การออกแบบและพัฒนาระบบสร้างและจ่ายก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำเพื่อใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในสำหรับผลิตไฟฟ้าในชุมชน

Designing and Developing a System for Generating and Separating Hydrogen Gas From Water for Use With Internal Combustion Engines for Generating Electricity in the Community

วิเชียร เหิมหาญ[1] และ พงศกร คชาพงศ์กุล[2]
วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนรัตนโกสินทร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์[1, 2]

E-mail: wichienh@icloud.com[1], pongsakorn.kerd@rmutr.ac.th[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีเป้าประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบสำหรับสร้างและจ่ายก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำเพื่อใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในสำหรับผลิตไฟฟ้า เพื่อหาอัตราส่วนของก๊าซไฮโดรเจน และน้ำมันเชื้อเพลิงที่เหมาะสมในการผลิตไฟฟ้าจากเครื่องยนต์ที่มีขนาด 5,871 CC. กำลังการผลิตไฟฟ้า 60 กิโลวัตต์ ในการออกแบบชุดอุปกรณ์แยกก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำจะใช้แผ่นเซลล์โลหะ STL 316L มีมี 5 ช่อง ๆ ละ 13 แผ่น เป็นขั้วลบ 7 ขั้ว ขั้วบวก 6 ขั้ว ซึ่งเป็นชุดใหญ่มีแผ่นเซลล์รวมทั้งหมด 65 แผ่น กว้าง 80 มิลลิเมตร ยาว 105 มิลลิเมตร หนา 1.3 มิลลิเมตร ในการทดสอบจะใช้วิธีการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ผลิตไปยังภาระโหลด 0, 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการทดสอบพบว่าที่ภาระโหลด 50 เปอร์เซ็นต์ มีอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงน้อยที่สุด สามารถลดการใช้น้ำมันดีเซลลงได้ 24.9 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาที่ภาระโหลด 75 เปอร์เซ็นต์ สามารถลดการใช้น้ำมันดีเซลลงได้ 21.3 เปอร์เซ็นต์ ที่ภาระโหลด 25 เปอร์เซ็นต์ ที่สามารถลดการใช้น้ำมันดีเซลลงได้ 20.1 เปอร์เซ็นต์ ส่วนภาระโหลด 100 เปอร์เซ็นต์ มีอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงมากที่สุดซึ่งสามารถลดการใช้น้ำมันดีเซลลงได้เพียง 12.5 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการปลดปล่อยปริมาณ ควันดำ, PM2.5 และ PM10 โดยการเปรียบเทียบกับการใช้เชื้อเพลิงจากน้ำมันดีเซลเพียงอย่างเดียว เมื่อเปรียบเทียบการใช้งานตามภาระโหลดต่าง ๆ พบว่าที่ภาระโหลด 50 เปอร์เซ็นต์จะลดปริมาณควันดำได้มากกว่าภาระโหลดอื่น ๆ แต่ปริมาณของ PM2.5 จะลดได้น้อยกว่าที่ภาระโหลด 25 เปอร์เซ็นต์ การใช้เชื้อเพลิงน้ำดีเซลร่วมกับก๊าซไฮโดรเจนที่แยกได้จากชุดแยกก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำสามรถลดต้นทุนการผลิตไฟฟ้าเมื่อเทียบกับการใช้น้ำมันดีเซล 100 เปอร์เซ็นต์ เฉลี่ยอยู่ที่ 24.90 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: การแยกก๊าซไฮโดรเจนออกจากน้ำ, เชื้อเพลิงไฮโดรเจน, เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Abstract

The objective of this research was to design and develop a system for generating and distributing hydrogen gas from water for use in internal combustion engines for generating electricity to find the ratio of hydrogen gas and

fuel suitable for generating electricity from an engine with a size of 5,871 CC and an electrical capacity of 60 kilowatts. In designing a set of equipment to separate hydrogen gas from water, STL 316L metal cell plates were used. There were five channels, 13 plates each, seven negative terminals, and six positive terminals. This was a large set with 65 cell plates, width 80-mm. length 105- mm. thickness 1. 3 mm. The test used a method of supplying 0, 25, 50, 75, and 100 percent of the generated electricity to the load. The test found that at 50 percent load, there was the lowest fuel consumption rate which could reduce diesel fuel use by 24. 9 percent. After trying to come down to a load of 75 percent, diesel fuel use could be reduced by 21.3 percent. At a load of 25 percent, diesel fuel use could be reduced by 20. 1 percent. At a load of 100 percent, there was the most waste of fuel because the diesel use could be reduced by only 12. 5 percent. As for the release of black smoke, PM2. 5 and PM10 were compared with the use of diesel fuel alone. When comparing the use according to various loads, it was found that at a load of 50 percent, the amount of black smoke was reduced more than at other loads, but the amount of PM2. 5 was reduced less at a load of 25 percent using diesel fuel. Together with hydrogen gas separated from the hydrogen gas separation unit from water, the cost of electricity production could be reduced compared to using 100 percent diesel fuel, with an average of 24. 90 percent.

Keywords: separation of hydrogen gas from water, hydrogen fuel, electric generators

1. บทนำ

กิจการไฟฟ้าของประเทศไทยในปัจจุบันเป็น “ระบบผู้ซื้อรายเดียว” (Enhanced Single Buyer) หมายความว่า มีกลุ่มผู้ซื้อไฟฟ้าเพียงกลุ่มเดียวได้แก่ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ซึ่งเป็นรัฐวิสาหกิจ ต่อจากนั้นรัฐวิสาหกิจ ดังกล่าว จึงจำหน่ายไฟฟ้าให้กับผู้บริโภครายใหญ่ ประชาชนครัวเรือน ผู้บริโภครายย่อยอนึ่ง ตามแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย (Power Development Plan : PDP) [1] คาดว่าในปี พ.ศ. 2579 หรืออีกใน 20 ปีข้างหน้า ประเทศไทยจะมีความต้องการใช้ไฟฟ้ามากถึง 70,335 เมกะวัตต์ความเป็นห่วงที่ตามมา คือ ประเทศไทยจะใช้อะไรเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าแทนก๊าซธรรมชาติที่กำลังจะหมดไปจากอ่าวไทย ในแผน PDP ดังกล่าว จึงให้ความสำคัญของการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินและพลังงานทดแทน รวมถึงการนำเข้าก๊าซธรรมชาติเหลวจากต่างประเทศในส่วนของการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานทดแทน ในช่วงแรก ๆ ซึ่งเป็นช่วงที่ต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนมีราคาสูง รัฐบาลจึงจำเป็นต้องออกมาตรการส่งเสริมด้วยการรับซื้อไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนในราคาจูงใจในการลงทุน ได้แก่ มาตรการส่วนเพิ่มค่าไฟฟ้า (Adder) มาตรการราคาพิเศษ (Feed-in Tariff : FiT)

อย่างไรก็ตาม ทั้งมาตรการ Adder และ FiT นั้น จำเป็นต้องมีการเรียกเก็บค่าไฟฟ้าเพิ่มเข้าไปในบิลค่าไฟฟ้าของประชาชนทั่วประเทศ (เพิ่มในค่า Ft) และนำเงินที่เก็บได้นั้นไปสนับสนุนในมาตรการ Adder และ FiT ดังกล่าว จึงเป็นการสร้างภาระค่าไฟฟ้าให้กับประชาชน และมีข้อจำกัดในด้านงบประมาณที่จะต้องใช้ในระยะยาวในอนาคต

ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาดังกล่าวข้างต้น จำเป็นต้องมีการส่งเสริมกิจการไฟฟ้าเสรีที่ใช้พลังงานทดแทนในระดับชุมชนและระดับครัวเรือน เพื่อให้มีการปฏิรูปกิจการไฟฟ้า ด้วยการเปิดโอกาสและเชิญชวนให้เอกชนเข้ามาลงทุนในกิจการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานทดแทน [1] ซึ่งเป็นการรายงานของคณะกรรมาธิการขับเคลื่อนการปฏิรูปด้านพลังงาน โดยไม่ต้องให้รัฐจัดหาเงินมาซื้อไฟฟ้าในราคาพิเศษ แต่ให้เอกชนสามารถขายไฟฟ้าที่ผลิตได้ ให้แก่เอกชนด้วยกันเอง โดยให้เอกชนทำสัญญาซื้อขายไฟฟ้ากันเองอย่างเสรี เปิดโอกาสให้เอกชนสามารถส่งกระแสไฟฟ้าจากสถานที่แห่งหนึ่งไปยังสถานที่อีกแห่งได้อย่างเสรี และกำหนดให้การไฟฟ้านครหลวง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคยินยอมให้เอกชนสามารถใช้โครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าเป็นผ่านสายของกระแสไฟฟ้า และให้เอกชนจ่ายค่าผ่านสายที่เป็นธรรมให้แก่การไฟฟ้า ซึ่งแผนการจัดหาไฟฟ้าของประเทศยังมีข้อจำกัดในการเลือกเชื้อเพลิง [1-2] เนื่องจากเป็นห่วงกับผลกระทบที่จะเกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งกระทรวงพลังงานจึงมีแนวคิดที่จะสร้างโรงงานไฟฟ้าชุมชนในท้องถิ่น เพื่อเป็นทางเลือกให้มีโรงไฟฟ้ากระจายในทุกพื้นที่ โรงไฟฟ้าชุมชน ถือเป็นโรงไฟฟ้าขนาดเล็กที่ใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีศักยภาพในท้องถิ่น เช่น พลังงานลม น้ำ แสงอาทิตย์ หรือชีวมวล เป็นแหล่งพลังงาน โดยมีชุมชนเป็นผู้บริหารจัดการโรงไฟฟ้า ซึ่งจะอยู่ในรูปแบบสหกรณ์หรือวิสาหกิจชุมชน ปัจจุบันแยกออกเป็น 2 ลักษณะ คือ โรงไฟฟ้าชุมชนที่ตั้งขึ้นเพื่อผลิตไฟฟ้าให้แก่ประชาชนที่ไม่มีไฟฟ้าใช้ มักมีทำเลที่ตั้งอยู่ในถิ่นทุรกันดาร ระบบสายส่งเข้าไปไม่ถึง และไม่คุ้มค่ากับการติดตั้งระบบสายส่งเข้าสู่พื้นที่ การผลิตไฟฟ้าชุมชนจะเป็นแบบไม่เชื่อมต่อเข้าระบบสายส่ง ที่เรียกว่า Stand Alone เพื่อผลิตไฟฟ้าให้เพียงพอกับความต้องการใช้ภายในชุมชนเท่านั้น ขนาดของโรงไฟฟ้าจะพิจารณาจากจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าภายในชุมชน และโรงไฟฟ้าชุมชนที่ตั้งขึ้นในพื้นที่ที่มีไฟฟ้าใช้อยู่แล้ว แต่ยังมีทรัพยากรที่มีศักยภาพที่สามารถจะผลิตไฟฟ้าได้ เป็นการใช้ทรัพยากรในท้องถิ่นให้เกิดประโยชน์สูงสุด ไฟฟ้าที่ผลิตได้จะเชื่อมต่อแบบ Grid connect กับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ซึ่งรายได้จากการขายไฟฟ้าจะนำมาพัฒนาชุมชน และสำรองไว้บำรุงรักษาระบบ โดยเน้นให้ประชาชนมีส่วนร่วมในการบริหารจัดการ ขนาดโรงไฟฟ้าจะพิจารณาเต็มศักยภาพของแหล่งพลังงานที่มีในพื้นที่

จากแนวทางดังกล่าวข้างต้นโรงไฟฟ้าชุมชนจะมีข้อเสียคือ ปริมาณกำลังการผลิตไฟฟ้าที่ผลิตจากโรงไฟฟ้าชุมชนมักมีจำนวนไม่มาก เนื่องจากข้อจำกัดเรื่องปริมาณวัตถุดิบที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง ตัวอย่างเช่น โรงไฟฟ้าชีวมวลชุมชน ชีวมวลที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงมักมีน้ำหนักเบา อยู่กระจัดกระจายการเก็บรวบรวมอาจอยู่ในรัศมีไม่เกิน 20 - 25 กิโลเมตร [1] ทำให้รวบรวมได้ในปริมาณไม่มากนัก หากเกินกว่านี้จะทำให้ค่าขนส่งสูงไม่คุ้มกับการดำเนินงาน ซึ่งการหาแหล่งเงินทุน

ลำบากเนื่องจากปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้น้อย ส่งผลให้ผลตอบแทนไม่จูงใจต่อการลงทุน เว้นแต่ภาครัฐจะเข้ามาลงทุนโดยไม่คำนึงถึงผลตอบแทนโครงการในรูปของตัวเงิน นอกจากนี้เงินทุนหมุนเวียนอาจขาดสภาพคล่องเนื่องจากมีเงินทุนน้อย อนึ่งโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กมักมีค่าใช้จ่ายในการดูแลและบำรุงรักษาเครื่องจักรสูงกว่าโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ การขาดแคลนบุคลากรที่จะดำเนินการซ่อมบำรุงและเข้าใจระบบอย่างแท้จริงเมื่อประสบปัญหาด้านเทคนิค ทำให้เกิดความล่าช้าในการแก้ไขและกระทบต่อการผลิตไฟฟ้าในระยะยาว เมื่อต้องมีการเปลี่ยนซ่อมอะไหล่ที่ชำรุดและอะไหล่มีราคาแพง จากผลตอบแทนโครงการที่ต่ำทำให้ขาดเงินทุนสำรอง อาจส่งผลให้โรงไฟฟ้าหยุดดำเนินการและถูกปล่อยทิ้งร้างในที่สุด หากทำเลที่ตั้งโรงไฟฟ้าอยู่ไกลมาก อาจทำให้การบำรุงรักษาและให้บริการจากผู้ติดตั้งไม่สะดวกเนื่องจากการเดินทางที่ยากลำบาก ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการผลิตไฟฟ้า มักถูกคัดค้านจากประชาชนต่อการสร้างโรงไฟฟ้าเนื่องจากความไม่เข้าใจหรือมีความเข้าใจในแง่ลบต่อการดำเนินโครงการ ความเสี่ยงต่อความไม่แน่นอนของปริมาณเชื้อเพลิงบางชนิดที่ใช้ในโรงไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศ ได้แก่ น้ำ ลม และแสงอาทิตย์

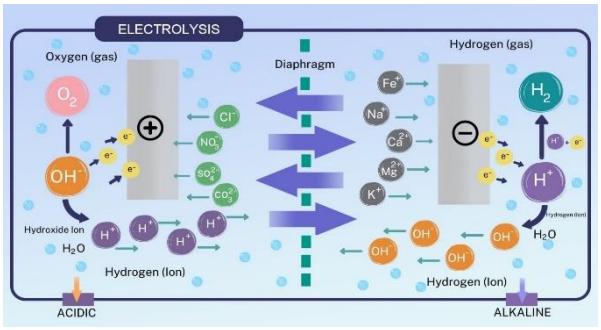
ดังนั้นทางเลือกหนึ่งของการใช้พลังงานทดแทนคือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยการติดตั้งระบบไฮโดรเจน เป็นทางเลือกใหม่ของพลังงานเชื้อเพลิงเครื่องยนต์ ซึ่งทางเลือกใหม่ของพลังงานเชื้อเพลิงเครื่องยนต์ที่นอกเหนือ LPG และ NGV กับชุดอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฮโดรเจน ใช้ควบคู่กับน้ำมันทั้งเบนซินและดีเซล ไม่ใช้ถัง ติดตั้งง่าย ระบบทำงานอัตโนมัติและที่สำคัญใช้พลังงานจากน้ำสะอาด ช่วยลดอัตราสิ้นเปลืองน้ำมันถึง 10 - 40% [5] โดยจะใช้ร่วมกับน้ำมันหลัก โดยที่ชุดอุปกรณ์ Hydrogen Power ทำงานอัตโนมัติทั้งระบบ ประกอบด้วย Cell Hydrogen ตัวเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน กล่อง CPU ควบคุมการผลิตไฮโดรเจนให้พอเหมาะตามรอบเครื่องยนต์ จึงใช้กระแสไฟฟ้าไม่มาก รวมถึงป้องกันกระแสไฟฟ้าเกิน โดยจะตัดทันทีหากเกิดผิดปกติ ECU ควบคุมปริมาณการจ่ายเชื้อเพลิง ให้กับเครื่องยนต์ร่วมกับพลังงานน้ำมันหลัก และยังป้องกันไฟย้อนกลับ กล่อง Power Control และระบบน้ำในการผลิตไฮโดรเจน ไม่ว่าจะเป็นหม้อน้ำวน หรือนวัตกรรมหล่อเย็น และถังบรรจุน้ำวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงไฮโดรเจน เครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าอิสระนี้สามารถเป็นทางเลือกหนึ่งของการใช้พลังงานทดแทน โดยการนำไปใช้ในภาคครัวเรือนหรือในชุมชน สำหรับลดปัญหาต่าง ๆ จากที่กล่าวมาได้เป็นอย่างดี ซึ่งงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบสำหรับสร้างและจ่ายก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำเพื่อใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในสำหรับผลิตไฟฟ้า และเพื่อหาอัตราส่วนของไฮโดรเจน และน้ำมันเชื้อเพลิงที่เหมาะสมในการผลิตไฟฟ้าจากเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าขนาด 60 kW

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การแยกสลายด้วยไฟฟ้าอิเล็กโทรลิซิส (Electrolysis) คือ กระบวนการผ่านกระแสไฟฟ้ากระแสตรง (DC) จากภายนอกเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี จึงเกิดเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) หรือ

รีดักชัน (Reduction Reaction) ในทิศทางที่ไม่สามารถเกิดเองได้ถ้าไม่จ่ายกระแสไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้จะต้องให้มากกว่าค่าโวลต์มาตรฐานที่ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้น เช่น การแยกสลายน้ำด้วยไฟฟ้าจะต้องใช้ค่าโวลต์ที่สูงกว่า 1.229 โวลต์ ในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยการแยกสลายน้ำด้วยไฟฟ้าที่ขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction) ของโปรตอน(ไฮโดรเจนไอออน) ในภาวะกรด ($2H+ + 2e- \longrightarrow H_2$) ส่วนในภาวะเบสจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ ($2H_2O + 2e- \longrightarrow H_2 + 2OH-$) ที่ขั้วแอโนดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้แก๊สออกซิเจน ($H_2O \longrightarrow 1/2O_2 + 2H+ + 2e-$) ดังแสดงในรูปที่ 1 ข้อดีของการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากวิธีนี้จะมีความบริสุทธิ์สูง



รูปที่ 1 การแยกสลายด้วยไฟฟ้า (Electrolysis)

เซลอิเล็กโทรลิซิส ประกอบด้วย

1. ขั้วไฟฟ้า (Electrode) คือ แผ่นตัวนำที่จุ่มในสารละลายอิเล็กโทรลิซิส แล้วต่อกับเซลล์ไฟฟ้าหรือแบตเตอรี่ แบ่งเป็น ขั้วแอโนด (Anode) และขั้วแคโทด (Cathode)

2. สารละลายอิเล็กโทรลิซิส คือ สารละลายที่นำไฟฟ้าได้ เพราะมีไอออนบวกและไอออนลบ ไอออนบวก วิ่งไปรับอิเล็กตรอนที่ขั้วลบเกิดปฏิกิริยารีดักชัน จึงเรียกขั้วลบว่า แคโทด และเรียกไอออนบวกว่า แคตไอออน (Cation)

ไอออนลบ วิ่งไปให้อิเล็กตรอนที่ขั้วบวกเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เรียกว่า แอโนด และเรียกไอออนลบว่า แอนไอออน (Anion)

3. เครื่องกำเนิดกระแสตรง (D.C.) ส่วนใหญ่จะเป็นแบตเตอรี่

2.2 แยกก๊าซไฮโดรเจน (H_2) จากน้ำ

ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยการแยกสลายน้ำด้วยไฟฟ้าที่ขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction) ของโปรตอน(ไฮโดรเจนไอออน) ในภาวะกรด

$$(2H+ + 2e- \longrightarrow H_2) \quad (1)$$

ส่วนในภาวะเบสจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ

$$(2H_2O + 2e- \longrightarrow H_2 + 2OH-) \quad (2)$$

ที่ขั้วแอโนด เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้แก๊สออกซิเจน

$$(H_2O \longrightarrow 1/2O_2 + 2H+ + 2e-) \quad (3)$$

ข้อดีของการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากวิธีนี้จะมีความบริสุทธิ์สูง ข้อเสีย คือค่าใช้จ่ายด้าน กระแสไฟฟ้าสูง ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้วิธีการแยกก๊าซไฮโดรเจนออกจากน้ำโดยใช้กระบวนการ Electrolysis แล้วนำก๊าซไฮโดรเจนที่แยกได้ไปใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับเชื้อเพลิงน้ำมันเพื่อผลิตไฟฟ้า โดยมีเป้าประสงค์ในการประหยัดพลังงาน ลดมลภาวะ และฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 [7] ที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของเครื่องยนต์สันดาปภายใน ส่งผลให้ลดภาวะโลกร้อนได้อีกด้วย โดยได้ศึกษาเพิ่มเติมจากงานวิจัย บทความ

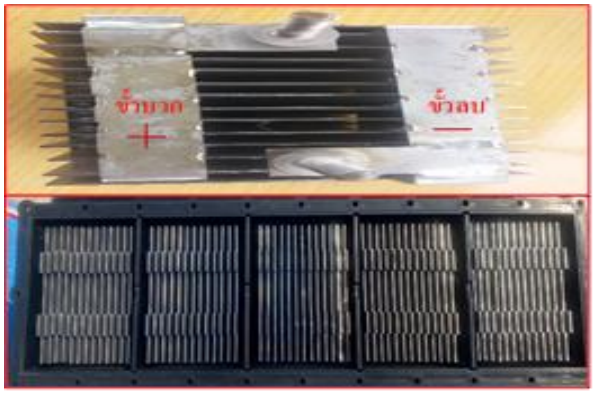
และตำราต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เพื่อเป็นแนวทาง ข้อเสนอแนะเพื่อนำมาประยุกต์ใช้

2.3 ชุดอุปกรณ์ผลิตแยกก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำ

พลังงานทดแทนเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ โดยเฉพาะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองที่ใช้น้ำมันดีเซล ก๊าซชีวภาพ การใช้น้ำมันดีเซล หรือก๊าซชีวภาพกับเครื่องเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าไว้ใช้สำรองกรณีไฟฟ้าหลักดับ จากงานวิจัยของณัฐพลและคณะ [2] พบว่าการใช้ก๊าซชีวภาพกับเครื่องยนต์แก๊สโซลีนขนาดเล็กเพื่อศึกษาหาสมรรถนะพร้อมชุดกำเนิดไฟฟ้าสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 1 kVA โดยเครื่องยนต์มีการดัดแปลงเพิ่มอุปกรณ์ผสมก๊าซแล้วทำการทดสอบการภาระโหลดโดยใช้หลอดไฟขนาดต่าง ๆ ผลการทดสอบพบว่าสมรรถนะที่ดีที่สุดของเครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซชีวภาพอยู่ที่ภาระเท่ากับ 600 วัตต์โดยที่อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเท่ากับ 31.2 ลิตรต่อนาที กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เท่ากับ 0.597 กิโลวัตต์การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเท่ากับ 3.13 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง การเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเบนซิน 91 กับเครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซชีวภาพที่ได้จากการหมักขี้ช้าง ผลการทดสอบของเครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซชีวภาพเดินเครื่อง พบว่าค่าปริมาณไอเสียมีค่าน้อยกว่าการเดินเครื่องโดยใช้น้ำมันเบนซิน 91 [2] แต่มีค่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่าเพราะก๊าซชีวภาพมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์มากอยู่แล้ว เมื่อมีการเผาไหม้ค่าก็จะยังเพิ่มมากขึ้น และค่าไนโตรเจนของก๊าซชีวภาพจะมีค่าสูงเช่นกันเมื่อเทียบค่าการทดสอบใช้ก๊าซชีวภาพเดินเครื่องยนต์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ได้ทำการทดสอบเดินเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบเท่ากัน และเปรียบเทียบกำลังของเครื่องยนต์ที่ให้ออกมาจากการทดลองพบว่าการใช้ก๊าซชีวภาพเดินเครื่องยนต์ให้กำลังต่ำกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงเบนซิน การใช้เชื้อเพลิงผสมทำให้กำลังลดลงประมาณ 9 - 17% และเมื่อใช้เชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพล้วนกำลังจะลดลงถึง 30 - 37 % [3] การศึกษาการใช้ก๊าซชีวภาพมาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ 4 สูบ 1.9 ลิตร โดยทดสอบที่ความเร็วรอบ 1,800 รอบ/นาที [4] โดยมีการวัดค่า CO_2 และ CH_4 ของก๊าซและจำกัดอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ แล้วทำการวัดความดันโดยวัดที่ถังก๊าซและอุณหภูมิที่ไอเสียปล่อยออกมาจากปลายท่อไอเสีย จากการทดลองพบว่าความดันของก๊าซอยู่ในช่วง 2 - 2.2 bar และมีอุณหภูมิความร้อนที่ปล่อยออกมาอยู่ในช่วง 473 - 483 K

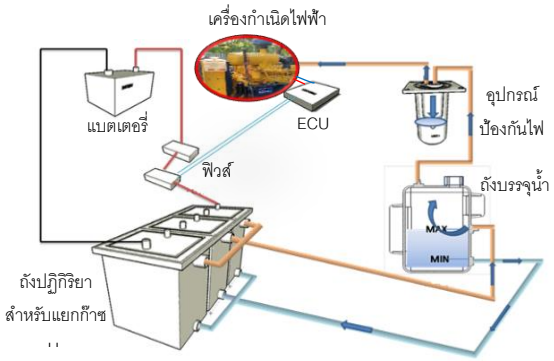
การศึกษาเพื่อดำเนินการวิจัยนี้เป็นแนวทางหนึ่งในการออกแบบและพัฒนาระบบสำหรับสร้างอุปกรณ์ผลิตเชื้อเพลิงไฮโดรเจนจากน้ำสำหรับผลิตไฟฟ้าขนาด 60 กิโลวัตต์ซึ่งเป็นแนวทางในการประหยัดพลังงาน โดยก๊าซไฮโดรเจนถูกนำมาใช้เป็นพลังงานทางเลือก เนื่องจากเป็นพลังงานสะอาดไม่มีสารประกอบคาร์บอน ซึ่งเป็นสาเหตุของภาวะเรือนกระจก ในการออกแบบชุดอุปกรณ์ผลิตแยกก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำ จะใช้แผ่นเซลล์โลหะ STL 316L มีมี 5 ช่อง ๆ ละ 13 แผ่น เป็นขั้วลบ 7 ขั้ว ขั้วบวก 6 ขั้ว ซึ่งเป็นชุดใหญ่มีแผ่นเซลล์รวมทั้งหมด 65 แผ่น กว้าง 80 มิลลิเมตร ยาว 105 มิลลิเมตร หนา 1.3 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2 และในการทดสอบนี้ได้เติมโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium Carbonate) หรือ โซดาแอช (Soda Ash) ซึ่งเป็นสารที่มีสูตรเคมี คือ Na_2CO_3 ซึ่งจะส่งผลให้

อิเล็กตรอนระหว่างประจุบวก และลบทำงานได้ดีขึ้น และส่งผลให้การแยกก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำ ได้มากขึ้น ด้วย ซึ่งควรเติมในอัตราส่วน 1 ช้อนชาต่อน้ำ 1 ลิตร



รูปที่ 2 แผ่นเซลล์โลหะ STL 316L

จากการทดสอบกำลังการแยกก๊าซพบว่า ขนาดเครื่องยนต์ ตั้งแต่ 3,500 - 6,500 ซีซี ชุดแยกก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำใช้แผ่นเซลล์โลหะ STL 316L มีห้องปฏิกิริยาจำนวน 5 ช่อง ๆ ละ 13 แผ่น เป็นขั้วลบ 7 ขั้ว ขั้วบวก 6 ขั้ว ซึ่งการทดสอบครั้งนี้ใช้เครื่องยนต์ดีเซล HINO รุ่น EH100 ขนาดความจุ 5,871 ซีซี ที่มีกำลังการผลิตไฟฟ้า 60 กิโลวัตต์ โดยการทดสอบตามการผลิตไฟฟ้าด้วยความเร็วรอบของการผลิตไฟฟ้าที่เครื่องยนต์ 1,500 รอบต่อนาที อุปกรณ์หลักของชุด

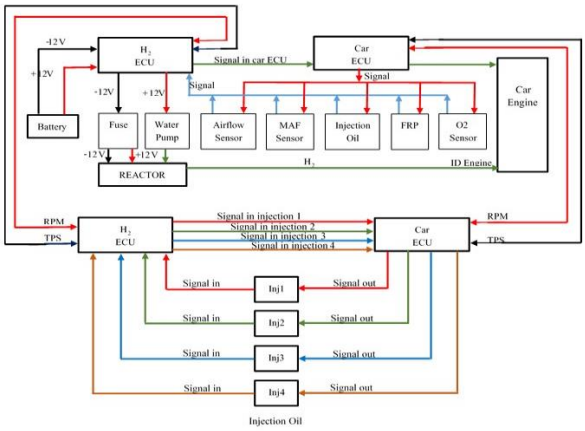


รูปที่ 3 การออกแบบกระบวนการและอุปกรณ์แยกก๊าซ H_2 ที่ใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

อุปกรณ์ผลิตแยกก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำประกอบด้วย 1.ถังปฏิกิริยา 2.ถังบรรจุน้ำ 3.อุปกรณ์ป้องกันไฟย้อนกลับ 4. Electronics Control Unit (ECU) ดังรูปที่ 3

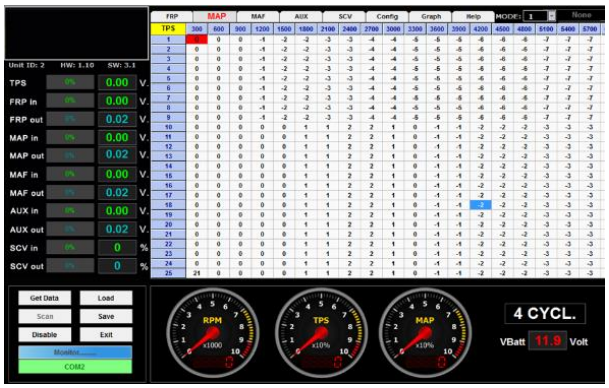
2.4 การออกแบบระบบควบคุมการผลิตและการจ่ายก๊าซไฮโดรเจนที่แยกได้สู่เครื่องยนต์

การควบคุมการผลิตและการจ่ายก๊าซไฮโดรเจนที่แยกได้สู่เครื่องยนต์ โดยการใช้ Electronic Control Unit (ECU) โดยการหลอกสัญญาณให้ปรับเวลายกหัวฉีดให้ช้าลง (msec) เพื่อให้การจ่ายน้ำมันน้อยลง และให้เครื่องยนต์ดูดเอาก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ไปใช้แทน โดยการควบคุมของชุด ECU ของการควบคุมการผลิตก๊าซไฮโดรเจนในถังปฏิกิริยา ในการจ่ายกำลังไฟฟ้าตามอัตราเร่งของเครื่องยนต์ ซึ่งในกระบวนการนี้ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ และใช้กระแสไฟฟ้าช่วง 10 - 13 แอมแปร์ [9] ซึ่งการออกแบบวงจรควบคุมแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ผังการออกแบบระบบควบคุมปรับลดสัญญาณในอุปกรณ์ และ Sensor เพื่อให้เครื่องยนต์ลดการใช้น้ำมัน โดยการใช้ก๊าซไฮโดรเจนเข้าไปทดแทน

การปรับตั้งค่าให้มีค่าเป็นลบ การสั่งฉีดน้ำมันของเครื่องยนต์จะลดลง ต้องตั้งตามตัวเลขที่ติดลบ หากตัวเลขเป็นบวกการสั่งฉีดน้ำมันจะเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 5 ซึ่งค่า MAP in คือค่าจริงของรถ และค่า MAP out คือค่าที่ได้จากการปรับตั้ง ดังนั้นการปรับตั้งให้ค่า out น้อยกว่า in โดยทำการหลอกสัญญาณที่ Sensor รถวัดได้จริงให้มีค่าเป็นแรงดันไฟฟ้าลดลง 0 - 1 โวลต์ และ 0 - 5 โวลต์ ก่อนที่ MAP จะส่งค่าเข้าสู่ ECU เพื่อให้เครื่องยนต์สั่งฉีดน้ำมันตามความเร็วของอากาศที่ผ่านเข้ามา ก่อนที่จะถูกส่งไปยัง ECU ของเครื่องยนต์ แล้วจะทำให้สัญญาณมาผ่าน ECU ของการสั่งจ่ายไฮโดรเจน ด้วยการหลอกสัญญาณโดยการลดให้มีค่า แรงดันไฟฟ้าน้อยลงจาก MAP in เพื่อให้การสั่งฉีดน้ำมันน้อยลงจากที่ควรจะเป็น แล้วจะทำการจ่ายก๊าซไฮโดรเจน เข้าชดเชยเชื้อเพลิงส่วนนี้ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การปรับตั้งสัญญาณมาผ่าน ECU ของการสั่งจ่ายน้ำมันและก๊าซไฮโดรเจน

ในการทดสอบนี้เป็นการทดสอบการใช้เครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า เพื่อมุ่งหวังจะนำไปใช้กับชุมชนที่ห่างไกลและไม่มีไฟฟ้าใช้ เพื่อเป็นแนวทางหนึ่งในการลดต้นทุนการผลิตไฟฟ้า จากการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง โดยการใช้เครื่องยนต์ขนาดความจุ 5,871 CC. กำลังการผลิตไฟฟ้า 60 กิโลวัตต์ ดังรูปที่ 6

รูปที่ 6 เครื่องยนต์ดีเซล HINO รุ่น EH100 ขนาดความจุ 5,871 CC. กำลังการผลิตไฟฟ้า 60 กิโลวัตต์

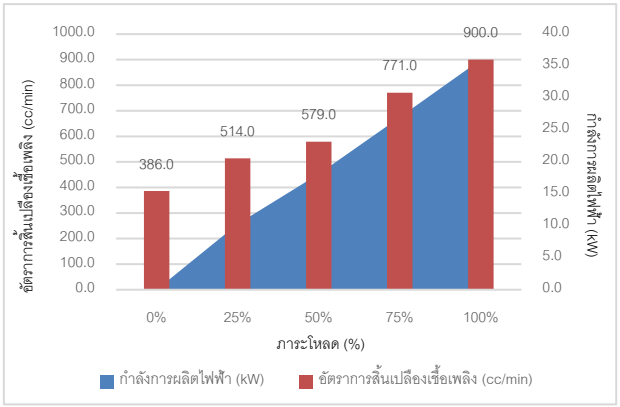
การทดสอบครั้งนี้ โดยการทดสอบตามการผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ทำงานที่ 1,500 รอบต่อนาที โดยใช้เครื่องยนต์มือสอง ที่มีสภาพเครื่องยนต์อยู่ที่ 95 เปอร์เซ็นต์ ในการทดสอบโดยใช้การเดินเครื่องจากการใช้น้ำมันดีเซล 100 เปอร์เซ็นต์ และการใช้แบบน้ำมันดีเซลผสมกับก๊าซไฮโดรเจนที่แยกได้จากน้ำตามกำลังการใช้กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยแบ่งการผลิตไฟฟ้าคือ 1.แบบไม่มีโหลด 2. แบบมีโหลดที่ 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ เพื่อหาอัตราส่วนของไฮโดรเจน และน้ำมันเชื้อเพลิงที่เหมาะสมในการผลิตไฟฟ้าในสภาวะต่าง ๆ

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 การทดสอบอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง

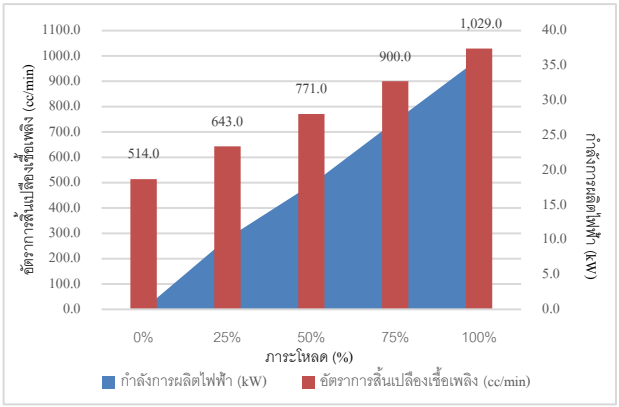
ในการทดสอบนี้จะทำการทดสอบในการผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที (ตามมาตฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า) โดยใช้เครื่องยนต์มือสอง ที่มีสภาพเครื่องยนต์อยู่ที่ 95 เปอร์เซ็นต์ โดยการเดินเครื่องยนต์ในการผลิตไฟฟ้า

ด้วยการใช้น้ำมันดีเซล 100 เปอร์เซ็นต์ และการใช้แบบน้ำมันดีเซลผสมกับก๊าซไฮโดรเจนที่แยกได้จากน้ำ โดยการแบ่งการผลิตไฟฟ้าดังนี้ 1.แบบไม่มีโหลด 2. แบบมีโหลดที่ 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งได้ผลดังนี้



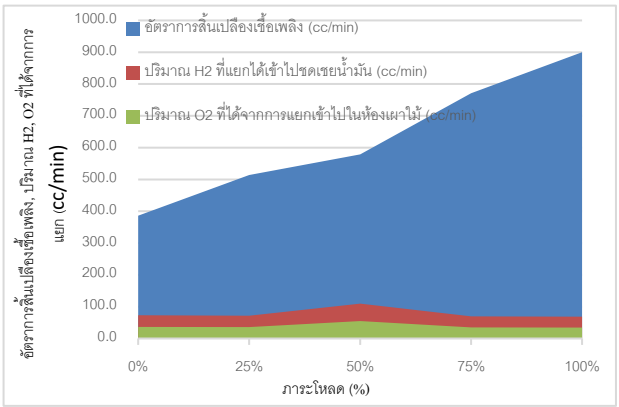
รูปที่ 7 อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงที่ลดลง โดยการใช้ก๊าซไฮโดรเจนผสมน้ำมันเชื้อเพลิงที่ภาระโหลดต่าง ๆ

จากการทดสอบการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำโดยการป้อนไฟฟ้ากระแสตรงที่ 12 - 14.5 โวลต์ และใช้กระแสไฟฟ้าช่วง 10 - 13 แอมแปร์ ซึ่งสามารถประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงได้เฉลี่ยที่ 2.3 ลิตรต่อชั่วโมง จากการทดสอบที่ภาระในการผลิตไฟฟ้าที่ 50 - 75 เปอร์เซ็นต์ หรือคิดเป็นไฟฟ้าที่ผลิตได้ 37.5 กิโลวัตต์ชั่วโมง โดยการนำก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้มาผสมกับน้ำมันดีเซล จะผลิตตามอัตราเร่งของเครื่องยนต์ โดยการปรับสัญญาณให้เครื่องยนต์จ่ายน้ำมันน้อยลง เพื่อนำก๊าซไฮโดรเจนเข้าไปแทนที่ และทำการทดสอบโดยการใช้น้ำมันดีเซล 100 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับการใช้ก๊าซไฮโดรเจน มาผสม พบว่าสามารถประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงได้ 24.9 เปอร์เซ็นต์ โดยที่การผลิตไฟฟ้าที่ 37.5 กิโลวัตต์ชั่วโมง จะประหยัดน้ำมันดีเซลในการผลิตไฟฟ้า 37.5 กิโลวัตต์ชั่วโมงเท่ากัน โดยการใช้น้ำมันดีเซล 100 เปอร์เซ็นต์ นั้นมีต้นทุนการผลิตคือ 8.13 บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง แต่เมื่อนำก๊าซไฮโดรเจนมาผสมจะมีต้นทุนการผลิตคือ 6.10 บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง จะเห็นได้ว่าการใช้ก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากน้ำสามารถลดต้นทุนการผลิตไฟฟ้าลงได้ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง โดยการใช้น้ำมันดีเซลเพียงอย่างเดียว ที่ภาระโหลดต่าง ๆ

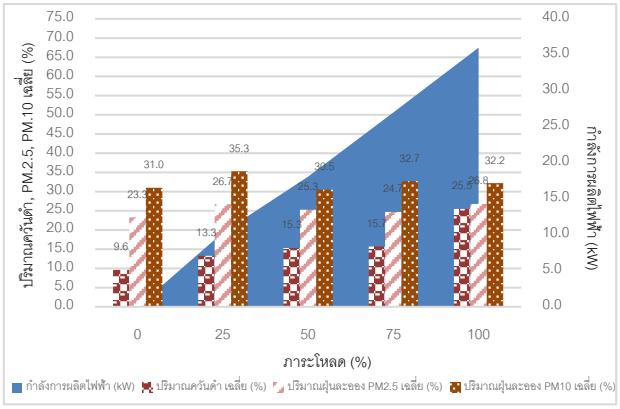
การเปรียบเทียบปริมาณการแยกก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำนั้นจะมีก๊าซออกซิเจนออกมาในอัตรา ½ ส่วนของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตออกมาแล้วนำมาเปรียบเทียบกับอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง และปริมาณก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนที่ผลิตได้ตามภาระโหลดต่าง ๆ

จากรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าที่ภาระโหลด 50 % จะมีอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจะมีค่าน้อย ซึ่งสามารถประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงลงได้ 192 CC/min เนื่องจากการผลิตก๊าซไฮโดรเจนนั้นสูงขึ้นในปริมาณที่ 144 CC/min ดังนั้นการผลิตไฟฟ้านี้จะเหมาะสมกับภาระโหลดที่ 50 %

การเปรียบเทียบการลดปริมาณควันดำ (%) โดยใช้เครื่องมือวัดควันดำ /ปริมาณควันไอเสียจากการเผาไหม้ (Smoke meter) ที่ผ่านการรับรองมาตรฐาน OIML R99 Class 0, ISO-3930 และ BAR97 ส่วน การตรวจวัด PM10 และ PM2.5 ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ โดยใช้เครื่องมือวัดปริมาณฝุ่นควันละอองขนาดเล็ก PM2.5 ซึ่งแบ่งการผลิตไฟฟ้าคือแบบมีโหลดที่ 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยการทดสอบจะทำการตรวจวัดระหว่างการใช้เชื้อเพลิงน้ำดีเซลร่วมกับใช้ เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ผลิตได้ ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 การตรวจวัดปริมาณ ควันดำ, PM2.5 และ PM10 ที่ภาระโหลดต่าง ๆ (%)

จากรูปที่ 10 พบว่าการใช้เชื้อเพลิงน้ำดีเซลร่วมกับเชื้อเพลิงไฮโดรเจน ที่แยกได้จากน้ำตามภาระโหลดต่าง ๆ สามารถช่วยลดการปลดปล่อยปริมาณควันดำ, PM2.5 และ PM10 ลงได้ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เชื้อเพลิงจากน้ำมันดีเซลเพียงอย่างเดียว เมื่อเปรียบเทียบการใช้งานตามภาระโหลดต่าง ๆ พบว่าที่ภาระโหลด 50 จะลดปริมาณควันดำได้มากกว่าภาระโหลดอื่น ๆ แต่ปริมาณของ PM2.5 จะลดได้น้อยกว่าที่ภาระโหลด 25 เปอร์เซ็นต์ อันเนื่องมาจากภาระงานในช่วงนี้น้อยกว่าส่งผลให้การเผาไหม้ของเครื่องยนต์อยู่ในจุดที่ไม่ก่อให้เกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก แต่จะอยู่ในช่วงที่เกิด PM10 มากกว่า ส่วนปริมาณควันดำที่ปล่อยออกมานั้นยังมีสัดส่วนที่สูงกว่าการใช้งานที่ภาระโหลด 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบแล้วจะเห็นได้ว่าที่ภาระโหลดระหว่าง 50 - 75 เปอร์เซ็นต์ เป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งานของการนำเชื้อเพลิงน้ำดีเซลร่วมกับเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่แยกได้จากน้ำในการผลิตไฟฟ้า

จากการวิจัยนี้พบว่าที่ภาระโหลด 37.5 กิโลวัตต์ การใช้ก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้มาผสมกับน้ำมันดีเซล มีสัดส่วนการประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงได้ 24.9 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการใช้น้ำมันดีเซล 100 เปอร์เซ็นต์

4. สรุปผล

การนำเสนอนี้เป็นแนวทางการลดต้นทุนการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยวิธีการแยกก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำผสมน้ำมันเชื้อเพลิง โดยการออกแบบและพัฒนาระบบสำหรับสร้างและจ่ายก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำเพื่อใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในสำหรับผลิตไฟฟ้า และหาอัตราส่วนของไฮโดรเจน และน้ำมันเชื้อเพลิงที่เหมาะสมในการผลิตไฟฟ้าจากเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้สำหรับการผลิตไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพ

สูงสุดของสรรถนะเครื่องยนต์สันดาปภายในที่ใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนรวมถึงอัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง จากการทดสอบพบว่าที่ภาระโหลด 0, 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ พบว่าที่ภาระโหลด 50 เปอร์เซ็นต์ มีอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงน้อยที่สุด สามารถลดการใช้น้ำมันดีเซลลงได้ 24.9 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาภาระโหลด 75 เปอร์เซ็นต์ ที่สามารถลดการใช้น้ำมันดีเซลลงได้ 21.3 เปอร์เซ็นต์ ที่ภาระโหลด 25 เปอร์เซ็นต์ ที่สามารถลดการใช้น้ำมันดีเซลลงได้ 20.1 เปอร์เซ็นต์ ส่วนภาระโหลด 100 เปอร์เซ็นต์ มีอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงมากที่สุดซึ่งสามารถลดการใช้น้ำมันดีเซลลงได้ 12.5 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการปลดปล่อยปริมาณ ควันดำ, PM2.5 และ PM10 โดยการเปรียบเทียบกับการใช้เชื้อเพลิงจากน้ำมันดีเซลเพียงอย่างเดียว เมื่อเปรียบเทียบการใช้งานตามภาระโหลดต่าง ๆ พบว่าที่ภาระโหลด 50 เปอร์เซ็นต์จะลดปริมาณควันดำได้มากกว่าภาระโหลดอื่นๆ แต่ปริมาณของ PM2.5 จะลดได้น้อยกว่าที่ภาระโหลด 25 เปอร์เซ็นต์ การใช้เชื้อเพลิงน้ำดีเซลร่วมไฮโดรเจนที่แยกได้จากชุดแยกก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำสามารถลดต้นทุนการผลิตไฟฟ้าเมื่อเทียบกับการใช้น้ำมันดีเซล 100 เปอร์เซ็นต์ เฉลี่ยอยู่ที่ 24.90 เปอร์เซ็นต์

เอกสารอ้างอิง

[1] Department of Alternative Energy Development and Energy Efficiency.(2014) “Hydrogen” Department of Alternative Energy Development and Energy Efficiency, Encyclopedia of Alternative Energy. pp. 47-75.

[2] Nattawut Ponsorn et al. (2011). A comparative study of the performance of modified diesel engines when using water, gasoline, cooking gas, and biogas as fuel. Khon Kaen University Research Journal (Graduate Studies Edition). pp. 27-38.

[3] Seokhwan Lee, Sang Hee Woo, Yongrae Kim, Young Choi, Kernyong Kang., (2020) “Combustion and emission characteristics of a diesel-powered generator running with N-butanol/ coffee ground pyrolysis oil/ diesel blended fuel” Energy journal homepage: www.elsevier.com/locate/energy0360-5442/ 2020, Elsevier Ltd. All rights reserved.

[4] Castro Nicolas, Toledo Mario, Amador German, (2019). An experimental investigation of the performance and emissions of a hydrogen- diesel dual fuel compression ignition internal combustion engine. Applied Thermal Engineering. pp. 660-667.

[5] Dhyani Vipin, Subramanian K. A., (2019). Experimental based comparative exergy analysis of a multi-cylinder spark ignition engine fueled with different gaseous (CNG, HCNG, and hydrogen) fuels. International Journal of Hydrogen Energy, 26 July 2019. pp. 20440-20451.

[6] Arat Huseyin Turan, (2019). Alternative fuelled hybrid electric vehicle (AF-HEV) with hydrogen enriched internal combustion engine. International Journal of Hydrogen Energy. Volume 44, Issue 34, 12 July 2019. pp. 19005-19016

[7] SunYao, Yua Xiumin, Donga Wei, Tang Yang, (2018). Effects of hydrogen direct injection on engine stability and optimization of control parameters for a combined injection engine. International Journal of Hydrogen Energy. pp. 1-11.

[8] Wu Horng-Wen, Hsu Tzu -Ting, Fan Chen-ming, He Po-Hsien, (2018) . Reduction of smoke, PM2.5, and NOX of a diesel engine integrated with methanol steam reformer recovering waste heat and cooled EGR. Energy Conversion and Management. pp. 567-578.

[9] Sara Tayaria, Reza Abedib, (2019) . Effect of Chlorella vulgaris methyl ester enriched with hydrogen on performance and emission characteristics of CI engine. Fuel 256 (2019). pp. 115-906.