Thesis Title Development of Internal Combustion Biogas Engine for Electricity Generation

Author Mr. Sittiboon Siripornakarachai

Degree Doctor of Engineering (Energy Engineering)

Thesis Advisory Committee
Assoc. Prof. Thawan Sucharitakul Chairperson
Asst. Prof. Dr. Patrapon Kamonpet Member
Asst. Prof. Dr. Det Damrongsak Member
Asst. Prof. Dr. Nakorn Tippayawong Member

ABSTRACT

The main objective of this work is to develop the prototype of small and large-sized electrical generators from biogas engines. This is by using the electrical generation technique with an engine running at a velocity synchronous with the induction-motor until the induction-motor reaches the generation mode and becomes the generator to produce electricity at 50 Hz. In this work, the biogas generator set was designed, constructed and tested into two sets; the first set in this study is to modify and tune a multi-valve automotive engine to use biogas to produce electricity. The engine under study was a Nissan GA-16DE 1,600 cc 16-valve gasoline engine coupled to a 3-phase 2-pole induction-motor and subsequent attachment to a small-sized biogas generator set (under 100 kW). A biogas carburetor was designed and installed on the engine. Operating variables including air/fuel ratio, ignition timing, and compression ratio are varied to find the optimal operating point. The second set in this study is to convert and tune a bus diesel engine for electricity production on a farm using biogas as fuel. The engine under study was a Hino K-13CTI 13,000 cc 24-valve diesel turbocharged engine coupled to a 3-phase 4-pole induction-motor and attachment to a large-sized biogas generator set (100 kW or more). Modifications included the addition of a biogas carburetor for air-fuel mixing, replacing the fuel injection system with a spark ignition system, reduction of compression ratio from the original 16:1 to 8:1 using a cylinder head spacer, and modification of the turbocharger waste gate so the boost pressure can be adjusted.

In the biogas carburetors designed and tested, the numerical model of the venturi is simulated by commercial computational fluid dynamic software. Numerical models were successfully developed to an appropriate flow at 8 circular ports around the throat area and 10^{o} of diffuser cone angle of the venturi. Also, the metering needle for the gas inlet was fabricated with a parabola profile to provide some linearity between

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

the needle position and the gas flow rate. Comparisons were drawn of the wear and tear on the engine's moving parts between the small-size biogas engine after 1,000 hours of operation at optimum conditions and the same gasoline engine model in a pickup truck after 100,000 km of operation under normal conditions. The results showed no abnormal wearing out of the engine's moving parts and regarded as having no significance. The amount of wear and tear on the biogas engine's moving parts is similar to the same gasoline engine model in a pickup truck. For example, the valve thickness of the biogas engine has 0.02 mm ware and the piston ring gap and thickness has 0.03 mm more ware than a similar gasoline engine.

The experimental results can be summarized into two parts as follows; for the small-size biogas generator set tested, it was found that when the system was operating at 3,000 rpm, the optimal settings are an excess air ratio of 1.006, ignition timing at 49^{o} BTDC, and compression ratio of 11:1 will produce the maximum engine efficiency of 26.22%. With these settings, the output power from the generator is 21.4 kW, the CO emission is 697 ppm and the payback period would be 1.69 years when running at 12 hours per day. The engine can also be tuned for maximum output power which reduces the payback period to 1.55 year. In this case, settings of an excess air ratio of 0.885, ignition timing at 44^{o} BTDC, will produce engine efficiency of 25.22%, maximum output power for this operating point is 22.7 kW and the amount of CO in the exhaust gas is 1,301 ppm. The large-size biogas generator set tested, when the induction motor was synchronized to the power grid, the running speed of the engine was 1,500 rpm. Optimal engine efficiency was achieved at 28.63% by setting the excess air ratio at 1.097, ignition timing at 54^{o} BTDC, and the turbocharger boost at 56 kPa. With this setting, the generator power output was 134.2 kW with emissions of CO and NO_X being 1,154 and 896 ppm respectively. The generator specific output for biogas containing 70%CH_4 is 1.7 kWh/m^3 of biogas consumed. With these settings, the payback period is 0.42 year when running 12 hours per day. As the boost pressure is increased from 56 kPa to 68 kPa, the efficiency begins to decrease and the amount of pollution is increased. Increase in engine vibration is also noted in this turbocharger boost range. NO_X is high when high pressure and temperature occur in the combustion. However, this system will produce electrical output power of 93.4 to 143.2 kW if the engine is operated with rich air/fuel ratio and high turbocharger boost. Higher engine output will yield a shorter payback period for the investment but increasing the boost pressure beyond 56 kPa will cause excessive pollution emissions and engine vibration which will probably shorten the engine's life. It can be concluded that the boost pressure of 56 kPa yields the highest efficiency with an acceptable pollution level for this engine. These experimental results tested, the exhaust gas emissions passed the internationally accepted pollution control standard of CO of a vehicle engine.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์	การพัฒนาเครื่องยนต์สันดาปภายในก๊าซชีวภาพเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า
ผู้เขียน	นายสิทธิบูรณ์ ศิริพรอัครชัย
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมพลังงาน)

คณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. ตะวัน	สุจริตกุล	ประธานกรรมการ
	ผศ.ดร. ภัทราพร	กมลเพ็ชร	กรรมการ
	ผศ.ดร. เดช	ดำรงศักดิ์	กรรมการ
	ผศ.ดร. นคร	ทิพยาวงศ์	กรรมการ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการพัฒนาต้นแบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่จากเครื่องยนต์สันดาปภายในที่ใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงโดยใช้เทคนิคการกำเนิดไฟฟ้าด้วยหลักการให้เครื่องยนต์เป็นต้นกำลังขับหมุนเพลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้มีความเร็วเข้าสู่ความเร็วซิงโครนัสของมอเตอร์จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะผลิตกระแสไฟฟ้าและกลายเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz ในที่สุด ในงานวิจัยนี้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นแบบได้ถูกออกแบบ สร้าง และทดสอบทั้งสิ้นสองชุดคือ ชุดแรกทำการดัดแปลงเครื่องยนต์ก๊าซโซลีน ยี่ห้อ Nissan รุ่น GA-16DE 1,600 ซีซี 16 วาล์ว โดยต่อกำลังขับหมุนจากเครื่องยนต์เข้ากับมอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับแบบ 3 เฟส 2 ขั้วแม่เหล็ก เพื่อให้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก (กำลังผลิตต่ำกว่า 100 กิโลวัตต์) พร้อมทั้งออกแบบและติดตั้งคาร์บูเรเตอร์ก๊าซชีวภาพเข้ากับเครื่องยนต์ ทำการปรับแต่งเวลาการจุดระเบิด ส่วนผสมอากาศกับเชื้อเพลิง และอัตราส่วนการอัด ส่วนชุดที่สองจะทำการดัดแปลงเครื่องยนต์ดีเซลซึ่งมีเครื่องเพิ่มความดันอากาศติดมาด้วย ซึ่งเป็นเครื่องยนต์ที่ใช้ในรถบัสโดยสารขนาดใหญ่ให้เป็นเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ในฟาร์มปศุสัตว์ เครื่องยนต์ที่ใช้เป็นยี่ห้อ Hino รุ่น K-13CTI 13,000 ซีซี 24 วาล์ว โดยต่อกำลังขับหมุนจากเครื่องยนต์เข้ากับมอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับแบบ 3 เฟส 4 ขั้วแม่เหล็ก เพื่อให้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ (กำลังผลิตไฟฟ้า 100 กิโลวัตต์หรือมากกว่า) พร้อมทั้งออกแบบและติดตั้ง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

คาร์บูเรเตอร์ก๊าซชีวภาพเข้ากับเครื่องยนต์ เปลี่ยนระบบจุดระเบิดให้เป็นระบบจุดระเบิดแบบใช้ประกายไฟจากหัวเทียนพร้อมทั้งปรับแต่งเวลาการจุดระเบิด ปรับลดอัตราส่วนการอัดจาก 16:1 มาเป็น 8:1 โดยใช้แผ่นโลหะเพื่อเพิ่มขนาดของห้องเผาไหม้ และดัดแปลงอุปกรณ์ควบคุมความดันอากาศเข้าห้องเผาไหม้ให้สามารถเปลี่ยนแปลงความดันได้ในขณะทดสอบ

ในการออกแบบและทดสอบคาร์บูเรเตอร์ ในส่วนของคอคอดนั้นได้ใช้วิธีการจำลองสภาพการไหลของอากาศกับก๊าซชีวภาพที่มาผสมคลุกเคล้ากันที่คอคอดนี้ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งผลลัพธ์สรุปได้ว่า จะต้องออกแบบให้มีช่องจ่ายก๊าซชีวภาพอยู่บริเวณรอบ ๆ คอคอดทั้งสิ้น 8 ช่อง และส่วนกรวยที่ยืดยาวออกไป (บริเวณห้องผสม) ของคอคอดจะต้องทำมุม 10 องศาจากแกนกลาง ของคอคอดจึงจะทำให้อากาศกับก๊าซชีวภาพที่มาผสมคลุกเคล้ากันที่คอคอดนี้เป็นไปได้ดีและมีอัตราส่วนผสมเหมาะสมกับการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ เช่นเดียวกัน ในส่วนของอุปกรณ์ปรับแต่งปริมาณก๊าซชีวภาพได้ออกแบบให้มีลักษณะเป็นเข็มปรับรูปโค้งพาราโบลา ซึ่งผลการทดสอบนั้นสามารถจำกัดปริมาณก๊าซชีวภาพให้เปลี่ยนแปลงไปในอัตราคงที่ได้เมื่อเข็มปรับนี้เคลื่อนที่ไปในระยะเท่า ๆ กัน นอกจากนี้แล้วจากการตรวจวัดการสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องยนต์เปรียบเทียบระหว่างเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพที่ประกอบเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเมื่อทำงานที่ประสิทธิภาพสูงสุดเป็นเวลา 1,000 ชั่วโมงกับเครื่องยนต์ยี่ห้อและรุ่นเดียวกันที่ใช้ในรถยนต์ขนาดเล็กโดยใช้ก๊าซโซลีนเป็นเชื้อเพลิงที่สภาวะการทำงานปกติเป็นระยะทาง 100,000 กิโลเมตร ผลสรุปว่าไม่พบการสึกหรอที่ผิดปกติ กล่าวคือการตรวจวัดชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ทั้งสองนี้มีการสึกหรอของชิ้นส่วนต่าง ๆ ใกล้เคียงกันมาก เช่น ความหนาของลิ้นไอดีและไอเสียของเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพจะสึกหรอมากกว่าเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนประมาณ 0.02 มิลลิเมตร ทั้งความหนาและระยะห่างปากแหวนลูกสูบตัวแรกของเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพจะสึกหรอมากกว่าเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนประมาณ 0.03 มิลลิเมตร

การทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพสรุปผลดังนี้ สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเมื่อระบบทำงานที่ความเร็วรอบคงที่ 3,000 รอบต่อนาที สภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดจะให้ค่าประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สูงสุดเป็น 26.22% โดยจะต้องปรับเปลี่ยนอัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์ไว้ที่ 11:1 เวลาการจุดระเบิดล่วงหน้าที่ 49 องศาก่อนศูนย์ตายบน และปรับอัตราส่วนผสมอากาศกับเชื้อเพลิงให้ได้ค่าอากาศส่วนเกินเป็น 1.006 ที่สภาวะนี้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 21.4 กิโลวัตต์ มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์เป็น 697 ppm และสามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 1.69 ปี เมื่อเดินเครื่องวันละ 12 ชั่วโมง ทั้งนี้สามารถเร่งระยะเวลาคืนทุนให้เร็วขึ้นเป็น 1.55 ปี โดยการปรับอัตราส่วนผสมอากาศกับเชื้อเพลิงให้หนาขึ้นจนได้ค่าอากาศส่วนเกินเป็น 0.885 และเวลาการจุดระเบิดล่วงหน้าเป็น 44

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

องศาก่อนศูนย์ตายบนเพื่อเพิ่มกำลังของเครื่องยนต์ให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดถึง 22.7 กิโลวัตต์ แต่ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ก็จะลดลงเป็น 25.22% พร้อมกับการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์จากก๊าซไอเสียเป็น 1,301 ppm ในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่เมื่อระบบทำงานที่ความเร็วรอบคงที่ 1,500 รอบต่อนาที สภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดจะให้ค่าประสิทธิภาพของเครื่องยนต์สูงสุดเป็น 28.63% โดยจะต้องปรับความดันไอดีนำเข้าเครื่องยนต์ไว้ที่ 56 กิโลปาสคาล เวลาการจุดระเบิดล่วงหน้าที่ 54 องศาก่อนศูนย์ตายบน และปรับอัตราส่วนผสมอากาศกับเชื้อเพลิงให้ได้ค่าอากาศส่วนเกินเป็น 1.097 ที่สภาวะนี้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 134.2 กิโลวัตต์ มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์เป็น 1,154 และ 896 ppm ตามลำดับ มีอัตราการผลิตกำลังไฟฟ้าต่อการสูญเสียเชื้อเพลิงเป็น 1.7 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร ภายใต้เชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพที่มีปริมาณก๊าซมีเทนอยู่ 70% การเดินเครื่องที่สภาวะประสิทธิภาพสูงสุดนี้สามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 0.42 ปีเมื่อเดินเครื่องวันละ 12 ชั่วโมง จากการทดสอบพบว่าขณะที่ความดันไอดีนำเข้าเพิ่มขึ้นจาก 56 ถึง 68 กิโลปาสคาล ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์และระบบจะเพิ่มขึ้นพร้อม ๆ กันกับการเพิ่มขึ้นของก๊าซที่เป็นมลพิษตลอดจนความสั่นสะเทือนจากการทำงานของเครื่องยนต์ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์จะเกิดขึ้นมากเมื่อความดันและอุณหภูมิในห้องเผาไหม้มีค่าสูง อย่างไรก็ตาม เครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้จะผลิตกำลังไฟฟ้าได้ในช่วง 93.4 ถึง 143.2 กิโลวัตต์ ถ้าเดินเครื่องที่ส่วนผสมอากาศกับเชื้อเพลิงที่หนาและความดันไอดีนำเข้ามีค่าสูง กำลังของเครื่องยนต์ที่สูงขึ้นจะทำให้ระยะเวลาคืนทุนเร็วขึ้น แต่การเพิ่มความดันไอดีนำเข้าที่เกินไปกว่า 56 กิโลปาสคาล จะทำให้ก๊าซไอเสียที่เป็นมลพิษและความสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์มีมากเกินกว่าจะยอมรับได้และยังจะทำให้เครื่องยนต์มีอายุการใช้งานสั้นลงด้วย โดยสรุปแล้วการปรับความดันไอดีนำเข้าไว้ที่ 56 กิโลปาสคาล จะนำมาซึ่งประสิทธิภาพสูงสุดพร้อมกับการปลดปล่อยก๊าซไอเสียที่เป็นมลพิษไม่เกินไปกว่าค่าสูงสุดที่ยอมให้มีได้ ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่พัฒนาเป็นต้นแบบทั้งสองขนาดนี้พบว่า ปริมาณก๊าซไอเสียที่เป็นมลพิษมีค่าไม่เกินไปกว่าค่ากำหนดสูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้กับเครื่องยนต์สำหรับยานพาหนะตามข้อกำหนดระดับนานาชาติ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved