



สมรรถนะและการปล่อยสารมลพิษของเครื่องยนต์ดีเซลจากการใช้ดีเซลผสมกับปาล์ม เอทิลเอสเตอ์ เอทิลอะซิเตท และเอทานอล

Diesel-Engine Performance and Emission Using Diesel Mixed with Palm Ethyl Ester, Ethyl Acetate and Ethanol

เอกชัย สุธีรศักดิ์^{1*}, เจริญ ชินวานิชย์เจริญ² และสถาพร เชื้อเพ็ง³

Ekkachai Sutheerasak^{1*}, Charoen Chinwanitcharoen² and Sathaporn Chuepeng³

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

²ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

³ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

²Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

³Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University

Received : 1 July 2021

Revised : 18 August 2021

Accepted : 6 September 2021

บทคัดย่อ

การปล่อยออกไซด์ของไนโตรเจนและฝุ่นละอองขนาดเล็กจากเครื่องยนต์ดีเซลส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เชื้อเพลิงดีเซลผสมกับสารที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น แอลกอฮอล์ และเอสเตอ์ กำลังถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อลดการปล่อยสารมลพิษทั้งสอง งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษสมรรถนะและการปล่อยสารมลพิษต่างๆ ของเครื่องยนต์ดีเซลแบบฉีดตรง หนึ่งสูบ สี่จังหวะ ณ ความเร็วรอบ 3,000 rpm และเปลี่ยนแปลงภาระงาน โดยใช้ดีเซลผสมกับปาล์มเอทิลเอสเตอ์และเอทิลอะซิเตทร้อยละ 5 (PEE5Ea5) และเอทานอล ซึ่งเพิ่มถึงร้อยละ 20 โดยปริมาตร เมื่อเทียบกับดีเซล และดีเซลผสมกับปาล์มเอทิลเอสเตอ์ร้อยละ 5 (PEE5) ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ แสดงให้เห็นว่า การใช้ PEE5Ea5 และเอทานอลซึ่งเพิ่มถึงร้อยละ 20 นำไปสู่การลดลงอย่างต่อเนื่องของสมรรถนะของเครื่องยนต์ตามการเพิ่มเอทานอล อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ พบว่า การใช้ PEE5Ea5 ผสมกับเอทานอลร้อยละ 5 มีประสิทธิภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 1 เมื่อเทียบกับ PEE5 และใกล้เคียงกับดีเซล ขณะที่การเพิ่มขึ้นของความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรคไม่เกินร้อยละ 6 เมื่อเทียบกับดีเซล ณ กำลังงานเบรค 4 kW ยิ่งไปกว่านั้น การวัดสารพิษต่างๆ ของเครื่องยนต์ แสดงให้เห็นว่า การใช้ PEE5Ea5 ผสมกับเอทานอลสูงถึงร้อยละ 20 นำไปสู่การลดลงอย่างต่อเนื่องของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรกออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และฝุ่นละออง เนื่องจากการผสมเอทิลอะซิเตท และเอทานอล ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ และการลดลงของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจน ซึ่งนำไปสู่การลดลงของอุณหภูมิการเผาไหม้ แต่มีการเพิ่มขึ้นของไฮโดรคาร์บอนเมื่อเทียบกับดีเซล และ PEE5

คำสำคัญ : ดีเซล; ดีเซลผสมกับปาล์มเอทิลเอสเตอ์; เอทานอล; เอทิลอะซิเตท; สมรรถนะและสารพิษต่างๆ ของเครื่องยนต์



Abstract

Nitrogen oxide and particulate matter emissions from diesel engines affect to human health and environment. Diesel fuel mixed with oxygenated additives, such as alcohols and esters, are being continuously developed to reduce both emissions. This work is to study the performance and emissions of a direct-injection diesel engine, single-cylinder and four-stroke engine, at speed 3,000 rpm and different loads, as using diesel mixed with palm ethyl ester and ethyl acetate at 5% v (PEE5Ea5) and ethanol increased to 20% v compared with diesel and diesel blended to 5% palm ethyl ester (PEE5). Results of engine performance test indicate that the use of PEE5Ea5 and ethanol as added to 20% led to the continuous reduction of engine performance with increasing ethanol. However, this work found that the use of PEE5Ea5 mixed with 5% ethanol had brake thermal efficiency increased to 1% comparing with PEE5 and similar to diesel. The increase of brake specific fuel consumption was not more than 6% as compared with diesel at 4 kW brake power. Moreover, measuring engine pollutants show that the use of PEE5Ea5 blended to ethanol as added to 20% led to the continuous reduction of carbon dioxide, nitric oxide, carbon monoxide, and particulate matter, because the mixture of ethyl acetate and ethanol resulted in the complete combustion and the decrease of carbon to hydrogen ratio leading to the reduction of burning temperature but there was the addition of hydrocarbon as comparing with diesel and PEE5.

Keywords : diesel; diesel blended to palm ethyl ester; ethanol; ethyl acetate; engine performance and emissions

บทนำ

ปัจจุบัน การปล่อยฝุ่นละอองขนาดเล็กขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) ทำให้เกิดปัญหามลภาวะทางอากาศที่รุนแรงในประเทศไทย และนำไปสู่โรคภัยต่างๆ ได้แก่ โรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง โรคหลอดเลือดในสมอง โรคมะเร็งปอด อื่นๆ สำหรับแหล่งกำเนิดของ PM2.5 นั้น ส่วนหนึ่งมาจากการใช้เครื่องยนต์ดีเซล เพราะประหยัดเชื้อเพลิงและกำลังงานสูง จึงถูกใช้กับยานยนต์ จักรกล และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่างๆ แต่การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของเครื่องยนต์นี้ นำไปสู่การปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และควันดำจำนวนมาก ทำให้การปล่อย PM2.5 เพิ่มมากขึ้นและยากต่อการควบคุม ดังนั้น นักวิจัยภายในสถาบันต่างๆ กำลังปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ ของดีเซลโดยการผสมสารเพิ่มออกซิเจน (Oxygenated additives) โดยเฉพาะเอทานอล ซึ่งผลิตจากพืชต่างๆ ภายในประเทศ และมีองค์ประกอบของออกซิเจน นำไปสู่การเผาไหม้สมบูรณ์ และลดสารพิษเหล่านี้ (Sutheerasak, 2017) สำหรับการใช้อีเทนอล ผสมหรือร่วมกับดีเซลนั้น มี 3 วิธี ได้แก่ อิมัลชัน (Emulsification) ฟูมิเกชัน (Fumigation) และการดัดแปลงการฉีดเชื้อเพลิง ขณะที่อิมัลชันดีกว่าสองวิธีที่กล่าวมา เนื่องจากเชื้อเพลิงผสมเฟสเดียวกัน ต้นทุนต่ำ และไม่ดัดแปลงเครื่องยนต์ (Yahuza & Dandakouta, 2015) อย่างไรก็ตาม การผสมเฟสเดียวกันของดีเซลและเอทานอลขึ้นกับการเลือกใช้เอทานอล Kwanchareon *et al.*, (2007) เสนอว่าการผสมดีเซลกับเอทานอลนั้น ควรใช้อีเทนอลปราศจากน้ำ หรือเอทานอลซึ่งมีความบริสุทธิ์จากร้อยละ 99.0 ถึง 99.9 เพื่อความเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสมบูรณ์ Hassan *et al.*, (2012) และ Huang *et al.*, (2009) ตรวจสอบการผสมดีเซลกับเอทานอล (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.0-99.9) พบว่า การผสมเอทานอลปราศจากน้ำมากกว่าร้อยละ 10 นำไปสู่การแยกชั้นในระยะเวลา 3 วัน Shadidi *et al.*, (2014) และ Kumar *et al.*, (2013) ศึกษาสมรรถนะและการปล่อยสารมลพิษต่างๆ ของเครื่องยนต์โดยใช้ดีเซลผสมกับเอทานอล (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.0-99.9) สูงถึงร้อยละ 50 พบว่า ประสิทธิภาพทางความร้อนเบรค (BTH) ลดลง และความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรค (BSFC) เพิ่มขึ้น การปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เพิ่มขึ้น แต่ไฮโดรคาร์บอน (HC) ลดลงตามการเพิ่มเอทานอล

Santasnachok *et al.*, (2021), Sutheerasak & Chinwanitcharoen, (2016), Yahuza & Dandakouta, (2015) และ Kumar *et al.*, (2013) เสนอการผสมดีเซลกับเอทานอล (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 95.0-99.9) โดยเพิ่มสารเติมแต่งต่างๆ ได้แก่ แอลกอฮอล์ และเอสเตอร์ (เอสเตอร์สังเคราะห์จากทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) ซึ่งทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันพืช แอลกอฮอล์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อผลิตเอทิลและเมทิลเอสเตอร์) เนื่องจากดีเซลและเอทานอล มีความเป็นขั้วต่างกัน ดังนั้น การเพิ่มสารเติมแต่งเหล่านี้ สามารถยืดระยะเวลาในการผสมของดีเซลและเอทานอลที่กำลังเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ สารเติมแต่งเหล่านี้ มีองค์ประกอบของออกซิเจน ซึ่งนำไปสู่การเผาไหม้สมบูรณ์ และปรับปรุงสมรรถนะและลดสารพิษต่างๆ ของเครื่องยนต์ สำหรับการเพิ่มสารเติมแต่งต่างๆ และการศึกษาการทำงานของเครื่องยนต์นั้น Santasnachok *et al.*, (2021) และ Sutheerasak, (2017) ตรวจสอบสมรรถนะและการปล่อยสารมลพิษต่างๆ ของเครื่องยนต์ดีเซลกำเนิดไฟฟ้า หนึ่งสูบสี่จังหวะ และ Sutheerasak & Chinwanitcharoen, (2016) วิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลแบบฉีดตรง สี่สูบสี่จังหวะ ซึ่งติดตั้งในรถยนต์กระบะ โดยผสมดีเซลกับเอทานอล (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9) สูงถึงร้อยละ 20 และเพิ่มเอทิลอะซิเตทสูงถึงร้อยละ 11 เนื่องจากเอทานอลและเอทิลอะซิเตทเป็นเอทิลแอลกอฮอล์ มีความเป็นขั้วและจุดเดือดใกล้เคียงกัน ทำให้ผสมเป็น



เฟสเดียวกัน ผลลัพธ์ที่ได้พบว่า ดีเซลผสมเอทานอลไม่เกินร้อยละ 10 ขณะเติมเอทิลอะซิเตทร้อยละ 5 มีระยะเวลาการผสมกันมากกว่า 5 วัน แต่คุณสมบัติของเชื้อเพลิงลดลงเล็กน้อย ทำให้ *BTH* ลดลง และ *BSFC* เพิ่มขึ้น การปล่อยออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) และควันดำลดลงร้อยละ 21 และ 14 เมื่อเทียบกับดีเซล ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม การใช้ดีเซลผสมเอทานอลร้อยละ 20 ร่วมกับเอทิลอะซิเตทร้อยละ 5 มีระยะเวลาการผสมกันของเชื้อเพลิงผสมเพียง 7 ชั่วโมง และค่าความหนืดและความหนาแน่นของเชื้อเพลิงต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของดีเซล นอกจากนี้ *BTH* ลดลงร้อยละ 3 *BSFC* เพิ่มขึ้นร้อยละ 22 และการปล่อย CO_2 เพิ่มขึ้น 2%vol เมื่อเทียบกับดีเซล Gnanamoorthi & Devaradjane, (2013) และ Gomasta & Mahla, (2012) ผสมดีเซลกับเอทานอล (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5-99.9) สูงถึงร้อยละ 50 และใช้ร่วมกับเอทิลอะซิเตทไม่เกินร้อยละ 7 โดยทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กและขนาดใหญ่แบบสี่จังหวะ พบว่า *BTH* ลดลง และ *BSFC* เพิ่มขึ้น การปล่อย NO_x และควันดำลดลง แต่ปริมาณของ CO_2 และ HC เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มเอทานอลและเอทิลอะซิเตท นอกจากนี้ การใช้ดีเซลผสมกับเอทานอลโดยเพิ่มเอทิลอะซิเตทมากกว่าร้อยละ 5 ทำให้สมรรถนะของเครื่องยนต์ลดลง และการปล่อย HC เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มเอทิลอะซิเตทเพราะการระเหยกลายเป็นไอเร็วกว่าเอทานอลและสะสมบริเวณซอกต่างๆ ของห้องเผาไหม้ (Santasnachok *et al.*, 2021; Sutheerasak & Chinwanitcharoen, 2016; Kumar *et al.*, 2013; Gomasta & Mahla, 2012) Sutheerasak *et al.*, (2020) ตรวจสอบดีเซลผสมกับเมทิลเอสเทอร์ร้อยละ 5 ซึ่งถูกใช้ร่วมกับบิวทานอลร้อยละ 5 และเอทานอลปราศจากน้ำสูงถึงร้อยละ 20 ขณะที่ Huang *et al.*, (2009) เติมนิวทานอลร้อยละ 5 ผสมกับดีเซลและเอทานอลปราศจากน้ำสูงถึงร้อยละ 30 โดยทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลแบบฉีดตรง หนึ่งสูบสี่จังหวะ พบว่า *BTH* และ *BSFC* เพิ่มขึ้น การปล่อย CO และควันดำลดลง NO_x ถูกเปลี่ยนแปลงไป แต่ HC เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มเอทานอล ขณะที่การผสมเอทานอลมากกว่าร้อยละ 20 ทำให้เกิดการแยกชั้นของเชื้อเพลิงผสมภายใน 11 ถึง 14 วัน นอกจากนี้ มีการเติมแอลกอฮอล์ต่างๆ เช่น เฮกซานอล เมทานอล โพรพานอล และอื่นๆ ร้อยละ 3 ถึง 10 โดยใช้ร่วมกับดีเซลผสมเอทานอลสูงถึงร้อยละ 50 และทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ พบว่า *BTH* ถูกเปลี่ยนแปลงไป แต่ *BSFC* เพิ่มขึ้น การปล่อย CO_2 และ NO_x เปลี่ยนแปลงตามสัดส่วนของเอทานอลและแอลกอฮอล์ต่างๆ (Yahuza & Dandakouta, 2015; Kumar *et al.*, 2013; Sathiyagnanam *et al.*, 2010)

Sutheerasak & Chinwanitcharoen, (2018), Gorey *et al.*, (2017), Srinidhi *et al.*, (2016) และ Dharma *et al.*, (2016) ศึกษาสมรรถนะและการปล่อยสารมลพิษต่างๆ ของเครื่องยนต์ดีเซลสี่จังหวะ ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ ณ ความเร็วรอบและภาระงานต่างๆ เมื่อใช้ดีเซลผสมกับเอสเทอร์ที่ผลิตจากน้ำมันทางเลือกต่างๆ ได้แก่ น้ำมันพืช น้ำมันไขมันสัตว์ และน้ำมันพืชใช้แล้วเทียบกับดีเซล พบว่า การเพิ่มปริมาณของเอสเทอร์ต่างๆ ในการผสมกับดีเซล ทำให้ค่าความหนาแน่นและความหนืดเพิ่มขึ้น และค่าความร้อนของเชื้อเพลิงลดลง ซึ่งนำไปสู่การลดลงของ *BTH* และการเพิ่มขึ้นของ *BSFC* ตามการเพิ่มเอสเทอร์ต่างๆ อย่างไรก็ตาม การใช้ดีเซลผสมกับเอสเทอร์ต่างๆ ร้อยละ 10 มีสมรรถนะของเครื่องยนต์ลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับดีเซล แต่การปล่อย HC, CO และควันดำลดลง ขณะที่ปริมาณของ CO_2 และ NO_x เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มเอสเทอร์ต่างๆ สำหรับการเปรียบเทียบเอทิลเอสเทอร์และเมทิลเอสเทอร์จากสารตั้งต้นชนิดเดียวกันนั้น Sutheerasak & Chinwanitcharoen, (2018) ตรวจสอบการใช้ดีเซลผสมพาล์มเอทิลเอสเทอร์ (PEE) และ Gorey *et al.*, (2017) และ Srinidhi



et al., (2016) ทดสอบการใช้ดีเซลผสมพลาสม์เมทิลเอสเทอร์ (PME) กับเครื่องยนต์ดีเซลแบบฉีดตรง หนึ่งสูบสี่จังหวะ พบว่าดีเซลผสม PEE มีสมรรถนะของเครื่องยนต์ต่ำกว่า แต่การปล่อย CO_2 และ NO_x ต่ำกว่า ขณะที่การปล่อย CO สูงกว่าดีเซลผสม PME เนื่องจากค่าความร้อนของ PEE ต่ำกว่า PME นอกจากนี้ มีการศึกษาการลดค่าความหนาแน่นและความหนืดของดีเซลผสมเอสเทอร์ต่างๆ โดยการเติมเอทานอล Sutheerasak & Chinwanitcharoen, (2019) ผสมเอทิลเอสเทอร์ร้อยละ 10 ขณะที่ Sutheerasak *et al.*, (2020), Krishna *et al.*, (2019), Emiroğlu & Şen, (2018), Srinidhi *et al.*, (2016) และ Kwanchareon *et al.*, (2007) ผสมเมทิลเอสเทอร์ไม่เกินร้อยละ 20 กับดีเซล และใช้ร่วมกับเอทานอลปราศจากน้ำสูงถึงร้อยละ 20 โดยทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดต่างๆ พบว่า การปล่อย CO และควันดำลดลง แต่ CO_2 และ NO_x เพิ่มขึ้น และสมรรถนะของเครื่องยนต์ลดลงตามการเพิ่มปริมาณเอสเทอร์และเอทานอล อย่างไรก็ตาม ดีเซลสามารถผสมกับเอสเทอร์ต่างๆ สูงถึงร้อยละ 20 ขณะเติมเอทานอลไม่เกินร้อยละ 10 เพราะมีความเป็นเนื้อเดียวกันของเชื้อเพลิงผสมนานถึง 1 เดือน สำหรับการเปรียบเทียบสารตั้งต้นชนิดเดียวกันในการผลิตเอสเทอร์ซึ่งถูกใช้ร่วมกับเอทานอลนั้น Sutheerasak & Chinwanitcharoen, (2019) ใช้ดีเซลผสม PEE ร้อยละ 10 และเอทานอลร้อยละ 5 ทำให้การปล่อย CO_2 และ NO_x ต่ำกว่า แต่ **BSFC** มากกว่าการใช้ดีเซลผสม PME ร้อยละ 10 และเอทานอลร้อยละ 5 (Srinidhi *et al.*, 2016) สุดท้าย การเพิ่มเอสเทอร์ต่างๆ มากกว่าร้อยละ 10 ผสมกับเอทานอลมากกว่าร้อยละ 20 เมื่อเทียบกับดีเซลพื้นฐาน พบว่า **BTH** ลดลงและ **BSFC** เพิ่มขึ้น และการปล่อย CO_2 , NO_x และ HC เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มเอทานอลและเอสเทอร์ (Ağbulut *et al.*, 2019; Ghanim *et al.*, 2018; Prbakaran *et al.*, 2018; Dharma *et al.*, 2016; Gnanamoorthi & Devaradjane, 2013)

จากการศึกษางานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมา พบว่า การใช้ดีเซลร่วมกับการเพิ่มเอทานอลมากกว่าร้อยละ 20 นำไปสู่การแยกชั้นของเชื้อเพลิงผสมอย่างรวดเร็ว ค่าความหนืดและความหนาแน่นของเชื้อเพลิงต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของดีเซล สมรรถนะของเครื่องยนต์ลดลง และมีการปล่อย CO_2 เพิ่มมากขึ้น ขณะที่การผสมดีเซลกับเอทานอลโดยการเติมเอทิลอะซิเตท นั้น ลดการปล่อยสารพิษต่างๆ ยกเว้น CO_2 และ HC เนื่องจากโมเลกุลของคาร์บอนถูกทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับออกซิเจนมากขึ้น ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของ CO_2 ยิ่งไปกว่านั้น เอทิลอะซิเตท มีความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอสูง ส่งผลให้มีการเพิ่มความหนาแน่นของปริมาณสารระเหยภายในไอระเหยของเชื้อเพลิงผสม และถูกสะสมไว้บริเวณชอกต่างๆ ของห้องเผาไหม้ ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของ HC แต่การปล่อย NO_x ลดลงเพราะอุณหภูมิการเผาไหม้ลดลงในช่วง Diffusion combustion นอกจากนี้ เอทิลอะซิเตทเป็นเอสเทอร์ของเอทานอล มีความเป็นขั้วและจุดเดือดใกล้เคียงกับเอทานอล ทำให้ยี่ดเวลาในการผสมของดีเซลและเอทานอลที่กำลังเพิ่มขึ้น และเอทิลอะซิเตท มีราคาประหยัดกว่าและหาได้ง่ายกว่าแอลกอฮอล์ต่างๆ สำหรับการเติมเอทิลอะซิเตทนั้น การผสมเอทิลอะซิเตทมากกว่าร้อยละ 5 ขณะที่ใช้ร่วมกับดีเซลและการเพิ่มเอทานอล นำไปสู่การเพิ่มความหนาแน่นของปริมาณสารระเหยภายในไอระเหยของเชื้อเพลิงผสม ทำให้มีการปล่อย HC เพิ่มขึ้น และการผสมเอทิลอะซิเตทต่ำกว่าร้อยละ 5 นำไปสู่การแยกชั้นของเชื้อเพลิงผสมรวดเร็วกว่า (Santasnachok *et al.*, 2021; Sutheerasak, 2017; Sutheerasak & Chinwanitcharoen, 2016) ขณะที่ดีเซลหมุนเร็วประเภทธรรมดาในปัจจุบัน เป็นน้ำมันดีเซลผสมกับเมทิลเอสเทอร์ไม่เกินร้อยละ 7 ตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน พ.ศ. 2562 และสารตั้งต้นของการผลิตเมทิลเอสเทอร์ส่วนใหญ่ เป็นน้ำมันพลาสม์ เนื่องจากพลาสม์มีการเพาะปลูกในหลายภูมิภาคของประเทศไทย นอกจากนี้ การเปรียบเทียบการใช้



PEE กับ PME แสดงให้เห็นว่า PEE มีการปล่อย CO_2 และ NO_x ต่ำกว่า แต่ CO สูงกว่า PME และการใช้ดีเซลผสม PEE ร้อยละ 10 มีสมรรถนะของเครื่องยนต์ต่ำกว่าดีเซลผสม PME ร้อยละ 10 (Sutheerasak & Chinwanitcharoen, 2018; Gorey *et al.*, 2017) ดังนั้น วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาสมรรถนะและการปล่อยสารพิษต่างๆ ของเครื่องยนต์ดีเซล โดยทดสอบ ณ ความเร็วรอบคงที่ และเปลี่ยนแปลงภาระงาน เมื่อใช้ดีเซลหมุนเร็วประเภทธรรมดาผสมปาล์มเอทิลเอสเตอร์ และเอทิลอะซิเตทคงที่ร้อยละ 5 และใช้ร่วมกับการเพิ่มเอทานอลถึงร้อยละ 20 เมื่อเทียบกับดีเซล และดีเซลผสมปาล์มเอทิลเอสเตอร์ร้อยละ 5 นอกจากนี้ มีการตรวจสอบการปล่อยสารมลพิษต่างๆ จากการใช้เชื้อเพลิงเหล่านี้กับค่ามาตรฐานไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการศึกษาคู่มือเครื่องยนต์ดีเซลขนาดใหญ่ต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการเตรียมเชื้อเพลิงต่างๆ

การผสมดีเซลกับปาล์มเอทิลเอสเตอร์, เอทิลอะซิเตท และเอทานอล (PEE:Ea:E) ในส่วนผสมต่างๆ โดยใช้วิธีอิมัลชันพีเคชันนั้น เริ่มต้นจากการผสมดีเซลกับปาล์มเอทิลเอสเตอร์ร้อยละ 5 (PEE5) โดยใช้ดีเซลหมุนเร็วประเภทธรรมดา (D) ซึ่งเป็นน้ำมันดีเซลผสมกับเมทิลเอสเตอร์ไม่เกินร้อยละ 7 ตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน พ.ศ. 2562 และนำมาจากสถานีจ่ายเชื้อเพลิงในท้องถิ่น โดยการผสมกับปาล์มเอทิลเอสเตอร์ (PEE) ร้อยละ 5 เพื่อปรับปรุงการปล่อยสารมลพิษต่างๆ ของเครื่องยนต์ และสมรรถนะของเครื่องยนต์ถูกเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการเพิ่ม PEE มากกว่าร้อยละ 5 นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของ *BSFC* และ CO (Sutheerasak & Chinwanitcharoen, 2019; Srinidhi *et al.*, 2016) ขณะที่ PEE ถูกผลิตจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ในท้องตลาดทั่วไป และเอทานอลปราศจากน้ำ (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9) และโพแทสเซียมเอทอกไซด์ (KOCH_2CH_3) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสารทั้งสองนี้ จัดหาจากบริษัทเคมีภัณฑ์ในประเทศไทย กำหนดสัดส่วนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา KOCH_2CH_3 ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มละลายในเอทานอลปริมาณ 7 mmol ผสมเข้ากันในเวลาประมาณ 30 min อัตราส่วนโมลของเอทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 และทำการกวนเพื่อเกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 60 min ณ อัตราการกวนคงที่ 800 rpm ภายในขวดก้นกลมซึ่งติดตั้งกับเครื่องกวนสารแบบใบกวน (Mechanical stirrer) หลังจากนั้น นำใส่กรวยแยกเพื่อแยกระหว่าง PEE และกลีเซอรอล และทำการตรวจสอบความบริสุทธิ์ของ PEE ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas chromatography) อ้างอิงตามมาตรฐาน EN14103 พบว่า ความบริสุทธิ์ของ PEE เฉลี่ยร้อยละ 98.96 และทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของ PEE ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่า ปริมาณของ PEE, ค่าความหนืด และค่าความหนาแน่นอยู่ในข้อกำหนดมาตรฐานเมทิลเอสเตอร์ของกรมธุรกิจพลังงานในประเทศไทย (Sutheerasak & Chinwanitcharoen, 2018) ยกเว้น อุณหภูมิจุดวาบไฟสูงกว่ามาตรฐานดังกล่าว ต่อมา ทำการผสม D ร้อยละ 95 กับ PEE ร้อยละ 5 โดยปริมาตร เพื่อผลิต PEE5 โดยใช้เครื่องกวนสารแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Magnetic stirrer) ณ ความเร็วรอบการผสมคงที่ 800 rpm อุณหภูมิคงที่ 40°C และระยะเวลาการผสม 30 min โดยอ้างอิงจาก Sutheerasak & Chinwanitcharoen, (2018)

ในเวลาเดียวกัน นำเอทิลอะซิเตท (Ea) ร้อยละ 5 ผสมกับเอทานอลปราศจากน้ำ (E) ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยปริมาตร โดยใช้เครื่องกวนสารแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Magnetic stirrer) ปรับความเร็วรอบการผสมคงที่ 800 rpm อุณหภูมิคงที่ 25°C และ



ระยะเวลาการผสม 15 min โดยอ้างอิงจาก Sutheerasak & Chinwanitcharoen, (2016) เพื่อผลิต Ea5E5, Ea5E10, Ea5E15 และ Ea5E20 ตามลำดับ หลังจากนั้น นำสารต่างๆ เหล่านี้ผสมกับ PEE5 ในปริมาณร้อยละ 90, 85, 80 และ 75 โดยปริมาตร ภายในขวดก้นกลมซึ่งติดตั้งกับเครื่องกวนสารแบบใบกวน โดยใช้ความเร็วรอบการผสมคงที่ 1,000 rpm อุณหภูมิคงที่ 30 °C และระยะเวลาการผสม 30 min โดยอ้างอิงจาก Sutheerasak, (2017) และ Yahuza & Dandakouta, (2015) เพื่อผลิต PEE5Ea5E5, PEE5Ea5E10, PEE5Ea5E15 และ PEE5Ea5E20 ตามลำดับ สุดท้าย มีการตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆ ของเชื้อเพลิง ได้แก่ ค่าความหนาแน่น (Density) ที่ 15 °C, ค่าความหนืดทางจลศาสตร์ (Kinematic viscosity) ที่ 40 °C, อุณหภูมิจุดวาบไฟ (Flash point) และค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (Low heating value, LHV) ตามมาตรฐาน ASTM D1298, ASTM D445, ASTM D93 และ ASTM D240 ตามลำดับ นอกจากนี้ มีการตรวจสอบการผสมเฟสเดียวกันจากระยะเวลาการแยกชั้น (Stratification time, ST) ของเชื้อเพลิงผสม โดยอ้างอิงจาก Hassan *et al.*, (2012) และ Huang *et al.*, (2009) ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในตารางที่ 1 พบว่า D มีคุณสมบัติทางกายภาพต่างๆ ตามข้อกำหนดมาตรฐานดีเซล (Diesel standard specifications, DSS) ของกรมธุรกิจพลังงานในประเทศไทย (Krishna *et al.*, 2019) ขณะที่ PEE5 มีค่าความหนาแน่น และความหนืดเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.64 และ 3.32 แต่ค่า LHV ลดลงร้อยละ 1.51 เมื่อเทียบกับ D

ตารางที่ 1 การตรวจสอบคุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิง

รายละเอียด	Density (kg/m ³)	Viscosity (mm ² /s)	Flash point (°C)	LHV (MJ/kg)	ST
DSS	810-870	1.80-4.10	52min	-	-
D	826	3.09	47	44.76	-
E	792	1.37	14	26.32	-
Ea	896	0.42	-5	22.79	-
PEE	871	4.72	173	39.90	-
PEE5	831	3.19	73	44.09	N/A
PEE5E5	828	3.13	71	43.38	N/A
PEE5Ea5E5	832	3.05	14	42.55	N/A
PEE5Ea5E10	826	2.98	13	41.73	20 (days)
PEE5Ea5E15	816	2.90	11	40.75	11 (days)
PEE5Ea5E20	808	2.82	9	39.88	5 (days)

นอกจากนี้ มีการผสม PEE5 กับ E ร้อยละ 5 (PEE5E5) โดยใช้วิธีอิมัลชันเพื่อเปรียบเทียบกับ PEE5 และ PEE:Ea:E ในส่วนผสมต่างๆ ผลลัพธ์ที่ได้ พบว่า PEE5E5 มีค่าความหนาแน่น, ความหนืด, จุดวาบไฟ และ LHV ต่ำกว่า PEE5 แต่คุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้สูงกว่า D ยกเว้นค่า LHV เนื่องจาก PEE และ E มีค่า LHV ต่ำกว่า D ดังนั้น การผสมเชื้อเพลิงเหล่านี้

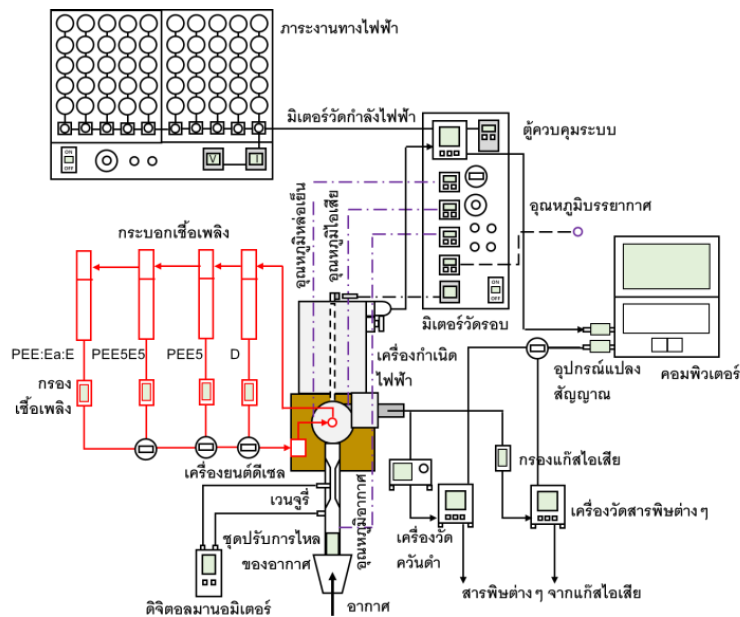


กับ D ทำให้ค่า LHV ลดลง (Yahuza & Dandakouta, 2015) การเปรียบเทียบระหว่าง PEE: Ea: E ในส่วนผสมต่างๆ กับ D, PEE5 และ PEE5E5 พบว่า ดีเซลผสมเอทิลเอสเทอร์และเอทิลอะซิเตทคงที่ร้อยละ 5 (PEE5Ea5) และ E ซึ่งเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 20 นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชื้อเพลิงดังนี้ (1) PEE5Ea5 และ E ร้อยละ 5 (PEE5Ea5E5) มีค่าความหนาแน่นสูงกว่า D, PEE5 และ PEE5E5 ซึ่งถูกเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.70, 0.09 และ 0.45 ตามลำดับ เนื่องจากค่าความหนาแน่นของ PEE5 และ Ea สูงกว่า E นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นของ PEE5Ea5E5 (Yahuza & Dandakouta, 2015) อย่างไรก็ตาม PEE5Ea5 และ E ซึ่งเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 10 ถึง 20 ทำให้ค่าความหนาแน่นลดลงจากร้อยละ 0.06 ถึง 2.15, 0.66 ถึง 2.74 และ 0.30 ถึง 2.39 เมื่อเทียบกับ D, PEE5 และ PEE5E5 ตามลำดับ สำหรับผลการตรวจสอบค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงผสมต่างๆ เทียบกับค่ามาตรฐานของ DSS พบว่า PEE5Ea5 และ E ร้อยละ 20 (PEE5Ea5E20) มีค่าความหนาแน่นต่ำกว่ามาตรฐานดังกล่าว (2) ค่าความหนืดของเชื้อเพลิงผสมต่างๆ ลดลงตามการเพิ่ม E โดย PEE5Ea5 และ E ที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 ถึง 20 ทำให้ค่าความหนืดลดลง 1.45 ถึง 8.82, 4.55 ถึง 11.68 และ 2.72 ถึง 9.98 เมื่อเทียบกับ D, PEE5 และ PEE5E5 ตามลำดับ สำหรับผลการตรวจสอบค่าความหนืดของเชื้อเพลิงผสมต่างๆ เทียบกับค่ามาตรฐานของ DSS พบว่า PEE5Ea5 และ E ซึ่งถูกเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 20 อยู่ในข้อกำหนดมาตรฐานของ DSS (3) อุณหภูมิจุดวาบไฟของเชื้อเพลิงผสมต่างๆ ลดลงตามการเพิ่ม E โดย PEE5Ea5 และ E ซึ่งเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 ถึง 20 ทำให้อุณหภูมิจุดวาบไฟลดลงจาก 33 ถึง 38 °C, 59 ถึง 64 °C และ 57 ถึง 62 °C เมื่อเทียบกับ D, PEE5 และ PEE5E5 ตามลำดับ ที่สำคัญ PEE5Ea5 และ E ซึ่งถูกเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 20 ทำให้อุณหภูมิจุดวาบไฟอยู่ในข้อกำหนดมาตรฐานของ DSS เมื่อเทียบกับ PEE5 และ PEE5E5 โดยทั้งสองมีอุณหภูมิจุดวาบไฟสูงกว่ามาตรฐานดังกล่าว (4) ค่า LHV ลดลงตามการเพิ่ม E โดย PEE5Ea5 และ E ซึ่งเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 ถึง 20 ทำให้ค่า LHV ลดลงจากร้อยละ 4.95 ถึง 10.91, 3.50 ถึง 9.55 และ 1.92 ถึง 8.07 เมื่อเทียบกับ D, PEE5 และ PEE5E5 ตามลำดับ และ (5) การตรวจสอบการผสมเฟสเดียวกันจากการแยกชั้นของเชื้อเพลิงผสม พบว่า PEE5Ea5E5, PEE5E5 และ PEE5 ไม่เกิดการแยกชั้นในระยะเวลา 2 เดือน แต่ PEE5Ea5 และ E ซึ่งถูกเพิ่มขึ้นที่ร้อยละ 10, 15 และ 20 เกิดการแยกชั้นของเชื้อเพลิงผสมในระยะเวลา 20, 11 และ 5 วัน ตามลำดับ

ชุดทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์

การจัดทำชุดทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ในงานวิจัยนี้ ใช้เครื่องยนต์ดีเซลบริษัทมิสซูชิ รุ่น MIT-186FG ซึ่งเป็นเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก หนึ่งสูบ สี่จังหวะ ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง ระบายความร้อนด้วยอากาศ ขนาด 8.5 kW ที่ความเร็วรอบ 3,000 rpm ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ Brushless Self-excited 2-pole และ 1 เฟส ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด 5 kW ที่ความเร็วรอบ 3,000 rpm โดยติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 1 สำหรับการเพิ่มภาระงาน งานวิจัยนี้ ใช้ชุดหลอดไฟต่อกับตัวต้านทานแบบปรับค่า เพื่อปรับกำลังไฟฟ้าตามการเพิ่มภาระงาน นอกจากนี้ มีการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ได้แก่ อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศโดยใช้ชุดปรับการไหลของอากาศ และท่อเวนทูรี ต่อกับดิจิตอลมานอมิเตอร์ อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของเชื้อเพลิงต่างๆ ใช้กระบอกเชื้อเพลิงขนาด 1,000 ml จำนวน 4 กระบอก ต่อกับกรองเชื้อเพลิง เครื่องบันทึกอุณหภูมิต่างๆ ต่อกับเทอร์โมคัปเปิล (ชนิดของไส้แบบ K ขนาดของไส้ 0.65 mm และอุณหภูมิใช้งานสูงสุด 1,300 °C) เพื่อตรวจสอบอุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิบรรยากาศ, อุณหภูมิอากาศเข้าท่อไอดี, อุณหภูมิแก๊สไอเสีย และอุณหภูมิล้อเย็น

การตรวจสอบความเร็วรอบของเครื่องยนต์ใช้เครื่องแสดงผลแบบดิจิตอล รุ่น PM digital indicator RPM meter ที่มีความเที่ยงตรงในการวัดร้อยละ ± 0.05 โดยต่อกับ Proximity switch รุ่น SC40P-AE-35 NC ของบริษัท AECO ที่มีระยะตรวจจับ 0-35 mm ความไวในการทำงาน 10 Hz และ ระยะทำซ้ำ <math>< 10\%SN</math> ขณะที่การวัดกำลังไฟฟ้า ใช้มิเตอร์วัดกำลังไฟฟ้าของบริษัท RICHTMASS รุ่น RP-963 ต่อกับอุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้า RICHTMASS RMBO โดยประมวลผลผ่านอุปกรณ์แปลงสัญญาณแบบ Hardlock ซึ่งต่อกับ RS48S แบบ USB data convertor RP-series และต่อเข้าคอมพิวเตอร์ สุดท้าย ติดตั้งเครื่องวัดสารพิษต่างๆ จากแก๊สไอเสียของบริษัท Cosber รุ่น KWQ-5 Automotive emission analyzes ซึ่งทำการวิเคราะห์ปริมาณของ CO₂, CO และ HC โดยใช้วิธี Non-disperse infrared (NDIR) และตรวจสอบปริมาณของไนตริกออกไซด์ (NO) โดยใช้วิธี Electrochemical cell ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งแสดงรูปแบบการวัดและความละเอียดของเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สไอเสีย ขณะที่เครื่องวิเคราะห์ดังกล่าวถูกใช้ร่วมกับเครื่องวัดควันดำของบริษัท Cosber รุ่น KYD-6 Opacimeter ซึ่งใช้วิธีการวัดแบบ Opacity เพื่อตรวจสอบการปล่อยควันดำ (Black smoke)



ภาพที่ 1 ชุดทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซล



ตารางที่ 2 วิธีการวัดและช่วงของการวัดการปล่อยสารพิษต่างๆ

สารพิษ	รูปแบบการวัด	ช่วงของการวัด	ความละเอียด
CO ₂ (%vol)	NDIR method	0 - 18	±0.02
CO (%vol)	NDIR method	0 - 15	±0.002
HC (ppm)	NDIR method	0 - 10,000	±1
NO (ppm)	Electrochemical cell	0 - 5,000	±1
Black smoke (%)	Opacity	0 - 100	±0.2

ภายหลังการวัดสารมลพิษต่างๆ ได้แก่ CO₂, CO, HC และ NO จากการใช้เครื่องวิเคราะห์ดังกล่าว มีการเปลี่ยนหน่วยของการวัดสารมลพิษต่างๆ ในรูปแบบ %vol และ ppm เพื่อแสดงผลในรูปแบบของ g/kWh โดยอ้างอิงจาก Agbulut *et al.*, (2019) และ Pilusa *et al.*, (2012) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{CO}_2 \text{ (g/kWh)} = 63.47 \times \text{CO}_2 \text{ (%vol)} \quad (1)$$

$$\text{CO (g/kWh)} = 35.91 \times \text{CO (%vol)} \quad (2)$$

$$\text{HC (g/kWh)} = 2.002 \times 10^{-3} \times \text{HC (ppm)} \quad (3)$$

$$\text{NO (g/kWh)} = 6.636 \times 10^{-3} \times \text{NO (ppm)} \quad (4)$$

สำหรับปริมาณควันดำซึ่งตรวจสอบจากเครื่องวัดควันดำ โดยแสดงผลในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์ (%) ถูกเปลี่ยนเป็นการรายงานผลในรูปแบบของฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM) และแสดงผลในรูปแบบของ g/kWh โดยอ้างอิงจากคู่มือของ AVL, (2005) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{PM (g/kWh)} = \frac{C \text{ (mg/m}^3\text{)} \times 3.6 \times \text{VFR}}{P_b} \quad (5)$$

$$C \text{ (mg/m}^3\text{)} = 12.22 \times \text{FSN} \exp (0.38 \times \text{FSN}) \quad (6)$$

โดยที่ *PM* คือ ฝุ่นละอองขนาดเล็ก (g/kWh)

C คือ ค่า Correlation (mg/m³)

VFR คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของแก๊สไอเสีย (m³/s)

P_b คือ กำลังงานเบรค (kW)

FSN คือ Filter smoke number ซึ่งขึ้นกับค่า Black smoke (%)



การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ในงานวิจัยนี้ เริ่มต้นจากการอุ่นเครื่องยนต์เป็นเวลา 15 นาที ณ ความเร็วรอบ 3,000±50 rpm เมื่อเครื่องยนต์เข้าสู่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิหล่อเย็นคงที่ ทำการทดสอบตามเงื่อนไขต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยเริ่มต้นจากการใช้ D และปรับภาระงานทางไฟฟ้าเริ่มต้น ณ ร้อยละ 20 หลังจากนั้น บันทึกข้อมูลต่างๆ ได้แก่ ความเร็วรอบ, กำลังไฟฟ้าที่ให้ออกมา, เวลาของการใช้เชื้อเพลิงที่ 20 ml, อัตราการไหลของอากาศ, อุณหภูมิต่างๆ และปริมาณสารพิษต่างๆ จากแก๊สไอเสีย ได้แก่ ปริมาณของ CO₂, CO, HC, NO และความชื้นของควันดำ ต่อมา เพิ่มภาระงานทางไฟฟ้าร้อยละ 40, 60, 80 และ 100 และบันทึกข้อมูลต่างๆ ตามลำดับ หลังจากนั้น เปลี่ยนเชื้อเพลิง โดยทำการทดสอบการใช้ PEE5, PEE5E5 และ PEE5Ea5 และ E ที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 ถึง 20 ตามลำดับ โดยใช้เงื่อนไขการทดสอบเดียวกับการใช้ D และบันทึกข้อมูลต่างๆ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะและการปล่อยสารพิษต่างๆ ของเครื่องยนต์ที่เสดต่อไป

ตารางที่ 3 สภาวะการทดสอบสมรรถนะและการปล่อยสารพิษต่างๆ ของเครื่องยนต์

รายการ	สภาวะที่กำหนด
ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (rpm)	3,000±50
เชื้อเพลิงต่างๆ ที่ทดสอบ	D/ PEE5/ PEE5E5/ PEE5Ea5E5/ PEE5Ea5E10/ PEE5Ea5E15/ PEE5Ea5E20
ภาระงานทางไฟฟ้า (%)	20/ 40/ 60/ 80/ 100
ปริมาณเชื้อเพลิง (ml)	20
อุณหภูมิหล่อเย็น (°C)	85±5

การวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องยนต์

การวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องยนต์ ถูกพิจารณาจากประสิทธิภาพทางความร้อนเบรค (Brake thermal efficiency, *BTH*) และความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรค (Brake specific fuel consumption, *BSFC*) โดยอ้างอิงจาก Sutheerasak & Chinwanitcharoen, (2018) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

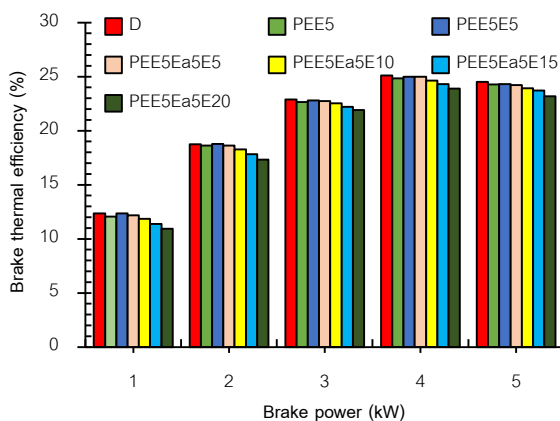
$$BTH = \frac{P_b}{\dot{m}_f \cdot LHV} \quad (7)$$

$$BSFC = \frac{\dot{m}_f}{P_b} \quad (8)$$

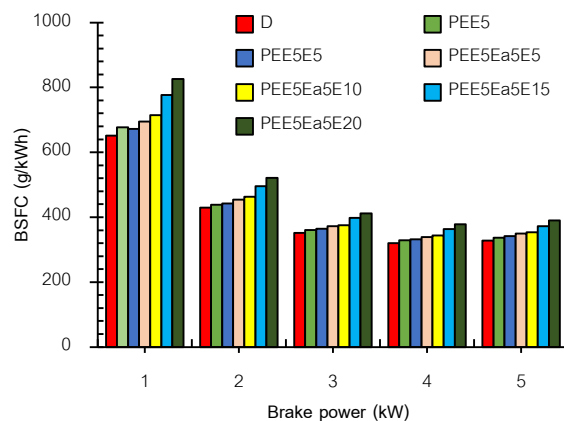
โดยที่ P_b คือ กำลังงานเบรค (kW) ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ ภาระงานทางไฟฟ้าต่างๆ
 \dot{m}_f คือ อัตราการใช้เชื้อเพลิง (kg/sec)
 LHV คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (MJ/kg)

ผลการวิจัย

การใช้เชื้อเพลิงต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3 ณ ความเร็วรอบ 3,000±50 rpm โดยเพิ่มภาระงานจากร้อยละ 20 ถึง 100 แสดงให้เห็นว่า กำลังงานเบรก (Brake power) เพิ่มขึ้นจาก 1 ถึง 5 kW โดยค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง ±0.05 ถึง ±0.27 kW เนื่องจากการทดสอบนี้ ปรับภาระงาน เพื่อให้กำลังไฟฟ้าจากการใช้เชื้อเพลิงต่างๆ ใกล้เคียงกัน ทำให้กำลังงานเบรกของเครื่องยนต์ใกล้เคียงกัน และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสมรรถนะและการปล่อยสารพิษต่างๆ จากการใช้เชื้อเพลิงต่างๆ โดยอ้างอิงจาก Sutheerasak & Chinwanitcharoen, (2018) และ Huang *et al.*, (2009) ขณะที่ภาพที่ 2 แสดงผลการตรวจสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ พบว่า ประสิทธิภาพทางความร้อนเบรก (*BTH*) เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มกำลังงานเบรก และ *BTH* สูงสุดเกิดขึ้นที่ 4 kW ดังแสดงในภาพที่ 2(ก) โดยสอดคล้องกับผลการตรวจสอบความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (*BSFC*) ดังแสดงในภาพที่ 2(ข) พบว่า มีการลดลงของ *BSFC* ตามการเพิ่มกำลังงานเบรก โดย *BSFC* ต่ำสุดอยู่ที่ 4 kW เนื่องจากกำลังงานเบรกนี้ เป็นการใส่ภาระงานทางไฟฟ้าร้อยละ 80 ซึ่งมีอัตราการใช้เชื้อเพลิงต่างๆ เหมาะสมกับกำลังงานที่ให้ออกมาจากเครื่องยนต์ และมีการสูญเสียพลังงานไปกับสิ่งแวดล้อมเพียงเล็กน้อย (Sutheerasak *et al.*, 2020) ดังนั้น งานวิจัยนี้ วิเคราะห์ผลของสมรรถนะและการปล่อยสารพิษต่างๆ ของเครื่องยนต์ เมื่อใช้เชื้อเพลิงต่างๆ ณ กำลังงานเบรก 4 kW สำหรับการใส่ D, PEE5, PEE5E5, PEE5Ea5E5, PEE5Ea5E10, PEE5Ea5E15 และ PEE5Ea5E20 เป็นเชื้อเพลิงนั้น *BTH* เท่ากับ ร้อยละ 25.11, 24.83, 24.99, 24.98, 24.64, 24.30 และ 23.88 และ *BSFC* เท่ากับ 320.37, 328.91, 332.21, 339.27, 343.37, 363.63 และ 378.04 g/kWh ตามลำดับ ดังนั้น การใช้ PEE5Ea5 และ E ที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 ถึง 20 ทำให้ *BTH* ลดลงจากร้อยละ 0.13 ถึง 1.23, 0.19 ถึง 0.95 และ 0.01 ถึง 1.11 และ *BSFC* เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5.90 ถึง 18.00, 3.15 ถึง 14.94 และ 2.13 ถึง 13.80 เมื่อเทียบกับ D, PEE5 และ PEE5E5 ตามลำดับ



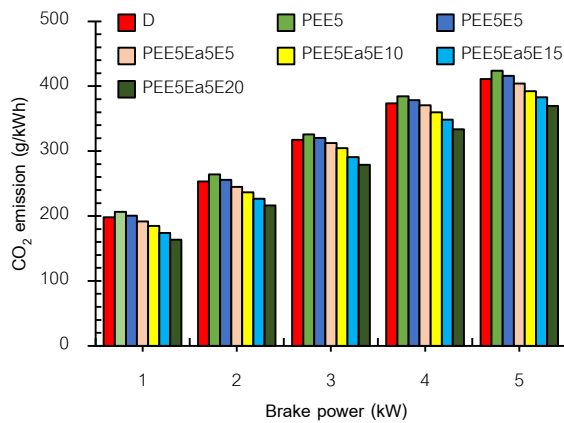
(ก) ประสิทธิภาพทางความร้อนเบรก



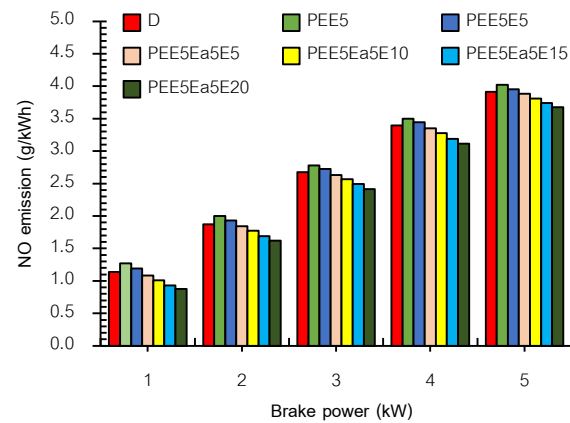
(ข) ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก

ภาพที่ 2 ประสิทธิภาพทางความร้อนเบรก และความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกที่กำลังงานเบรกต่างๆ

ภาพที่ 3 แสดงการปล่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไนตริกออกไซด์ (NO) ที่กำลังงานเบรคต่างๆ พบว่า การปล่อย CO_2 และ NO เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มกำลังงานเบรคดังแสดงในภาพที่ 3(ก) และ 3(ข) สำหรับผลการตรวจสอบระดับของ CO_2 และ NO ณ กำลังงานเบรค 4 kW เมื่อใช้ D, PEE5, PEE5E5, PEE5Ea5E5, PEE5Ea5E10, PEE5Ea5E15 และ PEE5Ea5E20 เป็นเชื้อเพลิง พบว่า การปล่อย CO_2 เท่ากับ 373.51, 384.49, 378.60, 370.82, 359.76, 348.55 และ 333.90 g/kWh และการปล่อย NO เท่ากับ 3.40, 3.50, 3.45, 3.35, 3.28, 3.19, 3.12 g/kWh ตามลำดับ ดังนั้น การใช้ PEE5Ea5 และ E ที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 ถึง 20 นำไปสู่การลดลงของระดับ CO_2 โดยลดลงจากร้อยละ 0.72 ถึง 10.60, 3.55 ถึง 13.16 และ 2.05 ถึง 13.16 ขณะที่ระดับของ NO ถูกลดลงจากร้อยละ 1.35 ถึง 8.24, 4.34 ถึง 11.03 และ 2.85 ถึง 9.64 เมื่อเทียบกับ D, PEE5 และ PEE5E5 ตามลำดับ ภาพที่ 4 แสดงการตรวจสอบการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ไฮโดรคาร์บอน (HC) และปริมาณควันดำซึ่งถูกแสดงในรูปแบบของการปล่อยฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM) ที่กำลังงานเบรคต่างๆ พบว่า การปล่อย CO และ HC ลดลงตามการเพิ่มกำลังงานเบรคดังแสดงในภาพที่ 4(ก) และ 4 (ข) ขณะที่การปล่อย PM เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มกำลังงานเบรคดังแสดงในภาพที่ 4(ค) ขณะที่ผลการวิจัยการใช้ D, PEE5, PEE5E5, PEE5Ea5E5, PEE5Ea5E10, PEE5Ea5E15 และ PEE5Ea5E20 เป็นเชื้อเพลิง ที่กำลังงานเบรค 4 kW แสดงให้เห็นว่า การปล่อย CO เท่ากับ 0.87, 0.85, 0.84, 0.81, 0.78, 0.75 และ 0.72 g/kWh, การปล่อย HC เท่ากับ 0.0155, 0.0150, 0.0159, 0.0170, 0.0189, 0.0217 และ 0.0235 g/kWh และการปล่อย PM เท่ากับ 0.0126, 0.0119, 0.0113, 0.0108, 0.0101, 0.0088 และ 0.0078 g/kWh ตามลำดับ

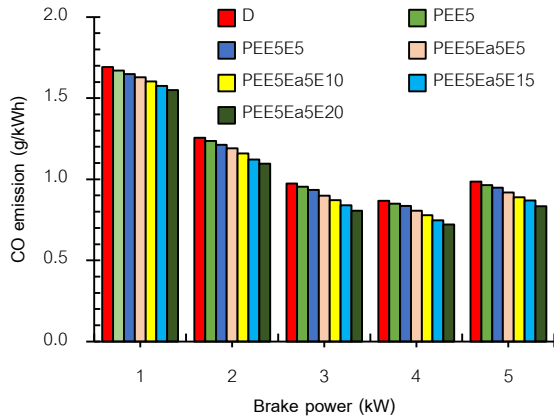


ก) คาร์บอนไดออกไซด์

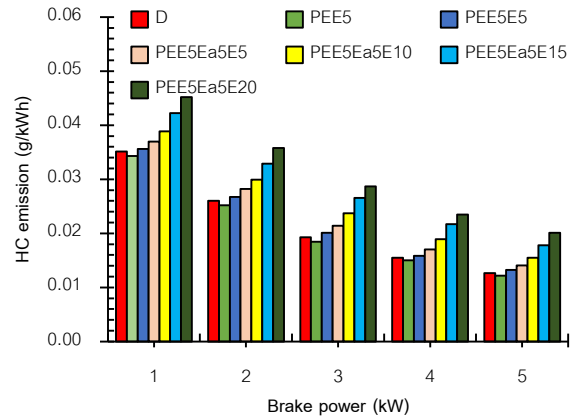


ข) ไนตริกออกไซด์

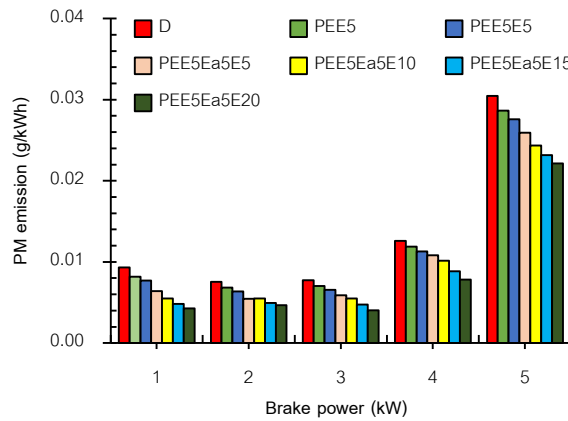
ภาพที่ 3 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์และไนตริกออกไซด์ที่ กำลังงานเบรคต่างๆ



(ก) คาร์บอนมอนอกไซด์



(ข) ไฮโดรคาร์บอน



(ค) ฝุ่นละอองขนาดเล็ก

ภาพที่ 4 ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรคาร์บอน และฝุ่นละอองขนาดเล็กที่กำลังงานเบรคต่างๆ

ดังนั้น การใช้ PEE5Ea5 และ E ที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 ถึง 20 นำไปสู่การลดของระดับ CO จากร้อยละ 7.05 ถึง 16.82, 5.07 ถึง 15.05 และ 3.42 ถึง 13.57 แต่ระดับของ HC ถูกเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 9.98 ถึง 51.54, 13.49 ถึง 56.39 และ 7.32 ถึง 47.88 ขณะที่การปล่อย PM ถูกลดลงจากร้อยละ 14.35 ถึง 37.95, 9.27 ถึง 34.27 และ 4.46 ถึง 30.79 เมื่อเทียบกับ D, PEE5 และ PEE5E5 ตามลำดับ

วิจารณ์ผลการวิจัย

ผลการวิจัยสมรรถนะและการปล่อยสารพิษต่างๆ ของเครื่องยนต์ดีเซลจากการใช้ PEE: Ea: E ในส่วนผสมต่างๆ เป็นเชื้อเพลิงนั้น อภิปรายผลการวิจัยดังต่อไปนี้

(1) การใช้ PEE: Ea: E ในส่วนผสมต่างๆ เมื่อเทียบกับ D, PEE5 และ PEE5E5 แสดงให้เห็นว่า **BTH** ถูกลดลงตามการเพิ่ม E ในทุกกำลังงานเบรคดังแสดงในภาพที่ 2(ก) และสอดคล้องกับ Sutheerasak *et al.*, (2020), Prbakaran *et al.*, (2018) และ Gnanamoorthi & Devaradjane, (2013) เนื่องจาก Ea และ E มีค่าความร้อนของเชื้อเพลิงต่ำกว่า PEE5 และ PEE5E5 มีค่าความร้อนของเชื้อเพลิงต่ำกว่า D ขณะที่สารทั้งสองถูกผสมกับ PEE5 และมีการเพิ่ม E นั้น ทำให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงต่ำกว่า D, PEE5 และ PEE5E5 ตามลำดับ (ตารางที่ 1) สำหรับการผลิตกำลังงานไฟฟ้าใกล้เคียงกัน เพื่อให้กำลังงานเบรคของเครื่องยนต์ใกล้เคียงกัน แต่ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงลดลงตามการเพิ่ม E ทำให้อัตราการใช้เชื้อเพลิงของ PEE5Ea5 และ E ที่เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 20 ถูกเพิ่มขึ้น เมื่อวิเคราะห์ **BTH** จากสมการที่ (1) พบว่า การใช้ PEE5Ea5 และ E ซึ่งถูกเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 20 นั้น มี **BTH** ต่ำกว่าเชื้อเพลิงทั้งสาม อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้พบว่า การใช้ PEE5Ea5E5 ให้ **BTH** สูงกว่า PEE5 เนื่องจากการผสมสารทั้งสองกับ PEE5 ทำให้ปริมาณของออกซิเจนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีปฏิกิริยาการเผาไหม้สมบูรณ์ในช่วง Premixed และ Diffusion combustion ถึงแม้ว่า PEE5Ea5E5 จะมีค่าความร้อนของเชื้อเพลิงต่ำกว่า และอัตราการใช้เชื้อเพลิงสูงกว่า PEE5 แต่พลังงานจากเชื้อเพลิงของ PEE5Ea5E5 ที่ป้อนเข้าไปถูกเผาไหม้และเปลี่ยนรูปเป็นกำลังงานของเครื่องยนต์อย่างเหมาะสม ดังนั้น ปัจจัยเหล่านี้จึงนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของ **BTH** (Dharma *et al.*, 2016; Kumar *et al.*, 2013) อย่างไรก็ตาม PEE5Ea5E5 มี **BTH** ต่ำกว่า PEE5E5 เพียงเล็กน้อย เพราะ PEE5E5 เป็นการผสมระหว่าง PEE5 กับ E เท่านั้น ดังนั้น PEE5Ea5E5 มีค่า LHV ต่ำกว่า PEE5E5 เนื่องจาก Ea มีค่าความร้อนของเชื้อเพลิงต่ำกว่า (ตารางที่ 1) เมื่อทดสอบที่ กำลังงานใกล้เคียงกัน PEE5Ea5E5 มีอัตราการใช้เชื้อเพลิงสูงกว่า PEE5E5 เล็กน้อย ส่งผลให้ PEE5Ea5E5 มี **BTH** ต่ำกว่า PEE5E5 เมื่อเปรียบเทียบกับ Santasnachok *et al.*, (2021) ซึ่งใช้ D ผสมกับ Ea และ E ร้อยละ 5 (DEa5E5) พบว่า **BTH** ถูกลดลงร้อยละ 1 ดังนั้น PEE5Ea5E5 มี **BTH** สูงกว่า DEa5E5 โดยสาเหตุของการเพิ่ม **BTH** เนื่องจากการผสม PEE5 กับ Ea5E5 นำไปสู่การเผาไหม้สมบูรณ์ในช่วงการเผาไหม้ทั้งสอง (Premixed และ Diffusion combustion) ทำให้อัตราการใช้ PEE5Ea5E5 ต่ำกว่า DEa5E5 ส่งผลให้ **BTH** สูงกว่า DEa5E5 (Dharma *et al.*, 2016 ;Kumar *et al.*, 2013)

(2) **BSFC** จากการใช้ PEE: Ea: E ในส่วนผสมต่างๆ สูงกว่า D, PEE5 และ PEE5E5 ณ กำลังงานเบรคต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 2(ข) และสอดคล้องกับ Sutheerasak *et al.*, (2020), Prbakaran *et al.*, (2018) และ Gnanamoorthi & Devaradjane, (2013) เนื่องจากการผสม Ea กับ E ซึ่งเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 20 นั้น ทำให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงลดลง (ตารางที่ 1) ขณะที่ตรวจสอบ **BSFC** จากสมการที่ (2) พบว่า กำลังงานเบรคใกล้เคียงกัน แต่อัตราการใช้เชื้อเพลิงของ PEE5Ea5 และ E ที่เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 20 สูงกว่า ทำให้ **BSFC** สูงกว่าเชื้อเพลิงทั้งสาม อย่างไรก็ตาม การใช้ PEE5Ea5E5 มี **BSFC** เพิ่มขึ้นไม่เกินร้อยละ 5.90 เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงทั้งสาม สำหรับการ ใช้ PEE5Ea5E5 เทียบกับ DEa5E5 จากงานวิจัยของ Santasnachok *et al.*, (2021) ซึ่งมี **BSFC** เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 6.10 เพราะฉะนั้น การใช้ PEE5Ea5E5 มี **BSFC** ต่ำกว่า

DEa5E5 เนื่องจากการผสม PEE5 กับ Ea5E5 ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์กว่า และอัตราการใช้เชื้อเพลิงต่ำกว่า DEa5E5 ทำให้ **BSFC** ต่ำกว่าการใช้ DEa5E5 (Dharma *et al.*, 2016; Kumar *et al.*, 2013)

(3) การใช้ PEE: Ea: E ในส่วนผสมต่างๆ มีระดับของ CO₂ ต่ำกว่า D, PEE5 และ PEE5E5 ในทุกกำลังงานเบรคดังแสดงในภาพที่ 3(ก) และการใช้ PEE5Ea5E5 มีการปล่อย CO₂ ต่ำกว่า PEE5 และ PEE5E5 โดยมีผลต่อจำกัดของเชื้อเพลิงทั้งสองซึ่งมีการปล่อย CO₂ สูงกว่า D และสอดคล้องกับ Ghanim *et al.*, (2018) และ Dharma *et al.*, (2016) ซึ่งนำเสนอว่าปฏิกิริยาการเผาไหม้สมบูรณ์ระหว่างเชื้อเพลิงต่างๆ (ซึ่งมีโมเลกุลของคาร์บอน (C) และไฮโดรเจน (H)) และอากาศบริเวณโดยรอบห้องเผาไหม้ (ซึ่งมีโมเลกุลของออกซิเจน (O) และไนโตรเจน (N)) ก่อให้เกิด CO₂, ไอน้ำ (H₂O_(g)) และ N₂ ขณะที่ PEE: Ea: E ในส่วนผสมต่างๆ มีอัตราส่วนของโมเลกุล C ต่อ H (C : H ratio) ลดลง และโมเลกุลของ O เพิ่มขึ้นตามการเพิ่ม E เมื่อเชื้อเพลิงผสมเหล่านี้ ซึ่งมีโมเลกุลของ C ลดลง ถูกทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับโมเลกุลของ O บริเวณโดยรอบห้องเผาไหม้ ก่อให้เกิดการลดลงของ CO₂ และมีการรวมตัวของอนุมูลอิสระของไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical, OH) เพิ่มขึ้นตามการเพิ่ม E ทำให้การปล่อย CO₂ ต่ำกว่าเชื้อเพลิงทั้งสาม ยิ่งไปกว่านั้น งานวิจัยนี้ มีการปล่อย CO₂ ต่ำกว่า Santasnachok *et al.*, (2021) ซึ่งใช้ D ผสมกับ Ea และ E (D: Ea: E) โดย E ถูกเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 20 เนื่องจาก D: Ea: E ซึ่ง E ถูกเพิ่มขึ้นนั้น มี C: H ratio มากกว่า ก่อให้เกิดการปล่อย CO₂ มากกว่า PEE: Ea: E ในส่วนผสมต่างๆ (Dharma *et al.*, 2016; Kumar *et al.*, 2013)

(4) การใช้ PEE: Ea: E ในส่วนผสมต่างๆ มีระดับของ NO ต่ำกว่า D, PEE5 และ PEE5E5 ในทุกกำลังงานเบรคดังแสดงในภาพที่ 3(ข) และงานวิจัยนี้ พบว่า PEE5Ea5E5 มีการปล่อย NO ต่ำกว่า PEE5 และ PEE5E5 โดยมีผลต่อจำกัดของเชื้อเพลิงทั้งสองซึ่งมีการปล่อย NO สูงกว่า D และสอดคล้องกับ Sutherasak *et al.*, (2020), และ Dharma *et al.*, (2016) ซึ่งนำเสนอว่าการเกิด NO ส่วนหนึ่งมาจากปริมาณอากาศจำนวนมากถูกทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ ทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงขึ้น แต่การผสม Ea และ E ซึ่งถูกเพิ่มขึ้นนั้น ทำให้ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอสูงขึ้น ส่งผลให้ปริมาณของสารระเหยและไอระเหยของเชื้อเพลิงผสมเหล่านี้ ถูกเพิ่มขึ้นตามการเพิ่ม E และต่อมา มีไอระเหยของเชื้อเพลิงผสมบางส่วน เกิดการเริ่มต้นการเผาไหม้ก่อน ทำให้อัตราการเผาไหม้ในช่วง Premixed combustion เกิดขึ้นและสิ้นสุดลงอย่างรวดเร็ว และส่งผลต่อเนื่องสู่อัตราการเผาไหม้ในช่วง Diffusion combustion มีการสิ้นสุดลงในช่วงเริ่มต้นของจังหวะขยาย ทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้ลดลง นอกจากนี้ โมเลกุลของ O บางส่วนเกิดการรวมตัวกับโมเลกุลของ H และนำไปสู่การรวมตัวของ OH ซึ่งถูกเพิ่มขึ้นตามการเพิ่ม E ด้วย ดังนั้น การใช้ PEE5Ea5 และ E ซึ่งถูกเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 20 จึงมีระดับของ NO ต่ำกว่าเชื้อเพลิงทั้งสาม นอกจากนี้ มีการตรวจสอบผลการวัดระดับของ NO ที่ 4 kW จากการใช้เชื้อเพลิงต่างๆ ได้แก่ D, PEE5, PEE5E5 และ PEE5Ea5 และ E ที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 ถึง 20 กับมาตรฐานไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลเพื่อใช้เป็นแนวทางการประยุกต์ใช้สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดใหญ่ พบว่า การปล่อย NO จากการใช้เชื้อเพลิงเหล่านี้อยู่ภายใต้มาตรฐาน EURO 4 ซึ่งกำหนดไว้ไม่เกิน 3.5 g/kWh อย่างไรก็ตาม การใช้ PEE5Ea5 ร่วมกับการเพิ่ม E สูงถึงร้อยละ 20 มีการปล่อย NO เพียง 3.12 g/kWh โดยเชื้อเพลิงผสมนี้ไม่สามารถอยู่ภายใต้มาตรฐาน EURO 5 ซึ่งกำหนดระดับของ NO ไว้ไม่เกิน 2.0 g/kWh (Friedrich, 2016; Pilusa *et al.*, 2012) สำหรับการนำมาประยุกต์ใช้ในประเทศไทยนั้น การใช้เชื้อเพลิงผสมเหล่านี้ ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่

ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน ECE R.83-05 (EURO 4) และตรงกับมาตรฐาน มอก. 2540-2554 และมอก. 2550-2554 เช่นกัน

(5) การใช้ PEE:Ea:E ในส่วนผสมต่างๆ มีระดับของ CO ต่ำกว่า D, PEE5 และ PEE5E5 ในทุกกำลังงานเบรก ดังแสดงในภาพที่ 4(ก) และสอดคล้องกับ Sutheerasak, (2017) และ Gnanamoorthi & Devaradjane, (2013) ซึ่งนำเสนอว่า PEE5Ea5 และ E ซึ่งถูกเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 20 นั้น นำไปสู่การลดลงของ C : H ratio เมื่อเชื้อเพลิงผสมเหล่านี้ ทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับโมเลกุลของ O บริเวณโดยรอบห้องเผาไหม้ ทำให้มีปฏิกิริยาการเผาไหม้สมบูรณ์อย่างมากในช่วงการเผาไหม้ทั้งสอง ตามการเพิ่มโมเลกุล O โดยโมเลกุลของ C ถูกรวมตัวกับโมเลกุลของ O กลายเป็น CO₂ ตามที่กล่าวในข้อ (3) แต่โมเลกุลของ C ภายในเชื้อเพลิงผสมเหล่านี้ ถูกลดลงตามการเพิ่ม E และส่วนใหญ่ เกิดการรวมตัวของ CO₂ ในปฏิกิริยาการเผาไหม้สมบูรณ์ ส่งผลให้การรวมตัวของ CO ที่เกิดขึ้นในช่วงการเผาไหม้ทั้งสองถูกลดลง เพราะโมเลกุลของ C ที่เป็นส่วนผสมหนาถูกทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของ O บางส่วนจากบริเวณโดยรอบ และจากความเข้มข้นของ E ที่เพิ่มขึ้น ทำให้การเผาไหม้ส่วนผสมหนาหมดลงอย่างรวดเร็ว และนำไปสู่การลดลงของปริมาณควันดำจากแก๊สไอเสียของเครื่องยนต์ ยิ่งไปกว่านั้น ผลการวิจัยนี้ มีการปล่อย CO น้อยกว่า Santasnachok *et al.*, (2019) เนื่องจากการใช้ PEE:Ea:E นำไปสู่ C : H ratio ต่ำกว่า D:Ea:E ขณะที่มีการเพิ่ม E ทำให้การปล่อย CO ต่ำกว่า (Dharma *et al.*, 2016; Kumar *et al.*, 2013) ในการตรวจสอบผลการวัดระดับของ CO ที่ 4 kW จากการใช้เชื้อเพลิงต่างๆ กับมาตรฐานไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลเพื่อใช้เป็นแนวทางการประยุกต์ใช้สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดใหญ่ การปล่อย CO จากการใช้เชื้อเพลิงเหล่านี้ อยู่ภายใต้มาตรฐาน EURO 4 ถึง EURO 6 ซึ่งกำหนดไว้ไม่เกิน 1.5 g/kWh (Friedrich, 2016; Pilusa *et al.*, 2012) ขณะที่การใช้ PEE5Ea5 ร่วมกับการเพิ่ม E สูงถึงร้อยละ 20 มีการปล่อย CO เพียง 0.72 g/kWh ซึ่งอยู่ภายใต้มาตรฐานเหล่านี้เช่นกัน

(6) การใช้ PEE:Ea:E ในส่วนผสมต่างๆ มีระดับ HC สูงกว่า D, PEE5 และ PEE5E5 ในทุกกำลังงานเบรกดังแสดงในภาพที่ 4(ข) และสอดคล้องกับ Dharma *et al.*, (2016) และ Huang *et al.*, (2009) สำหรับสาเหตุของการเพิ่ม HC ถูกตั้งสมมติฐานโดยเชื้อเพลิงผสมเหล่านี้ ขณะถูกฉีดออกจากหัวฉีด เกิดการสเปรย์เชื้อเพลิงซึ่งมีอัตราการระเหยกลายเป็นไออย่างรวดเร็ว เพราะ Ea และ E มีความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอสูงเนื่องจากจุดเดือดใกล้เคียงกัน ส่งผลให้มีการเพิ่มความหนาแน่นของปริมาณสารระเหยภายในไอระเหยของเชื้อเพลิงผสม และมีการเพิ่มปริมาณสารระเหยมากขึ้นตามการเพิ่ม E ส่งผลให้ส่วนหนึ่งของไอระเหยเชื้อเพลิงผสมเหล่านี้ ถูกทำปฏิกิริยาการเผาไหม้กับโมเลกุลของ O บริเวณโดยรอบห้องเผาไหม้ และอีกส่วนถูกสะสมไว้บริเวณซอกต่างๆ ของห้องเผาไหม้ เช่น บ่าวาล์วไอดีและไอดี และบริเวณหัวฉีด ในเวลาเดียวกัน การเคลื่อนที่ของสเปรย์เชื้อเพลิงผสมถูกดำเนินอย่างต่อเนื่อง และปะทะกับผนังกระบอกสูบ และบริเวณหัวลูกสูบ ทำให้เกิดไอระเหยของเชื้อเพลิงผสมเหล่านี้บางส่วน ถูกกักไว้ตามซอกต่างๆ และร่องแหวนลูกสูบ โดยไอระเหยของเชื้อเพลิงผสมเหล่านี้ ที่สะสมอยู่ตามซอกต่างๆ จะเกิดการสลายพันธะระหว่าง C, H และ O แต่อุณหภูมิของเชื้อเพลิงผสมเหล่านี้ ณ บริเวณนั้น ไม่สามารถจุดระเบิดตัวมันเองได้ ส่งผลให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้ไม่เกิดขึ้น จึงเกิดการรวมตัวของโมเลกุล H และ C และกลายเป็น HC เมื่อวาล์วไอดีเปิด HC ที่ตกค้างอยู่ในซอกต่างๆ จะเคลื่อนที่ออกมา และมี HC มากขึ้นตามการเพิ่ม E ด้วย นอกจากนี้ การตรวจสอบผลการวัดระดับของ HC ที่ 4 kW จากการใช้เชื้อเพลิงต่างๆ กับมาตรฐานไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล

เพื่อใช้เป็นแนวทางการประยุกต์ใช้สำหรับเครื่องยนตดีเซลขนาดใหญ่ พบว่า การปล่อย HC จากการใช้เชื้อเพลิงเหล่านี้ ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน EURO 4 และ EURO 5 ที่กำหนดการปล่อย HC ไม่เกิน 0.46 g/kWh และการใช้เชื้อเพลิงผสมเหล่านี้ สามารถใช้กับมาตรฐาน EURO 6 ซึ่งกำหนดการปล่อย HC ไว้ไม่เกิน 0.13 g/kWh อย่างไรก็ตาม การใช้ PEE5Ea5 ร่วมกับการเพิ่ม E สูงถึงร้อยละ 20 มีการปล่อย HC สูงกว่า D, PEE5 และ PEE5E5 โดยมีการปล่อย HC อยู่ที่ 0.024 g/kWh แต่เชื้อเพลิงผสมนี้ มีการปล่อย HC ไม่เกินค่ามาตรฐาน EURO 6 ที่กำหนดไว้ (Friedrich, 2016; Pilusa *et al.*, 2012)

(7) การใช้ PEE:Ea:E ในส่วนผสมต่างๆ มีปริมาณควันดำซึ่งถูกแสดงในรูปแบบของการปล่อย **PM** ต่ำกว่า D, PEE5 และ PEE5E5 ในทุกกำลังงานเบรคดังแสดงในภาพที่ 4(ค) และสอดคล้องกับ Sutheerasak *et al.*, (2020), Dharma *et al.*, (2016) และ Huang *et al.*, (2009) เนื่องจาก PEE5Ea5 และ E ซึ่งถูกเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 20 ทำให้โมเลกุลของ O เพิ่มขึ้น และ C : H ratio ลดลง ขณะที่เชื้อเพลิงผสมเหล่านี้ ทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของ O บริเวณโดยรอบห้องเผาไหม้ ทำให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้สมบูรณ์อย่างมากในช่วงการเผาไหม้ทั้งสอง ตามที่กล่าวในข้อ (3) และ (5) ผลลัพธ์ที่ตามมา การปล่อย CO ลดลง ทำให้ปริมาณของควันดำลดลงตามการเพิ่ม E ซึ่งนำไปสู่การลดลงของการปล่อย **PM** ยิ่งไปกว่านั้น การใช้ PEE:Ea:E มีการปล่อย **PM** น้อยกว่า D:Ea:E (Santasnachok *et al.*, 2021) เนื่องจาก การลดลงของ C : H ratio นำไปสู่โมเลกุลของ C ภายในองค์ประกอบของ PEE:Ea:E ถูกลดลง และถูกทำปฏิกิริยาการเผาไหม้สมบูรณ์มากกว่าการใช้ D:Ea:E ขณะที่มีการเพิ่ม E สูงขึ้น (Dharma *et al.*, 2016; Kumar *et al.*, 2013) นอกจากนี้ การวิจัยนี้ ทำการตรวจสอบการปล่อย **PM** ที่ 4 kW จากการใช้เชื้อเพลิงต่างๆ กับมาตรฐานไอเสียของเครื่องยนตดีเซลเพื่อใช้เป็นแนวทางการประยุกต์ใช้สำหรับเครื่องยนตดีเซลขนาดใหญ่ โดยเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน EURO 4 และ EURO 5 ซึ่งกำหนดการปล่อย **PM** ไว้ไม่เกิน 0.02 g/kWh ขณะที่มาตรฐาน EURO 6 กำหนดการปล่อย **PM** ไว้ไม่เกิน 0.01 g/kWh (Dharma *et al.*, 2016; Kumar *et al.*, 2013) โดยการใช้ D, PEE5, PEE5E5 และ PEE5Ea5E5 มีการปล่อย **PM** อยู่ในค่ามาตรฐาน EURO 4 และ EURO 5 ขณะที่การใช้ PEE5Ea5 และ E ที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 10 ถึง 20 มีการปล่อย **PM** จาก 0.010 ถึง 0.008 g/kWh และผ่านมาตรฐาน EURO 6

สรุปผลการวิจัย

ผลการตรวจสอบสมรรถนะและการปล่อยสารพิษต่างๆ ของเครื่องยนตดีเซลจากการใช้ PEE:Ea:E ในส่วนผสมต่างๆ เมื่อเทียบกับ D และ PEE5 สรุปผลดังนี้

(1) การใช้ PEE5Ea5 และ E ซึ่งถูกเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 20 นั้น มีสมรรถนะของเครื่องยนตลดลงในทุกกำลังงานเบรค เนื่องจากค่าความร้อนของ PEE:Ea:E ในส่วนผสมต่างๆ ต่ำกว่า D และ PEE5 อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นว่า การใช้ PEE5Ea5E5 มี **BTH** สูงกว่า PEE5 เพราะ PEE5Ea5E5 มีการเผาไหม้สมบูรณ์กว่า ทำให้พลังงานจากเชื้อเพลิงถูกบั่นอย่างเหมาะสม นอกจากนี้ การใช้ PEE5Ea5E5 ให้ **BTH** ใกล้เคียงกับ D แต่มีการเพิ่มขึ้นของ **BSFC** เพียงเล็กน้อย

(2) การปล่อยสารพิษต่างๆ จากแก๊สไอเสียของเครื่องยนตดีเซล เมื่อใช้ PEE5Ea5 และ E ซึ่งถูกเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 20 เทียบกับ D และ PEE5 นั้น พบว่า มีการลดลงของระดับ CO₂, NO, CO และ **PM** ตามการเพิ่ม E เพราะการผสม Ea และ E นำไปสู่การลดลงของ C : H ratio และมีการเพิ่มขึ้นของ O ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้สมบูรณ์ในช่วง Premixed และ



Diffusion combustion ทำให้ลดการปล่อยสารพิษเหล่านี้ ยิ่งไปกว่านั้น การใช้ PEE5Ea5 ร่วมกับการเพิ่ม E สูงถึงร้อยละ 20 มีการปล่อยสารพิษอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ EURO 4 ถึง EURO 6 ถึงแม้ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของ HC แต่การปล่อย HC ยังอยู่ภายใต้มาตรฐานของ EURO 6

(3) งานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นว่า การใช้ PEE5Ea5 และ E ซึ่งถูกเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 20 มีการปล่อย HC เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการผสม Ea และ E ที่เพิ่มถึงร้อยละ 20 นั้น ทำให้ปริมาณของสารระเหยถูกเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีการเพิ่มขึ้นของไอระเหยเชื้อเพลิงผสม และถูกสะสมบริเวณซอกต่างๆ ภายในห้องเผาไหม้เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีของเครื่องยนต์ดีเซลสมัยใหม่ มีการนำแก๊สไอเสียบางส่วนกลับไปเผาไหม้ใหม่อีกครั้ง (Exhaust Gas Recirculation, EGR) และมีการใช้การอัดอากาศ ซึ่งสองวิธีนี้ จะเป็นแนวทางในการลดการปล่อย HC ขณะที่การวิจัยในอนาคต ควรศึกษาการใช้ PEE5Ea5 และ E ซึ่งถูกเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 20 ร่วมกับการใช้ EGR และการอัดอากาศ และศึกษากการสึกหรอของระบบฉีดเชื้อเพลิงและชิ้นส่วนต่างๆ ภายในเครื่องยนต์ดีเซล เพื่อเป็นแนวทางการประยุกต์ใช้สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดใหญ่ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ 21/2549 และขอขอบคุณคุณณัชพล ประสงค์สกุล, คุณภาณุพงศ์ ทรัพย์ศิริ และคุณอิทธิพล ทรัพย์กุล ที่ช่วยเหลือด้านต่าง ๆ จนกระทั่งงานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

Ağbulut, Ü., Sarıdemir, S., & Albayrak, S. (2019). Experimental investigation of combustion, performance and emission characteristics of a diesel engine fuelled with diesel–biodiesel–alcohol blends. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(389), 1-12.

Al-Hassan, M., Mujafet, H., & Al-Shannag, M. (2012). An experimental study on the solubility of a diesel-ethanol blend and on the performance of a diesel engine fueled with diesel-biodiesel-ethanol blends. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 6(2), 147-153.

AVL. (2005). *Smoke Value Measurement with the Filter-Paper-Method*. Graz–Austria: AVL List GmbH.

Dharma, S., Ong, H.C., Masjuki, H.H., Sebayang, A.H., & Silitonga, A.S. (2016). An overview of engine durability and compatibility using biodiesel–bioethanol–diesel blends in compression-ignition engines. *Energy Conversion and Management*, 128, 66-81.



- Emiroğlu, A.O., & Şen, M. (2018). Combustion, performance and exhaust emission characterizations of a diesel engine operating with a ternary blend (alcohol-biodiesel-diesel fuel). *Applied Thermal Engineering*, 133, 371-380.
- Friedrich, A. (2016). Heavy duty vehicles emissions. In *Proceeding ASEAN-German Technical Cooperation Transport and Climate Change*. September 29th, 2016, Busan, South Korea. 1-30.
- Ghanim, F.M., Adam, A.M.H., & Farouk, H. (2018). Performance and emission characteristics of a diesel engine fueled by biodiesel-ethanol-diesel fuel blends. *International Journal of Advanced Thermofluid Research*, 4(1), 26-36.
- Gnanamoorthi, V., & Devaradjane, G. (2013). Effect of diesel-ethanol blends on performance, combustion and exhaust emission of a diesel engine. *Internal Journal of Current Engineering & Technology*, 3(1), 36-42.
- Gomasta, S., & Mahla, S.K. (2012). An experimental investigation of ethanol blended diesel fuel on engine performance and emission of a diesel engine. *International Journal on Emerging Technologies*, 3, 74-79.
- Gorey, N., Ghosh, S., Srivastava, P., & Kumar, V. (2017), Characterization of palm oil as biodiesel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 225 (012220), 1-9.
- Huang, J., Wang, Y., Li, S., Roskilly, A.P., Yu, H., & Li, H. (2009). Experimental investigation on the performance and emissions of a diesel engine fuelled with ethanol-diesel blends. *Applied Thermal Engineering*, 29, 2484-2490.
- Krishna, S.M., Abdul Salam, P., Tongroon, M., & Chollacoop, N. (2019). Performance and emission assessment of optimally blended biodiesel-diesel-ethanol in diesel engine generator. *Applied Thermal Engineering*, 155, 525-533.
- Kumar, S., Cho, J.H., Park, J., & Moon, I. (2013). Advances in diesel-alcohol blends and their effects on the performance and emissions of diesel engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 46-72.



- Kwanchareon, P., Luengnaruemitchai, A., & Jai-In, S. (2007). Solubility of a diesel-biodiesel-ethanol blend, its fuel properties, and its emission characteristics from diesel engine. *Fuel*, 86, 1053-1061.
- Pilusa, T.J., Mollagee, M.M., & Muzenda, E. (2012). Reduction of vehicle exhaust emissions from diesel engines using the whale concept filter. *Aerosol and Air Quality Research*, 12, 994-1006.
- Prbakaran, B., & Viswanathan, D. (2018). Experimental investigation of effects of addition of ethanol to bio-diesel on performance, combustion and emission characteristics in CI engine. *Alexandria Engineering Journal*, 57, 383-389.
- Santasnachok, M., Sutheerasak, E., Chinwanitcharoen, C., Ruengphrathuengsuka, W., & Chuepeng, S. (2021). Use of diesel mixed with ethanol and ethyl acetate for alternative fuel in a high-speed diesel engine. *ASEAN Engineering Journal*, 11(2), 25-36.
- Sathiyagnanam, A.P., Saravanan, C.G., & Gopalakrishnan, M. (2010). Hexanol-ethanol diesel blends on di-diesel engine to study the combustion and emission. In *Proceeding the World Congress on Engineering 2010*, June 30th to July 2sd, 2010, London, United Kingdom.
- Shadidi, B., Yusaf, T., Alizadeh, H.H.A., & Ghobadian, B. (2014). Experimental investigation of the tractor engine performance using diesohol fuel. *Applied Energy*, 114, 874-879.
- Srinidhi, C., Channapatna, S.V., Pawar, A.A., & Madhusudhan, A. (2016). Performance and emissions of diesel engine fuelled with ethanol and palm oil methyl ester. *International Research Journal of Engineering Technology*, 3(4), 108-113.
- Sutheerasak, E. (2017). Investigation on the performance, emissions and wear of a small diesel engine using 10% anhydrous ethanol diesel blends. *Ubon Ratchathani University Engineering Journal*, 10, 70-84. (in Thai)



- Sutheerasak, E., & Chinwanitcharoen, C. (2016). Ratio of ethanol and ethyl acetate on spray and diesel engine performance. *Ubon Ratchathani University Engineering Journal*, 9, 91-104. (in Thai)
- Sutheerasak, E., & Chinwanitcharoen, C. (2018). Performance and emissions of a diesel engine using palm ethyl ester. *Engineering Journal Chiang Mai University*, 25, 1-13. (in Thai)
- Sutheerasak, E., & Chinwanitcharoen, C. (2019). 10% Biodiesel mixed with 5% ethanol for alternative fuel in a diesel-engine generator. In *Proceeding the 14th National and International Sripatum University Conference*. December 19th, 2019. Bangkok, Thailand. 2303-2312. (in Thai)
- Sutheerasak, E., Pirompugd, W., & Ruengphrathuengsuka, W. (2020). Performance of HSDI diesel-engine generator using the blend of B5, n-butanol and ethanol as increased to 20%. In *Proceeding E3S Web of Conferences 182: 2020 10th International Conference on Power, Energy and Electrical Engineering*. June 19th to 21th, 2020. Tokyo, Japan, 1-5.
- Yahuza, I., & Dandakouta, H. (2015). A performance review of ethanol-diesel blended fuel samples in compression-ignition engine. *Chemical Engineering & Process Technology*, 6(5), 1-6.