

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยการปรับจูนแบบคลุ่มเครือ สำหรับควบคุมอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์แก๊สโซลีน

เอกณรงค์ ใจยงค์^{1*}
akenarong@rsu.ac.th^{1*}

^{1*} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต

Received	: 11-Oct-2019
Revised	: 23-Jan-2020
Accepted	: 11-Feb-2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ออกแบบตัวควบคุมสำหรับควบคุมอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์แก๊สโซลีน ตัวควบคุมที่นำเสนอเป็นตัวควบคุมพีซีลอจิกแบบพีไอดีที่สามารถปรับค่าเกนตัวควบคุมได้ โดยอินพุตของตัวควบคุมมีสองตัวคือค่าความคลาดเคลื่อน และค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อน เอาต์พุตของตัวควบคุมคือเกน K_p , K_i และ K_d กฎการควบคุมถูกสร้างจากเงื่อนไขทางภาษาจำนวน 25 กฎ งานวิจัยอาศัยแบบจำลองเครื่องยนต์และพารามิเตอร์เครื่องยนต์แก๊สโซลีนของ Crossley และ Cook ในการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB สมรรถนะของตัวควบคุมที่นำเสนอถูกเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีซีลอจิกแบบพีไอ ตัวควบคุมพีไอดี และตัวควบคุมพีไอ ผลการจำลองตัวควบคุมที่นำเสนอสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงได้เร็วที่สุดในเวลา 1.46 วินาทีโดยไม่พบค่าพุ่งเกิน และสามารถกำจัดการรบกวนจากการเบรคภายในเวลา 2.35 วินาที

คำสำคัญ: เครื่องยนต์แก๊สโซลีน ตัวควบคุมพีซีลอจิกแบบพีไอดี

Design of Fuzzy Tuned PID Controller for Speed Control of a Gasoline Engine

Akenarong Jaiyong^{1*}
akenarong@rsu.ac.th^{1*}

^{1*} Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, Rangsit University

Received	: 11-Oct-2019
Revised	: 23-Jan-2020
Accepted	: 11-Feb-2020

Abstract

The objective of this research was to design a controller for speed control of a gasoline engine. The proposed control scheme was a fuzzy PID controller with adaptive gains. It had two inputs, the error and the rate of change of error. The controller outputs were K_p , K_i and K_d gains. The control rules were created from 25 linguistic conditions. In this research, the Crossley and Cook's gasoline engine models and the corresponding parameters were employed by using MATLAB program. Performance of the proposed controller was compared with that of the fuzzy PI controller, PID controller, and PI controller. It appeared from simulations that the output of the proposed controller could reach a constant speed reference input as the fastest at 1.46 seconds, with no overshoot. The breaking disturbance was rejected within 2.35 seconds.

Keywords: gasoline engine, fuzzy PID controller.

1. บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีระบบควบคุมยานยนต์มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว หลายเทคโนโลยีถูกพัฒนาเป็นระบบควบคุมพื้นฐานในรถ เช่น ระบบควบคุมอัตราเร็วรอบเดินเบา ระบบควบคุมอัตราเร็วรถคงที่ (vehicle cruise speed control) ระบบรักษาเสถียรภาพการทรงตัวของรถ ระบบควบคุมเหล่านี้ล้วนมีความสัมพันธ์ต่ออัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ และแรงบิดทั้งสิ้น

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์เป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจสำหรับการวิจัยเพื่อวัตถุประสงค์ที่หลากหลาย เช่น งานวิจัย[1] อธิบายการประมาณแบบจำลองเชิงเส้นและการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบเครื่องยนต์ที่ไม่ต่อเนื่องงานวิจัย[2] อธิบายพลศาสตร์ของเครื่องยนต์ที่ถูกประมาณเป็นแบบจำลองเชิงเส้น งานวิจัย[3] นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์สันดาปภายในพร้อมวาล์วแปรผันและเพลาลูกเบี้ยว ระบบอื่นๆของเครื่องยนต์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นถูกอธิบายใน[4] ซึ่งแบบจำลองเหล่านี้มีความเกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ทางกายภาพหลายตัวแปร โดยทั่วไปสิ่งเหล่านี้มาจากการทดลองและการวัดในห้องปฏิบัติการ พารามิเตอร์เหล่านี้เช่น ประสิทธิภาพและค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการไหล และพารามิเตอร์การประมาณระบบเชิงเส้นสำหรับส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องยนต์ ในปี ค.ศ. 1991 Crossley และ Cook [2], [5-6] ได้อธิบายระบบเครื่องยนต์ที่ไม่ต่อเนื่องและนำเสนอแบบจำลองเครื่องยนต์สันดาปภายใน 4 จังหวะ โดยผลการจำลองถูกยืนยันด้วยผลการทดลองจากไดนาโมมิเตอร์

สำหรับการควบคุมอัตราเร็วรอบเดินเบา ในปี ค.ศ. 1769 [7] เจมส์ วัตต์ ได้ประดิษฐ์เครื่องจักรไอน้ำสามารถควบคุมอัตราเร็วรอบเครื่องจักรจากระบบทางกล โดยออกแบบมวลเฉื่อยทรงกลมหมุนรอบเพลตามอัตราเร็วรอบเครื่อง กรณีสถาพรเร็วรอบสูง มวลเฉื่อยจะเคลื่อนที่กดแหวนสปริงที่สวมในเพล และส่งกำลังกดลิ้นลดอัตราการไหลของไอน้ำ ทำให้อัตราเร็วรอบเครื่องจักรไอน้ำลดลง สำหรับเครื่องยนต์งานวิจัย[8] อธิบายการควบคุมแบบ Sliding mode ควบคุมตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อเครื่องยนต์ นอกจากนั้นการออกแบบตัวควบคุมได้ถูกนำเสนอหลายวิธี เช่น งานวิจัย [9] Rout MK และคณะ ใช้เทคนิคการวางโพลออกแบบตัวควบคุมพีไอดี (Proportion – Integral –

Derivative Controller: PID) สำหรับระบบควบคุมอัตราเร็วเครื่องยนต์ การเลือกใช้ตัวควบคุมดังกล่าวมีข้อดีที่ความยืดหยุ่นในการปรับเกนตัวควบคุมโดยไม่จำเป็นต้องทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ แต่ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้นั้นก็ไม่สามารถนำไปใช้ในการควบคุมตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อได้ทันที ซึ่งในทางปฏิบัติจะปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมอย่างละเอียดภายหลัง

สำหรับการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมพีไอดี ข้างต้นจะอาศัยผู้มีประสบการณ์สังเกตผลตอบสนองของการปรับเกนตัวควบคุม ซึ่งภายหลังถูกสร้างเป็นกฎที่มีความคลุมเครือและอาศัยคณิตศาสตร์สร้างความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันอินพุตและเกนตัวควบคุมพีไอดี การปรับเกนตัวควบคุมถูกนำเสนอเช่นตัวควบคุมแบบ Fuzzy Logic [10-11] Optimal Fuzzy PID [12] Fuzzy Adaptive PID [13] และ Fuzzy Self-tuning PID [14] เป็นต้น

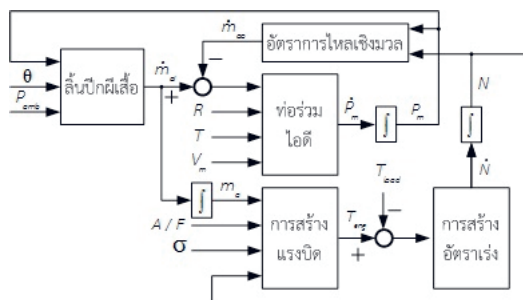
งานวิจัยดังกล่าวถูกใช้ในการปรับแต่งตัวควบคุมพีไอดี โดยมีจุดประสงค์ออกแบบตัวควบคุมที่สามารถรักษาอัตราเร็วรอบเดินเบาในขณะรถรับแรงบิดรบกวนจากการทำงานของเครื่องยนต์ ซึ่งต่อมาแนวคิดดังกล่าวถูกพัฒนาเป็นระบบรักษาอัตราเร็วของตัวรถคงที่

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีด้วยการปรับจูนแบบคลุมเครือสำหรับควบคุมอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์แก๊โซลีน โดยอาศัยข้อมูลจากแบบจำลองเครื่องยนต์ Crossley และ Cook [2], [5-6] สมรรถนะการติดตามสัญญาณอ้างอิง และการกำจัดแรงบิดรบกวนที่เพลาลูกเบี้ยวของตัวควบคุมที่ออกแบบจะถูกเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมแบบพีซีซีลอจิกและตัวควบคุมพีไอดีแบบพื้นฐาน

2.แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์แก๊โซลีน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สร้างแบบจำลองระบบเครื่องยนต์ อาศัยหลักการพื้นฐานทางอุณหพลศาสตร์ กลศาสตร์ของไหล และกลศาสตร์วัสดุ หลักการเหล่านี้มีความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้น ถูกนำเสนอด้วยสมการเชิงซ้อนและค่าพารามิเตอร์ของระบบที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา การทำงานเครื่องยนต์สันดาปภายในสี่จังหวะเริ่มจากเมื่อลิ้นไอดีอยู่ในตำแหน่งเปิดลิ้นไอดีอยู่ในตำแหน่งปิด ลูกสูบจะดูดของไหลซึ่งเป็นส่วนผสมของอากาศและน้ำมันผ่าน

ลิ้นปีกผีเสื้อผ่านท่อร่วมไอดีเข้าสู่ห้องเผาไหม้ จากนั้นลิ้นไอดีจะปิดลูกสูบจะเคลื่อนที่อัดของไหลดังกล่าว เมื่อมีสัญญาณจุดระเบิด การสันดาปจะเกิดขึ้นและสร้างแรงบิดส่งกำลังมายังเพลาข้อเหวี่ยง จากนั้นลิ้นไอดีจะเปิดระบายไอดีและเริ่มจังหวะดูดอีกครั้ง การทำงานระบบเครื่องยนต์ดังกล่าว สามารถอธิบายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของลิ้นปีกผีเสื้อ (Throttle) ท่อร่วมไอดี (Intake manifold) อัตราการไหลเชิงมวล (Mass flow rate) จังหวะอัดอากาศผสมน้ำมัน (Compression stroke) และการสร้างแรงบิดและอัตราเร่ง (Torque generation and acceleration) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์

2.1 ลิ้นปีกผีเสื้อ

อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่เข้าสู่ท่อร่วมไอดี $\dot{m}_{ai}$ เป็นผลคูณของฟังก์ชันตำแหน่งเชิงมุมของลิ้นปีกผีเสื้อ $f(\theta)$ และฟังก์ชันความดันท่อร่วมไอดี $g(P_m)$ ดังสมการที่ 1

$$\dot{m}_{ai} = f(\theta)g(P_m) \quad (1)$$

$$f(\theta) = 2.821 - 0.05231\theta + 0.10299\theta^2 - 0.00063\theta^3$$

เมื่อ

θ คือ ตำแหน่งเชิงมุมของลิ้นปีกผีเสื้อ [deg]

P_m คือ ความดันท่อร่วมไอดี [bar]

P_{amb} คือ ความดันสถานะนิ่ง [bar]

ฟังก์ชันความดันท่อร่วมไอดีมีความสัมพันธ์กับความดันสถานะนิ่งโดย

$$g(P_m) = \begin{cases} 1, & P_m \leq \frac{P_{amb}}{2} \\ \frac{2}{P_{amb}} \sqrt{P_m P_{amb} - P_m^2}, & \frac{P_{amb}}{2} \leq P_m \leq P_{amb} \\ -\frac{2}{P_m} \sqrt{P_m P_{amb} - P_{amb}^2}, & P_{amb} \leq P_m \leq 2P_{amb} \\ -1, & P_m \geq 2P_{amb} \end{cases}$$

2.2 ท่อร่วมไอดี

จากกฎของแก๊สในอุดมคติแบบจำลองท่อร่วมไอดีถูกแสดงเป็นสมการอนุพันธ์เทียบเวลา เมื่อไม่มีระบบหมุนเวียนไอดี (Exhaust Gas Recirculation: EGR) อัตราการเปลี่ยนแปลงความดันท่อร่วมไอดี $\dot{P}_m$ จึงเป็นผลต่างระหว่างค่าเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ผสมน้ำมันก่อนและหลังท่อร่วมไอดีดังสมการที่ 2

$$\dot{P}_m = K_m (\dot{m}_{ai} - \dot{m}_{ao}) \quad (2)$$

เมื่อ

$$K_m = RT/V_m$$

R คือ ค่าคงที่ของแก๊สอุดมคติ [J/kg.K]

T คือ อุณหภูมิท่อร่วมไอดี [K]

V_m คือ ปริมาตรท่อร่วมไอดี [m^3]

$\dot{m}_{ao}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลอากาศผสมน้ำมันหลังท่อร่วมไอดี [g/s]

K_m คือ ค่าคงที่อัตราการไหลเชิงมวลของท่อร่วมไอดี

2.3 อัตราการไหลเชิงมวล

อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศผสมน้ำมันหลังท่อร่วมไอดีถูกอธิบายด้วยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ N ในหน่วย [rad/s] และความดันท่อร่วมไอดีดังสมการที่ 3

$$\dot{m}_{ao} = -0.366 + 0.08979NP_m \quad (3)$$

$$-0.0337NP_m^2 + 0.0001N^2P_m$$

2.4 จังหวะอัด

การทำงานของเครื่องยนต์สันดาปภายใน 4 จังหวะ ในหนึ่งรอบการทำงานจะทำให้เพลาค้อเหวี่ยง หมุน 2 รอบ หรือ 720 องศา ทุกๆ การหมุน 180 องศา แบบจำลองเครื่องยนต์ที่นำเสนอตั้งรูปที่ 2 จะสร้างสัญญาณจาก Valve timing กำหนดจังหวะการดูด อัด ระเบิด และคาย ในช่วงจังหวะดูด สัญญาณที่สร้างข้างต้นจะหยุดการทำงานของตัวอินทิเกรเตอร์ และเริ่มแปลงอัตราการไหลเชิงมวลของไหลเป็นมวลอากาศที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้รอบใหม่ จังหวะการอัดเป็น จังหวะที่ 2 เริ่มการทำงานเมื่อลูกสูบเคลื่อนสู่ศูนย์ตายล่าง (Bottom Dead Center: BDC) ลิ้นไอดีและไอเสีย ถูกปิด ลูกสูบจะอัดส่วนผสมของอากาศและน้ำมันจน ลูกสูบอยู่ในตำแหน่งศูนย์ตายบน (Top Dead Center: TDC) ช่วงนี้แบบจำลองเครื่องยนต์จะหน่วงเวลาจนกว่า จะมีสัญญาณกำหนดจังหวะอีกครั้ง จังหวะระเบิดจะ เริ่มก่อนที่ลูกสูบเคลื่อนสู่ TDC เล็กน้อย การสันดาปจะ เกิดขึ้นและส่งกำลังทางกลขับเพลาค้อเหวี่ยง

2.5 การสร้างแรงบิดและอัตราเร่ง

องค์ประกอบสุดท้ายของแบบจำลองคือ การสร้างแรงบิดและอัตราเร่งของเครื่องยนต์ แรงบิดใน สมการที่ 4 เป็นฟังก์ชันของมวลอากาศในห้องเผาไหม้ อัตราส่วนผสมของอากาศกับน้ำมัน องศาการจุดระเบิด ล่วงหน้า และความเร็วยรอบเครื่องยนต์

$$\begin{aligned} T_{eng} = & -181.3 + 379.36m_a + 21.91(A/F) \\ & - 0.85(A/F)^2 + 0.26\sigma - 0.0028\sigma^2 \\ & + 0.027N - 0.000107N^2 + 0.00048N\sigma \\ & + 2.55\sigma m_a - 0.05\sigma^2 m_a \end{aligned} \quad (4)$$

เมื่อ

m_a คือ มวลอากาศในห้องเผาไหม้ [g]

σ คือ องศาจุดระเบิดล่วงหน้า [deg]

T_{eng} คือ แรงบิดเครื่องยนต์ [N.m]

A/F คือ อัตราส่วนผสมอากาศและน้ำมัน

โดยอาศัยกฎของนิวตัน-ออยเลอร์สามารถอธิบายอัตราเร่งเชิงมุมของเครื่องยนต์ ดังสมการที่ 5

$$J\dot{N} = T_{eng} - T_{load} \quad (5)$$

เมื่อ

T_{load} คือ ภาระแรงบิดเครื่องยนต์ [N.m]

$\dot{N}$ คือ อัตราเร่งเชิงมุมเครื่องยนต์ [rad/s²]

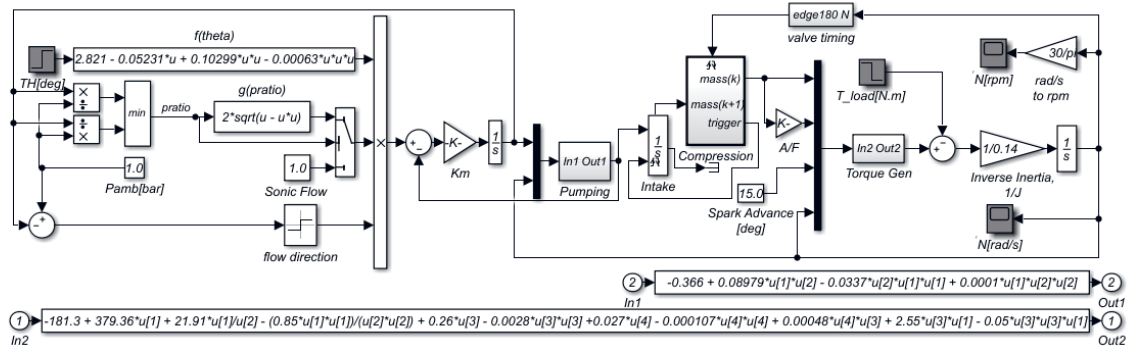
J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยเครื่องยนต์ [kg.m²]

3. การจำลองผลตอบสนองวงเปิด

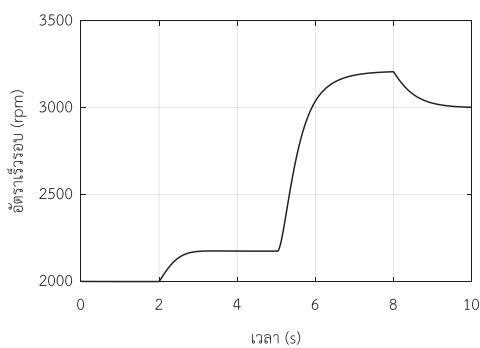
โดยอาศัยค่าพารามิเตอร์ตารางที่ 1 [5-6] สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์ด้วย โปรแกรม MATLAB Simulink ตั้งรูปที่ 2 เมื่อ TH[deg] คือตำแหน่งเชิงมุมของลิ้นปีกผีเสื้อ N[rpm] คืออัตราเร็ว รอบเครื่องยนต์จากการวัด พบว่าผลตอบสนองวงเปิดของ อัตราเร็วรอบของเครื่องยนต์จะแปรผันตามตำแหน่ง การเปิดของลิ้นปีกผีเสื้อ และหากมีการเปลี่ยนแปลง ภาระแรงบิดที่เพลาค้อ T_{load} [N.m] ก็ส่งผลต่อ อัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ตั้งรูปที่ 3

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์แบบจำลองเครื่องยนต์

พารามิเตอร์	ค่า [หน่วย]
θ	8.97 [deg] , $t < 5$ s 11.93 [deg] , $t \geq 5$ s
T_{load}	25 [N.m] , $t \leq 2$ s 20 [N.m] , $2 < t < 8$ s 25 [N.m] , $t \geq 8$ s
P_{amb} , J	1.0 [bar], 0.14 [kg.m ²]
σ , A/F	15.0 [deg], 1/14.6
K_m	0.41328



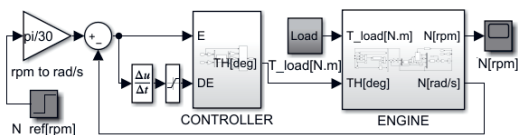
รูปที่ 2 แบบจำลองเครื่องยนต์ด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink



รูปที่ 3 ผลตอบสนองวงเปิด

4. การออกแบบระบบควบคุม

ระบบควบคุมอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ในงานวิจัยนี้ถูกแสดงดังรูปที่ 4 ประกอบด้วย อินพุตอัตราเร็วอ้างอิง $N_{ref}[rpm]$ เอาต์พุตอัตราเร็วจากการวัด $N[rpm]$ ตัวควบคุม และแบบจำลองเครื่องยนต์ ตัวควบคุมที่นำเสนอเป็นตัวควบคุมพีซีลอจิก อินพุตของตัวควบคุมมีสองตัวคือ ค่าความคลาดเคลื่อน E และค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความคลาดเคลื่อน DE ส่วนเอาต์พุตของตัวควบคุม คือ ค่าตำแหน่งเข็มมุลิ้นปีกผีเสื้อ



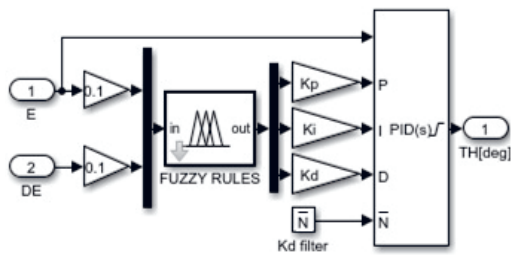
รูปที่ 4 ระบบควบคุมอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์

ตัวควบคุมที่นำเสนอเป็นตัวควบคุมพีซีลอจิกแบบพีโอดี และพีซีลอจิกแบบพีโอ การควบคุมเริ่มจากการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นของตัวควบคุมพีโอดีที่ทำให้ผลตอบสนองสามารถติดตามอัตราเร็วรอบอ้างอิงโดยไม่พบค่าพุ่งเกิน ตัวควบคุมพีซีลอจิกจะรับค่า E และ DE เพื่อคำนวณเกณฑ์ตัวควบคุมพีโอดีค่าใหม่ตามกฎการควบคุมที่ออกแบบ เกณฑ์ตัวควบคุมที่เปลี่ยนแปลงจะถูกป้อนเป็นอินพุตให้แก่ตัวควบคุมพีโอดีชุดเดิม ตัวควบคุมพีโอดีและตัวควบคุมพีโอมีโครงสร้างแบบขนานสามารถอธิบายดังสมการที่ 6 และสมการที่ 7

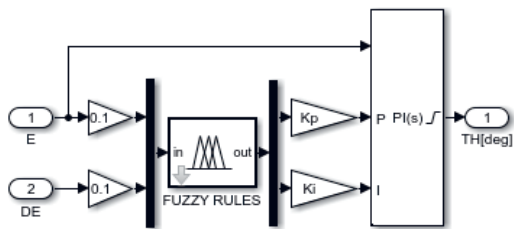
$$PID(S) = K_p + \frac{K_i}{S} + \frac{K_d \bar{N} S}{(S + \bar{N})} \quad (6)$$

$$PI(S) = K_p + \frac{K_i}{S} \quad (7)$$

กำหนดให้ $\bar{N}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์วงจรกรองความถี่ เมื่อปรับเกณฑ์อินพุตเริ่มต้นของตัวควบคุมพีซีลอจิก ค่า E และ DE เป็น 0.1 ตัวควบคุมพีซีลอจิกแบบพีโอดีและพีซีลอจิกแบบพีโอที่นำเสนอถูกแสดงดังรูปที่ 5 และ รูปที่ 6 ตามลำดับ



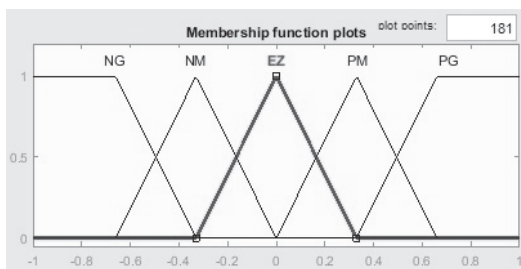
รูปที่ 5 ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกแบบพีไอดี



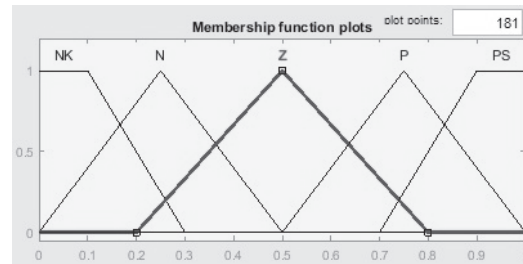
รูปที่ 6 ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกแบบพีไอ

การคำนวณแกนตัวควบคุมพีไอดีด้วยการปรับ
จูนแบบคลุมเครืออธิบายจากขั้นตอนการประมวลผลตัว
ควบคุมฟuzzyลอจิกดังนี้

1) การแปลงอินพุตดั้งเดิมเป็นอินพุตแบบฟuzzy
(Fuzzification) โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ
อินพุต E และ DE มีสมาชิก 5 ตัวคือ NG NM EZ PM
และ PG ช่วงฟuzzyเซตมีค่าระหว่าง -1 ถึง 1 ดังรูปที่ 7
ส่วนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตแกนตัวควบคุม
 K_p , K_i และ K_d มีสมาชิก 5 ตัวคือ NK N Z P และ PS
ช่วงฟuzzyเซตมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 แสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 7 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกอินพุต
E และ DE



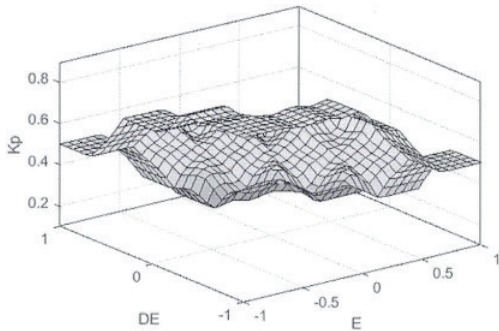
รูปที่ 8 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเอาต์พุต
 K_p , K_i และ K_d

2) การตีความ (Fuzzy Inference) เป็นส่วน
ที่ตรวจสอบฟuzzyอินพุตและสร้างฟuzzyเอาต์พุตที่สอดคล้อง
กับกฎการควบคุมแต่ละกฎซึ่งถูกแสดงด้วย
เงื่อนไขทางภาษาดังตารางที่ 2 เช่น ถ้า E=NG และ
DE=EZ แล้ว $K_p=P$, $K_i=N$, $K_d=NK$ จากนั้นฟuzzyเอาต์พุต
แต่ละกฎจะถูกสรุปรวมกันเป็นฟuzzyเอาต์พุตค่าเดียว
สำหรับกฎการควบคุมของตัวควบคุมฟuzzy $[K_p, K_i, K_d]^T$
มีทั้งหมด 25 กฎแสดงดังนี้

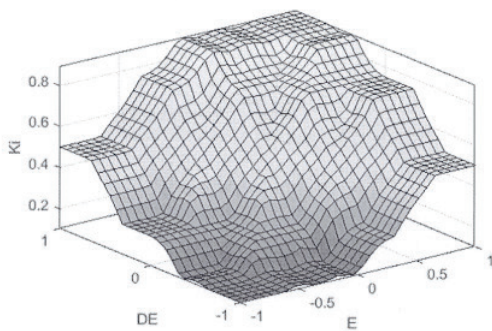
ตารางที่ 2 กฎการควบคุมแบบฟuzzy

E/DE	NG	NM	EZ	PM	PG
NG	PS NK PS	PS NK N	P N NK	P N N	Z Z PS
NM	PS NK Z	P N N	P N N	Z Z N	N P Z
EZ	PS NK Z	P N N	Z Z N	N P N	NK PS Z
PM	P N Z	Z Z Z	N P Z	N P Z	NK PS Z
PG	Z Z PS	N P P	N P P	NK PS P	NK PS PS

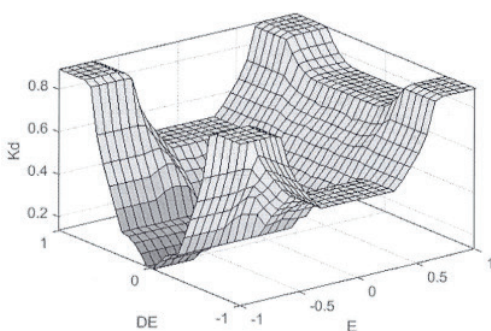
3) การแปลงค่าเอาต์พุตฟัซซีเป็นค่าปกติ (Defuzzification) เป็นขั้นตอนสุดท้ายโดยจะเปลี่ยนข้อสรุปของฟัซซีเอาต์พุตข้างต้น ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ เช่นวิธีการหาจุดศูนย์ถ่วง (Center of gravity) เพื่อคำนวณค่าเกน K_p , K_i และ K_d ที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งเกนดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับอินพุต E และ DE ดังรูปที่ 9 รูปที่ 10 และรูปที่ 11 ตามลำดับ



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างเกนตัวควบคุม K_p กับอินพุตที่เปลี่ยนแปลงของ E และ DE



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างเกนตัวควบคุม K_i กับอินพุตที่เปลี่ยนแปลงของ E และ DE



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างเกนตัวควบคุม K_d กับอินพุตที่เปลี่ยนแปลงของ E และ DE

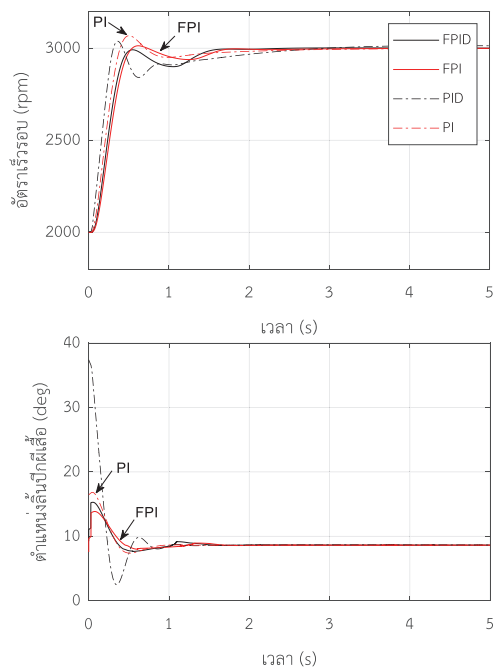
การปรับจูนเกนตัวควบคุมพีไอดีข้างต้นเป็นการปรับจูนแบบอัตโนมัติ เมื่อกำหนดค่าเริ่มต้นของสัมประสิทธิ์จริงกรองความถี่ของตัวควบคุมพีไอดีเป็น 2 ค่าเริ่มต้นของเกนตัวควบคุม K_p , K_i และ K_d ถูกปรับจูนด้วยวิธีสังเกตผลตอบสนองจากการจำลองควบคุมอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ด้วยตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบพีไอดี ที่สามารถติดตามอัตราเร็วรอบอ้างอิงโดยไม่พบค่าพุ่งเกิน ซึ่งผลจากการจำลองเกนตัวควบคุมพีไอดีมีค่าเป็น 0.14 0.15 และ 0.009 ตามลำดับ

5. การจำลองและผลการจำลอง

เนื้อหาในส่วนนี้กล่าวถึงผลการจำลองควบคุมอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ การจำลองอาศัยโปรแกรม MATLAB Simulink สร้างระบบควบคุมอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ดังรูปที่ 4 สมรรถนะของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกถูกเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอดีแบบพื้นฐาน โดยกำหนดให้เกนตัวควบคุม K_p , K_i และ K_d ทั้งสองชุดมีค่าเท่ากัน ผู้วิจัยโปรแกรมตัวควบคุมเป็นตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบพีไอดี (FPID) ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบพีไอ (FPI) ตัวควบคุมพีไอดี และตัวควบคุมพีไอ การจำลองแบ่งเป็นสามส่วน ส่วนแรกกล่าวถึงการควบคุมระบบวงปิดเมื่อกำหนดให้อัตราเร็วรอบอ้างอิงเป็นสัญญาณขั้นบันได ส่วนที่สองทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมเมื่อมีการเปลี่ยนอัตราเร็วรอบอ้างอิงอย่างฉับพลัน ส่วนที่สามเป็นการทดสอบความสามารถของตัวควบคุม ในการกำจัดภาระรบกวนจากการเบรคคังที่

ผลตอบสนองวงปิดเมื่อกำหนดให้อัตราเร็วรอบอ้างอิงเป็นสัญญาณแบบขั้นบันได

การจำลองเริ่มจากควบคุมอัตราเร็วรอบคังที่ 2,000 rpm หลังจากนั้นเพิ่มอัตราเร็วรอบอ้างอิงอย่างฉับพลันเป็น 3,000 rpm โดยปราศจากภาระแรงบิดรบกวน ผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดแสดงดังรูปที่ 12 สมรรถนะของตัวควบคุมที่สอดคล้องแสดงดังตารางที่ 3 เมื่อกำหนดให้ตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อเป็นสัญญาณควบคุมของระบบ ผลการจำลองพบว่าสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมทั้งหมดมีค่าคงตัวที่ 8.62 deg ในช่วงแรกพบสัญญาณควบคุมมีอัตราเร่งมากและมีค่าสูงสุดจากนั้นกลับตัวต่ำกว่าค่าคงตัวแล้วเข้าสู่ค่าคงตัวในวินาทีที่ 1



รูปที่ 12 ผลตอบสนองเมื่ออัตราเร็วรอบอ้างอิงเป็นสัญญาณขั้นบันได

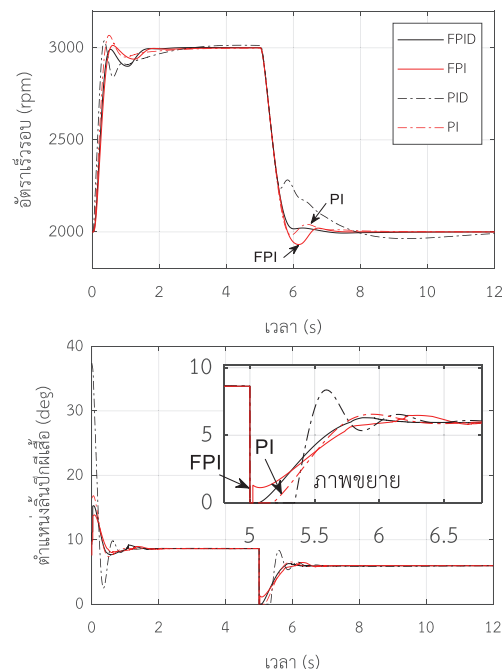
ตารางที่ 3 สมรรถนะตัวควบคุม

ตัวควบคุม	$t_r(10-90\%)$ [s]	$t_s(\pm 2\%)$ [s]	t_p [s]	P_o [%]
FPID	0.286	1.460	NA	NA
FPI	0.307	1.578	0.607	1.3
PID	0.201	2.290	0.362	3.8
PI	0.245	1.800	0.513	6.8

เมื่อเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมแบบพื้นฐานกับตัวควบคุมฟัซซีลอจิกพบว่าตัวควบคุมแบบพื้นฐานสร้างสัญญาณควบคุมในช่วงเริ่มต้นสูงกว่าตัวควบคุมฟัซซีลอจิก ทำให้ผลตอบสนองอัตราเร็วรอบมีเวลาไถ่ขึ้นที่น้อยกว่าและเกิดค่าพุ่งเกิน (overshoot) ที่สูงกว่าตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก เมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบพีโอดีกับฟัซซีลอจิกแบบพีไอ พบว่าตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบพีโอดีเข้าสู่ค่าอ้างอิงโดยไม่พบค่าพุ่งเกินภายในเวลา 1.46 วินาที ในขณะที่ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบพีไอเข้าสู่ค่าอ้างอิงช้ากว่า และมีค่าพุ่งเกิน 1.3 % ที่เวลา 0.607 วินาที

ผลตอบสนองเมื่อเปลี่ยนอัตราเร็วรอบอ้างอิงอย่างฉับพลัน

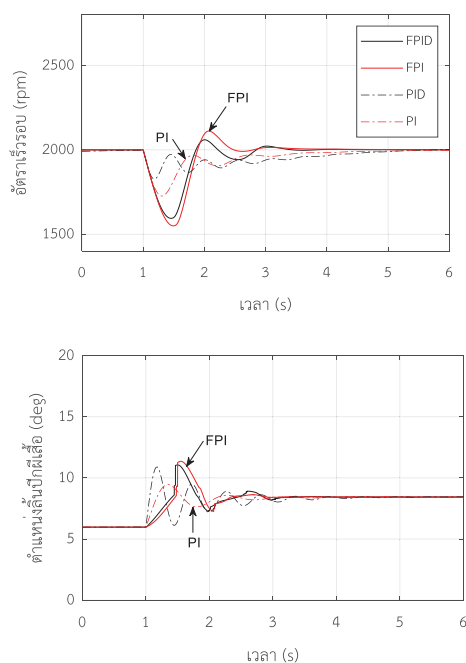
การทดลองเมื่อเปลี่ยนอัตราเร็วรอบอ้างอิงอย่างฉับพลัน มีวัตถุประสงค์ทดสอบความสามารถติดตามอัตราเร็วรอบอ้างอิง โดยจำลองควบคุมอัตราเร็วรอบคงที่ที่ 3,000 rpm จากนั้นเปลี่ยนเป็น 2,000 rpm ที่เวลา 5 วินาที ผลการจำลองดังรูปที่ 13 พบว่าสัญญาณควบคุมทุกตัวได้ลดลงในตำแหน่งปิดสุด จากนั้นจึงค่อยๆ ไถ่ขึ้นจนถึงค่าคงตัวที่ 5.97 deg เมื่อสังเกตอัตราเร็วรอบพบว่าตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบพีโอดีสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงใหม่โดยไม่พบค่าพุ่งต่ำ (undershoot) และเข้าสู่ค่าอ้างอิงใหม่ภายในเวลา 2 วินาที



รูปที่ 13 ผลตอบสนองเมื่อเปลี่ยนอัตราเร็วรอบอ้างอิงอย่างฉับพลัน

ผลตอบสนองเมื่อมีการรบกวนระบบ

การทดลองหัวข้อนี้กล่าวถึงการทดสอบสมรรถนะการกำจัดสัญญาณรบกวนเนื่องจากการเบรคคงที่ ขั้นตอนการจำลองเริ่มจากควบคุมอัตราเร็วรอบคงที่ที่ 2,000 rpm ในช่วงวินาทีที่ 1 เพิ่มภาระแรงบิดเครื่องยนต์เป็น 20 N.m คงที่



รูปที่ 14 ผลตอบสนองเมื่อมีการรบกวนเนื่องจากการเบรกกะทันหัน

ผลการจำลองปรากฏดังรูปที่ 14 พบว่าเมื่อระบบถูกรบกวน ช่วงเริ่มต้นสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมพีไอดีจะเพิ่มสูงและพบการแกว่งรอบค่าคงตัวมากกว่าตัวควบคุมพีไอ ส่วนตัวควบคุมฟuzzyลอจิกพบว่าสัญญาณควบคุมจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงวินาทีที่ 1.5 จากนั้นจะเพิ่มสูงอย่างรวดเร็ว โดยตัวควบคุมฟuzzyลอจิกแบบพีไอดีสร้างสัญญาณควบคุมสูงสุดที่ 11 deg ซึ่งต่ำกว่าฟuzzyลอจิกแบบพีไอเล็กน้อย ผลจากสัญญาณควบคุมข้างต้นจึงทำให้ตัวควบคุมแบบพื้นฐานสามารถลดผลการรบกวนจากภาระแรงบิดในช่วงเริ่มต้นได้ดีกว่าตัวควบคุมแบบฟuzzyลอจิก แต่จะใช้เวลาเข้าสู่ค่าอ้างอิงนานกว่า โดยพบว่าตัวควบคุมฟuzzyลอจิกแบบพีไอดี ฟuzzyลอจิกแบบพีไอ พีไอดี พีไอ ใช้เวลาในการกำจัดสัญญาณรบกวน 2.35 3.45 4.65 4.17 วินาที และผลการรบกวนทำให้อัตราเร็วรอบลดลงต่ำสุดจากอัตราเร็วอ้างอิง 400 450 170 270 rpm ตามลำดับ

6. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการปรับปรุงตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีแบบคลุมเครือสำหรับควบคุมอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์แก๊สโซลีน โดยอาศัยแบบจำลองและพารามิเตอร์เครื่องยนต์ของ Crossley และ Cook ตัวควบคุมที่นำเสนอคือตัวควบคุมฟuzzyลอจิกแบบพีไอดี สมรรถนะของตัวควบคุมถูกยืนยันจากผลการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB เปรียบเทียบกับสมรรถนะของตัวควบคุมฟuzzyลอจิกแบบพีไอ พีไอดี และพีไอ ผลการจำลองพบว่าตัวควบคุมที่นำเสนอสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงได้เร็วที่สุดใช้เวลา 1.46 วินาที โดยไม่พบค่าพุ่งเกิน และสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนจากการเบรกกะทันหันภายใน 2.35 วินาที

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Radhi RM, Hussien EQ. Controller modelling and design of rotational speed for internal combustion engine. Thi-Qar Univ J Eng Sci. 2013;4(2):1–13.
- [2] Rohit M, Rohit K. Modelling and simulation of spark ignition engines. Int J Adv Res Technol. 2014;3(5):55–93.
- [3] AHMED FS. Modeling, simulation and control of the air-path of an internal combustion engine [Internet]. Université de Technologie de Belfort-Montbéliard; 2014. Available from: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01002113>
- [4] Isermann R. General combustion engine models. In: Engine modeling and control: modeling and electronic management of internal combustion engines. New York: Springer; 2014. p. 133–266.
- [5] Crossley PR, Cook JA. A nonlinear engine model for drivetrain system development. In: International Conference on Control 1991 Control '91 [Internet]. Edinburgh, UK: IET; 1991. p. 921–5. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=98573>

- [6] Quinn S, Grace A, Barnard P, Michaels L, Aldrich BI. Engine model. In: Using simulink and stateflow ® tm in automotive applications abstract [Internet]. Massachusetts, USA: The Math Works Inc.; 1998. p. 8–17. Available from: <https://www.computoolable.nl/AuM5.pdf>
- [7] Spear B. James Watt: The steam engine and the commercialization of patents. World Pat Inf. 2008 Mar;30(1):53–8.
- [8] Choi S-B, Hedrick JK. Robust throttle control of automotive engines: theory and experiment. ASME J Dyn Syst Meas Control [Internet]. 1996;118:92–8. Available from: http://www.asme.org/terms/Terms_Use.cfm
- [9] Rout MK, Sain D, Swain SK, Mishra S K. PID controller design for cruise control system using genetic algorithm. In: 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT). Chennai, India: IEEE; 2016. p. 4170–4.
- [10] Gritli W, Gharsallaoui H, Benrejeb M. PID-type fuzzy scaling factors tuning using genetic algorithm and simulink design optimization for electronic throttle valve. In: International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). St. Julian's, Malta: IEEE; 2016. p. 216–21.
- [11] Tran TA, Haidara G. A research on marine diesel engine speed controller by fuzzy logic control theory based on experimental investigation. J Mech Eng Res Dev. 2019;42(2):18–26.
- [12] Chao C-T, Sutarna N, Chiou J-S, Wang C-J. An optimal fuzzy PID controller design based on conventional PID control and nonlinear factors. Appl Sci. 2019;9(6).
- [13] Linjing H, Yuezhen W. Design and simulate the idle speed control system based on fuzzy adaptive. In: Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). Chongqing, China: IEEE; 2015. p. 714–7.
- [14] Mu H, Li X, Tang J. Study with fuzzy self-turning PID controller on idle speed controlling of automobile. In: 2017 Chinese Automation Congress (CAC). Jinan, China: IEEE; 2017. p. 5755–9.

