

## การควบคุมรอบเดินเบาเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมที่ใช้ก๊าซธรรมชาติ ด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี่

### Idle Speed Control of Dual Fuel Diesel Engine with Natural Gas using Fuzzy Controller

กิตติพงษ์ เยาวจา<sup>1\*</sup> และ วิจิต ฉัตรรัตนกุลชัย<sup>2</sup>

Kittipong Yaovaja<sup>1\*</sup> and Withit Chatlatanagulchai<sup>2</sup>

#### บทคัดย่อ

เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมที่ใช้ก๊าซธรรมชาติ เป็นเครื่องยนต์ดีเซลที่ถูกดัดแปลงให้สามารถใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงทดแทนเชื้อเพลิงดีเซลเดิม เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมนั้นไม่ได้ถูกดัดแปลงกลไกของเครื่องยนต์ทำให้เครื่องยนต์ยังคงมีกำลังอัดสูง ซึ่งมีความทนทานและมีประสิทธิภาพเครื่องยนต์สูง แต่จะใช้ระบบควบคุมที่มีซับซ้อนเพียงพอเพื่อควบคุมการทำงานของเครื่องยนต์อย่างเหมาะสม โดยระบบควบคุมเครื่องยนต์นั้นมีหลายประเภทซึ่งประสิทธิภาพแตกต่างกันออกไป เนื่องจากการทำงานที่แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้ใช้ชุดควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถควบคุมได้ทั้งการทำงานของหัวฉีดดีเซลทั้ง 4 หัวฉีด และหัวฉีดก๊าซธรรมชาติอีก 4 หัวฉีด ทำให้สามารถควบคุมเครื่องยนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมที่ใช้ทดลองดัดแปลงมาจากเครื่องยนต์ดีเซลโตโยต้า รหัส 2KD-FTV (VNT) แบบ 4 สูบ ขนาดความจุ 2.5 ลิตร โดยในงานวิจัยนี้ทำการทดลองการควบคุมรอบเดินเบาของเครื่องยนต์ดังกล่าวโดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ เพื่อปรับระยะเวลาการเปิดของหัวฉีดดีเซล ซึ่งสามารถควบคุมรอบเดินเบาของเครื่องยนต์ได้เป็นอย่างดี

#### ABSTRACT

Dual Fuel Diesel engine with natural gas is a modified Diesel engine in order to replace the conventional Diesel fuel with the alternative fuel. Because the mechanical system of the engine is not modified and the engine still has high compression ratio, the engine robustness and the engine efficiency are high. On the other hand, the engine needs a sophisticated controller that generates appropriate control command. There is a numerous of the controller which gives difference performance due to variation in operating method. In this research, electronic control unit was applied to control both four Diesel injectors and four gas injectors which gave worthy control performance. The test engine was modified from a 2KD-FTV Toyota Diesel engine; 2.5 liters four-cylinder engine. This paper shows the experimental results of idle speed control by using a fuzzy controller. The proposed controller adjusted the Diesel injection duration and showed excellent control performance.

Key words: Diesel-Dual-Fuel Engine, Idle Speed Control, Fuzzy Controller

Corresponding author; e-mail address: Kittipong@eng.src.ku.ac.th

<sup>1</sup>คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ชลบุรี 20230

<sup>1</sup>Faculty of Engineering at Si Racha, Kasetsart University Sriracha campus, Chonburi, 20230

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

<sup>2</sup>Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, 10900

## คำนำ

เครื่องยนต์ดีเซลเป็นเครื่องยนต์ที่มีประสิทธิภาพสูง และมีความทนทานสูง เครื่องยนต์นี้จึงได้รับความนิยมในการนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์อย่างมาก ซึ่งทำให้มีความต้องการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงสูงมากเช่นกัน ประเทศไทยนั้นต้องนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศมหาศาล โดยในปี พ.ศ. 2556 นั้นมีมูลค่า 1.07 ล้านล้านบาทต่อปี โดยน้ำมันสำเร็จรูปที่ประเทศไทยใช้มีมูลค่า 1.33 ล้านบาทนั้นถูกนำมาใช้ในภาคขนส่งประมาณครึ่งหนึ่ง และน้ำมันดีเซลถูกนำมาใช้ในภาคขนส่งเท่ากับร้อยละ 40.21 ของเชื้อเพลิงทั้งหมด (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556) ซึ่งเป็นจำนวนเงินมหาศาลที่สูญเสียไป

การทดแทนการนำเข้าเชื้อเพลิงดีเซลซึ่งมีราคาเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างไม่แน่นอนด้วยการใช้ก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas) ที่สามารถขุดได้จากในประเทศไทยจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจ โดยก๊าซธรรมชาติที่ถูกขุดขึ้นมาจากในประเทศไทยมีส่วนประกอบหลักคือ ก๊าซมีเทนประมาณร้อยละ 75 ก๊าซอีเทนประมาณร้อยละ 6 และมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณร้อยละ 13 ซึ่งมีค่าความร้อนเฉลี่ย 34.17 MJ/Kg ซึ่งแม้มีค่าความร้อนน้อยกว่าน้ำมันดีเซลที่ค่าความร้อนเฉลี่ย 42.8 MJ/Kg แต่เนื่องจากราคาก๊าซธรรมชาติในประเทศที่ต่ำทำให้ราคาเชื้อเพลิงต่ำกว่าถึงสามเท่า

ยานยนต์ที่ใช้ก๊าซธรรมชาติจะถูกติดตั้งระบบก๊าซธรรมชาติอัด (Compressed Natural Gas, CNG) หรือบางครั้งเรียกว่าก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์ (Natural Gas for Vehicle, NGV) ก๊าซธรรมชาตินั้นจะถูกอัดให้มีแรงดันสูงที่ประมาณ 200 บาร์ (200 เท่าของบรรยากาศ) และบรรจุภายในถังเหล็กหรือวัสดุใยแก้วผสมหรือเส้นใยคาร์บอน ก๊าซธรรมชาติจะถูกนำไปใช้โดยผ่านระบบลดแรงดัน (Pressure Regulator) หรือบางครั้งนิยมเรียกว่าหม้อต้ม เพื่อลดแรงดันให้ต่ำลงก่อนที่จะเข้าสู่เครื่องยนต์

หากจำแนกประเภทของเครื่องยนต์ดีเซลที่ดัดแปลงให้สามารถใช้ก๊าซธรรมชาติได้นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงอย่างเดียว และประเภทที่น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซธรรมชาติ กรณีแรกเรียกว่า Dedicated Engine เครื่องยนต์จะถูกดัดแปลงให้กำลังอัดของเครื่องยนต์ต่ำลงให้เหมาะสมกับการใช้ก๊าซธรรมชาติ และเปลี่ยนไปใช้ระบบหัวเทียนจุดระเบิด ผลที่ตามมาคือเครื่องยนต์มีประสิทธิภาพต่ำ ความทนทานของกระบอกสูบต่ำ และค่าใช้จ่ายในการดัดแปลงสูง ในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอเครื่องยนต์ประเภทหลังคือ เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม (Diesel-Dual-Fuel Engine, DDF) ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการดัดแปลงต่ำกว่า เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพและความทนทานสูง

เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม ส่วนใหญ่มีหลักการทำงานคือใช้กลไกของเครื่องยนต์ดีเซลเดิมทั้งหมด ซึ่งมีอาศัยการอัดของกระบอกสูบของเครื่องยนต์ในการเผาไหม้ (Compression Ignition, CI) ซึ่งเครื่องยนต์ดีเซลปัจจุบันนิยมใช้การจ่ายเชื้อเพลิงแบบฉีดตรง (Direct Injection) คือมีหัวฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงที่สามารถฉีดน้ำมันดีเซลด้วยแรงดันสูงเข้าไปภายในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ได้โดยตรง โดยเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมจะถูกติดตั้งระบบจ่ายก๊าซธรรมชาติที่มีแรงดันประมาณ 3 บาร์ เพื่อให้ก๊าซนั้นผสมกับอากาศก่อนที่จะไหลเข้าไปในกระบอกสูบของเครื่องยนต์

ความแตกต่างของระบบเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมส่วนหนึ่งอยู่ที่ระบบควบคุมเครื่องยนต์ โดยส่วนใหญ่แล้วนิยมใช้ระบบควบคุมก๊าซธรรมชาติเพียงอย่างเดียว และยังคงใช้ระบบควบคุมเครื่องยนต์เดิมของรถยนต์ที่มาจากโรงงานผลิต ดังนั้นเครื่องยนต์จึงไม่สามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งทำให้เกิดปัญหาต่าง ๆ นานา เช่น

การใช้อัตราส่วนก๊าซธรรมชาติต่ำซึ่งส่งผลต่อความประหยัด เครื่องยนต์มีประสิทธิผลต่ำเนื่องจากเครื่องยนต์มีโอกาสเกิดการเสียหาย เช่น เครื่องยนต์เกิดการน็อก (Engine Knock) รวมทั้งปัญหาที่เครื่องยนต์ทำงานได้ไม่ราบเรียบ โดยปัญหาต่างๆ มีสาเหตุมาจากระบบควบคุมทำงานได้ไม่มีประสิทธิภาพที่ดีพอ

ในความเป็นจริงแล้วการเผาไหม้ภายในเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมมีหลากหลายรูปแบบมาก โดยเมื่อใช้ปริมาณก๊าซธรรมชาติน้อยหรือจังหวะการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลที่บริเวณใกล้จุดศูนย์ตายบนของเครื่องยนต์ การเผาไหม้ของเครื่องยนต์นั้นอาจจะมีลักษณะคล้ายการเผาไหม้แบบดีเซล (Conventional Diesel Combustion) แต่จะมีประสิทธิภาพลดลงเล็กน้อยเนื่องจากจะมีระยะเวลาการเผาไหม้นานมากยิ่งขึ้น และทำให้ความร้อนสะสมในเครื่องยนต์ได้มากขึ้น ส่งผลให้ระบบระบายความร้อนเครื่องยนต์ต้องทำงานสูงขึ้น หรือเครื่องยนต์อาจจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นได้ ในกรณีนี้หากเครื่องยนต์ทำงานอยู่ที่ภาระต่ำ การปรับจังหวะการฉีดน้ำมันดีเซลล่วงหน้าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพและลดมลพิษได้ (Abd Alla *et al.*, 2002) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Papagiannakis *et al.* (2007) ที่ศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้แบบสองโซนในเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมด้วยการฉีดน้ำมันแบบนําร่อง ซึ่งพบว่า การเผาไหม้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ความดันในระบบสูบและมลพิษต่ำลง

หากก๊าซธรรมชาติผสมกับอากาศคลุกเคล้าอย่างดี การเผาไหม้นั้นจะมีระยะเวลาการเผาไหม้ที่รวดเร็ว (Lee *et al.*, 2003) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kusaka and Okamoto (2000) ที่แสดงผลการจำลองด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD) พบว่าการเผาไหม้นั้นจะมีอุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำ และอุณหภูมิไอเสียต่ำ เครื่องยนต์จึงมีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากการสูญเสียความร้อนต่ำกว่าเครื่องยนต์ดีเซล นอกจากนี้จากการวิจัยด้านการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมพบว่า การเผาไหม้มีความซับซ้อน และต้องอาศัยระบบควบคุมที่ดีเพื่อให้เครื่องยนต์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การทำงานของเครื่องยนต์นั้นมีหลายสถานะ ได้แก่ การเร่งความเร็ว การลดความเร็ว การรักษาความเร็วคงที่ และรอบเดินเบาเครื่องยนต์ จากการใช้งานในเมืองที่มีจราจรหนาแน่นพบว่าเครื่องยนต์จะทำงานที่สถานะรอบเดินเบาบ่อยมากหรือราวหนึ่งในสาม การควบคุมเครื่องยนต์ดังกล่าวเพื่อให้สามารถทำงานได้ดีที่รอบเดินเบา ร่วมกับก๊าซธรรมชาติได้พบได้น้อยมาก สาเหตุหนึ่งมาจากผู้วิจัยส่วนใหญ่ไม่สามารถออกแบบระบบควบคุมการฉีดน้ำมันดีเซลได้ เนื่องจากต้องควบคุมการฉีดน้ำมันดีเซลแต่ละสูบด้วยคำสั่ง (Pulse) ที่มีความเร็วสูง จำนวน 1 ถึง 3 ครั้งต่อรอบการทำงานของเครื่องยนต์ โดยแต่ละคำสั่งจะมีค่าความกว้างสัญญาณ (Pulse width) อยู่ระหว่าง 0.3 ถึง 1 มิลลิวินาที นอกจากนี้เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมมีความซับซ้อนสูง จึงเหมาะสำหรับระบบควบคุมขั้นสูง

ทีมผู้วิจัยได้พัฒนาระบบควบคุมสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมหลากหลายรูปแบบ ซึ่งสามารถพัฒนาระบบควบคุมที่สามารถทำงานร่วมกับระบบเครื่องยนต์เดิมได้ โดยผู้วิจัยได้พัฒนาระบบควบคุมต่างๆ ของเครื่องยนต์ดังกล่าว ได้แก่ ระบบทางเดินอากาศของเครื่องยนต์ (Chatlatanagulchai *et al.*, 2010) ระบบป้องกันการน็อกของเครื่องยนต์ (Yaovaja and Chatlatanagulchai, 2014) และระบบแรงดันน้ำมันเครื่องยนต์ (Chatlatanagulchai *et al.*, 2015) เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอระบบควบคุมแบบฟัซซี่ที่สามารถควบคุมรอบเดินเบาได้อย่างดี ซึ่งควบคุมแบบฟัซซี่ถูกนำมาแทนตัวควบคุมทั่วไปแบบพีไอดีเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมรอบเครื่องยนต์ดีเซลขนาดใหญ่และเครื่องยนต์เรือเดินทะเลเพื่อลดความไม่แน่นอนจากสิ่งรบกวนภายนอก (Lynch, 2005; Farouk, 2012; Di *et al.*, 2015)

## อุปกรณ์และวิธีการ

### เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมที่ใช้ก๊าซธรรมชาติ

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องยนต์ดีเซลโตโยต้า รหัส 2KD-FTV (VNT) แบบ 4 สูบ ขนาดความจุ 2.5 ลิตร ซึ่งมีกำลังงานสูงสุด 106 kW ที่ 3,600 รอบต่อนาที มีแรงบิดสูงสุด 343 Nm ที่ 2,400 รอบต่อนาที อัตราส่วนกำลังอัดเครื่องยนต์ 17.4:1 โดยได้ถูกดัดแปลงเป็นเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมแล้ว (Figure 1, Left) ซึ่งเครื่องยนต์อยู่ในรถพิกัดโตโยต้ารุ่น Hilux Vigo Champ ที่ได้ติดตั้งระบบก๊าซธรรมชาติแล้ว (Figure 1, Right) ขณะทดลองอาศัยคนขับหนึ่งคน โดยระบบเชื้อเพลิงเครื่องยนต์จะถูกควบคุมด้วยระบบที่ได้ออกแบบไว้



Figure 1 (Left) Toyota 2KD-FTV (VNT), (Right) Toyota Hilux Vigo Champ

แผนภาพของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม (Figure 2) แสดงให้เห็นอุปกรณ์ต่างๆของเครื่องยนต์ประกอบด้วยระบบทางเดินอากาศและระบบทางเดินน้ำมันเชื้อเพลิง โดยหัวฉีดก๊าซธรรมชาติจะถูกติดตั้งไว้ที่บริเวณหน้าวาล์วไอดีของแต่ละสูบ จำนวน 4 หัวฉีด โดยก๊าซธรรมชาติจะถูกจ่ายสัมพันธ์กับจังหวะการดูดอากาศของแต่ละกระบอกสูบ เพื่อให้ก๊าซไหลเข้าไปยังเครื่องยนต์ได้อย่างแม่นยำ

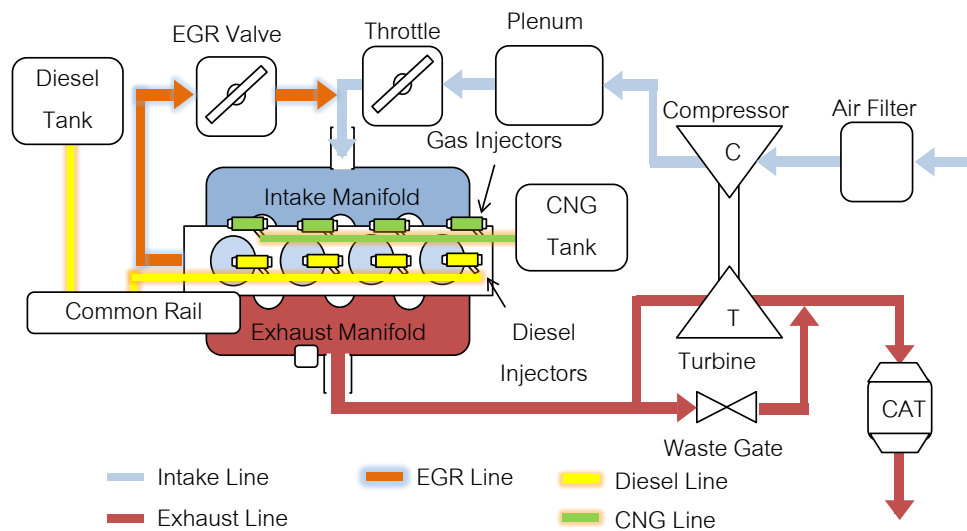


Figure 2 Schematic of air-path system and fuel-path system in the DDF engine

### ชุดควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์

งานวิจัยนี้ใช้ชุดควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Control Unit, ECU) สำหรับควบคุมเครื่องยนต์ที่สามารถเขียนโปรแกรมได้โดยใช้ Engine Control Module (ECM) (Figure 3, Left) ซึ่งทีมผู้วิจัยได้พัฒนาชุดควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Figure 3, Right) เพื่อให้สามารถทำงานร่วมกับระบบควบคุมเดิมของเครื่องยนต์ได้ ชุดควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์นี้ทำหน้าที่ควบคุมสัญญาณสั่งงานของระบบเชื้อเพลิง ได้แก่ คำสั่งการฉีดของน้ำมันดีเซลทั้ง 4 หัวฉีด และคำสั่งการจ่ายก๊าซธรรมชาติทั้ง 4 หัวฉีด

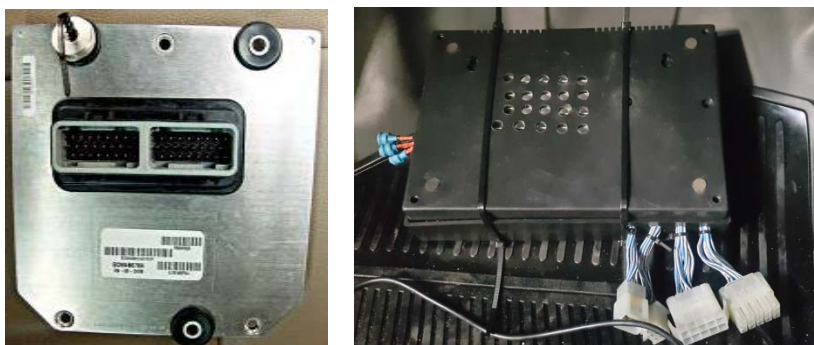


Figure 3 (Left) Engine Control Module (ECM), (Right) DDF Engine Electronic Control Unit (ECU)

### ระบบควบคุมรอบเดินเบาเครื่องยนต์แบบฟัซซี่

การออกแบบระบบควบคุมรอบเดินเบาสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมนั้น (Figure 4) จะมีสัญญาณอ้างอิง (Set-point) เป็นค่าความเร็วรอบเดินเบาเครื่องยนต์ที่หน่วยรอบต่อนาที (RPM) ส่วนสัญญาณป้อนกลับนั้นเป็นความเร็วรอบเครื่องยนต์ (Engine Speed) ซึ่งอ่านค่าได้จากสัญญาณจากเซนเซอร์ประเภทแม่เหล็กเหนี่ยวนำ ที่ติดตั้งไว้สองจุดคือ ที่เพลาลูกเบี้ยว (Crank Shaft) และที่เพลาลูกเบี้ยว (Cam Shaft) เมื่อนำสัญญาณอ้างอิงมาลบค่าที่อ่านได้จะได้ค่าผิดพลาด (Error) ที่ใช้ในการควบคุมรอบเดินเบา โดยสัญญาณขาเข้าของตัวควบคุมแบบฟัซซี่คือ ค่าผิดพลาด ค่าปฏิยานุพันธ์ค่าผิดพลาด

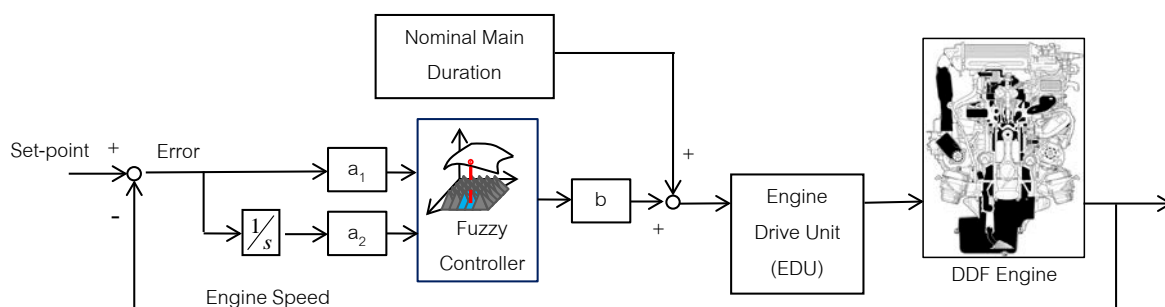


Figure 4 Idle Speed Control of DDF Engine by using Fuzzy Controller

จุดเด่นของการออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซี่คือ ตัวควบคุมสามารถสร้างกฎการควบคุมให้สอดคล้องกับแนวคิดของมนุษย์ได้ดี ซึ่งแตกต่างกับระบบควบคุมขั้นสูงส่วนใหญ่ที่อาศัยสมการทางคณิตศาสตร์เพียงอย่างเดียว เช่น เมื่อพิจารณาปัญหาในการควบคุมรอบเดินเบาของเครื่องยนต์นี้ กรณีที่ระบบควบคุมมีค่าเกนน้อย การควบคุมรอบเดินเบาอาจจะช้าทำให้เครื่องยนต์ดับได้ แต่ที่สภาวะคงที่และสิ่งรบกวนน้อยรอบเครื่องยนต์จะนิ่ง แต่กลับกันในกรณีที่ระบบควบคุมมีค่าเกนมาก การควบคุมรอบเดินเบาจะทำได้เร็วเพราะเครื่องยนต์ตอบสนองไว

แต่ที่สภาวะคงที่รอบเครื่องยนต์จะแกว่ง ดังนั้นแนวคิดในการออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีคือการปรับเกนของตัวควบคุมที่ช่วงค่าผิดพลาดทำให้มีค่าเกนต่ำ (เพื่อควบคุมที่สภาวะคงที่) ส่วนเมื่อมีค่าผิดพลาดสูงให้ตัวควบคุมมีค่าเกนมาก (เพื่อควบคุมให้เครื่องยนต์ตอบสนองไว) ซึ่งตัวควบคุมแบบฟัซซีที่ได้ออกแบบนี้นั้นจะมีคุณสมบัติดังกล่าวโดยสามารถพิจารณาได้จากความชันของกราฟพื้นผิวควบคุม (Control Surface) (Figure 5, Right)

ตัวควบคุมแบบฟัซซีที่มีตัวเกนสเกลค่า (Scaling Gain) ในการแปลงสัญญาณเข้าทั้งสองตัว ให้อยู่ในช่วง -1 ถึง 1 ก่อนที่จะเข้ากระบวนการต่อไป เนื่องจากตัวควบคุมแบบฟัซซีนี้เป็นลักษณะเซตวิภันนัยปกติ โดยมีค่าเอกภพของสรรพสาระอยู่ในช่วง -1 ถึง 1 ตัว การออกแบบค่าสัมประสิทธิ์นั้นต้องออกแบบให้เหมาะสมกับช่วงสัญญาณขาเข้าและสัญญาณขาออก โดยออกแบบได้ดังนี้  $a_1 = 0.003$  ,  $a_2 = 0.07$  และ  $b = 1$  การกำหนดค่าระดับขั้นของความเป็นสมาชิก (Degree of Membership) ของใช้ฟังก์ชันภาวะสมาชิกแบบสามเหลี่ยม (Triangular Membership Function) โดยฟังก์ชันภาวะสมาชิกของสัญญาณเข้า “Error” (Figure 5, Left) และ “Integrated Error” (Figure 5, Center) มีชื่อฟังก์ชันภาวะได้แก่ “-2”, “-1”, “0”, “1” และ “2” เรียงลำดับจากค่าต่ำไปสูง ส่วนฟังก์ชันภาวะสมาชิกของสัญญาณออกมีจำนวน 5 ค่า ซึ่งเป็นค่าคงที่ได้แก่ -1, -0.1, 0, 0.1 และ 1 ตามลำดับ

ประพจน์วิภันนัยประกอบข้อตั้งเป็นการเชื่อมโยงประพจน์ครบหน่วยด้วยอินเตอร์เซกชันวิภันนัยพื้นฐานแบบค่าต่ำสุด (Minimum) และตัวแปลงกลับวิภันนัย (Defuzzification) แบบค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (Weighted Average) กฎการควบคุมของตัวควบคุมแบบฟัซซีนั้นเป็นแบบสมมาตร และสร้างพื้นผิวควบคุมของคำสั่งหัวฉีดดีเซลได้ “Pulse Duration” (Figure 5, Right) โดยเมื่อได้ค่าคำสั่งออกมาแล้วจะนำไปรวมกับค่าการฉีดดีเซลปกติ (Nominal Main Duration) และส่งคำสั่งไปยังระบบขับหัวฉีด หรือ Electronic Drive Unit (EDU) ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณคำสั่งไฟฟ้าแรงดันต่ำเป็นกระแสไฟฟ้าแรงดันสูงเพื่อควบคุมการยกของหัวฉีดดีเซล

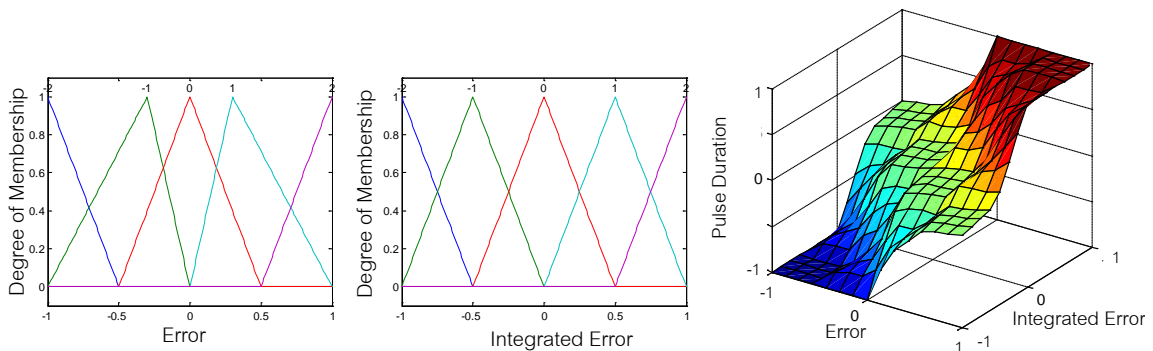


Figure 5 (Left) Membership Function of “Error” input, (Center) Membership Function of “Integrated Error” input, (Right) Control Surface of Fuzzy Controller

### ผลและวิจารณ์การทดลอง

การควบคุมรอบเดินเบาของเครื่องยนต์นี้จะควบคุมด้วยฉีดน้ำมันดีเซลเพียงครั้งเดียวต่อรอบการทำงาน เรียกว่า ฉีดน้ำมันดีเซลหลัก (Main Injection) โดยที่จังหวะการเริ่มต้นการฉีดน้ำมันดีเซล (Main SOI) นั้นจะถูกควบคุมไว้ที่ค่าคงที่ คือ ตำแหน่ง 6 องศาหลังจุดศูนย์ตายบน เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่การเผาไหม้ของเครื่องยนต์ไม่รุนแรง ระบบควบคุมนี้จะควบคุมระยะเวลาการยกของหัวฉีดดีเซลจากความกว้างสัญญาณ (Pulse Width) ซึ่งปกติจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.3 ถึง 1 มิลลิวินาที (Figure 6, Right) โดยประกอบด้วยค่าการฉีดดีเซลปกติ

(Nominal Main Duration) มีค่าคงที่เท่ากับ 0.5 มิลลิวินาที และถูกรวมกับค่าที่มาจากตัวควบคุมแบบฟัซซี่เพื่อควบคุมรอบเดินเบา ในขณะที่จะควบคุมปริมาณการจ่ายก๊าซธรรมชาติที่แรงดันประมาณ 3 บาร์ ด้วยการกำหนดคำสั่งของแต่ละหัวฉีดไว้คงที่ที่ 5 มิลลิวินาที โดยกำหนดจังหวะการจ่ายก๊าซธรรมชาติสิ้นสุด (Gas EOI) ไว้ที่ 240 องศา ก่อนจุดศูนย์ตายบนของแต่ละกระบอกสูบเสมอ (เครื่องยนต์นี้มีจังหวะปิดวาล์วไอดี IVC ที่ 149 องศา ก่อนจุดศูนย์ตายบน) โดยจังหวะการจุดระเบิดจะเกิดขึ้นหลังจากฉีดน้ำมันดีเซลหลักเล็กน้อย

การใช้ก๊าซธรรมชาติในเครื่องยนต์นี้ จะต้องการปริมาณอากาศต่ำกว่าการเผาไหม้แบบดีเซลปกติ โดยการฉีดก๊าซธรรมชาตินั้นจะเป็นการแทนที่อากาศทำให้ปริมาณอากาศลดลงส่วนหนึ่งแล้ว อุณหภูมิอากาศที่ต่ำลงเล็กน้อยมีผลให้อากาศมีความหนาแน่นขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ตามระบบทางเดินอากาศนั้นสามารถใช้ระบบควบคุมเดิมของเครื่องยนต์ได้ดี ซึ่งจะทำให้การหรืออากาศบางส่วนโดยจะควบคุมลิ้นปีกผีเสื้อ (Throttle) และควบคุมลิ้นไอเสียหมุนวน (EGR Valve) ที่ตำแหน่งคงที่ คือ 30 องศา และ 0 องศาตามลำดับ

การทดลองการควบคุมรอบเดินเบาเครื่องยนต์นั้น จะทำการทดลองกับรถพิกอัพโตโยต้า Hilux Vigo Champ โดยกำหนดค่าอ้างอิงของรอบเดินเบาที่ 750 รอบต่อนาที (Figure 6, Left) การทดลองเริ่มต้นจากตำแหน่งเกียร์ว่างที่เวลาประมาณ 0 วินาที โดยทำการเหยียบคลัทช์เพื่อเข้าเกียร์ 1 จากนั้นเมื่อเวลาประมาณ 2 วินาที ทำการปล่อยคลัทช์ โดยไม่เหยียบคันเร่ง เพื่อให้ระบบควบคุมรอบเดินเบาทำงาน โดยในช่วงเวลาประมาณ 2 วินาที หลังจากนั้นรอบเครื่องยนต์จะตกลงไปต่ำสุด ประมาณ 640 รอบต่อนาที หลังจากนั้นอีกประมาณ 1.5 วินาที ระบบควบคุมแบบฟัซซี่นั้นจะสามารถควบคุมรอบเดินเบาของเครื่องยนต์ไว้ที่ค่าอ้างอิงได้ โดยมีสัญญาณควบคุมคือ ความกว้างสัญญาณการฉีดน้ำมันดีเซลหลัก (Main Diesel Pulse) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.45 ถึง 0.7 มิลลิวินาที (Figure 6, Right)

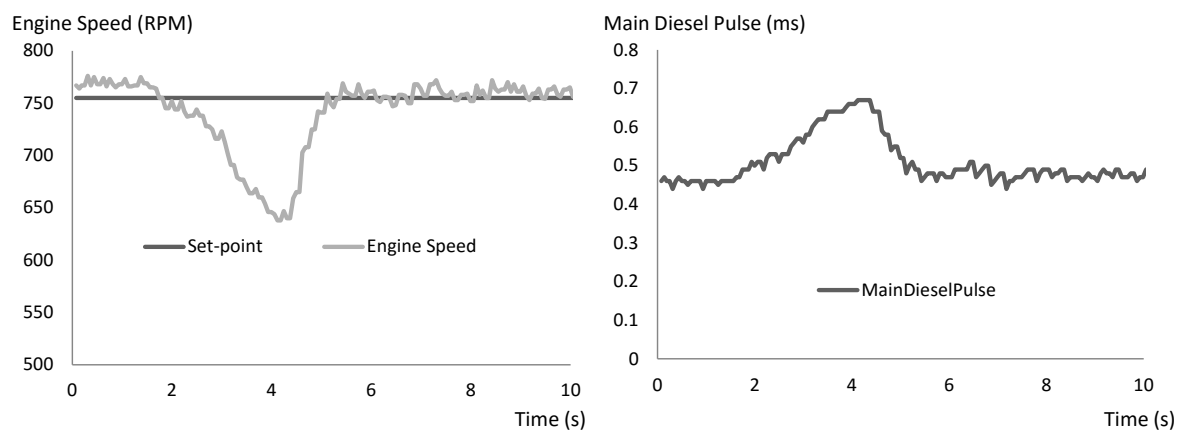


Figure 6 Experimental Results, (Left) Engine speed compare with its set-point, (Right) Output from the Fuzzy Controller, Main Diesel Pulse, to control DDF engine

## สรุป

ปัญหาของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมคือ เครื่องยนต์มีความซับซ้อนในการเผาไหม้สูงแต่ส่วนมากใช้ตัวควบคุมที่ไม่มีประสิทธิภาพ เช่น ไม่สามารถควบคุมการฉีดน้ำมันดีเซลได้ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงกระบวนการนำชุดควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์มาควบคุมเครื่องยนต์ดังกล่าว โดยพิจารณาที่สภาวะรอบเดินเบาซึ่ง

ถือว่าเป็นสถานะที่ใช้งานน้อยสำหรับการขับขี่ในเมือง โดยออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซี่เพื่อควบคุมรอบเดินเบาเครื่องยนต์ด้วยการปรับความกว้างสัญญาณการฉีดน้ำมันดีเซลหลัก ซึ่งตัวควบคุมแบบฟัซซี่สามารถจำลองตรรกะของมนุษย์จากการออกแบบกฎการควบคุมเพื่อให้เครื่องยนต์ทำงานได้อย่างเหมาะสม จากการทดลองกับรถพิกอัพโตโยต้า Hilux Vigo Champ ที่ใช้เครื่องยนต์ดังกล่าว โดยการทดลองเข้าเกียร์ให้รถเคลื่อนที่ไปด้านหน้าโดยไม่เหยียบคันเร่ง ระบบควบคุมรอบเดินเบาแบบฟัซซี่สามารถควบคุมรอบเครื่องยนต์จากที่ค่าต่ำสุดให้กลับมามากที่ ที่ค่าอ้างอิงได้ในเวลา 1.5 วินาที

### เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2556. **สถิติพลังงานของประเทศไทย**

๒๕๕๖. 62 หน้า

Abd Alla, G.H., H.A. Soliman, O.A. Badr and M.F. Abd Rabbo. 2002. Effect of ignition timing on performance of dual fuel engine. **Energy Conversion and Management** 43: 269-277.

Chatlattanagulchai W., K. Yaovaja, S. Rhiensayoon, and K. Wannatong. 2010. Air-fuel ratio regulation with optimum throttle opening in diesel-dual-fuel engine. **SAE Paper: 2010-01-1574**

\_\_\_\_\_, S. Damyot, D. Kijdech and K. Yaovaja. 2015. Fuzzy learning control of rail pressure in diesel-dual-fuel premixed-charge-compression-ignition engine. **Kasetsart Journal - Natural Science** 49 (2): 251-262.

Di, X., Y. Huang, Y. Ge, G. Li and M. Hu. 2015., Fuzzy-PID Speed Control of Diesel Engine Based on Load Estimation. **SAE Int. J. Engines** 8(4):1669-1677.

Farouk, N. 2012. Genetic Algorithm and Fuzzy Tuning PID Controller Applied on Speed Control System for Marine Diesel Engines. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology** 4(21): 4350-4357

Kusaka, J. and T. Okamoto. 2000. Combustion and exhaust gas emission characteristics of a diesel engine dual-fueled with natural gas. **Energy Conversion and Management** 43: 269-277.

Lee, C.S., K.H. Lee and D.S. Kim. 2003. Experimental and numerical study on the combustion characteristics of partially premixed charge compression ignition engine with dual fuel. **Fuel** 82 (2003): 553-560.

Lynch, C., H. Hagrais and V. Callaghan. 2005. Embedded Type-2 FLC for the Speed Control of Marine and Traction Diesel Engines **IEEE International Conference on Fuzzy Systems** pp. 347-353.

Papagiannakis, R.G., D.T. Hountalas and C.D. Rakopoulos. 2007. Theoretical study of the effects of pilot fuel quantity and its injection timing on the performance and emissions of a dual fuel diesel engine. **Energy Conversion and Management** 48 (2007): 2951-2961

Yaovaja, K., Chatlattanagulchai, W. 2014. Knock control in a diesel-dual-fuel premixed-charge-compression-ignition (DF-PCCI) engine using a fuzzy supervisory system. **Kasetsart Journal - Natural Science** 48 (1): 120-138.