

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

อิทธิเดช มูลมั่งมี<sup>1</sup>, บัณฑิต จิรนนท์ศักดิ์<sup>1</sup> และ วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสิ้นเสเทือน (CRV Lab) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพฯ 10900

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

\* ติดต่อ: โทรศัพท์: 086-57940404

E-mail: [profittidej@gmail.com](mailto:profittidej@gmail.com) (โทรศัพท์ 080-0831118 และ Email: [bunditji@hotmail.com](mailto:bunditji@hotmail.com))

**บทคัดย่อ**

บทความนี้เสนองานวิจัยเชิงประยุกต์เกี่ยวกับการประมาณค่าอากาศในกระบอกสูบของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดขนาด 2.5 ลิตร ที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงร่วมกับน้ำมันดีเซลและทำงานในโหมด DF-PCCI (Diesel-Dual-Fuel Premixed-Charge Compression Ignition Engine) มีการนำอากาศเข้าด้วยระบบเทอร์โบชาร์จเจอร์ (turbocharger) และระบบการนำไอเสียกลับมาเผาไหม้ซ้ำ (Exhaust Gas Recirculation; EGR) ปริมาณอากาศจริงที่ไหลเข้าสู่กระบอกสูบมีความสำคัญในการกำหนดปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงและการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ โดยเฉพาะเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วรอบและโหลดของเครื่องยนต์อย่างทันทีทันใด โดยปกติเซ็นเซอร์วัดอัตราการไหลอากาศ (MAF sensor) ที่ติดตั้งบริเวณด้านหน้าไม่สามารถให้ปริมาณอากาศจริงที่ใช้ในกระบอกสูบได้ เนื่องจากมีผลของปริมาณออกซิเจนที่เหลือจากการเผาไหม้ในรอบก่อนหน้า อีกทั้งมีเวลาล่าช้าในการวัดและความคลาดเคลื่อนของตัวเซ็นเซอร์ ทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลงและส่งผลกระทบต่อตอบสนองการขับขี่ การประมาณค่าอากาศนี้อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสภาวะทางอุณหพลศาสตร์ที่ทอร่วมไอดีร่วมกับความสัมพันธ์ของอัตราส่วนก๊าซที่เผาไหม้แล้ว (Burned Gas Ratio; BGR) ที่อยู่ในทอร่วมไอดีมาสร้างสมการสเตทของระบบ และออกแบบตัวสังเกตแบบแผนเลื่อน (Sliding-mode observer) ซึ่งมีสมบัติคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบได้ ผลจากการทดลองประมาณค่าอากาศในกระบอกสูบด้วยตัวสังเกตแบบแผนเลื่อนนี้พบว่าให้ปริมาณมวลอากาศที่เข้ากระบอกสูบมากกว่าที่อ่านได้จากเซ็นเซอร์ MAF เนื่องจากคำนึงถึงผลของอากาศที่เหลือจากการเผาไหม้ใน EGR โดยอาศัย BGR ในการคำนวณปริมาณก๊าซที่ยังไม่เผาไหม้ จำลองผลบนโปรแกรม MATLAB Simulink<sup>®</sup> และ AVL Boost<sup>®</sup>

**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*<sup>®</sup> 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) เพื่อให้ปริมาณอากาศที่ไหลเข้ามาสอดคล้องกับความต้องการของเครื่องยนต์ในขณะนั้น ซึ่งกำหนดโดยคำสั่งคันเร่ง (peddle) และอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ (engine speed) และเพื่อกำหนดปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงตามค่าที่กำหนดไว้ ดังนั้นจึงส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ (performance), การขับขี่ (drivability) และปริมาณมลพิษในไอเสีย (emissions) เป็นต้น เครื่องยนต์ DF-PCCI เป็นเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดซึ่งดัดแปลงให้สามารถ

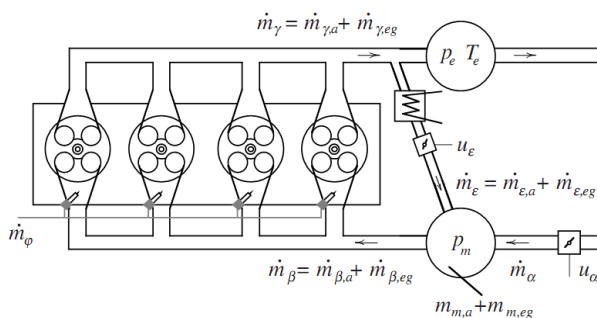
เผาไหม้เชื้อเพลิงได้ ทั้งสองชนิดพร้อมกันชนิดคือ ดีเซลและก๊าซธรรมชาติ (natural gas)

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

อย่างเดียวกัน คือ ค่าอัตราการไหลโดยมวลของอากาศที่อ่านได้ไม่ตรงกับมวลอากาศจริงที่เข้าสู่เครื่องยนต์ ซึ่งมีเหตุผลดังนี้ 1) ผลกระทบของเวลาล่าช้า (time delay) เนื่องจากตำแหน่งทางกายภาพของการติดตั้งเซ็นเซอร์ MAF 2) เครื่องยนต์ DF-PCCI มีลักษณะการเผาไหม้ส่วนใหญ่เป็นการเผาไหม้บาง (lean burn) นั่นคือมีปริมาณอากาศส่วนเกิน (exceed air) จากการเผาไหม้เหลือปนมากกับไอเสียในระบบไอเสียย้อนกลับ (EGR system) เข้าสู่เครื่องยนต์ อัตราการไหลโดยมวลอากาศส่วนเกินนี้ไม่สามารถทราบค่าจากเซ็นเซอร์ได้ ข้อบกพร่องดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะ การขับชี้ และปริมาณมลพิษในไอเสียไม่มาก หากเครื่องยนต์ทำงานที่อัตราเร็วรอบคงที่ (steady-state operation) แต่หากเครื่องยนต์อยู่ในช่วงของการเปลี่ยนอัตราเร็วรอบหรือโหลดอย่างทันทีทันใดจะส่งผลกระทบต่อ การควบคุมอย่างมาก [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  $\gamma$  แทนตำแหน่งในท่อร่วมไอดีและท่อร่วมไอเสียตามลำดับ ตัวห้อย  $a$  และ  $eg$  แทนก๊าซที่ยังไม่เผาไหม้ (สามารถแทนด้วยอากาศ) และก๊าซที่เผาไหม้แล้ว ตามลำดับ ตัวห้อย  $\alpha$  แทนอากาศจากภายนอก (fresh air) จากรูปที่ 1 อากาศไหลเข้าสู่ระบบผ่านลิ้นเร่ง  $u_\alpha$  ด้วยอัตราการไหลโดยมวลของอากาศ  $\dot{m}_\alpha$  รวมเข้ากับมวลของไอเสีย  $\dot{m}_\epsilon$  ในระบบไอเสียย้อนกลับที่ท่อร่วมไอดี ซึ่งมีเซ็นเซอร์วัดความดัน (intake manifold pressure;  $P_m$ ) และอุณหภูมิ (intake air temperature;  $T_m$ ) ส่วนผสมของอากาศและไอเสียที่มาจากไอเสียย้อนกลับ จะเข้าสู่เครื่องยนต์ด้วยอัตราการไหลโดยมวล  $\dot{m}_\beta$ , อัตราการไหลโดยมวลของดีเซล  $\dot{m}_\phi$  เพื่อจ่ายน้ำมันจากหัวฉีดดีเซลเข้าเผาไหม้ในเครื่องยนต์ และปล่อยก๊าซไอเสีย  $\dot{m}_\gamma$  ผ่านท่อร่วมไอเสีย ซึ่งมีเซ็นเซอร์วัดความดัน (exhaust manifold pressure;  $P_e$ ) และอุณหภูมิ (exhaust temperature;  $T_e$ ) การควบคุมอัตราการไหลโดยมวลของไอเสียย้อนกลับ  $\dot{m}_\epsilon$  จะควบคุมโดยตำแหน่งการปิดเปิด %  $u_\epsilon$  ของวาล์ว EGR อัตราการไหลโดยมวลของไอเสียย้อนกลับแทนด้วย  $\dot{m}_\epsilon$  ซึ่งจะประกอบด้วยมวลของก๊าซที่เผาไหม้แล้ว  $\dot{m}_{\epsilon, eg}$  และก๊าซส่วนที่ยังไม่เผาไหม้  $\dot{m}_{\epsilon, a}$  แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเส้นทางอากาศมีรายละเอียดซึ่งจะแสดงต่อไปนี้

### 2.1 Total Mass Balance in the Intake Manifold

พิจารณากฎของก๊าซอุดมคติ (ideal gas law) ที่ท่อร่วมไอดี :  $P_m V = M_m RT_m$  เมื่อสมมติให้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีน้อยมาก จะได้

$$\dot{P}_m = \frac{RT_m}{V_m} (\dot{m}_\alpha + \dot{m}_\epsilon + \dot{m}_{cng} - \dot{m}_\beta) \quad (1)$$

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

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

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

## 2.2 Composition Balance in the Intake Manifold

นิยาม อัตราส่วนโดยมวลระหว่างก๊าซที่เผาไหม้แล้ว (burned gas)  $m_{m,eg}$  ต่อก๊าซทั้งหมด (ส่วนที่เผาไหม้แล้ว (burned) + ส่วนที่ยังไม่เผาไหม้ (unburned gas)) โดยพิจารณาที่ท่อร่วมไอดี /ท่อร่วมไอเสีย ตามลำดับ กำหนดโดย

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

และ

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

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

$$\dot{F}_{int} = \frac{RT_m}{P_m V_m} (\dot{m}_\varepsilon (F_{egh} - F_{int}) - (\dot{m}_\alpha + \dot{m}_{cng}) F_{int}) \quad (5)$$

## 2.3 การคำนวณอัตราส่วนของมวลก๊าซที่เผาไหม้แล้วในท่อร่วมไอเสีย ( $F_{exh}$ )

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

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

โดยที่  $\dot{m}_\varphi$  แทนอัตราการไหลโดยมวลของดีเซลที่ใช้,  $R$  แทนอัตราส่วนโดยพลังงานของการใช้เพลิง ก๊าซธรรมชาติต่อ ดีเซล,  $(A/F)_g$  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  $\lambda$  ข้างต้น จะได้

$$\begin{aligned} m_{\gamma,eg} &\triangleq \dot{m}_{\beta,eg} (t - \tau_{IEG}) + \frac{1}{\lambda(t - \tau_{IEG})} \dot{m}_{\beta,a} (t - \tau_{IEG}) \\ &\quad + [\dot{m}_\varphi (t - \tau_{IEG}) + \dot{m}_{cng} (t - \tau_{IEG})] \end{aligned}$$

และ

$$\begin{aligned} m_\gamma &\triangleq [\dot{m}_{\beta,eg} (t - \tau_{IEG}) + \dot{m}_{\beta,a} (t - \tau_{IEG})] \\ &\quad + [\dot{m}_\varphi (t - \tau_{IEG}) + \dot{m}_{cng} (t - \tau_{IEG})] \end{aligned}$$

โดยที่  $\tau_{IEG} \approx 3\pi/\omega_\varepsilon$  เป็นช่วงเวลาหน่วง เนื่องจากการดูดอากาศโดย เริ่มจากวาล์วไอดีปิดในจังหวะ ดูดอากาศเข้า (aspiration center) ไปจนถึงจุดศูนย์กลางของจังหวะคายไอเสีย (exhaust center) เพื่อวัดค่า  $\lambda$  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  $\theta_{egr}$  เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และความดันในท่อร่วมไอเสีย  $u_\varepsilon$  แทนตำแหน่งของการเปิดวาล์ว 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  $u_\varepsilon$  แทนอัตราการไหลโดยมวลของก๊าซไอเสียย้อนกลับ  $\dot{m}_{egr}$  บนท่อ EGR โดยกำหนดค่าเริ่มต้น  $\theta_{egr} = 0.014$  ในการเขียนโปรแกรม

### 2.5 สมการสแตทของระบบทางเดินอากาศ

ในที่นี้สมมติว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีค่าน้อยมาก ( $\dot{T}_m \approx 0$ ) นั่นคือเป็นกระบวนการอุณหภูมิคงที่ (isothermal) โดยแทนค่า (2) ใน (1) และสมมติให้  $x = [P_m \ F_m]^T \in \mathcal{R}^2$  เป็นตัวแปรสแตท (state variables) และ  $y = P_m \in \mathcal{R}^1$  เป็นตัวแปรเอาต์พุต จะได้สมการสแตท (state equations) หรือแบบจำลองอ้างอิง (reference model) สำหรับออกแบบตัวสังเกต (หัวข้อที่ 4) ดังนี้

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

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

### 3. ทฤษฎีการออกแบบตัวสังเกตแบบแผนเลื่อน

พิจารณาระบบไม่เป็นเชิงเส้น

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

โดยที่  $x \in \mathcal{R}^n, u \in \mathcal{R}^m$  และ  $y \in \mathcal{R}^n$  สมการสแตทของตัวสังเกตแบบแผนเลื่อนของระบบ (8) อยู่ในรูป

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

โดยที่  $\hat{x} \in \mathcal{R}^n, \Gamma \in \mathcal{R}^{n \times p}$  เป็นค่าเกนของตัวสังเกต และ  $\text{sign}(S) \in \mathcal{R}^n$  เป็นฟังก์ชันที่กำหนดที่สวิตช์เมื่อ

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

โดยที่  $e = x - \hat{x}$  เป็นตัวแปรสแตทคลาดเคลื่อน (error state variables) และ  $\text{sign}(S)$  สอดคล้องกับ

$$\text{sign}(S) = [\text{sign}(s_1) \ \dots \ \text{sign}(s_p)]^T \quad (11)$$

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

### 4. การออกแบบตัวสังเกตแบบแผนเลื่อน

พิจารณาจาก (7) พลวัตของตัวสังเกตแบบแผนเลื่อนกำหนดโดย

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

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



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

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

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

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

$\tilde{x}_2$  - Dynamics:

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

โดยที่  $a_{int} \triangleq \frac{\alpha_m}{y} (\dot{m}_\alpha + \dot{m}_{cng} + \theta_{egr} u_\varepsilon)$  และ

$b_{int} \triangleq \frac{\alpha_m}{y} (F_{exh} - x_2) u_\varepsilon$  มีค่าขอบเขตบนเป็นบวก นั่นคือ

$$0 < a_m \leq a_{int} (t) \leq a_M$$

และ

$$0 < b_m \leq b_{int} (t) \leq b_M$$

สำหรับทุกเวลา  $t \geq 0$  จะได้

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

ซึ่งมีผลเฉลยกำหนดโดย

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

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

$$\tilde{x}_2 (t) \leq c e^{-\int_0^t a_{int} (s) ds} \leq c e^{-a_{int} t}$$

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

## 5. การคำนวณปริมาณอากาศในกระบอกสูบ

เนื่องจากพารามิเตอร์สำคัญที่บ่งบอกปริมาณอากาศที่เหลือจากการเผาไหม้คือ BGR โดยอาศัย (3) และ (4) จะได้

สัดส่วนของปริมาณอากาศในท่อร่วมไอดี:

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

สัดส่วนของปริมาณอากาศในท่อร่วมไอเสีย:

$$1 - F_{exh} = \frac{m_{\gamma,a}}{m_\gamma} \quad (15)$$

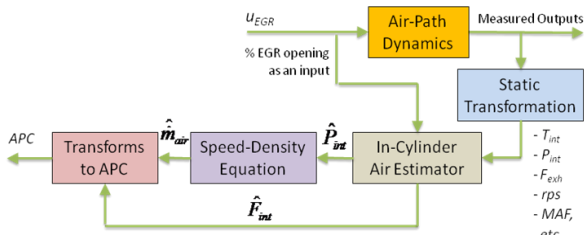
โดยสัดส่วนของปริมาณอากาศทั้งสอง มีค่าตั้งแต่ 0 (คือปิด TPS และเปิด EGR) ถึง 1 (คือเปิด EGR และเปิด TPS) ซึ่งบอกถึงปริมาณอากาศที่มีอยู่ต่อปริมาณก๊าซทั้งหมดในขณะนั้นและที่บริเวณนั้น ดังนั้นอัตราการไหล โดย มวล ของ เฉพาะก๊าซที่ยังไม่เผาไหม้ (unburned EGR + fresh air) คือ

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

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

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

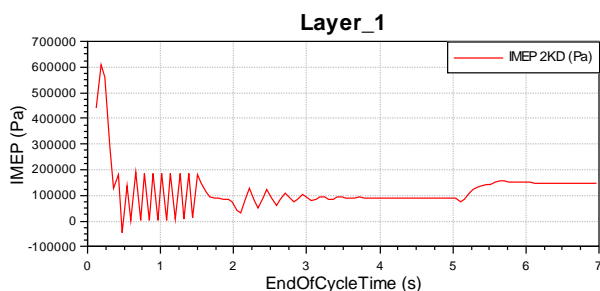
ภาพรวมของการคำนวณปริมาณอากาศในกระบอกสูบ แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ภาพรวมของระบบการคำนวณปริมาณอากาศ  
ในกระบอกสูบ

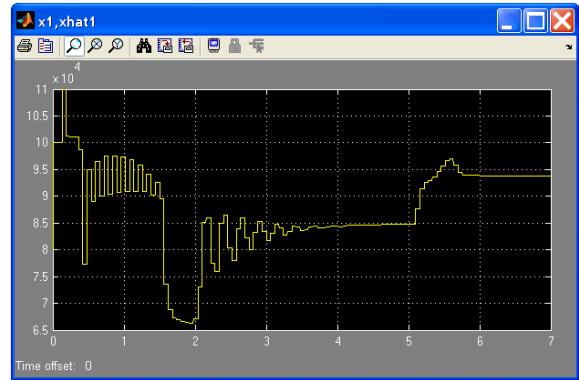
## 6. ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ตัวสังเกตแบบแผนเคลื่อนสำหรับ การประมาณค่า  
อากาศในกระบอกสูบที่ออกแบบในหัวข้อที่ 4 จะนำมา  
จำลองการทำงานบน *MATLAB Simulink*<sup>®</sup> และเชื่อม  
กับระบบ *AVL Boost*<sup>®</sup> ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นเครื่องยนต์  
เสมือน (virtual engine) โดยรับคำสั่ง Peddle 0.2%-  
0.4% ที่อัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000rpm และ  
สอดคล้องกับโหลด IMEP ดังรูปที่ 3

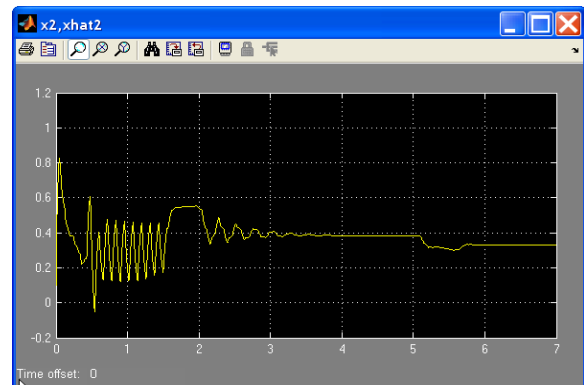


รูปที่ 3 โหลด IMEP จากคำสั่ง Peddle 0.2%-0.4%  
ในช่วงเวลา 5-5.5sec

สำหรับผลลัพธ์การประมาณค่าตัวแปรส เตท  $\hat{P}_m$  และ  
 $\hat{F}_{int}$  ที่ได้จากตัวสังเกตแสดงดังรูปที่ 4 โดยพบว่าตัว  
แปรส เตทที่ประมาณค่าได้ส ามารถติดตามสัญญาณ  
ออกจริงที่วัดจาก *AVL Boost* ได้เป็นที่น่าพอใจโดยมี  
ค่าคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกิน 20 kPa สำหรับค่า BGR  
( $F_{int}$ ) หรือ  $\hat{x}_2$  สามารถติดตามสถานะของ  
แบบจำลองอ้างอิง  $x_2$  ได้เป็นอย่างดี (ดูรูปที่ 5)

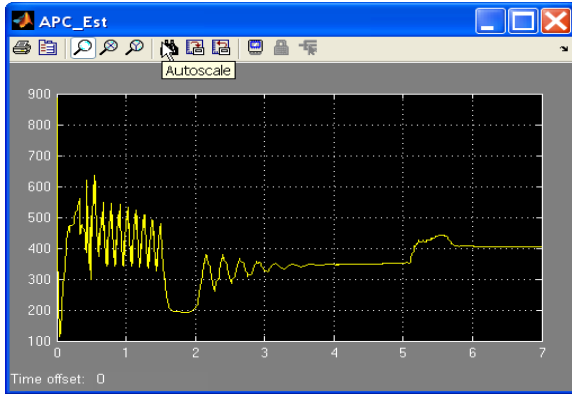


รูปที่ 3 ความดันในท่อร่วมไอดี  $P_m$  ที่ได้จากตัวสังเกต  
 $\hat{x}_1$  เทียบกับ  $x_1$  ใน *AVL Boost*<sup>®</sup>

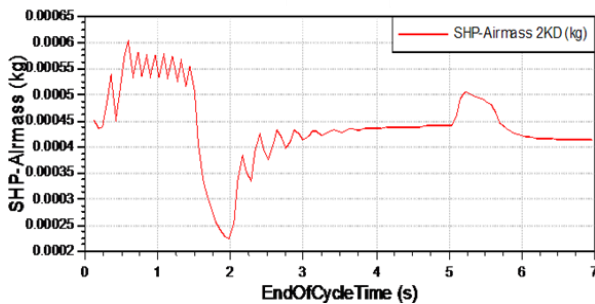


รูปที่ 4 BGR ในท่อร่วมไอดี  $\hat{F}_{int}$  ที่ได้จากตัวสังเกต  
 $\hat{x}_2$  เทียบกับ  $x_2$  ในแบบจำลองอ้างอิง

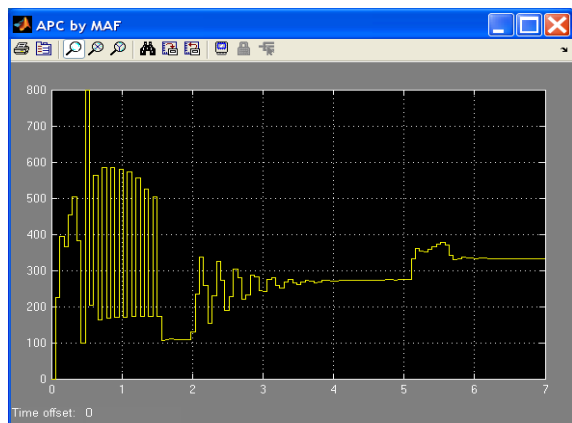
ผลลัพธ์ของสมการ (17) แสดงในรูปที่ 5 ในหน่วยของ  
kg/s เราต้องแปลงให้เป็นหน่วย kg/stroke เพื่อ  
เปรียบเทียบกับปริมาณอากาศต่อกระบอกสูบ ( APC)  
จาก *AVL Boost*<sup>®</sup> (รูปที่ 6) โดยพบว่า APC จากตัว  
สังเกตมีค่า 350mg/stroke ซึ่งน้อยกว่าปริมาณอากาศ  
ที่อ่านได้จาก *AVL Boost*<sup>®</sup> คือ 0.00043kg (หรือ  
430mg/stroke) เนื่องจากมีการคิดมวล ล ก๊าซทั้งหมด  
(burned + unburned) จึงทำให้มีมากกว่าที่ประมาณ  
ได้จากตัวสังเกตซึ่งคิดเฉพาะปริมาณอากาศ (fresh  
air) และก๊าซที่ยังไม่เผาไหม้ (unburned gas) เท่านั้น  
สอดคล้องกับสมมติฐานเบื้องต้นคือ ค่ามวลของอากาศ  
ที่ได้จากตัวสังเกต ควรจะมีค่ามากกว่า 280mg/stroke  
ซึ่งอ่านได้จากเซ็นเซอร์ MAF (รูปที่ 7) เนื่องจากได้  
รวมเอาปริมาณอากาศที่เหลืออยู่ในก๊าซไอเสีย  
ย้อนกลับไปคิดด้วย



รูปที่ 5 ปริมาณอากาศต่อกระบอกสูบ (APC) ในหน่วย mg/stroke ที่ประมาณค่าได้



รูปที่ 6 ปริมาณอากาศต่อกระบอกสูบ (APC) ในหน่วย kg จาก AVL Boost<sup>®</sup>



รูปที่ 7 ปริมาณอากาศต่อกระบอกสูบ (APC) ในหน่วย mg/stroke ที่ประมาณค่าได้

## 6. สรุปผลและวิจารณ์

บทความนี้เสนอแบบจำลองของระบบเส้นทางอากาศประกอบด้วย พลวัตของสองตัวแปรสเตท คือ ความดันในท่อร่วมไอดี (intake manifold pressure) และอัตราส่วนโดยมวลของก๊าซที่เผาไหม้แล้วต่อก๊าซทั้งหมด (Burned Gas Ratio; BGR) อีกทั้งการ

ออกแบบของตัวสังเกตแบบแผนเคลื่อนทำให้ตัวแปรสเตททั้งสองของตัวสังเกตสามารถติดตามแบบจำลองอ้างอิง (reference model) ได้อย่างดีทำให้สามารถคำนวณปริมาณอากาศ (fresh air) และก๊าซที่ยังไม่เผาไหม้ (unburned gas) ในท่อร่วมไอดีซึ่งจะถูกดูดเข้ากระบอกสูบต่อไป การคำนวณปริมาณอากาศในกระบอกสูบด้วยตัวสังเกตที่นำเสนอได้บทความนี้มีข้อดีคือ 1) ลดเวลาล่าช้าของ MAF เซ็นเซอร์โดยใช้สถานะของอุณหภูมิและความดันที่ท่อร่วมไอดีซึ่งอยู่ใกล้กระบอกสูบมากกว่าในการคำนวณ 2) ค่านี้ถึงผลของอากาศที่เหลือจากการเผาไหม้ใน EGR โดยอาศัย BGR ในการคำนวณปริมาณก๊าซที่ยังไม่เผาไหม้เท่านั้น 3) ไม่ต้องการการติดตั้งเซ็นเซอร์เพิ่มเติม

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Waszkiewicz, 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.