Eng.J.CMU.[2021] 28 [1], 169-184

วารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Engineering Journal
Chiang Mai University

การทดสอบใช้งานดีโซฮอล์ที่เติมกรดไขมันปาล์มโมเลกุลยาวบนแท่นทดสอบและในเรือประมง

Utilization Tests of Diesohols containing Palm Tall Oil Monoacids on a Test Bench and a Fishery Boat

ศุภกิจ เอียดตรง[1] ประทาน ศรีชัย[2] กำพล ประทีปชัยกูร[3] และ ธีระยุทธ หลีวิจิตร[1, *]

Suppakit Eiadtrong[1], Prathan Srichai[2], Gumpon Prateepchaikul[3] and Theerayut Leevijit[1, *]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

[2]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ อ.เมือง จ.นราธิวาส 96000

[3]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและหุ่นยนต์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช 80161

[1]Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering,
Prince of Sonkla University, Hat Yai, Songkhla, 90110, Thailand

[2]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Prince of Naradhiwas University, Muang, Narathiwat, 96000, Thailand

[3]Department of Mechanical and Robotic Engineering, School of Engineering and Technology,
Walailuk University, Tha Sala, Nakhon Si Thammarat, 80161, Thailand

E-mail: *leetheerayut@yahoo.com, suppakit_4390@hotmail.com Tel.: 074-287036

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการทดสอบใช้งานเบื้องต้นบนแท่นทดสอบและในเรือประมงพื้นบ้านของดีโซฮอล์ (ดีเซล-แอลกอฮอล์) ที่เติมกรดไขมันอิสระโมเลกุลยาวจากผลิตภัณฑ์พลอยได้ราคาถูกของส่วนกลั่นกรดไขปาล์ม (palm fatty acid distillate: PFAD) เป็นส่วนผสมทดแทนดีเซลและสารอิมัลซิไฟเออร์สำหรับการผลิตดีโซฮอล์ งานวิจัยนี้ถือเป็นตัวแทนการศึกษาในกรณีเลวร้ายที่สุดของการนำน้ำมันชีวภาพชนิดกรดไขมันอิสระสูงมาประยุกต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล สำหรับดีโซฮอล์ในงานวิจัยนี้ เอทานอลชนิดไม่มีน้ำ (anhydrous ethanol: AhE) และบิวทานอลชนิดไม่มีน้ำ (anhydrous n-butanol: AhnB) ถูกใช้เป็นสารปรับปรุงคุณสมบัติการเป็นของเหลวและส่วนผสมทดแทนดีเซลในคราวเดียวกัน โดยดีโซฮอล์ที่ศึกษามี 3 สูตร ซึ่งมีราคาใกล้เคียงกับดีเซล คือ PFAD20AhE5 PFAD30AhE10EHN4000 และ PFAD30AhnB20 ตัวเลขที่ตามหลัง PFAD และ AhE/AhnB คือ สัดส่วนการผสมกับดีเซลในหน่วย wt.% และตัวเลขที่ตามหลัง EHN (สารปรับปรุงค่าซีเทนชนิดไดเอทิลเฮกซิลไนเทรต) คือ สัดส่วนการผสมกับดีโซฮอล์ในหน่วย ppm เบื้องต้นได้เดินทดสอบดีโซฮอล์ในเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียวชนิดฉีดเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้โดยตรง ยี่ห้อคูโบต้า รุ่น RT100DI PLUS ที่ภาระสูง 6.40 kW และความเร็วรอบ

Received23 February 2021
Revised 29 March 2021
Accepted 30 March 2021

สูง 2,200 rpm บนแท่นทดสอบ พบว่า ดีโซฮอล์ทั้งหมดสามารถใช้งานได้ดีเทียบเท่าดีเซลด้วยประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกที่ต่ำกว่าดีเซลเล็กน้อย นอกจากนี้ ยังได้เดินทดสอบที่ภาระกลาง 3.84 kW และความเร็วรอบสูง 2,200 rpm ต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 90 นาที พบว่า ดีโซฮอล์ทั้งหมดสามารถใช้งานในเครื่องยนต์ได้อย่างต่อเนื่องด้วยความเร็วรอบคงที่เช่นเดียวกับดีเซล สำหรับการทดสอบใช้งานจริงเบื้องต้นเป็นระยะเวลา 15 ชั่วโมง ในเรือประมงพื้นบ้านที่ติดตั้งเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียวชนิดฉีดเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้โดยตรง ยี่ห้อยันม่าร์ รุ่น TF120 DI พบว่า ดีโซฮอล์ทั้งหมดสามารถให้อัตราเร่งในการขับเรือได้สอดคล้องกับเงื่อนไขการใช้งานสำหรับการล้อมอวนจับปลาที่ใกล้เคียงกับดีเซล และมีผลประเมินความพึงพอใจโดยรวมของการใช้งานและความเหมาะสมในการนำไปใช้งานจริงในระดับดี-ดีมากเทียบเท่ากับดีเซล โดยสรุป งานวิจัยนี้ค้นพบโอกาสที่ดีของการนำดีโซฮอล์ที่เติมกรดไขมันอิสระโมเลกุลยาวจากส่วนกลั่นกรดไขปาล์มไปใช้งานจริง

คำสำคัญ: ส่วนกลั่นกรดไขปาล์ม; กรดไขมันโมเลกุลยาว; เชื้อเพลิงทดแทนดีเซล; ดีโซฮอล์

ABSTRACT

This research studied the preliminary utilization tests on a test bench and a local fishery boat of diesohols (diesel-alcohols) containing tall oil monoacids from palm fatty acid distillate (PFAD), a cheap by-product of edible palm oil industry, as a diesel replacement and an emulsifier for diesohol production. This work represented the worst case of study to utilize high free fatty acid bio-oils as diesel substitutes. For diesohols in this work, anhydrous ethanol (AhE) and anhydrous n-butanol (AhnB) were used as a cold flow property improver and a simultaneous part of diesel replacement. Diesohols studied consists of 3 formulas including PFAD20AhE5, PFAD30AhE10EHN4000, and PFAD30AhnB20, the number following PFAD and AhE/AhnB is the blending proportion of wt.% with diesel and the number following EHN (cetane improver of 2-ethylhexyl nitrate) is the blending proportion of ppm with diesohol, in which their costs were comparable to that of diesel. Preliminarily, the diesohols were tested in a single-cylinder diesel engine model KUBOTA RT100 DI PLUS on a test bench under high load of 6.40 kW at high speed of 2200 rpm. It was found that all the diesohols could operate the tested engine in the same manner as diesel with slightly lower brake thermal efficiencies than diesel. In addition, the engine was also tested to continuously run under middle load of 3.84 kW at high speed of 2200 rpm for 90 min. The results revealed that all the diesohols were able to continuously run the engine with the good smooth of constant speed as same as diesel. For preliminarily actual utilizations of the diesohols for 15 hr in a local fishery boat mounted with a single-cylinder diesel engine model YANMAR TF120 DI, it was found that all the diesohols were able to provide the acceleration required for driving the boat to tow the fishing net as same as diesel. The overall satisfactions evaluated for the actual utilization and the suitability for actual utilization were in the levels of good-very good as same as diesel. In conclusion, this research explored the great opportunity for the actual utilization of diesohols containing tall oil monoacids from palm fatty acid distillate.

Keywords: Palm fatty acid distillate; Tall oil monoacid; Diesel substitute; Diesohol

1. บทนำ

ปัจจุบันจากการลดลงอย่างรวดเร็วของเชื้อเพลิงฟอสซิล และความกังวลเกี่ยวกับปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล โดยเฉพาะการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ส่งผลรุนแรงต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ จึงมีความพยามจากทั่วโลกเพื่อพัฒนาและใช้เชื้อเพลิงทดแทนดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืช/ไขพืช ผลิตภัณฑ์พลอยได้จากอุตสาหกรรมน้ำมันพืช และไบโอแอลกอฮอล์ (เอทานอล/บิวทานอล)

ดีโซฮอล์ (เชื้อเพลิงผสม ดีเซล-แอลกอฮอล์) เป็นเชื้อเพลิงทดแทนดีเซลที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นการนำไบโอแอลกอฮอล์มาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล ซึ่งเป็นการพัฒนาเชื้อเพลิงทดแทนดีเซลในเจนเนอเรชันที่ 3 และ 4 ที่มีการวิจัยมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 [1] ในสหรัฐอเมริกามีความก้าวหน้าเป็นอย่างมากและมีการกำหนดเป็นแผนนโยบายเพื่อการใช้จริงเชิงพาณิชย์ [2] ส่วนในประเทศไทยการวิจัยยังมีไม่มาก เคยมีโครงการความร่วมมือระหว่างบริษัท ปตท. บริษัทรถยนต์ฟอร์ด และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) เพื่อศึกษาศักยภาพการใช้ดีโซฮอล์เป็นเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล [3] อย่างไรก็ตาม การผลิตยังต้องปรับปรุงคุณสมบัติเชื้อเพลิงที่สำคัญดังต่อไปนี้ 1) การผสมและเสถียรภาพการเป็นของเหลว เนื่องจากแอลกอฮอล์ละลายและผสมกับดีเซลได้จำกัด เมื่อมีน้ำปนอยู่การแยกเฟสจะรุนแรงขึ้น จึงต้องเติมสารอิมัลซิไฟเออร์ 2) ค่าซีเทนของแอลกอฮอล์ต่ำกว่าดีเซลมาก เช่น การผสมเอทานอล 10 vol.% ส่งผลให้ค่าซีเทนลดลงประมาณ 30% จึงต้องมีการเติมสารปรับปรุงค่าซีเทน 3) แอลกอฮอล์มีความหนืดน้อยกว่าดีเซล ส่งผลให้ดีโซฮอล์มีคุณสมบัติการหล่อลื่นที่ด้อยลงด้วย จึงควรมีการเติมสารปรับปรุงการหล่อลื่น และ 4) การผสมแอลกอฮอล์ส่งผลต่อคุณสมบัติอื่น ๆ เช่น ความหนาแน่น ค่าความร้อน จุดวาบไฟ เป็นต้น [4-8] อย่างไรก็ตาม เนื่องจากแอลกอฮอล์มีคุณสมบัติการเป็นของเหลวที่ดีมาก โดยเฉพาะเอทานอลชนิดไม่มีน้ำ (anhydrous ethanol: AhE) มีจุดไหลเท -114°C และความหนืดจลนศาสตร์ 1.08 mm^2/s ที่ 40°C และบิวทานอลชนิดไม่มีน้ำ (anhydrous n-butanol: AhE) มีจุดไหลเท -89°C และความหนืดจลนศาสตร์ 2.59 mm^2/s ที่ 40°C [9] ดังนั้นจึงเป็นช่องโอกาสที่จะนำสารที่มีคุณสมบัติการเป็นของเหลวที่ดีมาใช้เป็นสารปรับปรุงคุณสมบัติการเป็นของเหลวของการนำน้ำมันพืช/ไขพืชมาใช้เป็นส่วนผสมทดแทนดีเซล (เชื้อเพลิงผสม ดีเซล-น้ำมันพืช/ไขพืช-แอลกอฮอล์) และแอลกอฮอล์ก็ถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนดีเซลในคราวเดียวกัน

สำหรับการศึกษาการผลิตและปรับปรุงคุณสมบัติเชื้อเพลิงของดีโซฮอล์ ในสหรัฐอเมริกามีหลายบริษัทที่วิจัยและพัฒนาอิมัลซิไฟเออร์สำหรับผลิตดีโซฮอล์ บริษัท Pure energy corporation (PEC) ในนิวยอร์กเป็นบริษัทแรกที่พัฒนาการใช้อิมัลซิไฟเออร์ 2-5 vol.% กับเอทานอลชนิดไม่มีน้ำ 10-15 vol.% บริษัทผู้ผลิตอิมัลซิไฟเออร์รายที่สอง คือ บริษัท AAE Technologies ได้ทดสอบการใช้เอทานอล 7.7 vol.% และ 10 vol.% ผสมกับดีเซล โดยเติมอิมัลซิไฟเออร์ของบริษัท 1 vol.% และ 1.25 vol.% บริษัทที่สามคือ บริษัท GE Betz ได้พัฒนาอิมัลซิไฟเออร์จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมเปรียบเทียบกับอิมัลซิไฟเออร์จากทรัพยากรหมุนเวียน [10] ในออสเตรเลีย บริษัท Apace Research Ltd. รายงานผลสำเร็จของการผสมดีเซล 84.5 vol.% กับเอทานอลชนิดมีน้ำ 15 vol.% และอิมัลซิไฟเออร์ของบริษัท 0.5 vol.% [11, 12] สำหรับประเทศไทย Kwanchareon และคณะ [13] และ Chotwichien และคณะ [14] ประสบความสำเร็จในการใช้ไบโอดีเซล (เป็นสารมีขั้วอย่างอ่อน 1 ข้าง และไม่มีขั้ว 1 ข้าง) เป็นอิมัลซิไฟเออร์สำหรับผลิตดีโซฮอล์ ซึ่งสามารถช่วยปรับปรุงทั้งความสามารถในการผสมระหว่างดีเซลกับแอลกอฮอล์ (โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ ≥20°C) และคุณสมบัติเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติได้ศึกษาการใช้งานในสภาพการใช้งานจริงของดีโซฮอล์ของเอทานอล 5-10 vol.% และใช้ไบโอดีเซลเป็นอิมัลซิไฟเออร์ในเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตรและในรถบรรทุกส่วนบุคคล ได้ข้อสรุปที่สำคัญ คือ การสึกหรอของเครื่องยนต์เมื่อใช้ดีโซฮอล์เท่ากับน้ำมันดีเซล และการเสื่อมสภาพของเครื่องยนต์ไม่มีความแตกต่างอย่างชัดเจนกับในกรณีเมื่อใช้ดีเซลและไม่พบ

การชำรุดเสียหายหรือความผิดปกติในชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ที่ใช้ดีโซฮอล์ [15]

การใช้อิมัลซิไฟเออร์จากต่างประเทศมีราคาค่อนข้างสูง และการใช้ไบโอดีเซลเป็นอิมัลซิไฟเออร์หรือเชื้อเพลิงทดแทนดีเซลถือได้ว่าเป็นขีดจำกัดบนของการใช้น้ำมันชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงทดแทน เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้นี้ต้องผ่านกระบวนการดัดแปลงโมเลกุลจนได้เชื้อเพลิงที่มีความบริสุทธิ์ของเอสเทอร์สูงและมีกรดไขมันอิสระเป็นองค์ประกอบอยู่ต่ำมาใช้งาน อย่างไรก็ตาม การใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบของกรดไขมันอิสระสูงเป็นเชื้อเพลิงทดแทนในปัจจุบันยังไม่ได้มีการยอมรับและถือว่าเป็นขีดจำกัดล่างของการใช้น้ำมันชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงทดแทนเนื่องจากข้อกังวลเกี่ยวกับข้อด้อยด้านคุณสมบัติเคมีกายภาพของกรดไขมันอิสระ เช่น ผลิตภัณฑ์สารกรดไขมันอิสระสูงมีคุณสมบัติเป็นกรด ซึ่งอาจจะส่งผลต่อการกัดกร่อนชิ้นส่วนเครื่องยนต์รุนแรง มีคุณสมบัติการเป็นของเหลวไม่ดี ซึ่งอาจจะส่งผลต่อการอุดตันของระบบท่อและระบบจ่ายเชื้อเพลิง โดยอาจจะส่งผลต่อไปถึงคุณสมบัติการเผาไหม้ไม่ดี อย่างไรก็ตาม การศึกษาการใช้น้ำมันชีวภาพที่มีกรดไขมันอิสระสูงเป็นเชื้อเพลิงทดแทนดีเซลเป็นสิ่งที่น่าสนใจอย่างมาก เนื่องจากเชื้อเพลิงนี้ไม่ต้องมีการดัดแปลงโมเลกุลมีขั้นตอนการผลิตไม่ซับซ้อน โดยเฉพาะไม่จำเป็นต้องมีการทำปฏิกิริยาเคมี ดังนั้น จึงมีต้นทุนต่ำกว่าอิมัลซิไฟเออร์ที่นำเข้าจากต่างประเทศ หรือผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์ของเอสเทอร์สูง

ในปี พ.ศ. 2559 มีการศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้กรดไขมันอิสระโมเลกุลยาวจากส่วนกลั่นกรดไขปาล์ม (palm fatty acid distillate: PFAD) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ราคาถูกของอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันปาล์มบริโภคมาใช้ประโยชน์เป็นส่วนผสมทดแทนดีเซลและสารอิมัลซิไฟ-เออร์สำหรับผลิตดีโซฮอล์จากเอทานอลชนิดไม่มีน้ำ/มีน้ำและบิวทานอลชนิดไม่มีน้ำ [16] โดยถือเป็นตัวแทนการศึกษาในกรณีเลวร้ายที่สุดของการนำน้ำมันชีวภาพชนิดกรดไขมันอิสระสูงมาประยุกต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล บนสมมติฐานที่สำคัญของโมเลกุลของกรดไขมันอิสระโมเลกุลยาวในส่วนกลั่นกรดไขปาล์มที่ประกอบด้วย ส่วนหัวมีขั้วที่แรงจะจับกับโมเลกุลมีขั้วของแอลกอฮอล์ และส่วนหางที่ไม่มีขั้วจะจับกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้วของไฮโดรคาร์บอนในดีเซล พบว่า ส่วนกลั่นกรดไขปาล์มที่มีลักษณะเป็นไขที่อุณหภูมิห้องและละลายเป็นของเหลวที่ 50°C มีโมเลกุลเฉลี่ยเป็น $C_{15.97}H_{31.87}COOH$ ซึ่งเป็นโมเลกุลที่ใกล้เคียงกับซีเทน ($C_{16}H_{34}$) มีหัวที่เป็นขั้วแรงและหางไม่มีขั้ว มีออกซิเจนในโมเลกุลที่จับตัวในรูปคาร์บอกซิล (– COOH) สามารถใช้ผสมตรงกับดีเซลได้สูงสุด 10 wt.% และนำมาใช้เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ที่มีค่าซีเทนสูงสำหรับผลิตดีโซฮอล์ที่มีเสถียรภาพการเป็นของเหลวได้อย่างมีประสิทธิผลทั้งแอลกอฮอล์ชนิดไม่มีน้ำและมีน้ำผสม ในขณะเดียวกันแอลกอฮอล์ยังสามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการเป็นของเหลวของเชื้อเพลิงผสมและเพิ่มสัดส่วนการนำส่วนกลั่นกรดไขปาล์มมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนสูงสุด 40-50 wt.% [17, 18] คุณสมบัติเชื้อเพลิงที่สำคัญของดีโซฮอล์ที่เติมส่วนกลั่นกรดไขปาล์มเป็นอิมัลซิไฟเออร์และส่วนผสมดีเซล พบว่า โมเลกุลของกรดไขมันอิสระในส่วนกลั่นกรดไขปาล์มมีค่าการกัดกร่อนแผ่นทองแดงเท่ากับหมายเลข 1a เหมือนกับดีเซล ซึ่งเป็นเพียงกรดอ่อนที่ไม่ส่งผลต่อการกัดกร่อนที่สูงกว่าดีเซล นอกจากนี้ ยังพบว่าการเติมส่วนกลั่นกรดไขปาล์มในดีเซลยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการหล่อลื่นได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจะช่วยป้องกันการสึกหรอของปั๊มและหัวฉีดเชื้อเพลิง [19-22] ผลการทดสอบสมรรถนะและการปล่อยไอเสียของเชื้อเพลิงผสม PFAD(5-10) และดีโซฮอล์ PFAD(10-30)AhnB10 (โดยตัวเลขที่ตามหลัง PFAD และ AhnB คือสัดส่วนการผสม wt.% กับดีเซล) พบว่า เชื้อเพลิงผสมและดีโซฮอล์ทั้งหมดสามารถใช้งานได้เทียบเท่าดีเซลด้วยประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกที่สูงกว่าดีเซลเล็กน้อย และการปล่อยควันไอเสียลดลงอย่างมีนัยสำคัญ [19, 20] ในขณะที่ผลการทดสอบสมรรถนะเบื้องต้นของดีโซฮอล์ PFAD30AhE10 พบว่า สามารถใช้งานได้ดีเทียบเท่าดีเซลในช่วงความเร็วรอบต่ำ-กลาง (1,200-1,700 rpm) [22]

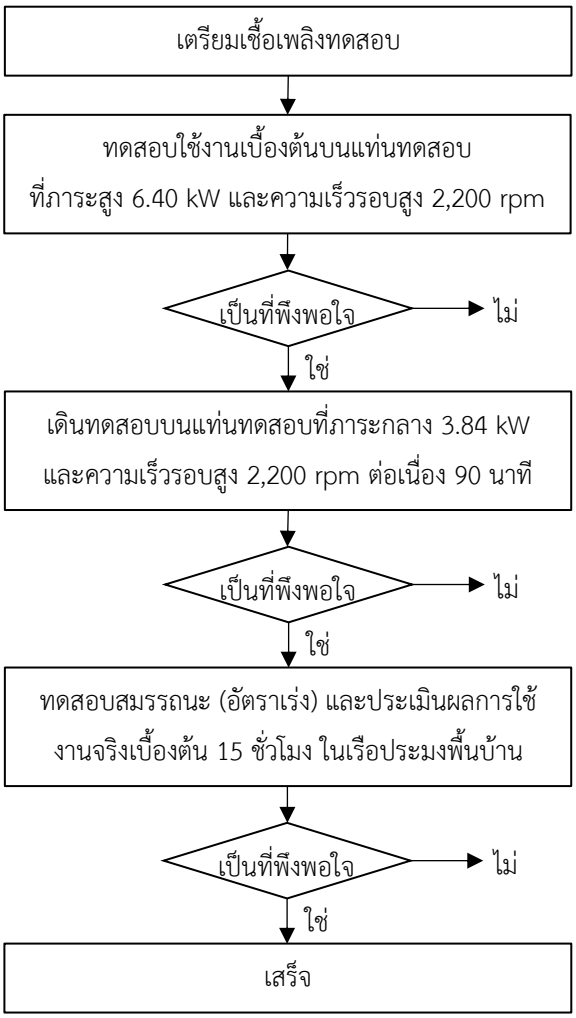
ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงสนใจนำดีโซฮอล์ที่เติมกรดไขมันอิสระโมเลกุลยาวจากส่วนกลั่นกรดไขปาล์มเป็นส่วนผสมทดแทนดีเซลและสารอิมัลซิไฟเออร์สำหรับผลิต

ดีโซฮอล์ขยายสู่การใช้งานจริงในเครื่องยนต์การเกษตรระดับชุมชน สำหรับดีโซฮอล์ที่ศึกษาในงานวิจัยนี้มีการปรับปรุงส่วนผสมเล็กน้อย ประกอบด้วย 3 สูตร คือ 1) PFAD20AhE5 2) PFAD30AhE10 ที่เติมสารปรับปรุงค่าซีเทนชนิดไดเอทิลเฮกซิลไนเทรต (2-ethylhexyl nitrate: EHN) ปริมาณ 4,000 ppm (PFAD30AhE10EHN4000) และ 3) PFAD30AhnB20 ดังนั้น ดีโซฮอล์ที่สนใจจะถูกทดสอบสมรรถนะเบื้องต้นบนแท่นทดสอบก่อนนำไปทดสอบใช้งานจริงเพื่อประเมินว่าดีโซฮอล์ที่สนใจสามารถใช้งานที่ภาระสูงและความเร็วรอบสูงได้เทียบเท่าดีเซลหรือไม่ หลังจากนั้นจึงทดสอบในสภาวะการใช้งานจริงในเรือประมงพื้นบ้านเพื่อศึกษาสมรรถนะการใช้งานเบื้องต้นและประเมินผลความพึงพอใจของการใช้ดีโซฮอล์ในสภาวะการใช้งานจริงเปรียบเทียบกับดีเซล

2. วัสดุและวิธีการ

ส่วนกลั่นกรดไขปาล์ม ดีเซลหมุนเร็วเกรดการค้า (commercial high speed diesel: CHSD) ซึ่งเป็นดีเซลผสมไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ 6-7 vol.% เอทานอลชนิดไม่มีน้ำเกรดการค้า ความบริสุทธิ์ 99.9% บิวทานอลชนิดไม่มีน้ำเกรดการค้า ความบริสุทธิ์ 99.4% และสารปรับปรุงค่าซีเทนชนิดไดเอทิลเฮกซิลไนเทรตเป็นวัตถุดิบหลักที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ส่วนกลั่นกรดไขปาล์มซื้อจากบริษัท สุขสมบูรณ์น้ำมันพืช จำกัด ตำบลห้างสูง อำเภอหนองใหญ่ จังหวัดชลบุรี ดีเซลหมุนเร็วซื้อจากปั๊มน้ำมันบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ตำบลคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา เอทานอลชนิดไม่มีน้ำซื้อจากบริษัท แกรททิทูด อินฟินิท จำกัด (มหาชน) บิวทานอลชนิดไม่มีน้ำและไดเอทิลเฮกซิลไนเทรตซื้อจากห้างหุ้นส่วนจำกัด แอล บี ซายน์ องค์ประกอบของส่วนกลั่นกรดไขปาล์มวิเคราะห์โดยวิธี thin layer chromatography/flame ionization detector (TLC/ FID) ซึ่งมีองค์ประกอบของกรดไขมันอิสระ ไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ เท่ากับ 93.8, 1.9, 2.2 และ 2.1 wt.% ตามลำดับ

สำหรับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 1 ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ 1) การเตรียมเชื้อเพลิงทดสอบ 2) การทดสอบใช้งานเบื้องต้นบนแท่นทดสอบ และ 3) การทดสอบใช้งานจริงเบื้องต้นในเรือประมงพื้นบ้าน ก่อนเตรียมดีโซฮอล์ ส่วนกลั่นกรดไขปาล์มจะถูกล้างโดยขั้นตอนดังนี้ ชั่งวัตถุดิบส่วนกลั่นกรดไขปาล์ม จำนวน 500 กรัม ในบีกเกอร์ขนาด 2 ลิตร แล้วนำไปอุ่นบนเตาให้ความร้อนจนกระทั่งส่วนกลั่นกรดไขปาล์มละลายเป็นของเหลว แล้วเติมน้ำปริมาณ 500 กรัม ลงไป จากนั้นกวนส่วนผสมด้วยใบกวนชนิด 6-blade disk turbine (เส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร) ที่ความเร็วรอบ 250–300 rpm และอุณหภูมิ ≈100°C เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นวางทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้น้ำแยกจากส่วนกลั่นกรดไขปาล์มแล้วถ่ายน้ำออก หลังจากนั้นทำการอุ่นไล่น้ำที่อุณหภูมิ ≈120°C เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

สำหรับดีโซฮอล์ที่ศึกษาในงานวิจัยนี้มี 3 สูตร คือ 1) 75 wt.% CHSD-20 wt.% PFAD-5 wt.% AhE (DS1: PFAD20AhE5) 2) 60 wt.% CHSD-30 wt.% PFAD-10 wt.% AhE ที่เติมสารปรับปรุงค่าซีเทนชนิดไดเอทิล-เฮกซิลไนเทรต ปริมาณ 4,000 ppm (DS2: PFAD30 AhE10EHN4000) และ 3) 50 wt.% CHSD-30 wt.% PFAD-20 wt.% AhnB (DS3: PFAD30AhnB20) ดีโซฮอล์จะถูกเตรียมตามสัดส่วนที่กำหนด แต่ละครั้งมีน้ำหนักรวม 2,000 กรัม โดยใช้เครื่องชั่งดิจิตอล ยี่ห้อ METTLER รุ่น AL204 ความละเอียด 0.1 กรัม การเตรียมมี 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 ส่วนกลั่นกรดไขปาล์มและแอลกอฮอล์ถูกผสมกันก่อน โดยองค์ประกอบแต่ละอย่างจะถูกชั่งตามสัดส่วนในบีกเกอร์กวนที่มีฝาปิดสนิทขนาด 3 ลิตร อุ่นบนเตาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 ±5°C และกวนผสมด้วยใบกวนชนิด 6-blade disk turbine (เส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร) ที่ความเร็วรอบ 250-300 rpm เป็นเวลา 5 นาที และขั้นตอนที่ 2 เติมดีเซลลงไปตามสัดส่วนและกวนผสมต่อที่ความเร็วรอบ 250-300 rpm และอุณหภูมิ 50 ±5°C เป็นเวลา 10 นาที สำหรับดีโซฮอล์สูตร 2 ไดเอทิลเฮกซิล-ไนเทรตจะถูกเติมพร้อมกับดีเซล โดยใช้เครื่องชั่งดิจิตอล ยี่ห้อ OHAUS รุ่น PA214C ความละเอียด 0.0001 กรัม

สำหรับราคาของดีโซฮอล์คำนวณบนพื้นฐานของราคาเฉลี่ย 10 ปี ย้อนหลัง (ปี พ.ศ. 2554-2563) ของดีเซลหมุนเร็วเกรดการค้าในประเทศไทย (26.98 บาท/ลิตร, 32.86 บาท/กิโลกรัม) [23] ส่วนกลั่นกรดไขปาล์ม (15.99 บาท/ลิตร, 18.12 บาท/กิโลกรัม) [24] และเอทานอลชนิดไม่มีน้ำ (23.96 บาท/ลิตร, 30.76 บาท/กิโลกรัม) [23] สำหรับราคาของบิวทานอลชนิดไม่มีน้ำที่ใช้คำนวณเป็นราคาที่ซื้อสำหรับใช้ในงานวิจัยนี้ (40.00 บาท/ลิตร, 50.00 บาท/กิโลกรัม) และสารปรับปรุงค่าซีเทนชนิดไดเอทิล-เฮกซิลไนเทรตคำนวณด้วยราคาเกรดการค้า ยี่ห้อ ZXCHEM (91.31 บาท/ลิตร, 94.82 บาท/กิโลกรัม) [25] ผลการคำนวณราคาของดีโซฮอล์ PFAD20AhE5 PFAD30AhE10EHN4000 และ PFAD30AhnB20 เท่ากับ 24.83 บาท/ลิตร (29.81 บาท/กิโลกรัม) 23.89 บาท/ลิตร (28.61 บาท/กิโลกรัม) และ 26.58 บาท/ลิตร (31.87 บาท/กิโลกรัม) ตามลำดับ ซึ่งดีโซฮอล์ทั้งหมดมีราคาต่ำกว่าดีเซลในช่วง -0.40 ถึง -3.09 บาท/ลิตร (-0.99 ถึง -4.25 บาท/กิโลกรัม) โดยที่ราคาข้างต้นไม่รวมต้นทุนจากการล้างส่วนกลั่นกรดไขปาล์มและการผสมเชื้อเพลิง ซึ่งมีต้นทุนการผลิตแบบกะขนาดเล็กในช่วง 0.19-0.26 บาท/ลิตร (0.23-0.31 บาท/กิโลกรัม)

คุณสมบัติเชื้อเพลิงที่สำคัญของเชื้อเพลิงที่สนใจถูกทดสอบตามมาตรฐานสมาคมการทดสอบและวัสดุอเมริกัน (American Society for Testing and Materials: ASTM) โดยค่าซีเทนส่งทดสอบที่ บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) จุดขุ่น จุดไหลเท ความหนืดจลนศาสตร์ ความหนาแน่น และการกัดกร่อนแผ่นทองแดง ส่งทดสอบที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และค่าความร้อนสูงส่งทดสอบที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับคุณสมบัติเชื้อเพลิงที่สำคัญของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดเปรียบเทียบกับมาตราฐานดีเซลหมุนเร็ว (high speed diesel: HSD) และดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (agricultural engine diesel: AED) ของประเทศไทย แสดงในตารางที่ 1

สำหรับการทดสอบเชื้อเพลิงบนแท่นทดสอบเพื่อประเมินเบื้องต้นว่าดีโซฮอล์ที่สนใจสามารถใช้งานที่ภาระสูงและความเร็วรอบสูงได้เทียบเท่ากับดีเซลหรือไม่ เครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียวชนิดฉีดเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้โดยตรง ยี่ห้อคูโบต้า รุ่น RT100 DI PLUS ดังแสดงรายละเอียดเครื่องยนต์ในตารางที่ 2 ถูกทดสอบบนแท่นทดสอบที่ใช้ไดนาโมมิเตอร์ ยี่ห้อ PLINT& PARTNER ดังแสดงไดอะแกรมในรูปที่ 2 [20] โดยไม่เน้นศึกษาการปลดปล่อยไอเสีย ภายใต้เงื่อนไขทดสอบที่ภาระสูง 6.40 kW และความเร็วรอบสูง 2,200 rpm ทำการวัดเบรกทอร์คด้วยเครื่องชั่งแบบสปริง ยี่ห้อ SALTER การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงโดยปริมาตรวัดด้วยกระบอกตวง ขนาด 50 มิลลิลิตร และนาฬิกาจับเวลา ยี่ห้อ ALBA ความละเอียด 0.01 วินาที ความเร็วรอบวัดและบันทึกทุก 1 วินาที ด้วยเอ็นโค้ดเดอร์ ยี่ห้อ PRIMUS รุ่น PR-01N-S อุณหภูมิไอเสีย (exhaust gas temperature: EGT) และอุณหภูมิเชื้อเพลิงวัดด้วยเทอโมคัปเปิล type k และบันทึกด้วย PC-based data logger ยี่ห้อ Wisco รุ่น AI210 ทำการทดสอบเครื่องยนต์ จำนวน 3 ซ้ำ เพื่อหาค่าเฉลี่ย และนำข้อมูลที่ได้คำนวณอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก

(brake specific fuel consumption: BSFC) และประสิทธิภาพเชิงความเบรก (brake thermal efficiency: BTE) นอกจากนี้ เพื่อยืนยันว่าดีโซฮอล์ที่สนใจจะสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องในสภาวะการใช้งานจริง จึงได้เดินทดสอบเครื่องยนต์ที่ภาระกลาง 3.84 kW และความเร็วรอบสูง 2,200 rpm ต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 90 นาที โดยบันทึกความเร็วรอบทุก 1 วินาที ด้วยเอ็นโค้ดเดอร์ ยี่ห้อ PRIMUS รุ่น PR-01N-S เพื่อวิเคราะห์การใช้งานของดีโซฮอล์แต่ละสูตรเปรียบเทียบกับดีเซลต่อไป

สำหรับการทดสอบใช้งานดีโซฮอล์ในเรือประมงพื้นบ้านจากการลงพื้นที่สำรวจการทำประมงชายฝั่งของชาวบ้านที่อาศัยติดกับทะเลอ่าวไทย หมู่บ้านบึงฉลาม ม.10 ต.ไพรวัน อ.ตากใบ จ.นราธิวาส ได้ข้อมูลว่าจำนวนของเรือประมงพื้นบ้าน (เรือกอและ) ที่ลงทะเบียนเรือประมงปี พ.ศ. 2559 มีจำนวน 118 ลำ และเครื่องยนต์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนเรือประมงร้อยละ 98 เป็นเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียว ระบายความร้อนด้วยน้ำ ขนาด 8-12 แรงม้า ยี่ห้อยันม่าร์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียวชนิดฉีดเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้โดยตรง ยี่ห้อยันม่าร์ รุ่น TF120 DI ขนาด 12 แรงม้า สำหรับใช้ขับเคลื่อนเรือประมงพื้นบ้านเพื่อทดสอบใช้งานดีโซฮอล์ในสภาวะการใช้งานจริง รายละเอียดของเครื่องยนต์แสดงดังตารางที่ 2 และเรือประมงพื้นบ้านที่ใช้ทดสอบแสดงดังรูปที่ 3 สำหรับการทดสอบใช้งานเชื้อเพลิงประกอบด้วย 2 ส่วน คือ 1) การทดสอบสมรรถนะเบื้องต้นของเครื่องยนต์ที่ใช้ดีโซฮอล์เปรียบเทียบกับดีเซล และ 2) การทดสอบใช้งานดีโซฮอล์ในสภาวะการใช้งานจริงเปรียบเทียบกับดีเซล โดยมีรายละเอียดการทดสอบดังต่อไปนี้

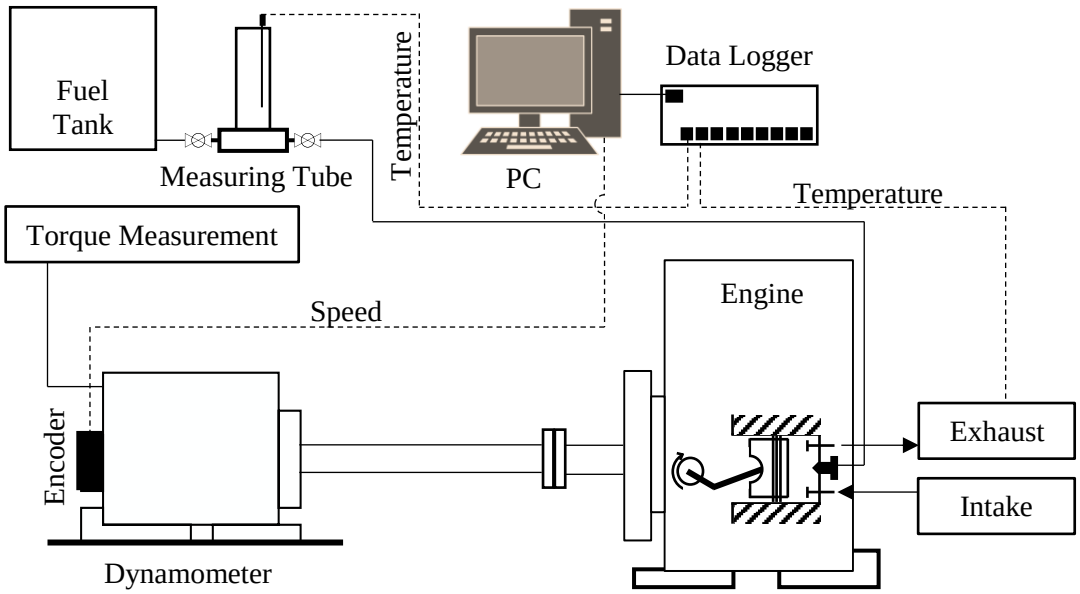
ตารางที่ 1 คุณสมบัติเชื้อเพลิงที่สำคัญของเชื้อเพลิงทดสอบ

คุณสมบัติเชื้อเพลิง	มาตรฐานประเทศไทย		เชื้อเพลิงทดสอบ			
	HSD	AED	CHSD	DS1	DS2	DS3
จุดขุ่น/จุดไหลเท (°C)	n.a./≤10	n.a./n.a.	8/-5	15/13	12/5	11/7
ความหนืดจลนศาสตร์ที่ 40°C (mm^2/s)	1.8-4.1	1.9-8.0	3.14	4.12	3.95	4.19
ความหนาแน่นที่ 15.6°C (g/l)	810-870	860-900	832	843	846	844
ค่าซีเทน	≥50	≥47	65.3	-	58.8	51.9
ค่าความร้อนสูง (MJ/kg)	n.a.	n.a.	44.9	42.9	41.4	41.1
การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (No.)	≤1	≤3	1a	1a	1a	1a

n.a. = non applied; HSD = high speed diesel; AED = agricultural engine diesel; CHSD = commercial high speed diesel; DS1 = PFAD20AhE5; DS2 = PFAD30AhE10EHN4000; DS3 = PFAD30AhnB20

ตารางที่ 2 ข้อมูลเทคนิคของเครื่องยนต์ที่ใช้ทดสอบบนแท่นทดสอบและในเรือประมงพื้นบ้าน

	คูโบต้า RT100 DI Plus	**ยันม่าร์ TF120 DI**
แบบเครื่องยนต์	ดีเซล 4 จังหวะ 1 สูบนอน	ดีเซล 4 จังหวะ 1 สูบนอน
อัตราส่วนแรงอัด	18 : 1	16.1 : 1
ปริมาตรกระบอกสูบ	547 cc.	638 cc.
กำลังสูงสุด	7.4 kW/2400 rpm	8.8 kW/2400 rpm
กำลังต่อเนื่อง	6.6 kW/2400 rpm	7.7 kW/2400 rpm
แบบเผาไหม้	ฉีดเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้โดยตรง	ฉีดเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้โดยตรง



รูปที่ 2 ไดอะแกรมแท่นทดสอบสมรรถนะ [20]

รูปที่ 3 เรือประมงที่ใช้ทดสอบในสภาวะการใช้งานจริง

ส่วนที่ 1 การทดสอบสมรรถนะเบื้องต้นของเครื่องยนต์ที่ใช้ดีโซฮอล์เปรียบเทียบกับดีเซล โดยการวัดอัตราเร่งของเรือประมงที่เดินด้วยดีโซฮอล์และดีเซล สำหรับการวัดอัตราเร่งทำโดยเร่งเครื่องยนต์ด้วยการเปิดคันเร่งสุดและจับเวลาที่ใช้สำหรับเร่งเรือประมงจากความเร็ว 3 ไมล์ทะเล/ชั่วโมง ถึงความเร็ว 7 ไมล์ทะเล/ชั่วโมง ความเร็วของเรือประมงวัดด้วยเครื่อง GPS ยี่ห้อ SAMYANG รุ่น N430 ความละเอียด 0.1 ไมล์ทะเล/ชั่วโมง และจับเวลาด้วยนาฬิกาจับเวลาแบบดิจิตอล ยี่ห้อ ALBA ความละเอียด 0.01 วินาที ทำการทดสอบจำนวน 8 ซ้ำ เพื่อหาค่าเฉลี่ย และนำข้อมูลที่ได้คำนวณหาอัตราเร่งของเชื้อเพลิงแต่ละสูตร สำหรับการทดลองเริ่มต้นในเวลาน้ำตาย ช่วงเวลา 7.00 น. ถึง 10.00 น. ที่ความสูงของคลื่น 5-10 เซนติเมตร โดยการวิ่งเรือเลียบชายฝั่งเพื่อให้ด้านคลื่นน้อยที่สุด ก่อนการทดสอบได้ตรวจสอบความสูงของคลื่นด้วยแอพลิเคชั่นมือถือชื่อ Windy และมีการวัดความสูงของคลื่นที่กราบเรือหากมีความสูงเกินที่กำหนดจะหยุดการทดสอบ

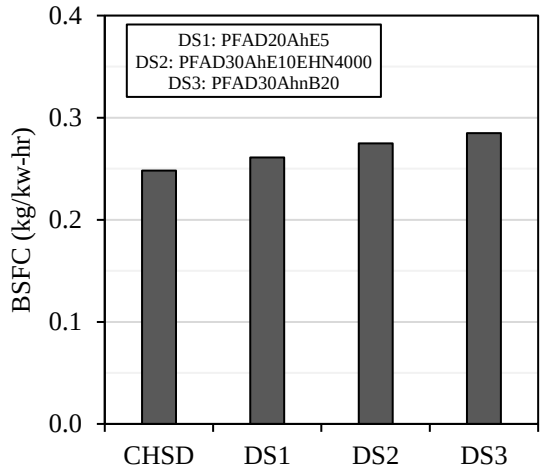
ส่วนที่ 2 การทดสอบใช้งานดีโซฮอล์ในสภาวะการใช้งานจริงเปรียบเทียบกับดีเซล โดยเชื้อเพลิงแต่ละสูตรถูกใช้ในเรือประมงพื้นบ้านเพื่อทำประมงตามระยะทางจากชายฝั่ง 7-14 ไมล์ทะเล จำนวน 1 ลำ การทดสอบใช้เชื้อเพลิงสูตรละ 40 ลิตร (ใช้งานประมาณ 15 ชั่วโมง) และประเมินความพึงพอใจการใช้งานของเชื้อเพลิงแต่สูตรโดยผู้ใช้งานจริง ซึ่งผู้ใช้งานจริงจะไม่ทราบว่าเชื้อเพลิงที่ใช้เป็นสูตรใด สำหรับการประเมินความพึงพอใจแบ่งเป็น 2 ด้าน คือ ด้านที่ 1 สมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ใช้ดีโซฮอล์เปรียบเทียบกับดีเซล (Q1) และด้านที่ 2 การใช้ดีโซฮอล์เป็นเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล (Q2)

3. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 ผลการทดสอบใช้งานดีโซฮอล์บนแท่นทดสอบ

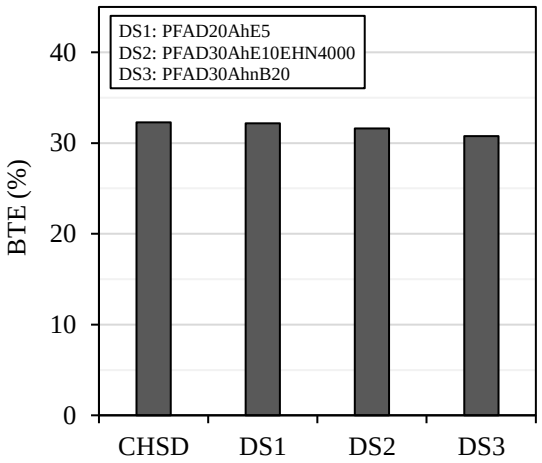
สำหรับการทดสอบดีโซออล์บนแท่นทดสอบเพื่อประเมินว่าดีโซฮอล์ที่สนใจสามารถใช้งานที่ภาระสูงและความเร็วรอบสูงได้เทียบเท่ากับดีเซลหรือไม่ ผลของ

สมรรถนะเครื่องยนต์ที่สำคัญในรูปของอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก และอุณหภูมิไอเสีย เปรียบเทียบกับดีเซล แสดงในรูปที่ 4-6 ตามลำดับ สำหรับอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก บ่งบอกถึงปริมาณเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าห้องเผาไหม้ต่อหน่วยกำลังเบรก และเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราเชิงมวลของเชื้อเพลิง จากผลการทดลองจะเห็นว่า อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกของดีโซฮอล์ PFAD20AhE5, PFAD30AhE10EHN4000 และ PFAD30AhnB20 สูงกว่าดีเซลเล็กน้อย (+5.1%, +10.7% และ +14.7% ตามลำดับ) สาเหตุเนื่องจากค่าความร้อนของดีโซฮอล์ต่ำกว่าดีเซล (-4.5%, -7.7% และ -8.4% ตามลำดับ) เพื่อให้ได้กำลังเบรกที่เท่ากัน เครื่องยนต์จึงต้องฉีดเชื้อเพลิงในปริมาณที่มากกว่า ผลที่คล้ายกันนี้ถูกพบในงานวิจัยก่อนหน้าที่ทดสอบดีโซฮอล์ของเอทานอลและบิวทานอลชนิดไม่มีน้ำ [26-40]



รูปที่ 4 BSFC ของดีโซฮอล์เปรียบเทียบกับดีเซล ที่ภาระสูง 6.40 kW และความเร็วรอบสูง 2,200 rpm

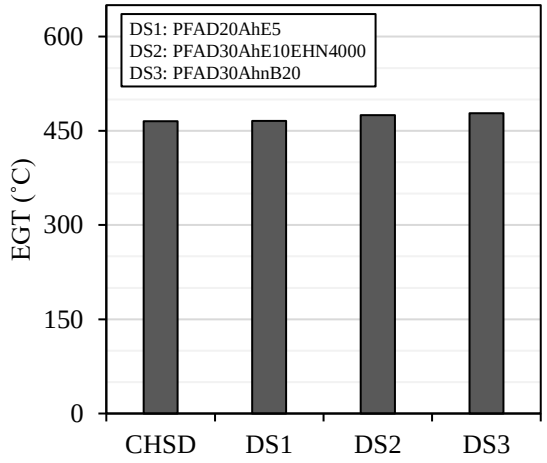
สำหรับประสิทธิภาพเชิงความเบรกบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงไปเป็นงานที่ใช้ประโยชน์ในเครื่องยนต์ [34] จากผลการทดลองจะเห็นว่า ประสิทธิภาพเชิงความเบรกของดีโซฮอล์ PFAD20AhE5, PFAD30AhE10EHN4000 และ PFAD30-AhnB20 ต่ำกว่าดีเซลเล็กน้อย (-0.4%, -2.1% และ -4.7% ตามลำดับ) เนื่องจากค่าความร้อนและค่าซีเทนของดีโซฮอล์ต่ำกว่าดีเซล การค้นพบที่คล้ายกันนี้ยังพบได้ในหลายงานวิจัยที่ทดสอบดีโซฮอล์ของเอทานอลและบิวทานอลชนิดไม่มีน้ำ [28, 30-32, 34, 37, 40-42] อย่างไรก็ตาม สิ่งสำคัญของการศึกษานี้ได้แสดงให้เห็นชัดเจนว่าดีโซฮอล์ PFAD20AhE5, PFAD30AhE10EHN4000 และ PFAD30-AhnB20 มีศักยภาพการใช้งานในเครื่องยนต์ที่ภาระสูงและความเร็วรอบสูงใกล้เคียงกับดีเซล



รูปที่ 5 BTE ของดีโซฮอล์เปรียบเทียบกับดีเซล ที่ภาระสูง 6.40 kW และความเร็วรอบสูง 2,200 rpm

สำหรับอุณหภูมิไอเสียในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดสะท้อนถึงปริมาณความร้อนที่ปล่อยออกมาในระหว่างกระบวนการเผาไหม้ภายในกระบอกสูบ และมีอิทธิพลต่อการเกิดไอเสียในระดับหนึ่ง [43] โดยปกติเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำกว่าจะมีอุณหภูมิไอเสียต่ำกว่ายกเว้นในกรณีที่เกิดการเผาไหม้ล่าช้า [44] จากผลการทดลองจะเห็นว่าอุณหภูมิไอเสียของดีโซฮอล์ PFAD20AhE5, PFAD30-AhE10EHN4000 และ PFAD30AhnB20 สูงกว่าดีเซลเล็กน้อย (+0.03%, +2.04% และ +2.72% ตามลำดับ) สาเหตุเนื่องจากเอทานอลและบิวทานอลชนิดไม่มีน้ำมีค่าซีเทนต่ำ (5-8 และ 25 ตามลำดับ) [9] และมีค่าความร้อนแฝงของการระเหยสูง (904 kJ/kg ที่ 25°C และ 582 KJ/kg ที่ 25°C ตามลำดับ) [4] ส่งผลให้ดีโซฮอล์มีความล่าช้าของการสันดาปสูงกว่าดีเซล โดยปัจจัยนี้จะทำให้เกิด

การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในกระบวนการคายไอเสีย [40, 45] และส่งผลให้อุณหภูมิไอเสียของดีโซฮอล์สูงกว่าดีเซล ผลที่คล้ายกันนี้ยังพบได้ในงานวิจัยก่อนหน้าที่ทดสอบดีโซฮอล์ของเอทานอลและบิวทานอลชนิดไม่มีน้ำ [27, 40, 45]



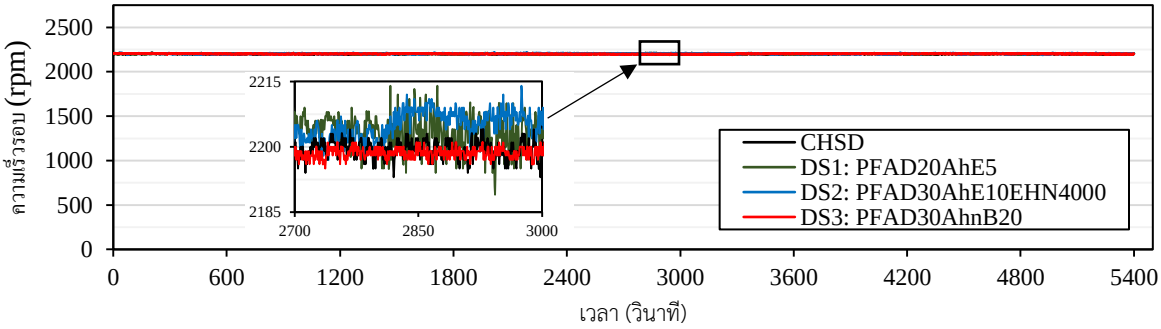
รูปที่ 6 EGT ของดีโซฮอล์เปรียบเทียบกับดีเซล ที่ภาระสูง 6.40 kW และความเร็วรอบสูง 2,200 rpm

นอกจากนี้ เพื่อยืนยันว่าดีโซฮอล์ที่สนใจจะสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องในสภาวะการใช้งานจริง จึงได้เดินทดสอบเครื่องยนต์ที่ภาระกลาง 3.84 kW และความเร็วรอบสูง 2,200 rpm ต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 90 นาที โดยบันทึกความเร็วรอบทุก 1 วินาที ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 7 จากผลการทดลองพบว่า เครื่องยนต์ที่เดินด้วยดีเซล และดีโซฮอล์ PFAD20AhE5, PFAD30AhE10EHN4000 และ PFAD30AhnB20 มีความเร็วรอบคงที่ตลอดช่วงทดลอง และมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 2,201 ±3 rpm, 2,202 ±4 rpm, 2,203 ±4 rpm และ 2,201 ±2 rpm ตามลำดับ จากผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่า ดีโซฮอล์ทั้งหมดสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องเทียบเท่ากับดีเซล และมีความเหมาะสมสำหรับทดสอบใช้งานในสภาวะการใช้งานจริง นอกจากนี้จากการสังเกตทั่วไปในช่วงการทดสอบยังไม่พบปัญหาที่รุนแรง เช่น การปั๊มและฉีดเชื้อเพลิง การสตาร์ทขณะเครื่องเย็น น็อค และการติดขัดของแหวนสูบ นอกจากนี้ หลังจากทดสอบเสร็จ ดีโซฮอล์แต่ละสูตรจะถูกค้างไว้ในถังและระบบเชื้อเพลิงเป็นเวลา 14 วัน เพื่อสังเกตการเป็นไข โดยพบว่าหลังจาก 14 วัน เชื้อเพลิงยังคงเป็นของเหลวเฟสเดียว และไม่พบการเกิดไขในถังและระบบเชื้อเพลิง และเครื่องยนต์สามารถสตาร์ทติดง่ายเหมือนตอนแรกเริ่ม

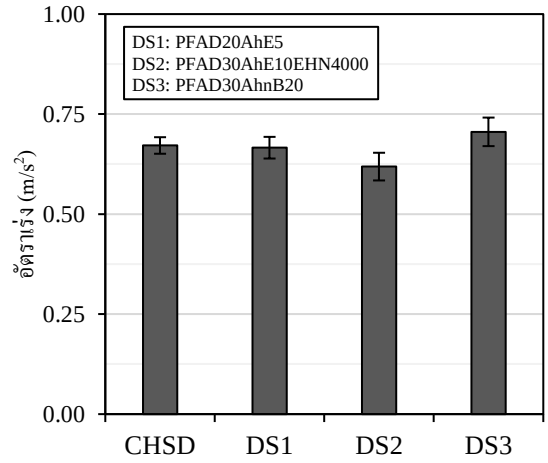
3.2 ผลการทดสอบใช้งานดีโซฮอล์ในสภาวะการใช้งานจริง

สำหรับการทดสอบใช้งานดีโซฮอล์ในเรือประมงพื้นบ้าน จำนวน 1 ลำ โดยใช้เครื่องยนต์ยี่ห้อยันมาร์ รุ่น TF120 DI ขนาด 12 แรงม้า ในการขับเคลื่อนเรือประมง การทดลองใช้งานเชื้อเพลิงประกอบด้วย 2 ส่วน คือ 1) การทดสอบสมรรถนะเบื้องต้นของเครื่องยนต์ที่ใช้ดีโซฮอล์เปรียบเทียบกับดีเซล และ 2) การทดสอบใช้งานดีโซฮอล์ในสภาวะการใช้งานจริงเปรียบเทียบกับดีเซล ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับ

สำหรับผลการทดสอบสมรรถนะเบื้องต้นของเครื่องยนต์ที่ใช้ดีโซฮอล์เปรียบเทียบกับดีเซล การทดสอบทำโดยเร่งเครื่องยนต์ด้วยการเปิดคันเร่งสุดจากความเร็ว 3 ไมล์ทะเล/ชั่วโมง ถึงความเร็ว 7 ไมล์ทะเล/ชั่วโมง ซึ่งเป็นความเร็วที่ใช้สำหรับล้อมอวนจับปลา หากเชื้อเพลิงที่ใช้มีอัตราเร่งที่ไม่ดีก็จะไม่เหมาะสมสำหรับใช้งานจริง จากผลการทดสอบพบว่า ดีโซฮอล์ PFAD20AhE5 และ PFAD30AhE10EHN4000 มีอัตราเร่งต่ำกว่าดีเซลเล็กน้อย (-0.8% และ -8.5% ตามลำดับ) ในขณะที่ดีโซฮอล์ PFAD30AhnB20 มีอัตราเร่งสูงกว่าดีเซลเล็กน้อย (+4.8) จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ดีโซฮอล์ทั้งหมดมีสมรรถนะการใช้งานจริงเทียบเท่ากับดีเซล และมีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล

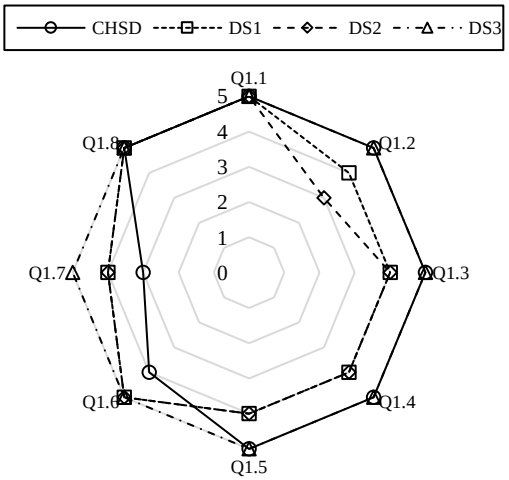


รูปที่ 7 ความเร็วรอบของเครื่องยนต์บนแท่นทดสอบ ที่ภาระกลาง 3.84 kW และความเร็วรอบสูง 2,200 rpm ต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 90 นาที



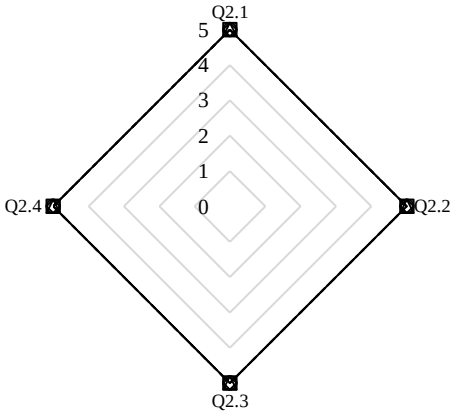
รูปที่ 8 อัตราเร่งของเรือประมงที่ใช้ดีโซฮอล์เปรียบเทียบกับดีเซล

สำหรับการทดสอบใช้งานดีโซฮอล์ในสภาวะการใช้งานจริงเปรียบเทียบกับดีเซลด้วยการประเมินความพึงพอใจโดยผู้ใช้งานจริง ประกอบด้วย 2 ด้าน คือ ด้านที่ 1 สมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ใช้ดีโซฮอล์เปรียบเทียบกับดีเซล และด้านที่ 2 การใช้ดีโซฮอล์เป็นเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล ดังแสดงในรูปที่ 8 (ก) และ (ข) ตามลำดับ สำหรับการประเมินความพึงพอใจแบ่งเป็น 5 ระดับ คือ ระดับ 1 ความพึงพอใจอยู่ในระดับน้อยที่สุด ระดับ 2 ความพึงพอใจอยู่ในระดับน้อย ระดับ 3 ความพึงพอใจอยู่ในระดับกลาง ระดับ 4 ความพึงพอใจอยู่ในระดับดี และระดับ 5 ความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมาก ผลการประเมินความพึงพอใจการใช้งานจริงในด้านที่ 1 พบว่า เรือประมงที่เดินด้วยดีเซลและดีโซฮอล์ PFAD20AhE5, PFAD30AhE10EHN4000 และ PFAD30AhnB20 มีระดับความพึงพอใจเฉลี่ยเท่ากับ 4.63, 4.38, 4.25 และ 5.00 ตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นว่า ดีโซฮอล์ PFAD20AhE5 และ PFAD30AhE-10EHN4000 มีระดับความพึงพอใจเฉลี่ยต่ำกว่าดีเซลเล็กน้อย (-5.4% และ -8.1% ตามลำดับ) อย่างไรก็ตามระดับความพึงพอใจของดีโซฮอล์ทั้งสองยังอยู่ในระดับดี-ดีมากเช่นเดียวกับดีเซล ในขณะที่ดีโซฮอล์ PFAD30AhnB20 มีระดับความพึงพอใจเฉลี่ยสูงกว่าดีเซล (+8.1%) และอยู่ในระดับมากที่สุด นอกจากนี้ จากผลการประเมินความพึงพอใจการใช้งานจริงในด้านที่ 1 ยังพบว่า การใช้งานดีโซฮอล์มีข้อดีกว่าดีเซลอยู่ 2 ประการ คือ 1) เครื่องยนต์มีเสียง การสั่นสะเทือน และการสะดุดในการทำงานน้อยกว่าดีเซล และ 2) เครื่องยนต์มีปริมาณควันดำน้อยกว่าดีเซลในช่วงที่เร่งและช่วงภาระงานเดินทาง สำหรับผลการประเมินความพึงพอใจการใช้งานจริงด้านที่ 2 พบว่า ดีโซฮอล์ทั้งหมดมีระดับความพึงพอใจเฉลี่ยอยู่ในระดับดีมากเช่นเดียวกับดีเซล (5.00) จากผลการประเมินความพึงพอใจการใช้งานจริงจะเห็นได้ว่า ดีโซฮอล์ทั้งหมดมีสมรรถนะและความเหมาะสมในการนำไปใช้งานจริงในระดับดี-ดีมากเทียบเท่ากับดีเซล



Q1.1 = เครื่องยนต์สามารถสตาร์ทติดง่าย; Q1.2 = เครื่องยนต์มีกำลังขณะมีการเร่งในช่วงใบจักรอยู่ในน้ำ; Q1.3 = เครื่องยนต์มีอัตราเร่งได้อย่างดี; Q1.4 = เครื่องยนต์ตอบสนองการทำงานที่ความเร็วรอบต่ำ-กลางได้อย่างปกติและต่อเนื่อง; Q1.5 = เครื่องยนต์ตอบสนองการทำงานที่ความเร็วรอบกลาง-สูงได้อย่างปกติและต่อเนื่อง; Q1.6 = เครื่องยนต์มีเสียง การสั่นสะเทือน และการสะดุดในการทำงานน้อย; Q1.7 = เครื่องยนต์มีปริมาณควันดำน้อยในช่วงที่เร่งและช่วงภาระงานเดินทาง; Q 1.8 = เครื่องยนต์สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยรอบเครื่องยนต์ไม่ตก

(ก) สมรรถนะเครื่องยนต์



Q2.1 = เชื้อเพลิงที่นำมาใช้ไม่เป็นอุปสรรคในพื้นที่และด้านสภาพอากาศ; Q2.2 = เชื้อเพลิงที่นำมาใช้สามารถใช้งานง่าย สะดวก กับเครื่องยนต์; Q2.3 = เชื้อเพลิงที่นำมาใช้เหมาะแก่การใช้งาน; Q2.4 = ไม่มีการกัดกร่อนท่อทางเดินและชิ้นส่วนที่สัมผัสเชื้อเพลิง

(ข) การใช้ดีโซฮอล์เป็นเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล

หมายเหตุ DS1 = PFAD20AhE5; DS2 = PFAD30AhE10EHN4000; DS3 = PFAD30AhnB20

รูปที่ 9 ผลการประเมินความพึงพอใจการใช้งานในสภาวะการใช้งานจริงของดีโซฮอล์เปรียบเทียบกับดีเซล

4. สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาการทดสอบใช้งานเบื้องต้นบนแท่นทดสอบและในเรือประมงพื้นบ้านของดีโซฮอล์ (ดีเซล-แอลกอฮอล์) ที่เติมกรดไขมันอิสระโมเลกุลยาวจากผลิตภัณฑ์พลอยได้ราคาถูกของส่วนกลั่นกรดไขปาล์ม เป็นส่วนผสมทดแทนดีเซลและสารอิมัลซิไฟเออร์สำหรับผลิตดีโซฮอล์ งานวิจัยนี้ถือเป็นตัวแทนการศึกษาในกรณีเลวร้ายที่สุดของการนำน้ำมันชีวภาพชนิดกรดไขมันอิสระสูงมาประยุกต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล สำหรับดีโซฮอล์ในงานวิจัยนี้ เอทานอลและบิวทานอลชนิดไม่มีน้ำถูกใช้เป็นสารปรับปรุงคุณสมบัติการเป็นของเหลวและส่วนผสมทดแทนดีเซลในคราวเดียวกัน โดยดีโซฮอล์ที่ศึกษามี 3 สูตร คือ PFAD20AhE5, PFAD30AhE10EHN4000 และ PFAD30AhnB20 ซึ่งมีราคาใกล้เคียงกับดีเซล เบื้องต้นได้เดินทดสอบดีโซฮอล์ในเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียวชนิดฉีดเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้โดยตรง ยี่ห้อคูโบต้า รุ่น RT100DI PLUS ที่ภาระสูง 6.40 kW และความเร็วรอบสูง 2,200 rpm บนแท่นทดสอบ พบว่า ดีโซฮอล์ทั้งหมดสามารถใช้งานได้ดีเทียบเท่าดีเซลด้วยประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกที่ต่ำกว่าดีเซลเล็กน้อย (-0.4% ถึง -4.7%) นอกจากนี้ ยังได้เดินทดสอบที่ภาระกลาง 3.84 kW และความเร็วรอบสูง 2,200 rpm ต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 90 นาที พบว่า ดีโซฮอล์ทั้งหมดสามารถใช้งานในเครื่องยนต์ได้อย่างต่อเนื่องด้วยความเร็วรอบคงที่เช่นเดียวกับดีเซล (≈2,200 ±2 ถึง ±4 rpm) สำหรับการทดสอบใช้งานจริงเบื้องต้นเป็นระยะเวลา 15 ชั่วโมง ในเรือประมงพื้นบ้านที่ติดตั้งเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียวชนิดฉีดเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้โดยตรง ยี่ห้อยันม่าร์ รุ่น TF120 DI พบว่า ดีโซฮอล์ทั้งหมดสามารถให้อัตราเร่ง ในการขับเรือได้สอดคล้องกับเงื่อนไขการใช้งานสำหรับการล้อมอวนจับปลาที่ใกล้เคียงกับดีเซล (-8.5% ถึง +4.8%) และมีผลประเมินความพึงพอใจโดยรวมของการใช้งานและความเหมาะสมในการนำไปใช้งานจริงในระดับดี-ดีมากเทียบเท่ากับดีเซล โดยสรุป งานวิจัยนี้

ค้นพบโอกาสที่ดีของการนำดีโซฮอล์ที่เติมกรดไขมันอิสระโมเลกุลยาวจากส่วนกลั่นกรดไขปาล์มไปใช้งานจริง

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ภายใต้กรอบวิจัยการพัฒนาพลังงานทดแทน และการประยุกต์ใช้งานจริง เพื่อนำไปสู่ชุมชนสีเขียว โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และเงินรายได้มหาวิทยาลัยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ขอขอบคุณ คุณสมะแอ บินเจ๊ะอาลี สำหรับการนำดีโซฮอล์ไปใช้งานจริงในเรือประมงพื้นบ้าน และขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ สำหรับคำชี้แนะในการทำวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Pidol, L., Lecointe, B., Starck, L. and Jeuland, N. Ethanol-biodiesel-Diesel Fuel Blends: Performances and Emissions in Conventional Diesel and Advanced Low Temperature Combustions. *Fuel*, 2012; 93: 329-338.

[2] Advanced Petroleum Based Fuels Program and Renewable Diesel Program. National Renewable Energy Laboratory. Milestone report: Technical barriers to use of ethanol in diesel fuel, 2001.

[3] Srithammarong, P. Collaborative Research and Development of Diesohol Fuel for Diesel Vehicles in Thailand. MTEC annual meeting 2003, Bangkok, Thailand, 2003; 120-121.

[4] Jin, C., Yao, M., Liu, H., Lee, C.F. and Ji, J. Progress in the Production and Application of N-Butanol as a Biofuel. *Renewable Sustainable Energy Review*, 2011; 15: 4080-4106.

[5] Mofijur, M., Rasul, M.G., Hyde, J., Azad, A.K., Mamat, R. and Bhuiya, M.M.K. Role of Biofuel and Their Binary (Diesel-Biodiesel) and Ternary (Ethanol-Biodiesel-Diesel) Blends on Internal Combustion Engines Emission Reduction. *Renewable Sustainable Energy Review*, 2016; 53: 265-278.

[6] Shahir, S.A., Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Imran, A., Rizwanul Fattah I.M. and Sanjid, A. Feasibility of Diesel-Biodiesel-Ethanol/Bioethanol Blend as Existing CI Engine Fuel: an Assessment of Properties, Material Compatibility, Safety and Combustion. *Renewable Sustainable Energy Review*, 2014; 32: 379-395.

[7] Shahir, S.A., Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Imran, A. and Ashraful, A.M. Performance and Emission Assessment of Diesel-Biodiesel-Ethanol/Bioethanol Blend as a Fuel in Diesel Engines: A Review. *Renewable Sustainable Energy Review*, 2015; 48: 62-78.

[8] Vallinayagam, R., Vedharaj, S., Yang, W.M., Roberts, W.L. and Dibble, R.W. Feasibility of Using Less Viscous and Lower Cetane (LVLC) Fuels in a Diesel Engine: A Review. *Renewable Sustainable Energy Review*, 2015; 51: 1166-1190.

[9] Kumar, S., Cho, J.H., Park, J. and Moon, I. Advances in Diesel-Alcohol Blends and Their Effects on the Performance and Emissions of Diesel Engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013; 22: 46-72.

[10] Marek, N. and Evanoff, J. The Use of Ethanol Blended Diesel Fuel in Unmodified, Compression Ignition Engines: an Interim Case Study. The air and waste management association 94th annual conference and exhibition 2001, June 24-28, Orlando, FL, 2001.

[11] Cheenkachorn, K., Narasingha, M.H. and Pupakornnopparut, J. (2006). Biodiesel as an additive for diesohol, Asian Journal on Energy and Environment; vol. 70(01), pp. 267-276.

[12] Beer, T., Grant, T., Morgan, G., Lapszewicz, J., Anyon, P., Edwards, J., Nelson, P., Watson, H. and Williams, D. (2007). Final Report (EV45A/2/F3C) to the Australian Greenhouse Office on the stage 2 study of life- cycle emissions analysis of alternative fuels for heavy vehicles. แหล่งที่มา http://www.globalbioenergy.org/uploads/media/06_Australian_Greenhouse_Office_-_Comparison_of_Transport_Fuels.pdf

[13] Kwanchareon, P., Luengnaruemitchai, A. and Jai-In, S. Solubility of a Diesel-Biodiesel-Ethanol Blend, Its Fuel Properties, and Its Emission Characteristics from Diesel Engine. *Fuel*, 2007; 86: 1053-1061.

[14] Chotwichien, A., Luengnaruemitchai, A. and Jai-In, S. Utilization of Palm Oil Alkyl Esters as an Additive in Ethanol-Diesel and Butanol-Diesel Blends. *Fuel*, 2009; 88: 1618-1624.

[15] การศึกษาและทดสอบสัดส่วนการผสมน้ำมันดีโซฮอล์ที่เหมาะสม. สัมมนาสรุปผลการศึกษาโดยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, มิถุนายน 22, โรงแรมแมนดาริน จังหวัดกรุงเทพมหานคร, 2561.

[16] ศุภกิจ เอียดตรง. การผลิตส่วนผสมดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบหีบรวมด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิสแบบ ต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2559.

[17] ศุภกิจ เอียดตรง, สมเกียรติ ลักษณะกะชา, ศิวกร เพ็ชรรัตนมุณี, กิตตินันท์ มลิวรรณ และ ธีระยุทธ หลีวิจิตร. การศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตเชื้อเพลิงเหลว ดีเซล-ส่วนกลั่นกรดไขปาล์ม-เอทานอล. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30, กรกฎาคม 5-8, โรงแรม บีพี สมิหลา บีช โฮเต็ล แอนด์ รีสอร์ท จังหวัดสงขลา, 2559.

[18] ศุภกิจ เอียดตรง, ณิชกานต์ หมัดหมาน, เรวัต์ ทองขจร, กิตตนันท์ มลิวรรณ และ ธีระยุทธ หลีวิจิตร. การศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตเชื้อเพลิงเหลว ดีเซล-น้ำมันปาล์มดิบหีบรวมลดยางเหนียว/ส่วนกลั่นกรดไขปาล์ม-บิวทานอล. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30, กรกฎาคม 5-8, โรงแรม บีพี สมิหลา บีช โฮเต็ล แอนด์ รีสอร์ท จังหวัดสงขลา, 2559.

[19] Eiadtrong, S., Maliwan, K., Prateepchaikul, G., Kattiyawan, T., Thephsorn, P. and Leevijit, T. Preparation, Important Fuel Properties, and Comparative Use of Un-Preheated Palm Fatty Acid Distillate-Diesel Blends in a Single Cylinder Diesel Engine. *Renewable Energy*, 2019; 134: 1089-1098.

[20] Eiadtrong, S., Maliwan, K., Thepaya, T., Kattiyawan T., Prateepchaikul, G. and Leevijit, T. An Investigation to Utilize Ternary Diesel-Palm Fatty Acid Distillate-10 Wt.% N-Butanol Blends as Simply Novel Diesel Substitute. *Fuel*, 2021; 289: 119965.

[21] Eiadtrong, S., Leevijit, T., Srewaradachpisal, S., Maliwan, K., Theppaya, T. and Prateepchaikul, G. (2017). Phase behavior and important fuel properties of diesel-palm fatty acid distillate-anhydrous ethanol blends, paper presented in the 8th Thai Society of Mechanical Engineers, International Conference on Mechanical Engineering, Bangkok, Thailand.

[22] Eiadtrong, S., Maliwan1, K., Theppaya, T., Kattiyawan, T., Tepsorn, K., Piamcharoensuk, S. and Leevijit, T. Preliminary Utilizing the Blends of Diesel-PFAD-Anhydrous/Hydrous Alcohols in an Agricultural Diesel Engine, The 9th Thai Society of Mechanical Engineers, International Conference on Mechanical Engineering, December 11-14, Phuket, Thailand, 2018.

[23] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: http://www.eppo.go.th/index.php/th/petroleum/price/structure-oil-price?limitstart=0

[24] กรมการค้าภายใน กระทรวงพาณิชย์. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: https://agri.dit.go.th/index.php/department_doc/3/ปาล์มน้ำมัน/28

[25] บริษัท Hainan Zhongxin Chemical จำกัด. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: https://zxchem.lookchem.com/products/CasNo-27247-96-7-2-Ethylhexyl-nitrate-2254173.html

[26] Alptekin, E. Emission, Injection and Combustion Characteristics of Biodiesel and Oxygenated Fuel Blends in a Common Rail Diesel Engine. *Energy*, 2017; 119: 44-52.

[27] Atmanli, A. Comparative Analyses of Diesel–Waste Oil Biodiesel and Propanol, N-Butanol or 1-Pentanol Blends in a Diesel Engine. *Fuel*, 2016; 176: 209-215.

[28] Atmanlı, A., Ileri, E. and Yüksel, B. Experimental Investigation of Engine Performance and Exhaust Emissions of a Diesel Engine Fueled with Diesel– n- Butanol– Vegetable Oil Blends. *Energy Conversion and Management*, 2014; 81: 312-321.

[29] Chen, Z., Liu, J., Han, Z., Du, B., Liu, Y. and Lee, C. Study on Performance and Emissions of a Passenger-Car Diesel Engine Fueled with Butanol-Diesel Blends. *Energy*, 2013; 55: 638-646.

[30] Damodharan, D., Sathiyagnanam, A.P., Rana, D., Rajesh Kumar, B. and Saravanan, S. Extraction and Characterization of Waste Plastic Oil (WPO) with the Effect of N- Butanol Addition on the Performance and Emissions of a DI Diesel Engine Fueled with WPO/ Diesel Blends. *Energy Conversion and Management*, 2017; 131: 117-126.

[31] Huang, J., Wanga, Y., Li, S., Roskilly, A.P., Yu, H. and Li, H. Experimental Investigation on the Performance and Emissions of a Diesel Engine Fuelled with Ethanol–Diesel Blends. *Applied Thermal Engineering*, 2009; 29: 2484-2490.

[32] Ileri, E. Experimental Study of 2-Ethylhexyl Nitrate Effects on Engine Performance and Exhaust Emissions of a Diesel Engine Fueled with N-Butanol or 1-Pentanol Diesel– Sunflower Oil Blends. *Energy Conversion and Management*, 2016; 118: 320-330.

[33] Imdadu, H.K., Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Zulkifli, N.W.M., Alabdulkarem, A. and Rashed, M.M. Influences of Ignition Improver Additive on Ternary (Diesel-Biodiesel-Higher Alcohol) Blends Thermal Stability and Diesel Engine Performance. *Energy Conversion and Management*, 2016; 123: 252-264.

[34] Imtenan, S., Masjuki, H.H., Varman, M., Rizwanul Fattah, I.M., Sajjad, H. and Arbab, M.I. Effect of n-butanol and Diethyl Ether as Oxygenated Additives on Combustion– Emission- Performance Characteristics of a Multiple Cylinder Diesel Engine Fuelled with Diesel– Jatropha Biodiesel Blend. *Energy Conversion and Management*, 2015; 94: 84-94.

[35] Krishna, S.M., Salama, P.A., Tongroonb, M. and Chollacoopb, N. Performance and Emission Assessment of Optimally Blended Biodiesel- Diesel- Ethanol in Diesel Engine Generator. *Applied Thermal Engineering*, 2019; 155: 525-533.

[36] Lujaji, F., Kristof, L., Bereczky, A. and Mbarawa, M. Experimental Investigation of Fuel Properties, Engine Performance, Combustion and Emissions of Blends Containing Croton Oil, Butanol and Diesel on a CI Engine. *Fuel*, 2011; 90: 505–510.

[37] Prabakaran, B. and Udhoji, A. Experimental Investigation into Effects of Addition of Zinc Oxide on Performance, Combustion and Emission Characteristics of Diesel- Biodiesel- Ethanol Blends in CI Engine. *Alexandria Engineering Journal*, 2016; 55: 3355-3362.

[38] Qi, D.H., Yang, K., Zhang, D. and Chen, B. Combustion and Emission Characteristics of Diesel-Tung Oil-Ethanol Blended Fuels Used in a CRDI Diesel Engine with Different Injection Strategies. *Applied Thermal Engineering*, 2017; 111: 927-935.

[39] Sathiyamoorthi, R. and Sankaranarayanan, G. The Effects of Using Ethanol as Additive on the Combustion and Emissions of a Direct Injection Diesel Engine Fuelled with Neat Lemongrass Oil-Diesel Fuel Blend. *Renewable Energy*, 2017; 101: 747-756.

[40] Sharon, H., Jai Shiva Ram, P., Jenis Fernando, K., Murali, S. and Muthusamy, R. Fueling a Stationary Direct Injection Diesel Engine with Diesel-Used Palm Oil–Butanol Blends – An Experimental Study. *Energy Conversion and Management*, 2013; 73: 95-105.

[41] Ibrahim, A. Performance and Combustion Characteristics of a Diesel Engine Fueled by Butanol–Biodiesel–Diesel Blends. *Applied Thermal Engineering*, 2016; 103: 651-659.

[42] Krishna, S.M., Salama, P.A., Tongroonb, M. and Chollacoopb, N. Performance and Emission Assessment of Optimally Blended Biodiesel- Diesel- Ethanol in Diesel Engine Generator. *Applied Thermal Engineering*, 2019; 155: 525-533.

[43] Venu, H. and Madhavan, V. Influence of Diethyl Ether (DEE) Addition in Ethanol-Biodiesel-Diesel (EBD) and Methanol-Biodiesel-Diesel (MBD) Blends in a Diesel Engine. *Fuel*, 2017; 189: 377-390.

[44] Rakopoulos, D.C., Rakopoulos, C.D., Giakoumis, E.G., Papagiannakis R.G. and Kyritsis, D.C. 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*, 2014; 73: 354-366.

[45] Pushparaj, T. and Ramabalan, S. Green Fuel Design for Diesel Engine, Combustion, Performance and Emission Analysis. *Procedia Engineering*, 2013; 64: 701–709.