อิทธิพลของตัวแปรการทำงานต่อพฤติกรรมของเครื่องยนต์ดีเซลระบบเชื้อเพลิงคู่ที่ใช้ก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิง

THE INFLUENCE OF ENGINE PARAMETERS ON LPG-DIESEL DUAL FUEL ENGINE OPERATION

คณิต วัฒนวิเชียร[1*] เยาวลักษณ์ ถมปัทม์
[1]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท กรุงเทพมหานคร 10330
โทร 0-2218-6607 โทรสาร 0-2252-2889 อีเมล์: wkanit@chula.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอแนวทางการดัดแปลงและรายงานผลการศึกษาค่าพารามิเตอร์การทำงานที่เหมาะสมสำหรับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดขนาดเล็กชนิดห้องเผาไหม้ช่วย (IDI) ระบบเชื้อเพลิงร่วมที่ใช้ก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิง เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาดัดแปลงเครื่องยนต์ให้สามารถใช้งานได้ดีโดยที่สมรรถนะการทำงานปกติไม่เสียไป ซึ่งการดัดแปลงเครื่องยนต์ได้ดำเนินการโดยการออกแบบมิกเซอร์และติดตั้งไว้ที่ปลายของท่อร่วมไอดีเพื่อทำหน้าที่ผสมก๊าซหุงต้มและอากาศให้เป็นสารผสมเนื้อเดียว และทำการทดสอบเครื่องยนต์ที่สภาวะภาระสูงสุด และสภาวะภาระบางส่วน ได้ดำเนินการตามมาตรฐานการทดสอบ European Stationary Test Cycle กล่าวคือ ทำการทดสอบที่ ความเร็วรอบคงที่ 1400, 1700 และ 2100 รอบต่อนาที ที่ภาระ 25%, 50%, 75% และที่ 100% ของภาระสูงสุด เพื่อการศึกษาอิทธิพลของปริมาณก๊าซหุงต้มและองศาการฉีดน้ำมันดีเซลที่แต่ละจุดทดสอบ ผลจากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณก๊าซหุงต้มช่วยให้สามารถลดปริมาณการจ่ายน้ำมันดีเซลลงได้มากที่ภาระต่ำ แต่พบค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกต่ำ และที่ภาระสูงแม้ว่าจะไม่สามารถใช้ปริมาณก๊าซหุงต้มได้มากตามต้องการเนื่องจากเกิดการ knock ทำให้ไม่สามารถลดอัตราการจ่ายน้ำมันดีเซลได้มากนัก แต่พบค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกที่ใกล้เคียงหรือสูงกว่าเครื่องยนต์ดีเซลปกติเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าแต่ละจุดการทำงานของเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงร่วมที่ใช้ก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิงต้องการจังหวะการฉีดน้ำมันดีเซลที่เหมาะสมแตกต่างกัน ผลการศึกษานี้ได้สรุปนำเสนอในรูปแผนภูมิแสดงค่าพารามิเตอร์การทำงานที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานได้อย่างเหมาะสมต่อไป

อย่างไรก็ตามแม้ว่าในเชิงค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกโดยเฉพาะที่ภาระต่ำของเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงร่วมที่ใช้ก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิงจะมีค่าต่ำกว่าเครื่องยนต์ดีเซลปกติแม้จะได้ปรับเปลี่ยนปริมาณก๊าซหุงต้มและจังหวะการฉีดน้ำมันดีเซลแล้วก็ตาม แต่ในทางค่าใช้จ่ายระบบเชื้อเพลิงร่วมที่ใช้ก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิงยังคงมีความน่าสนใจเพราะสามารถช่วยลดต้นทุนค่าเชื้อเพลิงรวมจำเพาะได้

Abstract

The optimum of LPG equivalence ratio and injection timing are investigated on a LPG-Diesel Dual Fuel Engine (LPG-DDF) which simple modified by installing a gas mixer at the end of the air intake pipe. The engine is tested at full load and part load (25%,50%,75%, 100% of full load) at three constant speed(1400, 1700, 2100 rev/min) then varied the LPG volume flow rate from minimum flow rate to the maximum flow rate that can be added to the engine without knocking. The test results show that the diesel consumption can be decreased by increasing LPG flow rate especially at low load but the brake specific total energy conversion efficiency is still lower than diesel mode. For running at high load, it seems to be that adding high LPG flow rate causes engine knock but the obtained brake specific total energy conversion efficiency is equal or slightly higher diesel mode. The effects of injection timing is also investigated by testing the engine at retarded, advanced, OEM injection timing of diesel pilot with constant LPG flow rate. The optimum injection timing is based on the engine speed and load, then, the optimum parameters map are plotted.

The brake specific total energy conversion efficiency of LPG-DDF at low load is still lower than diesel engine although the LPG flow rate and the diesel pilot injection timing are optimized adjusted.

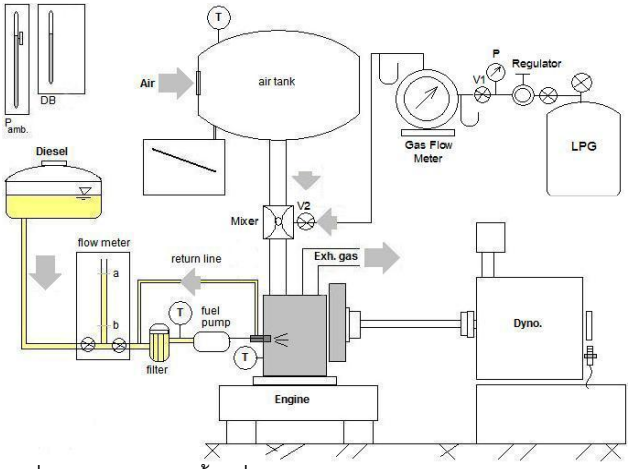
คำสำคัญ : ระบบเชื้อเพลิงร่วม, เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดขนาดเล็ก, อิทธิพลของสัดส่วน LPG, พารามิเตอร์การทำงานที่เหมาะสม

1. บทนำ

ก๊าซหุงต้มเป็นหนึ่งในพลังงานทางเลือกที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับเครื่องยนต์ที่ออกแบบมาสำหรับใช้กับน้ำมันดีเซล [1-5] เพราะก๊าซหุงต้มเป็นผลพลอยได้จากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมและจากโรงแยกก๊าซธรรมชาติอยู่แล้ว ประเทศไทยเองก็เป็นผู้ส่งออกก๊าซหุงต้ม นอกจากนี้ในการใช้งาน การจัดเก็บและขนย้ายก๊าซหุงต้มล้วนเป็นเรื่องไม่ยุ่งยาก และต้นทุนการดัดแปลงเครื่องยนต์มาใช้ก๊าซหุงต้มก็ต่ำอยู่มาก อีกทั้งเป็นพลังงานที่คุ้นเคยในครัวเรือน มีสถานีและร้านจำหน่ายกระจายอยู่ทั่วประเทศจึงง่ายต่อการเข้าถึง ดังนั้นการนำก๊าซหุงต้มมาใช้ทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ยังช่วยลดรายจ่ายทางด้านพลังงานให้กับประเทศและประชาชนได้อีกด้วย

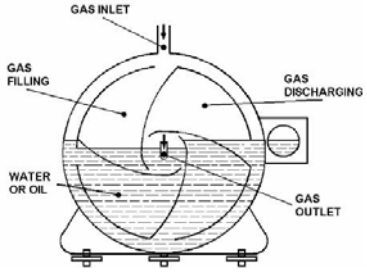
2. อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

เครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นเครื่องยนต์ดีเซลแบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อมของ KUBOTA รุ่น RT 120 สูบเดียวเคลื่อนที่ในแนวนอน,ห้องเผาไหม้แบบ swirl chamber, กำลังสูงสุด 12 hp/2400 rpm, แรงบิดเบรกสูงสุด 4.0 kg-m/1600 rpm, อัตราส่วนกำลังอัด 21:1, ปริมาตรกระบอกสูบ 624 cc. [6] ไดนาโมมิเตอร์ที่ใช้เป็นแบบไฮโดรลิคของ Redman Heenan International Company, England รุ่น Froude Hydraulic Dynamometer (DPX2) แผนผังการติดตั้งเครื่องยนต์และอุปกรณ์บนแท่นทดสอบแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังการติดตั้งเครื่องยนต์และอุปกรณ์บนแท่นทดสอบ

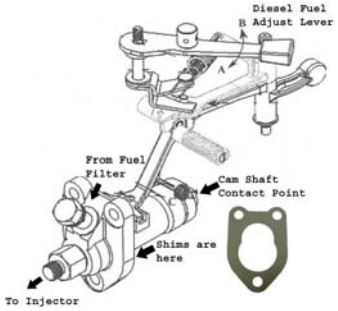
การวัดอัตราการไหลของก๊าซหุงต้ม ใช้ Gas Flow Meter ชนิด Liquid Seal Drum Gas Meter หรือ Wet Gas Meter ของ Alex.Wright&Co.,(Westminster)LTD. ปริมาตรก๊าซที่ไหลผ่านมิเตอร์ 2.5 ลิตรต่อการหมุนหนึ่งรอบ (lit/round) Capacity 0-30 lit/min. ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 องค์ประกอบภายในของ Gas Flow Meter ที่ใช้ในการวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซหุงต้ม

พารามิเตอร์ตัวแรกที่ศึกษา ได้แก่ ปริมาณก๊าซหุงต้ม ทำการปรับตั้งปริมาณก๊าซจากค่าความความดันต้นของก๊าซหุงต้มที่ปล่อยออกจากถังบรรจุด้วยเรกกูเลเตอร์ ใช้ความดันต้นทั้งสิ้น 5 ค่า ได้แก่ 400, 600, 800, 1000 และ 1200 mmH_2O (P_1, P_2, P_3, P_4 และ P_5) ได้ค่าอัตราการไหลของก๊าซหุงต้มระหว่าง 1.0 ถึง 2.5 ลิตรต่อนาที นำมาตรฐาน European Stationary Cycle มาประยุกต์ใช้ ที่ความเร็วรอบ 1400, 1700, 2100 rpm ที่ภาระ 25%, 50%, 75% และ 100% ของภาระสูงสุดที่เครื่องยนต์ดีเซลปกติทำได้ โดยเริ่มทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลปกติก่อน ที่ความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที ภาระ 25%, 50%, 75% และที่ 100% ของภาระเต็มที่ ที่เครื่องยนต์ดีเซลปกติสามารถทำได้ที่ความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที จากนั้นปรับตั้งความดันต้นของก๊าซหุงต้มด้วยการหมุนปรับที่แป้นเกลียวของเรกกูเลเตอร์โดยตรวจสอบและปรับค่าความดันจากมาตรวัดความดันก๊าซหุงต้มให้คงที่จากนั้น ทำการทดสอบจุดทำงานทั้ง 4 จุดทำงาน แล้วจึงปรับความดันก๊าซและทดสอบซ้ำจนครบทั้ง 5 ค่าความดันต้น แล้วทำการทดสอบที่ความเร็วรอบ 1700 รอบต่อนาที และที่ 2100 รอบต่อนาที เช่นเดียวกับที่ความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที โดยที่เปอร์เซ็นต์ภาระกำหนดมาจากภาระที่เครื่องยนต์ดีเซลปกติสามารถทำได้ หมายถึงทดสอบเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ที่ความเร็วรอบและภาระที่เท่ากันกับเครื่องยนต์ดีเซลปกติทุกประการ

จากนั้นได้ทำการทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของจังหวะการฉีดน้ำมันดีเซล (Injection Timing) จากการเริ่มฉีดน้ำมันดีเซลที่องศาเพลาข้อเหวี่ยงที่ประมาณ 21 deg BTDC (OEM setting) โดยมีแผ่นชิมรองเรือนปั๊มฉีดน้ำมันดีเซลจำนวนสองแผ่น (แบบหนา 0.15 mm.) ได้ทำการทดสอบเครื่องยนต์เมื่อปั๊มน้ำมันดีเซลฉีดน้ำมันดีเซลในจังหวะล่วงหน้าและล่าช้ากว่าตำแหน่งปกติจากผู้ผลิต (OEM setting) ด้วยการเพิ่ม/ลดจำนวนแผ่นชิมรองเรือนปั๊มน้ำมันดีเซลดังรูปที่ 3 และตารางที่ 1



รูปที่ 3 แสดงองค์ประกอบปั๊มน้ำมันดีเซลและตำแหน่งติดตั้งของแผ่นชิมรองเรือนปั๊มน้ำมันดีเซล

ตารางที่ 1 จำนวนแผ่นชิมรองเรือนปั๊มกับค่าองศาการฉีดน้ำมันดีเซล

Injection timing setting	Shims type (quantity.)		Diff. deg. BTDC
	thin (t 0.10 mm)	thick(t 0.15 mm)	
Retarding	2	2	Std -2
Standard (OEM)	-	2	Std -0
Advancing	1	-	Std +2

จุดที่ใช้ในการทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของจังหวะการฉีดน้ำมันดีเซลได้แก่ ที่ความเร็วรอบ 1400, 1700, 2100 rpm ตั้งค่าภาระที่ไดนาโมมิเตอร์สามระดับได้แก่ ที่ภาระต่ำ (2.9 kg), ที่ภาระปานกลาง

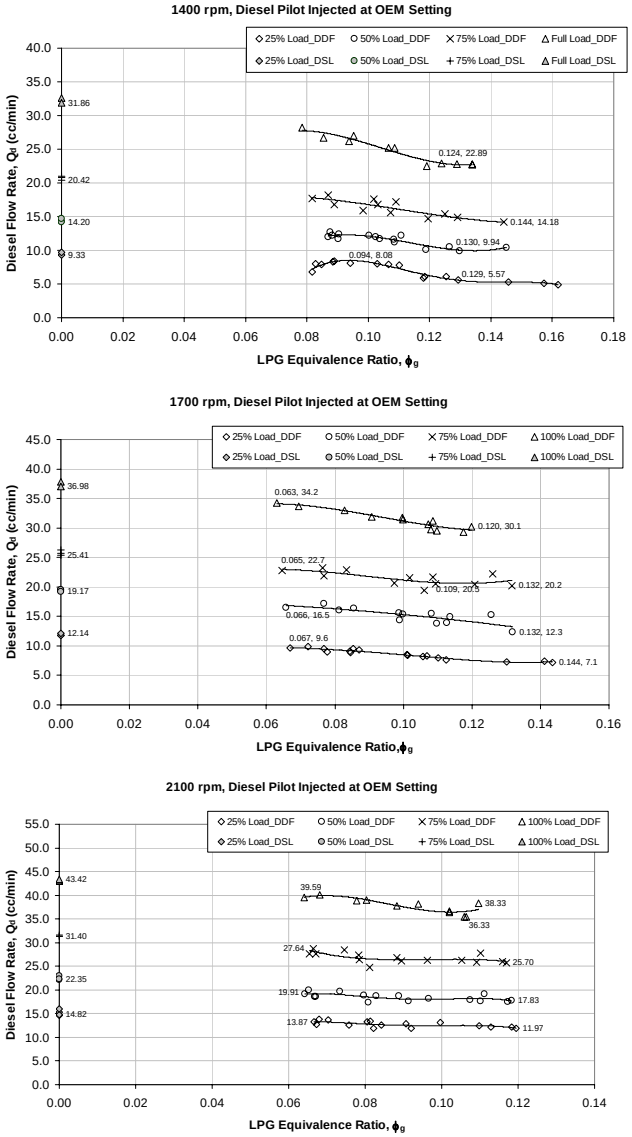
(7.0 kg) และที่ภาระสูงสุดซึ่งปล่อยให้เครื่องยนต์ผลิตกำลังสูงสุดที่สามารถทำได้ที่สภาวะนั้นๆ

3. ผลการทดสอบ [7]

3.1 อิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลของก๊าซหุงต้ม(ϕ_g)

3.1.1 อิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลของก๊าซหุงต้ม(ϕ_g)ต่อต่ออัตราการไหลของน้ำมันดีเซล(Q_d)

จากรูปที่ 4 ที่ 1400 rpm ที่ภาระต่ำหรือที่ 25% load พบว่าในช่วงแรกที่ปล่อยก๊าซหุงต้มเข้าสู่ห้องเผาไหม้ พบว่า อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำมันดีเซลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำมันดีเซลจะกลับลดลงเมื่อค่าอัตราส่วนสมมูลของก๊าซหุงต้มถึงที่ประมาณ 0.09 (1.43 lit/min) และมีแนวโน้มลดลงมาตลอดช่วงที่ค่าอัตราส่วนสมมูลของก๊าซหุงต้มหนาขึ้น



รูปที่ 4 แสดงอัตราการไหลของน้ำมันดีเซลเมื่อค่าอัตราส่วนสมมูลของก๊าซหุงต้มเปลี่ยนไป ที่ภาระและความเร็วรอบต่างๆ

ที่ภาระปานกลางหรือ 50% load พบว่า อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำมันดีเซล มีแนวโน้มคล้ายกับที่ภาระต่ำ 25% load โดยในช่วงแรกที่ปล่อยก๊าซหุงต้มเข้าสู่ห้องเผาไหม้ พบว่า อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำมันดีเซลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำมันดีเซลจะกลับลดลงมาเมื่อค่าอัตราส่วนสมมูลของก๊าซหุงต้มถึงที่ประมาณ 0.10 (1.50 lit/min) และมีแนวโน้มลดลงมาตลอดช่วงที่เพิ่มก๊าซหุงต้มเข้าไป กระทั่งค่าอัตราส่วนสมมูลของก๊าซหุงต้มถึงที่ประมาณ 0.13 (2.01 lit/min) พบว่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำมันดีเซลเริ่มคงที่หรือลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มก๊าซหุงต้มไปมากกว่านี้ และที่ภาระ 75% load และภาระสูงสุดพบว่า อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำมันดีเซลมีแนวโน้มลดลงตลอดช่วงที่มีการเพิ่มปริมาณก๊าซหุงต้มเข้าไปในห้องเผาไหม้ กระทั่งถึงปริมาณก๊าซหุงต้มสูงสุดที่สามารถป้อนให้แก่เครื่องยนต์ได้โดยปราศจากอาการน็อกที่ค่าอัตราส่วนสมมูลของก๊าซหุงต้มเท่ากับ 0.144 (2.13 lit/min) และ 0.136 (2.03 lit/min) ตามลำดับ

ที่ 1700 rpm พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณก๊าซหุงต้มเข้าไปในห้องเผาไหม้ความต้องการปริมาณน้ำมันดีเซลลดลงในทุกภาระของเครื่องยนต์ และที่ 2100 rpm ที่ภาระต่ำและที่ภาระปานกลาง พบว่า เมื่อเพิ่มค่าอัตราส่วนสมมูลของก๊าซหุงต้มค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำมันดีเซลจะลดลงเล็กน้อยและลดลงไปตลอดที่ค่าอัตราส่วนสมมูลของก๊าซหุงต้มเพิ่มขึ้น โดยจะได้อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำมันดีเซลต่ำที่สุด เมื่อค่าอัตราส่วนสมมูลของก๊าซหุงต้มหนาที่สุด สำหรับที่ภาระสูงสุด พบว่า เมื่อ อัตราส่วนสมมูลของก๊าซหุงต้มเท่ากับ 0.106 (2.14 lit/min) จะให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำมันดีเซลต่ำที่สุดเท่ากับ 36.33 cc/min หากเพิ่มอัตราส่วนสมมูลของก๊าซหุงต้มให้หนากว่านี้ค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำมันดีเซลจะเพิ่มขึ้น

3.1.2 อิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลของก๊าซหุงต้ม(ϕ_g)ต่อค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรก (η_t)

จากรูปที่ 5 ที่ทุกค่าความเร็วพบว่าที่ภาระต่ำ 25% load นั้นประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกต่ำกว่าที่ภาระ 50%, 75%, 100% load ทั้งกรณีเมื่อทดสอบด้วยเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่และเมื่อทดสอบแบบเครื่องยนต์ดีเซลปกติ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเครื่องยนต์ทั้งสองรูปแบบพบว่าที่ภาระต่ำ 25% load เมื่อทดสอบเครื่องยนต์ด้วยระบบเชื้อเพลิงคู่ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกมีค่าต่ำกว่าเมื่อทดสอบด้วยเครื่องยนต์ดีเซลปกติชัดเจน

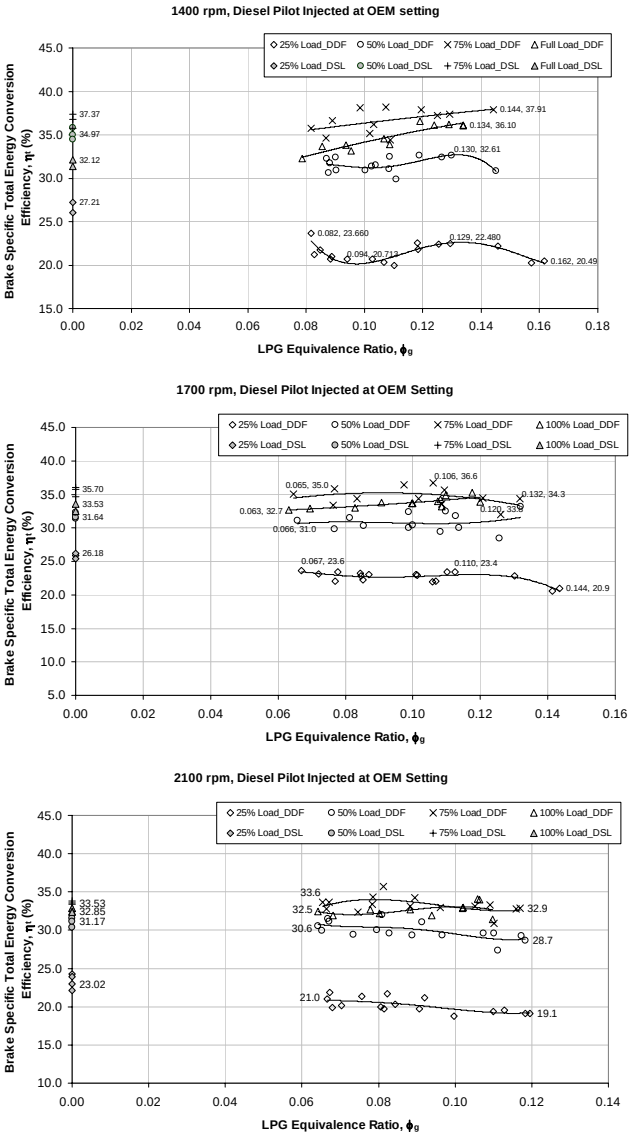
ที่ความเร็ว 1400 rpm ที่ภาระต่ำ 25% load เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณก๊าซหุงต้ม พบว่า ช่วงแรกของการปล่อยก๊าซหุงต้มเข้าสู่ห้องเผาไหม้นั้นพบว่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกมีค่าลดลงเมื่อก๊าซหุงต้มมากขึ้น กระทั่งถึงค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกต่ำสุดค่าหนึ่ง ที่อัตราส่วนสมมูลของก๊าซหุงต้ม 0.09 (1.43 lit/min) เมื่อเพิ่มปริมาณห๊าซหุงต้มมากขึ้นไปอีก พบว่า แนวโน้มประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกกลับเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มก๊าซหุงต้ม และประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่ง ที่อัตราส่วนสมมูลของก๊าซหุงต้ม 0.13 (2.03 lit/min) จากนี้หากเพิ่มก๊าซหุงต้มมากขึ้นไปอีกจะทำให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกกลับลดลงอีกครั้งกระทั่งค่าที่อัตราส่วนสมมูลของก๊าซหุงต้ม 0.16 (2.51 lit/min) โดยความชันของเส้นแนวโน้มลดลงตลอดชัดเจน และที่ค่าภาระ 50% load พบว่า ลักษณะเส้นแนวโน้มของประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกคล้ายกับที่ภาระต่ำ แต่ให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกใกล้เคียงกับกรณีเครื่องยนต์ดีเซลปกติ และพบว่าค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกที่สูงที่สุดที่

ภาระปานกลางนี้อยู่ที่ 32.62% ที่ค่าอัตราส่วนสมมูลของก๊าซหุงต้มเท่ากับ 0.13 (2.01 lit/min) ซึ่งให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงกว่ากรณีเครื่องยนต์ดีเซลปกติเล็กน้อย เมื่อเพิ่มก๊าซหุงต้มมากขึ้นพบว่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกมีแนวโน้มลดลงจากนี้ ที่ภาระ 75% พบว่า ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกเมื่อทดสอบเครื่องยนต์ด้วยระบบเชื้อเพลิงคู่มีค่าใกล้เคียงกับค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกเมื่อทดสอบเครื่องยนต์แบบเครื่องยนต์ดีเซลปกติ และเมื่อเพิ่มปริมาณก๊าซหุงต้มเข้าไปมากขึ้นพบว่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและสูงกว่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกเมื่อรัเครื่องยนต์แบบเครื่องยนต์ดีเซลปกติเล็กน้อย กระทั่งเมื่อปริมาณก๊าซหุงต้มที่ประมาณ 2.25 lit/min พบว่าหากเพิ่มก๊าซหุงต้มต่อไปอีกประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกของเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่มีแนวโน้มลดลงและต่ำกว่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกกรณีเครื่องยนต์ดีเซลปกติเล็กน้อย และที่ภาระสูงสุดพบว่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกของเครื่องยนต์ที่ทดสอบด้วยระบบเชื้อเพลิงคู่มีแนวโน้มสูงกว่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกของเครื่องยนต์ดีเซลปกติ โดยเมื่อเริ่มปล่อยก๊าซหุงต้มเข้าสู่ห้องเผาไหม้พบว่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและสูงกว่าค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกเมื่อทดสอบเครื่องยนต์แบบดีเซลปกติ จนกระทั่งค่าอัตราส่วนสมมูลของก๊าซหุงต้มเท่ากับ 0.12 (1.82 lit/min) จะพบว่าการเพิ่มอัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซหุงต้มมากขึ้นประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ ซึ่งยังคงมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงกว่าเครื่องยนต์ดีเซลปกติตลอดช่วงที่เพิ่มก๊าซหุงต้มกระทั่งถึงค่าอัตราการไหลก๊าซหุงต้มสูงสุดที่จ่ายได้ที่ 2.03 lit/min นอกจากนี้ พบว่าค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกที่ภาระ 75% ของความเร็วรอบ 1400 rpm มีค่าสูงสุดทั้งกรณีทดสอบเครื่องยนต์ด้วยระบบเชื้อเพลงคู่และแบบเครื่องยนต์ดีเซลปกติ และพบว่าเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่เมื่อทดสอบที่ความเร็วรอบต่ำนี้การใช้งานที่ภาระสูงและภาระสูงสุด จะให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงกว่าการใช้งานที่ภาระต่ำและภาระปานกลาง ต่างจากกรณีเครื่องยนต์ดีเซลปกติที่จะให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงเมื่อใช้เครื่องยนต์ที่ภาระปานกลางและที่ภาระสูง แต่จะให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกต่ำเมื่อใช้เครื่องยนต์ที่ภาระต่ำและสูงสุด

จากรูปที่ 5 ที่ 1700 rpm ที่ภาระต่ำ 25% load พบว่าค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อปล่อยก๊าซหุงต้มเข้าสู่เครื่องยนต์ในช่วงแรกจนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่งเมื่อเพิ่มก๊าซหุงต้มต่อไปค่า ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกจะกลับเพิ่มขึ้นมาถึงค่าต่ำสุดค่าหนึ่งและจะกลับลดลงอีกครั้งตลอดปริมาณก๊าซหุงต้มที่เพิ่มมากกว่านี้ ที่ค่าภาระ 50% load พบว่า ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกเมื่อทดสอบเครื่องยนต์ด้วยระบบเชื้อเพลิงคู่มีค่าใกล้เคียงเมื่อทดสอบแบบเครื่องยนต์ดีเซลปกติตลอดช่วงค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซหุงต้ม และยังพบว่าเมื่อเพิ่มก๊าซหุงต้มมากขึ้นพบว่าค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ ที่ภาระ 75% load พบว่า ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกเมื่อทดสอบเครื่องยนต์ด้วยระบบเชื้อเพลิงคู่มีค่าใกล้เคียงและสูงกว่ากับค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกเมื่อทดสอบเครื่องยนต์แบบเครื่องยนต์ดีเซลปกติเล็กน้อย และเมื่อเพิ่มปริมาณก๊าซหุงต้มเข้าไปมากขึ้นพบว่าค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและสูงกว่าค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกเมื่อทดสอบเครื่องยนต์แบบเครื่องยนต์ดีเซลปกติเล็กน้อย กระทั่งเมื่ออัตราส่วนสมมูลของก๊าซหุงต้มเท่ากับ 0.106 (1.88 lit/min) พบว่าหากเพิ่มก๊าซหุงต้มต่อไปอีกค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกของเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่มีแนวโน้มลดลงและต่ำกว่าค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกกรณีเครื่องยนต์ดีเซลปกติเล็กน้อย เมื่อพิจารณาที่ภาระสูงสุด พบว่า ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกของเครื่องยนต์ที่ทดสอบด้วยระบบเชื้อเพลิงคู่มีแนวโน้มสูงกว่าค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกของเครื่องยนต์ดีเซลปกติ โดยเมื่อเริ่มปล่อยก๊าซหุงต้มเข้าสู่ห้องเผาไหม้พบว่าค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและสูงกว่าค่าค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกเมื่อทดสอบเครื่องยนต์แบบดีเซลปกติ และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซหุงต้มมากขึ้นจะได้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงกว่าเครื่องยนต์ดีเซลปกติเล็กน้อยตลอดช่วงที่เพิ่มก๊าซหุงต้ม นอกจากนี้พบว่าเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่เมื่อทดสอบที่ความเร็วรอบนี้การใช้งานที่ภาระสูง และภาระสูงสุด จะให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงกว่าการใช้งานที่ภาระต่ำและภาระปานกลาง เช่นเดียวกับกรณีเครื่องยนต์ดีเซลปกติ

จากรูปที่ 5 ที่ 2100 rpm พบว่าที่ภาระต่ำ 25% load นั้นพบว่าการปล่อยก๊าซเข้าสู่ห้องเผาไหม้มากขึ้นทำให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกลดลง ที่ค่าภาระ 50% load พบว่า ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกเมื่อทดสอบเครื่องยนต์ด้วยระบบเชื้อเพลิงคู่ต่ำกว่าเมื่อทดสอบแบบเครื่องยนต์ดีเซลปกติตลอดช่วงค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซหุงต้ม ซึ่งค่าความต่างไม่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับที่ภาระ 25% load และยังพบว่าเมื่อเพิ่มก๊าซหุงต้มมากขึ้นพบว่าค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกมีแนวโน้มต่ำลง และต่ำกว่าค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกเมื่อทดสอบแบบเครื่องยนต์ดีเซลปกติที่ภาระ 75% load พบว่า ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกเมื่อทดสอบเครื่องยนต์ด้วยระบบเชื้อเพลิงคู่มีค่าใกล้เคียงและสูงกว่าค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกเมื่อทดสอบเครื่องยนต์แบบเครื่องยนต์ดีเซลปกติ และเมื่อเพิ่มปริมาณก๊าซหุงต้มเข้าไปมากขึ้นพบว่าค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและสูงกว่าค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกเมื่อทดสอบเครื่องยนต์แบบเครื่องยนต์ดีเซลปกติเล็กน้อย กระทั่งเมื่อปริมาณก๊าซหุงต้มที่ประมาณ 1.64 lit/min พบว่าหากเพิ่มก๊าซหุงต้มต่อไปอีกค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกของเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่มีแนวโน้มลดลงแต่ยังคงใกล้เคียงกับค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรก

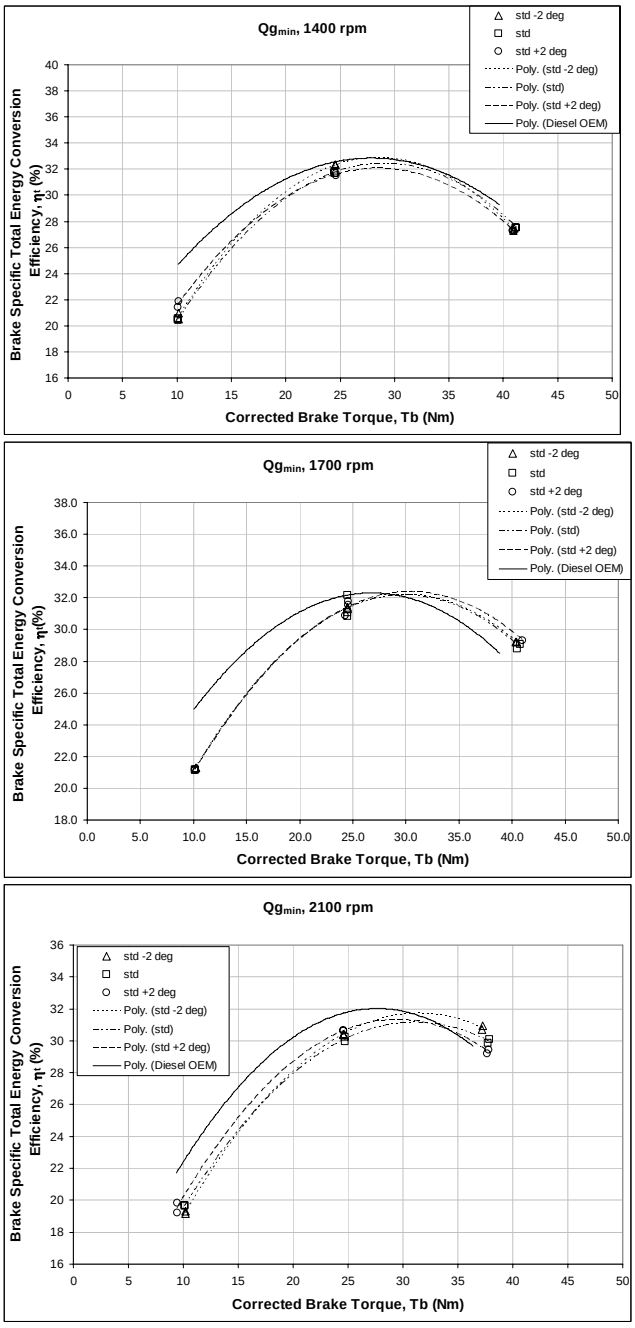
กรณีเครื่องยนต์ดีเซลปกติ ที่ภาระสูงสุดพบว่าค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกของเครื่องยนต์ที่ทดสอบด้วยระบบเชื้อเพลิงคู่มีแนวโน้มสูงกว่าค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกของเครื่องยนต์ดีเซลปกติ โดยเมื่อเริ่มปล่อยก๊าซหุงต้มเข้าสู่ห้องเผาไหม้พบว่าค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและสูงกว่าค่าค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรก เมื่อทดสอบเครื่องยนต์แบบดีเซลปกติ และพบว่าการเพิ่มอัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซหุงต้มมากขึ้นจะได้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกมีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงกว่าเครื่องยนต์ดีเวลปกติเล็กน้อย นอกจากนี้พบว่าเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่เมื่อทดสอบที่ความเร็วรอบนี้การใช้งานที่ภาระสูง และภาระสูงสุด จะให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงกว่าการใช้งานที่ภาระต่ำและภาระปานกลาง เช่นเดียวกับกรณีเครื่องยนต์ดีเซลปกติ



รูปที่ 5 ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกเมื่อค่าอัตราส่วนสมมูลของก๊าซหุงต้มเปลี่ยนไป ที่ภาระและรอบต่างๆ

3.2 อิทธิพลของจังหวะการฉีดน้ำมันดีเซล (injection timing)

3.2.1 อิทธิพลของ injection timing ที่ Q_{min} ($1.00 \leq Q_{min} \leq 1.25$ lit/min) ต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรก (η_t)



รูปที่ 6 ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรก (η_t) เมื่ออัตราการไหลของก๊าซหุงต้มต่ำสุด ที่ภาระและรอบต่างๆ

จากรูปที่ 6 ที่ 1400 rpm ที่ภาระต่ำ พบว่า เครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกต่ำกว่าเครื่องยนต์ดีเซลปกติอย่างชัดเจน และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่พบว่าเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ที่ฉีดน้ำมันดีเซลจังหวะล่วงหน้าให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงกว่าจังหวะมาตรฐานและจังหวะล่าช้า โดยไม่พบความแตกต่างที่สำคัญระหว่างจังหวะการฉีดแบบมาตรฐานและล่าช้า และพบว่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกที่ได้จากเครื่องยนต์ดีเซลปกติและเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ที่ทุกจังหวะการฉีดมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้นเมื่อเข้าสู่ภาระปานกลาง โดยเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ยังคงให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกต่ำกว่าเครื่องยนต์ดีเซลปกติ ที่ภาระสูงถึงภาระสูงสุดพบว่าเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ที่ฉีดน้ำมันดีเซลจังหวะมาตรฐานมีแนวโน้มให้ค่า

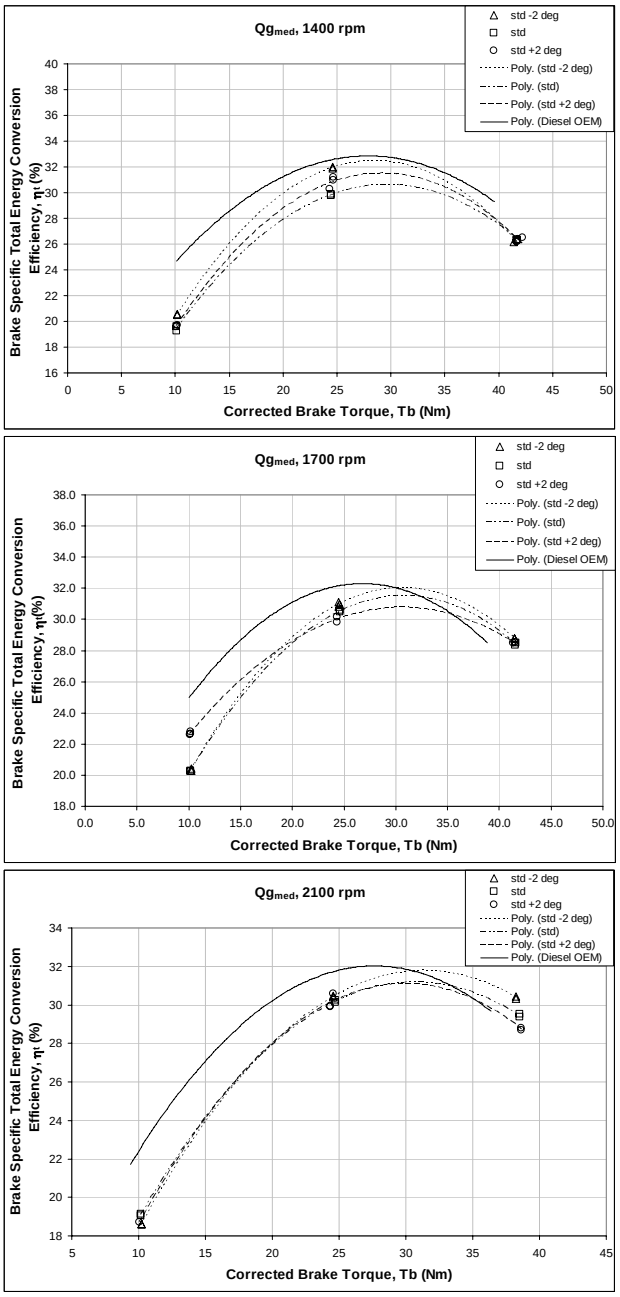
ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงกว่าทั้งกรณีเครื่องยนต์ดีเซลปกติและจังหวะล่วงหน้าและจังหวะล่าช้า และพบว่าเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ที่ฉีดน้ำมันดีเซลในจังหวะล่วงหน้าและจังหวะล่าช้าเครื่องยนต์ดีเซลปกติให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกต่ำกว่าเครื่องยนต์ดีเซลปกติ

จากรูปที่ 6 ที่ 2100 rpm ที่ภาระต่ำ พบว่า เครื่องยนต์ดีเซลปกติให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกต่ำกว่าเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ชัดเจน และพบว่าเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ที่ฉีดน้ำมันดีเซลจังหวะล่วงหน้าให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงกว่าจังหวะมาตรฐานและจังหวะล่าช้าตามลำดับ ที่ภาระปานกลางพบว่า เครื่องยนต์ดีเซลปกติยังคงให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงกว่าเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ชัดเจน และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ พบว่าจังหวะล่วงหน้าให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงกว่าจังหวะมาตรฐานและจังหวะล่าช้าตามลำดับ ที่ภาระสูงถึงภาระสูงสุด พบว่า เครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่มีแนวโน้มให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงกว่าเครื่องยนต์ดีเซลปกติ โดยที่จังหวะล่าช้าให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงที่สุด รองลงมาคือจังหวะมาตรฐานและจังหวะล่วงหน้าตามลำดับ

3.2.2 อิทธิพลของ injection timing ที่ Q_{med} ($1.75 \leq Q_{med} \leq 2.00$ lit/min) ต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรก (η_t)

จากรูปที่ 7 ที่ 1400 rpm ที่ภาระต่ำพบว่าจังหวะการฉีดน้ำมันดีเซลจังหวะล่าช้าให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงกว่าที่จังหวะการฉีดมาตรฐานและจังหวะล่วงหน้า และพบว่าที่ภาระต่ำนี้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกของเครื่องยนต์ด้วยระบบเชื้อเพลิงคู่ต่ำกว่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรก เมื่อทดสอบแบบเครื่องยนต์ดีเซลปกติอย่างชัดเจน ที่ภาระปานกลางถึงภาระสูง พบว่าการฉีดน้ำมันดีเซลด้วยองศาการฉีดจังหวะมาตรฐานให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงกว่ากรณีฉีดน้ำมันดีเซลจังหวะล่าช้าและจังหวะล่วงหน้า แต่ต่ำกว่ากรณีทดสอบแบบเครื่องยนต์ดีเซลปกติ ขณะที่จังหวะล่าช้าและจังหวะล่วงหน้าจะให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกต่ำกว่าโดยการฉีดแบบล่วงหน้าจะให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกต่ำกว่าที่องศาการฉีดน้ำมันดีเซลจังหวะล่าช้า และที่ภาระสูงสุด พบว่าการฉีดน้ำมันดีเซลด้วยองศาการฉีดจังหวะมาตรฐานให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงกว่ากรณีฉีดจังหวะล่าช้าและจังหวะล่วงหน้า แต่มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกต่ำกว่ากรณีทดสอบแบบเครื่องยนต์ดีเซลปกติ ขณะที่จังหวะล่าช้าและจังหวะล่วงหน้าจะให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกต่ำกว่า

จากรูปที่ 7 ที่ 2100 rpm พบว่าที่ภาระ 30 Nm ให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงที่สุด และพบว่าเครื่องยนต์ดีเซลปกติให้ค่าอัตราการบริโภคพลังงานรวมจำเพาะเบรกต่ำกว่าเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ที่ทุกค่าภาระทดสอบ เมื่อพิจารณาที่ภาระต่ำ พบว่าจังหวะมาตรฐานให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงกว่าเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ที่ฉีดน้ำมันดีเซลจังหวะล่าช้าและจังหวะล่วงหน้า และประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกจะเริ่มใกล้เคียงกันมากขึ้นเมื่อภาระเข้าใกล้ที่ค่า 25 Nm หลังจากนั้นที่ภาระสูงถึงสูงสุดพบว่าเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ที่ฉีดน้ำมันดีเซลจังหวะล่าช้าจะให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงกว่าที่จังหวะมาตรฐานและจังหวะล่วงหน้า โดยการฉีดน้ำมันดีเซลจังหวะล่วงหน้าจะให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกต่ำกว่า

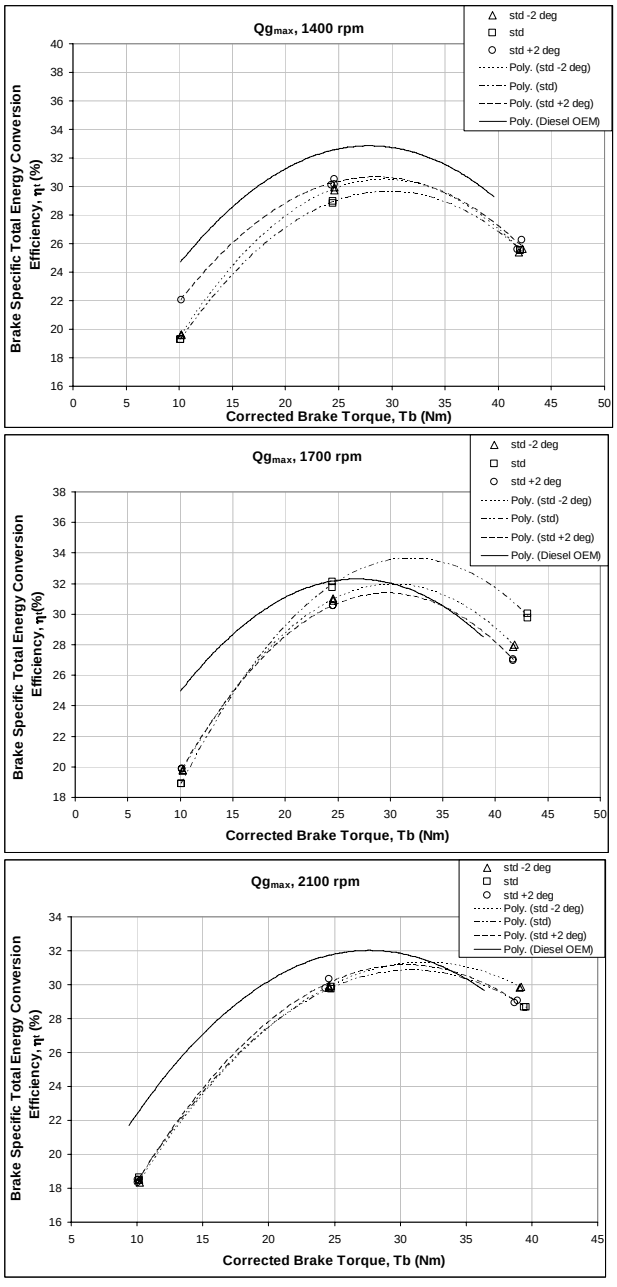


รูปที่ 7 ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรก (η_t) ที่อัตราการไหลของก๊าซหุงต้มปานกลาง ที่ภาระและความเร็วรอบต่างๆ

3.2.3 อิทธิพลของ injection timing ที่ Q_{max} ($2.25 \leq Q_{max} \leq 2.50$ lit/min) ต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรก (η_t)

จากรูปที่ 8 ที่ 1400 rpm พบว่าตลอดค่าภาระที่ทำการทดสอบเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกต่ำกว่าเครื่องยนต์ดีเซลปกติ และที่ภาระต่ำพบว่าเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ที่ฉีดจังหวะล่วงหน้าให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงกว่าเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ที่

ฉีดน้ำมันดีเซลที่จังหวะล่าช้าและจังหวะมาตรฐาน ที่ภาระปานกลาง พบว่าจังหวะล่วงหน้ายังคงให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงกว่าที่จังหวะล่าช้าและจังหวะมาตรฐาน ที่ภาระสูงถึงสูงสุด พบว่าเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ที่ฉีดในจังหวะล่วงหน้ายังคงให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงกว่าที่จังหวะล่าช้าและจังหวะมาตรฐาน และพบว่าการฉีดในจังหวะล่าช้าให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงขึ้นที่ภาระสูงและมีค่าใกล้เคียงกับกรณีเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ที่ฉีดในจังหวะล่วงหน้า และเมื่อทำงานที่ภาระสูงสุดพบว่าทั้งสามจังหวะการฉีดน้ำมันดีเซลให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกใกล้เคียงกัน



รูปที่ 8 ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรก (η_t)ที่อัตราการไหลของก๊าซหุงต้มสูงสุด ที่ภาระและรอบต่างๆ

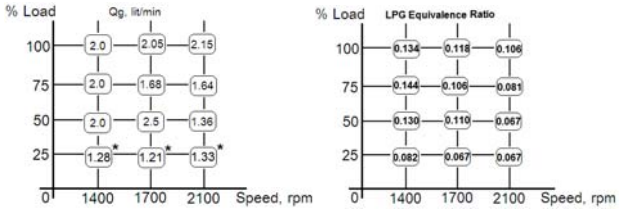
จากรูปที่ 8 ที่ 1700 rpm ที่ภาระต่ำ พบว่าเครื่องยนต์ดีเซลปกติให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงกว่าเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ทุกจังหวะการฉีดที่ทำการทดสอบ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่พบว่าได้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกใกล้เคียงกันโดยที่การฉีดที่จังหวะมาตรฐานให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกต่ำกว่าการฉีดที่จังหวะล่าช้าและล่วงหน้า และพบว่าทุกจังหวะการฉีดของเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกใกล้เคียงกันเมื่อเข้าสู่ภาระปานกลาง โดยที่ภาระปานกลางเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ที่ฉีดน้ำมันดีเซลในจังหวะมาตรฐานให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงกว่ากรณีอื่นๆ ที่ภาระสูงถึงภาระสูงสุดพบว่าเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ทุกจังหวะการฉีดให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงกว่าเครื่องยนต์ดีเซลปกติ โดยที่การฉีดจังหวะมาตรฐานให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงที่สุด ตามด้วยจังหวะล่าช้าและจังหวะล่วงหน้าตามลำดับ

จากรูปที่ 8 ที่ 2100 rpm พบว่าทุกจังหวะการฉีดที่ภาระต่ำและที่ภาระปานกลางของเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกต่ำกว่าเครื่องยนต์ดีเซลปกติชัดเจน โดยที่ภาระต่ำไม่พบผลต่างระหว่างค่าการฉีดในเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ ส่วนที่ภาระปานกลางพบว่าการฉีดจังหวะล่วงหน้าให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงกว่าจังหวะอื่นเล็กน้อย ที่ภาระสูงถึงภาระสูงสุดพบว่า เครื่องยนต์ดีเซลระบบเชื้อเพลิงคู่ให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงกว่าเครื่องยนต์ดีเซลปกติ โดยพบว่าเครื่องยนต์ดีเซลระบบเชื้อเพลิงคู่ที่ฉีดน้ำมันดีเซลในจังหวะล่าช้าให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงที่สุด ส่วนจังหวะการฉีดน้ำมันดีเซลจังหวะมาตรฐานและล่วงหน้าให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกใกล้เคียงกัน

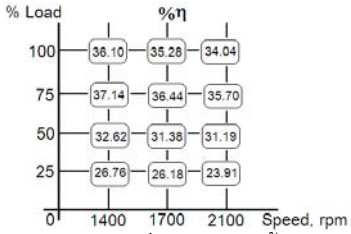
4.สรุปผลการทดลอง

4.1 อิทธิพลของปริมาณก๊าซหุงต้มและอัตราส่วนสมมูลของก๊าซหุงต้มต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์

จากการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลของก๊าซหุงต้ม นั้น สามารถสรุป ได้ว่าการใช้งานเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ที่ภาระต่ำนั้นได้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานจำเพาะเบรกต่ำกว่าเครื่องยนต์ดีเซลปกติชัดเจน โดยเฉพาะที่ความเร็วรอบต่ำ และเมื่ออัตราส่วนสมมูลของก๊าซหุงต้มหนามากขึ้นพบว่าไม่สามารถเพิ่มค่าประสิทธิภาพให้เครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ได้ ส่วนที่ภาระปานกลางมีแนวโน้มคล้ายกับที่ภาระต่ำแต่ความต่างของค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานจำเพาะเบรกระหว่างเครื่องยนต์ดีเซลปกติและเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ลดลง สำหรับที่ภาระสูงและภาระสูงสุดพบว่าการใช้งานเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกใกล้เคียงหรือดีกว่าเครื่องยนต์ดีเซลปกติ การเพิ่มอัตราส่วนสมมูลของก๊าซหุงต้มที่ภาระสูงและสูงสุดนี้สามารถเพิ่มค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกได้เล็กน้อย แต่ไม่สามารถป้อนก๊าซหุงต้มได้มากเท่ากับที่ใช้ที่ภาระต่ำและปานกลาง เนื่องจากพบว่าเกิดการน็อกเสียก่อน ดังแสดงในรูปที่ 9 และ 10



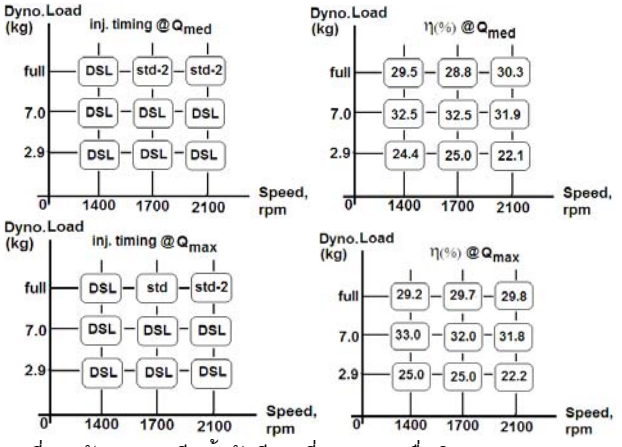
รูปที่ 9 ปริมาณก๊าซหุงต้ม, อัตราส่วนสมมูลของก๊าซหุงต้มที่เหมาะสม ณ จุดทำงานต่างๆ ที่ให้ค่าประสิทธิภาพสูงที่สุด



รูปที่ 10 ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกสูงสุดจากรูปที่ 9

เมื่อพิจารณาค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงสุดพบว่าการใช้งานเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ที่ภาระ 75% ของภาระสูงสุดที่รอบ 1400 rpm ให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงที่สุด เท่ากับ 37.14% ซึ่งเป็นจุดเดียวกันกับจุดที่ให้ค่าต้นทุนพลังงานจำเพาะเบรกสูงสุด และการใช้งานเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ที่ภาระต่ำที่ทุกความเร็วรอบที่ทดสอบพบว่าให้ค่าประสิทธิภาพต่ำกว่าเครื่องยนต์ดีเซลปกติ

4.2 อิทธิพลของจังหวะการฉีดน้ำมันดีเซลต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์



รูปที่ 11 จังหวะการฉีดน้ำมันดีเซลที่เหมาะสมเมื่อพิจารณาจากค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกที่สูงที่สุด

การใช้งานเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ที่ภาระต่ำและที่ภาระปานกลางยังคงให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกต่ำกว่าเครื่องยนต์ดีเซลปกติแม้จะได้เปลี่ยนจังหวะการฉีดน้ำมันดีเซลเป็นล่วงหน้าและล่าช้าแล้ว ส่วนที่ภาระสูงสุดพบว่าเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ให้ค่าแรงบิดเบรกสูงสุดสูงกว่าเครื่องยนต์ดีเซลปกติและให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะสูงกว่าเครื่องยนต์ดีเซลปกติโดยแต่ละจุดทดสอบมีจังหวะฉีดน้ำมันดีเซลที่เหมาะสมแตกต่างกันไป ดังแสดงในรูปที่ 11

4.3 ข้อดีของการใช้งานเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ที่ใช้ก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิง

ก) เครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงกว่าเครื่องยนต์ดีเซลปกติเมื่อทำงานที่ภาระสูงสุดที่เท่ากับเครื่องยนต์ดีเซล และเมื่อทำงานที่ภาระสูงสุดโดยไม่ควบคุมภาระจะพบว่าเครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ให้ค่าแรงบิดเบรกสูงกว่าเครื่องยนต์ดีเซลปกติ

ข) เครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงที่สุดที่ค่าภาระ 75% ของทุกรอบการทำงานที่ทดสอบและพบว่ายังให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมจำเพาะเบรกสูงกว่า เครื่องยนต์ดีเซลปกติ

ค) เครื่องยนต์ระบบเชื้อเพลิงคู่ช่วยลดการใช้น้ำมันดีเซลได้ โดยเฉพาะที่ภาระต่ำสามารถป้อนปริมาณก๊าซหุงต้มได้ในสัดส่วนที่มากกว่าที่ภาระอื่นๆ

เอกสารอ้างอิง

[1] Liu, Z., and G. A. Karim. . A Predictive Model for the Combustion Process in Dual Fuel Engines. SAE paper No. 952435.

[2] Jian, Dong., Xiaohong, Gao., Gesheng, Li., and Xintang, Zhang. Study on Diesel-LPG Dual Fuel Engines. SAE paper No. 2001-01-3679.

[3] Poonia, M. P., Ramesh, A., and Gaur, R. Effect of Intake Air Temperature and Pilot Fuel Quantity on the Combustion Characteristics of a LPG Diesel Dual Fuel Engine. SAE paper No.982455.

[4] Ghazi, .A. Karim. An Examination of Some Measures for Improving the Performance of Gas Fuelled Diesel Engines at Light Load. SAE paper No. 912366, combustion characteristics of LPG fuel. Fuel 84(2005) 1116-1127.

[5] Ogawa, Hideyuki., Miyamoto, Noboru., Li, Chenyu., Nakazawa, Satoshi., and Akao, Keiichi. Low Emission and Knock-Free Combustion with Rich and Lean Biform Mixture in a Dual-Fuel CI Engine with Induced LPG as the Main Fuel. SAE paper No.2001-01-3502.

[6] บริษัท สยามคูโบต้าอุตสาหกรรม จำกัด. คู่มือช่างเครื่องยนต์ดีเซลคูโบต้า รุ่น อาร์ที.

[7] เยาวลักษณ์ ถมปัทม์, อิทธิพลของตัวแปรการทำงานต่อพฤติกรรมของเครื่องยนต์ดีเซลระบบเชื้อเพลิงคู่ที่ใช้ก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิง, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.