

นวัตกรรมต้นแบบเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลและแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเกษตร

Innovative Engine Prototype Powered by Diesel and LPG as Fuel for Agriculture

ชัยยง ศิริพรมงคลชัย*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

217 ถนนนนทบุรี ตำบลสวนใหญ่ อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี 11000

E-mail: chaiyong_mp@hotmail.com

Chaiyong Siripornmongkolchai*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Industrial Education,

Rajamangala University of Technology Suvarnabumi

217 Nonthaburi Road, Suan Yai Sub-district, Mueang District, Nonthaburi Province 11000, Thailand

E-mail: chaiyong_mp@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ดัดแปลงเครื่องยนต์เล็กเพื่อการเกษตรให้สามารถรองรับการใช้เชื้อเพลิงได้ทั้งน้ำมันดีเซลและแอลพีจีในลักษณะการใช้เชื้อเพลิงทั้งสองชนิดที่แยกเป็นอิสระต่อกัน และ 2) เปรียบเทียบอัตราการใช้เชื้อเพลิงน้ำมันดีเซลและแอลพีจี โดยการนำเครื่องยนต์เล็กดีเซลเพื่อการเกษตร ยี่ห้อ Yanmar รุ่น TF120DI มาดัดแปลงติดตั้งระบบเชื้อเพลิงแอลพีจี ระบบจุดระเบิด และสร้างห้องเผาไหม้เสริมสำหรับติดตั้งเข้าแทนที่ในตำแหน่งของหัวฉีดน้ำมันดีเซลเดิม ห้องเผาไหม้เสริมจะทำหน้าที่ลดอัตราส่วนการอัดลงให้สามารถรองรับการใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งจะเป็นลักษณะการทำงานแบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีน การกลับไปใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงนั้น ทำได้โดยการถอดห้องเผาไหม้เสริมออก แล้วติดตั้งหัวฉีดน้ำมันดีเซลแทนที่ห้องเผาไหม้เสริม ซึ่งจะเป็นลักษณะการทำงานแบบเครื่องยนต์ดีเซล จากการทดสอบใช้เป็นเครื่องยนต์ต้นกำลังในการสูบน้ำ ด้วยท่อพญานาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 8 นิ้ว ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ 1,000 รอบต่อนาที พบว่าใช้น้ำมันดีเซลเฉลี่ย 0.92 กิโลกรัมต่อชั่วโมง หรือ 1.09 ลิตรต่อชั่วโมง คิดเป็นค่าใช้จ่าย 28.35 บาทต่อชั่วโมง และหากใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงจะใช้แอลพีจีเฉลี่ย 0.53 กิโลกรัมต่อชั่วโมง คิดเป็นค่าใช้จ่าย 12.91 บาทต่อชั่วโมง ซึ่งสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ร้อยละ 54.46 อย่างไรก็ตามขณะเครื่องยนต์ทำงานในแบบเครื่องยนต์ดีเซล พบว่าไอเสียมีค่าวันคาร์บอนร้อยละ 46.7 และ 59.6 ที่ความเร็วรอบ 1,800 และ 2,400 รอบต่อนาที ตามลำดับ ขณะเครื่องยนต์ทำงานในแบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีน พบว่าอุณหภูมิห้องเผาไหม้เสริมเปรียบเทียบกับอุณหภูมิฝาสูบเครื่องยนต์เล็ก

แก๊สโซลีน Honda GX160 ที่ความเร็วรอบสูงสุด มีค่า 302 และ 188 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และพบว่าในไอเสีย มีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 0.69 และไฮโดรคาร์บอน 1,893 ส่วนในล้านส่วน

คำสำคัญ: เครื่องยนต์ดีเซล; เครื่องยนต์แก๊สโซลีน; เครื่องยนต์เล็กเพื่อการเกษตร; แอลพีจี

Abstract

The objectives of this research were 1) to modify small engines for agriculture to be able to support both diesel and LPG fuel consumption in the form of using both types of fuel separately and 2) to compare diesel and LPG consumption rates by modifying a small diesel engine for agriculture, Yanmar TF120DI, and installing LPG fuel system, ignition system and an auxiliary combustion chamber place of the original diesel injectors. The auxiliary combustion chamber would reduce the compression ratio to accommodate LPG fuel, which was a characteristic of the gasoline engine. The auxiliary combustion chamber could be removed and then install a diesel injector to return using diesel fuel. From the test of using the power engine for pumping water with a Payanak pipe with the diameter of 8 inch at a constant engine speed of 1,000 rounds per minute, it was found that the average diesel usage was 0.92 kilograms per hour or 1.09 liters per hour with the cost of 28.35 baht per hour and if using LPG as fuel, average LPG was 0.53 kilograms per hour with the cost of 12.91 baht per hour, saving 54.46 percent of costs. However, when the engine runs as a diesel engine, it was found that black smoke was exhausted at 46.7 percent and 59.6 percent at 1,800 and 2,400 rounds per minute respectively. While running as a gasoline engine, it was found that the auxiliary combustion chamber temperature compared with the temperature of the engine cylinder head of Honda GX160 at maximum rounds per minute was 302 and 188 degrees Celsius, respectively, and found that the exhaust contained 0.69 percent carbon monoxide and 1,893 parts per million of hydrocarbons.

Keywords: Diesel engine; Gasoline engine; Small engines for agriculture; LPG

1. บทนำ

แม้ว่าประเทศไทยจะมีความพยายามลดการนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศโดยการใช้พลังงานทดแทน แต่การนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศยังคงเพิ่มขึ้นทุกปี เนื่องจากความต้องการการใช้น้ำมันที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะความต้องการน้ำมันดีเซลที่มีสูงสุดเฉลี่ย 57.7 ล้านลิตรต่อวัน [1] ดังนั้นหากต้องการลดการใช้น้ำมันดีเซลจึงต้องหาพลังงานทางเลือกอื่นที่มีราคาต่ำกว่ามาทดแทน ได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ ในปัจจุบันรถยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซล มีรูปแบบการใช้ก๊าซธรรมชาติแอลพีจีหรือเอ็นจีวี ทดแทนน้ำมันดีเซลได้สองรูปแบบ คือ 1) รถยนต์ใช้ก๊าซ

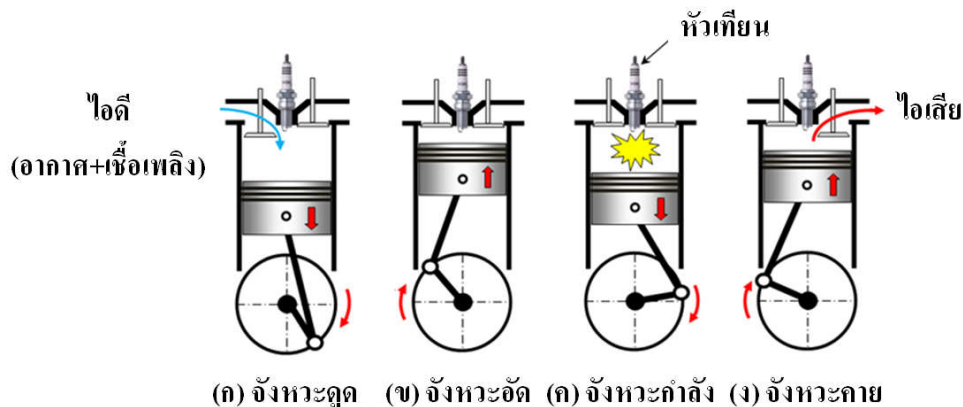
ธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงอย่างเดียว เรียกว่า Dedicated Engine เป็นการดัดแปลงชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ดีเซลเดิมให้มีอัตราส่วนการอัดลดลงให้สามารถรองรับการใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงอย่างเดียวได้ ซึ่งเป็นลักษณะการทำงานแบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีน ไม่สามารถกลับไปใช้น้ำมันดีเซลได้อีกต่อไป 2) รถยนต์ใช้ก๊าซธรรมชาติกับน้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงร่วมกัน เรียกว่า Dual-fuel Engine ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ก๊าซธรรมชาติร่วมกับน้ำมันดีเซลหรือใช้น้ำมันดีเซลอย่างเดียว อัตราส่วนก๊าซธรรมชาติต่อน้ำมันดีเซลจะขึ้นอยู่กับสภาพเครื่องยนต์นั้นๆ ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ก๊าซ และคุณภาพของก๊าซที่ใช้ โดยทั่วไปสามารถใช้อัตราส่วนก๊าซธรรมชาติต่อน้ำมันดีเซลได้ร้อยละ 25 ต่อ 75 ระบบนี้สามารถเลือกใช้น้ำมันดีเซลอย่างเดียวหรือใช้เชื้อเพลิงร่วมกันได้ โดยการปรับสวิตช์เลือกใช้เชื้อเพลิงเท่านั้น ซึ่งเป็นลักษณะการทำงานแบบเครื่องยนต์ดีเซล แต่เนื่องจากระบบเชื้อเพลิงร่วมกันใช้อัตราส่วนก๊าซธรรมชาติปริมาณน้อย จึงอาจจะไม่เห็นผลของความประหยัดค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงที่ชัดเจน

สำหรับเครื่องยนต์เล็กดีเซลเพื่อการเกษตรซึ่งใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงนั้นเป็นเครื่องจักรที่เกษตรกรนิยมใช้ในการทำเกษตรกรรม เช่น สามารถใช้เป็นเครื่องยนต์ต้นกำลังขับเคลื่อนยานพาหนะ รถไถนา เครื่องสูบน้ำ และประโยชน์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับเกษตรกรรม ทั้งนี้กรณีที่น้ำมันดีเซลมีราคาสูงขึ้น เกษตรกรต้องการลดต้นทุนค่าเชื้อเพลิงจึงดัดแปลงชิ้นส่วนภายในของเครื่องยนต์เล็กดีเซลเพื่อการเกษตรมาใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงอย่างเดียว อีกทั้งจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการดัดแปลงชิ้นส่วนภายในของเครื่องยนต์เล็กดีเซลเพื่อรองรับการใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงอย่างเดียว [2-3] ซึ่งเครื่องยนต์ที่ดัดแปลงชิ้นส่วนภายในแล้วไม่สามารถกลับไปใช้น้ำมันดีเซลได้อีกต่อไป ซึ่งเป็นการดัดแปลงในรูปแบบดั้งเดิม ทั้งนี้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องยนต์ดัดแปลงใช้แอลพีจีพบว่าการใช้ก๊าซชีววมวลในอัตราส่วนร้อยละ 100 เหมาะแก่การใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในอนาคต [4] และจากการศึกษาการดัดแปลงเครื่องยนต์ดีเซลแบบห้องเผาไหม้ช่วยใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงหลัก พบว่าค่าใช้จ่ายของเชื้อเพลิงก๊าซแอลพีจีน้อยกว่าค่าใช้จ่ายน้ำมันดีเซล [2] นอกจากนี้ในงานวิจัยเกี่ยวกับเครื่องยนต์ดีเซลเพื่อการเกษตรดัดแปลงใช้ก๊าซแอลพีจี ยังพบว่ากลุ่มเกษตรกรมีข้อเสนอแนะว่าควรพัฒนาให้เครื่องยนต์สามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลายชนิดในเครื่องยนต์เดียว [5] จึงกล่าวได้ว่ากลุ่มเกษตรกรยังคงมีความต้องการเครื่องยนต์ประเภทนี้

ในครั้งนี้อย่างมีแนวคิดดัดแปลงเครื่องยนต์เล็กเพื่อการเกษตรให้สามารถใช้น้ำมันดีเซลอย่างเดียวเป็นเชื้อเพลิงและสามารถใช้แอลพีจีอย่างเดียวเป็นเชื้อเพลิงได้ ซึ่งนั่นคือสามารถปรับเปลี่ยนสลับให้เครื่องยนต์เครื่องเดียวกันนี้ทำงานได้ในแบบเครื่องยนต์ดีเซลและทำงานได้ในแบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีน โดยการสร้างห้องเผาไหม้เสริมสำหรับติดตั้งเข้าแทนที่ในตำแหน่งของหัวฉีดน้ำมันดีเซลเดิม ห้องเผาไหม้เสริมจะทำหน้าที่ลดอัตราส่วนการอัดลงให้สามารถรองรับการใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งจะเป็นลักษณะการทำงานแบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีน การกลับไปใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงนั้น ทำได้โดยการถอดห้องเผาไหม้เสริมออก แล้วติดตั้งหัวฉีดน้ำมันดีเซลแทนที่ห้องเผาไหม้เสริม ซึ่งจะเป็นลักษณะการทำงานแบบเครื่องยนต์ดีเซล ทั้งนี้เพื่อเป็นทางเลือกแก่เกษตรกรในการเลือกใช้เชื้อเพลิงที่มีราคาต่ำตามสภาวะความผันผวนของราคาเชื้อเพลิงทั้งสองชนิด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ดัดแปลงเครื่องยนต์เล็กเพื่อการเกษตรให้สามารถรองรับการใช้เชื้อเพลิงได้ทั้งน้ำมันดีเซลและแอลพีจีในลักษณะ

การใช้เชื้อเพลิงทั้งสองชนิดที่แยกเป็นอิสระต่อกัน และ 2) เปรียบเทียบอัตราการใช้เชื้อเพลิงน้ำมันดีเซลและแอลพีจี

จากหลักการทำงานทางทฤษฎีของเครื่องยนต์แก๊สโซลีน 4 จังหวะ ดังรูปที่ 1 ประกอบด้วย จังหวะดูด จังหวะอัด จังหวะกำลัง และจังหวะคาย ดังนี้ [6]



รูปที่ 1 หลักการทำงานของเครื่องยนต์แก๊สโซลีน 4 จังหวะ [6]

จังหวะดูด (Intake Stroke)

ลูกสูบเคลื่อนที่จากศูนย์ตายบนลงสู่ศูนย์ตายล่าง ในขณะเดียวกันลิ้นไอดีเปิด ภายในกระบอกสูบมีความดันต่ำกว่าบรรยากาศ ทำให้ไอดีซึ่งเป็นส่วนผสมของอากาศกับน้ำมันเชื้อเพลิงไหลผ่านลิ้นไอดีเข้าสู่กระบอกสูบ จนกระทั่งลูกสูบเคลื่อนที่ลงถึงศูนย์ตายล่าง ดังรูปที่ 1(ก) [6]

จังหวะอัด (Compression Stroke)

ลูกสูบเคลื่อนที่ขึ้นจากศูนย์ตายล่าง ขณะเดียวกันลิ้นไอดีและลิ้นไอเสียปิดสนิท ลูกสูบอัดส่วนผสมไอดีให้มีปริมาตรเล็กลง ความดันและอุณหภูมิในกระบอกสูบจะสูงขึ้น จนกระทั่งลูกสูบเคลื่อนที่ขึ้นถึงศูนย์ตายบน ดังรูปที่ 1(ข) [6]

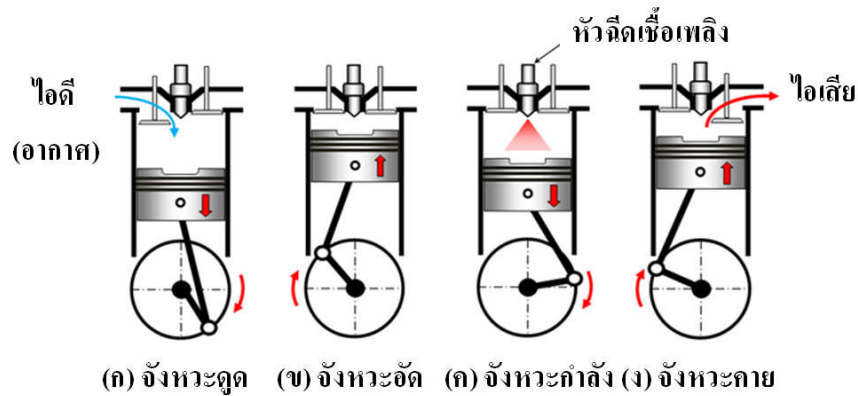
จังหวะกำลัง (Power Stroke)

ในจังหวะนี้ลิ้นไอดีและลิ้นไอเสียยังคงปิดสนิทอยู่ ระบบจุดระเบิดจะสร้างไฟฟ้าแรงเคลื่อนสูง เกิดประกายไฟที่เจ็วหัวเทียนเผาไหม้ส่วนผสมไอดีอย่างรวดเร็ว ความดันในกระบอกสูบสูงขึ้นมาก ผลักดันให้ลูกสูบเคลื่อนที่จากศูนย์ตายบนลงสู่ศูนย์ตายล่าง ดังรูปที่ 1(ค) [6]

จังหวะคาย (Exhaust Stroke)

ลิ้นไอเสียเปิด ไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้ซึ่งมีความดันสูงจะระบายออกผ่านลิ้นไอเสีย ในขณะเดียวกันลูกสูบเคลื่อนที่จากศูนย์ตายล่างขึ้นสู่ศูนย์ตายบน ช่วยขับไล่ไอเสียออกจากกระบอกสูบ พร้อมทั้งจะเริ่มจังหวะดูดในวัฏจักรต่อไป ดังรูปที่ 1(ง) [6]

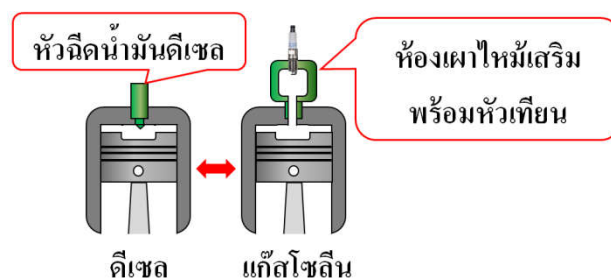
ทั้งนี้ หลักการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะ จะมีความแตกต่างจากเครื่องยนต์แก๊สโซลีน 4 จังหวะ กล่าวคือในจังหวะดูด ซึ่งจะดูดไอดีที่เป็นอากาศเท่านั้น และในจังหวะกำลัง ซึ่งระบบฉีดเชื้อเพลิงจะฉีดน้ำมันดีเซลให้เป็นฝอยละอองเข้าไปผสมกับอากาศร้อนในกระบอกสูบ ทำให้น้ำมันดีเซลเกิดการเผาไหม้โดยไม่ต้องใช้ประกายไฟจากเทียนหัวเทียน ดังรูปที่ 2 [6]



รูปที่ 2 หลักการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะ [6]

2. วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยนี้จะใช้เครื่องยนต์เล็กดีเซลเพื่อการเกษตร ยี่ห้อ Yanmar รุ่น TF120 DI สูบเดียว 4 จังหวะ ขนาดกระบอกสูบ 92 มิลลิเมตร ระยะชัก 96 มิลลิเมตร ปริมาตรกระบอกสูบ 638 มิลลิลิตร อัตราส่วนการอัด 16.1 ต่อ 1 ซึ่งเป็นเครื่องยนต์ระบบฉีดเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้โดยตรง (Direct Injection) [7] จึงคำนวณปริมาตรห้องเผาไหม้ได้ 42.2 มิลลิลิตร มีผิวหน้าฝาสูบเรียบ เมื่อจะทำการดัดแปลงมาใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง จึงต้องลดอัตราส่วนการอัดลงเหลือประมาณ 8 ถึง 12 ต่อ 1 โดยการสร้างและติดตั้งห้องเผาไหม้เสริมพร้อมหัวเทียนเข้าแทนที่ในตำแหน่งของหัวฉีดน้ำมันดีเซลเดิม ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ลดอัตราส่วนการอัดด้วยการติดตั้งห้องเผาไหม้เสริม

2.1 ออกแบบและสร้างชุดห้องเผาไหม้เสริม

ออกแบบห้องเผาไหม้เสริมมีลักษณะเป็นทรงกระบอกและสร้างด้วยวัสดุเหล็ก SNCM 439 ที่มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงถึง 100 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร หรือ 980 เมกะปาสคาล ซึ่งวัสดุดังกล่าวใช้ในการผลิตสกรู เกียร์ เฟลาข้อเหวี่ยง เฟลาลูกเบี้ยว ลูกสูบ ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ที่ต้องการความเหนียวสูง [8] คำนวณความหนาของผนังห้องเผาไหม้เสริมโดยใช้ทฤษฎีเกี่ยวกับทรงกระบอกบางอยู่ภายใต้ความดันภายใน [9] ดังสมการที่ (1) และ (2)

$$\sigma_H = \frac{P r}{t} \quad (1)$$

$$\sigma_L = \frac{P r}{2 t} \quad (2)$$

โดยที่ σ_H คือ ความเค้นตามแนวเส้นรอบวง (ปาสคาล)

σ_L คือ ความเค้นตามแนวยาว (ปาสคาล)

t คือ ความหนาของผนังทรงกระบอกบาง (เมตร)

r คือ รัศมีเฉลี่ยของทรงกระบอกบาง (เมตร)

P คือ ความดันที่เกิดขึ้นในทรงกระบอกบาง (ปาสคาล)

โดยการกำหนดขนาดห้องเผาไหม้เสริมให้เหมาะสมกับพื้นที่บริเวณโดยรอบฝาสูบ จึงกำหนดปริมาตรห้องเผาไหม้เสริมเป็น 42 มิลลิตร ซึ่งเมื่อนำห้องเผาไหม้เสริมไปติดตั้งแทนที่ในตำแหน่งของหัวฉีดน้ำมันดีเซลเดิม จะได้ค่าอัตราส่วนการอัด ดังสมการที่ (3)

$$r_v = \frac{V @ BDC}{V @ TDC} \quad (3)$$

โดยที่ r_v คือ อัตราส่วนการอัด (ไม่มีหน่วย)

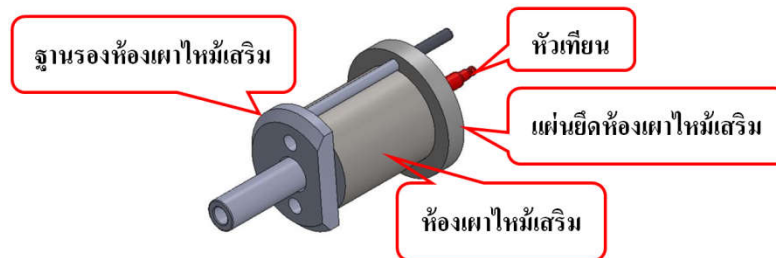
$V @ BDC$ คือ ปริมาตรทั้งหมดภายในกระบอกสูบเมื่อลูกสูบอยู่ที่ศูนย์ตายล่าง (มิลลิตร)

$V @ TDC$ คือ ปริมาตรทั้งหมดภายในกระบอกสูบเมื่อลูกสูบอยู่ที่ศูนย์ตายบน (มิลลิตร)

จะได้
$$r_v = \frac{638 + 42.2 + 42}{42.2 + 42}$$

จะได้ค่าอัตราส่วนการอัด 8.57 ต่อ 1

ซึ่งค่าอัตราส่วนการอัด 8.57 ต่อ 1 สามารถรองรับการใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงได้ และกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในในห้องเผาไหม้เสริม 34.5 มิลลิเมตร กำหนดและออกแบบให้ห้องเผาไหม้เสริมมีผนังหนา 8.4 มิลลิเมตร สามารถรองรับความดันได้มากกว่า 6 เมกะปาสกาล ซึ่งเป็นค่าระดับความดันสูงสุดที่เป็นไปได้ในเครื่องยนต์แก๊สโซลีน [10] จะได้ชุดห้องเผาไหม้เสริม ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ชุดห้องเผาไหม้เสริม

2.2 กำหนดหาขนาดรูของอุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศ (Gas-air Mixer)

อากาศที่ไหลผ่านรูของอุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศ จะเป็นลักษณะการไหลผ่านคอขวดนั่นเอง ในการนี้จึงมีสมมุติฐานที่ใช้ในการออกแบบ ดังนี้

- ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร (Volumetric Efficiency) ของเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในแบบประจุไอดีเข้าสู่กระบอกสูบโดยธรรมชาติ (Naturally Aspirated; NA) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.8 ถึง 0.9 [11] ดังนั้นจึงกำหนดให้ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรมีค่า 0.85

- ความเร็วอากาศ ณ จุดคอขวดควรจะอยู่ในช่วง 100 ถึง 150 เมตรต่อวินาที ทั้งนี้เพื่อทำให้ความดันอากาศ ณ จุดคอขวดต่ำลง อันจะเป็นผลทำให้เกิดการดึงเชื้อเพลิงมาผสมกับอากาศได้ดี [12] ดังนั้นจึงกำหนดให้ความเร็วอากาศผ่านรูของอุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศ มีค่า 125 เมตรต่อวินาที

คำนวณหาอัตราการไหลของอากาศที่เข้าสู่กระบอกสูบ ดังสมการที่ (4)

$$\dot{V}_i = \left(\frac{V_h \times n}{2,000 \times 60} \right) \eta_v \quad (4)$$

โดยที่ $\dot{V}_i$ คือ อัตราการไหลของอากาศที่เข้าสู่กระบอกสูบ (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)

V_h คือ ปริมาตรกระบอกสูบ = 0.638 ลิตร

n คือ ความเร็วรอบเครื่องยนต์ = 2,400 รอบต่อวินาที (ที่ความเร็วรอบสูงสุด)

η_v คือ ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร = 0.85

จะได้ $\dot{V}_i = 0.010846$ ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

และคำนวณความเร็วของอากาศที่เข้าห้องเผาไหม้ จากสมการที่ (5) และ (6)

$$A_i = \frac{\pi d_i^2}{4} \quad (5)$$

$$c_i = \frac{\dot{V}_i}{A_i} \quad (6)$$

โดยที่ c_i คือ ความเร็วของอากาศที่เข้าห้องเผาไหม้ (เมตรต่อวินาที)

A_i คือ พื้นที่หน้าตัดช่องทางเข้าสู่ห้องเผาไหม้ (ตารางเมตร)

d_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางเข้าสู่ห้องเผาไหม้ = 0.038 เมตร (จากการวัดขนาดที่เครื่องยนต์)

จะได้
$$A_i = \frac{\pi 0.038^2}{4}$$

$$A_i = 0.001134 \text{ ตารางเมตร}$$

และ
$$c_i = \frac{0.010846}{0.001134}$$

$$c_i = 9.564 \text{ เมตรต่อวินาที}$$

คำนวณขนาดรูของอุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศ จากสมการที่ (7) และ (8)

$$A_V = \frac{A_i c_i}{c_V} \quad (7)$$

$$d_V = \sqrt{\frac{4 A_V}{\pi}} \quad (8)$$

โดยที่ d_V คือ เส้นผ่านศูนย์กลางรูของอุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศ (เมตร)

A_V คือ พื้นที่หน้าตัดรูของอุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศ (ตารางเมตร)

c_V คือ ความเร็วอากาศผ่านรูของอุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศ = 125 เมตรต่อวินาที

จะได้
$$A_V = \frac{0.001134 \times 9.564}{125}$$

$$A_V = 0.00008677 \text{ ตารางเมตร}$$

และ

$$d_V = \sqrt{\frac{4 \times 0.00008677}{\pi}}$$

$$d_V = 0.01051 \text{ เมตร}$$

ดังนั้นเลือกใช้นาฬารูของอุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศ 11 มิลลิเมตร

2.3 ตัดแปลงและติดตั้งอุปกรณ์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 ชุดเรือนลิ้นเร่ง

นำชุดเรือนลิ้นเร่งของรถจักรยานยนต์ Honda รุ่น CRF250 ติดตั้งเข้ากับท่อไอเสียของเครื่องยนต์ Yanmar รุ่น TF120DI ดังรูปที่ 5 และต่อกลไกบังคับลิ้นเร่งไปยังขาควบคุมคันเร่งของเครื่องยนต์



รูปที่ 5 ชุดเรือนลิ้นเร่ง

2.3.2 อุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศ

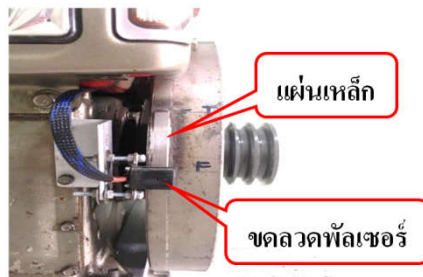
นำอุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 มิลลิเมตร มาติดตั้งโดยสวมอัดไว้ด้านบนชุดเรือนลิ้นเร่ง ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 อุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศ

2.3.3 อุปกรณ์กำเนิดสัญญาณจุดระเบิด

ติดตั้งขดลวดพัลเซอร์ (Pulser Coil) และเชื่อมต่อแผ่นเหล็กติดกับล้อช่วยแรง โดยการหมุนล้อช่วยแรงตามทิศทางการหมุนของเครื่องยนต์ให้ลูกสูบอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ตายบน จากนั้นหมุนล้อช่วยแรงย้อนกลับประมาณ 10 องศา ก่อนศูนย์ตายบน แล้วเชื่อมต่อแผ่นเหล็กขนาดกว้างประมาณ 1 เซนติเมตร ยาว 3 เซนติเมตร ติดกับล้อช่วยแรง ดังรูปที่ 7 เพื่อใช้กำเนิดสัญญาณจุดระเบิด ร่วมกับการใช้วงจรจุดระเบิด ดังรูปที่ 8(ก) คอยล์จุดระเบิดของรถจักรยานยนต์ Honda รุ่น Sonic125 ดังรูปที่ 8(ข) และต่อวงจรผ่านสวิทช์ควบคุมการจุดระเบิด ดังรูปที่ 8(ค)



รูปที่ 7 ขดลวดพัลเซอร์และแผ่นเหล็กเชื่อมติดกับล้อช่วยแรง



(ก) วงจรจุดระเบิด



(ข) คอยล์จุดระเบิด



(ค) สวิตช์จุดระเบิด

รูปที่ 8 อุปกรณ์ระบบจุดระเบิด

2.3.4 หม้อต้มสำหรับเครื่องยนต์เล็ก

ติดตั้งหม้อต้มเข้ากับเครื่องยนต์ ดังรูปที่ 9 ซึ่งเป็นหม้อต้มสำหรับเครื่องยนต์เล็กโดยเฉพาะ มีขนาดเล็ก อัตราการไหลของก๊าซต่ำ จึงไม่ต้องมีน้ำร้อนผ่านเข้าออกที่ตัวหม้อต้ม



รูปที่ 9 หม้อต้มสำหรับเครื่องยนต์เล็ก

2.3.5 ห้องเผาไหม้เสริม

ถอดหัวฉีดน้ำมันดีเซลออก แล้วติดตั้งห้องเผาไหม้เสริมที่ออกแบบสร้างขึ้นพร้อมหัวเทียน ดังรูปที่ 10 เข้าแทนที่ในตำแหน่งของหัวฉีดน้ำมันดีเซลเดิม ดังรูปที่ 11



รูปที่ 10 ห้องเผาไหม้เสริมพร้อมหัวเทียน



รูปที่ 11 ชุดห้องเผาไหม้เสริมติดตั้งแทนที่ในตำแหน่งของหัวฉีดน้ำมันดีเซล

2.3.6 ท่อน้ำมันไหลกลับ

ทำการถอดท่อน้ำมันเชื้อเพลิงเดิมออกจากปั๊มฉีดเชื้อเพลิง แล้วติดตั้งท่อน้ำมันไหลกลับจากปั๊มฉีดเชื้อเพลิงไปยังถังน้ำมันเชื้อเพลิง ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 ท่อน้ำมันไหลกลับ

2.3.7 เรกกูเลเตอร์ (หัววาล์วก๊าซ)

ติดตั้งเรกกูเลเตอร์เข้ากับถังก๊าซแอลพีจี จึงได้เครื่องยนต์ที่ดัดแปลงและติดตั้งอุปกรณ์ที่แล้วเสร็จ ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 เครื่องยนต์ที่ดัดแปลงและติดตั้งอุปกรณ์ที่แล้วเสร็จ

2.3.8 สตาร์ทเครื่องยนต์

สตาร์ทเครื่องยนต์และทำการปรับตั้งองศาการจุดระเบิดให้เหมาะสม โดยการเลื่อนตำแหน่งของ ขดลวดฟัลเซอร์ ซึ่งจะได้องศาการจุดระเบิดที่เหมาะสมประมาณ 9 องศา ก่อนศูนย์ตายบน ที่ความเร็วรอบ เครื่องยนต์ 600 รอบต่อนาที และหมุนปรับสกรูปรับปริมาณการจ่ายก๊าซที่ห้อยดัมให้เหมาะสม โดยสังเกตจาก ความเร็วรอบเครื่องยนต์และการตอบสนองต่อการเร่งเครื่องยนต์

2.4 ทดสอบการทำงานของเครื่องยนต์

ทดสอบการทำงานของเครื่องยนต์ในแบบเครื่องยนต์ดีเซล ทำการตรวจวัดค่าควันดำด้วยเครื่องวัดควันดำ ระบบความทึบแสง รุ่น Koeng OP-201T ดังรูปที่ 14 และทดสอบการทำงานของเครื่องยนต์ในแบบเครื่องยนต์ แก๊สโซลีน ทำการตรวจวัดอุณหภูมิห้องเผาไหม้เสริมด้วยเครื่องมืออินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ รุ่น Benetech GM320 ดังรูปที่ 15 ทำการตรวจวัดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และไฮโดรคาร์บอน (HC) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ ไอเสีย รุ่น Koeng KEG-200 ดังรูปที่ 16 แล้ววัดอัตราการใช้เชื้อเพลิงด้วยการชั่งน้ำหนักเชื้อเพลิงก่อนและหลังการ ทดสอบเครื่องยนต์เปรียบเทียบกับระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ โดยใช้เครื่องยนต์เป็นต้นกำลังในการสูบน้ำด้วย ท่อพญานาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 8 นิ้ว อัตราทดพูลเลย์เครื่องยนต์ต่อพูลเลย์ท่อพญานาคเป็น 1 ต่อ 1 ที่ ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ 1,000 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นระดับความเร็วรอบเครื่องยนต์โดยประมาณที่เกษตรกร ส่วนใหญ่ใช้ในการสูบน้ำ บันทึกอัตราการใช้เชื้อเพลิง โดยเปรียบเทียบในลักษณะการทำงานแบบเครื่องยนต์ดีเซล ที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ดังรูปที่ 17(ก) และในลักษณะการทำงานแบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีนที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็น เชื้อเพลิง ดังรูปที่ 17 (ข) โดยการสูบน้ำที่ความสูง (Head) 3 เมตร ย่อมจะได้ปริมาณการสูบน้ำที่เท่ากันคือประมาณ 2.4 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที หรือ 144 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เมื่อเทียบจากข้อมูลทางเทคนิคของท่อพญานาค ดังรูป ที่ 18 ทั้งนี้ทำการทดสอบแบบสลับไป-มา ระหว่างลักษณะการทำงานแบบเครื่องยนต์ดีเซลและลักษณะการทำงาน แบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีน จนครบลักษณะการทำงานแบบละ 3 ครั้ง



รูปที่ 14 เครื่องวัดควันดำระบบความทึบแสง รุ่น Koeng OP-201T



รูปที่ 15 อินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ รุ่น Benetech GM320

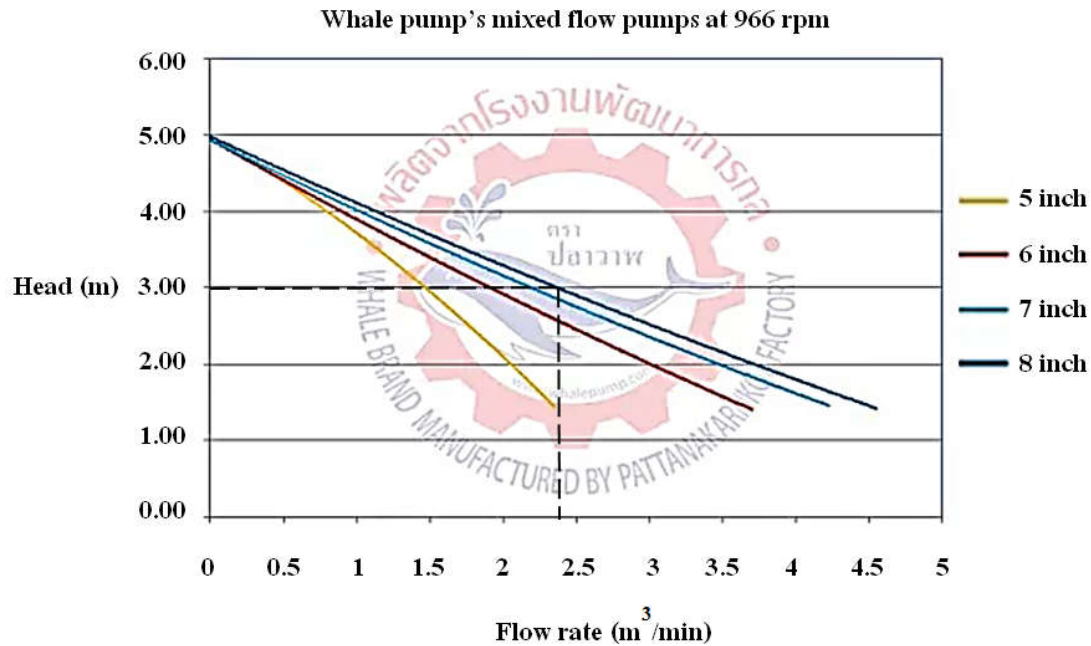


รูปที่ 16 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย รุ่น Koeng KEG-200



(ก) ทดสอบใช้งานแบบเครื่องยนต์ดีเซล(น้ำมันดีเซล) (ข) ทดสอบใช้งานแบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีน(แอลพีจี)

รูปที่ 17 ใช้งานเครื่องยนต์ Yanmar TF120DI เป็นต้นกำลังในการสูบน้ำ



รูปที่ 18 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของท่อพญานาค [13]

3. ผลการศึกษาและการอภิปราย

ผลการศึกษา แบ่งเป็น 2 ประเด็นตามวัตถุประสงค์ ดังนี้

ประเด็นที่ 1 ทดสอบการทำงานในแบบเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงและการทำงานในแบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีนที่ใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง ผลการทดสอบพบว่าเครื่องยนต์เครื่องเดียวกันนี้สามารถทำงานได้ในแบบเครื่องยนต์ดีเซลและทำงานได้ในแบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีน ซึ่งยังไม่เคยมีงานวิจัยใดที่ดำเนินการในรูปแบบนี้มาก่อน

ทั้งนี้ ขณะทดสอบให้เครื่องยนต์ทำงานในแบบเครื่องยนต์ดีเซล ได้ตรวจวัดค่าวันด้าเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ก่อนดัดแปลง ได้ผลดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าวันด้าของเครื่องยนต์ดีเซลที่ดัดแปลงแล้วเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์ดีเซลก่อนดัดแปลง โดยใช้เครื่องวัดควันท่อระบบความทึบแสง รุ่น Koeng OP-201T

ความเร็วรอบเครื่องยนต์ (รอบต่อนาที)	ค่าวันด้า (%)	
	เครื่องยนต์ Yanmar TF120DI ที่ดัดแปลงแล้ว ทำงานแบบเครื่องยนต์ดีเซล ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง	เครื่องยนต์ Yanmar TF120DI เดิมก่อนดัดแปลง ทำงานแบบเครื่องยนต์ดีเซล ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง
600	8.6	2.0
1,200	10.1	1.7
1,800	46.7	1.9
2,400	59.6	1.4

จากตารางที่ 1 พบว่าเกิดไอเสียมีค่าวันดำร้อยละ 46.7 ที่ความเร็วรอบ 1,800 รอบต่อนาที และร้อยละ 59.6 ที่ความเร็วรอบ 2,400 รอบต่อนาที ซึ่งเกินค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานค่าวันดำของรถยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์แบบจุดระเบิดด้วยการอัด ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 45 [14] ทั้งนี้เป็นเพราะอุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศมีขนาดเล็ก ส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรต่ำลง อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงต่ำเกินไปที่ความเร็วรอบสูง เผลาไหม้ไม่สมบูรณ์ จึงเกิดควันดำและสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงดีเซลมาก จึงมีข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไปควรพัฒนาให้อุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศสามารถปรับขนาดได้

ขณะทดสอบให้เครื่องยนต์ทำงานในแบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีน ได้ตรวจวัดอุณหภูมิของห้องเผาไหม้เสริมเปรียบเทียบกับอุณหภูมิของฝาสูบเครื่องยนต์เล็กแก๊สโซลีน Honda GX160 และตรวจวัดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรคาร์บอน ได้ผลดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบอุณหภูมิของห้องเผาไหม้เสริมกับอุณหภูมิของฝาสูบเครื่องยนต์เล็กแก๊สโซลีน เมื่อขณะอุณหภูมิคงที่ และปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรคาร์บอน

ความเร็วรอบเครื่องยนต์ (รอบต่อนาที)	เครื่องยนต์ Yanmar TF120DI ที่ดัดแปลงแล้ว ทำงานแบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีน ใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง			เครื่องยนต์เล็กแก๊สโซลีน Honda GX160 ทำงานแบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีน ใช้น้ำมันเบนซินเป็นเชื้อเพลิง		
	อุณหภูมิของห้องเผาไหม้เสริม (°C)	CO (%)	HC (ppm)	อุณหภูมิของฝาสูบ (°C)	CO (%)	HC (ppm)
600	181	0.03	1,208	-	-	-
1,200	228	0.36	1,579	119	0.02	336
1,800	283	0.67	1,893	129	0.09	402
2,400	302	0.69	1,727	148	0.42	217
3,000	-	-	-	165	0.33	170
3,600	-	-	-	188	0.33	181

จากตารางที่ 2 พบว่า ที่ความเร็วรอบสูงสุด จะมีความร้อนสะสมที่ห้องเผาไหม้เสริมจนมีอุณหภูมิ 302 องศาเซลเซียส ซึ่งอาจส่งผลต่อการเผาไหม้ที่ผิดปกติ จึงตรวจพบว่าปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์สูงสุดร้อยละ 0.69 และไฮโดรคาร์บอน 1,893 ส่วนในล้านส่วน เกินค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2552) เรื่อง กำหนดมาตรฐานค่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไฮโดรคาร์บอนจากท่อไอเสียของรถจักรยานยนต์ ซึ่งกำหนดค่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ไม่เกินร้อยละ 2.5 และกำหนดค่าก๊าซไฮโดรคาร์บอนไม่เกิน 1,000 ส่วนในล้านส่วน [15] อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้เป็นนวัตกรรมต้นแบบซึ่งยังไม่มีกระบวนการระบายความร้อนที่เพียงพอ จึงมีข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป ควรพัฒนาติดตั้งระบบระบายความร้อนที่ห้องเผาไหม้เสริมด้วย

ประเด็นที่ 2 เปรียบเทียบอัตราการใช้เชื้อเพลิงน้ำมันดีเซลและแอลพีจี จากการทดลองใช้เครื่องยนต์เป็นต้นกำลังในการสูบน้ำด้วยท่อพญานาคเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 8 นิ้ว ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ 1,000 รอบต่อนาที เปรียบเทียบในลักษณะการทำงานแบบเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงและในลักษณะการทำงานแบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีนที่ใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง ได้ผลดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบปริมาณและค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงน้ำมันดีเซลและแอลพีจี ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,000 รอบต่อนาที โดยใช้เป็นเครื่องยนต์ต้นกำลังในการสูบน้ำด้วยท่อพญานาคเส้นผ่านศูนย์กลางท่อขนาด 8 นิ้ว

ครั้งที่	เวลา (ชั่วโมง)	Yanmar TF120DI การทำงานแบบเครื่องยนต์ดีเซล ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง		Yanmar TF120DI การทำงานแบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีน ใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง	
		ปริมาณการใช้น้ำมันดีเซล; กิโลกรัม (ลิตร)	คำนวณเป็นค่าใช้จ่าย; บาทต่อชั่วโมง	ปริมาณการใช้แอลพีจี; กิโลกรัม	คำนวณเป็นค่าใช้จ่าย; บาทต่อชั่วโมง
1	1	0.95 (1.12)	29.22	0.50	12.10
2	1	0.90 (1.07)	27.92	0.55	13.31
3	1	0.90 (1.07)	27.92	0.55	13.31
เฉลี่ย	1	0.92 (1.09)	28.35	0.53	12.91

หมายเหตุ อ้างอิงราคาเชื้อเพลิง ณ วันที่ทำการทดลอง (11 กันยายน 2562)

- แอลพีจีภาคครัวเรือน ถึงขนาด 15 กิโลกรัม ราคา 363 บาทต่อถัง = 24.20 บาทต่อกิโลกรัม [16]
- น้ำมันดีเซลหมุนเร็ว (HSD, 0.005%S) ปตท. 26.09 บาทต่อลิตร [17]
- น้ำมันดีเซล มีค่าความหนาแน่น 0.845 กรัมต่อมิลลิกรัม ซึ่งได้จากการวัดค่าก่อนการทดลอง

จากตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบอัตราการใช้เชื้อเพลิงพบว่าใช้น้ำมันดีเซลเฉลี่ย 0.92 กิโลกรัมต่อชั่วโมง หรือประมาณ 1.09 ลิตรต่อชั่วโมง คิดเป็นค่าใช้จ่าย 28.35 บาทต่อชั่วโมง และหากใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงจะใช้แอลพีจีเฉลี่ย 0.53 กิโลกรัมต่อชั่วโมง คิดเป็นค่าใช้จ่าย 12.91 บาทต่อชั่วโมง สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ร้อยละ 54.46 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ นันทชัย โลหะโรจน์วิเชียร และ อนันต์ชัย เทียงคำห์ ที่ทำการศึกษาคัดแปลงเครื่องยนต์ดีเซลแบบห้องเผาไหม้ช่วยใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงหลัก [2] และชัยยง ศิริพรมงคลชัย ที่ทำการศึกษาคัดแปลงเครื่องยนต์ดีเซลแบบห้องเผาไหม้ช่วยใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงหลัก [3] พบว่าค่าใช้จ่ายของเชื้อเพลิงก๊าซแอลพีจีมีค่าใช้จ่ายน้อยกว่าค่าใช้จ่ายของเชื้อเพลิงน้ำมันดีเซล อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบครั้งนี้พบข้อสังเกตว่าปริมาณการใช้น้ำมันดีเซลสูงกว่าปริมาณการใช้แอลพีจีอย่างมาก ทั้งนี้เป็นผลมาจากปัญหาที่กล่าวมาในข้างต้นคืออุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศมีขนาดเล็ก ส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรต่ำลง อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงต่ำเกินไปที่ความเร็วรอบสูง จึงเกิดไอเสียมีควันสีดำและสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงดีเซลมากกว่าปกติ

4. สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) คัดแปลงเครื่องยนต์เล็กเพื่อการเกษตรให้สามารถรองรับการใช้เชื้อเพลิงได้ทั้งน้ำมันดีเซลและแอลพีจีในลักษณะการใช้เชื้อเพลิงทั้งสองชนิดที่แยกเป็นอิสระต่อกัน และ 2) เปรียบเทียบอัตราการใช้เชื้อเพลิงน้ำมันดีเซลและแอลพีจี จากงานวิจัยนี้จึงได้เครื่องยนต์ที่สามารถปรับเปลี่ยนสลับให้เครื่องยนต์เครื่องเดียวกันนี้ทำงานได้ในแบบเครื่องยนต์ดีเซลและทำงานได้ในแบบเครื่องยนต์แก๊สโซลีน จึงเป็นทางเลือกแก่เกษตรกรในการเลือกใช้เชื้อเพลิงที่มีราคาต่ำตามสภาวะความผันผวนของราคาเชื้อเพลิงทั้งสองชนิด ซึ่งยังไม่เคยมีงานวิจัยใดที่ดำเนินการในรูปแบบนี้มาก่อน ดังนั้นจึงอาจเป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาต่อยอดในการออกแบบสร้างเครื่องยนต์หลากหลายพลังงานทางเลือก อย่างไรก็ตามในการวิจัยครั้งนี้มีข้อเสนอแนะและควรพัฒนาเพื่อแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับความร้อนสะสมที่ห้องเผาไหม้เสริมและปริมาณควันดำมากที่ความเร็วรอบสูงต่อไปในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณภาณุพงศ์ ชันจันงค์, คุณภาณุวัฒน์ สุทธางกูร และ คุณสรศักดิ์ ลอยมา ที่ให้การสนับสนุนวัสดุอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Energy Policy and Planning Office Ministry of Energy, “NGV and LPG,” Eppo Journal, Special Issue, 2014, pp. 21.
- [2] N. Loharotwichian and A. Thiendah, “A study of diesel engine combustion chamber adapted to use LPG as the main fuel,” Journal of Energy and Environment Technology, Vol. 3, No. 1, 2016, pp. 29-37.
- [3] C. Siripornmongkolchai, “The use of gas LPG for alternative fuel engines for agriculture,” The Inaugural International Symposium on Local Wisdom and Improving Quality of Life, Rajamangala University of Technology Lanna Chiang-Mai, Thailand, 2012, pp. 238-244.
- [4] P. Kraisoda, B. Buphachot, G. Duangupama, K. Ruengsaen, C. Thurakarn, K. Chaiphet and W. Channuwong, “Application of Biogas Mixing with Gasifier for Agriculture Small Engines,” The 33rd Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, Udon Thani, Thailand, 2019, pp. AEC-022.
- [5] C. Siripornmongkolchai, “Evaluation of Agriculturist’s Satisfaction on 6 Districts of Nonthaburi Province, Using the Agricultural Small Engine Modified for LPG Gas Instead of Diesel,” Thaksin University Journal, Vol. 18, No. 3, 2015, pp. 72-80.
- [6] C. Siripornmongkolchai, Internal Combustion Engine, Odeonstore, Bangkok, 2017.
- [7] Yanmar TF-DI Series Data Manual, Yanmar S.P. Co., Bangkok, Thailand, 2008.

- [8] H. Chandler, Heat Treater's Guide Practices and Procedures for Irons and Steel, ASM International, USA, 1995.
- [9] C. Kasiphar, Strength of Materials, Chuan Pim, Bangkok, 1985.
- [10] M. Bohner, H. Gerschler, H. Gobweiler, S. Leyer, W. Pichler, W. Saier, H. Schmidt and H. Zwickel, Technology for the Automotive Trade Volume 2, Vollmer GmbH&Co, Germany, 1989.
- [11] J.B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, Singapore, 1988.
- [12] K.V. Mitzlaff, Engines for Biogas, Federal Republic of Germany, Lengerich, 1988.
- [13] บริษัท พัฒนาการกล จำกัด, ท่อสูบน้ำไรร้อยตะเข็บคุณภาพตราปลาฉลาม [Online], Available: <https://www.whalepump.com/propellerpumps> [26 มกราคม 2562].
- [14] กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานค่าวันค่าของรถยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์แบบจุดระเบิดด้วยการอัด, ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 136 ตอนพิเศษ 276 ง, 30 กันยายน 2562, หน้า 7-8 [Online], Available: <https://www.pcd.go.th/laws/ประกาศกระทรวงทรัพยากร-48/> [26 มกราคม 2562].
- [15] กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2552) เรื่อง กำหนดมาตรฐานค่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไฮโดรคาร์บอน จากท่อไอเสียของรถจักรยานยนต์, ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 126 ตอนพิเศษ 40 ง, 4 กุมภาพันธ์ 2552, หน้า 19-20 [Online], Available: <https://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2016/15811/1/กำหนดมาตรฐานค่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไฮโดรคาร์บอน%20จากท่อไอเสียของรถจักรยานยนต์.pdf> [26 มกราคม 2562].
- [16] RYT9, LPG Prices on 11 September 2019 [Online], Available: <https://www.ryt9.com/s/nepo/3040040> [September 11, 2019].
- [17] PTT Public Company Limited, Bangkok and Metropolitan Retail Prices for the Year 2019 [Online], Available: <https://www.pttplc.com/TH/Media-Center/Oil-Price/pages/Bangkok-Oil-Price.aspx> [September 11, 2019].