การใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล ระบบเชื้อเพลิงร่วม

The Using of Biogas in a Dual-Fuel Diesel Engine

คณิต วัฒนวิเชียร*, กริชชัย คชพลายุกต์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330
โทร 0-2-218-6607 โทรสาร 0-2-252-2889 E-mail: wkanit@chula.ac.th*

Kanit Wattanavichien* and Kritchai Cojchaplayuk
Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University
Phayathai Rd., Patumwan, Bangkok 10330 Thailand
Tel: +66-2-218-6607 Fax: +66-2-252-2889 E-mail: wkanit@chula.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแนวทางที่เหมาะสมในการนำก๊าซชีวภาพมาทดแทนเชื้อเพลิงดีเซลในระบบเชื้อเพลิงร่วมของเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กชนิดห้องเผาไหม้ล่วงหน้า โดยงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การออกแบบอุปกรณ์ผสมก๊าซกับอากาศ (gas mixer) เพื่อให้สามารถใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงร่วมได้ และการทดสอบสมรรถนะโดยไม่ปรับแต่งเครื่องยนต์ ผลการทดสอบสมรรถนะพบว่าการใช้ก๊าซชีวภาพในระบบเชื้อเพลิงร่วมสามารถลดปริมาณดีเซลได้ในระดับที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับความเร็วรอบและภาระ โดยปริมาณการทดแทนดีเซลจะเฉลี่ยอยู่ในช่วงร้อยละ 36 – 95 อุณภูมิไอเสียของเครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงร่วมมีค่าต่ำกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ดีเซลปกติประมาณ 5-45 เปอร์เซ็นต์ โดยมีแนวโน้มแตกต่างกันมากขึ้นเมื่อมีภาระสูงขึ้น ค่าควันดำมีค่าลดต่ำลงเมื่อใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงร่วมโดยเฉพาะที่ภาระสูงสุดตลอดช่วงความเร็วรอบต่าง ๆของการใช้งาน สรุปคือสามารถนำก๊าซชีวภาพมาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมให้กับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กได้ โดยความสามารถในการประหยัดน้ำมันดีเซลนั้นขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงาน ผลจากงานวิจัยนี้จะช่วยชี้แนวทางการประยุกต์ใช้ระบบเชื้อเพลิงร่วมเพื่อให้เกษตรกรสามารถประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงได้ เป็นการลดต้นทุนการผลิตและเป็นการลดการใช้น้ำมันช่วยประเทศและลดการสูญเสียเงินตราต่างประเทศอีกทาง

Abstract

In this research, the use of biogas in a diesel dual-fuel (DDF) engine was studied in order to evaluate effects of the biogas-diesel dual fuel operation on a single-cylinder, small indirect injection diesel engine. The research was divided into two parts: First, to design a gas mixer for mixing biogas and air. Second, to study the engine performance at either full load or partial load conditions. The experimental results show that the engine could operate with gas mixer for biogas dual fuel mode with the diesel fuel substitution around 36-95% depending on the engine speed and load. The biogas DDF mode also revealed with decreasing trend in exhaust temperature around 5-45% compared with the diesel operation. The smoke number from biogas DDF mode was lower than diesel, especially at high load, regardless of engine speed. In conclusion, the biogas can be used in a DDF engine to replace a fraction of the diesel. With diesel substitution by cheaper biogas, it could reduce the fuel cost for the farmer and saving the money to import diesel fuel from foreign country.

1. บทนำ

ก๊าซชีวภาพเป็นก๊าซที่ได้จากย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียแบบไร้ออกซิเจน มีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิงเนื่องจากมีก๊าซมีเทนเป็นส่วนประกอบหลัก งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบโดยใช้ก๊าซชีวภาพจากฟาร์มสุกรของ บ. เอส.พี.เอ็ม. อาหารสัตว์ จก. จ.ราชบุรี เป็นฟาร์มที่มีบ่อหมักขนาด 4,000 ลบ.เมตร ซึ่งมีแรงดันคงที่ตลอดช่วงการทดสอบ โดยทดสอบกับเครื่องยนต์ KUBOTA RT 120 ซึ่งเป็นเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก (กระบอกสูบแนวนอนมีปริมาตร 624 ลูกบาศก์เซนติเมตร) ชนิดห้องเผาไหม้ล่วงหน้า โดยงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการออกแบบมิกเซอร์เพื่อให้เครื่องยนต์สามารถใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงร่วม ส่วนที่สองเป็นการวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องยนต์ทั้งที่สภาวะภาระสูงสุดและที่ภาระบางส่วน

2. ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพจากฟาร์มสุกรของ บ. เอส.พี.เอ็ม. อาหารสัตว์ จก. จ. ราชบุรี ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี มีเทน (CH_4) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีองค์ประกอบและคุณสมบัติแสดงดังตารางที่ 1

* Corresponding author

ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบและคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพจากฟาร์ม S.P.M. [1],[2]

Constituent		by vol.	by mass
	CO_2	19%	37.38%
	N_2	6.5%	8.14%
	O_2	1.5%	2.15%
	CH_4	73%	52.34%
	H_2S	20ppm	
Density	0.9145 kg/m^3 (273K, 1at)		
LHV	26.17 MJ/kg		
(A/F)s	17.23		
Cost	3.14 Baht/m^3		

3. ข้อเปรียบเทียบระหว่างระบบดีเซลและระบบเชื้อเพลิงร่วม

การใช้เครื่องยนต์ดีเซลระบบเชื้อเพลิงร่วมเปรียบเทียบกับการใช้เครื่องยนต์ดีเซลแบบ Indirect Injection สามารถสรุปข้อแตกต่างได้ดังนี้ [3],[4],[5]

3.1 ความดันที่เกิดขึ้นในกระบอกสูบ ของระบบเชื้อเพลิงร่วมจะต่ำกว่าระบบดีเซล และจุดที่เกิดความดันสูงสุดของระบบเชื้อเพลิงร่วมจะเกิดหลัง TDC ซึ่งจะเกิดช้ากว่าดีเซล

3.2 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก ของระบบเชื้อเพลิงร่วมจะสูงกว่าระบบดีเซลเมื่อภาระของเครื่องยนต์ต่ำ แต่จะใกล้เคียงกับดีเซลเมื่อภาระเครื่องยนต์สูงขึ้น

3.3 ปริมาณเขม่า ของระบบเชื้อเพลิงร่วมจะต่ำกว่าดีเซลที่ทุกความเร็วรอบและภาระเครื่องยนต์

3.4 น็อก ในเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ระบบเชื้อเพลิงร่วมเกิดการน็อกได้ 2 รูปแบบคือ การน็อกซึ่งเกิดจากน้ำมันดีเซลและการน็อกที่เกิดจากส่วนผสมก๊าซกับอากาศ โดยการน็อกนี้นอกจากจะมีสาเหตุมาจากมีก๊าซภายในห้องเผาไหม้มากเกินไปและมีช่วงเวลาการเพิ่มอุณหภูมิให้ก๊าซยาวขึ้นแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่ช่วยเสริมให้เกิดการน็อกอีก เช่น ความเร็วรอบ, ภาระและอุณหภูมิส่วนผสมของก๊าซกับอากาศก่อนเข้าห้องเผาไหม้

4. เครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงร่วม

เครื่องยนต์ที่ใช้ดัดแปลงให้เป็นระบบเชื้อเพลิงร่วมในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องยนต์ดีเซลชนิด IDI ยี่ห้อ KUBOTA รุ่น RT 120 ซึ่งมีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2

5. มิกเซอร์

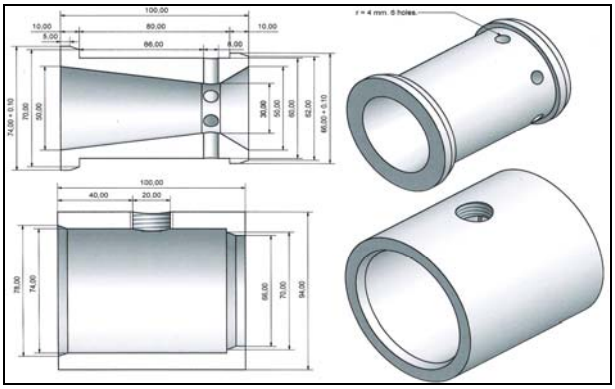
เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสารผสม (mixture) ระหว่างก๊าซชีวภาพกับอากาศชนิดที่ใช้ในระบบเชื้อเพลิงร่วมนี้เป็นแบบ venturi ซึ่งมีก๊าซชีวภาพไหลผ่านรู orifice รอบคอคอดและไปผสมกับอากาศที่ไหลผ่านคอคอดและผ่านท่อไอดีเข้าห้องเผาไหม้ แสดงดังรูปที่ 1

6. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

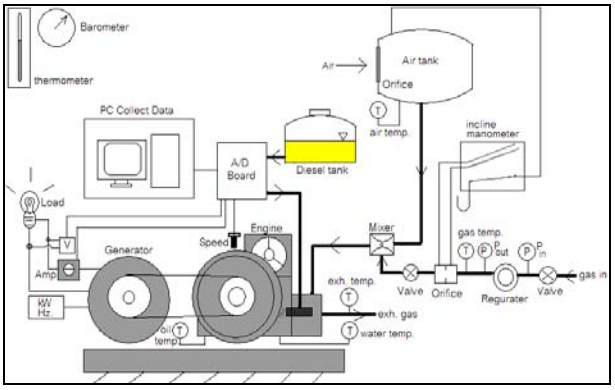
เครื่องยนต์จะติดตั้งบนแท่นทดสอบที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแหล่งกำเนิดกระแสและมีแผงหลอดไฟเป็นภาระ ซึ่งใช้การเปิด-ปิดจำนวนของหลอดไฟเป็นตัวควบคุมภาระให้แก่ระบบเครื่องยนต์ อุปกรณ์และการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบแสดงในรูปที่ 2 โดยมีรายละเอียดของอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 2 แสดงรายละเอียดของเครื่องยนต์ KUBOTA RT120 [6]

เครื่องยนต์	Kubota
รุ่น	RT120
ชนิด	Single cylinder (ลูกสูบเคลื่อนที่ในแนวนอน)
ระบบห้องเผาไหม้	Swirl chamber (IDI)
ขนาดกระบอกสูบ	94 mm. (bore)
ช่วงชัก	90 mm. (stroke)
ปริมาตรกระบอกสูบ	624 cc.
แรงม้าสูงสุด	12 hp / 2400 rpm
แรงบิดสูงสุด	4.0 kg-m / 1600 rpm
อัตราส่วนกำลังอัด	21 : 1
หัวฉีด	ประเภท: เข็มบานปลายหรือเดือยยาว ความดัน: 140 kg/cm^2
ปั๊มน้ำมันเชื้อเพลิง	ประเภท: อิสระหรือลูกสูบ, ความดัน: 600 kg/cm^2
ระบบหล่อลื่น	ระบบวิด-สาดและปั๊มแบบ rotary
ระบบระบายความร้อน	หม้อน้ำแบบหม้อน้ำรังผึ้ง ระบายความร้อนแบบ Natural Convection ความจุ 2.2 ลิตร
หม้อกรองอากาศ	แบบเปียก



รูปที่ 1 แสดงขนาดและลักษณะของอุปกรณ์มิกเซอร์



รูปที่ 2 แสดงอุปกรณ์และการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบ

6.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นแบบกระแสสลับยี่ห้อ KODAI (A.C. Synchronous Generators) ชนิด stationary armature มีรายละเอียดทางเทคนิคดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงรายละเอียดทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

กำลัง (kW)	10
แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Volt)	230/115
กระแสไฟฟ้า (A.)	43.5/87
ความถี่ (Hz)	50
ความเร็วรอบ (rev/min)	1500
cos φ	1.0
Excit.Volt. (V.)	80
Excit.Curr. (A.)	4.1
Phase	1
Standard	Q/MDL001-1998

6.2 หลอดไฟฟ้า ใช้หลอดไฟฟ้าซึ่งจัดเรียงลำดับเพื่อเพิ่มภาระให้กับเครื่องยนต์ครั้งละ 500 วัตต์

6.3 อุปกรณ์วัดอัตราการไหล ของก๊าซชีวภาพและอากาศ เป็นอุปกรณ์วัดแบบ orifice [7]

6.4 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ เป็นเทอร์โมคัปเปิลชนิด Type K (Chromel-Alumel, CA) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.65 มม. ซึ่งจะวัดอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่น, น้ำหล่อเย็น, ไอดี, ไอเสีย, ก๊าซชีวภาพ

6.5 อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ เป็นแบบ Aluminum Detecting Proximity Sensor ยี่ห้อ Omron รุ่น E2EY

6.6 อุปกรณ์วัดกระแสไฟฟ้า ยี่ห้อ Nitech Class 3 มีหน้าที่รับแปลงกระแสไฟฟ้าจาก 0-50 Aac เป็นไฟฟ้ากระแสตรง 0-5 Adc

6.7 อุปกรณ์วัดความต่างศักย์ไฟฟ้า ยี่ห้อ Primus มีหน้าที่แปลงความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับในช่วง 0-250 Vac เป็น 0-5 Vdc

6.8 **การวัดอัตราการบริโภคน้ำมันดีเซล** แบบ Volumetric Gravitation Flow Meter ชนิดหลอดแก้วมีปริมาตร 47 ลูกบาศก์เซ็นติเมตรมีเซนเซอร์ตรวจจับระดับของเหลว (Optical sensor Omron รุ่น E3X-DA11) และส่งสัญญาณต่อไปยังนาฬิกาจับเวลาภายในโปรแกรมคำนวณหาอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันดีเซล

6.9 **อุปกรณ์วัดสภาวะบรรยากาศ** ใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิบรรยากาศ และใช้บารอมิเตอร์วัดความดันบรรยากาศ หน่วย มม.น้ำ

6.10 อุปกรณ์รับและแปลงสัญญาณ หน้าที่รับสัญญาณจากอุปกรณ์วัดต่างๆ แล้วแปลงสัญญาณที่ได้เป็นสัญญาณดิจิตอลและส่งต่อไปยังคอมพิวเตอร์ เพื่อแสดงผลและเก็บข้อมูล

6.**11 อุปกรณ์วัดควันดำ** เป็นชนิดกระดาษกรองยี่ห้อ BOSCH รุ่น ETD 020.50

7 วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยจะแบ่งการทดสอบเป็นสามส่วน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

7.1 การทดสอบสมรรถนะที่ภาระสูงสุด (Full Load Test) เป็นการทดสอบเครื่องยนต์เพื่อศึกษาสมรรถนะสูงสุดที่เครื่องยนต์สามารถทำได้ในแต่ละความเร็วรอบซึ่งจะทำการวัดกำลัง, อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและอุณหภูมิการทำงานที่วัดได้จากเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซลและเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ

7.2 การทดสอบสมรรถนะที่ภาระบางส่วน (Partial Load Test) เป็นการทดสอบเครื่องยนต์เพื่อศึกษาสมรรถนะที่เครื่องยนต์สามารถทำได้ตลอดช่วงการทำงาน โดยมีตำแหน่งการทดสอบต่างๆ (Matrix test point) แสดงดังรูปที่ 3

7.3 การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ จะประเมินจากอัตราส่วนการแทนที่น้ำมันดีเซลของก๊าซชีวภาพซึ่งความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์นี้จะแสดงในรูปของร้อยละของต้นทุนค่าเชื้อเพลิงที่ประหยัดได้ดังนี้

$$\%Baht\downarrow = \left(\frac{(Sub_{diesel} \times X_{diesel}) - (V_{DDF,biogas} \times X_{biogas})}{(V_{d,diesel} \times X_{diesel})} \right) \times 100 \quad (1)$$

$\%Baht\downarrow$ = ร้อยละของต้นทุนค่าเชื้อเพลิงที่ประหยัดได้

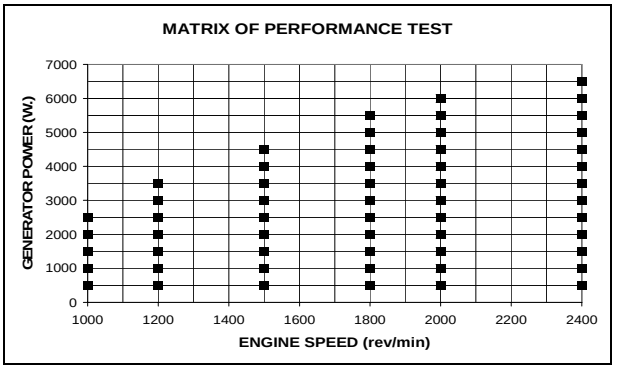
Sub_{diesel} = ปริมาณน้ำมันดีเซลที่ลดลงเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพเปรียบเทียบกับเมื่อใช้น้ำมันดีเซล (L/hr)

$V_{DDF,biogas}$ = ปริมาณก๊าซชีวภาพเมื่อใช้น้ำดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ (L/hr)

$V_{d,diesel}$ = ปริมาณน้ำมันดีเซล เมื่อทดสอบโดยใช้น้ำมันดีเซล (L/hr)

X_{diesel} = ราคาน้ำมันดีเซล (Baht/L) (ข้อมูลจาก บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) เมื่อ วันที่ 31 มี.ค. 2549 น้ำมันดีเซลราคาลิตรละ 25.57 บาท)

X_{biogas} = ราคาก๊าซชีวภาพ (ต้นทุนการผลิต) (Baht/L) (ข้อมูลจากหน่วยบริการก๊าซชีวภาพ สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ก๊าซชีวภาพมีต้นทุนการผลิตที่ลูกบาศก์เมตรละ 3.14 บาท)



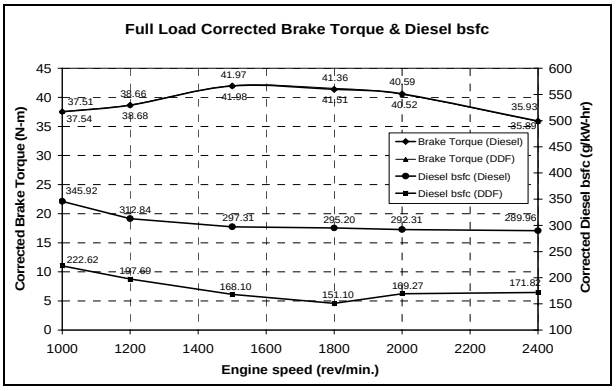
รูปที่ 3 แสดงจุดทดสอบทั้งหมด (Matrix test point) ของการทดสอบสมรรถนะที่สภาวะภาระบางส่วน

8. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล [8]

8.1 ผลการทดสอบที่สภาวะภาระสูงสุด พบว่า

(1) แรงบิดเบรกแก้ไข (Corrected Brake Torque) ที่ภาระสูงสุดและอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (bsfc) ที่ภาระสูงสุด (คำนวณเฉพาะน้ำมันดีเซล) ที่ความเร็วรอบต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4 พบว่าค่าแรงบิดเบรกแก้ไขที่ภาระสูงสุดที่ได้ในแต่ละความเร็วรอบนั้นมีค่าใกล้เคียงกันกับการใช้น้ำมันดีเซลซึ่งแรงบิดสูงสุดมีค่าประมาณ 41.98 N-m ที่ความเร็วรอบเดียวกันคือ 1500 รอบต่อนาที, อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงดีเซลจำเพาะเบรกเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซ

ชีวภาพมีค่าต่ำกว่าค่าจากการใช้น้ำมันดีเซลเนื่องจากพลังงานจากก๊าซชีวภาพแทนที่น้ำมันดีเซลบางส่วน โดยเมื่อใช้น้ำมันดีเซลค่าอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงดีเซลจำเพาะเบรกมีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 345.92 g/kW-hr.ที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที และต่ำสุดที่ประมาณ 289.96 g/kW-hrที่ความเร็วรอบ 2400 รอบต่อนาที ขณะที่การใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพมีค่าอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงดีเซลจำเพาะเบรกมีค่าสูงสุดที่ประมาณ 222.62 g/kW-hr ที่ 1000 รอบต่อนาทีและมีค่าต่ำสุดประมาณ 151.10 g/kW-hr ที่ความเร็วรอบ 1800 รอบต่อนาที



รูปที่ 4 เปรียบเทียบแรงบิดเบรกแก้ไขและอัตราสิ้นเปลืองน้ำมันดีเซลจำเพาะเบรกเมื่อใช้น้ำมันดีเซลและใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ

(2) อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงดีเซลและร้อยละของอัตราการแทนที่เชื้อเพลิงดีเซลที่สภาวะภาระสูงสุด ที่ความเร็วรอบต่างๆ แสดงในรูปที่ 5 พบว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซล อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงดีเซลมีค่าต่ำสุดที่ 27.7 cc/min.ที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที และสูงสุดที่ 53.9 cc/min.ที่ความเร็วรอบ 2400 รอบต่อนาที แต่เมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงดีเซลจะลดลงโดยมีค่าต่ำสุดที่ 17.9 cc/min.ที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที และสูงสุดที่ 31.9 cc/min.ที่ความเร็วรอบ 2400 รอบต่อนาที ซึ่งค่าร้อยละของอัตราการแทนที่เชื้อเพลิงดีเซลของการใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นจากค่าประมาณร้อยละ 36 ที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที เพิ่มขึ้นจนสามารถแทนที่น้ำมันดีเซลได้สูงสุดร้อยละ 49 ที่ความเร็วรอบ 1800 รอบต่อนาที จากนั้นค่าการแทนที่จะลดลงเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นโดยมีค่าต่ำสุดร้อยละ 41 ที่ความเร็วรอบ 2400 รอบต่อนาที

(3) ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงรวมจำเพาะ (Specific total energy conversion efficiency, STECE)

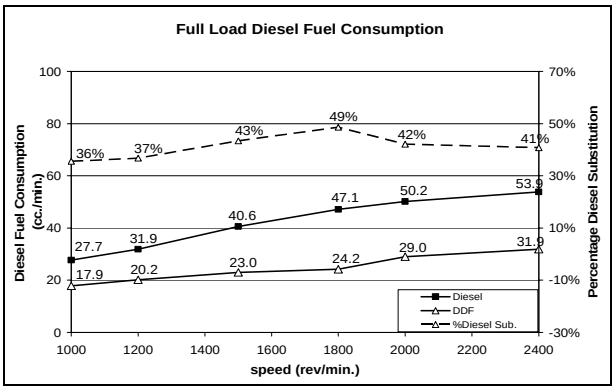
$$STECE = \frac{P}{\dot{m}_d LHV_d + \dot{m}_{biog} LHV_{biog}} \cdot 100(\%)$$

STECE ที่สภาวะภาระสูงสุดที่ความเร็วรอบต่างๆ จากรูปที่ 6 พบว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพส่วนใหญ่จะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซลเล็กน้อยในทุกความเร็วรอบยกเว้นที่ 1800 รอบต่อนาที ซึ่งมองภาพรวมจากความแตกต่างอาจสรุปได้ว่าการใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพที่สภาวะภาระสูงสุดให้ผลด้านประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงรวมจำเพาะไม่แตกต่างจากการใช้น้ำมันดีเซลอย่างมีนัยสำคัญ

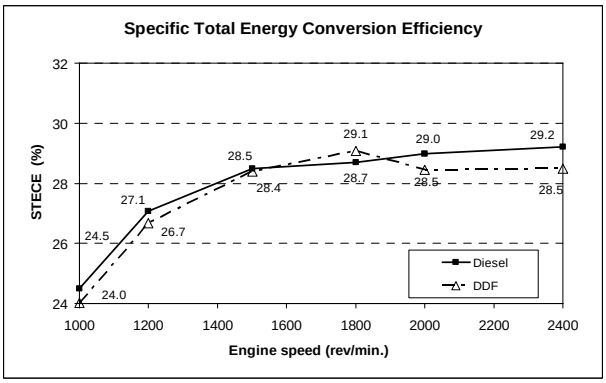
(4) อัตราส่วนสมมูลรวม (Total Equivalence ratio)

$$\Phi_{DDF} = \frac{\dot{m}_d (A/F)_{stioch,d} + \dot{m}_{biog} (A/F)_{stoich,biog}}{m_{air}}$$

อัตราส่วนสมมูลรวมที่ความเร็วรอบต่างๆ แสดงในรูปที่ 7 พบว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพมีค่าสูงกว่า (ส่วนผสมหนา) เมื่อใช้น้ำมันดีเซลอยู่ในช่วง 0.2 - 0.5 ยกเว้นที่ความเร็วรอบที่ 1800 รอบต่อนาทีค่าอัตราส่วนสมมูลรวมมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งผลดังกล่าวจะค่าอัตราส่วนสมมูลรวมมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งผลดังกล่าวจะสอดคล้องกับรูป



รูปที่ 5 เปรียบเทียบอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงดีเซลเมื่อใช้น้ำมันดีเซลและใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ และร้อยละของอัตราการแทนที่เชื้อเพลิงดีเซล

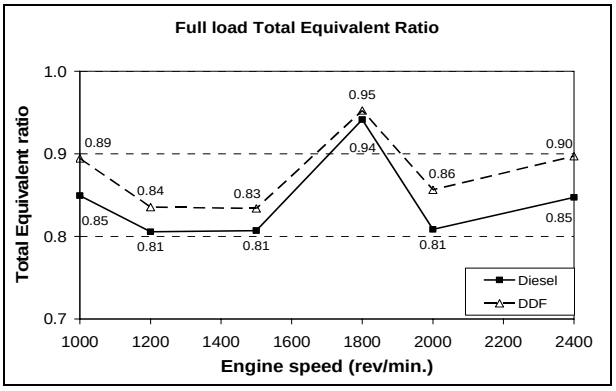


รูปที่ 6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงรวมจำเพาะเมื่อใช้น้ำมันดีเซลและใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ

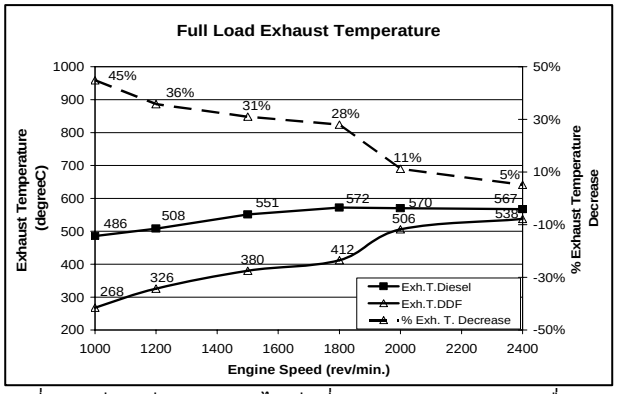
ที่ 5 เมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานสูงกว่าซึ่งทำให้มีค่าประสิทธิภาพต่ำกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซลมีสาเหตุมาจากส่วนผสมที่หนากว่า แต่สำหรับที่ความเร็วรอบ 1800 รอบต่อนาทีทั้งสองเชื้อเพลิงมีส่วนผสมเชื้อเพลิงกับอากาศที่ใกล้เคียงกันแต่พบว่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงรวมจำเพาะสูงกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซลอาจจะเนื่องมาจากที่ 1800 รอบต่อนาที (จากรูปที่ 4) พบว่ามีอัตราการแทนที่น้ำมันดีเซลด้วยก๊าซชีวภาพสูงที่สุดทำให้ส่วนของเชื้อเพลิงที่ไม่เผาไหม้ต่ำกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซล และเมื่อความเร็วรอบ

สูงขึ้นประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงรวมจำเพาะเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพมีค่าต่ำกว่าใช้น้ำมันดีเซลเนื่องจากไม่สามารถเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพ เกินกว่าขอบเขตการเกิดน็อกได้

(5) อุณหภูมิไอเสียที่สภาวะภาระสูงสุดที่ความเร็วรอบต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 8 พบว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพค่าอุณหภูมิไอเสียจะมีค่าต่ำกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซลทุกความเร็วรอบคือที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาทีต่ำกว่าประมาณร้อยละ 45 และที่ความเร็วรอบ 2400 รอบต่อนาทีต่ำกว่าประมาณร้อยละ 5 ผลของอุณหภูมิไอเสียที่มีค่าลดลงเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ อาจจะมีสาเหตุมาจากการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพมีช่วงการเผาไหม้ที่สั้นกว่าการใช้น้ำมันดีเซล ทำให้อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ในช่วงปลายของจังหวะกำลังขณะที่วาล์วไอเสียเริ่มเปิดมีค่าต่ำกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซล เนื่องจากปริมาณเชื้อเพลิงตกค้างที่ยังไม่เผาไหม้มีค่าที่น้อยลง ทำให้ปฏิกิริยาต่อเนื่องที่ปลายจังหวะกำลังและจังหวะคายน้อยลง อุณหภูมิของไอเสียจึงมีค่าต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด แต่เมื่อความเร็วรอบสูงขึ้นช่วงจังหวะกำลังสั้นลงและระยะเวลาการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ก็สั้นลง ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องที่ปลายจังหวะกำลังและจังหวะคายมีค่าสูงขึ้นทำให้อุณหภูมิของไอเสียมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเร็วรอบของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น



รูปที่ 7 เปรียบเทียบอัตราส่วนสมมูลรวมเมื่อใช้น้ำมันดีเซลและใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ

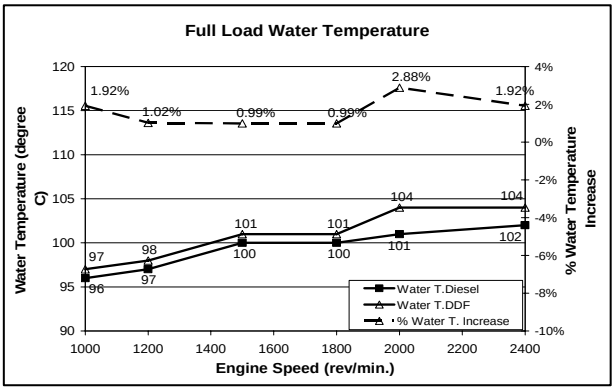


รูปที่ 8 เปรียบเทียบอุณหภูมิไอเสียที่สภาวะภาระสูงสุดของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซลและใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ

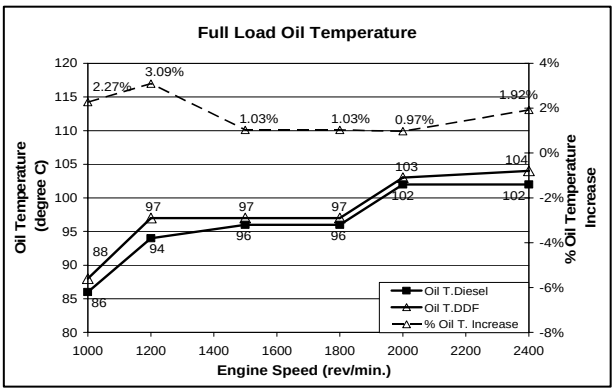
(6) อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นและอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นที่สภาวะภาระสูงสุดที่ความเร็วรอบต่างๆ แสดงในรูปที่ 9 และ 10 เมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพมีค่าอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นและอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นสูงกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซลประมาณ 1-3 องศาเซลเซียสหรือประมาณร้อยละ 1-3 เนื่องจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพมีระยะเวลาที่สั้นทำให้อัตราการคายพลังงานสูง ส่งผลถึงค่าการถ่ายเทความร้อนสู่ผนังห้องเผาไหม้ที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับใช้น้ำมันดีเซล และอาจจะมีสาเหตุมาจากการใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพมีส่วนผสมที่หนากว่าการใช้น้ำมันดีเซลปกติทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนมากขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นและน้ำหล่อเย็นมีค่าสูงขึ้น

8.2 ผลการทดสอบที่สภาวะภาระบางส่วน

(1) อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานพลังงานรวมจำเพาะที่ความเร็วรอบคงที่แสดงในรูปของแผนภูมิสมรรถนะเมื่อใช้น้ำมันดีเซลและเมื่อใช้



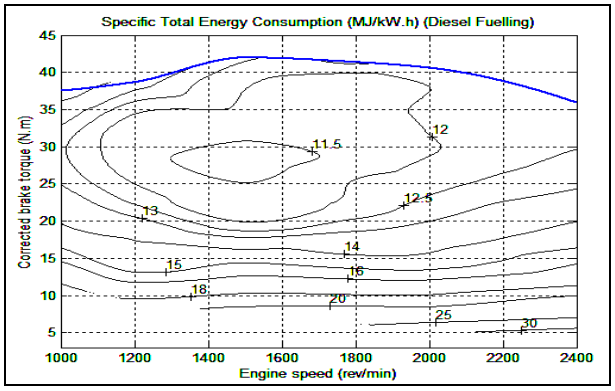
รูปที่ 9 เปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่สภาวะภาระสูงสุดเมื่อใช้น้ำมันดีเซลและใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ



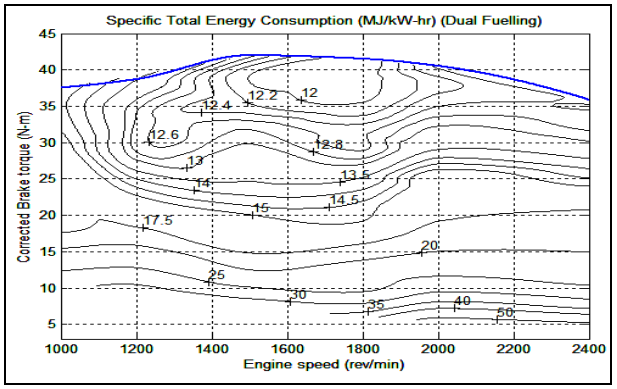
รูปที่ 10 เปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นที่สภาวะภาระสูงสุดเมื่อใช้น้ำมันดีเซลและใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ

น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ แสดงดังรูปที่ 11 และ 12 ตามลำดับ พบว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซล มีค่าต่ำสุดที่ 11.5 MJ/kW-hr ที่ช่วงความเร็วรอบประมาณ 1300–1700 รอบต่อนาที ที่ช่วงแรงบิดเบรกแก้ไขประมาณ 25-31 N-m ซึ่งแตกต่างจากเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานรวมจำเพาะมีค่าต่ำสุดที่ 12 MJ/kW-hr ที่ช่วงความเร็วรอบประมาณ 1500–1850 รอบต่อนาที ที่แรงช่วงบิดเบรกแก้ไขประมาณ 35-42 N-m เมื่อเปรียบเทียบที่ภาระต่ำเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานรวมจำเพาะสูงกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซล อาจมีสาเหตุมาจากขณะที่เครื่องยนต์ทำงานที่ความเร็วรอบต่ำและมีภาระของเครื่องยนต์ต่ำ ก๊าซจะถูกจ่ายเข้าสู่เครื่องยนต์น้อย ทำให้มีอากาศส่วนเกินมากซึ่งจะทำให้ส่วนผสมระหว่างก๊าซกับอากาศบาง เมื่อเปลวไฟจากน้ำมันดีเซลลาม

มาถึงส่วนที่เป็นก๊าซผสมกับอากาศที่มีส่วนผสมบางจะทำให้อุณหภูมิเปลวไฟของก๊าซต่ำ และอาจจะเกิดการดับของเปลวไฟในบริเวณที่มีส่วนผสมบางมากๆ อีกสาเหตุหนึ่งก็คืออัตราเร็วในการเผาไหม้ของก๊าซที่มีส่วนผสมบางจะช้า เนื่องจากก๊าซชีวภาพจะมีความเร็วของเปลวไฟในการเผาไหม้ต่ำ จึงทำให้ระบบเชื้อเพลิงร่วมมีการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เมื่อเทียบกับดีเซลที่ภาระเครื่องยนต์ต่ำ เมื่อภาระของเครื่องยนต์เพิ่มมากขึ้นจะทำให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานรวมจำเพาะเมื่อใช้น้ำดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพใกล้เคียงกับเมื่อใช้น้ำมันดีเซล เนื่องจากเมื่อภาระของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพถูกดูดเข้าไปผสมกับอากาศมากขึ้น ทำให้สัดส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศในห้องเผาไหม้หนาขึ้นไม่มีอากาศส่วนเกิน จึงทำให้ระยะเวลาในการเผาไหม้ยาวขึ้นทำให้การเผาไหม้มีความสมบูรณ์มากขึ้น ส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานรวมจำเพาะใกล้เคียงกับเมื่อใช้ดีเซล

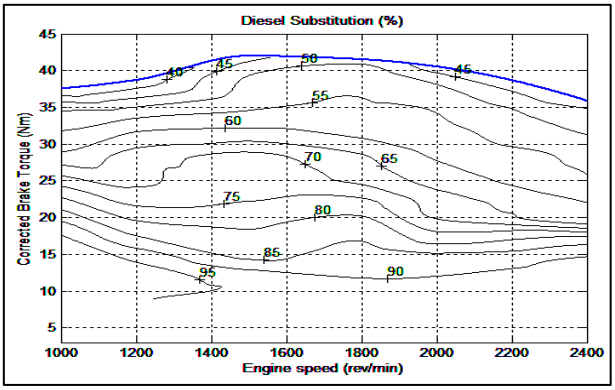


รูปที่ 11 แผนภูมิอัตราสิ้นเปลืองพลังงานรวมจำเพาะเมื่อใช้น้ำมันดีเซล แสดงค่า contour ของค่าคงที่ specific total energy consumption (MJ/kW-hr)

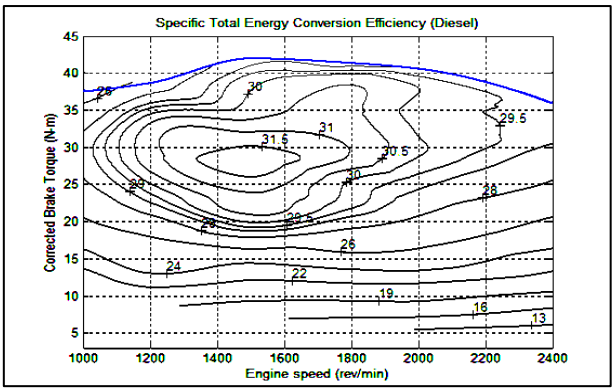


รูปที่ 12 แผนภูมิอัตราสิ้นเปลืองพลังงานรวมจำเพาะเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพแสดงค่า contour ของค่าคงที่ specific total energy consumption (MJ/kW-hr)

(2) อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันดีเซลและค่าร้อยละของอัตราส่วนการแทนที่น้ำมันดีเซล แสดงไว้ ณ แผนภูมิรูปที่ 13 พบว่าเมื่อเครื่องยนต์ใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงที่ความเร็วรอบเดียวกันอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันดีเซลสูงขึ้นตามแรงบิดเบรกแก้ไขที่สูงขึ้น โดยค่าร้อยละของอัตราส่วนการแทนที่น้ำมันดีเซลของในแต่ละความเร็วรอบมีแนวโน้มลดลงตามแรงบิดเบรกแก้ไขที่สูงขึ้นเช่นกัน ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 90-40 จากผลดังกล่าวอาจจะมีสาเหตุมาจากก๊าซไปแทนที่อากาศและก๊าซไม่สามารถให้พลังงานได้เพียงพอดังนั้นเมื่อต้องการกำลังหรือแรงบิดมากจึงต้องการเชื้อเพลิงดีเซลมากขึ้นเพื่อรักษาระดับปริมาณอากาศในห้องเผาไหม้ให้เหมาะสมและเนื่องจากขอบเขตของการเกิดน็อกของเครื่องยนต์ในระบบเชื้อเพลิงร่วม คือที่แรงบิดเบรกต่ำหรือที่ภาระต่ำอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้จะต่ำกว่าที่แรงบิดเบรกสูงหรือที่ภาระสูง จึงส่งผลให้ที่แรงบิดเบรกสูงมีสภาวะที่ง่ายต่อการเกิดน็อกมากกว่าที่แรงบิดเบรกต่ำ จึงทำให้ไม่สามารถเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพได้ ร้อยละของอัตราส่วนการแทนที่น้ำมันดีเซลลดลงเมื่อแรงบิดเบรกสูงขึ้น เช่นเดียวกับความเร็วรอบ ร้อยละของอัตราส่วนการแทนที่น้ำมันดีเซลลดลงเมื่อความเร็วรอบสูงขึ้นเนื่องจากไม่สามารถเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพเพราะการเกิดน็อก



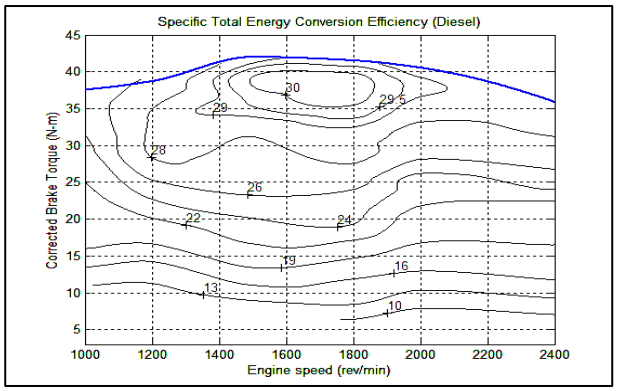
รูปที่ 13 แสดงแผนภูมิร้อยละของอัตราส่วนการแทนที่น้ำมันดีเซลเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง แสดง contour ของค่าคงที่ของ diesel substitution (เปอร์เซ็นต์)



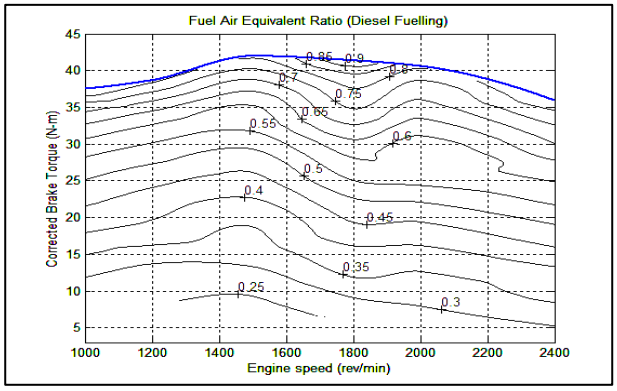
รูปที่ 14 แสดงแผนภูมิประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงรวมจำเพาะเมื่อใช้น้ำมันดีเซลแสดง contour ของค่าคงที่ของ Specific Total Energy Conversion Efficiency (%)

(3) ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเมื่อใช้น้ำมันดีเซลและใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ แสดงในรูปของแผนภูมิ ดังรูปที่ 14 และรูปที่ 15 ตามลำดับ พบว่าเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซลค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะของเครื่องยนต์มีค่าสูงสุดร้อยละ 31.5 ในช่วงแรงบิดเบรกแก้ไขประมาณ 26-30 N-m. ที่ช่วงความเร็วรอบ 1300-1700 รอบต่อนาที ซึ่งแตกต่างกับเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ คือ ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะของเครื่องยนต์มีค่าสูงสุดร้อยละ 30 ในช่วงแรงบิดเบรกแก้ไขประมาณ 35-40 N-m. ที่ช่วงความเร็วรอบ 1500-1850 รอบต่อนาทีซึ่งต่ำกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซล อย่างไรก็ตามพบว่าเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมัน

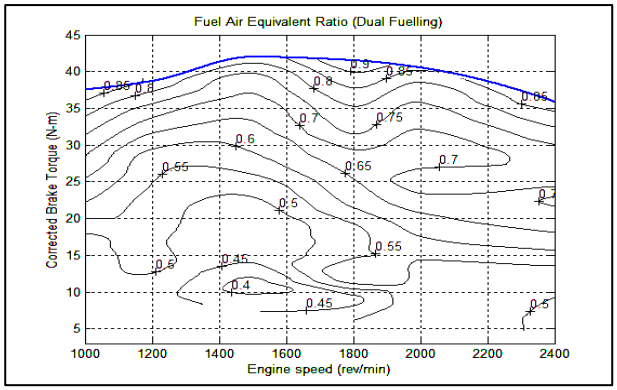
ดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ ค่าประสิทธิภาพสูงสุดจะเลื่อนขึ้นไปปรากฏในช่วงแรงบิดใช้งานและความเร็วรอบสูงกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซล



รูปที่ 15 แสดงแผนภูมิประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงรวมจำเพาะเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพแสดง contour ของค่าคงที่ของ Specific Total Energy Conversion Efficiency (%)



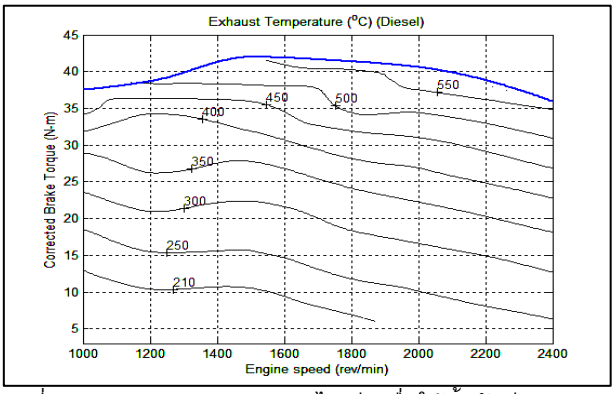
รูปที่ 16 แสดงแผนภูมิอัตราส่วนสมมูลรวมเมื่อใช้น้ำมันดีเซล แสดง contour ของค่าคงที่ของ Fuel Air Equivalent Ratio



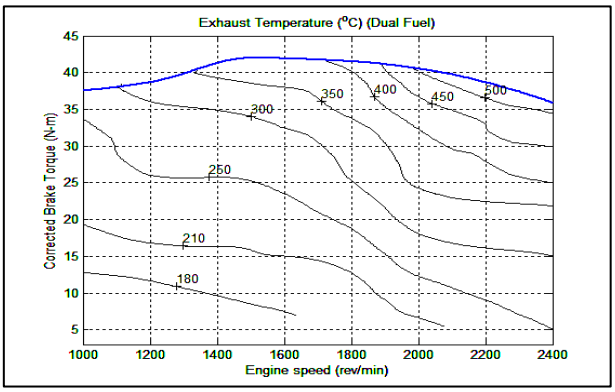
รูปที่ 17 แสดงแผนภูมิอัตราส่วนสมมูลรวมเมื่อใช้น้ำมันดีเซล แสดง contour ของค่าคงที่ของ Fuel Air Equivalent Ratio

(4) ค่าอัตราส่วนสมมูลรวมเมื่อใช้น้ำมันดีเซลและใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ แสดงในแผนภูมิรูปที่ 16 และรูปที่ 17 พบว่าอัตราส่วนสมมูลรวมของทั้ง 2 เชื้อเพลิงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อแรงบิดเพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดเท่ากันที่ 0.9 ที่ความเร็วรอบ 1800 รอบต่อนาที และแรงบิดเบรกแก้ไขประมาณ 41 N-m แต่ที่แรงบิดเบรกแก้ไขต่ำค่าอัตราส่วนสมมูลรวมเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพมีค่าสูงกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซล โดยเมื่อแรงบิดเบรกแก้ไขสูงขึ้นผลต่างของอัตราส่วนสมมูลรวมระหว่างเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพมีค่าลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลที่ภาระสูงสุด ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับค่าอัตราสิ้นเปลืองพลังงานรวมจำเพาะและค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานรวมจำเพาะ

(5) อุณหภูมิไอเสียเมื่อใช้น้ำมันดีเซลและใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพแสดงในแผนภูมิรูปที่ 18 และรูปที่ 19 ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิไอเสียเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพมีค่าต่ำกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซลอย่างเห็นได้ชัด โดยที่แรงบิดเบรกแก้ไขต่ำอุณภูมิไอเสียมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยและค่าอุณหภูมิไอเสียจะมีค่าแตกต่างกันมากขึ้นเมื่อค่าแรงบิดเบรกแก้ไขสูงขึ้น ซึ่งเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพอุณหภูมิมีค่าสูงสุด 538 องศาเซลเซียสที่ความเร็วรอบ 2400 รอบต่อนาทีและแรงบิดเบรกแก้ไข 35.89 N-m. และเมื่อใช้น้ำมันดีเซลอุณหภูมิไอเสียสูงสุด 572 องศาเซลเซียสที่ความเร็วรอบ 1800 รอบต่อนาที และแรงบิดเบรกแก้ไข 41.36 N-m



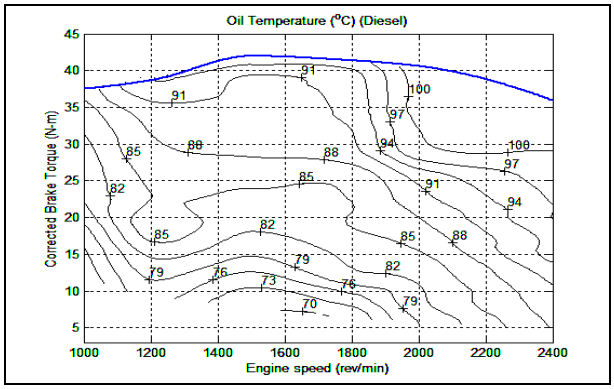
รูปที่ 18 แสดงแผนภูมิอุณหภูมิไอเสียเมื่อใช้น้ำมันดีเซล แสดง contour ของค่าคงที่ของ Exhaust Temperature (°C)



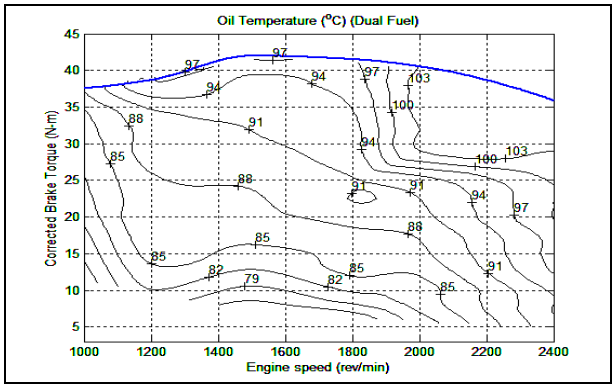
รูปที่ 19 แสดงแผนภูมิอุณหภูมิไอเสียเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ แสดง contour ของค่าคงที่ของ Exhaust Temperature (°C)

(6) อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นเมื่อใช้น้ำมันดีเซลและใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ แสดงในแผนภูมิรูปที่ 20 และรูปที่ 21 ตามลำดับ เมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพมีค่าสูงกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซลประมาณ 1-3 องศาเซลเซียส โดยค่าอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าแรงบิดเบรกแก้ไขและความเร็วรอบของเครื่องยนต์สูงขึ้น โดย

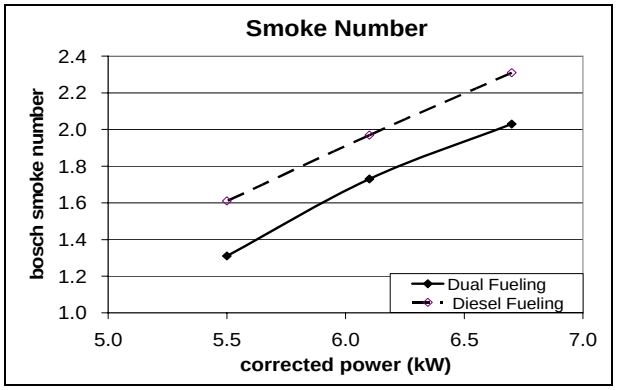
การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีแนวโน้มในลักษณะเดียวกันสังเกตได้จากลักษณะเส้น contour



รูปที่ 20 แสดงแผนภูมิอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นเมื่อใช้น้ำมันดีเซล แสดง contour ของค่าคงที่ของ Oil Temperature (^{o}C)



รูปที่ 21 แสดงแผนภูมิอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ แสดง contour ของค่าคงที่ของ Oil Temperature (^{o}C)



รูปที่ 22 แสดงค่าควันดำจากการวัดที่สภาวะภาระต่างๆ โดยใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพเปรียบเทียบกับใช้น้ำมันดีเซล

(7) ค่าควันดำทำการวัดที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2400 รอบต่อนาที จากการวัดด้วยเครื่องวัดควันดำแบบกระดาษกรองมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง ดังนั้นในการทดสอบจึงทำการวัดค่าควันดำถึง 3 ครั้งและหาค่าเฉลี่ยต่อหนึ่งจุดทดสอบ ซึ่งผลจากการวัดจากทั้งสองเชื้อเพลิงแสดงเปรียบเทียบไว้ในรูปที่ 22 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพค่าควันดำต่ำกว่าจากการใช้น้ำมันดีเซลในทุกภาระทดสอบ โดยทั้งสองเชื้อเพลิงนั้นค่าควันดำจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่ภาระสูงขึ้นกว่าที่ภาระต่ำ

ผลความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ แสดงในรูปต้นทุนค่าเชื้อเพลิงและร้อยละต้นทุนค่าเชื้อเพลิงที่ลดลงดังนี้

(8) ต้นทุนค่าเชื้อเพลิง (ข้อมูลจาก บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) เมื่อวันที่ 31 มี.ค. 2549 น้ำมันดีเซลราคาลิตรละ 25.57 บาท และ ราคาก๊าซชีวภาพ (ต้นทุนการผลิต) ราคาลูกบาศก์เมตรละ 3.14 บาท [1]) เมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ (ตารางที่ 4) พบว่าค่าต้นทุนค่าเชื้อเพลิงต่ำที่สุดที่กำลังเครื่องยนต์เดียวกันจะอยู่ในความเร็วรอบที่ต่างกันคือที่กำลังเครื่องยนต์1.17-1.75 กิโลวัตต์ต้นทุนค่าเชื้อเพลิงต่ำสุดที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที, ที่กำลังเครื่องยนต์ 2.34 กิโลวัตต์ ต้นทุนค่าเชื้อเพลิงต่ำสุดจะอยู่ที่ความเร็วรอบ 1200 รอบต่อนาที, ที่กำลังเครื่องยนต์ 3.10-7.44 กิโลวัตต์ต้นทุนค่าเชื้อเพลิงต่ำสุดจะอยู่ที่ความเร็วรอบ 1800 รอบต่อนาที, ที่กำลังเครื่องยนต์ 8.02 กิโลวัตต์ ต้นทุนค่าเชื้อเพลิงต่ำสุดจะอยู่ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาทีและที่กำลังเครื่องยนต์ 8.66-9.20 กิโลวัตต์ต้นทุนค่าเชื้อเพลิงต่ำสุดจะอยู่ที่ความเร็วรอบ 2400 รอบต่อนาที

ตารางที่ 4 แสดงต้นทุนค่าเชื้อเพลิงเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ

		Cost of Fuel Consumption (Diesel + Biogas) (DDF) (Baht/hr.)					
Corrected Power (kW.)	9.20						54.90
	8.66					50.19	49.31
	8.02				42.88	41.57	42.89
	7.44				36.19	36.35	37.93
	6.81			39.77	31.19	32.61	35.27
	6.23			32.57	27.81	28.89	32.30
	5.59			27.06	22.85	25.77	29.07
	4.99		34.00	21.85	19.94	21.83	26.67
	4.37	30.07	21.19	16.04	15.28	19.11	16.89
	3.71	22.08	14.35	13.44	11.74	14.84	12.66
	3.10	15.41	11.87	10.79	10.22	11.29	10.68
	2.34	8.47	7.99	8.34	8.70	9.82	9.80
	1.75	4.68	5.67	5.91	6.98	9.00	9.54
	1.17	4.48	5.29	6.10	6.75	9.42	9.74
Speed (rev/min)		1000	1200	1500	1800	2000	2400

(9) ร้อยละของต้นทุนค่าเชื้อเพลิงที่ลดลงเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ แสดงในตารางที่ 5 พบว่าค่าร้อยละของต้นทุนค่าเชื้อเพลิงที่ลดลงมากที่สุดที่กำลังเครื่องยนต์เดียวกันจะอยู่ในความเร็วรอบที่ต่างกันคือที่กำลังเครื่องยนต์ 1.17-1.75 กิโลวัตต์ร้อยละของต้นทุนค่าเชื้อเพลิงที่ลดลงมากที่สุดอยู่ที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที, ที่กำลังเครื่องยนต์ 2.34-4.37และ 8.66-9.20 กิโลวัตต์ร้อยละของต้นทุนค่าเชื้อเพลิงที่ลดลงมากที่สุดจะอยู่ที่ความเร็วรอบ 2400 รอบต่อนาที ที่

กำลังเครื่องยนต์ 4.99-7.44 กิโลวัตต์ร้อยละของต้นทุนค่าเชื้อเพลิงที่ลดลงมากที่สุดจะอยู่ที่ความเร็วรอบ 1800 รอบต่อนาทีและที่กำลัง

ตารางที่ 5 แสดงร้อยละของต้นทุนค่าเชื้อเพลิงที่ลดลงเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพ

		Saving of DDF Over Diesel (%)					
Corrected Power (kW.)	9.20						33.54
	8.66					34.81	37.65
	8.02				40.68	41.29	40.83
	7.44				44.27	44.21	43.72
	6.81			36.13	46.08	45.50	43.93
	6.23			41.72	47.80	46.98	44.62
	5.59			43.01	52.31	48.64	46.58
	4.99		30.53	48.77	54.74	51.86	47.48
	4.37	29.31	44.41	56.73	60.20	53.82	63.64
	3.71	39.37	54.53	58.17	66.04	59.46	70.67
	3.10	45.80	56.30	60.74	66.83	65.76	72.30
	2.34	63.41	65.91	66.80	68.23	66.73	72.87
	1.75	76.07	69.78	73.30	71.88	65.86	70.55
	1.17	71.62	66.20	67.13	67.90	60.42	66.61
Speed (rev/min)		1000	1200	1500	1800	2000	2400

9. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

9.1 ผลต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์

(1) การใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงร่วมจะให้ค่าแรงบิดเบรกสูงสุดในแต่ละความเร็วรอบใกล้เคียงกับค่าแรงบิดเบรกสูงสุดที่ได้จากการใช้น้ำมันดีเซล

(2) ที่สภาวะภาระสูงสุด เมื่อใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงร่วมพบว่าค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงรวมจำเพาะต่ำกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซล ยกเว้นที่ความเร็วรอบ 1800 รอบต่อนาที พบว่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงรวมจำเพาะมีค่าสูงกว่าอยู่เล็กน้อย ดังนั้นจุดนี้จึงเป็นจุดทำงานที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้งาน

(3) ที่สภาวะภาระสูงสุดค่าอัตราส่วนสมมูลเมื่อใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงร่วมจะมีค่าสูง (ส่วนผสมหนา) กว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซล แต่จะมีค่าใกล้เคียงกันที่ความเร็วรอบ 1800 รอบต่อนาที

(4) แผนภูมิสมรรถนะของการใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงร่วมพบว่าค่าอัตราสิ้นเปลืองพลังงานรวมจำเพาะต่ำสุดและประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะสูงสุดจะขยับไปเกิดขึ้นที่ตำแหน่งภาระและความเร็วรอบที่สูงกว่าการใช้น้ำมันดีเซล

(5) อัตราส่วนการแทนที่น้ำมันดีเซลของระบบเชื้อเพลิงร่วมอยู่ในช่วงร้อยละ 90-40 โดยอัตราส่วนการแทนที่น้ำมันดีเซลลดลงเมื่อแรงบิดเบรกและความเร็วรอบสูงขึ้น

(6) อุณหภูมิไอเสียที่สภาวะภาระสูงสุดเมื่อใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงร่วมจะมีค่าต่ำกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซลชัดเจนและต่ำกว่าการใช้น้ำมันดีเซลทุกจุดการทำงานของเครื่องยนต์ที่สภาวะภาระบางส่วน โดยอุณหภูมิไอเสียเมื่อใช้ก๊าซชีวภาพมีค่าในช่วงประมาณ 5-45 เปอร์เซ็นต์

(7) อุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นเมื่อใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซชีวภาพที่ภาระสูงสุดมีค่าสูงกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซลประมาณ 1-3 องศาเซลเซียส

(8) ค่าควันดำจากการใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงร่วมที่ความเร็วรอบ 2400 รอบต่อนาที จะต่ำกว่าค่าควันดำจากการใช้น้ำมันดีเซล

9.2 ผลความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์

สามารถลดต้นทุนค่าเชื้อเพลิงได้ในปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับความเร็วรอบและกำลังของเครื่องยนต์ โดยสามารถลดต้นทุนค่าเชื้อเพลิงได้ในช่วง 30-70 เปอร์เซ็นต์

9.3 ข้อเสนอแนะ

ผลที่นำเสนอในบทความนี้เป็นผลที่ได้จากการทดสอบเครื่องยนต์รุ่น 120 เมื่อใช้ก๊าซชีวภาพที่มีปริมาณมีเทนประมาณร้อยละ 73 เปอร์โดยปริมาตร, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณร้อยละ 19 โดยปริมาตร , ก๊าซไนโตรเจนประมาณร้อยละ 6.5 โดยปริมาตร, ก๊าซออกซิเจนประมาณร้อยละ 1.5 โดยปริมาตรและก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ประมาณ 20 ppm ซึ่งการใช้เครื่องยนต์รุ่นอื่นกับก๊าซนี้หรือใช้เครื่องรุ่นนี้กับก๊าซชีวภาพจากแหล่งอื่นๆ ที่อาจมีคุณสมบัติแตกต่างไปจากนี้อาจส่งผลให้สมรรถนะเครื่องยนต์ที่ได้แตกต่างไป ดังนั้นเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดการใช้งานควรปรับแต่งเครื่องยนต์ให้เหมาะสมกับงานเฉพาะกรณี

10. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอบคุณ บริษัทสยามคูโบต้าอุตสาหกรรม จำกัด ที่เอื้อเฟื้อเครื่องยนต์และให้คำแนะนำเกี่ยวกับเครื่องยนต์ที่ใช้ในงานวิจัย, คุณสมชาย นิติกาญจนา เจ้าของฟาร์มสุกร บ.เอส พี เอ็ม อาหารสัตว์ จก. ที่ได้ให้ความกรุณาอำนวยความสะดวกสถานที่พักและแหล่งก๊าซชีวภาพ ขอขอบคุณ นิสิตในห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องยนต์สันดาปภายในทุกคนที่ช่วยติดตั้งเครื่องยนต์และทำการทดสอบตลอดจนให้การช่วยเหลืออื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

1. แหล่งที่มา:http://www.eppo.go.th/vrs/VRS38-10-Biomass.html; หน่วยบริการก๊าซชีวภาพ, สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโลยี, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
2. แหล่งที่มา:http://www.biogastech-cmu.com; อุเทน กันทา, โครงการส่งเสริมการผลิตก๊าซชีวภาพในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ ฟาร์มขนาดใหญ่, สถาบันเทคโลยีก๊าซชีวภาพ, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
3. Ghazi, A. Karim, “A Review of Combustion Process in the Dual Fuel Engine-The Gas Diesel Engine”, Energy Combustion Science, Vol. 6, pp. 277-285
4. Wai, Y. Wong, K. Clack Midkiff, Stuart R. Bell, “Performance and Emission of Natural Gas Dual-Fuel Indirect Injected Diesel Engine”, SAE Technical Paper No. 911766
5. R.G. Papagiannakis, D.T. Hountalas, “Combustion and Exhaust Emission Characteristics of a Dual Fuel Compression Ignition Engine Operated with Pilot Diesel Fuel and Natural Gas”, Energy Conversion and Management, (2004) pp 2971-2987

6. “คู่มือช่างเครื่องยนต์ดีเซลคูโบต้า RT 120”, หน่วยงานอบรมเทคนิค, ส่วนบริการเทคนิค, บริษัท สยามคูโบต้าอุตสาหกรรม จำกัด
7. The American Society of Mechanical Engineering (ASME), “Measurement of Fluid Flow Using Small Bore Precision Orifice Meters”, ASME MFC-14M-2001 (Revision of ASME MFC-14M-1995)
8. กริชชัย คชพลายุกต์, “การใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล ระบบเชื้อเพลิงคู่”, มหาบัณฑิต วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548