียบเทียบกับดีเซลบนแท่นทดสอบ	4.1 ทดสอบในเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียว ยี่ห้อคูโบต้า รุ่น RT100 DI PLUS ขนาด 10 แรงม้า	4.2 เงื่อนไขการทดสอบ 1) เปลี่ยนแปลงภาระในช่วง 1.28-6.40 kW และ 2) ความเร็วรอบสูงคงที่ 2,200 rpm	4.3 ผลการทดสอบ 1) อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรค 2) ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค และ 3) อุณหภูมิไอเสีย

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมส่วนกลั่นกรดไขมันพาล์มเอสเทอร์ไฟด์บางส่วนด้วยกระบวนการเอทานอลิซิสโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เริ่มด้วยการล้างทำความสะอาดส่วนกลั่นกรดไขมันอย่างง่ายและการอุ่นไอน้ำ (Eiadtrong *et al.*, 2021) จากนั้นเตรียมส่วนผสมสำหรับทำปฏิกิริยาโดยชั่งส่วนกลั่นกรดไขมัน 1724.5 กรัม และเอทานอลชนิดไม่มีน้ำ 275.5 กรัม (น้ำหนักรวม 2,000 กรัม ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:1) นำไปกวนอุ่นผสมอย่างง่ายในบีกเกอร์ขนาด 3 ลิตร บนแท่นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $\approx 50 \pm 5^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 15 นาที (ใช้ใบกวนชนิด 6-blade disk turbine เส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร ที่ความเร็วรอบการกวน $\approx 250\text{-}300\text{ rpm}$)

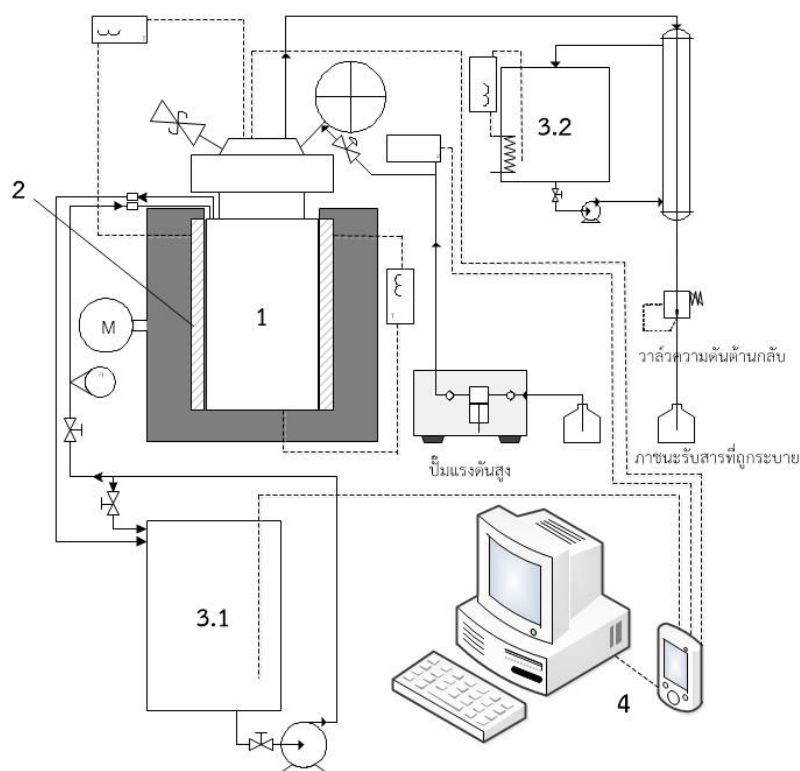
จากนั้นนำส่วนผสม (2,000 กรัม) ไปบรรจุและทำปฏิกิริยาในชุดทดลองเครื่องปฏิกรณ์แบบกะขนาด 2 ลิตร ดังไดอะแกรมภาพที่ 1 ประกอบด้วยถังปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร ฮีตเตอร์หล่อทรงกระบอกระบบหล่อเย็น และหน่วยบันทึกข้อมูล ตามขั้นตอนการทดลองโดยย่อต่อไปนี้ เมื่อบรรจุส่วนผสมและปิดฝาถังปฏิกรณ์เรียบร้อยแล้ว เปิดฮีตเตอร์ให้ความร้อนแก่ถังปฏิกรณ์ (วัดอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์ด้วยเทอร์โมคัปเปิล type k และควบคุมอุณหภูมิ ให้ความร้อนด้วยเครื่องควบคุมแบบดิจิทัล ยี่ห้อ

DIGICON รุ่น MD-400A) โดยระหว่างการให้ความร้อนมีการใช้ปั๊มแรงดันสูง HPLC pump รุ่น Series-I และวาล์วควบคุมความดันด้านกลับ ยี่ห้อ GO Regulator รุ่น BP-60 Series ช่วยควบคุมรักษาความดันในถังปฏิกรณ์ไว้ที่ ≈ 70 บาร์ เริ่มจับเวลาการทำปฏิกิริยาเมื่ออุณหภูมิในถังปฏิกรณ์เพิ่มถึงอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาที่ต้องการ ($\approx 275^\circ\text{C}$) ไปจนครบระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่กำหนด (60 นาที) จากนั้นจึงปิดระบบให้ความร้อนและเปิดระบบหล่อเย็น เมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ลดลงเหลือ $\approx 65^\circ\text{C}$ ทำการปิดระบบหล่อเย็น เปิดฝาถังปฏิกรณ์นำผลิตภัณฑ์ออกจากถังปฏิกรณ์ใส่บีกเกอร์แล้วนำไปอุ่นไล่แอลกอฮอล์และน้ำบนแท่นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $\approx 120^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที จะได้ผลิตภัณฑ์ส่วนกลั่นกรดไขมันพาล์มเอสเทอร์ไฟด์บางส่วนที่ต้องการ (PEPFAD)

ขั้นตอนที่ 2 การศึกษาพฤติกรรมเฟสที่อุณหภูมิห้องระยะยาวของเชื้อเพลิงผสม CHSD-PEPFAD-AhE เมื่อเตรียมตัวอย่างในขวดแก้วขนาดเล็กที่มีฝาปิดโดยการเขย่าให้ส่วนผสมเข้ากันดีด้วยมืออย่างง่าย (Eiadtrong, 2016) ในการศึกษาเชื้อเพลิงผสมที่สัดส่วนการผสมต่าง ๆ ของแต่ละองค์ประกอบในช่วง 0-100 wt.% (ที่ทุก ๆ ช่วง การผสม 10 wt.%) ถูกเตรียมโดยใช้เครื่องชั่งดิจิทัลยี่ห้อ METTLER รุ่น

AL204 (ความละเอียด 0.0001 กรัม) แต่ละตัวอย่างถูกเตรียมให้มีน้ำหนักรวม 10.0 กรัม และควบคุมความคลาดเคลื่อนของแต่ละองค์ประกอบไว้ในช่วง ± 0.05 wt.% สำหรับการเตรียมเชื้อเพลิงผสม 2 ส่วน (CHSD-PEPFAD, CHSD-AhE, PEPFAD-AhE) ขวดแก้วถูกบรรจุและชั่งน้ำหนักของแต่ละองค์ประกอบตามสัดส่วน ปิดฝา แล้วนำไปอุ่นบนแท่นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $50 \pm 5^{\circ}\text{C}$ จากนั้นจึงเขย่าผสมด้วยมือเป็นเวลา 1 นาที (ส่วนผสมทั้งหมดเข้ากันดีเป็นของเหลวเฟสเดียว) สำหรับการเตรียมเชื้อเพลิงผสม 3 ส่วน (CHSD-PEPFAD-AhE) ขั้นแรกขวดแก้วถูกบรรจุด้วย

PEPFAD และ AhE ตามสัดส่วน ปิดฝาและนำไปอุ่นที่อุณหภูมิ $50 \pm 5^{\circ}\text{C}$ แล้วเขย่าผสมด้วยมือเป็นเวลา 1 นาที (ส่วนผสมเข้ากันดีเป็นของเหลวเฟสเดียว) จากนั้นจึงบรรจุ CHSD เพิ่มตามสัดส่วนปิดฝา และนำไปอุ่นที่อุณหภูมิ $50 \pm 5^{\circ}\text{C}$ แล้วเขย่าด้วยมือเป็นเวลา 1 นาที (ส่วนผสมทั้งหมดเข้ากันดีเป็นของเหลวเฟสเดียว) จากนั้นจึงนำขวดตัวอย่างเชื้อเพลิงผสมทั้งหมดไปวางนิ่งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (บันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิรายวันอยู่ในช่วง $22-34^{\circ}\text{C}$) เป็นระยะเวลา 90 วัน เพื่อสังเกตพฤติกรรมเฟสระยะยาวของเชื้อเพลิงผสมต่อไป



ภาพที่ 1 ไลอะแกรมเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ประกอบด้วย 1) ถังปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร 2) ฮีตเตอร์หล่อทรงกระบอก 3 kW 3) ระบบหล่อเย็น (3.1) ระบบหล่อเย็นถึงปฏิกรณ์ (3.2) ระบบหล่อเย็นผลิตภัณฑ์ และ 4) หน่วยบันทึกข้อมูล

ขั้นตอนที่ 3 การศึกษาคุณสมบัติการเป็นของเหลวและการไหลที่สำคัญของเชื้อเพลิงผสมที่สนใจ จากผล การศึกษาพฤติกรรมเฟสของเชื้อเพลิงผสม CHSD-PEPFAD-AhE จะทราบขอบเขตโดยรวม

ของสัดส่วนการผสม อย่างไรก็ตาม สำหรับเชื้อเพลิงผสมที่มีความน่าสนใจในการเริ่มนำไปประยุกต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล (มีเอทานอลชนิดไม่มีน้ำผสมอยู่ ≤ 10 wt.%) จะทำการศึกษาคูณสมบัติการเป็น

ของเหลวและการไหลที่สำคัญของเชื้อเพลิงผสม ได้แก่ จุดชุน จุดไหลเท และความหนืดจลศาสตร์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการเลือกเชื้อเพลิงผสมที่มีความน่าสนใจในการประยุกต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล ตามมาตรฐานดีเซลหมุนเร็ว (High Speed Diesel: HSD) และดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (Agricultural Engine Diesel: AED) ของประเทศไทย ต่อไป ซึ่งทดสอบคุณสมบัติตามวิธีทดสอบมาตรฐานของสมาคมการทดสอบและวัสดุอเมริกัน (American Society for Testing and Materials: ASTM) โดยเชื้อเพลิงผสมที่ถูกเลือกจะมีการทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิงที่สำคัญเพิ่มเติม ได้แก่ ความหนาแน่น ค่าความร้อน และค่าซีเทน เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณหาสมรรถนะและประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ สำหรับจุดชุน จุดไหลเท ความหนืดจลศาสตร์ และความหนาแน่น ได้ส่งทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM D2500 ASTM D97 ASTM D445 และ ASTM D1298 ตามลำดับ ที่สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ค่าความร้อน ได้ส่งทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM D240 ที่สำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และ ค่าซีเทน ได้ส่งทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM D613 ที่บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน)

ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบใช้งานเชื้อเพลิงผสมที่น่าสนใจในเครื่องยนต์เบื้องต้นเปรียบเทียบกับดีเซลบนแท่นทดสอบ ได้ทำการทดสอบในเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียว ชนิดฉีดเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้โดยตรง ยี่ห้อคูโบต้า รุ่น RT100 DI PLUS (รายละเอียดของเครื่องยนต์ทดสอบแสดงใน ตารางที่ 2) บนแท่นทดสอบไดนาโมมิเตอร์ ยี่ห้อ PLINT & PARTNER ขนาด 12 แรงม้า ดังไดอะแกรมชุดการทดลองในภาพที่ 2 โดยวิธีเปลี่ยนแปลงภาระในช่วง 1.28-6.40 kW $\pm$ 0.5% ที่ความเร็วรอบสูงคงที่ 2,200 $\pm$ 10 rpm วัดแรงกระทำต่อแขนชุดไดนาโมมิเตอร์ (ความยาว 1.05 ft) โดยใช้เครื่องชั่งแบบสปริงยี่ห้อ SALTER (ความละเอียด 0.05 lbf) เพื่อนำไปคำนวณหาเบรคทอร์ก (Brake Torque: BT) และกำลังเบรค (Brake Power: BP) ของเครื่องยนต์ วัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเชื้อเพลิงโดยใช้กระบอกตวง (ความละเอียด 0.5 ml) และนาฬิกาจับเวลา ยี่ห้อ ALBA (ความละเอียด 0.01 s) วัดความเร็วรอบของเครื่องยนต์โดยใช้ดิิจิทัลเอ็นโค้ดเดอร์ รุ่น PR-01 N-S (ความละเอียด 0.1 rpm) วัดอุณหภูมิของเชื้อเพลิงและแก๊สไอเสียโดยใช้ดาต้าล็อกเกอร์ รุ่น AI210 และสายเทอร์โมคัปเปิลแบบ K (ความละเอียด 0.01°C) โดยทำการทดสอบเครื่องยนต์จำนวน 3 ชั่วโมง (ในที่นี้รายงานเป็นค่าเฉลี่ย)

ตารางที่ 2 รายละเอียดเครื่องยนต์ทดสอบยี่ห้อคูโบต้า รุ่น RT100 DI PLUS

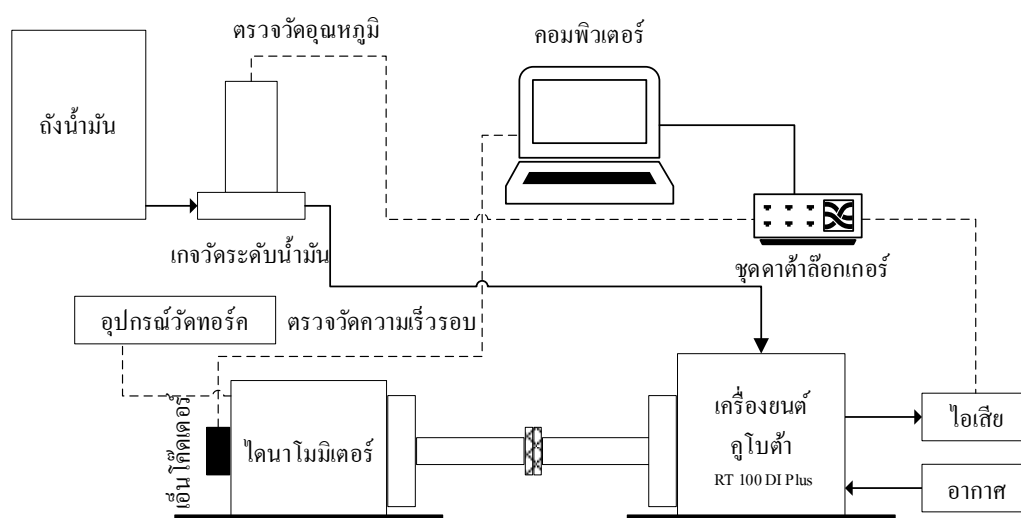
ข้อมูลทางเทคนิค	
แบบเครื่องยนต์	ดีเซล 4 จังหวะ 1 สูบนอน
อัตราส่วนการอัด	18 : 1
ปริมาตรกระบอกสูบ	547 cc.
กำลังสูงสุด	7.4 kW/2400 rpm
กำลังต่อเนื่อง	6.6 kW/2400 rpm
แบบห้องเผาไหม้	ฉีดเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้โดยตรง

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

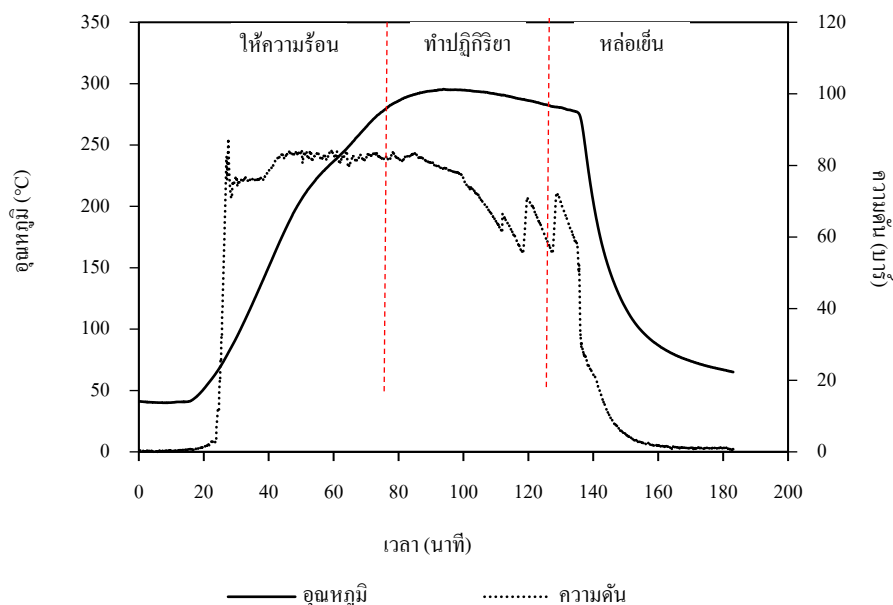
1. การเตรียมส่วนกลั่นกรดไขมันเอสเตอร์ไฟด์บางส่วนโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

การเตรียมส่วนกลั่นกรดไขมันเอสเตอร์ไฟด์บางส่วนโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จากข้อมูลอุณหภูมิและความดันภายในถังปฏิกรณ์ที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ ชุดทดลองสามารถทำได้จริง ดังแสดงในภาพที่ 3 จะเห็นได้ว่าหลังจากปรับความดันภายในถังปฏิกรณ์ได้ ≈ 70 บาร์ (นาทีก่อน 0-25) ควบคู่กับการอุ่นให้ความร้อน ชุดทดลองใช้ระยะเวลาในการอุ่นให้ความร้อน ≈ 60 นาที (นาทีก่อน 15-75) ภายในถังปฏิกรณ์จึงมีอุณหภูมิถึงจุดที่กำหนด 275°C โดยระหว่างการทำ

ปฏิกิริยา 60 นาที (นาทีก่อน 75-135) ชุดทดลองสามารถควบคุมสถานะการทำงานปฏิกิริยาจริง ช่วงนาทีก่อน 100-135 เป็นช่วงที่ฮีตเตอร์ตัดการทำงาน อุณหภูมิและความดันลดลงจึงรักษาความดันด้วยปั๊มแรงดันสูงโดยช่วงทำปฏิกิริยา 60 นาที มีอุณหภูมิเฉลี่ย $289 \pm 6^{\circ}\text{C}$ และความดันเฉลี่ย 72 ± 9 บาร์ เมื่อสิ้นสุดการทำปฏิกิริยาจะหล่อเย็นด้วยน้ำผ่านชุดปั๊มให้อุณหภูมิผลิตภัณฑ์ลดลงเหลือ $\approx 65^{\circ}\text{C}$ ที่ความดัน ≈ 0 บาร์ ใช้เวลา ≈ 40 นาที (นาทีก่อน 135-175) จากนั้นจึงนำผลิตภัณฑ์ออกจากถังปฏิกรณ์ไปอุ่นไอล์แอลกอฮอล์และน้ำที่เกิดขึ้นระหว่างการทำปฏิกิริยา โดยไม่จำเป็นต้องนำผลิตภัณฑ์ไปล้างน้ำทำความสะอาดและอุ่นไอล์น้ำเพิ่มเติมเหมือนการผลิตแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพที่ 2 ไคอะแกรมแทนทดสอบสมรรถนะ (Eiadtrong *et al.*, 2018)



ภาพที่ 3 อุณหภูมิและความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์

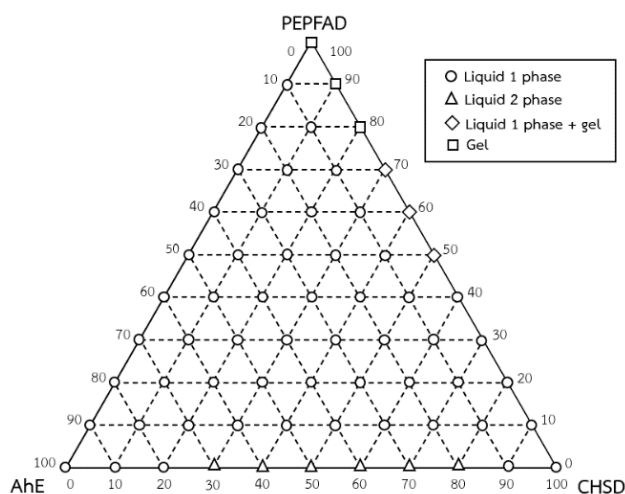
เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วยวิธี Thin-Layer Chromatography/Flame Ionization Detector (TLC/FID) พบว่ามี เอทิลเอสเทอร์ กรดไขมันอิสระ ไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และ โมโนกลีเซอไรด์อยู่ 71.6, 26.8, 1.0, 0.3 และ 0.3 wt.% ตามลำดับ ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าการผลิตส่วนกลั่นกรดไขมันเอสเทอร์รีไฟด์บางส่วนสามารถเตรียมผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่มีความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์ได้ในระดับสูง (≥ 70 wt.%) นอกจากนี้ก็เป็นที่น่าทึ่งที่ทราบกันดีโดยทั่วไปแล้วว่า เอทิลเอสเทอร์มีคุณสมบัติการเป็นของเหลวที่ดีกว่ากรดไขมันอิสระ (Prasit and Somnuk, 2017) และเมื่อสังเกตผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้จะเห็นว่ามิลักษณะทางกายภาพเป็นไขอ่อนที่อุณหภูมิห้อง โดยมีความแตกต่างอย่างชัดเจนกับส่วนกลั่นกรดไขมันที่ เป็นไขค่อนข้างแข็งที่อุณหภูมิห้องด้วยเหตุนี้ ระดับความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้จึงมีผลโดยตรงต่อระดับการปรับปรุงคุณสมบัติการเป็นของเหลวของผลิตภัณฑ์ที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นส่วนผสมดีเซล/ดีโซฮอล์ต่อไป

2. การศึกษาพฤติกรรมเฟสที่อุณหภูมิห้องระยะยาวของเชื้อเพลิงผสม CHSD-PEPFAD-AhE

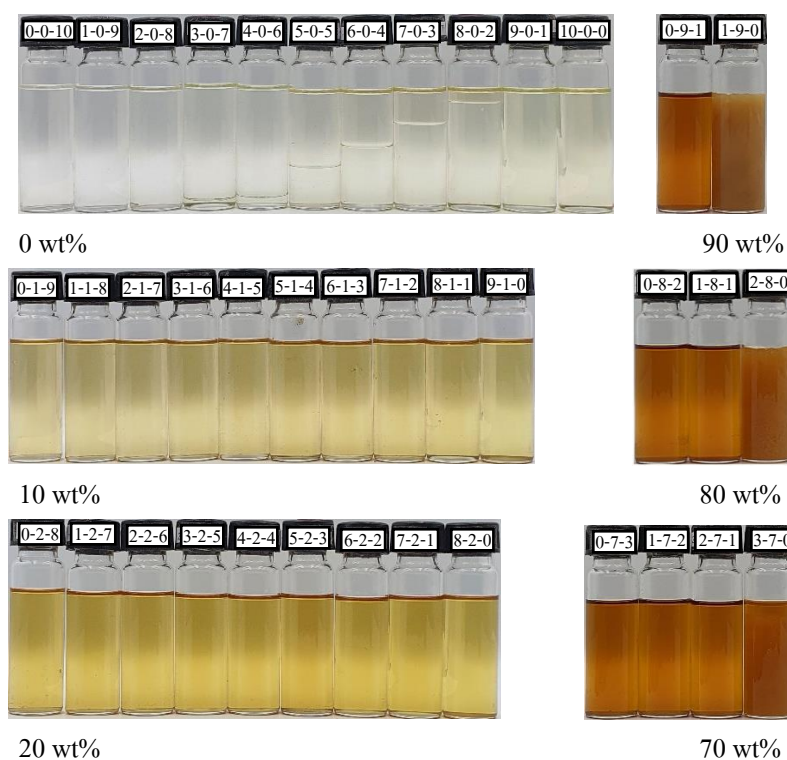
การศึกษาพฤติกรรมเฟสระยะยาวของเชื้อเพลิงผสม CHSD-PEPFAD-AhE เพื่อประเมินความสามารถขึ้นต้นในการเป็นส่วนผสมทดแทนดีเซล/ดีโซฮอล์ ซึ่งแสดงเฟสไดอะแกรมและพฤติกรรมเฟส ดังภาพที่ 4 และ ภาพที่ 5 ตามลำดับ โดยในการเพิ่มสัดส่วนการผสม PEPFAD ในช่วง 10-40 wt.% เชื้อเพลิงผสม CHSD-PEPFAD และเชื้อเพลิงผสม CHSD-PEPFAD-AhE สามารถคงสถานะเป็นของเหลวเฟสเดียวได้ทุกสัดส่วน และในสัดส่วนการผสม PEPFAD ในช่วง 50-90 wt.% พบว่า เชื้อเพลิงผสม CHSD-PEPFAD มีการแยกชั้นเกิดขึ้น ในขณะที่เชื้อเพลิงผสม CHSD-PEPFAD-AhE สามารถคงสถานะเป็นของเหลวเฟสเดียวได้ทุกสัดส่วน ดังนั้นเอทานอลชนิดไม่มีน้ำจึงมีคุณสมบัติที่สำคัญในการคงสถานะเป็นของเหลวเฟสเดียวสำหรับเชื้อเพลิงผสม CHSD-PEPFAD-AhE ที่มี PEPFAD ในระดับสูง (>40 wt.%)

จากผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่าการทำปฏิกิริยาเอทานอลิซิสบางส่วนสามารถเพิ่มสัดส่วนการผสม PEPFAD กับดีเซลหมุนเร็วเกรดการค้า เป็นเชื้อเพลิงเหลวผสม 2 ส่วน CHSD-PEPFAD ได้ ≤ 40 wt.% (CHSD-PEPFAD ได้ ≤ 10 wt.% (Eiadtrong, 2016; Eiadtrong *et al.*, 2019) และผสมเป็นเชื้อเพลิงเหลวผสม 3 ส่วน CHSD-PEPFAD-AhE หรือดีโซฮอล์ได้

≤ 80 wt.% (CHSD- PEPFAD- AhE ได้ ≤ 50 wt.% (Eiadtrong, 2016)) ด้วยผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบเอทิลเอสเทอร์ในระดับสูง (≥ 70 wt.%) ซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวและยังคงเหลือกรดไขมันอิสระ (≥ 20 wt.%) มีหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์จึงส่งผลให้ความสามารถในการผสมเป็นของเหลวสูงขึ้น



ภาพที่ 4 เฟสไดอะแกรมของเชื้อเพลิงผสม CHSD-PEPFAD-AhE





ภาพที่ 5 พฤติกรรมเฟสที่อุณหภูมิห้องของเชื้อเพลิงผสม CHSD-PEPFAD-AhE ที่สัดส่วนการผสม PEPFAD ต่าง ๆ
หมายเหตุ: หมายเลขบนฝาขวดแสดงถึงสัดส่วนการผสม เช่น เชื้อเพลิงผสม 0-0-10 หมายถึงมีสัดส่วนการผสมที่ CHSD 0 wt%, PEPFAD 0 wt% และ AhE 10 wt%

3. การศึกษาคุณสมบัติการเป็นของเหลวและการไหลที่สำคัญของเชื้อเพลิงผสม

จากผลการศึกษาพฤติกรรมเฟสที่อุณหภูมิห้องระยะยาวมีตัวอย่างที่น่าสนใจ คือ PEPFAD(10-40) และ PEPFAD(10-90)AhE10 (ตัวเลขที่ตามหลัง PEPFAD และ AhE คือสัดส่วนการผสมกับดีเซลในหน่วย wt.%) เนื่องจากมีลักษณะเป็นของเหลวใสและผสมเอทานอลชนิดไม่มีน้ำในระดับต่ำ (10 wt.%) จึงเหมาะสมต่อการศึกษาการทดสอบคุณสมบัติการเป็นของเหลวและการไหลที่สำคัญ ประกอบด้วย

จุดขุ่นและจุดไหลเท เป็นคุณสมบัติการเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง จากการทดสอบพบว่า จุดขุ่นและจุดไหลเทของ PEPFAD(10-40) สามารถผสม PEPFAD ≤ 30 wt.% ดังภาพที่ 6 โดยจุดขุ่นและจุดไหลเทมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการผสม (+2°C ถึง +11°C และ 0°C ถึง +16°C ตามลำดับเทียบกับดีเซล) สำหรับ PEPFAD(10-90)AhE10 สามารถผสม PEPFAD ≤ 70 wt.% ดังภาพที่ 7 จุดขุ่นและจุดไหลเทมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการผสม (0°C ถึง +7°C และ +1°C ถึง +8°C

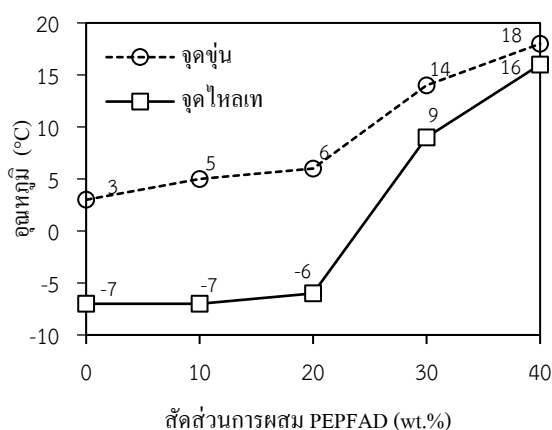
ตามลำดับเทียบกับดีเซล) เนื่องจาก PEPFAD มีค่าจุดขุ่นและจุดไหลเทสูงส่งผลให้เชื้อเพลิงผสมมีจุดขุ่นและจุดไหลเทเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการผสม โดยสรุป PEPFAD(10-30) และ PEPFAD(10-70)AhE10 ผ่านทั้งมาตรฐานดีเซลหมุนเร็วและดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร

ความหนืดจลนศาสตร์ คือคุณสมบัติที่มีผลต่อการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง ผลการทดสอบพบว่า ความหนืดจลนศาสตร์ของ PEPFAD(10-40) เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการผสม (+12.2% ถึง +53.7% ตามลำดับเทียบกับดีเซล) ดังภาพที่ 8 สำหรับ PEPFAD(10-90)AhE10 ที่สัดส่วนการผสม PEPFAD เท่ากับ 10 wt.% มีค่าความหนืดจลนศาสตร์ใกล้เคียงกับดีเซล (-3.2%) และเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการผสม (+15.0% ถึง +106.5% ตามลำดับเทียบกับดีเซล) ดังภาพที่ 9 จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นว่า เอทานอลที่มีความหนืดต่ำ (1.08 mm²/s) (He *et al.*, 2003) สามารถช่วยปรับปรุงความหนืดจลนศาสตร์ของเชื้อเพลิงผสมที่เพิ่มขึ้นจากการผสม PEPFAD ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสรุป PEPFAD (10-30) และ PEPFAD (10-70)AhE10 มีความหนืดจลนศาสตร์ผ่าน

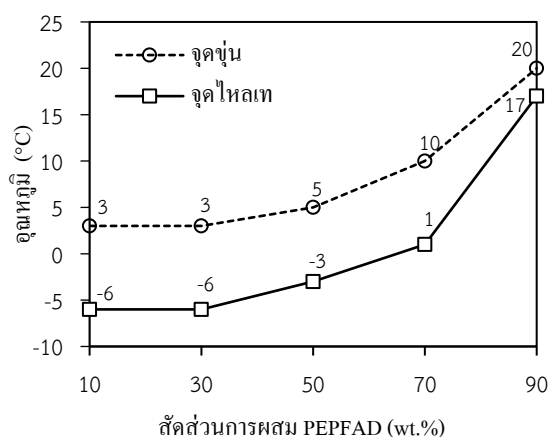
ทั้งมาตรฐานดีเซลหมุนเร็วและดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร

จากผลการทดสอบคุณสมบัติการเป็นของเหลวและการไหลที่อุณหภูมิต่ำ จึงเลือก PEPFAD30 และ PEPFAD50AhE10 เป็นตัวอย่างเพื่อ

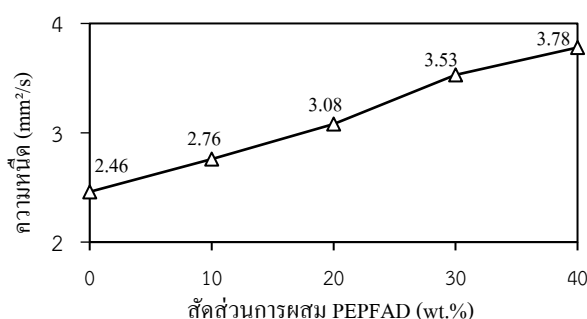
ทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิงที่สำคัญเพิ่มเติม ประกอบด้วย ความหนาแน่น ค่าความร้อน และค่าซีเทน เนื่องจากเป็นตัวอย่างที่มีแนวโน้มสามารถทดสอบกับเครื่องยนต์การเกษตรได้



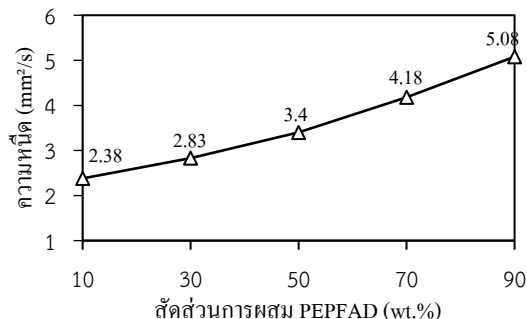
ภาพที่ 6 จุดขุ่นและจุดไหลเทของ PEPFAD(10-40)



ภาพที่ 7 จุดขุ่นและจุดไหลเทของ PEPFAD(10-90)AhE10



ภาพที่ 8 ความหนืดจลนศาสตร์ของ PEPFAD(10-40)



ภาพที่ 9 ความหนืดจลนศาสตร์ของ PEPFAD(10-90)AhE10

ความหนาแน่น เป็นคุณสมบัติที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับมวลและพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ผลการทดสอบพบว่า ความหนาแน่นของ PEPFAD30 และ PEPFAD50AhE10 มีค่าเท่ากับ 838 g/l และ 845 g/l มีค่าสูงกว่าดีเซล +2.0% และ +2.9% ตามลำดับ โดยเชื้อเพลิงผสมทั้ง 2 สูตร มีค่าผ่านทั้งมาตรฐานดีเซลหมุนเร็วและดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร แสดงให้เห็นว่าเอทานอลที่มีความหนาแน่นต่ำ (771 g/l)

(He et al., 2003) สามารถช่วยปรับปรุงค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ค่าความร้อน บ่งบอกปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในการสันดาป ผลการทดสอบพบว่า PEPFAD30 และ PEPFAD50AhE10 มีค่าเท่ากับ 43.3 MJ/kg และ 40.0 MJ/kg ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าดีเซล -3.6% และ -10.9% ตามลำดับ เนื่องจากค่าความร้อนของเอทานอลและส่วนกลั่นเกรดไฮโดรคาร์บอนบางตัวมีค่าเท่ากับ 22.8 MJ/Kg และ 39.5 MJ/Kg

ต่ำกว่าดีเซล -49.2% และ -12.1% ตามลำดับ (Eiadtrong *et al.*, 2018) ส่งผลให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงผสมมีค่าต่ำลง อย่างไรก็ตาม ค่าความร้อนของส่วนกลั่นกรด

ไฮปาล์มเอสเทอร์ไฟด์บางส่วนมีค่าสูงกว่าเอทานอลถึง +73.2% ส่งผลให้การผสมส่วนกลั่นกรดไฮปาล์มเอสเทอร์ไฟด์

ตารางที่ 4 คุณสมบัติเชื้อเพลิงที่สำคัญของเชื้อเพลิงทดสอบ

คุณสมบัติเชื้อเพลิง	มาตรฐานประเทศไทย		เชื้อเพลิงทดสอบ		
	HSD	AED	CHSD	PEPFAD30	PEPFAD50AhE10
จุดขุ่น/จุดไหลเท (°C)	n.a./≤10	n.a./n.a.	3/-7	14/9	5/-3
ความหนืดจลนศาสตร์ที่ 40°C (mm ² /s)	1.8-4.1	1.9-8.0	2.46	3.53	3.40
ความหนาแน่นที่ 15.6°C (g/l)	810-870	860-900	832	838	845
ค่าซีเทน	≥50	≥47	65.3	-	54.0
ค่าความร้อนสูง (MJ/kg)	n.a.	n.a.	44.9	43.3	40.0

หมายเหตุ: n.a. = non applied; HSD = High Speed Diesel; AED = Agricultural Engine Diesel; CHSD = Commercial High Speed Diesel; PEPFAD30 = 70 wt.% CHSD-30 wt.%PEPFAD; PEPFAD50AhE10 = 40 wt.%CHSD-50 wt.%PEPFAD-10 wt.%AhE

ค่าซีเทน บ่งบอกถึงคุณภาพในการจุดระเบิดของเชื้อเพลิง จากการศึกษาพบว่าเอทานอลมีค่าซีเทนที่ต่ำกว่าดีเซล (Eiadtrong *et al.*, 2018) จึงได้เลือก PEPFAD50AhE10 เป็นตัวอย่างในการส่งทดสอบค่าซีเทน ผลการทดสอบพบว่า PEPFAD50AhE10 มีค่าซีเทน 54.0 ต่ำกว่าดีเซล -17.3% แต่สามารถผ่านทั้งมาตรฐานดีเซลหมุนเร็วและดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตรที่กำหนดไว้ ≥50 และ ≥47 ตามลำดับ ส่งผลให้ PEPFAD30 มีค่าซีเทนผ่านทั้งมาตรฐานดีเซลหมุนเร็วและดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตรได้เช่นเดียวกัน และมีค่าซีเทนที่สูงกว่า 54.0 เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนการผสมกับ PEPFAD50AhE10 ดังตารางที่ 4

จากผลการทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิงที่สำคัญสามารถสรุปได้ว่า PEPFAD(10-30) และ PEPFAD(10-50)AhE10 มีค่าจุดขุ่น จุดไหลเท ความหนืดจลนศาสตร์

ค่าความหนาแน่น ค่าความร้อน และค่าซีเทน ผ่านทั้งมาตรฐานดีเซลหมุนเร็วและดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร

4. การทดสอบใช้งานเชื้อเพลิงผสมที่น่าสนใจในเครื่องยนต์เบื้องต้นเปรียบเทียบกับดีเซลบนแท่นทดสอบ

จากผลการทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิงที่สำคัญ จึงใช้เชื้อเพลิงผสม 2 สูตร คือ PEPFAD30 และ PEPFAD50AhE10 เป็นตัวอย่างทดสอบใช้งานเบื้องต้น พบว่า

อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก คือความต้องการเชื้อเพลิงสำหรับเดินเครื่องยนต์ให้ได้กำลังเบรกดตามต้องการในเวลาที่กำหนด พบว่า PEPFAD30 มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกที่ใกล้เคียงดีเซล (+0.1% ถึง +3.5%) แต่สำหรับ

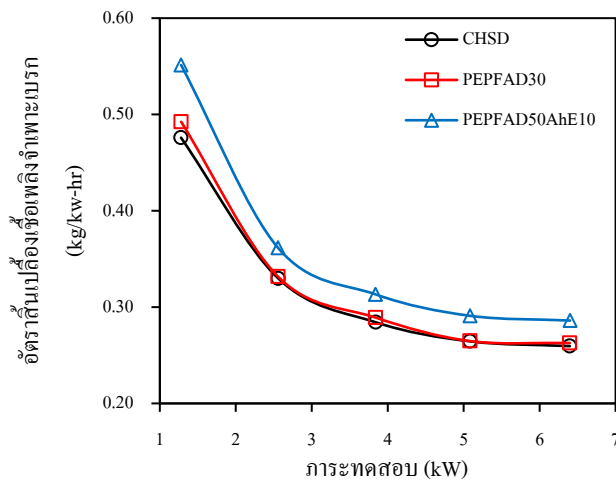
PEPFAD50AhE10 มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรคที่สูงกว่าดีเซลในทุกเงื่อนไขการทดสอบ (+9.7% ถึง +15.9%) ดังภาพที่ 10 เนื่องจากค่าความร้อนของ PEPFAD50AhE10 ต่ำกว่าดีเซลส่งผลให้มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่สูงกว่า

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค คือตัวแปรพื้นฐานที่ไม่มีหน่วย นิยมใช้เป็นค่าอ้างอิงเปรียบเทียบเชิงทฤษฎี พบว่า PEPFAD30 มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคสูงกว่าดีเซลทุกภาระการทดสอบมีค่าเฉลี่ย +2.4% และ PEPFAD50AhE10 พบว่าที่ภาระต่ำสุด (1.28 kW) มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคต่ำกว่าดีเซล -3.1% แต่เมื่อเพิ่มภาระพบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคมีค่าเพิ่มขึ้นและสูงกว่าดีเซลมีค่าเฉลี่ย +0.8% ดังภาพที่ 11

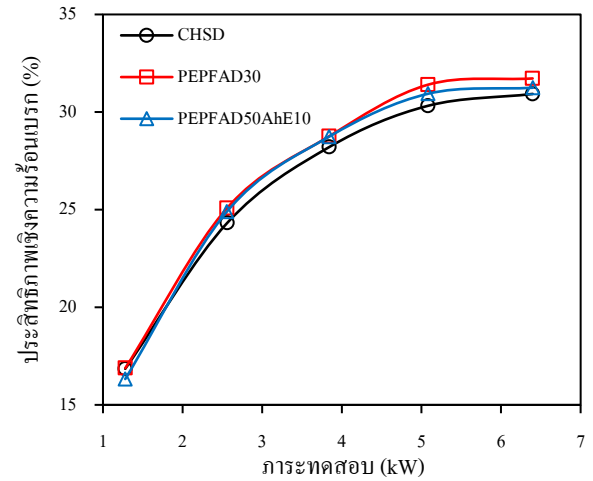
อุณหภูมิไอเสีย พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นตามภาระของเครื่องยนต์ โดยเป็นผลมาจากส่วนผสม เชื้อเพลิง-อากาศ ที่หนาขึ้น อุณหภูมิไอเสียของ PEPFAD30 มีค่าต่ำกว่าดีเซลโดยเฉลี่ย -1.4% ซึ่งเป็นปกติของเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำกว่า จะมีอุณหภูมิไอเสียต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม สำหรับ PEPFAD50AhE10 พบว่ามีค่าอุณหภูมิไอเสียสูงกว่าดีเซลเล็กน้อย โดยเฉลี่ย +4.2% ดังภาพที่ 12 ทั้งที่เชื้อเพลิงมีค่าความร้อนต่ำกว่า ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้จากการสันดาปล่าช้า โดยจะสังเกตได้ง่ายที่การทดสอบเครื่องยนต์รอบสูงสอดคล้องกับงานวิจัย Rakopoulos (2014); Eiadtrong (2021)

จากผลการทดสอบใช้งานเบื้องต้นบนแท่นทดสอบ แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า การใช้ PEPFAD30 และ PEPFAD50AhE10 ไม่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะเครื่องยนต์ และมีผลประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ที่ดีขึ้น โดยเฉพาะในภาระเครื่องยนต์ที่สูงขึ้น และตลอดช่วงการทดสอบทุกเงื่อนไขไม่พบปัญหาเกิดขึ้นในช่วงการทดสอบ เช่น การฉีดเชื้อเพลิง การสตาร์ทขณะเครื่องเย็น อาการน็อก และการติดขัดของแหวนลูกสูบ

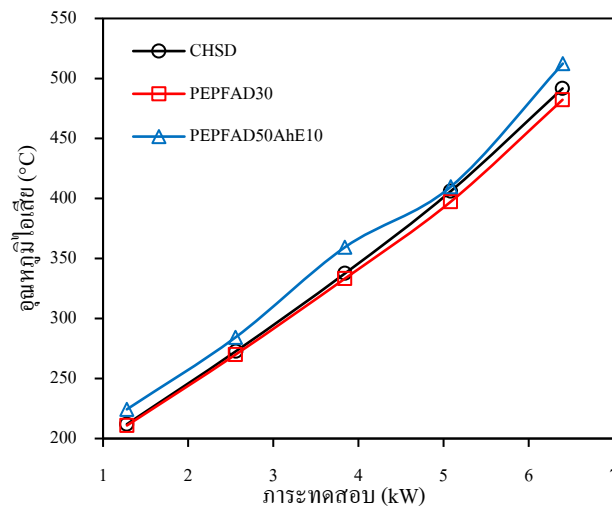
สำหรับราคาต้นทุนของเชื้อเพลิงทดสอบคำนวณบนพื้นฐานของราคาดิเซลย้อนหลัง 10 ปี (พ.ศ. 2555-2564) ประกอบด้วย ดีเซลหมุนเร็วเกรดการค้า (26.85 บาท/ลิตร) (Energy Policy and Planning Office Ministry of Energy, 2021) เอทานอลชนิดไม่มีน้ำเกรดการค้า (24.14 บาท/ลิตร) (Thai Ethanol Producers Trade Association, 2021) และส่วนกลั่นกรดไขปาแลม (PFAD) (21.16 บาท/ลิตร) (Bank of Thailand, 2021) โดยการผลิตส่วนกลั่นกรดไขปาแลมเอทานอลิซิสบางส่วน (PEPFAD) รวมค่าวัตถุดิบและไฟฟ้ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 24.51 บาท/ลิตร ดังนั้น ผลการคำนวณราคาเชื้อเพลิงผสม PEPFAD30 และ เชื้อเพลิงดีโซฮอล์ PEPFAD50AhE10 จึงมีราคา 25.66 และ 24.53 บาท/ลิตร ซึ่งต่ำกว่าดีเซล 1.19 และ 2.32 บาท/ลิตร คิดเป็น 4.4% และ 8.6% ตามลำดับ เปรียบเทียบกับดีเซลหมุนเร็วเกรดการค้า



ภาพที่ 10 อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก



ภาพที่ 11 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก



ภาพที่ 12 อุณหภูมิไอเสีย

หมายเหตุ: CHSD = Commercial High Speed Diesel

PEPFAD30 = 70 wt.%CHSD-30 wt.%PEPFAD

PEPFAD50AhE10 = 40 wt.%CHSD-50 wt.%PEPFAD-10 wt.%AhE

สรุป

การเตรียมส่วนกลั่นกรดไขมันเอสเทอร์ ไฟล์บางส่วนด้วยปฏิกิริยาเอทานอลโดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งใช้ส่วนกลั่นกรดไขมันทำปฏิกิริยากับเอทานอลชนิดไม่มีน้ำ ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:1 อุณหภูมิเฉลี่ย $289 \pm 6^\circ\text{C}$ ความดันเฉลี่ย

72 ± 9 บาร์ เป็นเวลา 60 นาที และทำความสะอาดด้วยกระบวนการอุ่นไล่แอลกอฮอล์และน้ำ โดยไม่ใช้กระบวนการล้างน้ำทำความสะอาดและอุ่นไล่น้ำเพิ่มเติมเหมือนการผลิตแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อลดการสูญเสียพลังงาน ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีองค์ประกอบหลักเป็นเอทิลเอสเทอร์ 71.6 wt.% กรด

ไขมันอิสระ 26.8 wt.% และองค์ประกอบอื่น ๆ อีก 1.6 wt.% สามารถผสมเป็นเชื้อเพลิงเหลวกับดีเซลหมุนเร็วเกรดการค้า CHSD-PEPFAD และดีโซฮอล์ CHSD-PEPFAD-AhE สูงถึง 40 และ 80 wt.% ตามลำดับ จากการทดสอบคุณสมบัติการเป็นของเหลวและการไหลที่สำคัญ ประกอบด้วย จุดขุ่น จุดไหลเท และความหนืดจลนศาสตร์ พบว่า PEPFAD(10-30) และ PEPFAD(10-50)AhE10 มีคุณสมบัติผ่านมาตรฐานดีเซลหมุนเร็วและดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตรของประเทศไทย และการทดสอบใช้งานเบื้องต้นเชิงเปรียบเทียบเบื้องต้นบนแท่นทดสอบ ในเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียว ยี่ห้อคูโบต้า รุ่น RT100DI PLUS ขนาด 10 แรงม้า ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงภาระในช่วง 1.28-6.40 kW ที่ความเร็วรอบสูงคงที่ 2,200 rpm พบว่า PEPFAD30 และ PEPFAD50AhE10 สามารถใช้งานได้ดีเทียบเท่าดีเซล มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรคและประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคใกล้เคียงหรือสูงกว่าดีเซลเล็กน้อย โดยไม่พบปัญหาเกิดขึ้นในช่วงการทดสอบ เช่น การฉีดเชื้อเพลิง การสตาร์ทขณะเครื่องเย็น อาการน็อก และการติดขัดของแวนลูกสูบ โดยสรุป งานวิจัยนี้ค้นพบโอกาสที่ดีของการเพิ่มศักยภาพการนำกรดไขมันปาล์มโมเลกุลยาวจากส่วนกลั่นกรดไขมันมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล/ดีโซฮอล์ ด้วยการทำปฏิกิริยาเอทาโนไลซิสโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา อย่างไรก็ตาม ยังต้องมีการศึกษาทดสอบใช้งานจริงในเครื่องยนต์ที่เงื่อนไขต่าง ๆ เพิ่มเติม เพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อเครื่องยนต์ระยะยาว เช่น การอุดตันของหัวฉีด การเสื่อมสภาพของชิ้นส่วนเครื่องยนต์ และการอุดตันหรือนิกขาดของกรองน้ำมันเชื้อเพลิง เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ภายใต้กรอบวิจัยการพัฒนาพลังงานทดแทน และการประยุกต์ใช้งานจริงเพื่อนำไปสู่ชุมชนสีเขียว และเงินรายได้มหาวิทยาลัยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และทุนบัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

เอกสารอ้างอิง

- Atabani, A. E. , Silitonga, A. S. , Badruddin, I. A. , Mahlia, T.M.I., Masjuki, H.H. and Mekhilef, S. 2012. A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 16: 2070-2093.
- Bank of Thailand. 2021. **Crude Palm Oil**. Major industrial products in the south of Thailand. Available Source: https://app.bot.or.th/BTWS_STAT/statistics/BOTWEBSTAT.aspx?reportID=590&language=ENG, April 10, 2022. (in thai)
- Department of Energy Business Ministry of Energy. 2021. **News on fuel use situation in 2021**. Ministry of Energy. Available Source: https://www.doeb.go.th/news_activity/2498.pdf, March 20, 2022. (in thai)
- Eiadtrong, S. 2016. Production of Diesel Extender from Mixed Crude Palm Oil by Continuous Hydrolysis Process. Master Thesis of Engineering, Prince of Songkla University. (in Thai)
- Eiadtrong, S., Maliwan1, K., Theppaya, T., Kattiyawan, T. , Tepsorn, K. , Piamcharoensuk, S. and Leevijit, T. 2018. Preliminary utilizing the blends of diesel- PFAD- anhydrous/hydrous

- alcohols in an agricultural diesel engine, pp. 76-83. In **The 9th TSME-IcoME**. Phuket, Thailand. (in Thai)
- Eiadtrong, S., Maliwan, K., Prateepchaikul, G., Kattiyawan, T., Thephsorn, P. and Leevijit, T. 2019. Preparation, important fuel properties, and comparative use of un-preheated palm fatty acid distillate- diesel blends in a single cylinder diesel engine. **Renewable Energy** 134: 1089-1098.
- Eiadtrong, S. 2021. An Investigation to Utilize Diesel/Diesohols containing Palm Tall Oil Monoacids as Simply Novel Diesel Substitutes. Doctor of Philosophy Thesis of Engineering, Prince of Songkla University. (in Thai)
- Eiadtrong, S., Maliwan, K., Thepaya, T., Kattiyawan, T., Prateepchaikul, G. and Leevijit, T. 2021. An investigation to utilize ternary diesel-palm fatty acid distillate-10 wt.% n-butanol blends as simply novel diesel substitute. **Fuel** 289: 119965.
- Energy Policy and Planning Office Ministry of Energy. 2021. **Oil Price**. Petroleum. Ministry of Energy. Available Source: <http://www.eppo.go.th/index.php/th/petroleum/price/oil-price.html>, April 3, 2022. (in Thai)
- He, B.Q., Shuai, S.J., Wang, J.X. and He, H. 2003. The effect of ethanol blended diesel fuels on emissions from a diesel engine. **Atmospheric Environment** 37: 4965-4971.
- Lapuerta, M., Garcia-Contreras, R., Campos-Fernandez, J. and Pilar Dorado, M. 2010. Stability, lubricity, viscosity, and cold-flow properties of alcohol/diesel blends. **Energy & Fuels** 24: 4497-4502.
- Leevijit, T., Prateepchaikul, G., Maliwan, K., Mompiboon, P. and Eiadtrong, S. 2017. Comparative properties and utilization of un- preheated degummed/esterified mixed crude palm oil-diesel blends in an agricultural engine. **Renewable Energy** 101: 82-89.
- Prasit, T. and Somnuk, K. 2017. Circulation Biodiesel Production Process from Palm Fatty Acid Distillate Using Helical Static Mixer. **RMUTL Engineering Journal** 1(1): 99-108. (in Thai)
- Rakopoulos, D. C. , Rakopoulos, C. D. , Giakoumis, E.G., Papagiannakis, R.G. and Kyritsis, D.C. 2014. Influence of properties of various common bio- fuels on the combustion and emission characteristics of high- speed DI (direct injection) diesel engine: vegetable oil, bio- diesel, ethanol, n- butanol, diethyl ether. **Energy** 73: 354-366.
- Srihammarong, P. 2003. Collaborative research and development of diesohol fuel for diesel vehicles in Thailand, pp. 120-121. In **MTEC annual meeting**. Bangkok, Thailand. (in Thai)
- Thai Ethanol Producers Trade Association.2021. **Ethanol reference price**. Data statistics. Thai Ethanol Producers Trade Association. Available Source: <https://www.thai-ethanol.com/th /statistical-data/price.html>, April 15, 2022. (in Thai)

Yilmaz, N. and Vigil, F. 2014. Potential use of a blend of diesel, biodiesel, alcohols and vegetable oil in compression ignition engines. **Fuel** 124: 168-172.