

# การใช้ปาล์มเอทิลเอสเทอร์สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลแบบฉีดตรงภายในรถยนต์กระบะ

## Use of Palm Ethyl Ester for Direct-Injection Diesel Engine within a Pickup Vehicle

เอกชัย สุธีรศักดิ์<sup>1</sup>, วิโรจนา เรืองประเทืองสุข<sup>2\*</sup> และ เจริญ ชินวานิชย์เจริญ<sup>2</sup>

Ekkachai Sutheerasak<sup>1</sup>, Wirojana Ruengphrathuengsuka<sup>2\*</sup> and Charoen Chinwanitcharoen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

<sup>2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

<sup>1</sup> Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Burapha University

<sup>2</sup> Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering, Burapha University

Received : 10 July 2018

Revised : 20 November 2018

Accepted : 21 December 2018

### บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ เป็นการตรวจสอบสมรรถนะและการปล่อยสารมลพิษต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ดีเซลแบบฉีดตรงซึ่งถูกติดตั้งภายในรถยนต์กระบะ เมื่อใช้เอสเทอร์บริสุทธิ์ และน้ำมันดีเซลผสมเอสเทอร์ ขณะที่เอสเทอร์ถูกสังเคราะห์โดยใช้น้ำมันปาล์มโพลีอิน เอทานอลปราศจากน้ำ และตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมเมทอกไซด์ เพื่อผลิตปาล์มเอทิลเอสเทอร์ (POEE) ซึ่งมีเอสเทอร์เฉลี่ยร้อยละ 98.53 ผลลัพธ์ต่าง ๆ จากการใช้ POEE เทียบกับน้ำมันดีเซลแสดงให้เห็นว่า ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงลดลงร้อยละ 10.56 ค่าความหนืดของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นร้อยละ 71.43 และความหนาแน่นของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.33 นอกจากนี้ กำลังงานของเครื่องยนต์และประสิทธิภาพทางความร้อนลดลงร้อยละ 5.18 และ 5.57 และความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นร้อยละ 29.35 ในทางตรงกันข้าม การปล่อยสารมลพิษ CO, HC และควันดำลดลง แต่การปลดปล่อย CO<sub>2</sub> และ NO เพิ่มขึ้น ขณะที่การใช้น้ำมันดีเซลผสมเอสเทอร์ นำไปสู่การลดลงของสมรรถนะของเครื่องยนต์ แต่มีการลดลงของการปล่อยสารมลพิษ CO, HC และควันดำตามการเพิ่มปริมาณของเอสเทอร์

**คำสำคัญ :** ปาล์มเอทิลเอสเทอร์, น้ำมันดีเซล, เครื่องยนต์ดีเซลแบบฉีดตรง, สมรรถนะ, การปล่อยก๊าซไอเสีย

### Abstract

The main objective of this research is to investigate the performance and emissions of a direct-injection diesel engine connected within an automotive pickup to use the pure ester and mixture of diesel and ester. Ester was synthesized by using oleic palm oil and anhydrous ethanol with potassium-methoxide catalysts to produce the palm-oil ethyl ester (POEE) which had the average of ester at 98.53%. Results from using POEE compared with diesel showed that the fuel heating value decreased to 10.56%, the fuel viscosity increased to 71.43%, and the density increased to 5.33%. Besides, the engine power and thermal efficiency decreased to 5.18% and 5.57%, and the fuel consumption increased to 29.35%. On the other hand, the release of CO, HC and black smoke decreased, but the CO<sub>2</sub> and NO releases increased. Use of diesel mixed with ester led to the decrease in engine performance, but there was the decrease of CO, HC and black smoke emissions with increasing the amount of ester.

**Keywords :** palm-oil ethyl ester, diesel, direct-injection diesel engine, performance, exhaust gas emission

\*Corresponding author. E-mail : wirojana@eng.buu.ac.th

## บทนำ

ปัจจุบันยานยนต์สำหรับการคมนาคมขนส่งนิยมใช้เครื่องยนต์ดีเซลเป็นต้นกำลัง เนื่องจากประหยัดเชื้อเพลิงและค่าบำรุงรักษาต่ำ แต่เครื่องยนต์นี้จะปลดปล่อยสารมลพิษประเภทควันดำออกมามาก ซึ่งจะทำลายสภาวะแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ และปัญหานี้นำไปสู่การใช้เชื้อเพลิงทดแทน (Vieira da Silva *et al.*, 2017) ขณะที่เอสเทอร์เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกหนึ่งซึ่งกำลังได้รับความสนใจจากหลายหน่วยงานเพราะสามารถผลิตจากการนำน้ำมันพืชต่าง ๆ ที่เป็นผลผลิตจากการเกษตรภายในประเทศไปทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ และใช้กรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยวิธีทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) เพื่อสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ หรือเอทิลเอสเทอร์ (Sakhivel *et al.*, 2014; Venkateswara, 2016) ในประเทศไทย น้ำมันปาล์มถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเอสเทอร์ เนื่องจากปาล์มมีการเพาะปลูกในหลายภูมิภาค เป็นพืชเศรษฐกิจที่มีผลผลิตตลอดปี และมีปริมาณน้ำมันต่อพื้นที่การผลิตมากกว่าพืชชนิดอื่น ๆ เช่น ถั่วเหลือง ทานตะวัน เมล็ดเรพ ฯลฯ โดยเอสเทอร์ที่ถูกสังเคราะห์และผสมกับน้ำมันดีเซลในปัจจุบันเป็นเมทิลเอสเทอร์ ซึ่งถูกสังเคราะห์จากเมทานอล เนื่องจากเมทานอลหาได้ง่าย มีราคาถูก การทำปฏิกิริยาไม่ซับซ้อน ทำให้บริสุทธิ์ได้ง่าย แต่เนื่องจากเมทานอลผลิตจากการกลั่นปิโตรเลียม และมีความเป็นพิษสูง (Venkateswara, 2016; Noipin & Kumar, 2014) ถ้ามีการรั่วไหลใด ๆ สามารถนำไปสู่อันตรายขั้นร้ายแรงได้ และเสนอว่าควรรหาแอลกอฮอล์ประเภทอื่นทดแทนเมทานอล

เพื่อลดการใช้เมทานอล นักวิจัยจากหลากหลายสถาบัน จึงสนใจพัฒนาเอสเทอร์อีกประเภท นั่นคือ เอทิลเอสเทอร์ ซึ่งถูกสังเคราะห์จากการใช้เอทานอล ซึ่งผลิตจากการหมักพืชผลทางการเกษตรภายในประเทศ และมีความเป็นพิษต่ำกว่าเมทานอล โดย Patchana & Santikunaporn, (2012) สังเคราะห์ POEE จากน้ำมันปาล์มและเอทานอลที่ปราศจากน้ำร้อยละ 99.9 และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา KOH ร้อยละ 1 อัตราส่วนโมลของเอทานอลต่อน้ำมันปาล์มที่เหมาะสมคือ 9:1 ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาในช่วง 30 ถึง 45 นาที โดยมีปริมาณของ POEE ร้อยละ 96.5 Noipin & Kumar, (2014) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาระหว่าง 40 ถึง 75 °C อัตราส่วนโมลของเอทานอลต่อน้ำมันปาล์มระหว่าง 6:1 ถึง 18:1 โดยใช้ KOH ระหว่างร้อยละ 0.4 ถึง 2.0 โดยน้ำหนัก พบว่า มีปริมาณของ POEE เกิดขึ้นมากที่สุดเมื่ออุณหภูมิการทำปฏิกิริยาสูงกว่า 60 °C และใช้ KOH ประมาณร้อยละ 0.5 ถึง 0.8 โดยน้ำหนัก

สำหรับการประยุกต์ใช้ POEE ในเครื่องยนต์ดีเซลนั้น Santasnachok *et al.*, (2018) สังเคราะห์ POEE จากอัตราส่วนโมลของ เอทานอลที่ปราศจากน้ำร้อยละ 99.9 ต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 60 °C โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ (NaOH) 7 g ละลายในเอทานอล 217.38 g ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาในช่วง 60 นาที มีปริมาณของ POEE ร้อยละ 99.95 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง 39.87 MJ/kg และค่าความหนาแน่น 873 kg/m<sup>3</sup> ทำการทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ณ ภาระงานสูงสุด พบว่า มีกำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพทางไฟฟ้าลดลง ขณะที่ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิของก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้น Ghazanfari *et al.*, (2017) สังเคราะห์ POEE จากอัตราส่วนโมลของเอทานอลที่ปราศจากน้ำต่อน้ำมันจากเนื้อปาล์ม 6:1 อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 70 °C และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NaOH ร้อยละ 0.1 ต่อน้ำหนักของน้ำมัน ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 30 นาที มีปริมาณ POEE สูงสุดร้อยละ 99 หลังจากนั้น ตรวจสอบกำลังงานของเครื่องยนต์ดีเซลแบบฉีดตรง หนึ่งสูบสี่จังหวะ ที่ความเร็วรอบ 1,500 rpm ณ ภาระงานต่าง ๆ โดยใช้ POEE เทียบกับน้ำมันดีเซล พบว่า กำลังงานลดลงเล็กน้อย แต่ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ มีการตรวจสอบสมรรถนะและการปล่อยสารมลพิษของเครื่องยนต์ดีเซลแบบฉีดตรงหนึ่งและสี่สูบ ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ณ ภาระงานสูงสุด โดยใช้เอทิลเอสเทอร์สังเคราะห์จากอัตราส่วนโมลของเอทานอลปราศจากน้ำร้อยละ 99.5 ถึง 99.9 ต่อน้ำมันพืชทานได้ (ได้แก่ ดอกทานตะวัน, ถั่วเหลือง, เรพซิด และมะพร้าว) และน้ำมันพืชทานไม่ได้ (ได้แก่ Karanja, Canola, Nerium, เม็ดฝ้าย, สนุ่นดำ และน้ำมันพืชใช้แล้ว) ระหว่าง 6:1 ถึง 12:1 อุณหภูมิการ

ทำปฏิกิริยาระหว่าง 40 ถึง 75 °C และตัวเร่งปฏิกิริยา คือ โพแทสเซียมเมทอกไซด์ ( $KCH_3O$ ), โซเดียมเอธิลออกไซด์ ( $NaCH_3O$ ) และ NaOH พบว่า ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (BSFC) สูงกว่า และประสิทธิภาพทางความร้อนต่ำกว่าน้ำมันดีเซล (Santasnachok *et al.*, 2018; Tamilselvan *et al.*, 2017; Shahir *et al.*, 2015)

อย่างไรก็ตาม Mendow *et al.*, (2011) นำเสนอว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $KCH_3O$  จะได้ผลดีกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $NaCH_3O$ , KOH และ NaOH โดยช่วยลดปริมาณไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในเอทิลเอสเทอร์ในปริมาณมาก นอกจากนี้ Tamilselvan *et al.*, (2017), Othman *et al.*, (2017) และ Shahir *et al.*, (2015) นำเสนอการสังเคราะห์เอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันพืชใช้แล้วและเอทานอลมีน้ำหรือไฮดรอลิเอทานอลนั้น ให้ปริมาณเอทิลเอสเทอร์ลดลงเล็กน้อย แต่ผลการทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซล พบว่า สมรรถนะของเครื่องยนต์ลดลงเมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล ยิ่งไปกว่านั้น การใช้เอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลที่ติดตั้งภายในรถยนต์นั้น มุ่งเน้นไปที่เมทิลเอสเทอร์โดยส่วนใหญ่ ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการสังเคราะห์เอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ทำปฏิกิริยากับเอทานอลที่ปราศจากน้ำร้อยละ 99.9 และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $KCH_3O$  หลังจากนั้นจะตรวจสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิง และคุณลักษณะของสมรรถนะและการปล่อยสารมลพิษต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ดีเซลที่ติดตั้งในรถยนต์กระบะบนแท่นทดสอบ โดยใช้ น้ำมัน POEE บริสุทธิ์ และ POEE ผสมกับน้ำมันดีเซล เทียบกับน้ำมันดีเซลมาตรฐาน

## วิธีดำเนินการวิจัย

### (1) ขั้นตอนการเตรียมปาล์มเอทิลเอสเทอร์

งานวิจัยนี้มีการเตรียมกระบวนการผลิตปาล์มเอทิลเอสเทอร์ (POEE) ภายในห้องปฏิบัติการวิจัยเชื้อเพลิงและพลังงานชีวมวล ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา โดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชันจากการนำน้ำมันปาล์มโอดีอินจากเนื้อปาล์มเป็นวัตถุดิบ ซึ่งมีส่วนประกอบของกรดไขมันต่าง ๆ ดังตารางที่ 1

ขั้นตอนแรก เริ่มต้นจากการนำน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์มากำจัดความชื้นที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลาประมาณ 30 นาที จากนั้นเตรียมเอทานอลเพื่อใช้ในการทำปฏิกิริยา โดยเอทานอลที่ใช้เป็นเอทานอลปราศจากน้ำร้อยละ 99.9 และใช้โพแทสเซียมเมทอกไซด์ ( $KCH_3O$ ) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยกำหนดสัดส่วนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $KCH_3O$  ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มละลายในเอทานอลปริมาณ 7 mmol ผสมให้เข้ากันในเวลาประมาณ 30 นาที โดยใช้อัตราส่วนโมลของเอทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 และทำการกวนเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอย่างทั่วถึงเป็นเวลา 60 นาที ด้วยอัตราการกวน 500 rpm โดยใช้เครื่องรีแอกเตอร์แบบใช้ใบกวน ดังแสดงในภาพที่ 1 (ก) และควบคุมอุณหภูมิในช่วงนี้ลดลงเหลือ 65 °C โดยศึกษาจากงานวิจัย (Noipin & Kumar, 2014; Santasnachok *et al.*, 2018) หลังจากนั้น นำใส่กรวยแยกได้ POEE และกลีเซอริน ซึ่งจะแยกชั้นออกจากชั้น POEE โดยแยกตัวตกลงมาด้านล่างดังภาพที่ 1 (ข) ซึ่งแสดงการแยกชั้นระหว่าง POEE และกลีเซอรินในกรวยแยกน้ำมันที่ทำปฏิกิริยาไม่หมด ดังนั้น จึงต้องทำหยุดปฏิกิริยาโดยเติมกรดไฮโดรคลอริกร้อยละ 10 และใช้น้ำสะอาดล้าง 4 ครั้ง เพื่อล้างกรดใน POEE ให้เป็นกลาง และขั้นสุดท้ายจะขจัดน้ำที่หลงเหลือในชั้น POEE ออก โดยการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 20 นาที หลังจากนั้น ทำการตรวจสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิง โดยใช้แก๊สโครมาโตกราฟี (Gas chromatography, GC) และอ้างอิงตามมาตรฐาน EN 14103 เพื่อหาปริมาณ POEE ขณะที่งานวิจัยนี้ ทำการสังเคราะห์ทั้งหมด 8 ครั้ง และนำไปทดสอบ GC เพื่อหาปริมาณ POEE เหลือ

โดยเอสเทอร์ที่สามารถนำไปใช้งานได้นั้น จะต้องมีควมบริสุทธิ์อยู่ระหว่างร้อยละ 97 ถึง 100 (Santasnachok *et al.*, 2018) ขณะที่ผลการทดสอบ GC แสดงในภาพที่ 2 ซึ่งแสดงร้อยละของเอทิลเอสเทอร์ (Percent of ethyl ester) ที่สังเคราะห์จำนวนทั้งหมด (Number of analysis) 8 ครั้ง ผลลัพธ์ที่ได้พบว่า ปริมาณของ POEE อยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 97.36 ถึง 99.97 โดยงานวิจัยนี้ พบว่าการใช้อัตราส่วนโมลของเอทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6:1 มีระยะเวลาการทำปฏิกิริยา

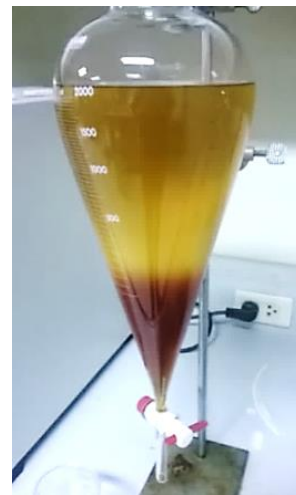
ที่เหมาะสมคือ 60 นาที และอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมคือ 65 °C โดยมีค่าของ POEE เฉลี่ยร้อยละ 98.53 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานและมีผลลัพท์ใกล้เคียงกับงานวิจัยในอดีต (Noipin & Kumar, 2014; Patchana & Santikunaporn, 2012)

**ตารางที่ 1** องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันปาล์มไฮลิอิน (Koushki *et al.*, 2015)

กรดไขมัน	จำนวนของ C	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ลอริก	C12:0	0.1-0.5
ไมริสติก	C14:0	0.9-1.4
ปาล์มิติก	C16:0	37.9-41.7
ปาล์มิทอเลอิก	C16:1	0.1-0.4
สเตียริก	C18:0	4.0-4.8
โอเลอิก	C18:1	40.7-43.9
ไลโนเลอิก	C18:2	10.4-13.4
ไลโนเลนิก	C18:3	0.1-0.6
อะราซิโดนิก	C20:0	0.2-0.5



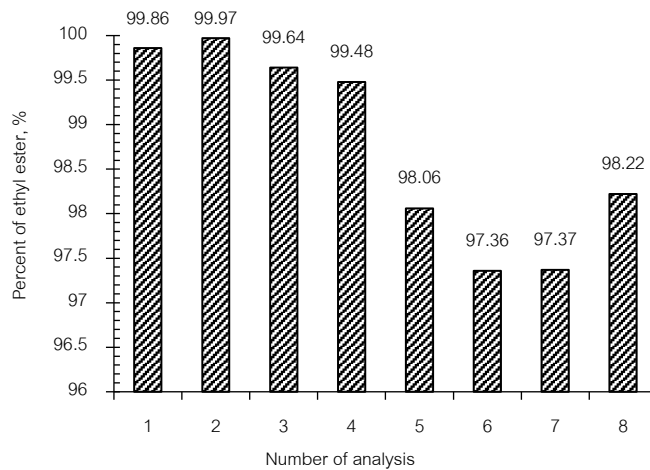
(ก) การเกิดปฏิกิริยา



(ข) การแยกชั้น

**ภาพที่ 1** การสังเคราะห์ POEE

ต่อมา ดำเนินการตรวจสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของเชื้อเพลิง ได้แก่ ค่าความหนาแน่น (Density) ค่าความหนืด (Viscosity) และค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (Low heating value, LHV) โดยใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D1298, ASTM D445 และ ASTM D 240 ตามลำดับ สำหรับน้ำมัน POEE บริสุทธิ์ (B100) และน้ำมันดีเซลผสม POEE ร้อยละ 10 ถึง 50 (B10 ถึง B50) เทียบกับน้ำมันดีเซลมาตรฐาน (D100) ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งแสดงการตรวจสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิง และมีการเปรียบเทียบกับคุณสมบัติเชื้อเพลิงจากการสังเคราะห์ POEE<sup>a</sup> และขอบเขตของการนำไปใช้งาน<sup>b</sup> โดยที่ a แสดงขีดจำกัดของคุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงจากการผลิตไบโอดีเซลจากแหล่งต่าง ๆ ภายในประเทศไทย และ b แสดงขอบเขตของคุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลภายในประเทศไทยจากงานวิจัย (Noipin & Kumar, 2014)



ภาพที่ 2 ปริมาณ POEE ที่สังเคราะห์จากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์

ตารางที่ 2 การตรวจสอบคุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิง

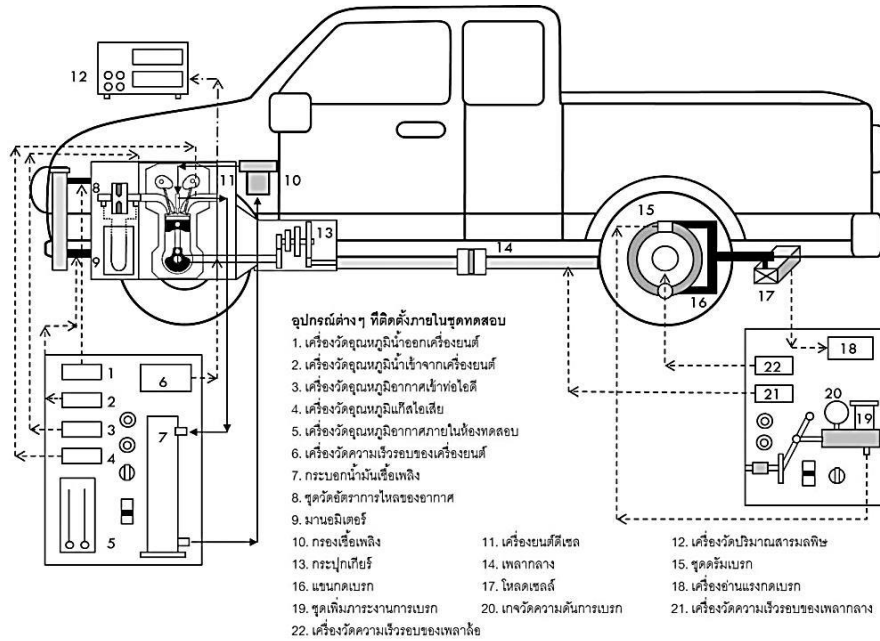
รายละเอียด	ASTM	D100	B10	B20	B30	B40	B50	B100	POEE <sup>a</sup>	ขอบเขต <sup>b</sup>
Density @ 15°C, kg/m <sup>3</sup>	D1298	826	838	840	841	846	848	870	872.3	860-900
Viscosity @ 40°C, mm <sup>2</sup> /s	D445	2.8	3.0	3.1	3.3	3.4	3.5	4.8	4.9	1.9-8.0
LHV, MJ/kg	D 240	44.03	42.96	42.42	41.57	40.34	40.91	39.38	40.22	-

ผลลัพธ์ที่ได้พบว่า ค่าความหนาแน่นของ B10 ถึง B50 เพิ่มขึ้นร้อยละ 1.45 ถึง 2.66 ตามอัตราส่วนของ POEE ที่เพิ่มขึ้น และค่าความหนาแน่นของ B100 เพิ่มขึ้นร้อยละ 5.33 ขณะที่เปรียบเทียบกับงานวิจัย Noipin & Kumar, (2014) พบว่าการสังเคราะห์ B100 ในงานวิจัยนี้มีค่าความหนาแน่นน้อยกว่าร้อยละ 0.26 แต่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานซึ่งอยู่ในช่วงระหว่าง 860 ถึง 900 kg/m<sup>3</sup> สำหรับการเปรียบเทียบค่าความหนืดของเชื้อเพลิงพบว่า B10 ถึง B50 มีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นร้อยละ 7.1 ถึง 25.0 ตามอัตราส่วนของ POEE ที่เพิ่มขึ้น และค่าความหนืดของ B100 เพิ่มขึ้นร้อยละ 71.43 ขณะที่เปรียบเทียบกับงานวิจัย Noipin & Kumar, (2014) พบว่า การสังเคราะห์ B100 ในงานวิจัยนี้มีค่าความหนืดน้อยกว่าร้อยละ 2.04 แต่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานซึ่งอยู่ในช่วงระหว่าง 1.9 ถึง 8.0 mm<sup>2</sup>/s และสุดท้าย การเปรียบเทียบค่าความร้อนของเชื้อเพลิงพบว่า B10 ถึง B50 มีค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงลดลงร้อยละ 2.43 ถึง 7.09 ตามอัตราส่วนของ POEE ที่เพิ่มขึ้น และ B100 มีค่าความร้อนของเชื้อเพลิงลดลงร้อยละ 10.56 ขณะที่เปรียบเทียบกับงานวิจัย Noipin & Kumar, (2014) พบว่า การสังเคราะห์ B100 ในงานวิจัยนี้มีค่าความร้อนของเชื้อเพลิงน้อยกว่าร้อยละ 0.87

**(2) ชุดทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซล**

การทดสอบสมรรถนะและการปล่อยสารมลพิษต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ดีเซลนั้น มีการจัดทำชุดทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซล โดยการดัดแปลงรถยนต์กระบะของบริษัทฟอร์ด รุ่น Ranger ติดตั้งบนแท่นทดสอบ เพื่อจัดทำเป็นชุดทดสอบดังกล่าว และทดสอบ ณ ห้องปฏิบัติการวิจัย Automotive biofuels and combustion engineering research laboratory ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ดังแสดงในภาพที่ 3 ซึ่งแสดงชุดทดสอบ

สมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลภายในรถยนต์กระบะและทำการติดตั้งเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยเครื่องยนต์ดีเซล (รุ่น FORD Ranger 2009, แบบฉีดตรง 4 สูบ 4 จังหวะ, อัตราส่วนการอัด 18:1, ความจุ 2,500 cc, และกำลังงานสูงสุด 115 hp ที่ความเร็วรอบ 3,200 rpm) ต่อกับระบบขับเคลื่อนล้อหลังที่ใช้ระบบเกียร์กลไก 5 เกียร์



ภาพที่ 3 ชุดทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลภายในรถยนต์กระบะ

โดยส่วนหน้าของรถยนต์นั้น เครื่องยนต์ดีเซลถูกต่อกับหม้อน้ำของรถยนต์ และติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล (ชนิดของได้แบบ K ขนาดของไส้ 0.65 mm และมีอุณหภูมิใช้งานสูงสุด 1300 °C) ต่อกับเครื่องควบคุมอุณหภูมิ LT400-101000 เพื่อตรวจสอบอุณหภูมิต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิของอากาศเข้าท่อไอเสีย (หมายเลข 3) อุณหภูมิของแก๊สไอเสีย (หมายเลข 4) อุณหภูมิทางเข้าและออกของระบบหล่อเย็น (หมายเลข 1 และ 2) และอุณหภูมิห้องทดสอบ (หมายเลข 5) ขณะที่การตรวจสอบความเร็วรอบของเครื่องยนต์ เพื่อคำนวณกำลังงานของเครื่องยนต์ และความเร็วรอบของเพลากลาง และเพลาล้อของรถยนต์ เพื่อคำนวณอัตราทดอัตราเร็ว และกำลังขับเคลื่อนนั้น ใช้เครื่องแสดงผลแบบดิจิตอล รุ่น PM digital indicator RPM meter ที่มีความเที่ยงตรงในการวัด  $\pm 0.05\%$  (หมายเลข 6) ต่อกับ Proximity switch รุ่น SC40P-AE-35 NC ของบริษัท AECO ที่มีระยะตรวจจับ 0-35 mm ความไวในการทำงาน 10 Hz และ ระยะทำซ้ำ <math>< 10\%</math> SN นอกจากนี้มีการติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหลเชื้อเพลิงโดยใช้ระบบท่อเชื้อเพลิง (หมายเลข 7) ขนาด 500 ml และอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศโดยใช้เครื่องวัดอัตราการไหลแบบออร์ฟิตต่อกับมานอมิเตอร์ (หมายเลข 8)

ส่วนท้าย มีการติดตั้งอุปกรณ์วัดปริมาณสารมลพิษต่าง ๆ ได้แก่ CO<sub>2</sub>, CO, HC, NO โดยใช้เครื่อง Eurogas emission analyzer ของบริษัท Motorscan รุ่น 8020 (หมายเลขที่ 12) ซึ่งเป็นเครื่องวิเคราะห์ห้องคัพประกอบแก๊สไอเสียโดยใช้การแผ่รังสี (IR Bench) ช่วยในการวิเคราะห์ปริมาณการปลดปล่อยของ CO<sub>2</sub>, CO และ HC ส่วนการวัดปริมาณของ NO ใช้การวิเคราะห์แบบ Electrochemical cell ดังแสดงตารางที่ 3 ซึ่งแสดงรูปแบบการวัดและความละเอียดของเครื่องวิเคราะห์ห้องคัพประกอบแก๊สไอเสียโดยใช้ร่วมกับเครื่องมือวัดปริมาณควันดำ (Smoke meter) ของบริษัท Motorscan รุ่น 9010 เพื่อวัดความเข้มของควันดำ (Smoke opacity) ซึ่งใช้ระบบการวัดความทึบแสงแบบไหลผ่านบางส่วนและต่อเนื่อง สำหรับการเพิ่มภาระงานกับเครื่องยนต์นั้น มีการดัดแปลงชุดระบบเบรกล้อหลังของรถยนต์คันดังกล่าว เพื่อจัดทำ

ไดนาโมมิเตอร์แบบความเสียดทาน โดยการใช้ชุดแม่ปั๊มเบรก (หมายเลข 19) ต่อกับเกจวัดความดัน (หมายเลข 20) และชุดตรัมเบรกที่ล้อหลังของรถยนต์ (หมายเลข 15) โดยการเพิ่มภาระงาน จะใช้แรงเบรกสูงสุด และทำการบันทึกค่าแรงเบรกจากเครื่องอ่านน้ำหนักที่มีความละเอียด 0.001 kg ซึ่งต่อกับโหลดเซลล์รุ่น ZEGA KBQS-A แบบ Shear beam compression ขนาด 5 ตัน (หมายเลข 17) ที่ติดตั้งกับแกนกดเบรก (หมายเลข 16) เพื่อนำไปคำนวณค่าทอร์กสูงสุด

### ตารางที่ 3 รูปแบบและความละเอียดของการวิเคราะห์แก๊สไอเสีย

สารมลพิษ	รูปแบบการวัด	ความละเอียดและถูกต้อง
CO, %vol	IR Bench	0.01±2%
CO <sub>2</sub> , %vol	IR Bench	0.01±2%
HC, ppm vol	IR Bench	1±2%
NO, % vol	Electrochemical cell	1±2%
Black smoke, Km <sup>-1</sup>	Opacity	0.1±2%

### (3) วิธีการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์

เริ่มต้นจากการอุ่นเครื่องยนต์เป็นเวลา 15 นาที ในตำแหน่งเกียร์ว่าง เพื่อให้เครื่องยนต์มีสภาวะการทำงานคงที่ โดยตรวจสอบจากอุณหภูมิหล่อเย็นคงที่ 80±5 °C (หมายเลข 1 และ 2) ต่อมา ทำการทดสอบสมรรถนะและการปล่อยสารมลพิษต่าง ๆ โดยกำหนดสภาวะการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4

### ตารางที่ 4 สภาวะการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์

รายการ	สภาวะที่กำหนด
ความเร็วรอบของเครื่องยนต์, rpm	1,500-3,000±50
ภาระงาน	ทอร์กสูงสุด
เชื้อเพลิงที่ทดสอบ	D100/ B10/ B20/ B30/ B40/ B50/ B100
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น, °C	80±5
อุณหภูมิห้องทดสอบ, °C	32±3
ปริมาณเชื้อเพลิง, ml	20

เริ่มต้นจากการใช้ D100 และปรับตำแหน่งเกียร์ 5 โดยใช้แรงเบรกสูงสุด และควบคุมความเร็วรอบคงที่ 1,500±50 rpm ตลอดการทดสอบ หลังจากนั้น บันทึกข้อมูลต่าง ๆ ได้แก่ ความเร็วรอบเครื่องยนต์ ความเร็วรอบเพลากลาง ความเร็วรอบเพลาท้าย แรงเบรก อัตราการไหลของน้ำมัน อุณหภูมิต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิอากาศเข้าที่อ้อมไอดี อุณหภูมิหล่อเย็น และอุณหภูมิแก๊สไอเสีย และวัดปริมาณของ CO<sub>2</sub>, CO, HC, NO และควันดำ เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะและการปล่อยสารมลพิษของเครื่องยนต์ ต่อมาทดสอบที่ความเร็วรอบ 2,000±50 rpm จนถึง 3,000±50 rpm โดยใช้แรงเบรกสูงสุด และบันทึกข้อมูลต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมา หลังจากนั้น เปลี่ยนน้ำมันเชื้อเพลิง โดยใช้ B10 จนถึง B50 และ B100 โดยใช้เงื่อนไขการทดสอบเดียวกับการใช้ D100 และวิเคราะห์ข้อมูลต่าง ๆ ตามที่กล่าวมา

ทั้งหมดเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสมรรถนะของเครื่องยนต์ ได้แก่ กำลังงานเบรก ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก และประสิทธิภาพทางความร้อนเบรก

(4) การวิเคราะห์ข้อมูล

การศึกษาสมรรถนะเครื่องยนต์ อ้างอิงจาก (Ryborz, 1999; Stone & Ball, 2004) โดยการตรวจสอบทอร์กสูงสุด (Maximum torque,  $\tau_{max}$ ), กำลังงานเบรก (Brake power,  $p_b$ ), ประสิทธิภาพทางความร้อนเบรก (Brake thermal efficiency,  $BTE$ ), และความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (Brake specific fuel consumption,  $BSFC$ ) โดยคำนวณจากสมการดังนี้

$$\tau_w = F_b \cdot r \tag{1}$$

$$\tau_e = \frac{100 \cdot \tau_w}{\eta_i \cdot i_g \cdot i_f} \tag{2}$$

$$p_b = \frac{2\pi \cdot N_e}{60} \tag{3}$$

$$BTE = \frac{P_b}{m_f \cdot LHV} \tag{4}$$

$$BSFC = \frac{m_f}{P_b} \tag{5}$$

โดยที่

- $\tau_w$  = ทอร์กขับเคลื่อน (N.m)
- $F_b$  = แรงเบรกสูงสุด (N)
- $r$  = รัศมีของล้อรถยนต์ (m)
- $\tau_e$  = ทอร์กของเครื่องยนต์ (N.m)
- $\eta_i$  = ประสิทธิภาพของการส่งกำลัง (%) ขณะที่ใช้กระปุกเกียร์แบบกลไกร้อยละ 85 (Stone & Ball, 2004)
- $i_g$  = อัตราทดเกียร์
- $i_f$  = อัตราทดเฟืองท้าย
- $N_e$  = ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (rpm)
- $m_f$  = อัตราการไหลของเชื้อเพลิง (kg/sec)
- $LHV$  = ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (MJ/kg)

**ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล**

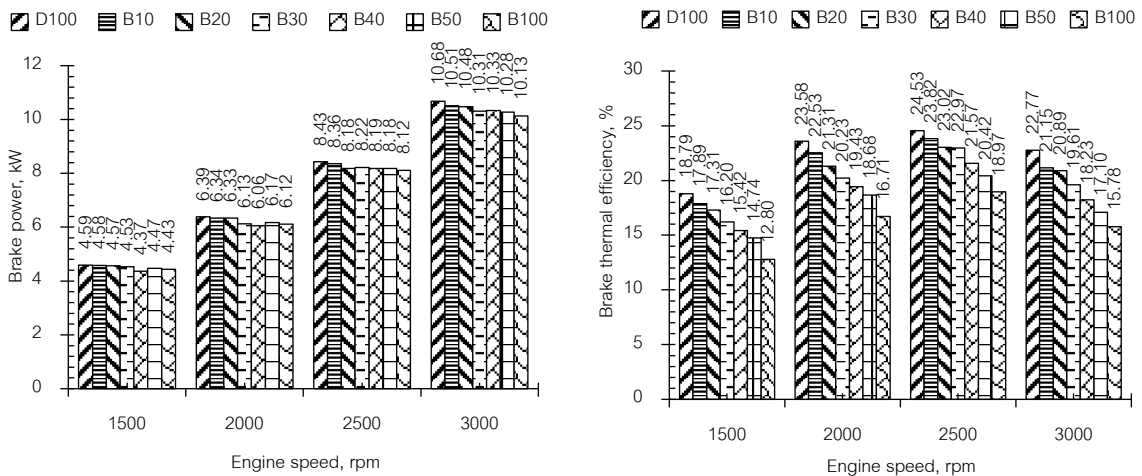
จากการทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลที่ติดตั้งภายในรถยนต์กระบะบนแท่นทดสอบ โดยใช้ POEE บริสุทธิ์ และเชื้อเพลิงผสมระหว่าง POEE กับ D100 เทียบกับ D100 ที่ความเร็วรอบ 1,500-3,000±50 rpm ณ ทอร์กสูงสุด มีผลการวิจัยต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

(1) กำลังงานเบรก

กำลังงานเบรกของเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ณ ทอร์กสูงสุด เมื่อใช้ B10 ถึง B50 และ B100 เทียบกับ D100 ถูกแสดงในภาพที่ 4 (ก) พบว่า กำลังงานเบรกเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่เพิ่มขึ้น สำหรับการันใช้ B10



ถึง B50 กำลังเบรกมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แต่การใช้ B100 พบว่า กำลังงานเบรกลดลง โดยที่ความเร็วรอบต่ำสุด การ  
ใช้ B10 ถึง B50 มีกำลังงานเบรกลดลงร้อยละ 0.28 ถึง 2.70 และการใช้ B100 มีกำลังงานเบรกลดลงร้อยละ 3.41 และที่  
ความเร็วรอบสูงสุด พบว่า การใช้ B10 ถึง B50 ทำให้กำลังงานเบรกลดลงร้อยละ 1.58 ถึง 3.79 และการใช้ B100 มีกำลัง  
งานเบรกลดลงร้อยละ 5.18 เมื่อเทียบกับ D100 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย (Santasnachok *et al.*, 2018; Ghazanfari  
*et al.*, 2017) เนื่องจากค่าความร้อนของ POEE น้อยกว่าน้ำมันดีเซลดังแสดงในตารางที่ 2 ทำให้กำลังงานเบรกลดลง และ  
ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้ B10 และ B20 มีการเปลี่ยนแปลงกำลังงานที่ให้ออกมาเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ  
B100 ดังนั้น ในการใช้งานจริง ไม่ควรผสม POEE มากกว่าร้อยละ 20



(ก) กำลังงานเบรก

(ข) ประสิทธิภาพทางความร้อนเบรก

ภาพที่ 4 กำลังงานเบรกและประสิทธิภาพทางความร้อนเบรกที่ความเร็วรอบต่างๆ

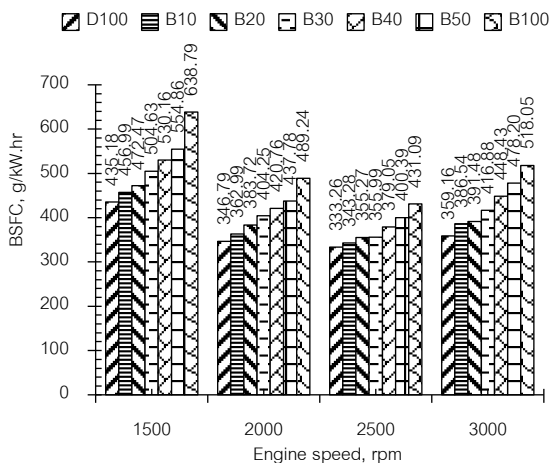
## (2) ประสิทธิภาพทางความร้อนเบรก

ประสิทธิภาพทางความร้อนเบรก (Brake thermal efficiency, *BTE*) ที่ความเร็วรอบต่างๆ ถูกแสดงในภาพที่ 4  
(ข) พบว่า ค่า *BTE* เพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบของเครื่องยนต์จนถึงความเร็วรอบ 2,500 rpm ซึ่งเป็นความเร็วรอบเหมาะสม  
ที่ให้ค่า *BTE* สูงสุด สำหรับการใช้ B10 ถึง B50 และ B100 เทียบกับ D100 พบว่า ค่า *BTE* ลดลงตามปริมาณของ  
POEE ที่เพิ่มขึ้น และลดลงทุกความเร็วรอบของเครื่องยนต์ โดยที่การใช้ B10 ถึง B50 ที่ความเร็วรอบ 2,500 rpm พบว่า  
ค่า *BTE* ลดลงร้อยละ 0.72 ถึง 4.11 และการใช้ B100 มีค่า *BTE* ลดลงร้อยละ 5.57 เมื่อเทียบกับ D100 โดยผลการวิจัย  
นี้สอดคล้องกับงานวิจัย (Santasnachok *et al.*, 2018; Vieira da Silva *et al.*, 2017; Sakthivel *et al.*, 2014; Jeffrey &  
Subramanian, 2014) เนื่องจากค่าความร้อนของเชื้อเพลิงลดลงตามการเพิ่มส่วนผสมของ POEE และ POEE มีออกซิเจน  
(O<sub>2</sub>) เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของเชื้อเพลิง ส่งผลให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงนี้และอากาศมีความ  
สมบูรณ์มากขึ้น ทำให้การเผาไหม้ในช่วง Premixed combustion เพิ่มขึ้น และมีการสูญเสียงานในช่วงจังหวะขยาย  
(Work in expansion stroke) บางส่วนไปกับการถ่ายเทความร้อนมากขึ้น ส่งผลให้งานสุทธิภายในกระบอกสูบลดลง  
นอกจากนี้ เพื่อให้กำลังงานออกมาใกล้เคียงกับการใช้น้ำมันดีเซล ส่งผลให้มีการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ทำให้  
ประสิทธิภาพทางความร้อนลดลง และจากผลการทดลองนี้ แสดงให้เห็นว่า การใช้ B10 มีการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพ  
ทางความร้อนเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ B20 ซึ่งลดลงถึงร้อยละ 1.51 เมื่อเทียบกับ D100 ดังนั้น B10 จึงเหมาะสมที่จะใช้  
เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในอนาคต อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ต้องการเพิ่มอัตราส่วนผสมของไบโอดีเซลมากกว่าร้อยละ 10

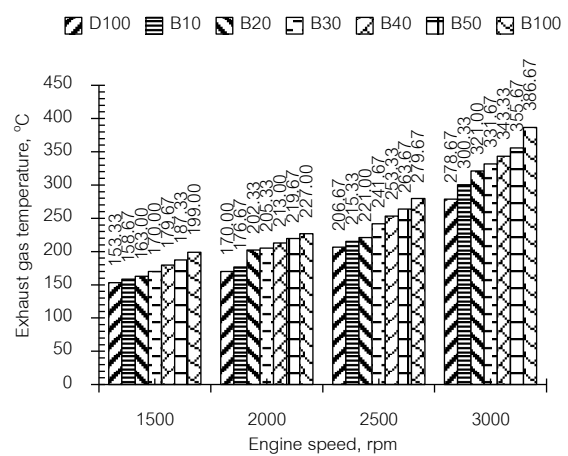
ควรปรับจังหวการทำงานของปั๊มเชื้อเพลิง เพื่อเปลี่ยนแปลงจังหวการทำงานฉีดเชื้อเพลิง หรือควรรุ่นน้ำมัน เพื่อลดค่าความหนืดของไบโอดีเซล ซึ่งทั้งสองวิธีนี้ สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพทางความร้อนให้ใกล้เคียงกับ D100 และเป็นการเพิ่มส่วนผสมของไบโอดีเซลในปริมาณที่สูงขึ้น (Tamilselvan *et al.*, 2017; Othman *et al.*, 2017; Shahir *et al.*, 2015)

### (3) ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก

ภาพที่ 5 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (Brake specific fuel consumption, *BSFC*) และความเร็วยกต่าง ๆ พบว่า ค่า *BSFC* ลดลงตามความเร็วยกของเครื่องยนต์จนถึงความเร็วยก 2,500 rpm ซึ่งเป็นความเร็วยกเหมาะสมที่ให้ค่า *BSFC* ต่ำสุด ขณะที่ผลการตรวจสอบค่า *BSFC* เมื่อใช้ B10 ถึง B50 เทียบกับ D100 พบว่า ค่า *BSFC* เพิ่มขึ้นตามปริมาณของ POEE ที่เพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นทุกความเร็วยกของเครื่องยนต์ พิจารณาที่ความเร็วยก 2,500 rpm พบว่า การใช้ B10 ถึง B50 มีค่า *BSFC* เพิ่มขึ้นร้อยละ 3.00 ถึง 20.14 ขณะที่ B100 มีค่า *BSFC* เพิ่มขึ้นร้อยละ 29.35 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย (Santasnachok *et al.*, 2018; Vieira da Silva *et al.*, 2017; Sakthivel *et al.*, 2014; Jeffrey & Subramanian, 2014) เนื่องจากการเพิ่มการผสมของ POEE ทำให้ค่าความหนาแน่นและค่าความหนืดของน้ำมันสูงกว่า และค่าความร้อนของเชื้อเพลิงต่ำกว่า D100 ทำให้อัตราการใช้เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ยิ่งไปกว่านั้น ผลกระทบจากการเผาไหม้ในช่วง Premixed combustion รวดเร็วขึ้นเพราะความเข้มข้นของ  $O_2$  ช่วยการเผาไหม้ดีขึ้น ส่งผลให้งานสุทธิภายในกระบอกสูบลดลง ทำให้กำลังงานที่ให้ออกมาจากการใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่าง POEE กับ D100 ลดลง ในขณะที่การรับภาระงานใกล้เคียงกับ D100 ส่งผลให้มีการใช้เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น และค่า *BSFC* จึงเพิ่มขึ้น ขณะที่การใช้ B10 มีค่า *BSFC* เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับค่า *BTE* ดังนั้น B10 จึงเหมาะสมที่จะใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในอนาคต



(ก) ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก



(ข) อุณหภูมิแก๊สไอเสีย

ภาพที่ 5 ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกและอุณหภูมิแก๊สไอเสียที่ความเร็วยกต่างๆ

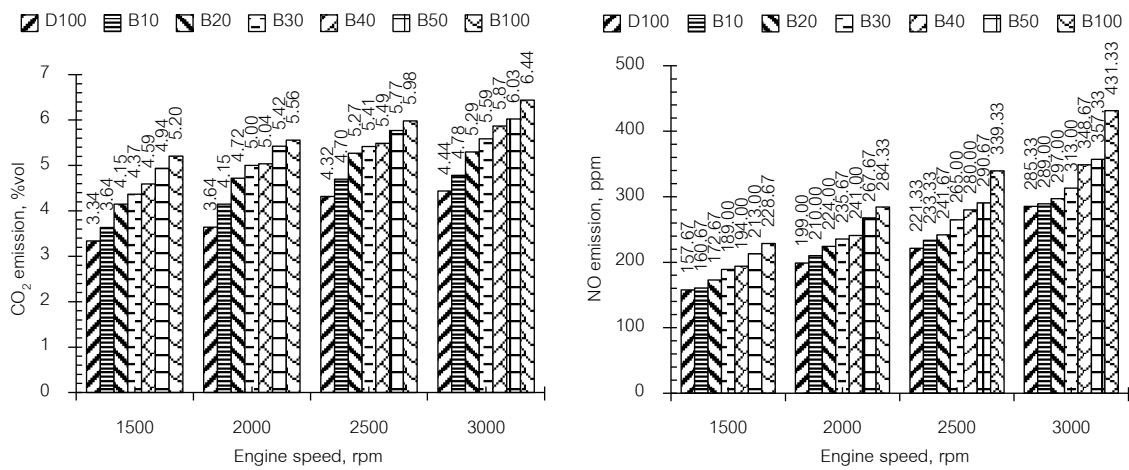
### (4) อุณหภูมิแก๊สไอเสีย

ภาพที่ 5 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแก๊สไอเสีย (Exhaust gas temperature,  $T_{exh}$ ) ที่ความเร็วยกต่าง ๆ พบว่า ค่า  $T_{exh}$  เพิ่มขึ้นตามความเร็วยกที่เพิ่มขึ้น และค่า  $T_{exh}$  เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณของ POEE ในน้ำมันเชื้อเพลิงผสมทุกความเร็วยกของเครื่องยนต์ ขณะที่ผลการตรวจสอบที่ความเร็วยก 2,500 rpm ซึ่งเป็นความเร็วยกที่ให้ค่า *BTE* สูงสุด และค่า *BSFC* ต่ำสุด แสดงให้เห็นว่า การใช้ B10 ถึง B50 ให้ค่า  $T_{exh}$  เพิ่มขึ้นร้อยละ 4.19 ถึง 27.58

และการใช้ B100 ทำให้ค่า  $T_{exh}$  เพิ่มขึ้นร้อยละ 35.32 เทียบกับ D100 โดยผลการทดสอบนี้ สอดคล้องกับงานวิจัย (Sutheerasak & Chinwanitcharoen, 2018; Santasnachok *et al.*, 2018; Sakthivel *et al.*, 2014; Mohod *et al.*, 2013) เนื่องจากความเข้มข้นของ  $O_2$  ที่สูงขึ้นตามการเพิ่มปริมาณของ POEE ทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้นในช่วง Premixed combustion ส่งผลให้อุณหภูมิการเผาไหม้เพิ่มขึ้น และอีกเหตุผลคือ การเพิ่มปริมาณของ POEE ทำให้ค่าความหนืดและแรงตึงผิว (Surface tension) สูงขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้ในช่วง Diffusion combustion เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง และสิ้นสุดการเผาไหม้เมื่อวาล์วไอเสียเปิด โดยทั้งสองสาเหตุนี้ นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิแก๊สไอเสีย

**(5) ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์**

ภาพที่ 6 (ก) แสดงผลการตรวจสอบปริมาณคาร์บอน ไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ พบว่า ปริมาณของ  $CO_2$  เพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้น ขณะที่การใช้ B10 ถึง B50 และ B100 เทียบกับ D100 พบว่า ปริมาณของ  $CO_2$  เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณของ POEE และเมื่อพิจารณาที่ความเร็วรอบ 2,500 rpm พบว่า การใช้ B10 ถึง B50 มีปริมาณ  $CO_2$  เพิ่มขึ้นร้อยละ 8.71 ถึง 33.59 และการใช้ B100 มีปริมาณ  $CO_2$  เพิ่มขึ้นร้อยละ 38.47 เทียบกับ D100 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย (Sutheerasak & Chinwanitcharoen, 2018) เนื่องจาก POEE มี  $O_2$  เป็นองค์ประกอบช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น ผลลัพธ์ที่ตามมาคือการเพิ่มปริมาณของ POEE ส่งผลให้มีปริมาณ  $CO_2$  เพิ่มขึ้นด้วย



(ก) คาร์บอนไดออกไซด์

(ข) ไนตริกออกไซด์

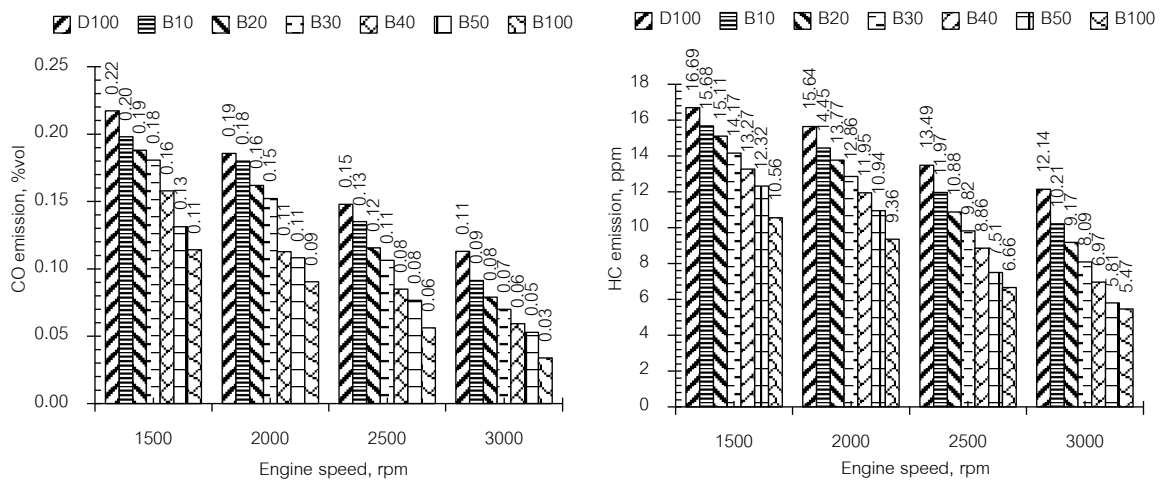
**ภาพที่ 6** ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์และไนตริกออกไซด์ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

**(6) ปริมาณไนตริกออกไซด์**

ภาพที่ 6 (ข) แสดงการปล่อยปริมาณไนตริกออกไซด์ (NO) ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ พบว่า ปริมาณ NO เพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้น ขณะที่การใช้ B10 ถึง B50 และ B100 เทียบกับ D100 พบว่า มีการปล่อยปริมาณ NO เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณของ POEE และกรณีพิจารณาที่ความเร็วรอบ 2,500 rpm พบว่า การใช้ B10 ถึง B50 มีปริมาณ NO เพิ่มขึ้นร้อยละ 5.42 ถึง 31.33 และการใช้ B100 ให้ปริมาณ NO เพิ่มขึ้นร้อยละ 53.31 เมื่อเทียบกับ D100 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย (Sutheerasak & Chinwanitcharoen, 2018; Vieira *et al.*, 2017; Sakthivel *et al.*, 2014) เนื่องจากปริมาณของ  $O_2$  ในโครงสร้างของ POEE ทำปฏิกิริยากับอากาศ ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น อุณหภูมิการเผาไหม้สูงขึ้น และมีปริมาณอากาศส่วนเกินออกมาซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มปริมาณ NO

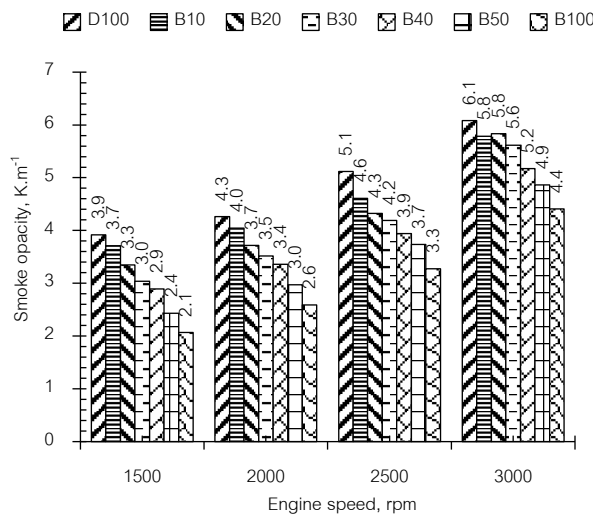
**(7) ปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์**

ภาพที่ 7 (ก) แสดงผลการตรวจสอบปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ พบว่า ปริมาณ CO ลดลงตามความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่เพิ่มขึ้น สำหรับการันใช้ B10 ถึง B50 และ B100 เทียบกับ D100 พบว่า ปริมาณ CO ลดลงตามการเพิ่มส่วนผสมของ POEE เมื่อตรวจสอบการปล่อยปริมาณ CO ที่ความเร็วรอบ 2,500 rpm พบว่า การันใช้ B10 ถึง B50 มีการปล่อยปริมาณ CO ลดลงร้อยละ 8.70 ถึง 48.18 และการันใช้ B100 มีการปล่อยปริมาณ CO<sub>2</sub> ลดลง ร้อยละ 62.01 เทียบกับ D100 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย (Sutheerasak & Chinwanitcharoen, 2018) เนื่องจากมีการเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้นตามปริมาณ O<sub>2</sub> ใน POEE จึงเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบสมบูรณ์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีผลิตภัณฑ์การเผาไหม้ของสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่สมบูรณ์ จึงมีการปล่อยแก๊ส CO ในแก๊สไอเสียลดลง



(ก) คาร์บอนมอนนอกไซด์

(ข) ไฮโดรคาร์บอน



(ค) ปริมาณควันดำ

ภาพที่ 7 ปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์ ไฮโดรคาร์บอนและปริมาณควันดำที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

**(8) ปริมาณไฮโดรคาร์บอน**

ภาพที่ 7 (ข) แสดงการปล่อยไฮโดรคาร์บอน (HC) ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ พบว่า ปริมาณ HC ลดลงตามความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้น การันใช้ B10 ถึง B50 และ B100 เทียบกับ D100 พบว่า ปริมาณ HC ลดลงตามการเพิ่มส่วนผสมของ POEE

เมื่อพิจารณาที่ความเร็วรอบ 2,500 rpm การใช้ B10 ถึง B50 มีการปล่อยปริมาณ HC ลดลงร้อยละ 11.26 ถึง 44.34 และ การใช้ B100 มีการปล่อยปริมาณ HC ลดลงร้อยละ 50.59 เทียบกับ D100 เนื่องจากสารมลพิษไฮโดรคาร์บอนเป็นผลมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของน้ำมันเชื้อเพลิง แต่ POEE มีปริมาณของ  $O_2$  เป็นองค์ประกอบ ทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณของ POEE

### (9) ปริมาณควันดำ

ภาพที่ 7 (ค) แสดงผลการวัดปริมาณควันดำ โดยใช้เครื่องมือวัดปริมาณควันดำ ซึ่งเป็นการวัดความเข้มของควันดำผ่านระบบการวัดความทึบแสงแบบไหลผ่านบางส่วนและต่อเนื่อง พบว่า ปริมาณควันดำเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากขณะความเร็วรอบสูงขึ้น ภาระงานสูงขึ้น จะมีปริมาณเชื้อเพลิงมากขึ้นทำให้ส่วนผสมของเชื้อเพลิงหนา (เข้มข้น) ขึ้น จึงเกิดควันดำสูงขึ้นด้วย ขณะที่การใช้ B10 ถึง B50 และ B100 เทียบกับ D100 พบว่า มีการปล่อยปริมาณควันดำลดลงตามการเพิ่มส่วนผสมของ POEE เมื่อตรวจสอบที่ความเร็วรอบ 2,500 rpm พบว่า การใช้ B10 ถึง B50 ให้ปริมาณควันดำลดลงร้อยละ 9.89 ถึง 27.04 และ การใช้ B100 ให้ปริมาณควันดำลดลงร้อยละ 35.97 เมื่อเทียบกับ D100 เนื่องจาก POEE มีปริมาณของ  $O_2$  เป็นองค์ประกอบ ทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ ส่งผลให้ปริมาณของ CO และ HC ลดลง ทำให้ปริมาณควันดำลดลงด้วย อนึ่ง ผลการศึกษาปริมาณไฮโดรคาร์บอนและปริมาณควันดำสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Sutheerasak & Chinwanitcharoen, 2018; Vieira *et al.*, 2017; Jeffrey *et al.*, 2014)

### สรุปผลการวิจัย

ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงและการใช้ POEE เทียบกับน้ำมันดีเซลสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลแบบฉีดตรงภายในรถยนต์กระบะ สามารถสรุปได้ดังนี้

(1) POEE ที่สังเคราะห์จากน้ำมันปาล์มมีปริมาณเอสเทอร์เฉลี่ยร้อยละ 98.53 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานและสามารถผสมกับน้ำมันดีเซลในสัดส่วนต่าง ๆ ได้ สำหรับการเพิ่มส่วนผสมของ POEE จากร้อยละ 10 ถึง 50 และ การใช้ POEE บริสุทธิ์ ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.20 ถึง 6.1 ค่าความหนืดเพิ่มขึ้นร้อยละ 7.1 ถึง 71.43 และค่าความร้อนของเชื้อเพลิงลดลงร้อยละ 3.37 ถึง 10.32 เมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล

(2) B10 ถึง B50 และ B100 สามารถใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลภายในรถยนต์กระบะได้ตามปกติ และจากการตรวจสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ พบว่า กำลังงานเบรกเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ขณะที่ประสิทธิภาพทางความร้อนเบรกลดลง และค่า BSFC เพิ่มขึ้นตามปริมาณของ POEE ที่เพิ่มขึ้น

(3) ผลการตรวจสอบการปล่อยสารมลพิษต่าง ๆ เมื่อใช้ B10 ถึง B50 และ B100 เทียบกับน้ำมันดีเซล พบว่ามีการปล่อยปริมาณของ CO, HC และควันดำลดลง แต่มีการปล่อยปริมาณของ  $CO_2$ , NO เพิ่มขึ้น และอุณหภูมิแก๊สไอเสียสูงขึ้นทุกความเร็วรอบของเครื่องยนต์

### ข้อเสนอแนะ

การใช้ POEE เทียบกับน้ำมันดีเซลสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลแบบฉีดตรงภายในรถยนต์กระบะในงานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นว่า การใช้ส่วนผสมของ POEE ร้อยละ 10 (B10) มีคุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล โดยทำให้สมรรถนะของเครื่องยนต์ลดลงเล็กน้อย ขณะที่การเพิ่มส่วนผสมของ POEE มากกว่าร้อยละ 10 ส่งผลให้ค่าความหนืดของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น และค่าความร้อนของเชื้อเพลิงลดลง ทำให้สมรรถนะของเครื่องยนต์ลดลง ดังนั้น ถ้าต้องการเพิ่มส่วนผสมของ POEE มากกว่าร้อยละ 10 ควรปรับจังหวะการทำงานของปั๊มเชื้อเพลิง เพื่อให้ได้จังหวะการฉีดเชื้อเพลิงที่เหมาะสมหรือควรรีววิถีการอุ่นเพื่อเพิ่มอุณหภูมิเชื้อเพลิง เพื่อลดค่าความหนืดของเชื้อเพลิง โดยวิธีการนี้ อาจทำให้คุณลักษณะของ

การฉีดและการสเปรย์เชื้อเพลิง (ได้แก่ จังหวะการฉีด มุมสเปรย์ การแตกเป็นละอองฝอย และการระเหยกลายเป็นไอของเชื้อเพลิง) ดีขึ้น ส่งผลให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น และให้สมรรถนะของเครื่องยนต์ใกล้เคียงกับการใช้น้ำมันดีเซล (Tamilselvan *et al.*, 2017; Othman *et al.*, 2017; Shahir *et al.*, 2015) ดังนั้น การวิจัยในอนาคต ควรศึกษาสมรรถนะและการปล่อยสารมลพิษต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ เมื่อใช้การปรับตำแหน่งของจังหวะการฉีดเชื้อเพลิง และการหาอุณหภูมิที่เหมาะสมของน้ำมันดีเซลผสม POEE ในสัดส่วนต่าง ๆ เพื่อพัฒนาการใช้น้ำมันดีเซลผสม POEE ในสัดส่วนต่าง ๆ จนถึงการใช้ POEE บริสุทธิ์ ให้สามารถใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลอย่างมีประสิทธิภาพต่อไปในอนาคต

### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยและพัฒนา (เลขที่ 10/2551) และขอขอบคุณ คุณพีระศักดิ์ ล้วนเจริญ คุณสรศักดิ์ อัมพันธ์ และคุณอุษณิกานต์ แดงศรี ที่ช่วยเก็บข้อมูล และให้ความช่วยเหลือด้านต่าง ๆ จนกระทั่งงานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จ

### เอกสารอ้างอิง

- Ghazanfari, J., Najafi, B., Ardabili, S.F., & Shamshirband, S. (2017). Limiting factors for the use of palm oil biodiesel in a diesel engine in the context of the ASTM standard. *Cogent Engineering*, 4, 1-16.
- Jeffrey, J.A., & Subramanian, M. (2014). Experimental analysis of performance and emission parameters of neem oil ethyl ester and HHO gas addition with neem oil ethyl ester in a single cylinder four stroke compression ignition engine. *Journal of Engineering Research and Applications*, 4(4), 23-28.
- Koushki, M., Nahidi, M., & Cheraghali, F. (2015). Physico-chemical properties, fatty acid profile and nutrition in palm oil. *Journal of Paramedical Sciences*, 6(3), 117-134.
- Mendow, G., Veizaga, N.S., Sanchez, B.S., & Querini, C.A. (2011). Biodiesel production by two-stage transesterification with ethanol. *Bioresource Technology*, 102, 10407-10413.
- Mohod, T.R., Jikar, P.C., & Khobragade, V.S. (2013). Experimental investigation of a diesel engine fueled with waste cooking oil ethyl ester. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2(5), 240-244.
- Noipin, K., & Kumar, S. (2014). Optimization of ethyl ester production from palm oil. *Petroleum & Coal*, 56, 249-258.
- Othman, M.F., Adam, A., Najafi, G., & Mamata, R. (2017). Green fuel as alternative fuel for diesel engine: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 694-709.
- Patchana, N., & Santikunaporn, M. (2012). Biodiesel production by transesterification of palm oil with ethanol. In *Proceeding of the 1st Conference on Graduate Student Network of Thailand*. Thammasat University, Thailand. (in Thai)
- Ryborz, J. (1999). *Automotive transmissions: fundamental selection, design and application*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Ramos, M.J., Fernandez, C.M., Casas, A., Rodriguez, L., & Perez, A. (2009). Influence of fatty acid composition of raw materials on biodiesel properties. *Bioresource Technology*, 100, 261-268.

- Sakthivel, G., Nagarajan, G., Ilangkumaran, M., & Gaikwad, A. B. (2014). Comparative analysis of performance, emission and combustion parameters of diesel engine fuelled with ethyl ester of fish oil and its diesel blends. *Fuel*, 132, 116-124.
- Santasnachok, M., Sutheerasak, E., Ruengphrathuengsuka, W., & Chinwanitcharoen, C. (2018). Performance analysis of a diesel-engine generator using ethyl ester synthesized from anhydrous ethanol and NaOH. In *Proceeding 2018 International Conference on Power, Energy and Electrical Engineering (CPEEE 2018)*. March 30th to April 1, 2018. Tokyo, Japan.
- Shahir, V.K., Jawahar, C.P., & Suresh, P.R. (2015). Comparative study of diesel and biodiesel on CI engine with emphasis to emissions-a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 686-697.
- Stone, R., & Ball, J.K. (2004). *Automotive Engineering Fundamentals*. SAE International.
- Sutheerasak, E., & Chinwanitcharoen, C. (2018). Performance and emissions of a diesel engine using palm ethyl ester. *Engineering Journal Chiang Mai University*, 25(2), 1-13. (in Thai)
- Tamilselvan, P., Nallusamy, N., & Rajkumar, S. (2017). A comprehensive review on performance, combustion and emission characteristics of biodiesel fuelled diesel engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 1134-1159.
- Venkateswara, R.P. (2016). Performance analysis of ci engine fuelled with diesel-biodiesel (methyl/ethyl esters) blend of non-edible oil. *International Journal of Research-Granthaalayah*, 4(7), 20-26.
- Vieira da Silva, M.A., Ferreira, B.L.G., Marques, L.G.C., Murta, A.L.S., & Vasconcelos de Freitas, M.A. (2017). Comparative study of NOx emissions of biodiesel-diesel blends from soybean, palm and waste frying oils using methyl and ethyl transesterification routes. *Fuel*, 194, 141-156.