

การประมาณค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม
โดยใช้เทคนิคตัวกรองคาลมาน
In – Cylinder Air Estimation on Diesel Dual Fuel Engine Using Kalman Filter

บัณฑิต จิรนนท์ศักดิ์¹, อิทธิเดช มุลมั่งมี² และ วิฑิต ฉัตรรัตนกุลชัย^{1*}

^{1,2,3}ห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสัมผัสเทียม (CRVLAB) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เขต
จตุจักร จ.กรุงเทพฯ 10900

*ติดต่อ: bunditji@hotmail.com, 080 083 1118

บทคัดย่อ

ความไม่แม่นยำในการทราบค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์ลดลง เนื่องจากปริมาณอากาศในกระบอกสูบมีความสัมพันธ์กับการฉีดน้ำมันและการเผาไหม้ งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการประมาณค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบโดยใช้เทคนิคตัวกรองคาลมานแบบขยาย (Extended Kalman Filter; EKF) สมการสถานะของระบบออกแบบโดยใช้สมการของก๊าซอุดมคติที่ทอร่วมไอดี และนำไปใช้กับแบบจำลองของเครื่องยนต์จากโปรแกรม AVL-Boost โดยเป็นการจำลองเครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบ ขนาด 2.5 ลิตร ที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงร่วมเมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้จากตัวกรองคาลมานแบบขยายกับข้อมูลจากเซ็นเซอร์ MAF (Mass Air Flow Sensor) พบว่าตัวกรองคาลมานแบบขยายสามารถลดความผิดพลาดในการประมาณค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบได้สูงถึง 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการประมาณค่าอากาศดังกล่าวด้วยเซ็นเซอร์ MAF โดยอ้างอิงข้อมูลจากโปรแกรม AVL-Boost

คำหลัก: ตัวกรองคาลมานแบบขยาย, เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม, ก๊าซธรรมชาติ

Abstract

Inaccuracy of the in-cylinder air estimation decreases the engine performance because it directly relates to the combustion and the amount of injected fuel. In this work, an Extended Kalman Filter (EKF) is proposed as observer of the in-cylinder air estimation on the engine model from AVL-Boost. We used the ideal gas law to design the system model in the intake manifold of a four cylinders engine 2.5 liter running on diesel dual fuel mode with natural gas. The comparisons are based on simulation results between air estimation from the EKF and mass air flow (MAF) sensor. When compared to the data from MAF sensor, the EKF estimator can reduce estimation error up to 20 percent referring to the in-cylinder air from AVL-Boost.

Keywords: Extended Kalman filter (EKF), Diesel Dual Fuel, Natural gas

1. บทนำ

ความไม่แม่นยำในการทราบค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ทำให้การใช้เชื้อเพลิงไม่เต็มประสิทธิภาพ เนื่องจากปริมาณอากาศในกระบอกสูบมีความสัมพันธ์กับปริมาณการฉีดน้ำมันและการเผาไหม้ แต่เนื่องจากไม่สามารถวัดปริมาณอากาศในกระบอกสูบด้วยเซ็นเซอร์ได้ เป็นผลทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทราบปริมาณอากาศจริงในกระบอกสูบ โดย

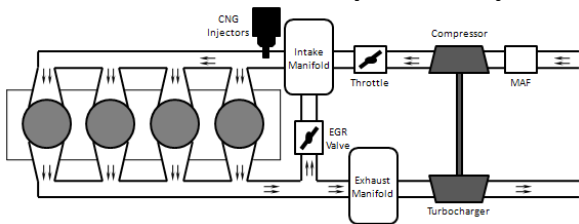
เบื้องต้นการทำนายปริมาณอากาศในกระบอกสูบอาศัยข้อมูลจากเซ็นเซอร์ MAF ซึ่งติดตั้งไว้ที่ตัวกรองอากาศ (Air Filter) เพียงอย่างเดียว แต่การทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลโดยส่วนใหญ่มีการนำไอเสียย้อนกลับ (Exhaust Gas Recirculation; EGR) มาใช้ ซึ่งในไอเสียย้อนกลับนั้นมีอากาศที่ยังไม่เผาไหม้รวมอยู่ด้วย จึงทำให้เกิดความไม่แม่นยำในการทำนายดังกล่าวขึ้น อีกทั้งปริมาณการฉีดก๊าซธรรมชาติยังส่งผลต่ออุณหภูมิ ความดัน และมวล

อากาศทั้งหมดในท่อร่วมไอดีอีกด้วย จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการประมาณค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลขนาด 2.5 ลิตรที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงร่วมให้มีความแม่นยำมากขึ้น โดยนำเสนอการใช้เทคนิคตัวกรองคาลมานแบบขยายในการประมาณค่าอากาศในกระบอกสูบ โดยมี EGR และสัดส่วนระหว่างก๊าซที่เผาไหม้แล้วต่อก๊าซทั้งหมดในท่อร่วมไอดีเป็นตัวแปรสำคัญ

บทความนี้แบ่งการนำเสนอเป็นส่วนๆ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแสดงในส่วนที่ 2, ทฤษฎีและการออกแบบตัวสังเกตตัวกรองคาลมานแบบขยายแสดงในส่วนที่ 3, ผลการจำลองของตัวสังเกตแสดงในส่วนที่ 4 และส่วนที่ 5 แสดงการสรุปผลและวิจารณ์

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ

ระบบทางเดินอากาศเข้าเครื่องยนต์เริ่มจากอากาศภายนอกผ่านเข้ามาที่กรองอากาศ ทำการวัดอัตราการไหลของอากาศที่จุดนี้โดยเซ็นเซอร์ MAF และไหลผ่านเข้าสู่ท่อร่วมไอดีโดยผ่านวาล์วลิ้นปีกผีเสื้อ ทำการฉีดก๊าซธรรมชาติเข้าไปผสมกับอากาศที่ปลายท่อร่วมไอดีก่อนไหลเข้าสู่กระบอกสูบ เมื่อผ่านกระบวนการเผาไหม้ในกระบอกสูบแล้ว ไอดีที่เกิดขึ้นจะถูกส่งไปยังท่อร่วมไอดี แต่จะมีไอดีส่วนหนึ่งไหลย้อนกลับเข้าสู่ท่อร่วมไอดีโดยผ่านวาล์ว EGR ภาพรวมของระบบทางเดินของอากาศที่เข้าและออกจากกระบอกสูบแสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ระบบทางเดินอากาศที่ผ่านเข้าและออกจากกระบอกสูบของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบออกแบบโดยใช้สมการของก๊าซอุดมคติที่บริเวณท่อร่วมไอดีดังนี้

$$P_{int} V_{int} = M_{int} RT_{int} \quad (1)$$

โดย P_{int} , V_{int} , M_{int} และ T_{int} คือ ความดัน, ปริมาตร, มวล และอุณหภูมิที่ท่อร่วมไอดีตามลำดับ และ R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ เมื่อพิจารณาให้อุณหภูมิในท่อร่วมไอดีมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก จะได้

$$\dot{P}_{int} = \left(\frac{RT_{int}}{V_{int}} \right) \dot{M}_{int}$$

เมื่อ $\dot{m}_{asp} = \dot{m}_{maf} + \dot{m}_{egr} + \dot{m}_{cng} - \dot{M}_{int}$

โดย \dot{m}_{maf} คืออัตราการไหลของอากาศที่อ่านค่าได้จากเซ็นเซอร์ MAF, \dot{m}_{egr} คืออัตราการไหลของไอดีที่ย้อนกลับเข้าสู่ท่อร่วมไอดี, \dot{m}_{cng} คืออัตราการไหล (ปริมาณการฉีด) ของก๊าซธรรมชาติ และ \dot{m}_{asp} คืออัตราการไหลของมวลก๊าซทั้งหมดที่เข้าสู่กระบอกสูบ แสดงสมการ (Speed-Density equation) ได้ดังนี้

$$\dot{m}_{asp} = \eta_{vol} (P_{int}, N_e) \frac{P_{int}}{RT_{int}} V_{cyl} \frac{N_e}{120} \quad (2)$$

โดย N_e คือ ความเร็วรอบเครื่องยนต์ (Engine Speed), V_{cyl} คือปริมาตรกระบอกสูบ (Cylinder Volume) และ $\eta_{vol}(P_{int}, N_e)$ คือประสิทธิภาพเชิงปริมาตร (Volumetric Efficiency) ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปโดยขึ้นอยู่กับความดันที่ท่อร่วมไอดีและความเร็วรอบเครื่องยนต์

หมายเหตุ: หน่วยของตัวแปรทั้งหมดแสดงได้ดังตารางที่ 1
ทำการเขียนสมการการเปลี่ยนแปลงความดันที่ท่อร่วมไอดีใหม่ดังนี้

$$\dot{P}_{int} = \left(\frac{RT_{int}}{V_{int}} \right) (\dot{m}_{maf} + \dot{m}_{egr} + \dot{m}_{cng} - \dot{m}_{asp}) \quad (3)$$

เมื่อมวลอากาศทั้งหมดในท่อร่วมไอดีมีทั้งก๊าซที่ยังไม่เผาไหม้ (Unburned gas) และก๊าซที่เผาไหม้แล้ว (Burned gas) ปะปนกันอยู่ ดังนั้นการประมาณค่าอากาศที่เข้ากระบอกสูบจึงจำเป็นต้องทราบค่าอัตราส่วนของก๊าซที่เผาไหม้แล้ว (Burned gas rate) ในท่อร่วมไอดีแสดงสมการได้ดังนี้

$$F_{int} = \frac{M_{int,bg}}{M_{int}}$$

เมื่อ $M_{int} = M_{int,a} + M_{int,bg}$

โดย F_{int} คืออัตราส่วนส่วนของก๊าซที่เผาไหม้แล้วต่อก๊าซทั้งหมดที่อยู่ในท่อร่วมไอดี, $M_{int,a}$ และ $M_{int,bg}$ คือมวลของก๊าซที่ยังไม่เผาไหม้และมวลของก๊าซที่เผาไหม้แล้วที่อยู่ภายในท่อร่วมไอดีตามลำดับ อัตราการเปลี่ยนแปลงของ F_{int} แสดงได้ดังนี้

$$\dot{F}_{int} = \frac{RT_{int}}{P_{int} V_{int}} (\dot{m}_{egr} F_{exh} - (\dot{m}_{maf} + \dot{m}_{egr} + \dot{m}_{cng}) F_{int}) \quad (4)$$

$$\text{เมื่อ } \dot{m}_{egr} \triangleq \theta_{egr} u \quad (5)$$

โดย θ_{egr} คือฟังก์ชันค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันที่ต่อรวมไอเสีย, u คือตำแหน่งการเปิด-ปิดของวาล์ว EGR และ F_{exh} คือสัดส่วนก๊าซที่เผาไหม้แล้วต่อก๊าซทั้งหมดที่อยู่ในท่อรวมไอเสีย แสดงสมการได้ดังนี้

$$F_{exh}(t) = \frac{\dot{m}_{asp,bg}(t-\tau) + (15.6 + 1.7 R_e) [\dot{m}_{fuel}(t-\tau)]}{\dot{m}_{asp,bg}(t-\tau) + \dot{m}_{asp,a}(t-\tau) + \dot{m}_{fuel}(t-\tau)} \quad (6)$$

$$\text{เมื่อ } \dot{m}_{fuel}(t-\tau) = \dot{m}_d(t-\tau) + \dot{m}_{cng}(t-\tau)$$

$$\text{และ } \tau \approx \frac{3\pi}{N_e}$$

โดย $\dot{m}_{asp,a}$ และ $\dot{m}_{asp,bg}$ คืออัตราการไหลของก๊าซที่ยังไม่เผาไหม้และอัตราการไหลของก๊าซที่เผาไหม้แล้วเข้าสู่กระบอกสูบตามลำดับ, \dot{m}_d คืออัตราการไหล (ปริมาณการฉีด) ของน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล, τ คือช่วงเวลาหน่วงจากจังหวะในการดูดอากาศและเผาไหม้

2.1 การคำนวณปริมาณอากาศในกระบอกสูบ

เมื่อได้ปริมาณก๊าซทั้งหมดที่ไหลเข้ากระบอกสูบจาก (2) แล้ว สามารถคำนวณปริมาณของก๊าซที่ยังไม่เผาไหม้ที่ไหลเข้ากระบอกสูบ โดยนำค่าส่วนต่างของสัดส่วนก๊าซที่เผาไหม้แล้วต่อก๊าซทั้งหมดในท่อรวมไอดี ($1 - F_{int}$) มาใช้คำนวณ แสดงได้ดังนี้

$$\dot{m}_{asp,a} = (\dot{m}_{asp} - \dot{m}_{cng})(1 - F_{int}) \quad (7)$$

ทำการคำนวณปริมาณอากาศในกระบอกสูบจากอัตราการไหลของอากาศที่ได้จาก (7) ดังนี้

$$APC = \dot{m}_{asp,a} \left(\frac{30}{N_e} \right) \quad (8)$$

โดย APC คือปริมาณอากาศในกระบอกสูบ

2.2 ตัวแปรสถานะและสมการสถานะ

ทำการกำหนดตัวแปรสถานะดังนี้

$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [P_{int} \ F_{int} \ \theta_{egr}]^T$$

จาก (3), (4) และ (5) แสดงสมการสถานะได้ดังนี้

$$\dot{x}_1 = \alpha (\dot{m}_{maf} + x_3 u + \dot{m}_{cng} - \eta_{vol}(x_1, N_e)) \beta x_1$$

$$\dot{x}_2 = \frac{\alpha}{x_1} (x_3 u F_{exh} - (\dot{m}_{maf} + x_3 u + \dot{m}_{cng}) x_2) \quad (9)$$

$$\dot{x}_3 = 0$$

$$y = x_1$$

$$\text{เมื่อ } \alpha = \frac{RT_{int}}{V_{int}} \text{ และ } \beta = \frac{1}{RT_{int}} V_{int} \frac{N_e}{120}$$

3. ทฤษฎีและการออกแบบตัวสังเกตด้วย

ตัวกรองคาลมานแบบขยาย

ตัวกรองคาลมานเป็นวิธีที่ดีที่สุดวิธีหนึ่งสำหรับการประมาณค่า ซึ่งงานวิจัยนี้ได้นำตัวกรองคาลมานแบบขยายมาใช้ในการประมาณค่าที่จำเป็นสำหรับการทราบปริมาณอากาศในกระบอกสูบ โดยใช้ในสมการในรูปของ Discrete-time

3.1 ทฤษฎีตัวกรองคาลมานแบบขยาย

3.1.1 สมการของระบบในรูปของ Discrete-time

$$\begin{aligned} x_k &= f_{k-1}(x_{k-1}, u_{k-1}, w_{k-1}) \\ y_k &= h_k(x_k, v_k) \\ w_k &\sim (0, Q_k) \\ v_k &\sim (0, R_k) \end{aligned} \quad (10)$$

เมื่อ w_k และ v_k คือ สัญญาณรบกวนจากกระบวนการทำงาน (Process noise) และสัญญาณรบกวนจากการวัด (Measurement noise) ตามลำดับ โดยสัญญาณรบกวนทั้งสองมีลักษณะเป็นสัญญาณรบกวนขาว (white noise) และมีโควาเรียนซ์เมตริกซ์ (Covariance matrices) คือ Q_k และ R_k ดังนี้

$$\begin{aligned} Q_k &= E[ww^T] \\ R_k &= E[vv^T] = \sigma_R^2 \end{aligned} \quad (11)$$

และ $E[w_i w_j] = 0$ เมื่อ $i \neq j$

โดย $E[.]$ หมายถึงค่าที่คาดหวัง (Expected value) และ σ_R คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณที่วัดได้

3.1.2 สมการตัวกรองคาลมานแบบขยาย

$$\begin{aligned} P_k^- &= F_{k-1} P_{k-1}^+ F_{k-1}^T + L_{k-1} Q_{k-1} L_{k-1}^T \\ \hat{x}_k^- &= f_{k-1}(\hat{x}_{k-1}^+, u_{k-1}, 0) \\ K_k &= P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + M_k R_k M_k^T)^{-1} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k [y_k - h_k(\hat{x}_k^-, 0)]$$

$$P_k^+ = (I - K_k H_k) P_k^-$$

$$\text{เมื่อ } F_{k-1} = \left. \frac{\partial f_{k-1}}{\partial x} \right|_{\hat{x}_{k-1}^+}, \quad L_{k-1} = \left. \frac{\partial f_{k-1}}{\partial w} \right|_{\hat{x}_{k-1}^+},$$

$$H_k = \left. \frac{\partial h_k}{\partial x} \right|_{\hat{x}_k^-}, \quad M_k = \left. \frac{\partial h_k}{\partial v} \right|_{\hat{x}_k^-}$$

โดย \hat{x}_k^- และ \hat{x}_k^+ คือการประมาณค่าตัวแปรสถานะก่อนทำการวัดข้อมูลและหลังทำการวัดข้อมูลแล้วตามลำดับ, P_k^- และ P_k^+ คือ โควาเรียนซ์ของค่าผิดพลาดในการประมาณค่า (Estimation error

covariance) ของ \hat{x}_k^- และ \hat{x}_k^+ ตามลำดับ และ K_k คืออัตราขยายคาลมาน (Kalman gain)

3.2. การออกแบบตัวสังเกต

3.2.1 แปลงสมการระบบให้อยู่ในรูป Discrete-time

จาก (9) สมการทางคณิตศาสตร์ของระบบอยู่ในรูปของ Continuous-time จึงต้องทำการแปลง (9) ให้อยู่ในรูป Discrete-time แสดงได้ดัง (13) เพื่อให้สอดคล้องกับสมการตัวกรองคาลมานแบบขยายดังแสดงในหัวข้อ 3.1 โดยใช้วิธี Forward Euler's Method

$$x_1(k) = T_s \alpha [\dot{m}_{maf} + \dot{m}_{cng} + x_3(k-1)u - \eta_{vol}(x_1(k-1), N_e) \beta x_1(k-1)] + x_1(k-1) + w_1(k-1)$$

$$x_2(k) = \frac{T_s \alpha}{x_1(k-1)} [x_3(k-1)u F_{exh} - (\dot{m}_{maf} + \dot{m}_{cng} + x_3(k-1)u)x_2(k-1)] + x_2(k-1) + w_2(k-1)$$

$$x_3(k) = x_3(k-1) + w_3(k-1)$$

$$y(k) = x_1(k) + v(k)$$

(13)

3.2.2 โควาเรียนซ์เมตริกซ์ Q_k และ R_k

เมื่อพิจารณาให้สัญญาณระบบกวนของกระบวนการนั้นเกิดขึ้นจากอินพุต u เท่านั้น จาก (11) จะได้ Q_k ดังนี้

$$Q_k = \begin{pmatrix} w_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & w_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & w_3^2 \end{pmatrix} \quad (14)$$

เมื่อ

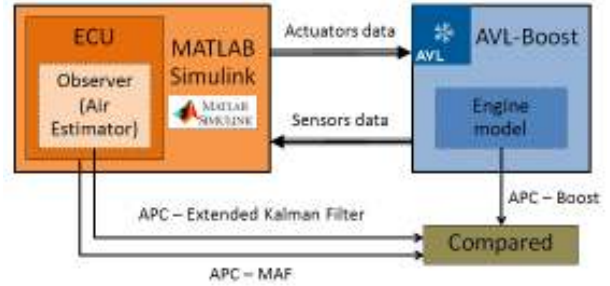
$$\begin{bmatrix} w_1(k) \\ w_2(k) \\ w_3(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_s \alpha x_3(k) \\ \frac{T_s \alpha}{x_1(k)} [F_{exh} x_3(k) - x_2(k)x_3(k)] \\ 0 \end{bmatrix} n_u$$

โดย T_s คือเวลาที่ใช้ในการสุ่ม (Sampling time), n_u คือสัญญาณรบกวนที่เกิดจากอินพุต u

ในส่วนของ R_k นั้นขึ้นอยู่กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเซ็นเซอร์ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ข้อมูลที่วัดได้จากโปรแกรมจำลอง AVL-Boost ซึ่งเมื่อจำลองด้วยสภาวะแบบเดียวกัน ในแต่ละครั้งที่จำลอง จะอ่านข้อมูลจากเซ็นเซอร์ได้เท่ากัน ดังนั้นจึงพิจารณาให้ $R_k = 0$

4. ผลการจำลองของตัวสังเกต

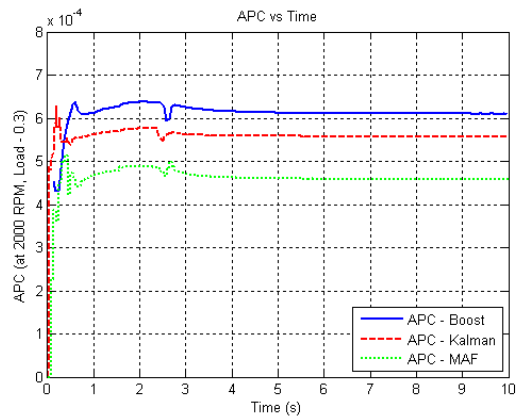
ทำการออกแบบอัลกอริทึมตัวสังเกตด้วยโปรแกรม MATLAB-Simulink และจำลองร่วมกับโปรแกรม AVL-Boost เปรียบเทียบผลการประมาณค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบด้วยตัวกรองคาลมานแบบขยายกับการทำนายค่าอากาศในกระบอกสูบด้วยเซ็นเซอร์ MAF



รูปที่ 2 แผนภาพการทำงานร่วมกันของ MATLAB - Simulink และ AVL-Boost

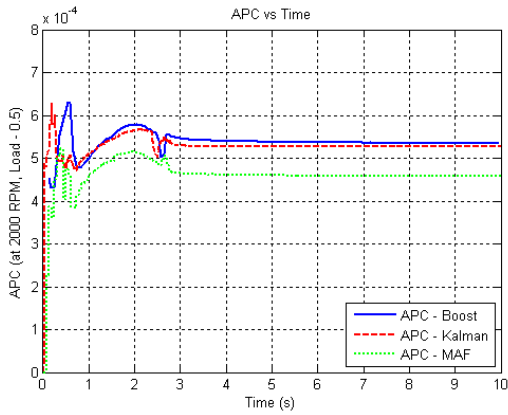
4.1 การจำลองแบบ Steady-State

ทำการจำลองโดยกำหนดความเร็วรอบเครื่องยนต์ที่ 2000 รอบต่อนาที (rpm) และตำแหน่งคันเร่งคงที่ที่ 30%, 50% และ 70% แสดงผลจำลองได้ดังนี้

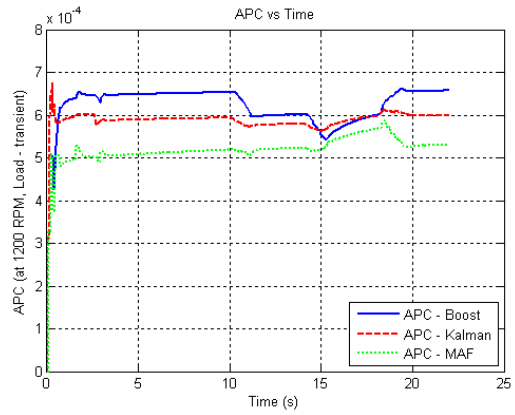


รูปที่ 3 เปรียบเทียบปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm, คันเร่ง 30%

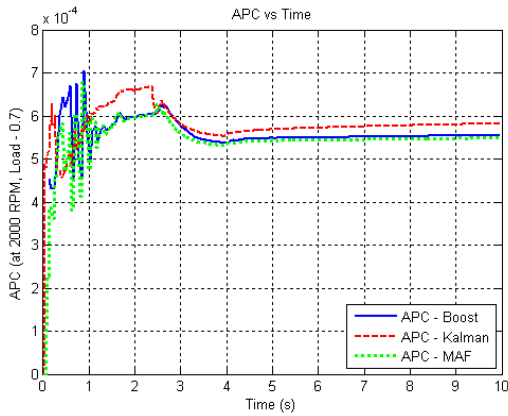
จากรูปที่ 3 แสดงผลการจำลองการประมาณค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบ โดยเป็นการจำลองในสภาวะความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ที่ 2000 rpm และตำแหน่งคันเร่งคงที่ที่ 30% โดยกราฟสีน้ำเงินแสดงค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่ได้จากโปรแกรม AVL-Boost ซึ่งเป็นข้อมูลที่ใช้อ้างอิง กราฟสีแดงแสดงค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่ได้จากตัวสังเกตตัวกรองคาลมานแบบขยาย และกราฟสีเขียวแสดงปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่คำนวณจากเซ็นเซอร์ MAF โดยตรง



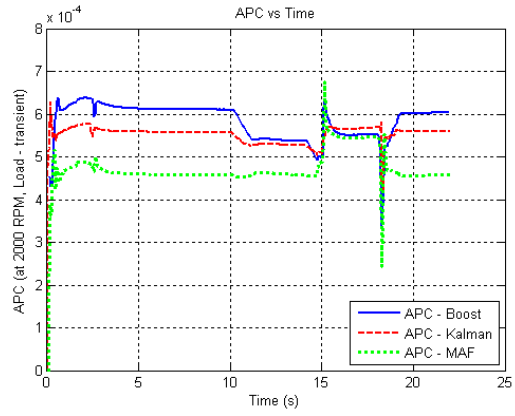
รูปที่ 4 เปรียบเทียบปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm, คับแรง 50%



รูปที่ 7 เปรียบเทียบปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm, คับแรงเปลี่ยนแปลง



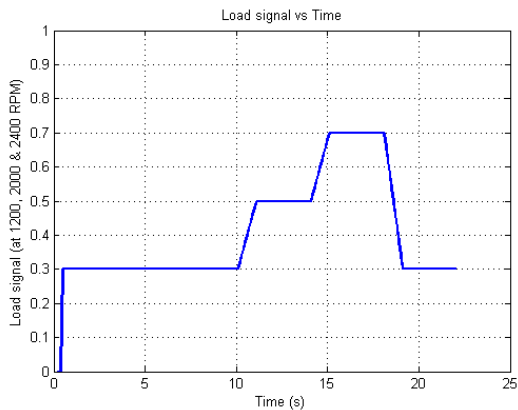
รูปที่ 5 เปรียบเทียบปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm, คับแรง 70%



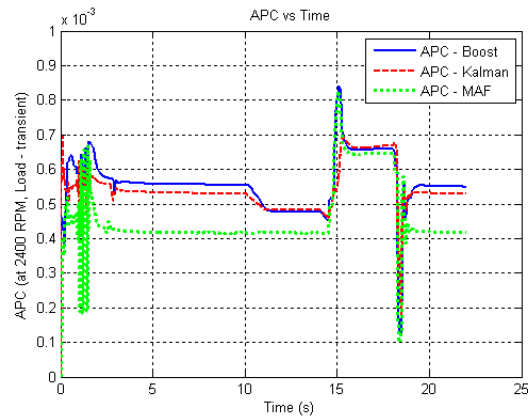
รูปที่ 8 เปรียบเทียบปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm, คับแรงเปลี่ยนแปลง

4.2 การจำลองแบบเปลี่ยนแปลงคับแรงอย่างฉับพลัน

ทำการจำลองโดยการกำหนดความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ที่ 1200 rpm, 2000 rpm และ 2400 rpm แต่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งคับแรงอย่างฉับพลันดังนี้



รูปที่ 6 ตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงคับแรงอย่างฉับพลัน



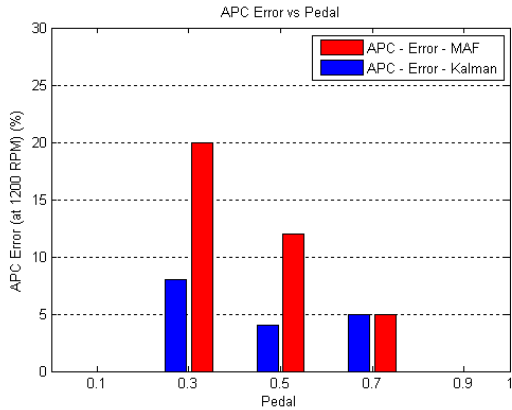
รูปที่ 9 เปรียบเทียบปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2400 rpm, คับแรงเปลี่ยนแปลง

5. สรุปผลและวิจารณ์

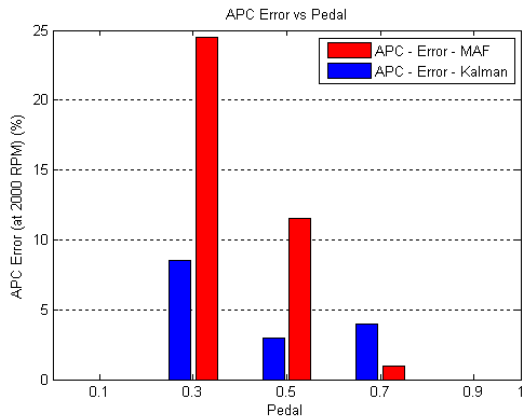
บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวสังเกตด้วยวิธีตัวกรองคาลมานแบบขยายเพื่อใช้ประมาณค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม โดยมีอัตราส่วนโดยมวลของก๊าซที่เผาไหม้แล้วต่อก๊าซ



ทั้งหมดในท่ร่วมไอดีเป็นตัวแปรสำคัญ ซึ่งเมื่ออ้างอิงผลจากโปรแกรมจำลองเครื่องยนต์ AVL-Boost แล้ว ตัวสังเกตนั้นให้ค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบได้ใกล้เคียงกับโปรแกรม AVL-Boost มากกว่าการคำนวณปริมาณอากาศในกระบอกสูบโดยตรงจากเซ็นเซอร์ MAF โดยแสดงค่าผิดพลาดเมื่ออ้างอิงจากโปรแกรม AVL-Boost ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm, 2000 rpm และ 2400 rpm ได้ดังรูปที่ 10, 11 และ 12



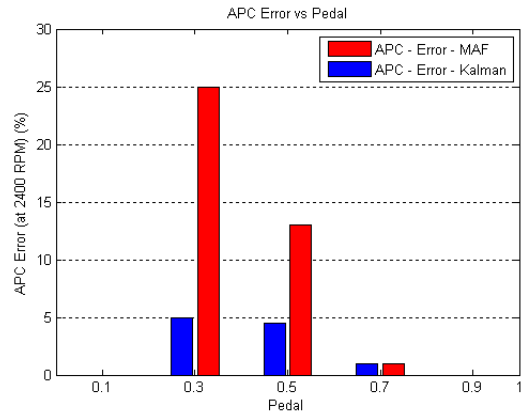
รูปที่ 10 ค่าความผิดพลาดของของการทำนายปริมาณอากาศในกระบอกสูบเมื่ออ้างอิงจากโปรแกรม AVL-Boost ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm



รูปที่ 11 ค่าความผิดพลาดของของการทำนายปริมาณอากาศในกระบอกสูบเมื่ออ้างอิงจากโปรแกรม AVL-Boost ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm

จากกราฟแสดงความผิดพลาดในการประมาณค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบ ตัวสังเกตตัวกรองคาลมานแบบขยายนั้นให้ผลที่ดีกว่าการทำนายค่าอากาศในกระบอกสูบจากเซ็นเซอร์ MAF โดยตรง อย่างชัดเจนในช่วงตำแหน่งคันเร่งต่ำ (คันเร่ง 0.3 - 0.5) แต่เมื่อตำแหน่งคันเร่งสูงขึ้น (คันเร่ง 0.7) การทำนายค่าโดยตรง

จากเซ็นเซอร์ MAF ทำได้ใกล้เคียงจนถึงดีกว่าเมื่ออ้างอิงจากโปรแกรม AVL-Boost



รูปที่ 12 ค่าความผิดพลาดของของการทำนายปริมาณอากาศในกระบอกสูบเมื่ออ้างอิงจากโปรแกรม AVL-Boost ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2400 rpm

ตารางที่ 1 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องและหน่วย

Variable	Unit
P_{int}	Pa
T_{int}	K
M_{int}	kg
V_{int}	L
N_e	rpm
\dot{M}_{int}	kg / sec
\dot{m}_{maf}	kg / sec
\dot{m}_{egr}	kg / sec
\dot{m}_{asp}	kg / sec
\dot{m}_{cng}	kg / sec
\dot{m}_d	kg / sec
V_{cyl}	L
F_{int}	-
F_{exh}	-
R	J / (kg · K)
η_{vol}	-
u	-



6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. ชเนศ อรุณศรีโสภณ และบริษัท AVL สำหรับโปรแกรมจำลองเครื่องยนต์ (AVL-Boost), ธีรนันชัย เตพิมลรัตน์ สำหรับคำปรึกษา, สถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. สำหรับอุปกรณ์และสถานที่วิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Chauvin, J., Petit, N. and Rouchon, P. (2006). Air Path Estimation on Diesel HCCI Engine, paper presented in *SAE World Congress 2006*, Detroit, Michigan, U.S.A.
- [2] Simon, D. (2006). *Optimal State Estimation*, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
- [3] อธิติเดช มุลมั่งมี, บัณฑิต จิรนนทศักดิ์ และ วิฑิต ฉัตรรัตนกุลชัย (2554). การคำนวณปริมาณอากาศในกระบอกสูบโดยตัวสังเกตแบบแผนเลื่อนสำหรับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดแบบ DF-PCCI, *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25*, จังหวัดกระบี่
- [4] กฤษฎา แสงเพชรส่อง (2547). แนะนำ Kalman Filter Algorithm, โรงเรียนนายเรือ, สมุทรปราการ
- [5] Guzzella, L. and Onder, C.H. (2010). *Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York
- [6] พงษ์ธี นาครัตน์ (2550). การออกแบบการควบคุมแรงสำหรับกระบอกสูบไฮดรอลิกด้วยวิธีการลาปูนอฟแบบคอนโทรลแบบแควตเตปั้ง, วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [7] Barbarisi, O., Gaeta, A.D., Glielmo, L. and Santini, S. (n.d.). An Extended Kalman Observer for the In-Cylinder Air Mass Flow Estimation, n.p