การคำนวณปริมาณอากาศในกระบอกสูบโดยตัวสังเกตแบบแผนเลื่อน สำหรับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดแบบ DF-PCCI

A Sliding-Mode Observer for In-Cylinder Air Calculation on Compression Ignition Engine Operating with DF-PCCI Mode

อิทธิเดช มูลมั่งมี[*1], บัณฑิต จิรนันทศักดิ์[1] และ วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย[2]

[1] ห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสั่นสะเทือน (CRV Lab) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพฯ 10900
[2] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพฯ 10900
* ติดต่อ: โทรศัพท์: 086-57940404
E-mail: profittidej@gmail.com (โทรศัพท์ 080-0831118 และ Email: bunditji@hotmail.com)

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนองานวิจัยเชิงประยุกต์เกี่ยวกับการประมาณค่าอากาศในกระบอกสูบของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดขนาด 2.5 ลิตร ที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงร่วมกับน้ำมันดีเซลและทำงานในโหมด DF-PCCI (Diesel-Dual-Fuel Premixed-Charge Compression Ignition Engine) มีการนำอากาศเข้าด้วย ระบบเทอร์โบชาร์จ (turbocharger) และระบบการนำไอเสียกลับมาเผาไหม้ซ้ำ (Exhaust Gas Recirculation; EGR) ปริมาณอากาศจริงที่ไหลเข้าสู่กระบอกสูบมีความสำคัญในการกำหนดปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงและการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ โดยเฉพาะเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วรอบและโหลดของเครื่องยนต์อย่างทันทีทันใด โดยปกติเซ็นเซอร์วัดอัตราการไหลอากาศ (MAF sensor) ที่ติดตั้งบริเวณด้านหน้าไม่สามารถให้ปริมาณอากาศจริงที่ใช้ใน การเผาไหม้ภายในกระบอกสูบได้ เนื่องจากมีผลของปริมาณออกซิเจนที่เหลือจากการเผาไหม้ในรอบก่อนหน้า อีกทั้งมีเวลาล่าช้าในการวัดและความคลาดเคลื่อนของตัวเซ็นเซอร์ ทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลงและส่งผลต่อการตอบสนองการขับขี่ การประมาณค่าอากาศนี้อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสภาวะทางอุณหพลศาสตร์ที่ท่อร่วมไอดีร่วมกับความสัมพันธ์ของอัตราส่วนก๊าซที่เผาไหม้แล้ว (Burned Gas Ratio; BGR) ที่อยู่ในท่อร่วมไอดีมาสร้างสมการสเตทของระบบ และออกแบบตัวสังเกตแบบแผนเลื่อน (Sliding-mode observer) ซึ่งมีสมบัติคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบได้ ผลจากการทดลองประมาณค่าอากาศในกระบอกสูบด้วยตัวสังเกตแบบแผนเลื่อนนี้พบว่าให้ปริมาณมวลอากาศที่เข้ากระบอกสูบมากกว่าที่อ่านได้จากเซ็นเซอร์ MAF เนื่องจากคำนึงถึงผลของอากาศที่เหลือจากการเผาไหม้ใน EGR โดยอาศัย BGR ในการคำนวณปริมาณก๊าซที่ยังไม่เผาไหม้ จำลองผลบนโปรแกรม *MATLAB Simulink®* และ *AVL Boost®*

คำหลัก: ตัวสังเกต, อากาศในกระบอกสูบ, แผนเลื่อน, เครื่องยนต์เชื้อเพลิงร่วม

Abstract

This article presents an application research involving a calculation of in-cylinder air mass on a 2.5L compression ignition engine composing with EGR and turbocharger system, and operating on DF-PCCI mode. The DF-PCCI engine using CNG as main fuel is a multipoint-injected CNG at the intake ports after Diesel is directly injected in smaller amount, mainly for ignition purpose, resulting in lower fuel cost. The amount of in-cylinder air is important to Diesel and CNG injection calculations, especially when we tip-in or abrupt changes in load paddle. The presence of time delay of a MAF sensor is an obstacle in the controller design for air/fuel ratio control. Because its combustion characteristic is close to lean burn (exceed O_2), resulting in more residual air on the EGR system. The in-cylinder air is calculated for determine Diesel and CNG injection durations, estimation of in-cylinder air improves the engine efficiency, drivability, and emission in the exhaust. We present 1) a model of air-part system with EGR system, and the Burned Gas Ration (BGR) (i.e., a ratio between the burned mass and the total mass) is a key concept of this work for estimates the combustion parameter on the intake manifold. 2) a nonlinear sliding-mode observer, which has robustness properties. The proposed algorithm was simulated on the *MATLAB Simulink*® as a controller and the *AVL BOOST* as a virtual engine. The results of this estimation provide more accuracy in predicting the Air-per-Cylinder (APC) instantaneously, where it does not required in additional sensors.

Keywords*:* Observer, In-cylinder air, Sliding-mode, Diesel-Dual-Fuel Engine

1. บทนำ

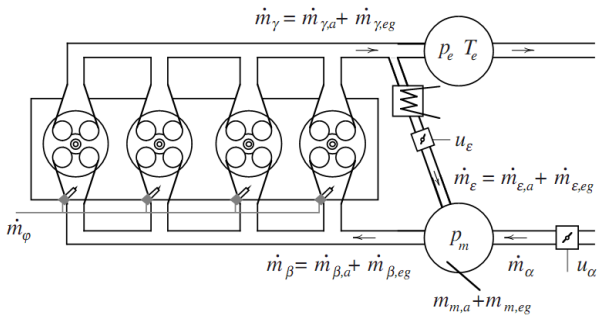
ระบบควบคุมเส้นทางอากาศ (air-path control system) ในเครื่องยนต์ เชื้อเพลิงร่วมดีเซลและก๊าซธรรมชาติซึ่งมีการจุดระเบิดด้วยการอัดแบบ DF-PCCI (Diesel-Dual-Fuel Premixed-Charge Compression Ignition) จะทำการควบคุม อัตราการไหลโดยมวลของอากาศที่ลิ้นเร่ง (throttle) และของก๊าซไอเสียย้อนกลับที่วาล์วไอเสียย้อนกลับ (Exhaust Gas Recirculation (EGR) valve) เพื่อให้ปริมาณอากาศที่ไหลเข้ามาสอดคล้องกับความต้องการขอ งเครื่องยนต์ในขณะนั้นซึ่งกำหนดโดยคำสั่งคันเร่ง (peddle) และอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ (engine speed) และเพื่อกำหนดปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงตามค่าที่กำหนดไว้ ดังนั้นจึงส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ (performance), การขับขี่ (drivability) และปริมาณมลพิษในไอเสีย (emissions) เป็นต้น เครื่องยนต์ DF-PCCI เป็นเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดซึ่งดัดแปลงให้สามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงได้ ทั้งสองชนิดพร้อมกันชนิดคือดีเซลและก๊าซธรรมชาติ (natural gas)

พารามิเตอร์สำคัญในการควบคุมระบบเส้นทางอากาศคือ ปริมาณอัตราการไหล โดยมวลของอากาศ (Mass Air Flow; MAF) และความดันในท่อร่วมไอดี (Manifold Absolute Pressure; MAP) ค่าอัตราการไหลของอากาศนี้จะถูกนำมาคำนวณการฉีดเชื้อเพลิง , กำหนดโซนของเครื่องยนต์ ฯลฯ สำหรับออกแบบการควบคุมแบบป้อนกลับ ในเครื่องยนต์ อย่างไรก็ตา ม อัตราการไหลของอากาศ ที่ดังกล่าวนั้นเป็นการไหลเฉพาะอากาศจากภายนอก (fresh air) เข้าสู่เครื่องยนต์เท่านั้นและทราบจากเซ็นเซอร์วัดอัตราการไหลโดยมวลของอากาศ (MAF sensor) ที่ติดตั้งทางด้านหน้าเครื่องยนต์ เครื่องยนต์ดีเซล 2.5 ลิตร ระบบนำอากาศเข้าเครื่องยนต์โดยเทอร์โบชาร์จ (turbocharger) และการนำไอเสียกลับมาเผาไหม้ซ้ำในระบบไอเสียย้อนกลับ (EGR system) ข้อบกพร่องของปริมาณอากาศที่อ่านได้จากเซ็นเซอร์ MAF เพียง

อย่างเดียว คือ ค่าอัตราการไหลโดยมวลของอากาศที่อ่านได้ไม่ตรงกับมวลอากาศจริงที่เข้าสู่เครื่องยนต์ ซึ่งมีเหตุผลดังนี้ 1) ผลกระทบของเวลาล่าช้า (time delay) เนื่องจากตำแหน่ง ทางกายภาพของการติดตั้งเซ็นเซอร์ MAF 2) เครื่องยนต์ DF-PCCI มีลักษณะการเผาไหม้ส่วนใหญ่เป็นการเผาไหม้บาง (lean burn) นั่นคือมีปริมาณอากาศส่วนเกิน (exceed air) จากการเผาไหม้เหลือปนมากับไอเสียในระบบไอเสียย้อนกลับ (EGR system) เข้าสู่เครื่องยนต์ อัตราการไหลโดยมวล อากาศส่วนเกินนี้ไม่สามารถ ทราบค่าจากเซ็นเซอร์ ได้ ข้อบกพร่อง ดังกล่าวจะ ส่งผลเสียต่อสมรรถนะ การขับขี่ และปริมาณมลพิษในไอเสียไม่มาก หากเครื่องยนต์ทำงานที่อัตราเร็วรอบคงที่ (steady-state operation) แต่หากเครื่องยนต์อยู่ในช่วงของ การเปลี่ยนอัตราเร็วรอบหรือโหลดอย่างทันทีทันใดจะส่งผลกระทบ ต่อการควบคุมอย่างมาก [3], [4], [5] ดังนั้น มีความจำเป็นต้องประมาณค่ามวลอากาศจริงที่อยู่ในกระบอกสูบที่เวลาใดๆ เพื่อส่งสัญญาณที่เวลาจริงไปยังระบบควบคุมส่วนอื่นต่อไป

ในบทความนี้จะนำเสนอเป็น 6 ส่วนดังนี้ ส่วนที่ 2 แบบจำลองของระบบเส้นทางอากาศ ส่วนที่ 3 ทฤษฎีการออกแบบตัวสังเกตแบบแผนเลื่อน ส่วนที่ 4 การออกแบบตัวสังเกตแบบแผนเลื่อน (Sliding-mode observe) ส่วนที่ 5 การคำนวณปริมาณอากาศในกระบอกสูบ ส่วนที่ 6 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ส่วนที่ 7 สรุปผลและวิจารณ์

2. แบบจำลองของระบบเส้นทางอากาศ



รูปที่ 1 นิยามตัวแปรสำหรับเครื่องยนต์ [2]

อาศัยการจำลองแบบ Mean-Value Model โครงสร้างของระบบและตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการประมาณ ค่าอากาศในกระบอกสูบ แสดงดังรูปที่ 1 ตัวห้อย m และ γ แทนตำแหน่งในท่อร่วมไอดีและท่อร่วมไอเสีย ตามลำดับ ตัวห้อย a และ eg แทนก๊าซที่ยังไม่เผาไหม้ (สามารถแทนด้วยอากาศ) และก๊าซที่เผาไหม้แล้ว ตามลำดับ ตัวห้อย α แทนอากาศจากภายนอก (fresh air) จากรูปที่ 1 อากาศไหลเข้าสู่ระบบผ่านลิ้นเร่ง u_α ด้วยอัตราการไหลโดยมวลของอากาศ $\dot{m}_\alpha$ รวมเข้ากับมวลของไอเสีย $\dot{m}_\varepsilon$ ในระบบไอเสียย้อนกลับที่ท่อร่วมไอดี ซึ่งมีเซ็นเซอร์วัดความดัน (intake manifold pressure; P_m) และอุณหภูมิ (intake air temperature; T_m) ส่วนผสมของอากาศและไอเสียที่มาจากไอเสียย้อนกลับ จะเข้าสู่เครื่องยนต์ด้วยอัตราการไหลโดยมวล $\dot{m}_\beta$, อัตราการไหลโดยมวลของดีเซล $\dot{m}_\varphi$ เพื่อจ่ายน้ำมันจากหัวฉีดดีเซลเข้าเผาไหม้ในเครื่องยนต์ และปล่อยก๊าซไอเสีย $\dot{m}_\gamma$ ผ่านท่อร่วมไอเสีย ซึ่งมีเซ็นเซอร์วัดความดัน (exhaust manifold pressure; P_e) และอุณหภูมิ (exhaust temperature; T_e) การควบคุมอัตราการไหลโดยมวลของไอเสียย้อนกลับ $\dot{m}_\varepsilon$ จะควบคุมโดยตำแหน่งการปิดเปิด % u_ε ของวาล์ว EGR อัตราการไหลโดยมวลของไอเสียย้อนกลับแทนด้วย $\dot{m}_\varepsilon$ ซึ่งจะประกอบด้วยมวลของก๊าซที่เผาไหม้แล้ว $\dot{m}_{\varepsilon,eg}$ และก๊าซส่วนที่ยังไม่เผาไหม้ $\dot{m}_{\varepsilon,a}$ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเส้นทางอากาศมีรายละเอียดซึ่งจะแสดงต่อไปนี้

2.1 Total Mass Balance in the Intake Manifold

พิจารณากฎของก๊าซอุดมคติ (ideal gas law) ที่ท่อร่วมไอดี : $P_m V = M_m R T_m$ เมื่อสมมติให้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีค่าน้อยมาก จะได้

$$\dot{P}_m = \frac{RT_m}{V_m}\left(\dot{m}_\alpha + \dot{m}_\varepsilon + \dot{m}_{cng} - \dot{m}_\beta\right) \qquad (1)$$

โดยที่ $\dot{m}_{cng}$ แทนอัตราการไหล โดยมวลของ ก๊าซธรรมชาติ สำหรับอัตราการไหลโดยมวลที่เข้าสู่เครื่องยนต์ กำหนดโดย Speed-Density Equation:

$$\dot{m}_{\beta} = \eta_{vol}\left(P_m, N_e, xxx\right)\frac{P_m}{RT_m}V_{cyl}\frac{N_e}{120} \qquad (2)$$

โดยที่ V_{cyl} แทนปริมาตรการกระจัด (displaced volume (m^3)) N_e แทนอัตราเร็วรอบ (rpm) และ η_{vol} แทนประสิทธิภาพเชิงปริมาตร (volumetric efficiency) ซึ่งได้ค่าจากการทดลอง

2.2 Composition Balance in the Intake Manifold

นิยาม อัตรา ส่วนโดยมวลระหว่างก๊าซที่เผาไหม้แล้ว (burned gas) $m_{m,eg}$ ต่อก๊าซทั้งหมด (ส่วนที่เผาไหม้แล้ว (burned) + ส่วนที่ยังไม่เผาไหม้ (unburned gas)) โดย พิจารณาที่ท่อร่วมไอดี /ท่อร่ วมไอเสีย ตามลำดับ กำหนดโดย

$$F_{int} = \frac{m_{m,bg}}{m_m} = \frac{m_{m,bg}}{m_{m,a}+m_{m,bg}} = 1-\frac{m_{m,a}}{m_m} \qquad (3)$$

และ

$$F_{exh} = \frac{m_{\gamma,eg}}{m_{\gamma}} = \frac{m_{\gamma,eg}}{m_{\gamma,a}+m_{\gamma,eg}} = 1-\frac{m_{\gamma,a}}{m_{\gamma}} \qquad (4)$$

โดยที่ $m_{m,a}$ เป็นมวลของก๊าซที่ยังไม่เผาไหม้ (unburned gas) ซึ่งสามารถพิจารณาเป็นมวลของอากาศที่อยู่ในไอเสีย ตัวห้อย m และ γ แทนตำแหน่งในท่อร่มไอดีและท่อร่วมไอเสีย ตามลำดับ เมื่อพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงของ F_{int} จะได้

$$\dot{F}_{int} = \frac{RT_m}{P_mV_m}\left(\dot{m}_{\varepsilon}\left(F_{egh}-F_{int}\right)-\left(\dot{m}_{\alpha}+\dot{m}_{cng}\right)F_{int}\right) \qquad (5)$$

2.3 การคำนวณอัตราส่วนของมวลก๊าซที่เผาไหม้แล้วในท่อร่วมไอเสีย (F_{exh})

เนื่องจาก F_{exh} ขึ้นอยู่กับปริมาณอากาศที่เหลือจากการเผาไหม้และมีความสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนสัมพัทธ์ระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิง (relative air/fuel ratio: λ) เราจึงสามารถคำนวณ F_{exh} ได้ในเทอมของ λ (โดยที่ค่า λ ได้มาจาก เซ็นเซอร์ ที่ติดตั้งในห้องทดสอบ) สำหรับเครื่องยนต์เชื้อเพลิงร่วมที่ทำงานในโหมด DF-PCCI เรามี

$$\lambda = \frac{(A/F)_{actual}}{(A/F)_{stoi}} = \frac{A/\left(F_g+F_d\right)}{R(A/F)_g+(1-R)(A/F)_d} = \frac{\dot{m}_{\beta,a}/\left(\dot{m}_{cng}+\dot{m}_{\varphi}\right)}{R(A/F)_g+(1-R)(A/F)_d}$$

โดยที่ $\dot{m}_{\varphi}$ แทนอัตราการไหลโดยมวลของดีเซลที่ใช้, R แทนอัตราส่วนโดยพลังงานของการใช้เพลิง ก๊าซธรรมชาติต่ อดีเซล , $(A/F)_g$ และ $(A/F)_d$ เป็นค่าคงที่เท่ากับ 16.3 และ 14.6 ตามลำดับ นั่นคือ $(A/F)_{stoi} = 16.3R+14.6(1-R) = 14.6-1.7R$ และพารามิเตอร์ $F_{exh} = m_{\gamma,eg}/m_{\gamma}$ ใน (4) พิจารณาจากสมการสมดุลมวลที่กระบอกสูบ และอาศัยนิยามค่า λ ข้างต้น จะได้

$$m_{\gamma,eg} \triangleq \dot{m}_{\beta,eg}\left(t-\tau_{IEG}\right)+\tfrac{1}{\lambda(t-\tau_{IEG})}\dot{m}_{\beta,a}\left(t-\tau_{IEG}\right) + \left[\dot{m}_{\varphi}\left(t-\tau_{IEG}\right)+\dot{m}_{cng}\left(t-\tau_{IEG}\right)\right]$$

และ

$$m_{\gamma} \triangleq \left[\dot{m}_{\beta,eg}\left(t-\tau_{IEG}\right)+\dot{m}_{\beta,a}\left(t-\tau_{IEG}\right)\right] + \left[\dot{m}_{\varphi}\left(t-\tau_{IEG}\right)+\dot{m}_{cng}\left(t-\tau_{IEG}\right)\right]$$

โดยที่ $\tau_{IEG} \approx 3\pi/\omega_{\varepsilon}$ เป็นช่วงเวลาหน่วง เนื่องจากการดูดอากาศโดย เริ่มจากวาล์วไอดีปิดในจังหวะ ดูดอากาศเข้า (aspiration center) ไปจนถึงจุดศูนย์กลางของจังหวะคายไอเสีย (exhaust center) เพื่อวัดค่า λ ออกมา เรียกว่า Induction-to-Exhaust-Gas (IEG) delay) [2]

2.4 การคำนวณอัตราการไหลโดยมวลของ EGR

จากสมดุลมวลบนท่อร่วมไอดี จะได้ว่า

$$\dot{m}_{egr} = \dot{m}_{asp} - \dot{m}_{maf} - \dot{m}_{cng} + \dot{m}_m$$

โดยสมมติให้อัตราการไหลโดยมวลของไอเสียสามารถเขียนในรูป $\dot{m}_{egr} = \theta_{egr}u_{\varepsilon}$ โดยที่ θ_{egr} เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และความดันในท่อร่วมไอเสีย u_{ε} แทนตำแหน่ง ของการเปิดวาล์ว EGR (ร้อยละ 0-1) ดังนั้น

$$\theta_{egr} = \frac{1}{u_\varepsilon}\left(\dot{m}_{asp} - \dot{m}_{maf} - \dot{m}_{cng} + \frac{\dot{P}_m V_m}{RT_m}\right) \quad (6)$$

ผลคูณของ (6) และ u_ε แทนอัตราการไหล โดยมวลของก๊าซไอเสียย้อนกลับ $\dot{m}_{egr}$ บนท่อ EGR โดยกำหนดค่าเริ่มต้น $\theta_{egr} = 0.014$ ใน การเขียนโปรแกรม

2.5 สมการสเตทของระบบทางเดินอากาศ

ในที่นี้สมมติว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีค่าน้อยมาก ($\dot{T}_m \approx 0$) นั่นคือเป็นกระบวนการอุณหภูมิคงที่ (isothermal) โดยแทนค่า (2) ใน (1) และสมมติให้ $x = \left[P_m \quad F_m\right]^T \in \Re^2$ เป็นตัวแปรสเตท (state variables) และ $y = P_m \in \Re^1$ เป็นตัวแปรเอาท์พุต จะได้สมการสเตท (state equations) หรือแบบจำลองอ้างอิง (reference model) สำหรับออกแบบตัวสังเกต (หัวข้อที่ 4) ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \alpha_m\left(\dot{m}_\alpha + \dot{m}_{cng} + \theta_{egr}u - \eta_{vol,map}\left(x_1, N_e\right)\beta_m x_1\right) \\ \dot{x}_2 = \dfrac{\alpha_m}{x_1}\left(F_{exh}\theta_{egr}u_\varepsilon - \left(\dot{m}_\alpha + \dot{m}_{cng} + \theta_{egr}u_\varepsilon\right)x_2\right) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (7)$$

โดยที่ $\alpha_{int} \triangleq RT_m/V_m$ และ $\beta_{int}\left(N_e, T_m\right) \triangleq \left(1/RT_m\right)V_{cyl}\left(N_e/120\right)$

3. ทฤษฎีการออกแบบตัวสังเกตแบบแผนเลื่อน

พิจารณาระบบไม่เป็นเชิงเส้น

$$\begin{cases} \dot{x} = f\left(x, u\right) \\ y = h\left(x\right) \end{cases} \quad (8)$$

โดยที่ $x \in \Re^n, u \in \Re^m$ และ $y \in \Re^n$ สมการสเตทของตัวสังเกตแบบแผนเลื่อนของระบบ (8) อยู่ในรูป

$$\dot{\hat{x}} = f\left(\hat{x}, u\right) + \Gamma sign\left(S\right) \quad (9)$$

โดยที่ $\hat{x} \in \Re^n, \Gamma \in \Re^{n\times p}$ เป็นค่าเกนของตัวสังเกต และ $sign\left(S\right) \in \Re^p$ เป็นฟังก์ชันที่ทำหน้าที่สวิตซ์ เมื่อ

$$S = \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 \\ \vdots \\ e_p \end{bmatrix} \quad (10)$$

โดยที่ $e = x - \hat{x}$ เป็นตัวแปรสเตทคลาดเคลื่อน (error state variables) และ $sign\left(S\right)$ สอดคล้องกับ

$$sign\left(S\right) = \left[sign\left(s_1\right) \quad \ldots \quad sign\left(s_p\right)\right]^T \quad (11)$$

พื้นผิวแผนเลื่อน (sliding surface) กำหนดโดย $S = 0$ และค่าอัตราขยาย $\Gamma = \left[\gamma_{ij}\right]_{i=1,\ldots,n;\, j=1,\ldots,p}$ และเงื่อนไขสำคัญสำหรับเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับวงกว้าง (globally asymptotically stable) คือการออกแบบพื้นผิวแผนเลื่อน S เพื่อให้ $S^T\dot{S} < 0$

4. การออกแบบตัวสังเกตแบบแผนเลื่อน

พิจารณาจาก (7) พลวัตของตัวสังเกตแบบแผนเลื่อนกำหนดโดย

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \alpha_m\left(\dot{m}_\alpha + \dot{m}_{cng} + \theta_{egr}u_\varepsilon \right. \\ \qquad \left. -\eta_{vol,map}\left(y, N_e\right)\beta_m\hat{x}_1\right) + \Gamma sign\left(S\right) \\ \dot{\hat{x}}_2 = \dfrac{\alpha_m}{y}\left(F_{exh}\theta_{egr}u_\varepsilon \right. \\ \qquad \left. -\left(\dot{m}_\alpha + \dot{m}_{cng} + \theta_{egr}u\right)\hat{x}_2\right) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (12)$$

โดยที่ $\Gamma \in \Re^+$ และ กำหนด ให้ $S = \tilde{x}_1 = x_1 - \hat{x}_1$ จะได้สมการสเตทของความคลาดเคลื่อน (error state dynamics) ในรูป

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1 = \alpha_m \left[\theta_{egr} u_\varepsilon - \eta_{vol,map}\left(y, N_e\right) \beta_m \tilde{x}_1 \right] \\ \qquad - \Gamma sign\left(x_1 - \tilde{x}_1\right) \\ \dot{\tilde{x}}_2 = \dfrac{\alpha_m}{y}\left(-\left(\dot{m}_\alpha + \dot{m}_{cng} + \theta_{egr} u\right)\tilde{x}_2 \right. \\ \qquad \left. + \left(F_{exh} - x_2\right)\theta_{egr} u_\varepsilon \right) \end{cases} \tag{13}$$

เราต้องออกแบบอัตราขยาย Γ เพื่อให้บนพื้นผิวแผนเลื่อน $S = 0$ สอดคล้องกับเงื่อนไข $S^T \dot{S} = S\dot{\tilde{x}}_1 < 0$ ดังนั้น จึงเลือก

$$\Gamma > \alpha_m \left(\theta_{egr} u_\varepsilon - \left|\tilde{x}_1\right| \eta_{vol,map}\left(y, N_e\right) \beta_m \right)$$

การวิเคราะห์เสถียรภาพ (stability analysis) ของ $\tilde{x}_2$ *:* เนื่องจากพลวัตของ $\tilde{x}_1$ เป็นอิสระกับ $\tilde{x}_2$ ดังนั้นจึงสามารถแยกการวิเคราะห์เสถียรภาพได้อย่างอิสระ สำหรับทุกค่า $u_{min} \le u_\varepsilon \le u_{max}$

$\tilde{x}_2$ *– Dynamics:*

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_2 &= \frac{\alpha_m}{y}\left(-\left(\dot{m}_\alpha + \dot{m}_{cng} + \theta_{egr} u_\varepsilon\right)\tilde{x}_2 \right. \\ &\quad \left. + \left(F_{exh} - x_2\right)\theta_{egr} u_\varepsilon \right) \\ &:= -a_{int}\left(t\right)\tilde{x}_2 + b_{int}\left(t\right)\theta_{egr} \end{aligned}$$

โดยที่ $a_{int} \triangleq \frac{\alpha_{int}}{y}\left(\dot{m}_\alpha + \dot{m}_{cng} + \theta_{egr} u_\varepsilon\right)$ และ $b_{int} \triangleq \frac{\alpha_{int}}{y}\left(F_{exh} - x_2\right) u_\varepsilon$ มีค่าขอบเขตบนเป็นบวก นั่นคือ

$$0 < a_m \le a_{int}\left(t\right) \le a_M$$

และ

$$0 < b_m \le b_{int}\left(t\right) \le b_M$$

สำหรับทุกเวลา $t \ge 0$ จะได้

$$\dot{\tilde{x}}_2 \le -a_{int}\left(t\right)\tilde{x}_2 + b_M \tau e^{-\lambda t}$$

ซึ่งมีผลเฉลยกำหนดโดย

$$\tilde{x}_2\left(t\right) \le -\int_0^t a_{int}\left(s\right)\tilde{x}_2\left(s\right) ds + c \quad \forall t > 0$$

โดยที่ $c \triangleq \tilde{x}_2\left(0\right) + b_M \tau / \lambda$ และอาศัย Gronwall's Lemma [3] จะได้ว่า

$$\tilde{x}_2\left(t\right) \le c e^{-\int_0^t a_{int}(s)\, ds} \le c e^{-a_{int} t}$$

ดังนั้น จุดสมดุล $\left(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2\right) = \left(0, 0\right)$ มีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับ (asymptotically stable)

5. การคำนวณปริมาณอากาศในกระบอกสูบ

เนื่องจากพารามิเตอร์สำคัญที่บ่งบอกปริมาณอากาศที่เหลือจากการเผาไหม้คือ BGR โดยอาศัย (3) และ (4) จะได้

สัดส่วนของปริมาณอากาศในท่อร่วมไอดี:

$$1 - F_{int} = \frac{m_{m,a}}{m_m} \tag{14}$$

สัดส่วนของปริมาณอากาศในท่อร่วมไอเสีย:

$$1 - F_{exh} = \frac{m_{\gamma,a}}{m_\gamma} \tag{15}$$

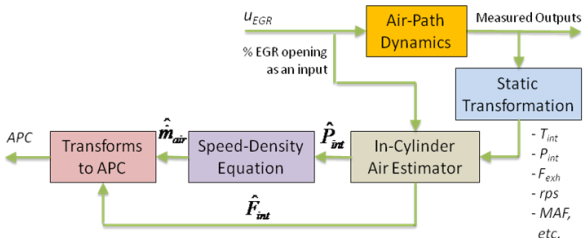
โดยสัดส่วนของปริมาณอากาศทั้งสอง มีค่าตั้งแต่ 0 (คือปิด TPS และเปิด EGR) ถึง 1 (คือปิด EGR และเปิด TPS) ซึ่งบอกถึงปริมาณอากาศที่มีอยู่ต่อปริมาณก๊าซทั้งหมดในขณะนั้นและที่บริเวณนั้น ดังนั้นอัตราการไหล โดย มวล ของ เฉพาะก๊าซที่ยังไม่เผาไหม้ (unburned EGR + fresh air) คือ

$$\dot{m}_{\beta,ub} = \left(1 - \hat{F}_{int}\right)\dot{\hat{m}}_\beta\left(t\right) \tag{16}$$

โดยพิจารณาร่วมกับ Speed-Density Equation (2) บนท่อร่วมไอดี และค่า $\hat{F}_{int}$, $\hat{P}_m$ ที่ได้จากตัวสังเกตแบบแผนเลื่อน และเนื่องจากเครื่องยนต์ DF-PCCI มีระบบของหัวฉีดก๊าซธรรมชาติที่ติดตั้งในบริเวณปริมาตรควบคุม (control volume) ของท่อร่วมไอดี ทำให้ความดันในท่อร่วมไอดีจะมีค่าสูงกว่าปกติอันเนื่องจากแรงดันของการฉีดก๊าซธรรมชาติ ดังนั้นอัตราการไหลโดยมวลที่เข้ากระบอกสูบของก๊าซที่ยังไม่เผาไหม้ (จาก EGR) และอากาศ กำหนดโดย

$$\dot{m}_{asp} = \left(1 - \hat{F}_{int}\right)\dot{\hat{m}}_\beta\left(t\right) - \dot{m}_{cng}\left(t\right) \tag{17}$$

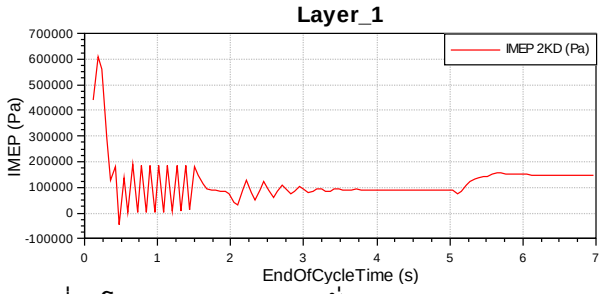
ภาพรวมของการคำนวณปริมาณอากาศในกระบอกสูบแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ภาพรวมของระบบการคำนวณปริมาณอากาศในกระบอกสูบ

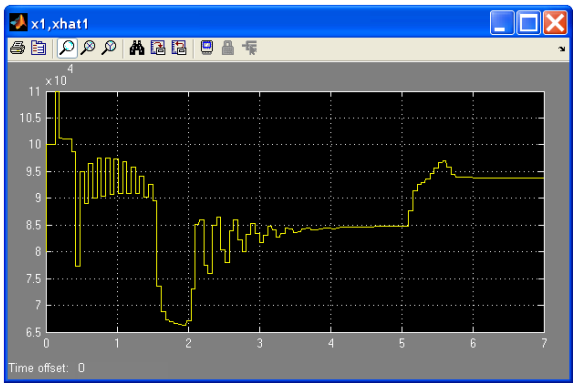
6. ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ตัวสังเกต แบบแผนเลื่อนสำหรับ การประมาณค่าอากาศในกระบอกสูบที่ออกแบบในหัวข้อที่ 4 จะนำมาจำลองการทำงานบน *MATLAB Simulink®* และเชื่อมกับระบบ *AVL Boost®* ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นเครื่องยนต์เสมือน (virtual engine) โดยรับคำสั่ง Peddle 0.2%-0.4% ที่อัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000rpm และสอดคล้องกับโหลด IMEP ดังรูปที่ 3

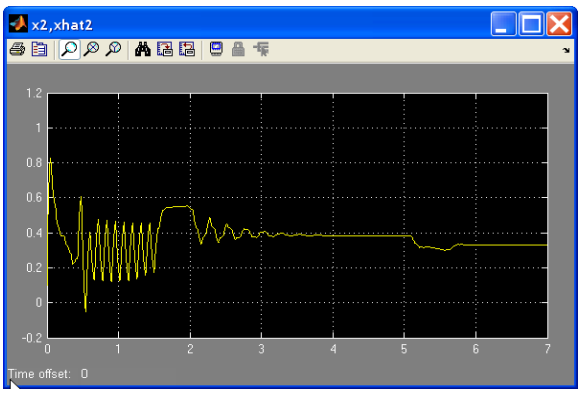


รูปที่ 3 โหลด IMEP จากคำสั่ง Peddle 0.2%-0.4% ในช่วงเวลา 5-5.5sec

สำหรับผลลัพธ์การประมาณค่าตัวแปรส เตท $\hat{P}_m$ และ $\hat{F}_{int}$ ที่ได้จากตัวสังเกตแสดงดังรูปที่ 4 โดยพบว่าตัวแปรสเตทที่ประมาณค่าได้ส ามารถติดตามสัญญาณออกจริงที่วัดจาก *AVL Boost* ได้เป็นที่น่าพอใจโดยมีค่าคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกิน 20 kPa สำหรับค่า BGR (F_{int}) หรือ $\hat{x}_2$ สามารถติดตามสถานะของแบบจำลองอ้างอิง x_2 ได้เป็นอย่างดี (ดูรูปที่ 5)

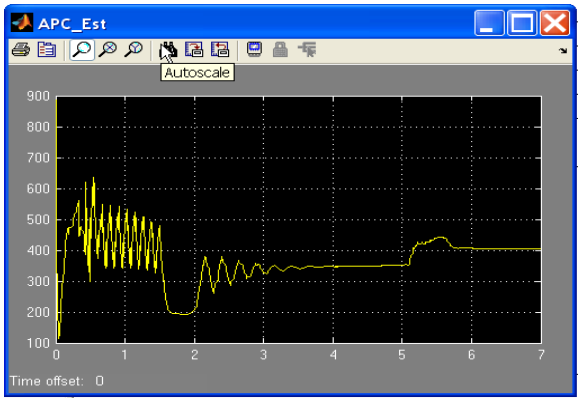


รูปที่ 3 ความดันในท่อร่วมไอดี P_m ที่ได้จากตัวสังเกต $\hat{x}_1$ เทียบกับ x_1 ใน *AVL Boost®*

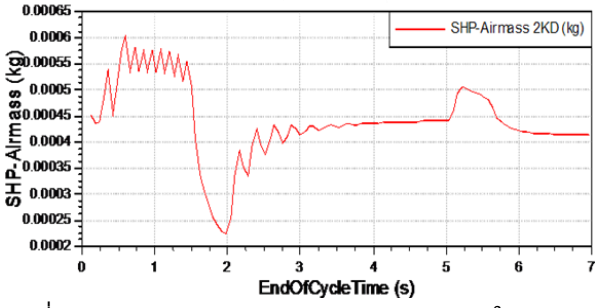


รูปที่ 4 BGR ในท่อร่วมไอดี $\hat{F}_{int}$ ที่ได้จากตัวสังเกต $\hat{x}_2$ เทียบกับ x_2 ในแบบจำลองอ้างอิง

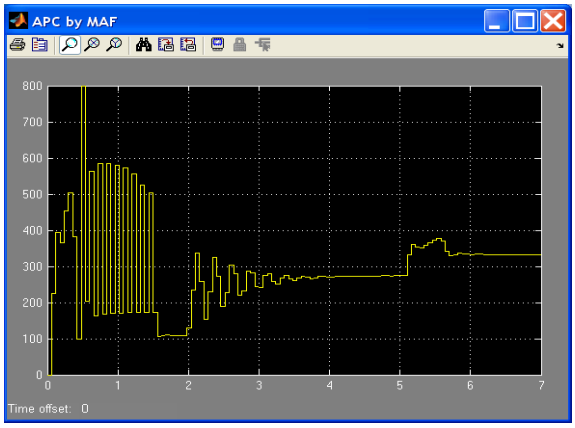
ผลลัพธ์ของสมการ (17) แสดงในรูปที่ 5 ในหน่วยของ kg/s เราต้องแปลงให้เป็นหน่วย kg/stroke เพื่อเปรียบเทียบกับปริมาณอากาศต่อกระบอกสูบ (APC) จาก *AVL Boost®* (รูปที่ 6) โดยพบว่า APC จากตัวสังเกตมีค่า 350mg/stroke ซึ่งน้อยกว่าปริมาณอากาศที่อ่านได้จาก *AVL Boost®* คือ 0.00043kg (หรือ 430mg/stroke) เนื่องจา กมีการคิดมว ลก๊าซทั้งหมด (burned + unburned) จึงทำให้มีมากกว่าที่ประมาณได้จากตัวสังเกตซึ่งคิดเฉพาะปริมาณอากาศ (fresh air) และก๊าซที่ยังไม่เผาไหม้ (unburned gas) เท่านั้น สอดคล้องกับสมมติฐานเบื้องต้นคือ ค่ามวลของอากาศที่ได้จากตัวสังเกต ควรจะมีค่ามากกว่า 280mg/stroke ซึ่งอ่านได้จากเซ็นเซอร์ MAF (รูปที่ 7) เนื่องจากได้รวมเอาปริมาณอากาศที่เหลืออยู่ในก๊าซไอเสียย้อนกลับไปคิดด้วย



รูปที่ 5 ปริมาณอากาศต่อกระบอกสูบ (APC) ในหน่วย mg/stroke ที่ประมาณค่าได้



รูปที่ 6 ปริมาณอากาศต่อกระบอกสูบ (APC) ในหน่วย kg จาก *AVL Boost*®



รูปที่ 7 ปริมาณอากาศต่อกระบอกสูบ (APC) ในหน่วย mg/stroke ที่ประมาณค่าได้

6. สรุปผลและวิจารณ์

บทความนี้เสนอแบบจำลองของระบบเส้นทางอากาศประกอบด้วย พลวัตของสองตัวแปรสเตท คือ ความดันในท่อร่วมไอดี (intake manifold pressure) และอัตราส่วนโดยมวลของก๊าซที่เผาไหม้แล้วต่อก๊าซทั้งหมด (Burned Gas Ratio; BGR) อีกทั้งการออกแบบของตัวสังเกตแบบแผนเลื่อนทำให้ตัวแปรสเตททั้งสองของตัวสังเกตสามารถติดตามแบบจำลองอ้างอิง (reference model) ได้อย่างดีทำให้สามารถคำนวณปริมาณอากาศ (fresh air) และก๊าซที่ยังไม่เผาไหม้ (unburned gas) ในท่อร่วมไอดีซึ่งจะถูกดูดเข้ากระบอกสูบต่อไป การคำนวณปริมาณอากาศในกระบอกสูบด้วยตัวสังเกตที่นำเสนอได้บทความนี้มีข้อดีคือ 1) ลดเวลาล่าช้าของ MAF เซ็นเซอร์โดยใช้สถานะของอุณหภูมิและความดันที่ท่อร่วมไอดีซึ่งอยู่ใกล้กระบอกสูบมากกว่าในการคำนวณ 2) คำนึงถึงผลของอากาศที่เหลือจากการเผาไหม้ใน EGR โดยอาศัย BGR ในการคำนวณปริมาณก๊าซที่ยังไม่เผาไหม้เท่านั้น 3) ไม่ต้องการการติดตั้งเซ็นเซอร์เพิ่มเติม

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Waszkiewics, S.D., Tierney, M.J. and Scott, H.S. (2009). Development of coated, annular fins for adsorption chillers, *Applied Thermal Engineering*, vol. 29(11-12), August 2009, pp. 2222 – 2227.

[2] Wilfrid Perruquetti and Jean Pierre Barbot (Eds.) (2002). *Sliding Mode Control in Engineering*, Marcel Dekker, Inc.,

[2] Stotsky, A.A. (2009). *Automotive Engines: Control, Estimation, Statistical Detection*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

[3] Khalil, H.K. (2002). *Nonlinear Systems*, third edition, Prentice Hall.

[4] Chauvin, J., Petit, N., Rouchon, P., Gilles Corde, and Vigild, C. Air Part Estimation on Diesel HCCI Engine, *SAE International Conference*, No. 2006-01-1085, 2006.

[5] Chauvina, J., Corde, G., Petit, N. and Rouchonb, P., Motion Planning for Experimental Air Path Control of a Diesel Homogeneous Charge-Compression Ignition Engine, *Control Engineering Practice*, Vol. 16 page 1081-1091, 2008.