



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การประมาณค่าปริมาณอากาศที่ไหลเข้ากระบอกสูบของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม
โดยใช้เทคนิคตัวกรองคาลมาน

In – Cylinder Air Estimation on a Diesel Dual Fuel Engine Using a Kalman Filter
Technique

นามผู้วิจัย นายบัณฑิต จิรนนทศักดิ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิทิต นัตร์รัตนกุลชัย, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนศ อรุณศรีโสภณ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การประมาณค่าปริมาณอากาศที่ไหลเข้ากระบอกสูบของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมโดยใช้
เทคนิคตัวกรองคาลมาน

In – Cylinder Air Estimation on a Diesel Dual Fuel Engine
Using a Kalman Filter Technique

โดย

นายบัณฑิต จิรนนท์ศักดิ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. ๒๕๕๕

บัณฑิต จิรนนท์ศักดิ์ 2555: การประมาณค่าปริมาณอากาศที่ไหลเข้ากระบอกสูบของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมโดยใช้เทคนิคตัวกรองคาลมาน ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย, Ph.D.

109 หน้า

ความไม่แม่นยำในการทราบค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์ลดลง เนื่องจากปริมาณอากาศในกระบอกสูบมีความสัมพันธ์กับการฉีดน้ำมันและการเผาไหม้

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการประมาณค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบโดยใช้เทคนิคตัวกรองคาลมานแบบขยาย (Extended Kalman Filter; EKF) สมการสถานะของระบบออกแบบโดยใช้สมการของก๊าซอุดมคติที่ทอว์ร่วมไอดี และนำไปใช้กับแบบจำลองของเครื่องยนต์จากโปรแกรม AVL-Boost โดยเป็นการจำลองเครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบ ขนาด 2.5 ลิตร ที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงร่วม

จากผลการจำลองการทำงานของเครื่องยนต์ เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้จากตัวกรองคาลมานแบบขยายกับข้อมูลจากเซ็นเซอร์ MAF (Mass Air Flow Sensor) พบว่า พบว่าตัวกรองคาลมานแบบขยายสามารถลดความผิดพลาดในการประมาณค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบได้สูงถึง 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการประมาณค่าอากาศในกระบอกสูบจากการคำนวณด้วยเซ็นเซอร์ MAF โดยอ้างอิงข้อมูลจากโปรแกรม AVL-Boost

Bundit Jiranantasak 2012: In-Cylinder Air Estimation on a Diesel Dual Fuel Engine Using a Kalman Filter Technique. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Withit Chatrattanakulchai, Ph.D. 109 pages.

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.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ขั้วทิด นัตรรัตนกุลชัย ที่ได้ให้ความรู้ชี้แนะแนวทางการทำงาน การแก้ไขปัญหา รวมถึงการให้โอกาสในการทำงานวิจัยต่างๆ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ชัชเนศ อรุณศรี โสภณ ที่ได้ให้คำชี้แนะ ความรู้ต่างๆ ลิขสิทธิ์การใช้โปรแกรม AVL-Boost รวมถึงการร่วมตรวจสอบในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.กฤษฎา วรรณทอง, คุณชินภัทร เจริญประยูร และนักวิจัยจากสถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือในการวิจัย รวมถึงความรู้และคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์สำหรับงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ อธิเดช มุลมั่งมี และคณะนิสิตจากห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการต้นสะเทือน (CRV Lab), ชนันชัย เตพพิมลรัตน์ และคณะนิสิตจากห้องปฏิบัติการการเผาไหม้เชิงประยุกต์ (ACL Lab) และยังบุคคลอื่นที่ไม่ได้เอ่ยนามไว้ ณ ที่นี้ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำต่างๆ สำหรับการทำงานวิจัยนี้

บัณฑิต จิรนนทศักดิ์

ตุลาคม 2555

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(12)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	27
อุปกรณ์	27
วิธีการ	29
ผลและวิจารณ์	52
สรุปและข้อเสนอแนะ	94
สรุป	94
ข้อเสนอแนะ	95
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	97
ภาคผนวก	99
ภาคผนวก ก คุณสมบัติของรถยนต์ที่ใช้ทำการจำลอง	100
ภาคผนวก ข โปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับการประมาณค่า	102
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	109

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	เปรียบเทียบปริมาณไอเสียที่เกิดขึ้นระหว่าง 2 วิธี คือการใช้การประมาณค่าปริมาณอากาศที่ Inlet port กับการใช้ค่าอากาศที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ เพื่อควบคุมค่า AFR	21

ตารางผนวกที่

ก1	ข้อมูลเครื่องยนต์	101
ก2	ค่าประสิทธิภาพเชิงปริมาตร	101
ข1	ชื่อและหน่วยของอินพุตและเอาต์พุตที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม	106

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ขั้นตอนของการประมาณค่าด้วยตัวกรองคาลมาน ที่เวลา t_k ใด ๆ	9
2	ตัวอย่างองค์ประกอบการหาระยะระหว่างเรือกับประภาคารโดยใช้ Stadimeter	10
3	ผลจากการใช้ตัวกรองคาลมานเพื่อประมาณระยะระหว่างเรือและ ประภาคาร	10
4	ตำแหน่งของยานพาหนะที่ได้จากสมการ State, การวัด และการ ประมาณค่า	12
5	ค่าความผิดพลาดของค่าที่ได้จากการวัดและการประมาณค่าตำแหน่งของ ยานพาหนะเมื่อทำการเปรียบเทียบกับ True State	13
6	เปรียบเทียบความเร็วของยานพาหนะที่ได้จากการประมาณค่า และ True State	14
7	ค่าความผิดพลาดของความเร็วที่ได้จากการประมาณค่าเปรียบเทียบกับ True State	14
8	แบบจำลองทางเดินอากาศที่ไหลเข้ากระบอกสูบของเครื่องยนต์ดีเซล	16
9	โครงสร้างของตัวประมาณค่าจากงานวิจัยของ Moulin <i>et al.</i> (2004)	19
10	เปรียบเทียบค่า AFR ระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ค่าที่ วัดได้จากเซ็นเซอร์และค่าที่ได้จากการประมาณค่าในงานวิจัยของ Moulin <i>et al.</i> (2004)	20
11	อัตราการไหลของอากาศที่ Throttle valve และ Inlet port ในงานวิจัยของ Takahashi and Sekozawa (1995)	22
12	ภาพบน; ปริมาณการไหลของอากาศที่ประมาณโดย Speed-Density equation และประมาณค่าด้วย EKF, ภาพล่าง; ค่าความผิดพลาดระหว่าง ทั้งสองวิธีในงานวิจัยของ Barbaris <i>et al.</i>	23
13	เปรียบเทียบปริมาณ BGR ระหว่างค่าอ้างอิงที่ได้จากแบบจำลองของระบบ, ค่าที่ได้จาก Isothermal case และค่าที่ได้จาก Adiabatic case ที่ช่วงเวลาใด ๆ ในงานวิจัยของ Chauvin <i>et al.</i> (2006)	25

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
14	แผนภาพแสดงการทำงานระหว่างโปรแกรม MATLAB และ AVL - Boost	28
15	แบบจำลองเครื่องยนต์ดีเซล 2KD - FTV จากโปรแกรม AVL – Boost ที่ใช้ในงานวิจัย	29
16	ระบบทางเดินอากาศที่ผ่านเข้าและออกจากกระบอกสูบของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม	31
17	EGR Flow Coefficient จาก AVL – Boost ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm และตำแหน่งคันเร่งดังภาพที่ 19	35
18	ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm และตำแหน่งคันเร่งดังภาพที่ 19	36
19	ตำแหน่งคันเร่งสำหรับการจำลองการหาอัตราการใช้ของไอเสียหมุนเวียนดัง (24)	36
20	อัตราการใช้ของไอเสียหมุนเวียนที่ได้จากโปรแกรม AVL – Boost และจาก (24)	37
21	ค่าความผิดพลาดของการคำนวณด้วย (24) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าอัตราการใช้ของไอเสียหมุนเวียนที่ได้จาก AVL – Boost	38
22	เปรียบเทียบความดันที่ท่อร่วมไอเสียจาก AVL – Boost และจากสมการทางคณิตศาสตร์ (45)	40
23	ค่าความผิดพลาดของความดันที่ท่อร่วมไอเสียจากสมการทางคณิตศาสตร์ (45) เมื่อเปรียบเทียบกับ AVL –Boost	40
24	เปรียบเทียบ Burned gas rate ในท่อร่วมไอเสียจาก AVL – Boost และจากสมการทางคณิตศาสตร์ (45)	41
25	ค่าความผิดพลาดของ Burned gas rate ในท่อร่วมไอเสียที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ (45) เมื่อเปรียบเทียบกับ Burned gas rate ในท่อร่วมไอเสียจาก AVL – Boost	42
26	Operating point ที่ทำการจำลองเพื่อเก็บค่า Volumetric Efficiency	43

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
27	ค่า Volumetric Efficiency ที่คำนวณด้วยสมการที่ได้จาก CAMEO	44
28	เปรียบเทียบตัวแปร State ระหว่างค่าที่วัดได้จาก AVL – Boost และประมาณค่าได้จาก EKF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และ คันทรง 30%	53
29	เปรียบเทียบค่า APC ระหว่าง APC จาก AVL – Boost, APC จาก EKF และ APC จาก เซ็นเซอร์ MAF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และ คันทรง 30%	53
30	บน; อัตราการไหลของอากาศจาก MAF, ล่าง; อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และคันทรง 30%	54
31	บน; ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR, ล่าง; อัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสีย ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และคันทรง 30%	54
32	ตัวแปร State ที่ได้จาก EKF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และ คันทรง 50%	55
33	เปรียบเทียบค่า APC ระหว่าง APC จาก AVL – Boost, APC จาก EKF และ APC จาก เซ็นเซอร์ MAF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และคันทรง 50%	56
34	บน; อัตราการไหลของอากาศจาก MAF, ล่าง; อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และคันทรง 50%	56
35	บน; ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR, ล่าง; อัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสีย ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และคันทรง 50%	57
36	ตัวแปร State ที่ได้จาก EKF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และ คันทรง 70%	58
37	เปรียบเทียบค่า APC ระหว่าง APC จาก AVL – Boost, APC จาก EKF และ APC จาก เซ็นเซอร์ MAF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และคันทรง 70%	59
38	บน; อัตราการไหลของอากาศจาก MAF, ล่าง; อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และคันทรง 70%	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
39	บน; ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR, ล่าง; อัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสีย ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และคันเร่ง 70%	60
40	ตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงคันเร่งที่ใช้ทำการจำลอง	60
41	ตัวแปร State ที่ได้จาก EKF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง	61
42	เปรียบเทียบค่า APC ระหว่าง APC จาก AVL – Boost, APC จาก EKF และ APC จากเซ็นเซอร์ MAF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง	62
43	บน; อัตราการไหลของอากาศจาก MAF, ล่าง; อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และคันเร่งเปลี่ยนแปลง	62
44	บน; ตำแหน่งวาล์ว EGR, ล่าง; อัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสีย ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และคันเร่งเปลี่ยนแปลง	63
45	ค่าความผิดพลาดของการทำนายปริมาณอากาศในกระบอกสูบเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงจาก AVL – Boost ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm	63
46	ตัวแปร State ที่ได้จาก EKF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 rpm และตำแหน่งคันเร่งที่ 30%	64
47	เปรียบเทียบค่า APC ระหว่าง APC จาก AVL – Boost, APC จาก EKF และ APC จาก เซ็นเซอร์ MAF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 rpm และตำแหน่งคันเร่ง 30%	65
48	บน; อัตราการไหลของอากาศจาก MAF, ล่าง; อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 rpm และคันเร่ง 30%	66
49	บน; ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR, ล่าง; อัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสีย ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 rpm และคันเร่ง 30%	66
50	ตัวแปร State ที่ได้จาก EKF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 rpm และตำแหน่งคันเร่งที่ 50%	67

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
51	เปรียบเทียบค่า APC ระหว่าง APC จาก AVL – Boost, APC จาก EKF และ APC จาก เซ็นเซอร์ MAF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 rpm และตำแหน่งคันเร่ง 50%	68
52	บน - ซ้าย; อัตราการไหลของอากาศจาก MAF, บน - ขวา; อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน, ล่าง-ซ้าย; ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR, ล่าง-ขวา; อัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสีย ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 rpm และคันเร่ง 50%	68
53	ตัวแปร State ที่ได้จาก EKF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 rpm และตำแหน่งคันเร่งที่ 70%	69
54	เปรียบเทียบค่า APC ระหว่าง APC จาก AVL – Boost, APC จาก EKF และ APC จากเซ็นเซอร์ MAF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 rpm และตำแหน่งคันเร่ง 70%	69
55	บน - ซ้าย; อัตราการไหลของอากาศจาก MAF, บน - ขวา; อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน, ล่าง-ซ้าย; ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR, ล่าง-ขวา; อัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสีย ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 rpm และคันเร่ง 70%	70
56	ตัวแปร State ที่ได้จาก EKF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 rpm และตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง	71
57	เปรียบเทียบค่า APC ระหว่าง APC จาก AVL – Boost, APC จาก EKF และ APC จากเซ็นเซอร์ MAF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 rpm และตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง	72
58	บน - ซ้าย; อัตราการไหลของอากาศจาก MAF, บน - ขวา; อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน, ล่าง-ซ้าย; ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR, ล่าง-ขวา; อัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสีย ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 rpm และคันเร่งเปลี่ยนแปลง	72

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
59	ค่าความผิดพลาดของการทำนายปริมาณอากาศในกระบอกสูบเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงจาก AVL – Boost ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 rpm	73
60	ตัวแปร State ที่ได้จาก EKF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm และตำแหน่งคันเร่งที่ 30%	74
61	เปรียบเทียบค่า APC ระหว่าง APC จาก AVL – Boost, APC จาก EKF และ APC จากเซ็นเซอร์ MAF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm และตำแหน่งคันเร่ง 30%	75
62	บน - ซ้าย; อัตราการไหลของอากาศจาก MAF, บน - ขวา; อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน, ล่าง-ซ้าย; ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR, ล่าง-ขวา; อัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสีย ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm	75
63	ตัวแปร State ที่ได้จาก EKF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm และตำแหน่งคันเร่งที่ 50%	76
64	เปรียบเทียบค่า APC ระหว่าง APC จาก AVL – Boost, APC จาก EKF และ APC จากเซ็นเซอร์ MAF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm และตำแหน่งคันเร่ง 50%	76
65	บน - ซ้าย; อัตราการไหลของอากาศจาก MAF, บน - ขวา; อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน, ล่าง-ซ้าย; ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR, ล่าง-ขวา; อัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสีย ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm และคันเร่ง 50%	77
66	ตัวแปร State ที่ได้จาก EKF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm และตำแหน่งคันเร่งที่ 70%	78
67	เปรียบเทียบค่า APC ระหว่าง APC จาก AVL – Boost, APC จาก EKF และ APC จากเซ็นเซอร์ MAF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm และตำแหน่งคันเร่ง 70%	78

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
68	บน - ซ้าย; อัตราการไหลของอากาศจาก MAF, บน - ขวา; อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน, ล่าง-ซ้าย; ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR, ล่าง-ขวา; อัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสีย ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm และคันเร่ง 70%	79
69	ตัวแปร State ที่ได้จาก EKF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm และตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง	80
70	เปรียบเทียบค่า APC ระหว่าง APC จาก AVL – Boost, APC จาก EKF และ APC จากเซ็นเซอร์ MAF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm และตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง	80
71	บน - ซ้าย; อัตราการไหลของอากาศจาก MAF, บน - ขวา; อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน, ล่าง-ซ้าย; ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR, ล่าง-ขวา; อัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสีย ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm และคันเร่งเปลี่ยนแปลง	81
72	ค่าความผิดพลาดของการทำนายปริมาณอากาศในกระบอกสูบเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงจาก AVL – Boost ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm	82
73	ตัวแปร State ที่ได้จาก EKF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2400 rpm และตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง	83
74	เปรียบเทียบค่า APC ระหว่าง APC จาก AVL – Boost, APC จาก EKF และ APC จากเซ็นเซอร์ MAF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2400 rpm และตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง	83
75	บน - ซ้าย; อัตราการไหลของอากาศจาก MAF, บน - ขวา; อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน, ล่าง-ซ้าย; ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR, ล่าง-ขวา; อัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสีย ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2400 rpm และคันเร่งเปลี่ยนแปลง	84

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
76	ค่าความผิดพลาดของการทำนายปริมาณอากาศในกระบอกสูบเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงจาก AVL – Boost ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2400 rpm	85
77	ตัวแปร State ที่ได้จาก EKF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2800 rpm และตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง	86
78	เปรียบเทียบค่า APC ระหว่าง APC จาก AVL – Boost, APC จาก EKF และ APC จากเซ็นเซอร์ MAF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2800 rpm และคันเร่งตำแหน่งเปลี่ยนแปลง	86
79	บน - ซ้าย; อัตราการไหลของอากาศจาก MAF, บน - ขวา; อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน, ล่าง-ซ้าย; ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR, ล่าง-ขวา; อัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสีย ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2800 rpm และคันเร่งเปลี่ยนแปลง	87
80	ค่าความผิดพลาดของการทำนายปริมาณอากาศในกระบอกสูบเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงจาก AVL – Boost ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2800 rpm	87
81	อัตราส่วน Burned gas ในไอเสียที่ทำการปรับแต่งค่าแล้ว ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm และตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง	88
82	เปรียบเทียบค่า APC ระหว่าง APC จาก AVL – Boost, APC จาก EKF (เมื่อทำการปรับปรุ่ค่า F_{exh} ดังภาพที่ 81) และค่า APC จากเซ็นเซอร์ MAF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm และตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง	88
83	เปรียบเทียบอัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียนระหว่าง AVL – Boost และค่าที่คำนวณจากตัวแปร State ตัวที่ 3 (เมื่อทำการปรับปรุ่ค่า F_{exh} ดังภาพที่ 81) ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm, ตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง	89
84	อัตราส่วน Burned gas ในไอเสียที่ทำการปรับแต่งค่าแล้ว ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2800 rpm และตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง	90

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
85	เปรียบเทียบค่า APC ระหว่าง APC จาก AVL – Boost, APC จาก EKF (เมื่อทำการปรับปรุ่ค่า F_{exh} ดังภาพที่ 84) และค่า APC จากเซ็นเซอร์ MAF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2800 rpm และตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง	91
86	เปรียบเทียบอัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียนระหว่าง AVL – Boost และค่าที่คำนวณจากตัวแปร State ตัวที่ 3 (เมื่อทำการปรับปรุ่ค่า F_{exh} ดังภาพที่ 84) ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2800 rpm, ตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง	91

คำอธิบายลักษณะและคำย่อ

AFR	=	Air – Fuel Ratio
APC	=	ปริมาณอากาศในกระบอกสูบ (Air Per Cylinder)
BGR	=	Burned Gas Rate
CNG	=	Compressed Natural Gas
DDF	=	Diesel Dual Fuel
ECU	=	Electrical Control Unit / Engine Control Unit
EGR	=	Exhaust Gas Recirculation
EKF	=	Extended Kalman Filter
E.M.	=	Exhaust Manifold
I.M.	=	Intake Manifold
MAF	=	Mass Air Flow
rpm	=	round per minute

การประมาณค่าปริมาณอากาศที่ไหลเข้ากระบอกสูบของเครื่องยนต์ ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมโดยใช้เทคนิคตัวกรองกาลมาน

In – Cylinder Air Estimation on a Diesel Dual Fuel Engine Using a Kalman Filter Technique

คำนำ

ศาสตร์การควบคุมถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงให้ระบบต่างๆ เกิดประสิทธิภาพมากขึ้น การควบคุมที่ดีและมีประสิทธิภาพจะเกิดขึ้นได้เมื่อเรารู้จักกับระบบที่ต้องการควบคุมมากพอ นั่นหมายถึงการรับรู้ถึงองค์ประกอบและข้อมูลต่างๆ ที่จำเป็นสำหรับการควบคุม โดยทั่วไปการรับรู้ข้อมูลที่จำเป็นอาจได้มาจากเซ็นเซอร์ที่ได้ติดตั้งไว้ แต่ในบางระบบอาจไม่สามารถทำการติดตั้งเซ็นเซอร์ได้ หรืออาจมีเซ็นเซอร์แต่คุณภาพการวัดข้อมูลต่ำ จึงก่อให้เกิดปัญหาเมื่อต้องการนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ป้อนองค์ประกอบในการควบคุม ซึ่งการออกแบบตัวสังเกตเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับระบบที่ไม่มีเซ็นเซอร์หรือมีเซ็นเซอร์แต่มีสัญญาณรบกวนมาก โดยตัวสังเกตถูกนำมาใช้เพื่อทำให้ทราบข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการนำไปใช้ควบคุม

การใช้พลังงานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการดำเนินชีวิตในปัจจุบัน เนื่องจากราคาน้ำมันมีการปรับตัวสูงขึ้นเรื่อยๆ จึงทำให้ประชาชนตระหนักถึงการใช้อย่างประหยัดพลังงานต่างๆ อย่างคุ้มค่าที่สุด เครื่องยนต์ดีเซลจัดเป็นเครื่องมือที่มีการใช้พลังงานในปริมาณที่ค่อนข้างมากชนิดหนึ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการคมนาคมขนส่ง หากสามารถใช้งานเครื่องยนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพแล้ว ก็ถือเป็นการใช้พลังงานได้อย่างคุ้มค่า แต่เมื่อเริ่มมีปัญหาจากการใช้จ่ายเงินไปกับเชื้อเพลิงที่มีราคาค่อนข้างสูง จึงมีการศึกษาหาพลังงานทดแทนที่จะช่วยลดภาระการใช้จ่ายเงิน โดยปัจจุบันได้นำก๊าซธรรมชาติมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ด้วย แต่สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลนั้น ไม่สามารถใช้ก๊าซธรรมชาติทำงานแทนที่น้ำมันดีเซลได้ทั้งหมด เนื่องจากพื้นฐานของเครื่องยนต์ดีเซลทำให้ไม่สามารถจุดระเบิดก๊าซธรรมชาติล้วนได้ หากนำหัวเทียนมาใช้เพื่อช่วยในการจุดระเบิด ตัวเครื่องและฝาสูบก็ไม่สามารถรองรับความร้อนของก๊าซธรรมชาติที่สูงกว่าน้ำมันดีเซลได้ และอาจทำให้เครื่องยนต์เกิดความเสียหาย ทำให้การนำก๊าซธรรมชาติมาในเครื่องยนต์ดีเซลนั้น จะทำในรูปแบบของการใช้เชื้อเพลิงร่วมกันกับน้ำมันดีเซล

ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลเกิดจากการทำงานร่วมกันของตัวแปรต่างๆ การรู้ค่าที่แม่นยำของปริมาณอากาศที่ไหลเข้ากระบอกสูบที่เวลาใดๆ จัดว่าเป็นตัวแปรหนึ่งที่มองข้ามไม่ได้เช่นกัน เนื่องจากค่าปริมาณอากาศที่ไหลเข้ากระบอกสูบมีผลต่อค่าปริมาณอากาศต่อเชื้อเพลิง (A/F Ratio) ที่เป็นส่วนสำคัญในการควบคุมการเผาไหม้ และการควบคุมค่าปริมาณอากาศต่อเชื้อเพลิงยังส่งผลถึงไอเสียจากเครื่องยนต์ด้วย ดังนั้นการทราบค่าที่แม่นยำของปริมาณอากาศที่ไหลเข้ากระบอกสูบจึงเป็นสิ่งจำเป็นต่อการพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์ และยังเป็นการใช้พลังงานให้เกิดประโยชน์สูงสุดอีกด้วย

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นถึงการพัฒนาการรับรู้ค่าปริมาณอากาศที่ไหลเข้ากระบอกสูบเครื่องยนต์เมื่อมีตำแหน่งคันเร่งคงที่และมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งคันเร่งอย่างทันทีทันใด ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์ โดยทำการจำลองการโมเดลของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมระหว่างน้ำมันดีเซลและก๊าซธรรมชาติจากโปรแกรม AVL – Boost

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสมการของตัวสังเกต (Observer) และสมการตัวกรองคาลมานเพื่อใช้สำหรับการประมาณค่า
2. เพื่อศึกษาการออกแบบสมการที่ใช้ประมาณค่าปริมาณอากาศที่ไหลเข้ากระบอกสูบของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมโดยเทคนิคตัวกรองคาลมาน
3. เพื่อศึกษาถึงความแตกต่างของผลการจำลองของปริมาณอากาศในกระบอกสูบเมื่อใช้การประมาณค่าด้วยเทคนิคตัวกรองคาลมาน เปรียบเทียบกับเมื่อไม่ได้ใช้

การตรวจเอกสาร

ตัวสังเกต

การควบคุมป้อนกลับสถานะ (State feedback control) โดยทั่วไปจะมีการตั้งข้อสมมติฐานว่าสถานะ (state) ทุกตัวของระบบสามารถวัดได้ในทางปฏิบัติ และสามารถนำมาใช้ในการป้อนกลับให้กับตัวควบคุมโดยตรงได้

วโรตม (2550) กล่าวว่า การตั้งสมมติฐานว่าสถานะทุกตัวของระบบจะต้องวัดได้ในทางปฏิบัตินั้นเป็นข้อจำกัดสำหรับการควบคุมป้อนกลับสถานะ อย่างแรกคือต้องการจำนวนของตัวตรวจรู้ หรือเซ็นเซอร์ มากเท่ากับจำนวนของสถานะ ซึ่งระบบบางประเภทที่มีธรรมชาติเป็นระบบมิติไม่จำกัด อาจจำเป็นต้องใช้ตัวตรวจรู้หรือเซ็นเซอร์เป็นจำนวนมาก นอกจากนั้นแล้ว มักจะพบว่าในโมเดลที่ได้มาจากการหาเอกลักษณ์ระบบจากข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตนั้น สถานะของระบบอาจจะไม่มีความหมายทางกายภาพใด คือไม่ได้เป็นสัญญาณหรือค่าใดๆ ที่สามารถจะวัดได้จริงในทางปฏิบัติ ซึ่งถือได้ว่าเป็นข้อด้อยของการควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ

สำหรับการนำมาใช้งานจริง หากมองถึงการวัดค่าของสถานะ (State) ด้วยเซ็นเซอร์เพียงอย่างเดียว อาจพบกับปัญหาเนื่องจากการใช้เซ็นเซอร์ เช่น เซ็นเซอร์ที่ต้องการใช้มีราคาแพง และการเลือกใช้เซ็นเซอร์ที่มีราคาถูกบางครั้งก็มีคุณภาพต่ำเกินไปสำหรับงานบางประเภท หรืออาจจะไม่สามารถติดตั้งเซ็นเซอร์เข้าไปวัดในบริเวณที่ต้องการได้ หรือ State เหล่านั้นไม่สามารถวัดได้ในทางปฏิบัติ โดยปัญหาเหล่านี้อาจเป็นอุปสรรคต่อการควบคุมป้อนกลับ ในส่วนของวิธีแก้ไขในกรณีที่ไม่ต้องการหรือไม่สามารถใช้เซ็นเซอร์สำหรับวัดค่า State นั้นๆ ได้ก็คือ การเพิ่มระบบพลวัตส่วนหนึ่งเข้ามา ที่สามารถทำการสร้าง State ขึ้นมาจากสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบหรือที่เรียกกันว่า แพลนต์ (Plant) นั่นเอง และเรียกระบบพลวัตนี้ว่า ตัวประมาณค่าตัวแปร State (State Estimator) หรือตัวสังเกต (Observer) และเรียกการควบคุมป้อนกลับโดยอาศัยตัวแปร State ที่ประมาณค่าโดยตัวสังเกตว่า การควบคุมป้อนกลับเอาต์พุต (Output Feedback Control)

องค์ประกอบของตัวควบคุมป้อนกลับ State และตัวสังเกตของระบบที่เป็นแบบ MIMO (Multi Input – Multi Output) แสดงได้ดังนี้

การออกแบบตัวควบคุมป้อนกลับ State และตัวสังเกต โดยพิจารณาจากระบบ MIMO

สมการปริภูมิสแตต (State-Space equation) สำหรับระบบ MIMO สามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \quad ; x \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^m \\ y &= Cx + Du \quad ; y \in \mathbb{R}^p\end{aligned}\quad (1)$$

โดยเมตริกซ์ A, B, C และ D จะมีขนาด $n \times n, n \times m, p \times n$ และ $p \times m$ ตามลำดับ แต่ในกรณีที่ไม่สามารถวัดค่า State ได้จริงในทางปฏิบัติ จะต้องทำการเปลี่ยนจากการใช้ State จริง (True State, x) ไปเป็น State ที่ได้จากการประมาณค่าโดยตัวสังเกต (Estimated State, $\hat{x}$) และพยายามลดค่าผิดพลาดระหว่าง True State กับ Estimated State ($e = x - \hat{x}$) ให้เหลือน้อยที่สุด ออกแบบตัวควบคุมป้อนกลับ State ในรูปของ $u = Kx$ โดยจะยังคงสามารถใช้ตัวควบคุมในรูปแบบเดิมได้อยู่ แต่ต้องใช้ร่วมกับพจน์ที่แทนค่าผิดพลาดของการประมาณค่าด้วย ($\Delta y = y - \hat{y} = Ce$)

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y}) \\ \hat{y} &= C\hat{x}\end{aligned}\quad (2)$$

ทำการแทนค่าและจัดสมการให้อยู่ในรูปพลวัตของค่าผิดพลาดในการประมาณค่า State

$$\dot{e} = (A - LC)e \quad (3)$$

จากสมการข้างต้น หากสามารถสังเกต A, C ได้ ก็จะสามารถเจาะจงค่าของ $(A - LC)$ ได้ตามต้องการ ดังนั้นจะสามารถออกแบบตัวสังเกตที่เสถียรและทำให้ค่าผิดพลาดในการประมาณค่าเข้าใกล้ศูนย์ได้เมื่อเวลาผ่านไป

ในหัวข้อถัดไปจะเป็นส่วนของการอธิบายสมการ องค์ประกอบของสมการและหลักการทำงานของตัวกรองคาลมาน ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้สำหรับการประมาณค่าใดๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตัวกรองคาลมาน

ตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter) เป็นเทคนิคการประมาณค่าที่ได้รับการยอมรับและถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โดยมีเป้าหมายเพื่อใช้การวัดที่เป็นการสังเกต (Observed) กับระบบที่มีสิ่งรบกวน (Noise) หรือการเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม (Random Variation) แล้วทำการประมาณค่าที่มีแนวโน้มเข้าไปใกล้เคียงกับค่า True State โดยใช้การทำนายล่วงหน้า (Predicted) ร่วมกับค่าที่ได้จากการวัด (Measurement) ตัวกรองคาลมานนั้นจะใช้โมเดลที่เป็นระบบทางไดนามิก (System's Dynamic Model) ซึ่งหมายถึงการใช้กฎการเคลื่อนที่ทางฟิสิกส์นั่นเอง โดยจะต้องรู้ด้วยว่าจะอะไรเป็นอินพุตสำหรับการควบคุมในระบบนั้นๆ และค่าใดบ้างที่ได้จากการวัด โดยอาจจะได้มาจากเซ็นเซอร์ มาประกอบกันแล้วจัดรูปแบบขึ้นมาเพื่อใช้ในการประมาณค่าตัวแปรที่ต้องการ

ตัวกรองคาลมานมีลักษณะของสมการทั้งในรูปแบบของ Continuous-time และ Discrete-time อีกทั้งยังสามารถใช้ได้ทั้งกับระบบที่มีสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบเป็นแบบเชิงเส้น (Linear System Model) และระบบที่มีสมการทางคณิตศาสตร์เป็นแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear System Model) โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้สมการของตัวกรองคาลมานในรูปแบบของ Discrete-time และมีสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบเป็นแบบไม่เชิงเส้น

Discrete-time Extended Kalman Filter

ตัวกรองคาลมานแบบขยาย (Extended Kalman Filter, EKF) เป็นสมการตัวกรองคาลมานที่มีรูปแบบสำหรับการนำไปใช้กับระบบที่เป็นแบบไม่เชิงเส้น และในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้สมการในรูปแบบของ Discrete-time โดยแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}x_k &= f_{k-1}(x_{k-1}, u_{k-1}, w_{k-1}) \\y_k &= h_k(x_k, v_k) \\w_k &\sim (0, Q_k) \\v_k &\sim (0, R_k)\end{aligned}\tag{4}$$

- เมื่อ x_k คือ ตัวแปรสถานะของระบบ (State variables)
 u_k คือ สัญญาณควบคุมที่เป็นอินพุตของระบบ (Control input signal)
 y_k คือ สัญญาณเอาต์พุตของระบบ (Output signal)

w_k คือ สัญญาณรบกวนที่เกิดจากกระบวนการทำงาน (Process noises) โดยกำหนดว่าเป็น สัญญาณรบกวนขาว (White noise) ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์

v_k คือ สัญญาณรบกวนที่เกิดจากกระบวนการวัด (Measurement noises) โดยกำหนดว่า เป็นสัญญาณรบกวนขาว ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์

Q_k คือ โควาเรียนซ์ของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในทางกระบวนการทำงาน (Covariance of the process noise)

R_k คือ โควาเรียนซ์ของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากการวัดค่าต่างๆ (Covariance of the observation noise)

โดย

$$\begin{aligned} Q_k &= E[ww^T] \\ R_k &= E[vv^T] = \sigma_R^2 \end{aligned} \quad (5)$$

ซึ่งค่า $E[.]$ หมายถึง ค่าที่คาดหวัง (Expected value)

ตัวกรองคาลมานมีส่วนการทำงานอยู่สองส่วนหลัก คือ ส่วนการทำนาย (Predict phase) และส่วนอัปเดต (Update phase) โดยที่ส่วนการทำนายจะใช้การประมาณค่าตัวแปร State (State Variable) จากช่วงเวลาก่อนหน้า มาช่วยในการสร้างการประมาณค่าตัวแปร State ที่ช่วงเวลาปัจจุบัน เรียกว่าการประมาณค่าแบบ *a priori* ซึ่งหมายถึงการมีอิสระจากประสบการณ์ เนื่องจากว่า ถึงแม้จะเป็นการประมาณค่าตัวแปร State ที่ช่วงเวลาปัจจุบัน แต่ก็ไม่ได้ใช้ข้อมูลจากการวัดค่าในช่วงเวลาปัจจุบัน ต่อมาคือส่วนอัปเดต เมื่อได้ค่าการทำนายในช่วงเวลาปัจจุบันแล้ว ก็นำมารวมกับ ข้อมูลจากการวัดค่าที่ช่วงเวลาปัจจุบัน เพื่อให้มีการประมาณค่าตัวแปร State ที่ดีขึ้น เรียกการประมาณค่าในส่วนอัปเดตว่าเป็นแบบ *a posteriori* ซึ่งหมายถึงความไม่อิสระจากประสบการณ์ หรือกล่าวได้ว่าเป็นการประมาณค่าตัวแปร State ที่ช่วงเวลาปัจจุบันโดยใช้การวัดค่าที่ช่วงเวลาปัจจุบันด้วย แสดงเป็นสัญลักษณ์ได้ดังนี้

- $\hat{x}_k^-$ คือ การประมาณค่า State x ที่ช่วงเวลา k โดยไม่ใช้ข้อมูลจากการวัดที่ช่วงเวลา k มาช่วยในการประมาณค่าตัวแปรสถานะ
- $\hat{x}_k^+$ คือ การประมาณค่า State x ที่ช่วงเวลา k โดยนำข้อมูลจากการวัดที่ช่วงเวลา k มาช่วยในการประมาณค่าตัวแปรสถานะด้วย

- P_k^- คือ การวัดการประมาณค่าความแม่นยำของการประมาณค่า State $\hat{x}_k^-$ ซึ่งก็คือโควาเรียนซ์ของเมตริกซ์ความผิดพลาด (Error covariance matrix) ของ $\hat{x}_k^-$ นั่นเอง
- P_k^+ คือ การวัดการประมาณค่าความแม่นยำของการประมาณค่า State $\hat{x}_k^+$ ซึ่งก็คือโควาเรียนซ์ของเมตริกซ์ความผิดพลาด (Error covariance matrix) ของ $\hat{x}_k^+$ นั่นเอง

สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการประมาณค่าต่างๆ ของตัวกรองคาลมาน ทั้งสองส่วน ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นสามารถแสดงได้ดังนี้

ส่วนการทำนาย (Predicted phase)

- การทำนายค่าตัวแปร State [Predicted state]

$$\hat{x}_k^- = f_{k-1}(\hat{x}_{k-1}^+, u_{k-1}, 0) \quad (6)$$

- การทำนายการประมาณค่าของโควาเรียนซ์ [Predicted estimate covariance]

$$P_k^- = F_{k-1} P_{k-1}^+ F_{k-1}^T + L_{k-1} Q_{k-1} L_{k-1}^T \quad (7)$$

ส่วนการอัปเดต (Update phase)

- การอัปเดตการประมาณค่าตัวแปร State (Update state estimate)

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k [y_k - h_k(\hat{x}_k^-, 0)] \quad (8)$$

- การอัปเดตการประมาณค่าของโควาเรียนซ์ (Update estimate covariance)

$$P_k^+ = (I - K_k H_k) P_k^- \quad (9)$$

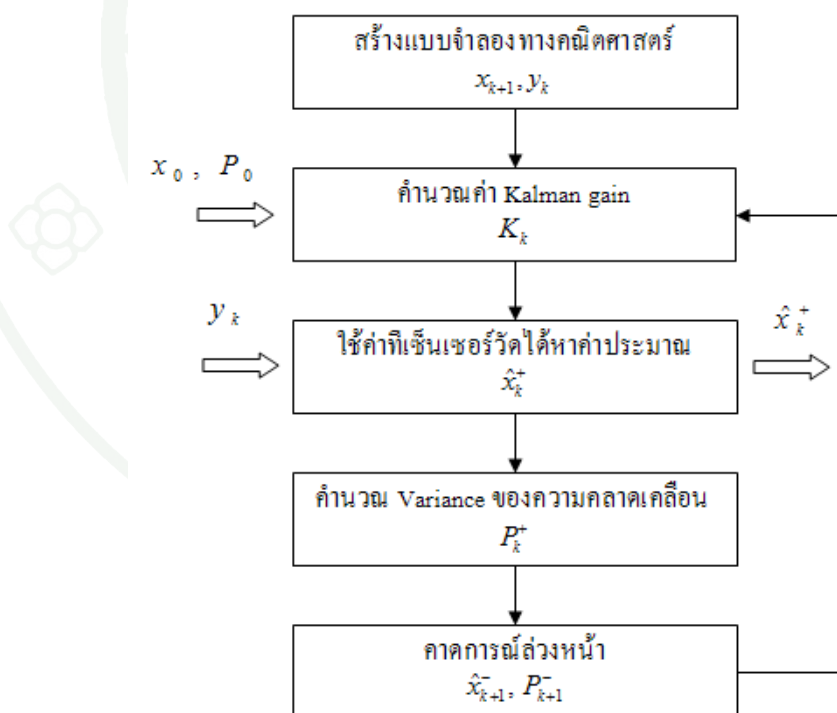
- อัตราขยายคาลมาน (K_k) ที่เหมาะสม (Optimal Kalman gain)

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + M_k R_k M_k^T)^{-1} \quad (10)$$

โดย F, L, H, M สามารถหาค่าได้ดังนี้

$$\begin{aligned} F_{k-1} &= \left. \frac{\partial f_{k-1}}{\partial x} \right|_{\hat{x}_k^+} \\ L_{k-1} &= \left. \frac{\partial f_{k-1}}{\partial w} \right|_{\hat{x}_k^+} \\ H_k &= \left. \frac{\partial h_k}{\partial x} \right|_{\hat{x}_k^-} \\ M_k &= \left. \frac{\partial h_k}{\partial v} \right|_{\hat{x}_k^-} \end{aligned} \quad (11)$$

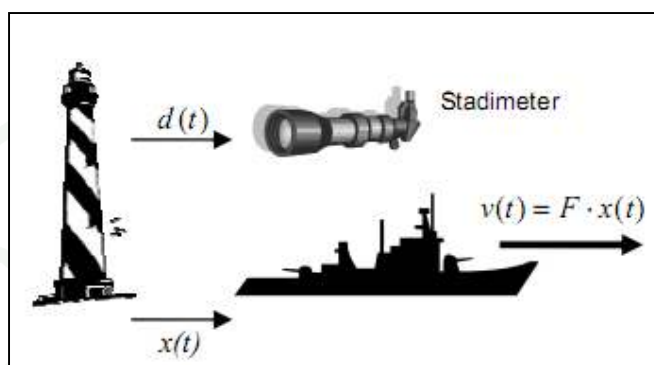
กฤษฎา (2547) ได้แสดงแผนภาพกระบวนการทำงานของการประมาณค่าด้วยเทคนิคตัวกรองคาลมานเพื่อทำความเข้าใจไว้ดังนี้



ภาพที่ 1 ขั้นตอนของการประมาณค่าด้วยตัวกรองคาลมาน ที่เวลา t_k ใด ๆ

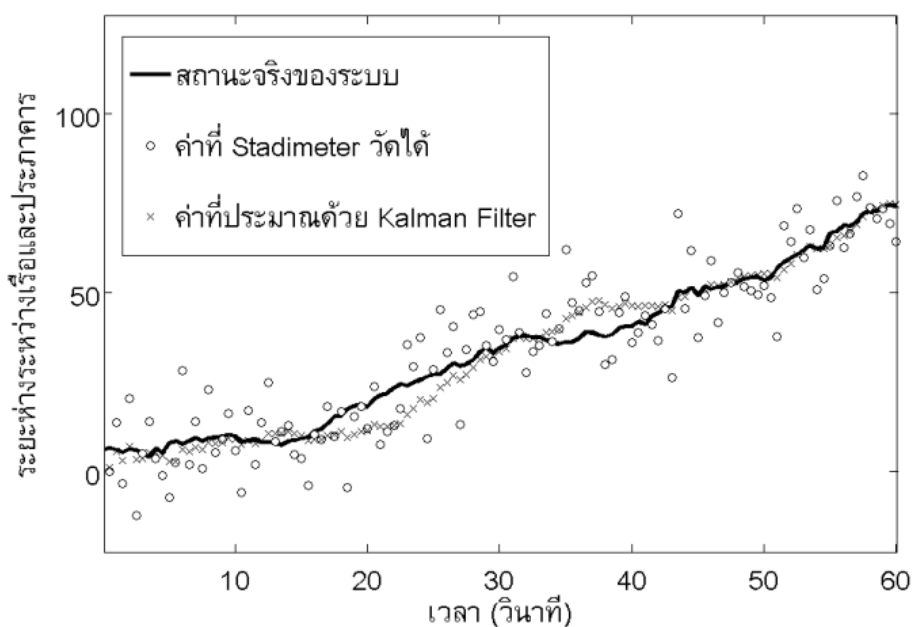
ที่มา: กฤษฎา (2547)

อีกทั้งยังได้ยกตัวอย่างการใช้ตัวกรองคาลมานในการประมาณค่า ซึ่งทำการยกตัวอย่างกับระบบที่ต้องการหาระยะระหว่างเรือกับประภาคาร โดยมี Stadimeter เป็นเซ็นเซอร์สำหรับวัดระยะ แสดงองค์ประกอบของระบบได้ดังภาพที่ 2 และแสดงการเปรียบเทียบผลได้ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 2 ตัวอย่างองค์ประกอบการหาระยะระหว่างเรือกับประภาคารโดยใช้ Stadimeter

ที่มา: กฤษฎา (2547)



ภาพที่ 3 ผลจากการใช้ตัวกรองคาลมานเพื่อประมาณระยะระหว่างเรือและประภาคาร

ที่มา: กฤษฎา (2547)

ภาพที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบผลระหว่างค่าระยะทางที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการ State (State Equations) โดยตรง, ค่าที่ได้จากเซ็นเซอร์ Stadimeter และค่าที่ได้จากการประมาณค่าด้วยตัวกรองคาลมาน โดยผลการประมาณค่าที่ได้จากตัวกรองคาลมานให้ผลเป็นที่น่าสนใจกว่าค่าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์เมื่อเปรียบเทียบกับ True State ซึ่งจะเห็นได้ว่าการใช้ตัวกรองคาลมานจะช่วยลดปัญหาในเรื่องของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับเซ็นเซอร์ได้ และทำให้ได้ค่าที่ต้องการได้อย่างแม่นยำมากขึ้น

Simon (2001) ยกตัวอย่างการประมาณค่าด้วยเทคนิคตัวกรองคาลมาน โดยยกตัวอย่างการประมาณค่าระยะทางของยานพาหนะที่วิ่งเป็นเส้นตรง ซึ่งมี States คือตำแหน่งของยานพาหนะ และความเร็ว ดังนี้

$$x_k = \begin{bmatrix} p_k \\ v_k \end{bmatrix}$$

โดย p คือ ตำแหน่งของรถยนต์ หน่วย Feet

v คือ ความเร็วของรถยนต์ หน่วย Feet/sec

มีการสั่งการความเร่งเป็นสัญญาณอินพุต (u_k) และมีเอาต์พุต (y_k) คือค่าตำแหน่งของยานพาหนะที่ทำการวัดได้ โดยสมการของระบบแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k + w_k \\ y_k &= Cx_k + z_k \end{aligned}$$

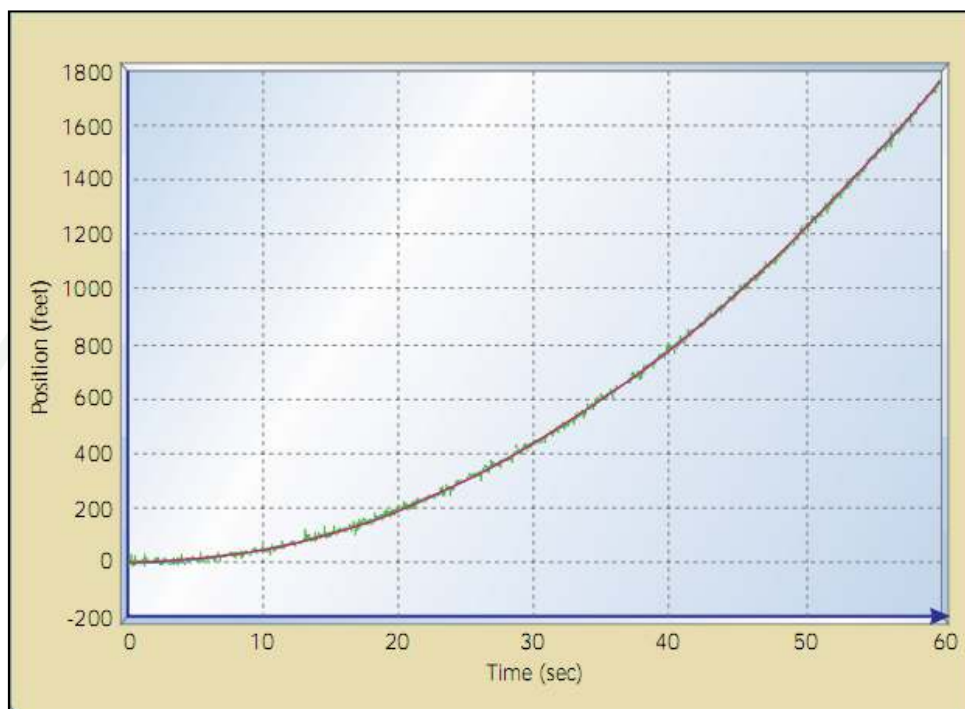
เมื่อ

$$\begin{aligned} p_{k+1} &= p_k + Tv_k + \frac{1}{2}T^2u_k + \tilde{p}_k \\ v_{k+1} &= v_k + Tu_k + \tilde{v}_k \end{aligned}$$

ได้ว่า

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x_k + \begin{bmatrix} T^2/2 \\ T \end{bmatrix} u_k + w_k \\ y_k &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} x_k + z_k \end{aligned}$$

ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการประมาณค่าด้วยเทคนิคตัวกรองคาลมาน, ค่าที่คำนวณได้จากสมการ State โดยตรง และค่าที่ได้จากการวัดด้วยเซ็นเซอร์ แสดงได้ดังนี้

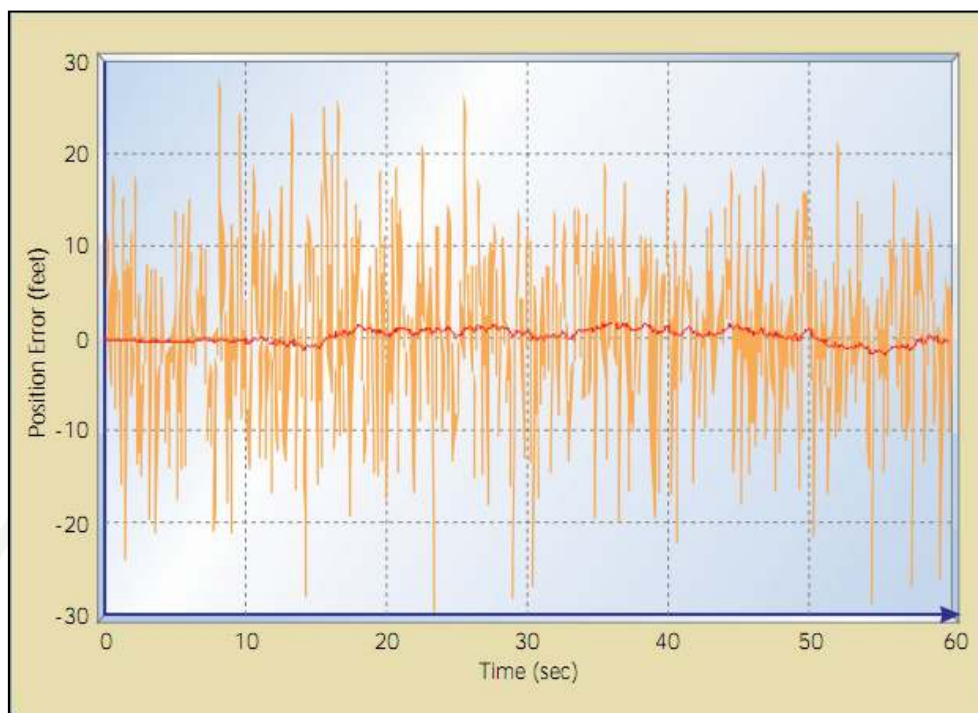


ภาพที่ 4 ตำแหน่งของยานพาหนะที่ได้จากสมการ State, การวัด และการประมาณค่า

ที่มา: Simon (2001)

จากภาพที่ 4 ข้อมูลที่วัดได้แสดงด้วยสีเขียว ซึ่งเป็นสัญญาณที่ถูกรบกวนอยู่ และค่า True State กับค่าที่ได้จากการประมาณค่าแสดงด้วยเส้นโค้งสีแดงกับสีฟ้า ตามลำดับ ภาพที่ 5 แสดงค่าผิดพลาดระหว่างค่าที่วัดได้กับ True State และค่าผิดพลาดระหว่างค่าที่ได้จากการประมาณค่าด้วยเทคนิคตัวกรองคาลมานกับ True State

ภาพที่ 5 เป็นการแสดงกราฟของค่าความผิดพลาด โดยกราฟสีส้มคือค่าผิดพลาดของการวัดเมื่อเปรียบเทียบกับ True State และสีแดงคือค่าผิดพลาดของการประมาณค่าด้วยเทคนิคตัวกรองคาลมานเมื่อเปรียบเทียบกับ True State ซึ่งจะเห็นได้ว่าการประมาณค่าด้วยเทคนิคตัวกรองคาลมานให้ผลที่ดีกว่าการใช้ค่าที่ได้จากเซ็นเซอร์เพียงอย่างเดียว

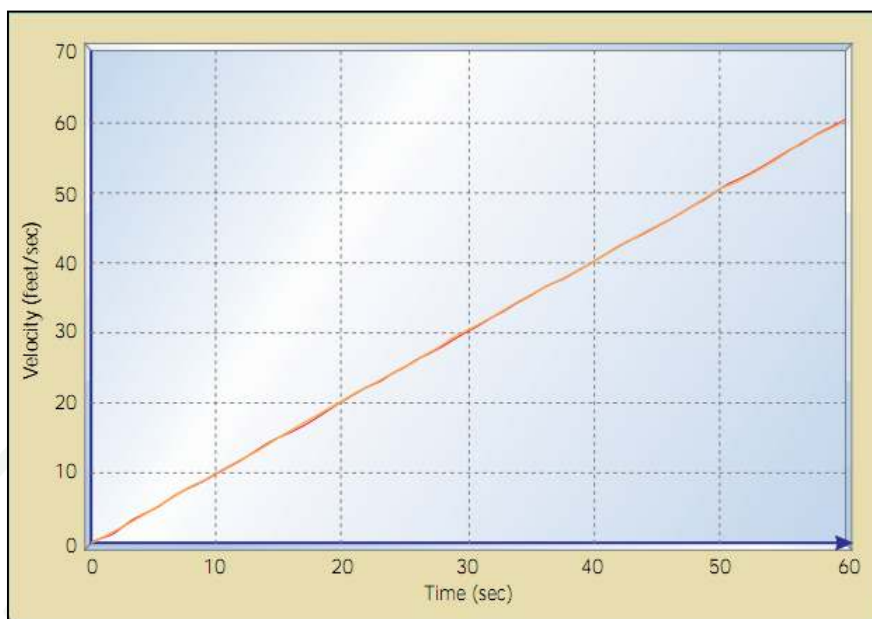


ภาพที่ 5 ค่าความผิดพลาดของค่าที่ได้จากการวัดและการประมาณค่าตำแหน่งของยานพาหนะเมื่อทำการเปรียบเทียบกับ True State

ที่มา: Simon (2001)

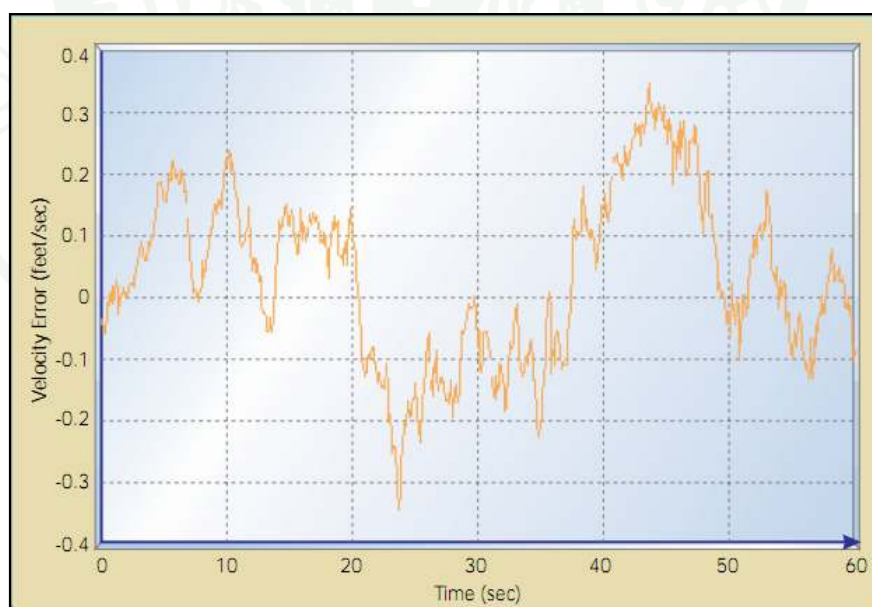
ภาพที่ 6 แสดงค่าความเร็วของยานพาหนะที่ได้จากการประมาณค่าด้วยตัวกรองคาลมานเปรียบเทียบกับ True State ซึ่งหมายถึงค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการ State โดยตรง โดยเส้นสีส้มแสดงค่า True State และเส้นสีแดงแสดงค่าความเร็วของยานพาหนะที่ได้จากการประมาณค่าด้วยตัวกรองคาลมาน

ภาพที่ 7 แสดงค่าความผิดพลาดของความเร็วของยานพาหนะที่ประมาณค่าได้จากตัวกรองคาลมานเมื่อเปรียบเทียบกับค่า True State โดยจะเห็นได้ว่าการประมาณค่า State ที่ได้จากตัวกรองให้ผลที่ดีแม้ไม่มีเซ็นเซอร์สำหรับวัดค่าความเร็วของยานพาหนะ โดยสังเกตได้จากค่าความผิดพลาดมากที่สุดของความเร็วที่ประมาณค่าได้จากตัวกรองคาลมานนั้นมีค่าไม่เกิน 0.4 feet/sec เมื่อยานพาหนะมีความเร็วตั้งแต่ 0 – 60 feet/sec



ภาพที่ 6 เปรียบเทียบความเร็วของยานพาหนะที่ได้จากการประมาณค่า และ True State

ที่มา: Simon (2001)



ภาพที่ 7 ค่าความผิดพลาดของความเร็วที่ได้จากการประมาณค่าเปรียบเทียบกับ True State

ที่มา: Simon (2001)

พทฐี (2550) กล่าวว่า สำหรับการหาค่าโควาเรียนซ์ของสัญญาณรบกวนจากระบบการ (Process noise covariance, Q_k) เมื่อพิจารณาว่าสัญญาณรบกวนของระบบเกิดขึ้นจากสัญญาณควบคุมเท่านั้น โดยกำหนดว่าสมการ State ของระบบอยู่ในรูปดังนี้

$$\dot{x} = Ax + B(u + n_u) \quad (12)$$

โดยรูปแบบทั่วไปของสมการ State ของตัวกรองคาลมานในแบบเชิงเส้นแสดงได้ดังนี้

$$\dot{x} = Ax + Bu + w \quad (13)$$

เมื่อ w คือสัญญาณรบกวนจากระบบการทำงาน (Process noise) และ n_u ใน (12) คือสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากสัญญาณควบคุม โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และมีการกระจายแบบปกติ จะได้ว่า

$$w = Bn_u \quad (14)$$

โดย B คือเมตริกซ์อินพุตของระบบ แต่เมื่อระบบเป็นแบบไม่เชิงเส้น ค่าเมตริกซ์ B สามารถหาได้ดังนี้

$$B = \frac{\partial f}{\partial u} \quad (15)$$

เมื่อทำการหาค่า w เรียบร้อยแล้ว ก็จะสามารถหาค่า Q_k ได้ดัง (5)

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้มุ่งเน้นถึงการนำเทคนิคการประมาณค่าไปใช้สำหรับช่วยประมาณค่าในระบบการทำงานของรถยนต์ โดยจะนำเทคนิคตัวกรองคาลมานมาช่วยทำการประมาณค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

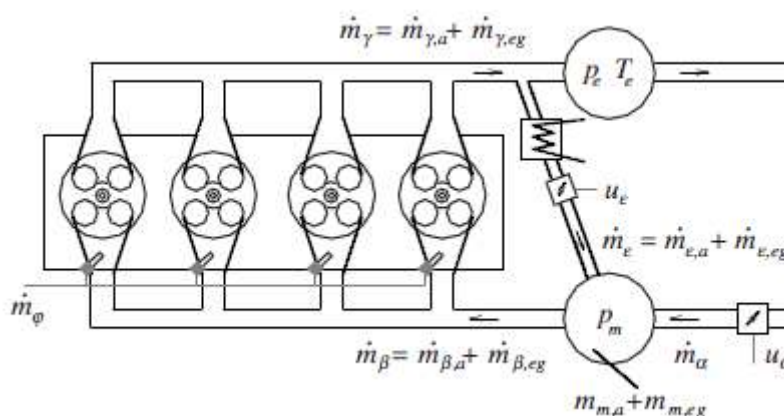
หลักการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมและองค์ประกอบต่างๆ ในระบบทางเดินอากาศ (Air path) ของเครื่องยนต์ดีเซลจะแสดงในหัวข้อถัดไป

หลักการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม (Diesel – Dual –Fuel; DDF)

เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมจะมีลักษณะการทำงานที่คล้ายกับเครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยการอัดโดยทั่วไป (เครื่องยนต์ดีเซล) เพียงแต่มีการนำก๊าซธรรมชาติมาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมด้วย และเปลี่ยนชนิดของเชื้อเพลิงหลักจากน้ำมันดีเซลเป็นก๊าซธรรมชาติ โดยยังคงใช้น้ำมันดีเซลในการจุดระเบิดเช่นเดิม เนื่องจากไม่ได้ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนการอัด เป็นผลให้ก๊าซธรรมชาติเพียงอย่างเดียวไม่สามารถทำให้จุดระเบิดได้ จึงต้องอาศัยเชื้อเพลิงดีเซลในการจุดระเบิดด้วย โดยก๊าซธรรมชาติจะถูกฉีดสู่ระบบที่บริเวณก่อนเข้ากระบอกสูบ เพื่อผสมกับอากาศที่ผ่านออกมาจากท่อร่วมไอดี แล้วจึงถูกดูดเข้าไปภายในกระบอกสูบ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการดูดอากาศของเครื่องยนต์ดีเซล

Guzzella and Onder (2010) ออกแบบสมการการเปลี่ยนแปลงมวลของอากาศที่ไหลเข้าสู่กระบอกสูบไว้ดังนี้



ภาพที่ 8 แบบจำลองทางเดินอากาศที่ไหลเข้ากระบอกสูบของเครื่องยนต์ดีเซล

ที่มา: Guzzella and Onder (2010)

ภาพที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ของก๊าซทั้งหมดที่ไหลเข้ากระบอกสูบของเครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบ ซึ่งมีการนำไอเสียหมุนเวียน (Exhaust recirculation gas; EGR) เข้ามาใช้กับระบบในส่วนนี้ด้วย

โดยไหลกลับมารวมกับอากาศที่บริเวณท่อร่วมไอดี แล้วจึงส่งต่อไปยังสู่กระบอกสูบ สมการที่เกี่ยวข้องแสดงได้ดังนี้

- อัตราการไหลของก๊าซทั้งหมดที่เข้ากระบอกสูบ

$$\dot{m}_\beta = \dot{m}_{\beta,a} + \dot{m}_{\beta,eg} \quad (16)$$

- อัตราการไหลของไอเสียที่ออกจากกระบอกสูบ

$$\dot{m}_\gamma = \dot{m}_{\gamma,a} + \dot{m}_{\gamma,eg} \quad (17)$$

- อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียนที่เข้าสู่ท่อร่วมไอดี

$$\dot{m}_\varepsilon = \dot{m}_{\varepsilon,a} + \dot{m}_{\varepsilon,eg} \quad (18)$$

และแทนอัตราการไหลของอากาศที่เข้าสู่ท่อร่วมไอดีด้วย $\dot{m}_\alpha$

โดยที่

$\dot{m}_\phi$	คือ อัตราการไหลของเชื้อเพลิง
p_m	คือ ความดันที่บริเวณท่อร่วมไอดี
p_e	คือ ความดันที่บริเวณท่อร่วมไอเสีย
T_e	คือ อุณหภูมิที่บริเวณท่อร่วมไอเสีย
u_ε	คือ พื้นที่หน้าตัดของวาล์ว EGR ที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการไหลของไอเสีย
	ย้อนกลับ (Effective area)
u_α	คือ พื้นที่หน้าตัดของวาล์วลิ้นปีกผีเสื้อที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการไหลของอากาศ
	เข้าสู่ท่อร่วมไอดี

ตัวห้อย $,a$ และ $,bg$ แสดงถึงอัตราการไหลของค่าใดๆ ในเชิงของอากาศหรือออกซิเจน (Unburned gas) และ Burned gas ตามลำดับ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นพิจารณาโดยใช้สมการก๊าซอุดมคติเป็นหลัก และพิจารณาสมดุลของก๊าซที่ท่อร่วมไอดีดังนี้

- สมการก๊าซอุดมคติ (Ideal gas law)

$$p_m(t) \cdot V_m(t) = [m_{m,a}(t) + m_{m,eg}(t)] \cdot R \cdot \mathcal{G}_m$$

- สมการสมดุลที่ห้องรวมไอดี แบ่งตามลักษณะของก๊าซเป็น 2 ชนิดดังนี้

$$\frac{d}{dt} m_{m,a}(t) = \dot{m}_\alpha(t) - \dot{m}_{\beta,a}(t) + \dot{m}_{\varepsilon,a}(t)$$

$$\frac{d}{dt} m_{m,eg}(t) = \dot{m}_{\varepsilon,eg}(t) - \dot{m}_{\beta,eg}(t)$$

โดยที่

V_m คือ ปริมาตรที่บริเวณห้องรวมไอดี
 R คือ ค่าคงที่ก๊าซ (Gas constant)
 $\mathcal{G}_m$ คือ อุณหภูมิที่บริเวณห้องรวมไอดี

- สมการสมดุลไอเสียที่ออกจากการบอกลูบ

$$\dot{m}_{\gamma,eg}(t) = \dot{m}_{\beta,eg}(t - \tau_{IEG}) + \dot{m}_{\beta,a}(t - \tau_{IEG}) \cdot \frac{1 + 1/\sigma_0}{\lambda(t - \tau_{IEG})} \quad (19)$$

$$\dot{m}_{\gamma,a}(t) = \dot{m}_{\beta,a}(t - \tau_{IEG}) \cdot \left[1 - \frac{1}{\lambda(t - \tau_{IEG})} \right] \quad (20)$$

เมื่อค่า Lambda เป็นดังนี้

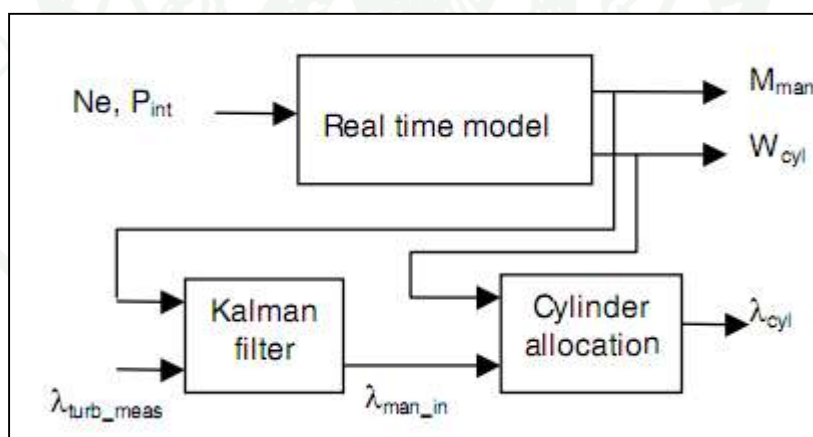
$$\lambda(t) = \frac{1}{\sigma_0} \cdot \frac{\dot{m}_{\beta,a}(t)}{\dot{m}_\varphi(t)} \quad (21)$$

โดย σ_0 คือ ค่าคงที่ Stoichiometric

การประมาณค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบ

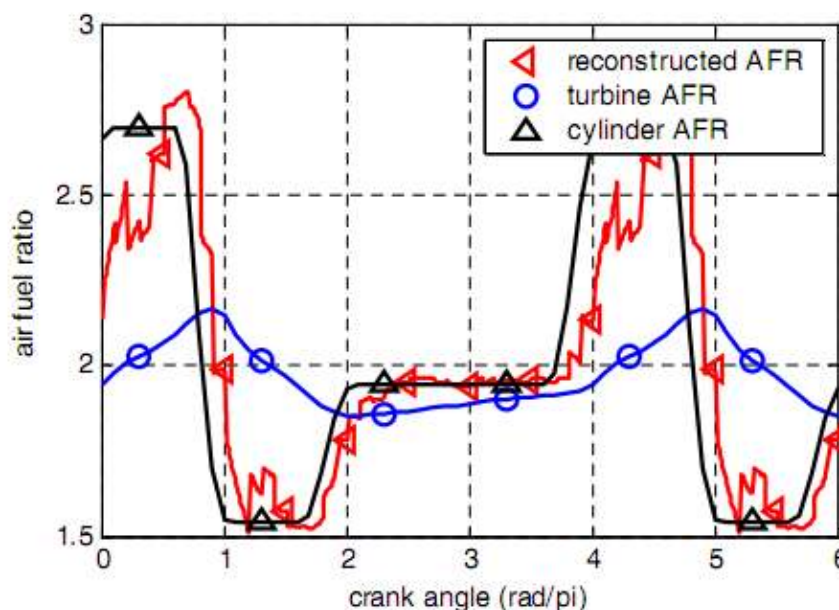
การทราบค่าที่แม่นยำของปริมาณอากาศในกระบอกสูบ เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ใช้เชื้อเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากเมื่อทราบค่าอากาศที่ถูกต้อง ก็จะสามารถคำนวณปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงที่ถูกต้องตามค่า AFR ที่ต้องการได้ อีกทั้งยังช่วยลดมลพิษให้น้อยลงด้วย

Moulin *et al.* (2004) ได้ทำการออกแบบการประมาณค่าอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิง (AFR) ที่แต่ละกระบอกสูบ และยังได้กล่าวว่าความแตกต่างระหว่าง AFR ของกระบอกสูบอาจเป็นสาเหตุให้สมรรถนะของการทำงานลดลง มีมลพิษเพิ่มขึ้น และส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานในส่วน of after treatment ด้วย โดยในงานวิจัยของ Moulin *et al.* (2004) ได้ทำการพัฒนาตัวประมาณค่า AFR สำหรับแต่ละกระบอกสูบโดยใช้แบบจำลองที่เป็นพื้นฐานทางฟิสิกส์ของระบบไอเสีย และใช้เทคนิคตัวกรองคาลมานในการประมาณค่า การประมาณค่าสำหรับงานนี้ประกอบด้วยสามส่วนหลักคือ แบบจำลองที่ทำงานแบบ real time, ตัวกรองคาลมาน และการแบ่งส่วนการประมาณค่าของแต่ละกระบอกสูบ (Cylinder allocation) โครงสร้างของตัวประมาณค่าดังกล่าวแสดงได้ดังภาพที่ 9 และในเบื้องต้นได้ทำการประมาณค่า AFR โดยที่ไม่นำผลจากความเฉื่อยของก๊าซเข้ามาพิจารณา ซึ่งผลที่ได้จากการ simulation แสดงดังภาพที่ 10



ภาพที่ 9 โครงสร้างของตัวประมาณค่าจากงานวิจัยของ Moulin *et al.* (2004)

ที่มา: Moulin *et al.* (2004)



ภาพที่ 10 เปรียบเทียบค่า AFR ระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี, ค่าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์และค่าที่ได้จากการประมาณค่า ในงานวิจัยของ Moulin *et al.* (2004)

ที่มา: Moulin *et al.* (2004)

ภาพที่ 10 เป็นการเปรียบเทียบผลการจำลองระหว่างค่า AFR ภายในกระบอกสูบที่คำนวณโดยทฤษฎี (เส้นสีดำ), ค่า AFR ที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งอยู่ที่บริเวณ turbine (เส้นสีน้ำเงิน) และค่า AFR ที่ได้จากการประมาณค่า (เส้นสีแดง) โดยผลการจำลองออกมาเป็นที่น่าสนใจ เนื่องจากค่าที่ได้จากการประมาณค่ามีลักษณะและแนวโน้มใกล้เคียงกับค่า AFR ภายในกระบอกสูบที่ได้มาโดยทางทฤษฎี แต่พบว่ามีข้อผิดพลาดในเรื่องของเวลาที่ล่าช้าจากค่าจริงอยู่ (delay time) และเมื่อเพิ่มอัลกอริทึมในส่วนของการจัดการเวลาล่าช้าเข้าไป ก็ทำให้ได้ผลการจำลองออกมาเป็นที่น่าสนใจ

ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น เมื่อทราบค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบได้อย่างแม่นยำแล้ว นอกจากจะส่งผลให้การควบคุม AFR เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพแล้ว ยังช่วยลดมลพิษที่เกิดขึ้นจากไอเสียรถยนต์อีกด้วย โดยแสดงได้ดังงานวิจัยของ Takahashi and Sekozawa (1995) ดังนี้

Takahashi and Sekozawa (1995) กล่าวว่าการพัฒนาการควบคุมค่า AFR ให้มีความแม่นยำมากขึ้น มีผลทำให้สามารถลดมลพิษที่เกิดจากรถยนต์ที่ใช้แก๊สโซลีน (Gasoline, SI Engine) ได้ โดยการทราบค่าอากาศที่ Inlet port จะช่วยทำให้การควบคุมค่า AFR มีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งวิธีการหาค่าปริมาณอากาศที่นำมาใช้ควบคุม AFR โดยเบื้องต้นนั้นได้มาจากเซ็นเซอร์วัดอัตราการไหลของอากาศที่ทำการวัดการไหลของอากาศก่อนเข้าสู่วาล์วล้นปีกผีเสื้อ (Throttle valve) จึงทำให้เกิดความล่าช้าของเวลา และทำให้ไม่สามารถควบคุมค่า AFR ได้ตามต้องการ จึงได้ออกแบบการชดเชยเวลาเพื่อให้สามารถหาค่าปริมาณอากาศที่บริเวณ Inlet port ได้ โดยภาพที่ 11 แสดงลักษณะของปริมาณอากาศที่บริเวณวาล์วล้นปีกผีเสื้อและบริเวณ Inlet port เมื่อนำค่าปริมาณอากาศเหล่านี้ไปใช้ควบคุมค่า AFR สามารถแสดงความแตกต่างของไอเสียที่เกิดขึ้นได้ดังตารางที่ 1

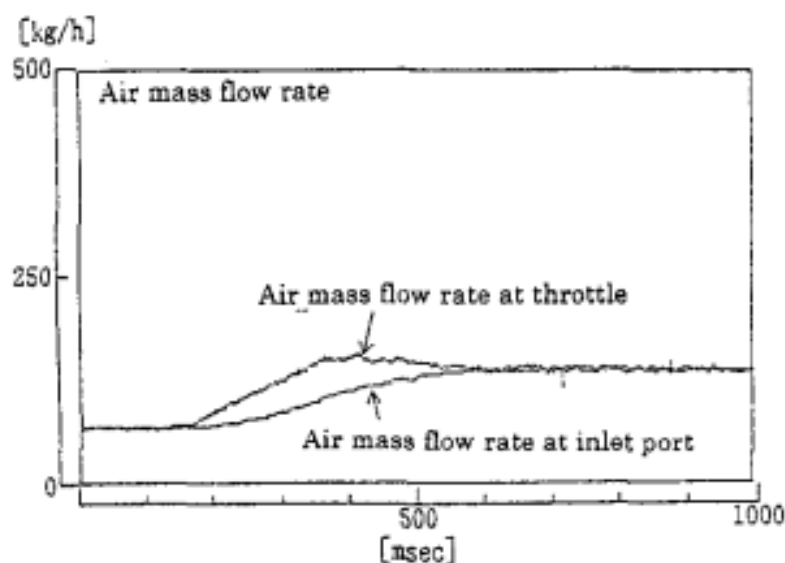
ตารางที่ 1 เปรียบเทียบปริมาณไอเสียที่เกิดขึ้นระหว่าง 2 วิธี คือการใช้การประมาณค่าปริมาณอากาศที่ Inlet port กับการใช้ค่าอากาศที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ เพื่อควบคุมค่า AFR

Exhaust gas	Proposed Method	Conventional Method
HC	0.39	0.46
CO	4.11	4.57
NOx	0.11	0.17

unit : g/mile

ที่มา: Takahashi and Sekozawa (1995)

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าการทราบปริมาณอากาศที่ถูกต้องเพื่อใช้คำนวณหาปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงนั้น มีผลทำให้มลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้มีปริมาณน้อยลงได้อย่างชัดเจน โดยสามารถลดปริมาณของไฮโดรคาร์บอน (HC), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และ ออกไซด์ของไนโตรเจน (NOx) ในไอเสียได้ 15%, 10% และ 35% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหาค่าปริมาณอากาศโดยทั่วไป (จากเซ็นเซอร์)

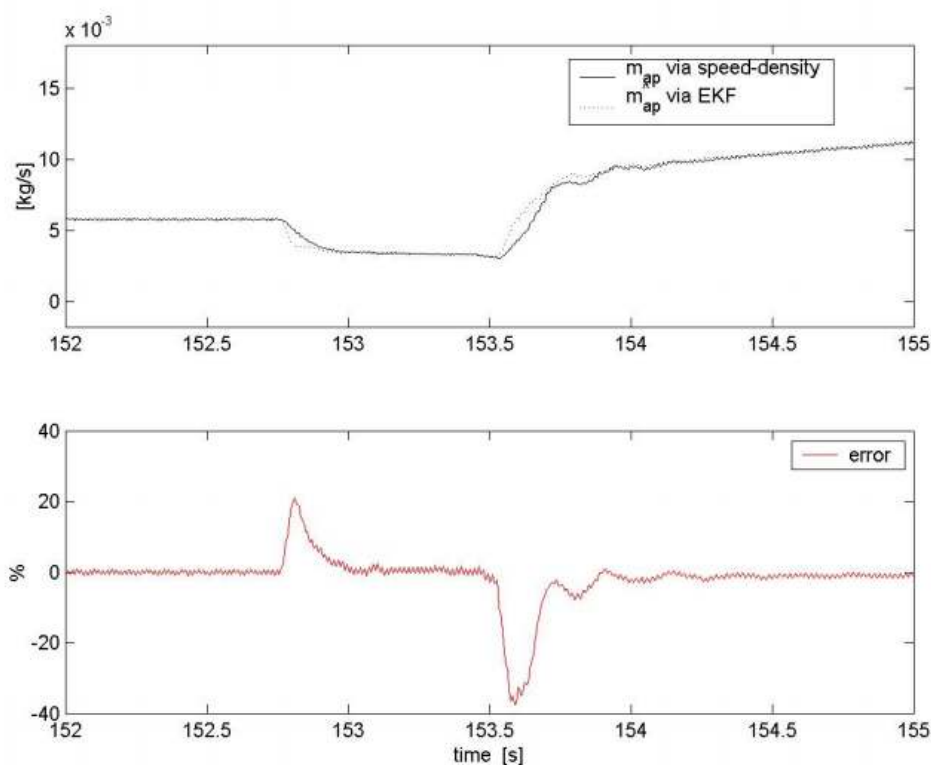


ภาพที่ 11 อัตราการไหลของอากาศที่ Throttle valve และ Inlet port ในงานวิจัยของ Takahashi and Sekozawa (1995)

ที่มา: Takahashi and Sekozawa (1995)

Barbarisi *et al.* (n.d.) ได้ทำการออกแบบการประมาณค่าปริมาณอากาศที่ไหลเข้ากระบอกสูบของเครื่องยนต์แก๊สโซลีน 4 สูบ ขนาด 1282 cc เพื่อทำการหาปริมาณการฉีดยาน้ำมันที่ทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ โดยมีจุดประสงค์หลักคือต้องการให้มลพิษจากการทำงานของเครื่องยนต์อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานทางด้านมลพิษที่กำหนดไว้ในสหรัฐอเมริกาและยุโรป ทำการหาปริมาณอากาศที่ไหลเข้ากระบอกสูบโดยใช้ตัวกรองคาถมานเป็นตัวประมาณค่า ซึ่งค่าที่ต้องการคือความดันเฉลี่ยที่ท่อร่วมไอดี แต่ทำการประมาณค่าที่บริเวณก่อนถึงเซ็นเซอร์ เนื่องจากค่าความดันที่เซ็นเซอร์วัดได้จะถูกสัญญาณรบกวนต่างๆ ทั้งเกิดจากการกระเพื่อมของความดัน (Pumping fluctuations) และสัญญาณรบกวนต่อเซ็นเซอร์โดยตรง (Measurement noise) โดยตัวประมาณค่าสามารถทำหน้าที่ได้ดีทั้งในช่วงที่มีสถานะของการทำงานคงตัว (Steady-State) และสถานะชั่วครู่ (Transient-State) แสดงได้ดังภาพที่ 11

ภาพที่ 12 เป็นการแสดงถึงความแม่นยำในการใช้ตัวกรองคาถมานเพื่อประมาณค่าปริมาณอากาศที่ไหลเข้ากระบอกสูบของเครื่องยนต์แก๊สโซลีน โดยแสดงการประมาณค่าที่ได้จาก EKF เปรียบเทียบกับการประมาณค่าที่ได้จาก Speed-Density equation ที่ช่วงเวลาหนึ่ง



ภาพที่ 12 ภาพบน: ปริมาณการไหลของอากาศที่คำนวณด้วย Speed-Density equation และประมาณค่าด้วย EKF, ภาพล่าง: ค่าความผิดพลาดระหว่างทั้งสองวิธี ในงานวิจัยของ Barbarisi *et al.* (n.d.)

ที่มา: Barbarisi *et al.* (n.d.)

Chauvin *et al.* (2006) ได้ออกแบบการประมาณค่าอัตราส่วนระหว่างมวลของก๊าซที่เผาไหม้แล้วกับมวลของก๊าซทั้งหมดภายในห้องรวมไอดี (Burned gas rate; BGR) ของเครื่องยนต์ที่ทำงานแบบ HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) มีผลทำให้ได้ค่าปริมาณอากาศที่เข้ากระบอกสูบในช่วงเวลาใดๆ โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดมลพิษจากเครื่องยนต์ ได้ทำการออกแบบโดยใช้ตัวสังเกต 2 แบบ แบบที่หนึ่งเป็นการตั้งสมมติฐานว่าระบบเป็นแบบ Isothermal (อุณหภูมิที่บริเวณห้องรวมไอดีมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก) และแบบที่สองเป็นแบบ adiabatic ซึ่งทั้งสองแบบได้ตั้งอยู่บนสมมติฐานทางฟิสิกส์ทั้งสิ้นแต่มีการตั้งสมมติฐานบางข้อที่แตกต่างกันออกไป และเลือกใช้เซ็นเซอร์ที่ต่างกัน โดยในเอกสารฉบับนี้ขอยกเพียงสมการในส่วนของ Isothermal case มาอธิบาย แสดงได้ดังนี้

- ตัวแปร State (State variables)

$$x = \begin{bmatrix} P_{int} & F_{int} & \theta_{egr} \end{bmatrix}^T \in \mathbb{R}^3 \quad (22)$$

โดย

- P_{int} คือ ความดันที่ท่อร่วมไอดี (Pa)
- F_{int} คือ อัตราส่วนระหว่างไอเสียต่อก๊าซทั้งหมดที่ท่อร่วมไอดี (Burned gas rate at the intake manifold, BGR)
- θ_{egr} คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันที่ท่อร่วมไอเสีย

- สมการ State (State equations)

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \alpha_{int} (\dot{m}_{air} + x_3 u - \eta_{vol, map}(x_1, N_e) \beta_{int} x_1) \\ \dot{x}_2 &= \frac{\alpha_{int}}{x_1} (F_{exh} x_3 u - (\dot{m}_{air} + x_3 u) x_2) \\ \dot{x}_3 &= 0 \\ y &= x_1 \end{aligned} \quad (23)$$

เมื่อ $\alpha_{int} \triangleq \frac{RT_{int}}{V_{int}}, \beta_{int} \triangleq \frac{1}{RT_{int}} V_{cyl} \frac{N_e}{120}$

โดย

- T_{int} คือ อุณหภูมิที่บริเวณท่อร่วมไอดี (Kelvin, K)
- V_{int} คือ ปริมาตรท่อร่วมไอดี (Liter, L)
- R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (J/kg.K)
- F_{exh} คือ อัตราส่วนระหว่างไอเสียต่อก๊าซทั้งหมดที่ท่อร่วมไอเสีย (-)
- V_{cyl} คือ ปริมาตรกระบอกสูบ (Liter, L)
- N_e คือ ความเร็วรอบเครื่องยนต์ (rpm)
- $\dot{m}_{air}$ คือ อัตราการไหลของอากาศที่วัดด้วยเซ็นเซอร์ MAF (kg/sec)
- $\eta_{vol, map}$ คือ ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร (Volumetric efficiency) (-)

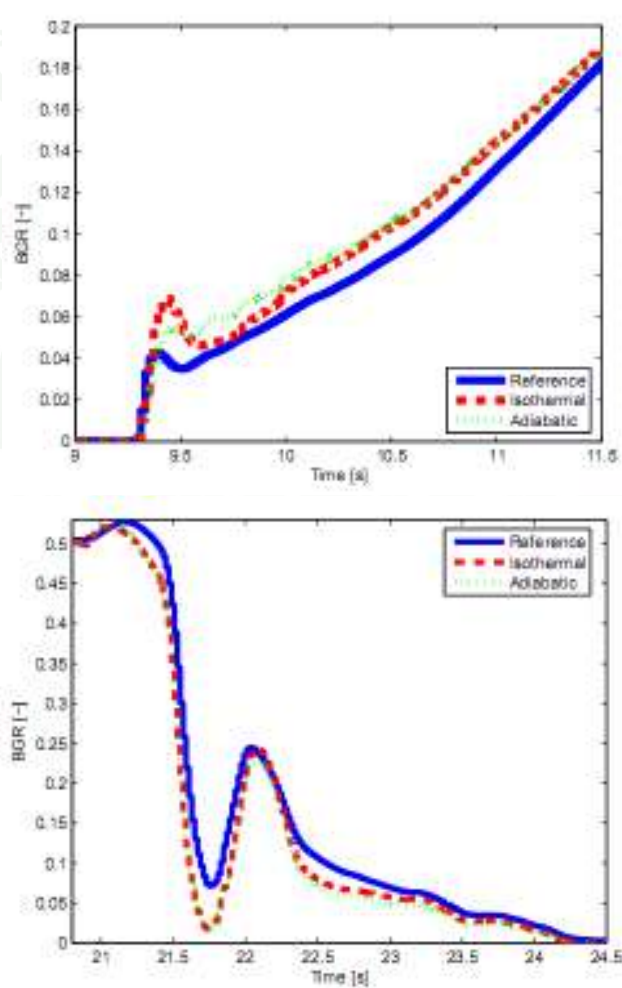
- กำหนดอัตราการไหลของไอเสียย้อนกลับ

$$\dot{m}_{egr} \triangleq \theta_{egr} u \quad (24)$$

โดย

$\dot{m}_{egr}$ คือ อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน (kg/sec)

u คือ Effective area ของวาล์ว EGR (-)



ภาพที่ 13 เปรียบเทียบปริมาณ BGR ในท่อร่วมไอศระหว่างค่าอ้างอิงที่ได้จากแบบจำลองของระบบ, ค่าที่ได้จาก Isothermal case และค่าที่ได้จาก Adiabatic case ที่ช่วงเวลาใด ๆ ในงานวิจัยของ Chauvin *et al.* (2006)

ที่มา: Chauvin *et al.* (2006)

เมื่อได้สมการ State แล้ว จึงทำการออกแบบตัวสังเกต โดยใช้หลักการของตัวสังเกตดังที่ได้แสดงไว้ที่ส่วนบนของการตรวจเอกสาร โดยผลที่ได้จากการจำลองของตัวสังเกตทั้งสองแบบเปรียบเทียบกับแบบจำลองของระบบ (Reference Model) อยู่ในเกณฑ์ดี แสดงได้ดังภาพที่ 13



อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

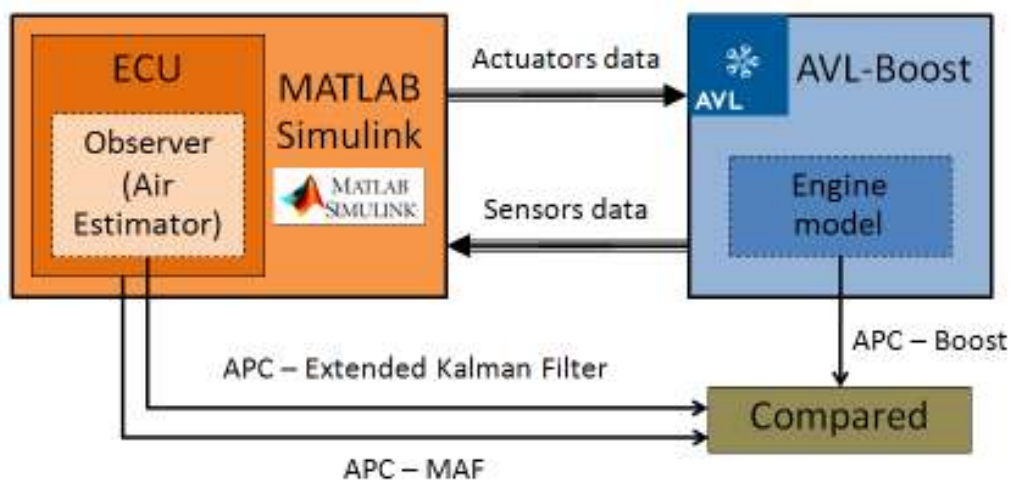
เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นการเปรียบเทียบผลการจำลอง จึงมีการใช้ Software โปรแกรมต่างๆ เป็นอุปกรณ์หลักในการทำงาน โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์เป็นอุปกรณ์ดำเนินงาน โปรแกรมที่ใช้งานมีดังนี้

1. MATLAB

ใช้โปรแกรม MATLAB version 2009a ทำหน้าที่เสมือนเป็น ECU ของรถกระบะ สำหรับโปรแกรมการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมที่นำมาใช้ได้รับความอนุเคราะห์จากสถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. โดยผู้วิจัยได้ทำการเขียนอัลกอริทึมในส่วนของการประมาณค่าปริมาณอากาศที่ไหลเข้ากระบอกสูบโดยใช้เทคนิคตัวกรองคาลมานเพิ่มเข้าไปเพื่อทำการศึกษางานวิจัยครั้งนี้ ซึ่งโปรแกรมการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมที่ใช้และอัลกอริทึมที่ทำการเขียนเพิ่มทั้งหมดถูกออกแบบและเขียนด้วย MATLAB-Simulink เป็นหลัก

2. AVL - BOOST

ใช้โปรแกรม AVL – Boost version 2010.1 ทำหน้าที่เป็นเครื่องยนต์เสมือน ซึ่งแบบจำลองของเครื่องยนต์ 2KD – FTV ที่ได้นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากสถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. โปรแกรม AVL – Boost มีความสัมพันธ์ในการทำงานร่วมกับโปรแกรม MATLAB ในลักษณะของการส่งถ่ายข้อมูลกันระหว่างเครื่องยนต์และ ECU โดยในการจำลองการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมนั้นจะต้องทำการเชื่อมต่อโปรแกรม AVL – Boost กับโปรแกรม MATLAB ซึ่งเครื่องยนต์เสมือนจะรับข้อมูลที่ทำให้การสั่ง Actuator ต่างๆ จากโปรแกรม MATLAB มาเพื่อใช้สั่งการทำงาน และทำการส่งสัญญาณที่เปรียบเสมือนเซ็นเซอร์จากรถกระบะกลับไปยังโปรแกรม MATLAB อีกครั้ง (เปรียบเสมือน ECU ของรถ) โดยจะมีกระบวนการทำงานร่วมกันเป็นเช่นนี้ไปจนจบการจำลองในครั้งนั้นๆ และสามารถแสดงหลักการทำงานดังกล่าวได้ดังภาพที่ 14



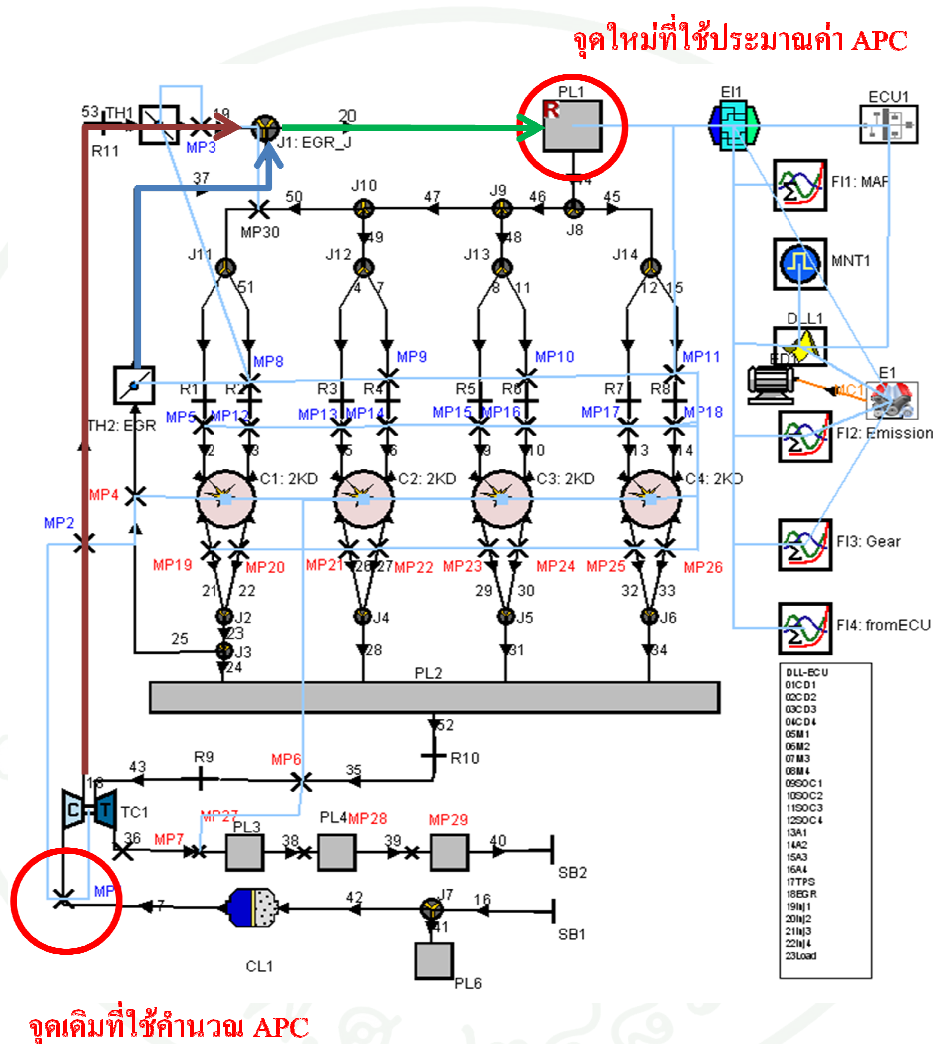
ภาพที่ 14 แผนภาพแสดงการทำงานระหว่างโปรแกรม MATLAB และ AVL - BOOST

3. AVL - CAMEO

เป็นโปรแกรมที่นำมาใช้เพื่อทำการสร้างสมการจากข้อมูลที่มีอยู่ โดยนำมาใช้ในส่วนของการสร้างสมการเพื่อเทียบเคียงค่าประสิทธิภาพเชิงปริมาตร (Volumetric efficiency) ซึ่งได้นำข้อมูลความดันที่ท่อร่วมไอดี, ความเร็วรอบเครื่องยนต์ และค่าประสิทธิภาพเชิงปริมาตรที่บันทึกได้จากการจำลองการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมกับโปรแกรม AVL - Boost มาสร้างสมการการหาประสิทธิภาพเชิงปริมาตรด้วยโปรแกรม CAMEO โดยเป็นสมการที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ท่อร่วมไอดีและความเร็วรอบเครื่องยนต์

วิธีการ

1. แนวคิดงานวิจัย



ภาพที่ 15 แบบจำลองเครื่องยนต์ดีเซล 2KD – FTV จากโปรแกรม AVL – Boost ที่ใช้ในงานวิจัย

ที่มา: สถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. (PTTRTI)

ภาพที่ 15 เป็นแบบจำลองเครื่องยนต์ดีเซล 2KD-FTV ปี 2008 ที่ออกแบบด้วยโปรแกรม AVL – Boost โดยแสดงถึงบริเวณที่ใช้คำนวณหาค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบ ซึ่งต่อไปนี้จะขอเรียกค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบด้วยตัวย่อ APC (Air-Per-Cylinder) ในเบื้องต้นนั้นใช้การ

คำนวณค่า APC จากเซ็นเซอร์ MAF (วงกลมสีแดงด้านล่าง) ซึ่งอากาศที่ผ่าน MAF นั้นไม่ได้ถูกส่งเข้าสู่กระบอกสูบโดยตรง (เส้นสีเลือดหมูแสดงอากาศผ่านจาก MAF ไปยังวาล์วลิ้นปีกผีเสื้อ) แต่ยังมีไอเสียหมุนเวียน (เส้นสีฟ้า) ส่งเข้ามาพร้อมกับอากาศที่ผ่าน MAF อีกด้วย แล้วจึงถูกส่งเข้าสู่ท่อร่วมไอดี (จุด PL1) แต่เนื่องจากยังคงมีออกซิเจนเหลืออยู่ในไอเสียย้อนกลับด้วย เป็นผลทำให้การคำนวณค่า APC จากเซ็นเซอร์ MAF โดยตรงนั้นเกิดความคลาดเคลื่อน สำหรับงานวิจัยนี้มุ่งเน้นทำการประมาณค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบโดยใช้ข้อมูลต่างๆ ที่บริเวณท่อร่วมไอดี (วงกลมสีแดงด้านบน) โดยคาดหวังให้ทราบค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบได้ดีขึ้น เนื่องจากการทำนายโดยรวมผลจากออกซิเจนที่ปะปนอยู่ในไอเสียหมุนเวียนแล้ว

2. การออกแบบสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบ

2.1 สมการก๊าซอุดมคติ

ทำการออกแบบสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบ โดยใช้สมการก๊าซอุดมคติเป็นหลัก (Ideal gas law) ดังนี้

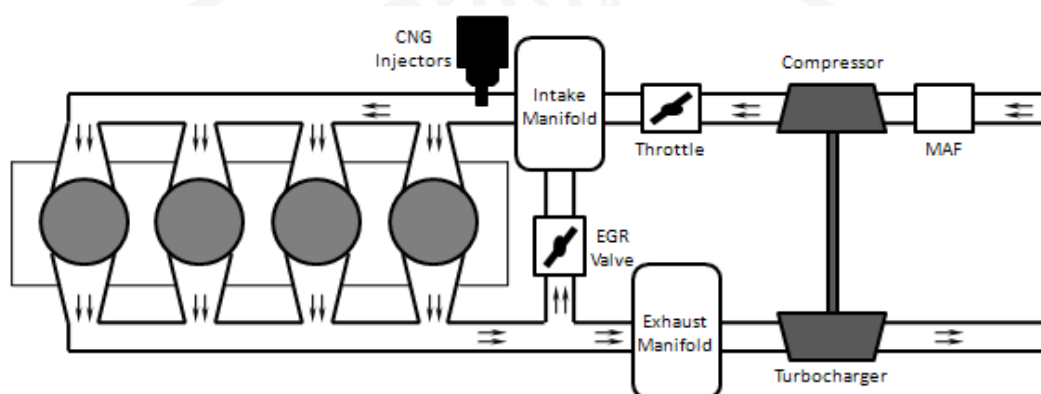
$$P_{int} V_{int} = m_{int} R T_{int} \quad (25)$$

โดย	P_{int}	คือ ความดันที่ท่อร่วมไอดี (Pa)
	V_{int}	คือ ปริมาตรท่อร่วมไอดี (m^3)
	m_{int}	คือ มวลของก๊าซทั้งหมดที่ท่อร่วมไอดี (kg)
	R	คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (J/kg.K)
	T_{int}	คือ อุณหภูมิที่บริเวณท่อร่วมไอดี (K)

เมื่อระบบการจ่ายเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมมีการจ่ายก๊าซธรรมชาติเข้าไปที่บริเวณปลายทางออกของท่อร่วมไอดี หรือก่อนเข้ากระบอกสูบนั่นเอง จึงสามารถเขียนสมการเพื่อสมดุลมวลได้ดังนี้

$$\dot{m}_{asp} = \dot{m}_{air} + \dot{m}_{egr} + \dot{m}_{cng} - \dot{m}_{int} \quad (26)$$

- โดย $\dot{m}_{asp}$ คือ อัตราการไหลของก๊าซทั้งหมดเข้าสู่กระบอกสูบ (kg/sec)
 $\dot{m}_{air}$ คือ อัตราการไหลของอากาศ (MAF) ที่เข้าสู่ท่อร่วมไอดี (kg/sec)
 $\dot{m}_{egr}$ คือ อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียนที่เข้าสู่ท่อร่วมไอดี (kg/sec)
 $\dot{m}_{cng}$ คือ อัตราการฉีดก๊าซธรรมชาติ (kg/sec)
 $\dot{m}_{int}$ คือ อัตราการไหลของก๊าซทั้งหมดที่ค้างในท่อร่วมไอดี (kg/sec)



ภาพที่ 16 ระบบทางเดินอากาศที่ผ่านเข้าและออกจากกระบอกสูบของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม

เมื่อพิจารณาให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในท่อร่วมไอดีมีค่าน้อยมาก (Isothermal) สามารถเขียนสมการการเปลี่ยนแปลงจาก (19) ได้ดังนี้

$$\dot{P}_{int} = \left(\frac{RT_{int}}{V_{int}} \right) \dot{m}_{int} \quad (27)$$

จาก (26) สามารถเขียน (27) ใหม่ได้ดังนี้

$$\dot{P}_{int} = \left(\frac{RT_{int}}{V_{int}} \right) (\dot{m}_{air} + \dot{m}_{egr} + \dot{m}_{cng} - \dot{m}_{asp}) \quad (28)$$

เมื่อ Speed-Density equation แสดงได้ดังนี้

$$\dot{m}_{asp} = \eta_{vol}(P_{int}, N_e) \frac{P_{int}}{RT_{int}} V_{cyl} \frac{N_e}{120} \quad (29)$$

โดย $\eta_{vol}(P_{int}, N_e)$ คือ ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร (Volumetric efficiency) (-)
 N_e คือ ความเร็วรอบเครื่องยนต์ (rpm)
 V_{cyl} คือ ปริมาตรกระบอกสูบ (m^3)

2.2 อัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดที่ท่อร่วมไอดี (Burned gas rate at the I.M.)

$$F_{int} = \frac{m_{int,bg}}{m_{int}} \quad (30)$$

โดย F_{int} คือ อัตราส่วน Burned Gas ต่อก๊าซทั้งหมดที่ท่อร่วมไอดี (BGR at I.M.)
 $m_{int,bg}$ คือ ปริมาณ Burned gas ทั้งหมดที่อยู่ในท่อร่วมไอดี (kg)

อัตราการเปลี่ยนแปลงค่า BGR ที่ท่อร่วมไอดี แสดงได้ดังนี้

$$\dot{F}_{int} = \frac{(\dot{m}_{int,bg} m_{int}) - (m_{int,bg} \dot{m}_{int})}{(m_{int})^2} \quad (31)$$

เมื่อพิจารณาว่าอัตราการไหลของ Burned gas ทั้งหมดที่เข้าสู่ท่อร่วมไอดีเป็น Burned gas ที่มาจากไอเสียหมุนเวียนเท่านั้น ดังนั้น

$$\begin{aligned} \dot{m}_{int,bg} &= \dot{m}_{egr,bg} - \dot{m}_{asp,bg} \\ &= F_{exh} \dot{m}_{egr} - F_{int} \dot{m}_{asp} \end{aligned} \quad (32)$$

โดย F_{exh} คือ อัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดที่ท่อร่วมไอเสีย (BGR at E.M.)

จาก (24) และ (26) สามารถเขียน (25) ใหม่ได้ดังนี้

$$\dot{F}_{int} = \frac{[(F_{exh} \dot{m}_{egr} - F_{int} \dot{m}_{asp}) m_{int}] - (F_{int} m_{int} \dot{m}_{int})}{(m_{int})^2}$$

$$\dot{F}_{int} = m_{int} \frac{(F_{exh} \dot{m}_{egr} - F_{int} \dot{m}_{asp}) - (F_{int} \dot{m}_{int})}{(m_{int})^2}$$

$$\dot{F}_{int} = \frac{(F_{exh}\dot{m}_{egr} - F_{int}\dot{m}_{asp}) - [F_{int}(\dot{m}_{air} + \dot{m}_{egr} + \dot{m}_{cng} - \dot{m}_{asp})]}{m_{int}}$$

$$\dot{F}_{int} = \frac{RT_{int}}{P_{int}V_{int}}[F_{exh}\dot{m}_{egr} - F_{int}(\dot{m}_{air} + \dot{m}_{egr} + \dot{m}_{cng})] \quad (33)$$

2.3 อัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดที่ท่อร่วมไอเสีย (Burned gas rate at the E.M.)

เนื่องเป็นในลักษณะของอัตราส่วน ดังนั้นอัตราส่วนโดยมวลระหว่าง Burned gas และ ก๊าซทั้งหมดที่ท่อร่วมไอเสีย (F_{exh}) จาก (33) สามารถหาจากไอเสียทั้งหมดออกจากกระบอกสูบได้เช่นกัน แสดงได้ดังนี้

$$F_{exh} = \frac{m_{exh,bg}}{m_{exh}} = \frac{\dot{m}_{exh,bg}}{\dot{m}_{exh}} \quad (34)$$

เมื่อ $\dot{m}_{exh}$ และ $\dot{m}_{exh,bg}$ คืออัตราการไหลของก๊าซทั้งหมดของไอเสียที่ออกจากกระบอกสูบและอัตราการไหลของ Burned gas ในไอเสียที่ออกจากกระบอกสูบตามลำดับ โดยสามารถนำสมการ (17), (19) และ (20) จาก Guzzella and Onder (2010) ที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้นมาประยุกต์ใช้เพื่อหาค่า F_{exh} ได้ โดยแสดงค่า Lambda ของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมได้ดังนี้

$$\lambda_{DDF} = \frac{(A/F)_{actual}}{(A/F)_{DDF,stoi}} \quad (35)$$

เมื่อ

$$(A/F)_{actual} = \frac{\dot{m}_{asp,a}}{\dot{m}_{cng} + \dot{m}_d} \quad (36)$$

$$(A/F)_{DDF,stoi} = R_e(A/F)_{cng} + (1 - R_e)(A/F)_d \quad (37)$$

โดย $\dot{m}_d$ คือ อัตราการฉีดน้ำมันดีเซล (kg/sec)

R_e คือ อัตราส่วนโดยมวลระหว่าง CNG และ ดีเซล (Replacement ratio) (-)

จาก (19) เขียนสมการอัตราการไหลของ Burned gas ในไอเสียที่ออกจากกระบอกสูบของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมได้ใหม่นี้

$$\begin{aligned}\dot{m}_{exh,bg}(t) &= \dot{m}_{asp,bg}(t - \tau_{IEG}) + \left[\dot{m}_{asp,a}(t - \tau_{IEG}) \cdot \frac{1 + 1/(A/F)_{DDF,stoi}}{\lambda_{DDF}(t - \tau_{IEG})} \right] \\ &= \dot{m}_{asp,bg}(t - \tau_{IEG}) + \left[(\dot{m}_d + \dot{m}_{cng}) \cdot \left(\frac{A}{F} \right)_{DDF,stoi} \right] + (\dot{m}_d + \dot{m}_{cng})\end{aligned}\quad (38)$$

เมื่อ τ_{IEG} คือ ค่าเวลาล่าช้าจากการเผาไหม้ (Induction to exhaust gas delay) และมีค่าดังนี้

$$\tau_{IEG} \approx \frac{3\pi}{N_e} \quad (39)$$

จาก (20) เขียนสมการอัตราการไหลของออกซิเจนที่เหลืออยู่ในไอเสียที่ออกจากกระบอกสูบของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{m}_{exh,a}(t) &= \dot{m}_{asp,a}(t - \tau_{IEG}) \cdot \left(1 - \frac{1}{\lambda_{DDF}(t - \tau_{IEG})} \right) \\ &= \dot{m}_{asp,a}(t - \tau_{IEG}) - \left[(\dot{m}_d + \dot{m}_{cng}) \cdot \left(\frac{A}{F} \right)_{DDF,stoi} \right]\end{aligned}\quad (40)$$

เมื่อพิจารณาใช้ค่าคงที่ $(A/F)_d$ และ $(A/F)_{cng}$ ค่าเดียวกับในงานวิจัยของ Chatlatanagulchai (2010) โดยแสดงได้ดังนี้

$$(A/F)_d = 14.6 \text{ และ } (A/F)_{cng} = 16.3$$

จะได้ว่า

$$\begin{aligned}(A/F)_{DDF,stoi} &= 16.3R_e + (1 - R_e)(14.6) \\ &= 1.7R_e + 14.6\end{aligned}\quad (41)$$

เมื่อพิจารณาว่า

$$\dot{m}_{exh} = \dot{m}_{exh,bg} + \dot{m}_{exh,a} \quad (42)$$

จาก (34), (38), (40), (41) และ (42) สามารถเขียนสมการของ F_{exh} ใหม่ได้ดังนี้

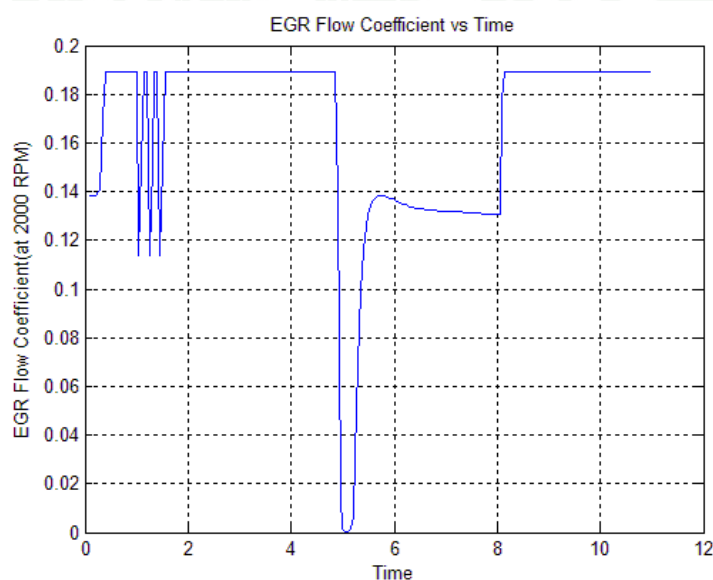
$$F_{exh}(t) = \frac{\dot{m}_{asp,bg}(t - \tau_{IEG}) + (1.7R_e + 15.6) [\dot{m}_d(t - \tau_{IEG}) + \dot{m}_{cng}(t - \tau_{IEG})]}{[\dot{m}_{asp,bg}(t - \tau_{IEG}) + \dot{m}_{asp,a}(t - \tau_{IEG})] + [\dot{m}_d(t - \tau_{IEG}) + \dot{m}_{cng}(t - \tau_{IEG})]} \quad (43)$$

2.4 อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน

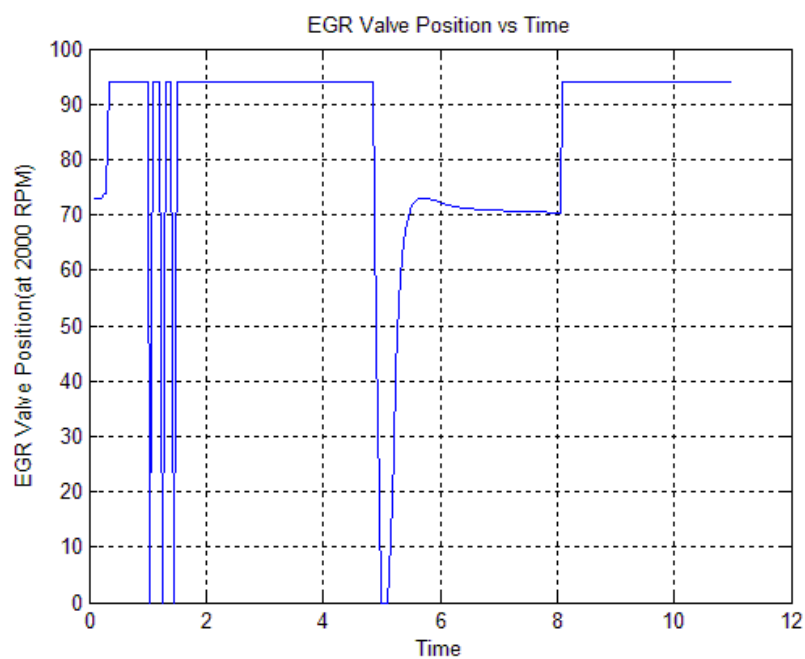
พิจารณาให้อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียนมีค่าดัง (24) แสดงได้ดังนี้

$$\dot{m}_{egr} \triangleq \theta_{egr} u$$

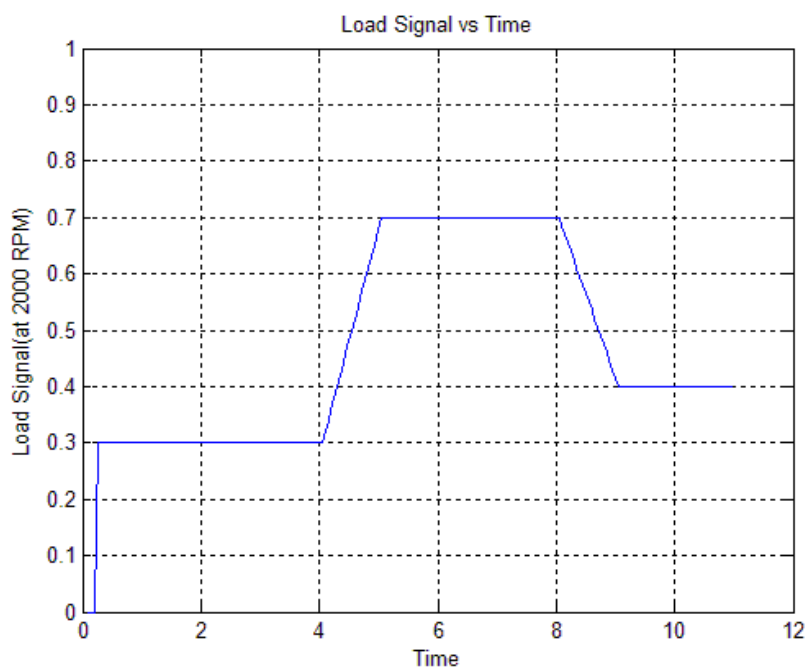
โดยสมการ (24) เป็นการทราบค่าอัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียนโดยประมาณ ซึ่งสามารถทำการพิสูจน์ได้ดังนี้



ภาพที่ 17 EGR Flow Coefficient จาก AVL – Boost ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm และตำแหน่งคันเร่งดังภาพที่ 19

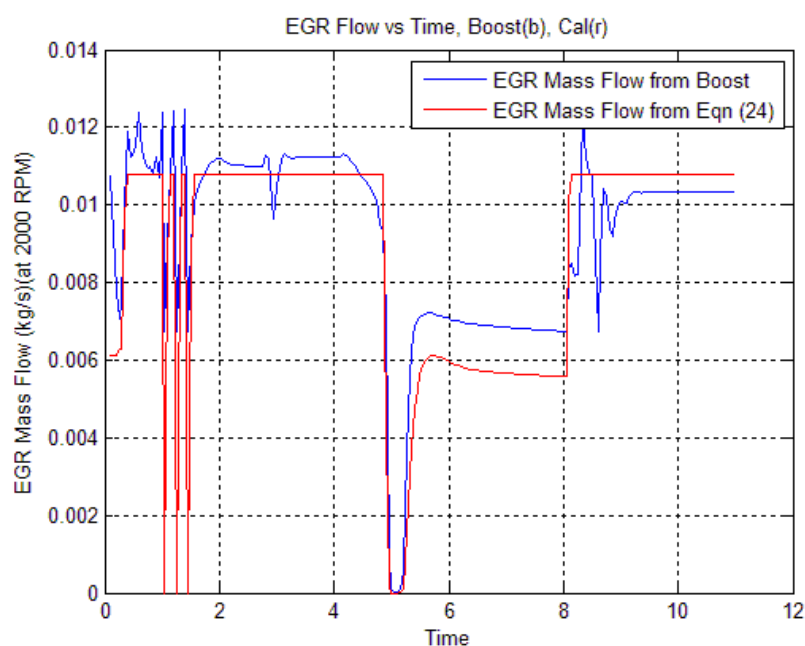


ภาพที่ 18 ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm และตำแหน่งคันเร่ง ดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 ตำแหน่งคันเร่งสำหรับการจำลองการหาค่าอัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียนดัง (24)

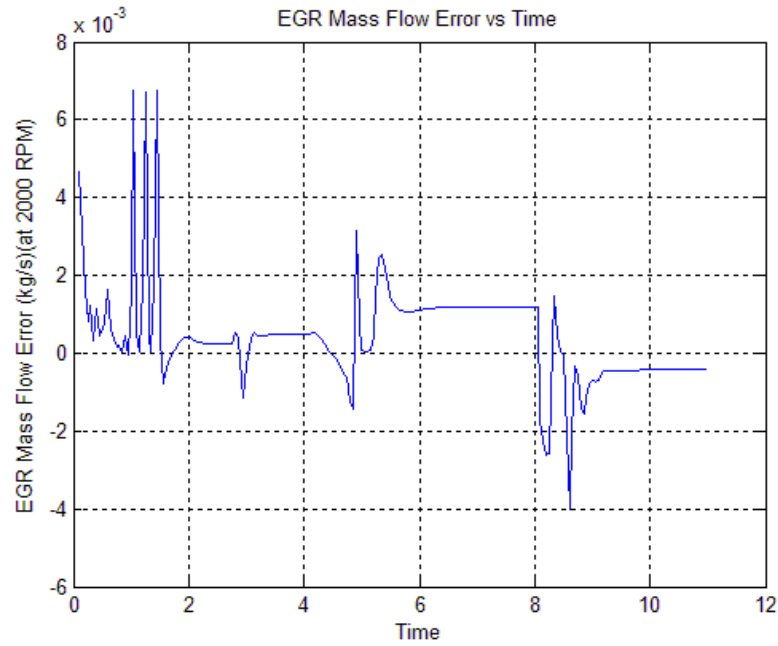
จากภาพที่ 17 และ 18 เป็นค่า θ_{egr} และตำแหน่งวาล์ว EGR ที่ได้จากโปรแกรม AVL – Boost ตามลำดับ โดยจากการจำลองนั้น เมื่อทำการหาค่า u (พื้นที่การเปิด-ปิดของวาล์ว EGR ที่มีผลกับอัตราการไหลของไอเสียย้อนกลับ) โดยการหาค่าตำแหน่งวาล์ว EGR (ภาพที่ 18) ด้วยค่า 1650 แล้วทำการคูณกับ θ_{egr} ดัง (24) เป็นผลทำให้ได้ค่าอัตราการไหลของไอเสียย้อนกลับแสดงได้ดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียนที่ได้จากโปรแกรม AVL – Boost และจาก (24)

ภาพที่ 20 เป็นการแสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียนเมื่อทำการจำลองด้วยโปรแกรม AVL – Boost ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 รอบต่อนาที (rpm) และมีตำแหน่งคันเร่งดังภาพที่ 19 โดยกราฟสีน้ำเงินแสดงอัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียนที่ได้จากโปรแกรม AVL – Boost และกราฟสีแดงแสดงอัตราการไหลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการ (24) โดยค่าความผิดพลาดของการคำนวณด้วย (24) เปรียบเทียบกับค่าอัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียนจาก AVL – Boost แสดงได้ดังภาพที่ 21

เมื่อค่าความผิดพลาดที่แสดงดังภาพที่ 21 อยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้ (24) เป็นส่วนหนึ่งของสมการที่จำเป็นสำหรับงานวิจัยด้วย



ภาพที่ 21 ค่าความผิดพลาดของการคำนวณด้วย (24) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าอัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียนที่ได้จาก AVL – Boost

3. ตัวแปร State และสมการ State (State Variables and State Equations)

จากหัวข้อ 2.1, 2.2 และ 2.4 ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น นำมาทำการกำหนดตัวแปร State แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} x &= [x_1 \ x_2 \ x_3]^T \\ &= [P_{int} \ F_{int} \ \theta_{egr}]^T \end{aligned} \quad (44)$$

จาก (28), (33) และ (24) สามารถแสดงสมการ State ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \alpha_{int}(\dot{m}_{air} + \dot{m}_{eng} + x_3 u - \eta_{vol}(x_1, N_e)\beta_{int}x_1) \\ \dot{x}_2 &= \frac{\alpha_{int}}{x_1}(F_{exh}x_3 u - (\dot{m}_{air} + \dot{m}_{eng} + x_3 u)x_2) \\ \dot{x}_3 &= 0 \\ y &= x_1 \end{aligned} \quad (45)$$

เมื่อ

$$\alpha_{int} \triangleq \frac{RT_{int}}{V_{int}}$$

$$\beta_{int} \triangleq \frac{1}{RT_{int}} V_{cyl} \frac{N_e}{120}$$

และ y คือสมการเอาต์พุต โดยสำหรับสมการ State ดัง (45) หมายถึงมีค่าความดันที่ต่อรวมไอดีเป็นเอาต์พุตเพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นค่าที่ทำการวัดได้

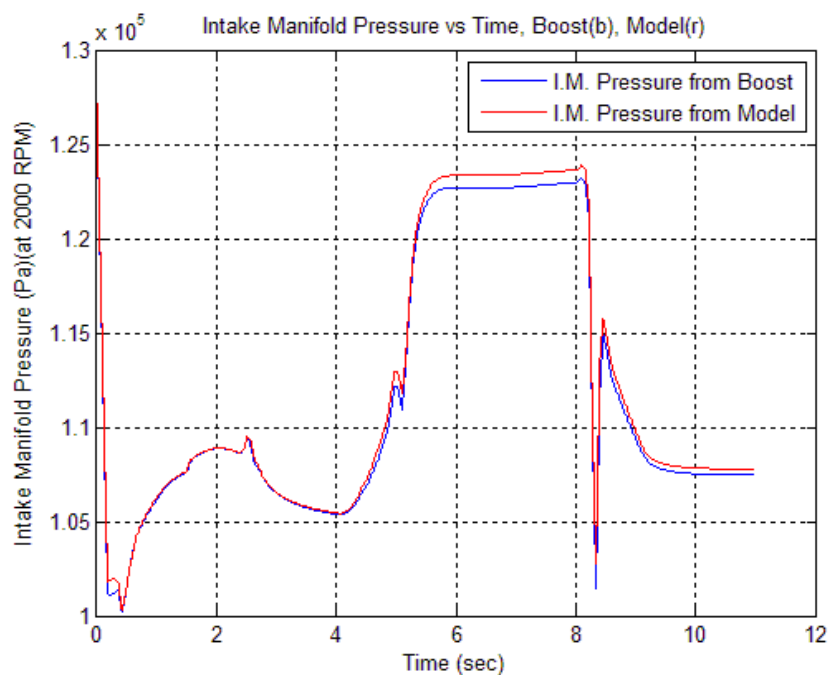
4. การตรวจสอบความถูกต้องของสมการทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model Validation)

เมื่อทำการกำหนดสมการ State ได้ดัง (45) แล้ว ในลำดับต่อมาจะเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของสมการ State ที่ได้ออกแบบ ซึ่งจะทำการตรวจสอบโดยการจำลองการทำงานของเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 รอบต่อนาที (rpm) และมีตำแหน่งการเหยียบคันเร่งดังแสดงในภาพที่ 19

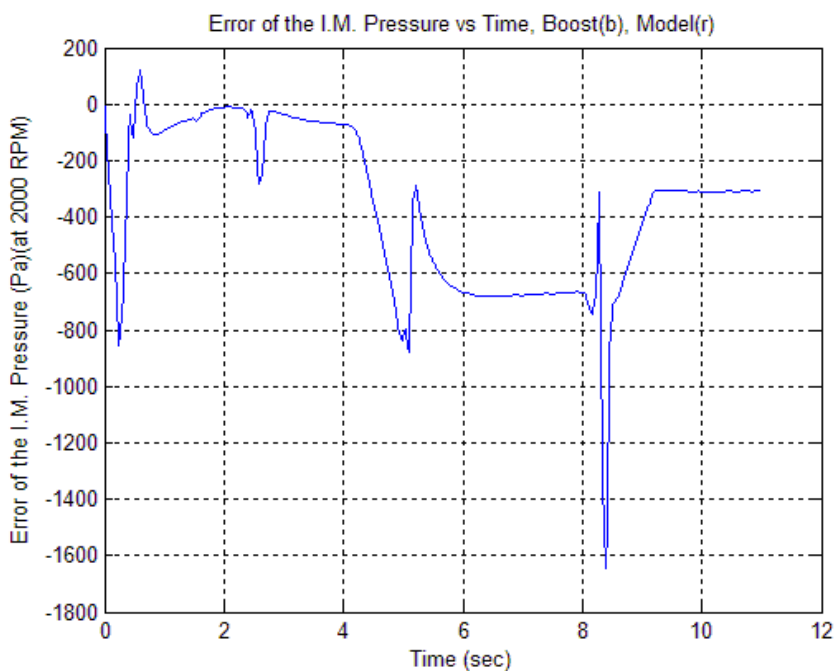
เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ใช้ข้อมูลที่ได้จากการจำลองด้วย AVL – Boost เป็นข้อมูลอ้างอิง ดังนั้นการตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่ใช้จึงเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม AVL – Boost และเมื่อทำการเก็บข้อมูลที่จำเป็นสำหรับ (45) จากการจำลองด้วย AVL – Boost แล้ว จึงนำมาจำลองความถูกต้องของสมการ State ด้วยโปรแกรม MATLAB ผลการจำลองแสดงได้ดังต่อไปนี้

4.1 ตรวจสอบความถูกต้องของสมการความดันที่ต่อรวมไอดี

ภาพที่ 22 เป็นกราฟเปรียบเทียบระหว่างความดันที่ต่อรวมไอดีจาก AVL – Boost ซึ่งเป็นกราฟสีน้ำเงิน กับเส้นสีแดงซึ่งคือความดันที่ต่อรวมไอดีที่ได้จากสมการ State เมื่อเปรียบเทียบกันแล้ว จะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากสมการ State อยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ โดยสังเกตได้จากค่าความผิดพลาดของความดันที่ต่อรวมไอดีจากสมการ State เปรียบเทียบกับ AVL – Boost แสดงได้ดังภาพที่ 23 ซึ่งจะมีค่าความผิดพลาดสูงสุดไม่ 1700 Pa และมีค่าเฉลี่ยคือ -367 Pa คิดเป็น 0.329% โดยประมาณ

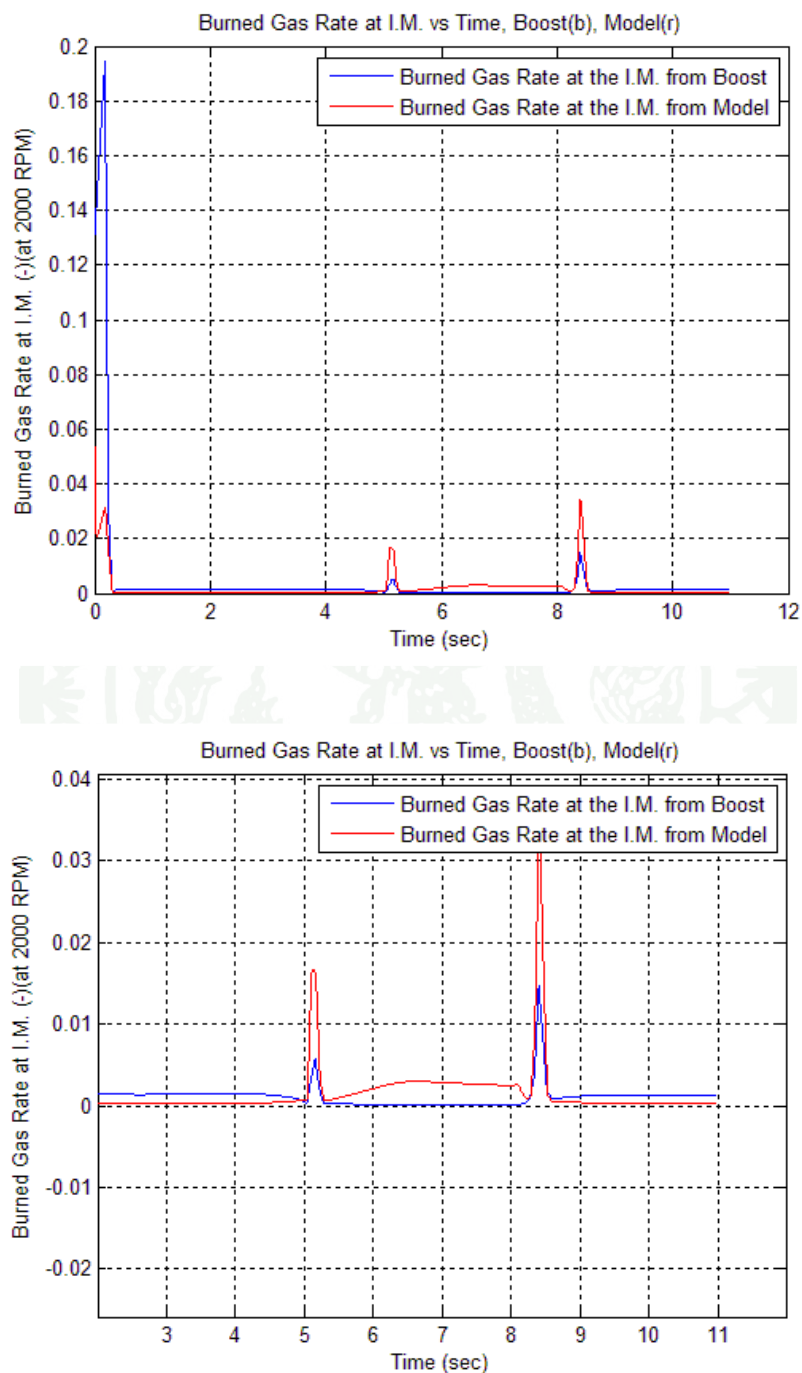


ภาพที่ 22 เปรียบเทียบความดันที่ท่อร่วมไอดีจาก AVL – Boost และสมการทางคณิตศาสตร์ (45)



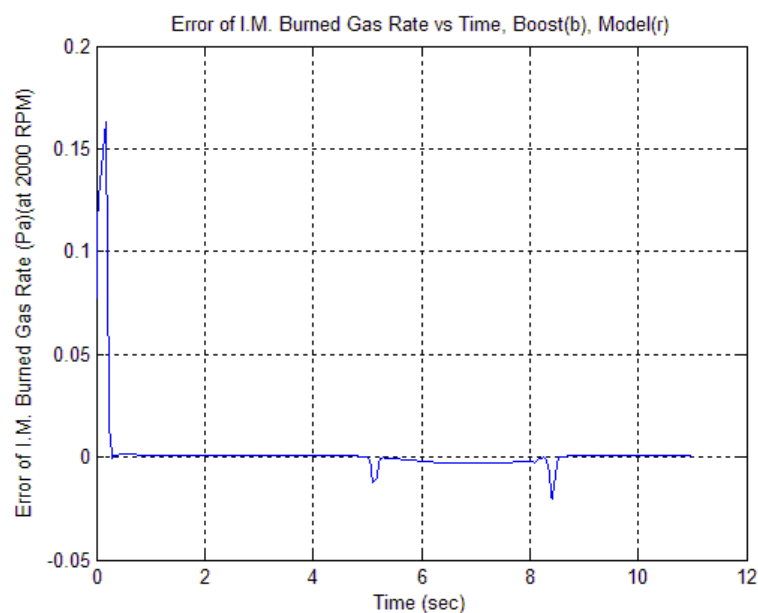
ภาพที่ 23 ค่าความผิดพลาดของความดันที่ท่อร่วมไอดีจากสมการทางคณิตศาสตร์ (45) เมื่อเปรียบเทียบกับ AVL -Boost

4.2 ตรวจสอบความถูกต้องของอัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดที่ท่อร่วมไอดี



ภาพที่ 24 เปรียบเทียบ Burned gas rate ในท่อร่วมไอดีจาก AVL – Boost และจากสมการทางคณิตศาสตร์ (45), บน; ช่วงเวลาการจำลองทั้งหมด, ล่าง; ช่วงการจำลองตั้งแต่วินาทีที่ 2

ภาพที่ 24 แสดงการเปรียบเทียบของกราฟเส้นสีน้ำเงินและสีแดง ซึ่งหมายถึงค่า BGR ที่ทอร่วมไอดีที่ได้จาก AVL – Boost และค่า BGR ที่ทอร่วมไอดีที่ได้จากสมการ State ตามลำดับ โดยค่าความผิดพลาดของค่า BGR ในทอร่วมไอดีที่ได้จากสมการ State เมื่อเปรียบเทียบกับค่า BGR ที่ได้จาก AVL – Boost แสดงได้ดังภาพที่ 25



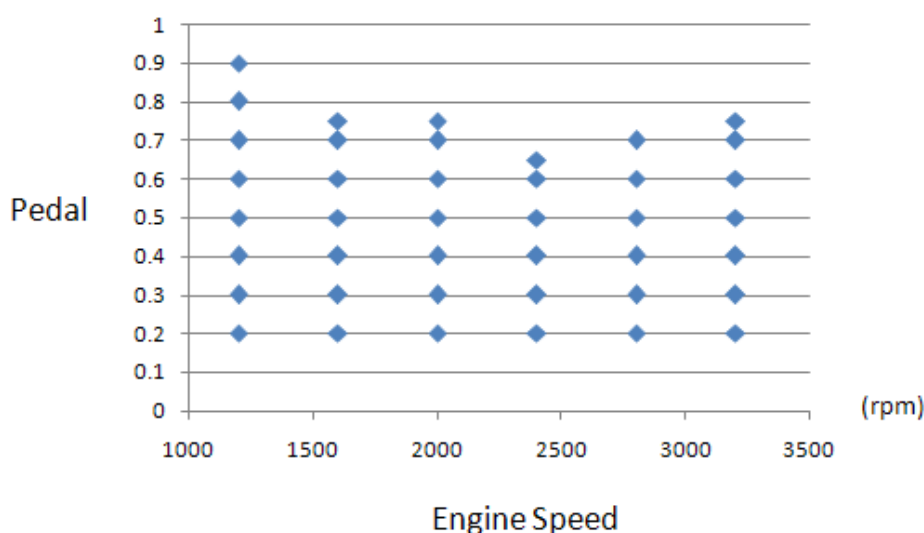
ภาพที่ 25 ค่าความผิดพลาดของ Burned gas rate ในทอร่วมไอดีที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ (45) เมื่อเปรียบเทียบกับ Burned gas rate ในทอร่วมไอดีจาก AVL – Boost

4.3 การตรวจสอบความถูกต้องของค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับนุณหภูมิและความดันที่ทอร่วมไอเสีย (θ_{egr})

เนื่องจาก θ_{egr} เป็นค่าคงที่ ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของ θ_{egr} จึงมีค่าเท่ากับศูนย์ดัง (45) เมื่อใช้สมการ State ในการตรวจสอบ จึงเป็นผลให้ θ_{egr} มีค่าคงที่ตลอด โดยมีค่าเท่ากับค่าเริ่มต้นที่กำหนดให้ และการตรวจสอบความถูกต้องของสมการนั้นสามารถแสดงได้ดังหัวข้อ 2.4 ที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น

5. การหาประสิทธิภาพเชิงปริมาตร (Volumetric Efficiency)

ทำการหาค่า Volumetric Efficiency ด้วยการนำข้อมูลที่ได้จากการจำลองด้วย AVL – Boost โดยจุด (Operating point) ทั้งหมดที่ทำการจำลองแสดงได้ดังภาพที่ 26

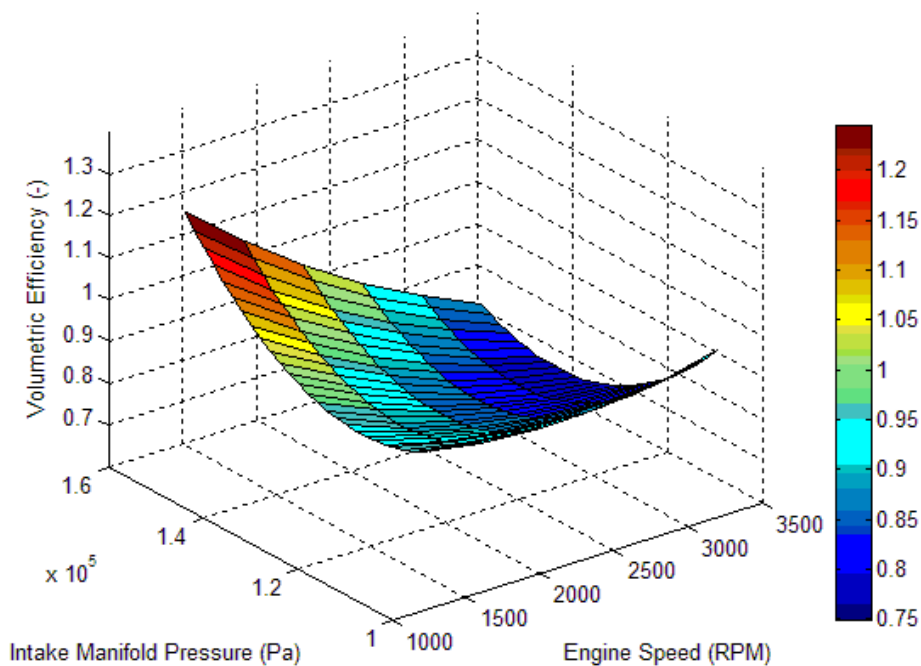


ภาพที่ 26 Operating point ที่ทำการจำลองเพื่อเก็บค่า Volumetric Efficiency

จากภาพที่ 26 แกนแนวนอนแสดงความเร็วรอบเครื่องยนต์ และแกนแนวตั้งแสดงตำแหน่งคันเร่ง ซึ่งค่า 1 หมายถึงตำแหน่งคันเร่งที่ 100% โดยทำการเก็บข้อมูลของความดันที่ท่อร่วมไอดี, ความเร็วรอบเครื่องยนต์ และค่า Volumetric Efficiency จากการจำลอง เมื่อได้ข้อมูลที่ต้องการแล้ว จึงนำไปทำให้อยู่ในรูปของสมการที่สัมพันธ์กันด้วยโปรแกรม CAMEO โดยสมการที่ได้จะอยู่ในรูปของฟังก์ชันระหว่างความดันที่ท่อร่วมไอดีและความเร็วรอบเครื่องยนต์ ดังนี้

$$\eta_{vol} = f(P_{int}, N_e)$$

เมื่อได้สมการการคำนวณค่า Volumetric Efficiency จากค่าความดันที่ท่อร่วมไอดีและความเร็วรอบเครื่องยนต์แล้ว จึงนำไปใช้ในอัลกอริทึมการประมาณค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่เขียนด้วย MATLAB – Simulink โดยค่า Volumetric Efficiency ที่คำนวณได้จากสมการสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 ค่า Volumetric Efficiency ที่คำนวณด้วยสมการที่ได้จาก CAMEO

6. การออกแบบตัวสังเกตด้วยตัวกรองคาลมาน

6.1 Discretization

เนื่องจากการออกแบบตัวสังเกตเพื่อให้สามารถนำไปสำหรับ ECU ได้ จึงทำการออกแบบตัวกรองคาลมานให้อยู่ในรูป Discrete-time ดัง (4) แต่เนื่องจากสมการ State (45) ที่ได้แสดงไว้ข้างต้นอยู่ในรูปของ Continuous-time จึงต้องทำการแปลงให้อยู่ในรูป Discrete-time โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธี Forward Euler's Method แสดงได้ดังนี้

$$\dot{x} = \frac{x(k+1) - x(k)}{T_s} = f(x(k)) \quad (46)$$

เมื่อ $\dot{x}$ ทางด้านซ้ายคือตัวแปรในรูปของ Continuous-time และสมการทางด้านขวาคือตัวแปรในรูปของ Discrete-time

โดย T_s คือ ช่วงเวลาที่ใช้ในการสุ่มค่า (Sampling time)

$x(k)$ คือ State ที่ช่วงเวลาปัจจุบัน

$x(k+1)$ คือ State ที่ช่วงเวลาถัดไปของการสุ่ม

ในการทำงานเดียวกัน การ Discretized ด้วยวิธี Forward Euler's Method ดัง (46) สามารถเขียนให้อยู่ในรูป $\frac{x(k) - x(k-1)}{T_s} = f(x(k-1))$ ได้เช่นกัน โดยในงานวิจัยนี้จะทำการเขียนสมการในรูปนี้ เพื่อให้สมการที่ Discretized เรียบร้อยแล้ว อยู่ในรูปแบบที่ตรงกับ (4)

6.1.1 State ตัวที่ 1; x_1

จาก $\dot{x}_1$ ใน (45) ทำการ Discretized ให้อยู่ในรูป $x_1(k)$ ซึ่งหมายถึงความดันที่ท่อร่วมไอดีด้วยวิธี Forward Euler's Method ได้ดังนี้

$$\frac{x_1(k) - x_1(k-1)}{T_s} = \alpha_{int} [\dot{m}_{air} + \dot{m}_{cng} + x_3(k-1)u - \eta_{vol}(x_1(k-1), N_e)\beta_{int}x_1(k-1)]$$

$$x_1(k) = T_s \alpha_{int} [\dot{m}_{air} + \dot{m}_{cng} + x_3(k-1)u - \eta_{vol}(x_1(k-1), N_e)\beta_{int}x_1(k-1)] + x_1(k-1) \quad (47)$$

6.1.2 State ตัวที่ 2; x_2

สามารถทำการ Discretized ตัวแปร State $\dot{x}_2$ ใน (45) ให้อยู่ในรูป $x_2(k)$ ซึ่งหมายถึงอัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในท่อร่วมไอดี (F_{int}) ด้วยวิธีเดียวกับ State ตัวที่ 1 แสดงได้ดังนี้

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

$$x_2(k) = \frac{T_s \alpha_{int}}{x_1(k-1)} [F_{exh}x_3(k-1)u - (\dot{m}_{air} + \dot{m}_{cng} + x_3(k-1)u)x_2(k-1)] + x_2(k-1) \quad (48)$$

6.1.3 State ตัวที่ 3; x_3

จาก $\dot{x}_3$ ใน (45) ทำการแปลงให้อยู่ในรูป $x_3(k)$ ได้ดังนี้

$$\frac{x_3(k) - x_3(k-1)}{T_s} = 0$$

$$x_3(k) = x_3(k-1) \quad (49)$$

6.2 สมการระบบและสมการการวัด (System and Measurement Equations)

จาก (47), (48) และ (49) สามารถนำมาเขียนให้อยู่ในรูปดัง (4) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} x_1(k) &= T_s \alpha_{int} [\dot{m}_{air} + \dot{m}_{cng} + x_3(k-1)u(k-1) - \eta_{vol}(x_1(k-1), N_e) \beta_{int} x_1(k-1)] \\ &\quad + x_1(k-1) + w_1(k-1) \\ x_2(k) &= \frac{T_s \alpha_{int}}{x_1(k-1)} [F_{exh} x_3(k-1)u(k-1) - (\dot{m}_{air} + \dot{m}_{cng} + x_3(k-1)u(k-1)) x_2(k-1)] \\ &\quad + x_2(k-1) + w_2(k-1) \\ x_3(k) &= x_3(k-1) + w_3(k-1) \\ y(k) &= x_1(k) + v(k) \end{aligned} \quad (50)$$

สมการ (50) เป็นสมการระบบและสมการการวัดที่ทำการแปลงให้อยู่ในรูป Discrete-time แล้ว โดย w_1, w_2, w_3 คือ สัญญาณรบกวนของระบบ (Process noise) ที่ไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน และ v คือ สัญญาณรบกวนจากการวัด (Measurement noise)

6.3 คำนวณหาเมตริกซ์ F, L, H และ M

ทำการคำนวณหาเมตริกซ์ F, L, H และ M ได้ดัง (11) โดยเมตริกซ์เหล่านี้เป็นค่าที่จำเป็นสำหรับสมการตัวกรองคาลมาน แสดงการหาค่าได้ดังนี้

6.3.1 เมตริกซ์ F_{k-1}

$$F_{k-1} = \left. \frac{\partial f_{k-1}}{\partial x} \right|_{\hat{x}_{k-1}^+}$$

$$= \left(\begin{array}{ccc} \frac{\partial f_1(k-1)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1(k-1)}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1(k-1)}{\partial x_3} \\ \frac{\partial f_2(k-1)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2(k-1)}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2(k-1)}{\partial x_3} \\ \frac{\partial f_3(k-1)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3(k-1)}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3(k-1)}{\partial x_3} \end{array} \right) \Big|_{\hat{x}_{k-1}^+}$$

เมื่อ Element ต่างๆ มีค่าดังนี้

$$\frac{\partial f_1(k-1)}{\partial x_1} = 1 - T_s \alpha_{int} \eta_{vol} \beta_{int} ,$$

$$\frac{\partial f_1(k-1)}{\partial x_2} = 0 ,$$

$$\frac{\partial f_1(k-1)}{\partial x_3} = T_s \alpha_{int} u$$

$$\frac{\partial f_2(k-1)}{\partial x_1} = - \frac{T_s \alpha_{int}}{x_1(k-1)^2} [F_{exh} x_3(k-1)u - (\dot{m}_{air} + \dot{m}_{cng} + x_3(k-1)u)x_2(k-1)]$$

$$\frac{\partial f_2(k-1)}{\partial x_2} = 1 - \frac{T_s \alpha_{int}}{x_1(k-1)} [\dot{m}_{air} + \dot{m}_{cng} + x_3(k-1)u]$$

$$\frac{\partial f_2(k-1)}{\partial x_3} = \frac{T_s \alpha_{int}}{x_1(k-1)} F_{exh} u$$

$$\frac{\partial f_3(k-1)}{\partial x_1} = 0 ,$$

$$\frac{\partial f_3(k-1)}{\partial x_2} = 0 ,$$

$$\frac{\partial f_3(k-1)}{\partial x_3} = 1$$

6.3.2 เมตริกซ์ L_{k-1}

$$\begin{aligned}
 L_{k-1} &= \left. \frac{\partial f_{k-1}}{\partial w} \right|_{\hat{x}_{k-1}^+} \\
 &= \left(\begin{array}{ccc} \frac{\partial f_1(k-1)}{\partial w_1} & \frac{\partial f_1(k-1)}{\partial w_2} & \frac{\partial f_1(k-1)}{\partial w_3} \\ \frac{\partial f_2(k-1)}{\partial w_1} & \frac{\partial f_2(k-1)}{\partial w_2} & \frac{\partial f_2(k-1)}{\partial w_3} \\ \frac{\partial f_3(k-1)}{\partial w_1} & \frac{\partial f_3(k-1)}{\partial w_2} & \frac{\partial f_3(k-1)}{\partial w_3} \end{array} \right) \bigg|_{\hat{x}_{k-1}^+} \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

6.3.3 เมตริกซ์ H_k

$$\begin{aligned}
 H_k &= \left. \frac{\partial h_k}{\partial x} \right|_{\hat{x}_k^-} \\
 &= \left[\frac{\partial h_k}{\partial x_1} \quad \frac{\partial h_k}{\partial x_2} \quad \frac{\partial h_k}{\partial x_3} \right] \bigg|_{\hat{x}_k^-} \\
 &= [1 \quad 0 \quad 0]
 \end{aligned}$$

6.3.4 เมตริกซ์ M_k

$$\begin{aligned}
 M_k &= \left. \frac{\partial h_k}{\partial v} \right|_{\hat{x}_k^-} \\
 &= \left[\frac{\partial h_k}{\partial v} \right] = 1
 \end{aligned}$$

6.4 คำนวณ Q_{k-1} และ R_k

สามารถคำนวณหาค่า Process Noise Covariance (Q_{k-1}) และ Measurement Noise Covariance (R_k) ได้ดัง (5) โดยแสดงได้ดังนี้

6.4.1 Process Noise Covariance, Q_{k-1}

จาก (5);

$$\begin{aligned}
 Q_{k-1} &= E[ww^T] \\
 &= E \left[\begin{bmatrix} w_1(k-1) \\ w_2(k-1) \\ w_3(k-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1(k-1) & w_2(k-1) & w_3(k-1) \end{bmatrix} \right] \\
 &= E \begin{pmatrix} w_1(k-1)^2 & w_1(k-1)w_2(k-1) & w_1(k-1)w_3(k-1) \\ w_2(k-1)w_1(k-1) & w_2(k-1)^2 & w_2(k-1)w_3(k-1) \\ w_3(k-1)w_1(k-1) & w_3(k-1)w_2(k-1) & w_3(k-1)^2 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

เมื่อ w_1, w_2, w_3 ไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน จะได้ว่า

$$E[w_i w_j] = 0 \text{ เมื่อ } i \neq j \quad (51)$$

เมื่อพิจารณาจาก (51) ดังนั้น

$$Q_{k-1} = \begin{bmatrix} w_1(k-1)^2 & 0 & 0 \\ 0 & w_2(k-1)^2 & 0 \\ 0 & 0 & w_3(k-1)^2 \end{bmatrix} \quad (52)$$

การหาค่า Process Noise (w) สามารถหาได้ดัง (12), (13), (14) และ (15) โดยเป็นการกำหนดว่าสัญญาณรบกวนของระบบเกิดขึ้นที่สัญญาณอินพุตเท่านั้น แสดงการหาค่าได้ดังนี้

จาก (14) เมื่อ $w = Bn_u$ แต่เนื่องจากสมการระบบดัง (50) เป็นแบบไม่เชิงเส้น ดังนั้นสามารถหาค่า B ได้ดัง (15) แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 B &= \frac{\partial f_{k-1}}{\partial u} \\
 &= \left[\frac{\partial f_1(k-1)}{\partial u} \quad \frac{\partial f_2(k-1)}{\partial u} \quad \frac{\partial f_3(k-1)}{\partial u} \right]^T
 \end{aligned}$$

โดย

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial f_1(k-1)}{\partial u} &= T_s \alpha_{int} x_3(k-1), \\
 \frac{\partial f_2(k-1)}{\partial u} &= \frac{T_s \alpha_{int}}{x_1(k-1)} [F_{exh} x_3(k-1) - x_2(k-1) x_3(k-1)], \\
 \frac{\partial f_3(k-1)}{\partial u} &= 0
 \end{aligned}$$

ได้ว่า

$$\begin{aligned}
 w_{k-1} &= \begin{bmatrix} w_1(k-1) \\ w_2(k-1) \\ w_3(k-1) \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} T_s \alpha_{int} x_3(k-1) \\ \frac{T_s \alpha_{int}}{x_1(k-1)} [F_{exh} x_3(k-1) - x_2(k-1) x_3(k-1)] \\ 0 \end{bmatrix} n_u
 \end{aligned} \tag{53}$$

กำหนดให้สัญญาณรบกวนของระบบที่เกิดขึ้นกับอินพุตหรือหมายถึงตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR นั้นมีค่าร้อยละ 0.5 หรือ 0.5%

6.4.2 Measurement Noise Covariance, R_k

จาก (5);

$$R_k = E[vv^T] = \sigma_R^2$$

แต่เนื่องจากข้อมูลที่วัดได้เป็นข้อมูลที่จำลองด้วย AVL – Boost จึงทำให้ผลที่ได้จากการจำลองด้วยสภาวะเหมือนกัน มีค่าเท่ากันทุกครั้ง ดังนั้นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จึงมีค่าเท่ากับศูนย์

ได้ว่า
$$R_k = \sigma_R^2 = 0 \quad (54)$$

7. การคำนวณค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบ

เมื่อประมาณค่าตัวแปร State เรียบร้อยแล้ว ทำการคำนวณอัตราการไหลของก๊าซทั้งหมด ที่เข้ากระบอกสูบ ($\dot{m}_{asp}$) ดัง (29) โดยใช้ตัวแปร State ตัวที่ 1 ($\hat{x}_k^+$) แทนลงใน P_{int} หลังจากนั้นจึงทำการคำนวณค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบ แสดงได้ดังนี้

$$\dot{m}_{asp,a} = (\dot{m}_{asp} - \dot{m}_{cng})(1 - F_{int}) \quad (55)$$

ค่าที่คำนวณได้จาก (55) คืออัตราการไหลของอากาศที่เข้ากระบอกสูบ โดยมีหน่วยคือ กิโลกรัมต่อวินาที (kg/sec) ทำการแปลงหน่วยเพื่อให้อยู่ในรูปของกิโลกรัมต่อสโตรก ได้ดังนี้

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

หรือ แปลงเป็นมิลลิกรัมต่อสโตรกได้ดังนี้

$$APC = \dot{m}_{asp,a} \left(\frac{30}{N_e} \right) \times 10^6 \quad (\text{mg/str}) \quad (56)$$

ผลและวิจารณ์

ทำการจำลองทั้งแบบสภาวะคงตัว (Steady-State) และแบบเปลี่ยนแปลงตำแหน่งคันเร่ง (Load Transient) เพื่อเปรียบเทียบผลระหว่างการทำนายค่า APC ด้วยการคำนวณจากเซ็นเซอร์ MAF โดยตรง และการประมาณค่า APC โดยใช้เทคนิค EKF โดยทำการจำลองที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200, 1600, 2000, 2400 และ 2800 รอบต่อนาที (rpm) และตำแหน่งคันเร่งที่ 30%, 50% และ 70% แสดงผลได้ดังต่อไปนี้

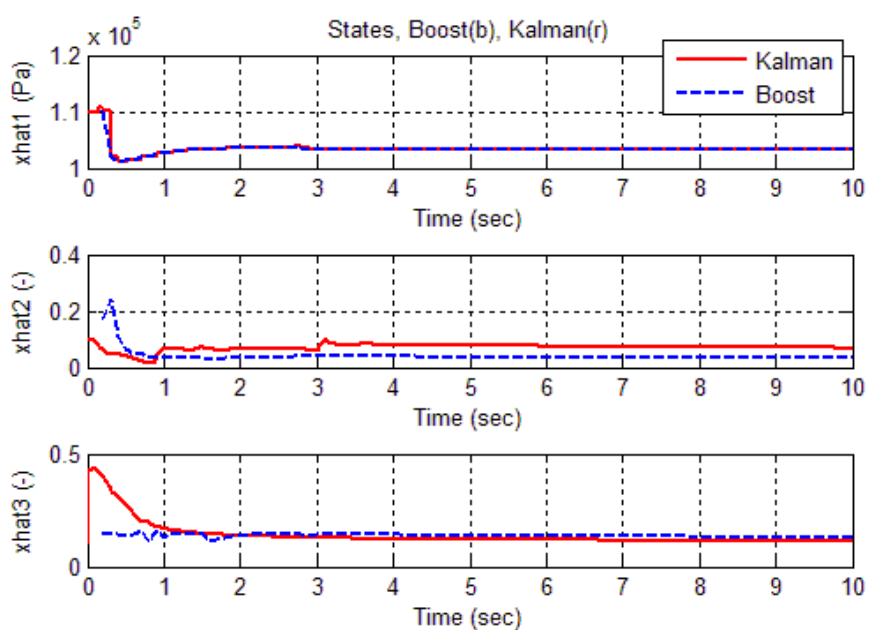
1. ผลการจำลองที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 รอบต่อนาที

1.1 การจำลองที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm, ตำแหน่งคันเร่งคงที่ (Steady-State)

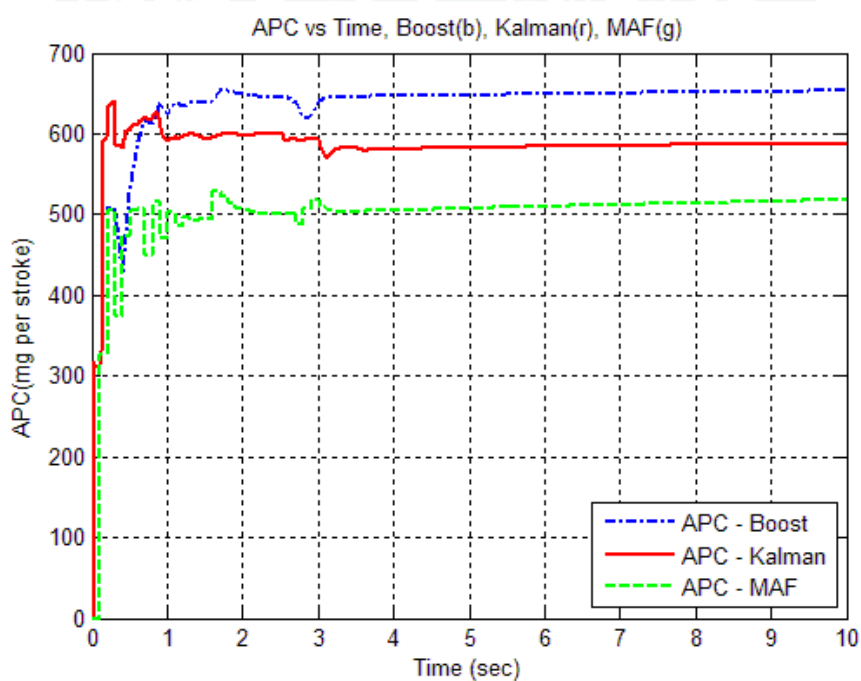
ทำการจำลองที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 รอบต่อนาที โดยการจำลองแต่ละครั้งจะทำการกำหนดตำแหน่งคันเร่งที่ 30%, 50% และ 70% ตามลำดับ แสดงได้ดังนี้

1.1.1 ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 รอบต่อนาที, ตำแหน่งคันเร่ง 30%

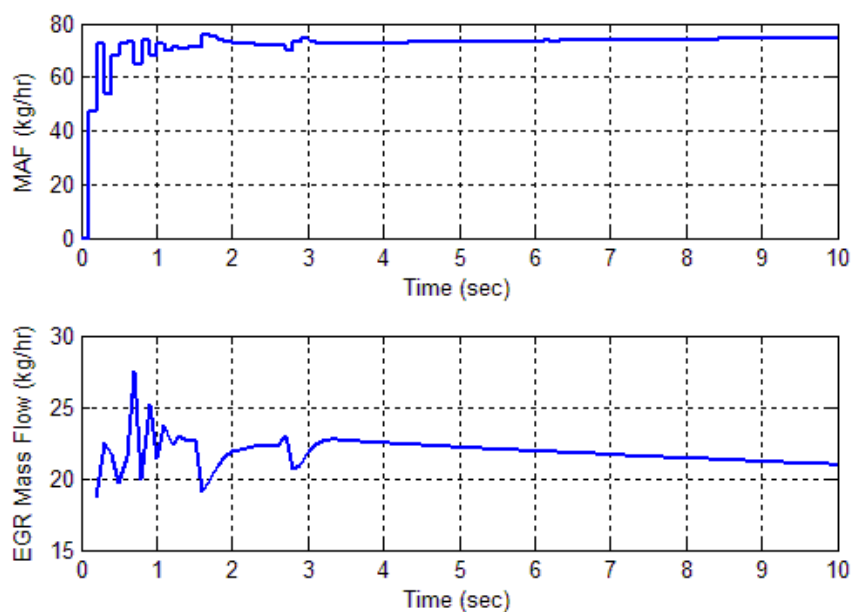
ค่าตัวแปร State จากการจำลองแสดงได้ดังภาพที่ 28 โดยเป็นการเปรียบเทียบระหว่างค่าตัวแปร State ที่ประมาณค่าด้วย EKF (เส้นสีแดง) และค่าอ้างอิงจาก AVL – Boost (เส้นสีน้ำเงิน) โดยผลที่ได้จากการประมาณค่าด้วย EKF ถือได้ว่าอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงจาก AVL - Boost เมื่อได้ค่าของตัวแปร State ที่ต้องการแล้ว จึงนำไปคำนวณหาค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบดัง (29), (55) และ (56) และแสดงการเปรียบเทียบค่า APC ได้ดังภาพที่ 29 โดยเส้นสีน้ำเงินแสดงค่าอ้างอิงจาก AVL – Boost, เส้นสีแดงแสดงค่า APC ที่ประมาณด้วยเทคนิค EKF และเส้นสีเขียวแสดงค่า APC ที่คำนวณจากเซ็นเซอร์ MAF โดยตรง ซึ่งผลจากกราฟแสดงให้เห็นว่าในสภาวะการจำลองที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และคันเร่ง 30% นั้น การประมาณค่า APC ด้วย EKF ให้ผลที่ดีกว่าการคำนวณ APC จากเซ็นเซอร์ MAF โดยตรงเมื่อเปรียบเทียบกับค่า APC อ้างอิงที่ได้จาก AVL – Boost โดยค่าความผิดพลาดของ APC - EKF (เส้นสีแดง) และ APC – MAF (เส้นสีเขียว) เมื่อเปรียบเทียบจากค่าอ้างอิง APC – Boost (เส้นสีน้ำเงิน) มีค่า 10% และ 21% โดยประมาณ ตามลำดับ



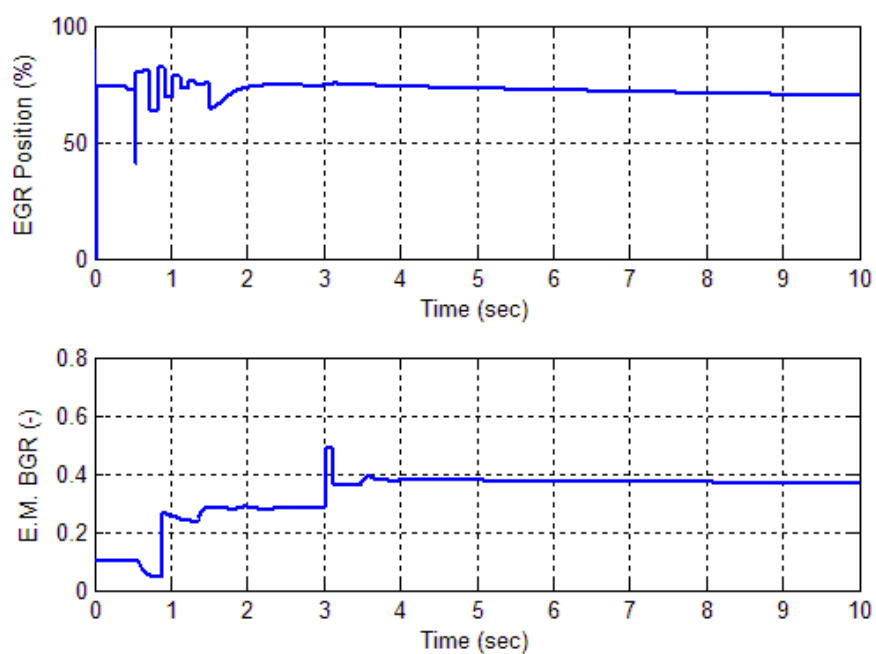
ภาพที่ 28 เปรียบเทียบตัวแปร State ระหว่างค่าที่วัดได้จาก AVL – Boost และประมาณค่าได้จาก EKF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และ คั่นเร่ง 30%



ภาพที่ 29 เปรียบเทียบค่า APC ระหว่าง APC จาก AVL – Boost, APC จาก EKF และ APC จาก เซ็นเซอร์ MAF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และตำแหน่งคั่นเร่ง 30%



ภาพที่ 30 บน; อัตราการไหลของอากาศจาก MAF, ล่าง; อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และคันทันเร่ง 30%

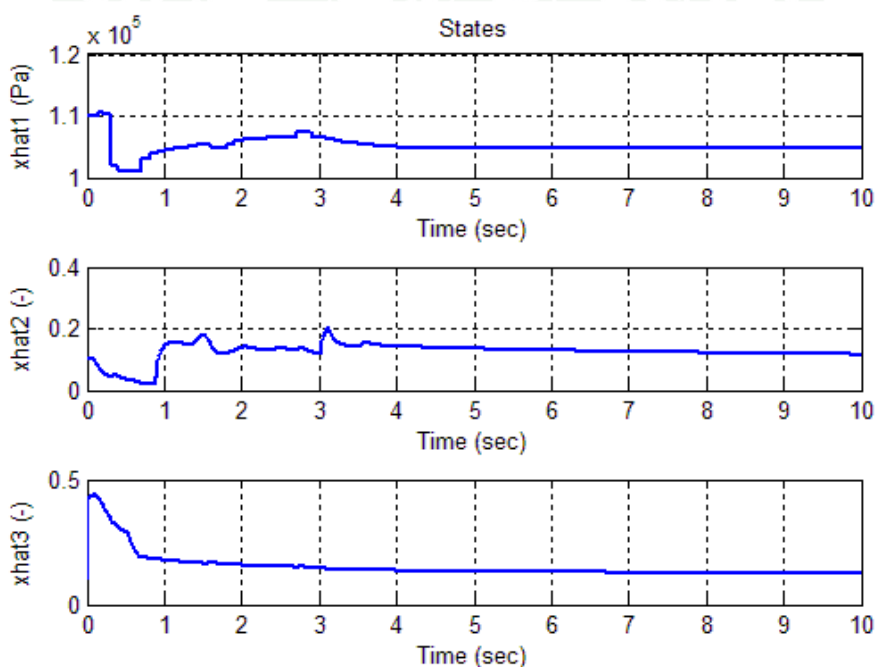


ภาพที่ 31 บน; ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR, ล่าง; อัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสีย ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และคันทันเร่ง 30%

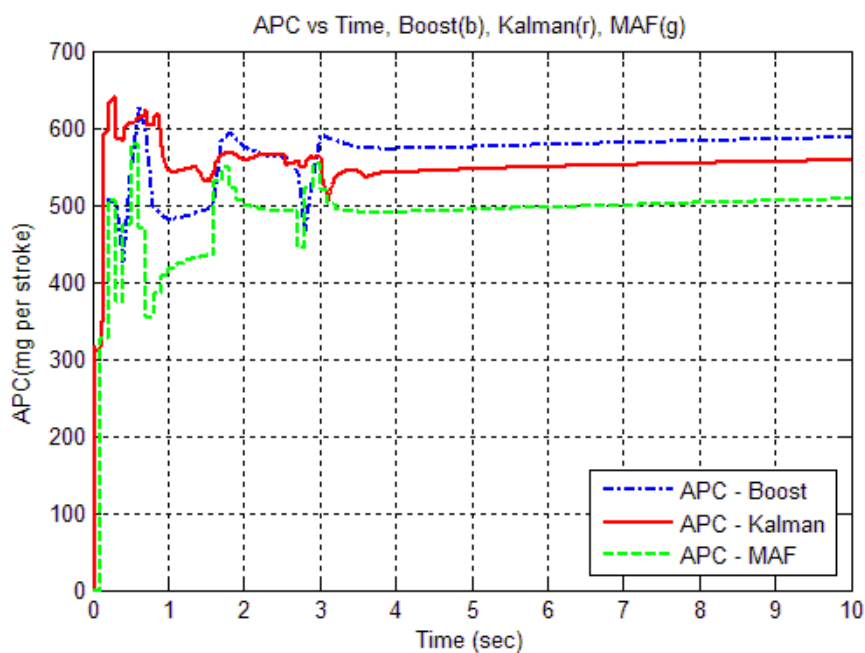
สาเหตุที่ทำให้ค่าอากาศในกระบอกสูบที่คำนวณจากเซ็นเซอร์ MAF (เส้นสีเขียว) มีความผิดพลาดที่ค่อนข้างมากนั้นเนื่องมาจากไม่ได้คำนึงถึงออกซิเจนที่เหลือและปะปนมาในไอเสียหมุนเวียน ภาพที่ 30 แสดงอัตราการไหลของอากาศที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ MAF และอัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน โดยคิดเป็นอัตราส่วนได้เป็น 3.3 : 1 ซึ่งอัตราการไหลของก๊าซจากทั้งสองแหล่งนี้เป็นปัจจัยหลักของปริมาณอากาศที่จะเข้ากระบอกสูบ เนื่องจากเป็นก๊าซที่ถูกส่งเข้าสู่ท่อร่วมไอดีก่อนที่จะถูกส่งต่อไปยังกระบอกสูบ โดยตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR และค่า BGR ในไอเสียที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 รอบต่อนาที และตำแหน่งของคันเร่งอยู่ที่ 30% แสดงได้ดังภาพที่ 31

1.1.2 ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 รอบต่อนาที, ตำแหน่งคันเร่ง 50%

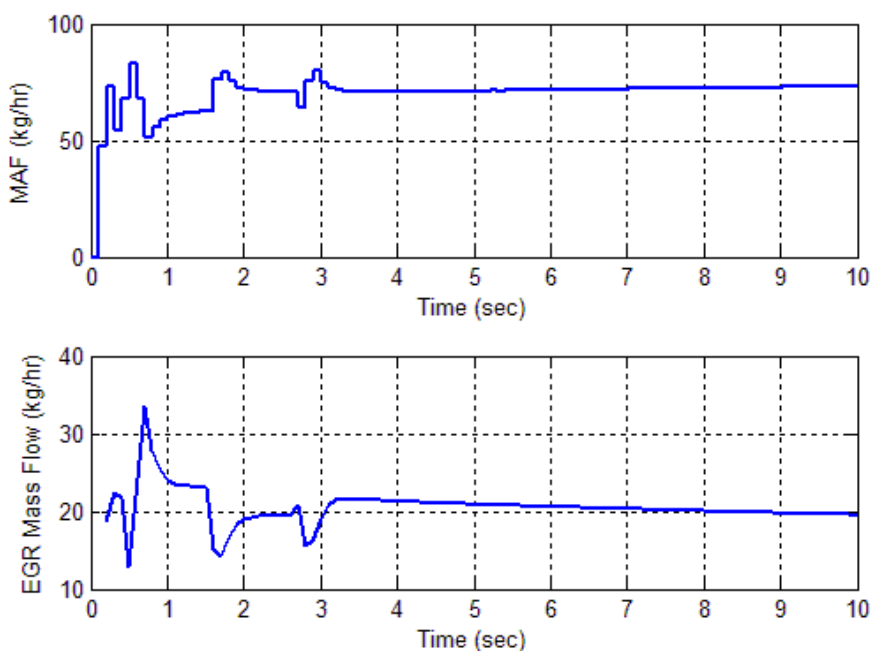
ผลที่ได้จากการจำลองนั้นมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกับผลในข้อ 1.1.1 โดยตัวแปร State ทั้ง 3 ตัวที่ทำการประมาณค่า แสดงได้ดังภาพที่ 32 และค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบแสดงได้ดังภาพที่ 33



ภาพที่ 32 ตัวแปร State ที่ได้จาก EKF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และตำแหน่งคันเร่งที่ 50%

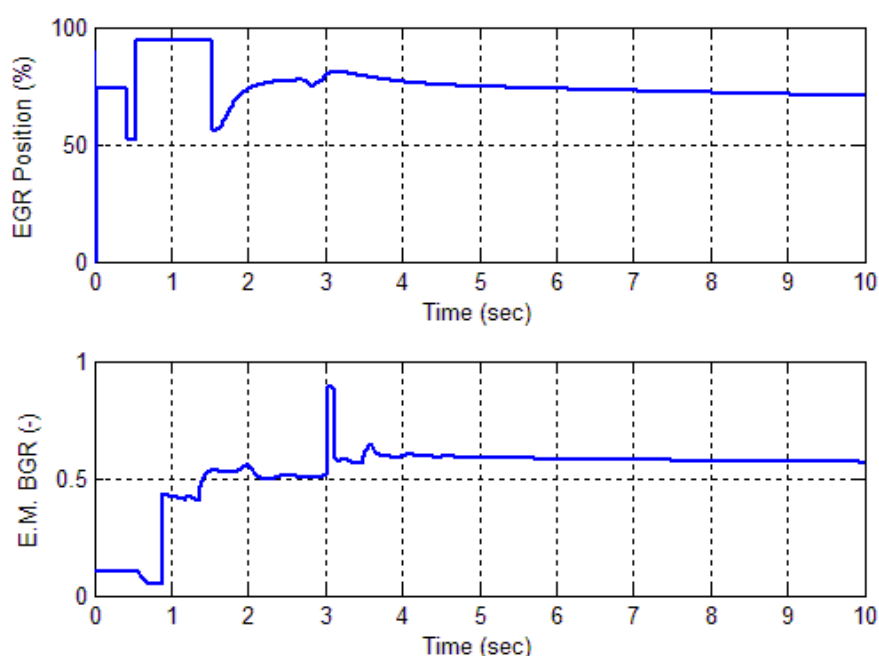


ภาพที่ 33 เปรียบเทียบค่า APC ระหว่าง APC จาก AVL – Boost, APC จาก EKF และ APC จาก เซ็นเซอร์ MAF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และตำแหน่งคันเร่ง 50%



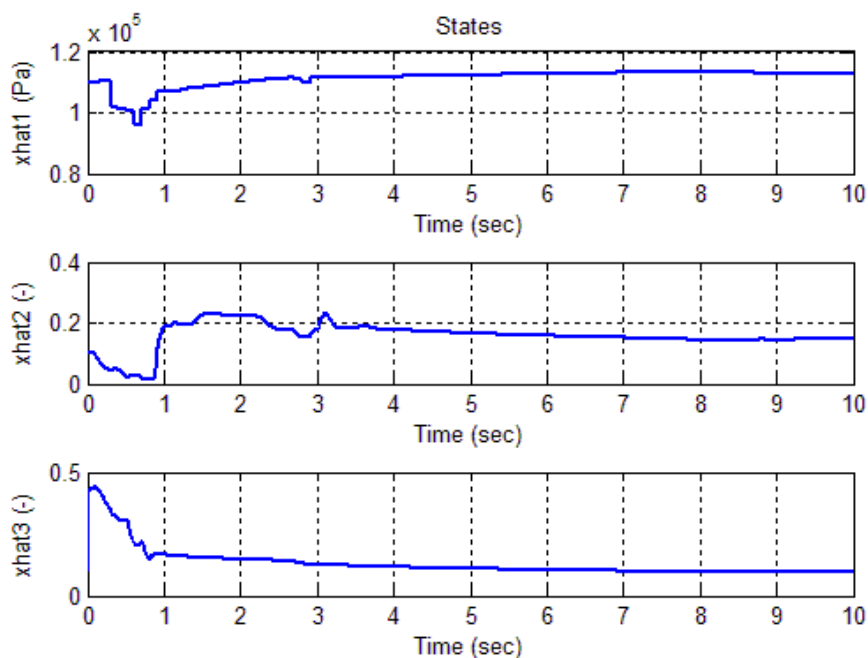
ภาพที่ 34 บน; อัตราการไหลของอากาศจาก MAF, ล่าง; อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และคันเร่ง 50%

จากภาพที่ 33 ผลการจำลองที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และคันเร่ง 50% แสดงให้เห็นได้ว่าการประมาณค่า APC ด้วย EKF ให้ผลที่ดีกว่าการคำนวณค่า APC ด้วยเซ็นเซอร์ MAF โดยตรงเมื่อเปรียบเทียบกับค่า APC อ้างอิงที่ได้จาก AVL – Boost โดยเมื่อวิเคราะห์ตั้งแต่วินาทีที่ 5 เป็นต้นไป ค่าความผิดพลาดของ APC – Kalman (เส้นสีแดง) และ APC – MAF (เส้นสีเขียว) เมื่อเปรียบเทียบกับ APC – Boost (เส้นสีน้ำเงิน) มีค่า 5% และ 14% ตามลำดับ ในภาพที่ 34 แสดงอัตราการไหลของอากาศที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ MAF และอัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน โดยเมื่อพิจารณาจากกราฟแล้ว อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของอากาศที่ MAF และอัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียนมีค่า 3.53 : 1 โดยประมาณ (ข้อมูลที่วินาทีที่ 5) โดยตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR และค่า BGR ในไอเสียแสดงได้ดังภาพที่ 35 จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดของการคำนวณค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบจากเซ็นเซอร์ MAF มีค่าน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับผลในข้อ 1.1.1 เนื่องจากไอเสียหมุนเวียนมีปริมาณน้อยลงเมื่อคิดเป็นอัตราส่วนเปรียบเทียบกับอัตราการไหลของอากาศที่ MAF อีกทั้งค่า BGR ในไอเสียยังมีค่ามากขึ้นอีกด้วย นั่นหมายถึงออกซิเจนที่ปะปนมากับไอเสียหมุนเวียนมีค่าน้อยลง จึงทำให้ความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณค่าอากาศในกระบอกสูบด้วยเซ็นเซอร์ MAF มีค่าน้อยลงด้วย



ภาพที่ 35 บน; ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR, ล่าง; อัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสีย ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และคันเร่ง 50%

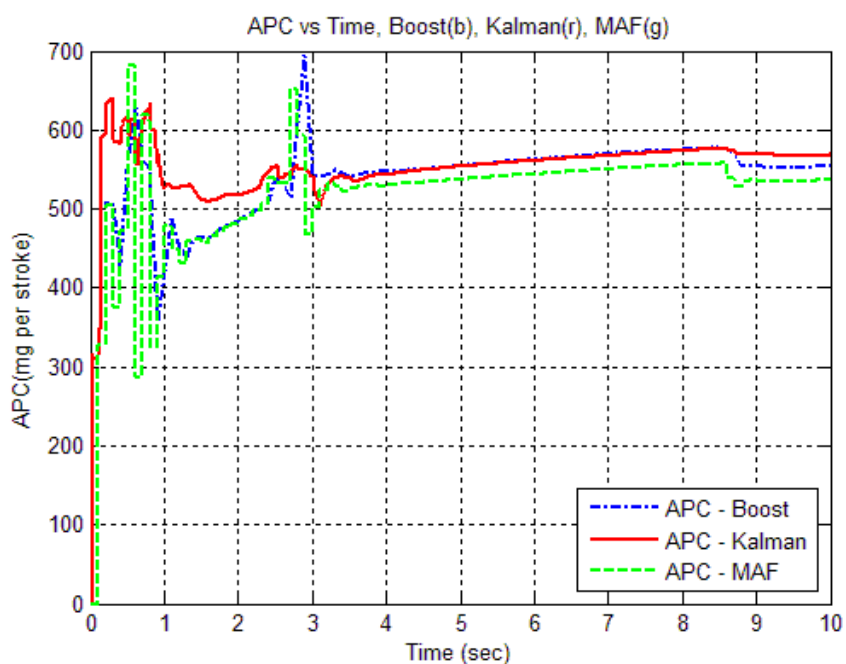
1.1.3 ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 รอบต่อนาที, ตำแหน่งคันเร่ง 70%



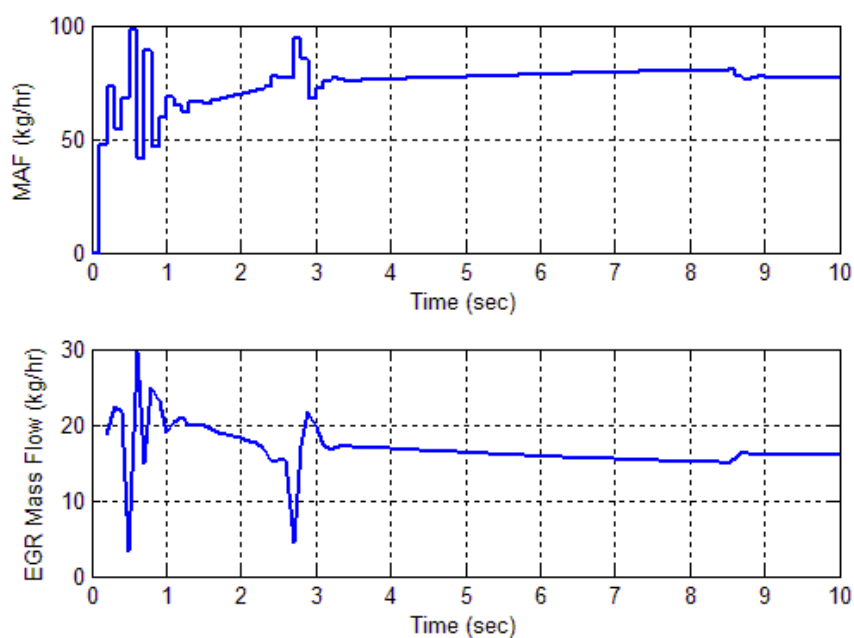
ภาพที่ 36 ตัวแปร State ที่ได้จาก EKF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และตำแหน่งคันเร่งที่ 70%

ในการทำนองเดียวกับข้อ 1.1.1 และ 1.1.2 การจำลองการทำงานที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และคันเร่ง 70% นั้น เมื่อระบบเข้าสู่ Steady – State แล้ว การประมาณค่า APC ด้วย EKF ยังคงให้ผลที่ดีกว่าการคำนวณค่า APC ด้วยเซ็นเซอร์ MAF เมื่อเปรียบเทียบกับค่า APC อ้างอิงที่ได้จาก AVL – Boost โดยผลการจำลองจากภาพที่ 37 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของ APC – Kalman (เส้นสีแดง) และ APC – MAF (เส้นสีเขียว) เมื่อเปรียบเทียบกับ APC – Boost (เส้นสีน้ำเงิน) มีค่า 0.47% และ 3.4% ตามลำดับ

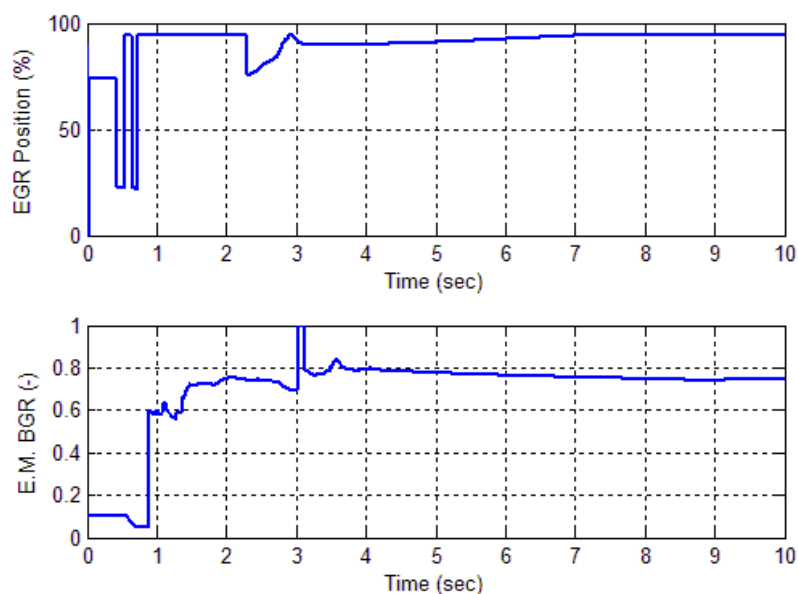
ภาพที่ 38 แสดงอัตราการไหลของอากาศจาก MAF และอัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน โดยอัตราส่วนของอากาศจาก MAF และไอเสียหมุนเวียนมีค่า 4.93 : 1 ซึ่งปริมาณของไอเสียหมุนเวียนเมื่อคิดเป็นอัตราส่วนมีค่าน้อยลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับข้อ 1.1.2 แต่เนื่องจากค่า BGR ในไอเสียมีค่ามากขึ้น แสดงได้ถึงออกซิเจนที่อยู่ในไอเสียย้อนกลับมีค่าน้อยลง จึงทำให้ค่า APC ที่คำนวณได้จากเซ็นเซอร์ MAF มีความผิดพลาดน้อยลงด้วย



ภาพที่ 37 เปรียบเทียบค่า APC ระหว่าง APC จาก AVL – Boost, APC จาก EKF และ APC จาก เซ็นเซอร์ MAF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และตำแหน่งคันเร่ง 70%

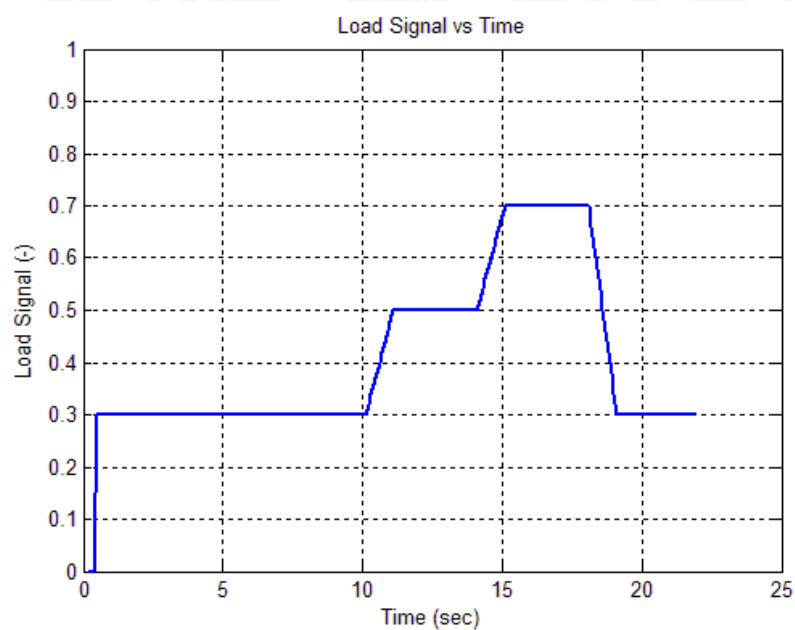


ภาพที่ 38 บน; อัตราการไหลของอากาศจาก MAF, ล่าง; อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และคันเร่ง 70%



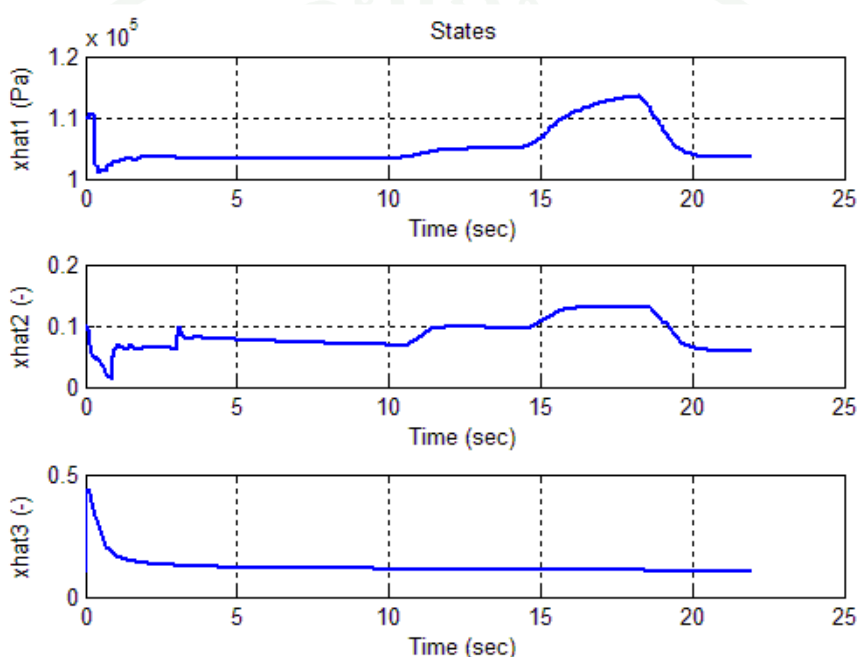
ภาพที่ 39 บน; ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR, ล่าง; อัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสีย ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และคันทรง 70%

1.2 การจำลองที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm, คันทรงเปลี่ยนแปลง (Load-Transient)



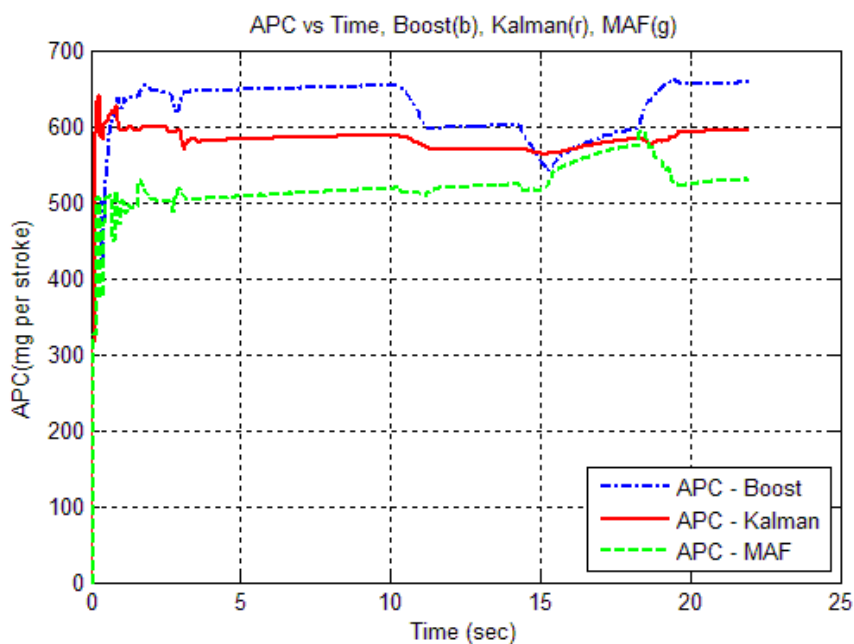
ภาพที่ 40 ตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงคันทรงที่ใช้ทำการจำลอง

ทำการจำลองที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 รอบต่อนาที โดยมีการเปลี่ยนแปลงคันเร่ง จาก 30%, 50%, 70% และกลับมาที่ 30% ดังภาพที่ 40 ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อทดสอบของการประมาณค่า APC ด้วย EKF เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงคันเร่ง ผลของตัวแปร State ที่ประมาณค่าด้วย EKF แสดงได้ดังภาพที่ 41 และนำค่า State ที่ได้ไปใช้ประกอบประกอบในการคำนวณค่า APC แสดงได้ดังภาพที่ 42

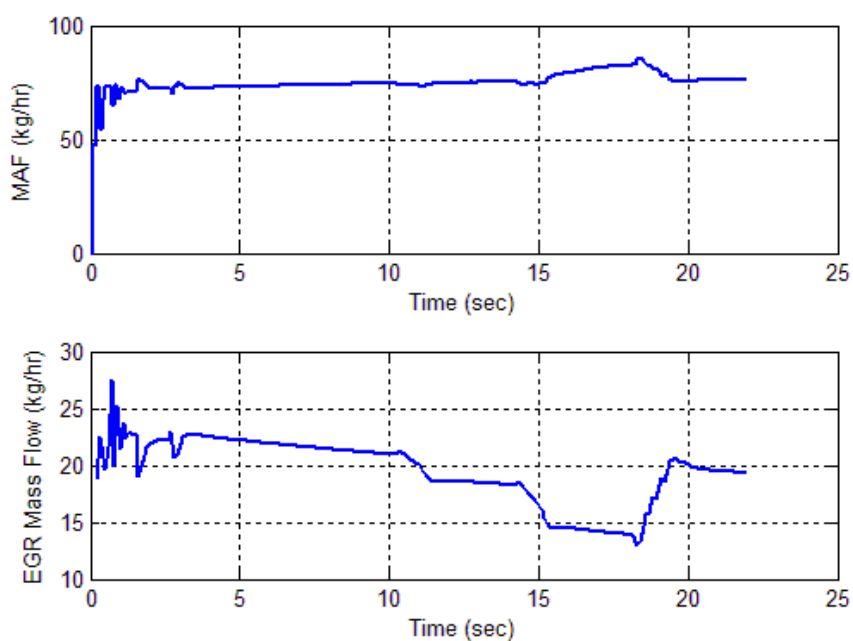


ภาพที่ 41 ตัวแปร State ที่ได้จาก EKF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง

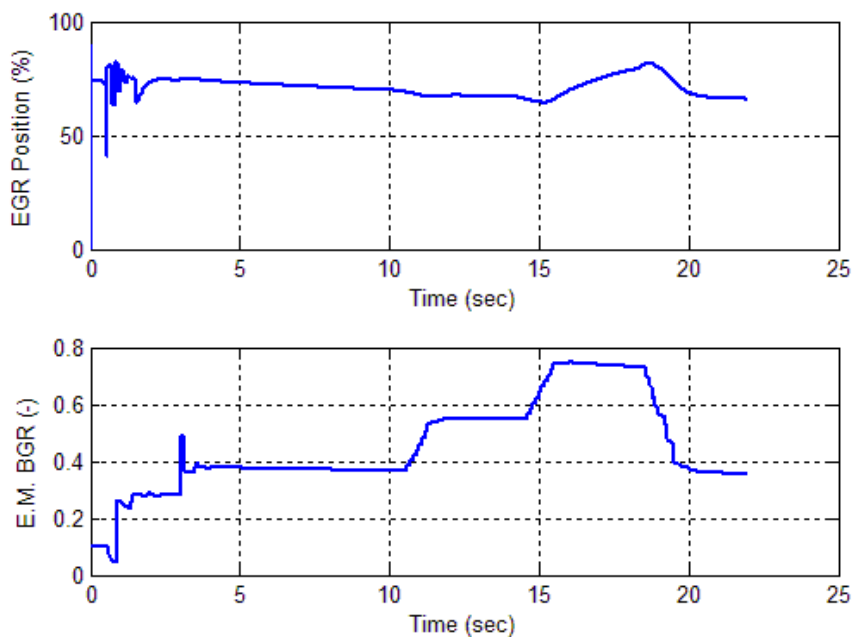
ผลของค่าอากาศในกระบอกสูบดังในภาพที่ 42 แสดงให้เห็นว่าการประมาณค่า APC ด้วย EKF (เส้นสีแดง) ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 รอบต่อนาที ให้ผลที่ดีกว่าการคำนวณค่า APC จากเซ็นเซอร์ MAF (เส้นสีเขียว) เมื่อเปรียบเทียบกับค่า APC อ้างอิงที่ได้จาก AVL – Boost (เส้นสีน้ำเงิน) โดยจะเห็นได้ว่าแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงคันเร่ง แต่ผลตอบสนองของ APC – Kalman (เส้นสีแดง) ก็ยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ ซึ่งมีแนวโน้มของกราฟเป็นไปในแนวทางเดียวกับ APC – Boost (เส้นสีน้ำเงิน) อัตราการไหลของอากาศที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ MAF และอัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียนแสดงได้ดังภาพที่ 43 โดยตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR และอัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสียแสดงได้ดังภาพที่ 44



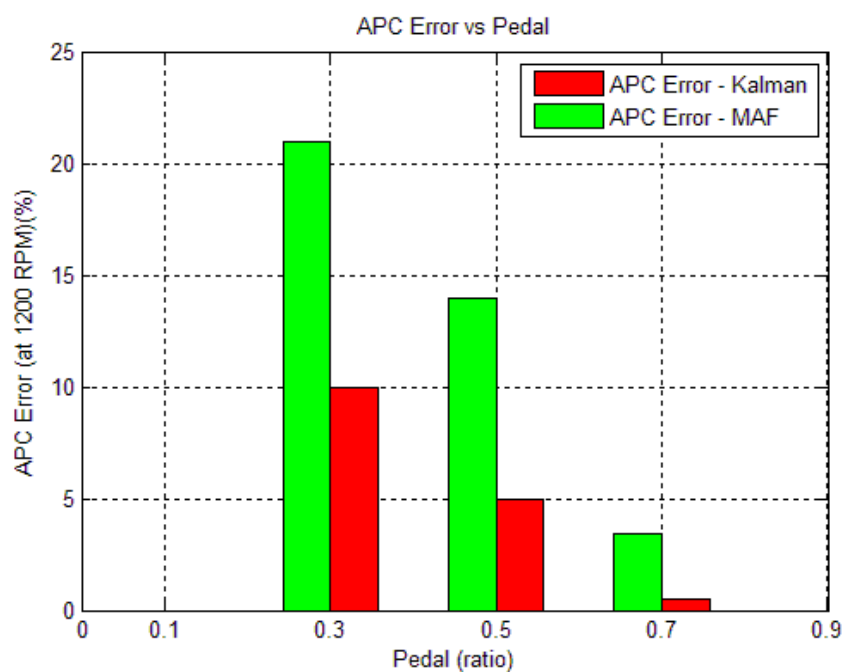
ภาพที่ 42 เปรียบเทียบค่า APC ระหว่าง APC จาก AVL – Boost, APC จาก EKF และ APC จาก เซ็นเซอร์ MAF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 43 บน; อัตราการไหลของอากาศจาก MAF, ล่าง; อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และคันเร่งเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 44 บน; ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR, ล่าง; อัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสีย ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm และคันเร่งเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 45 ค่าความผิดพลาดของการทำนายปริมาณอากาศในกระบอกสูบเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงจาก AVL – Boost ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm

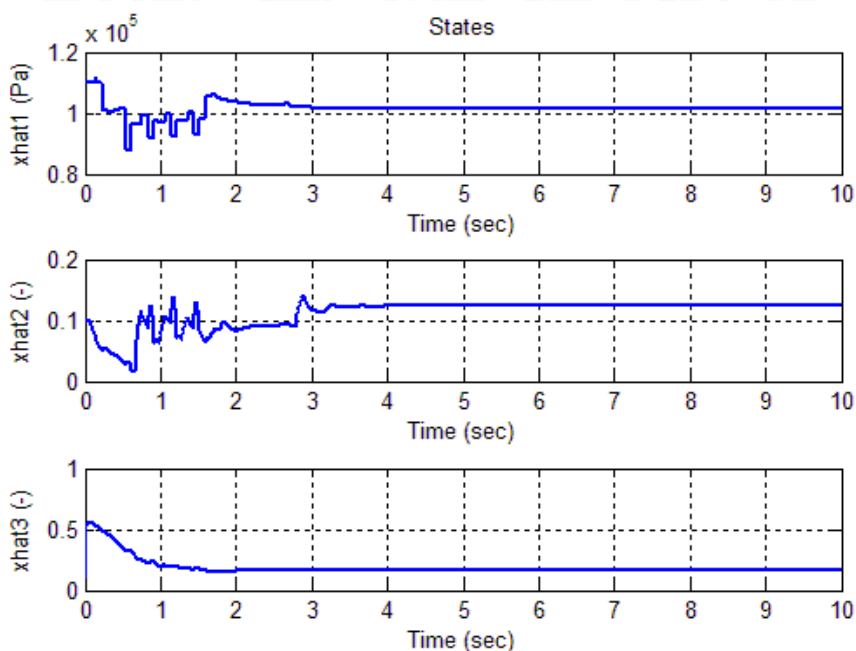
ค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่ได้จากหัวข้อ 1.1 และ 1.2 สามารถนำมาสรุปเป็นค่าความผิดพลาดของปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่ได้จากการการประมาณค่าด้วย EKF และคำนวณจากเซ็นเซอร์ MAF แสดงได้ดังภาพที่ 45 โดยจะเห็นได้ว่าที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 รอบต่อนาที ค่า APC ที่ได้จาก EKF ให้ผลที่ดีกว่าค่า APC ที่คำนวณจากเซ็นเซอร์ MAF อย่างชัดเจนในทุกช่วงตำแหน่งของคันเร่ง

2. ผลการจำลองที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 รอบต่อนาที

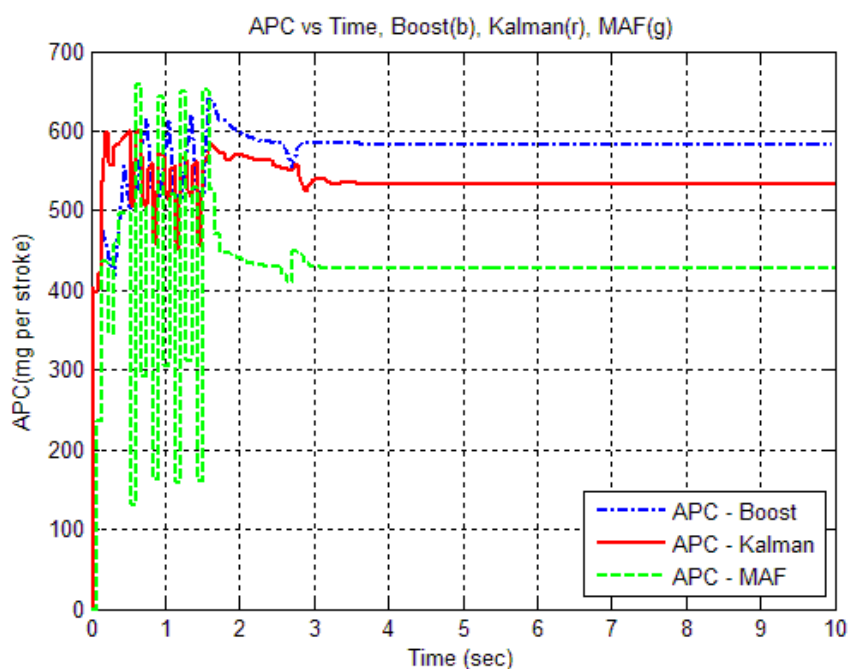
2.1 การจำลองที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200 rpm, ตำแหน่งคันเร่งคงที่ (Steady-State)

ทำการจำลองการทำงานที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 รอบต่อนาที โดยใช้ตำแหน่งคันเร่งคงที่ที่ 30%, 50% และ 70% เช่นเดียวกับการจำลองในข้อ 1 ดังนี้

2.1.1 ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 รอบต่อนาที, ตำแหน่งคันเร่ง 30%



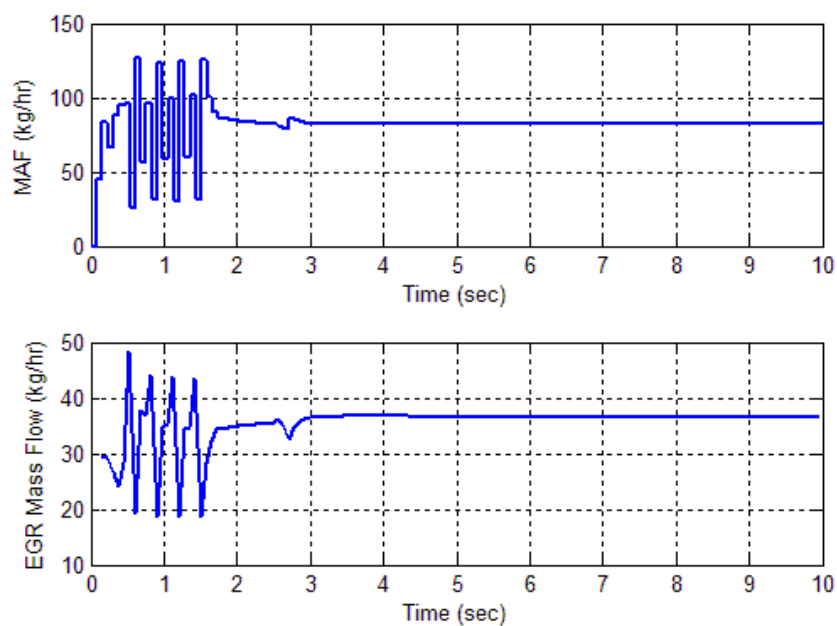
ภาพที่ 46 ตัวแปร State ที่ได้จาก EKF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 rpm และตำแหน่งคันเร่งที่ 30%



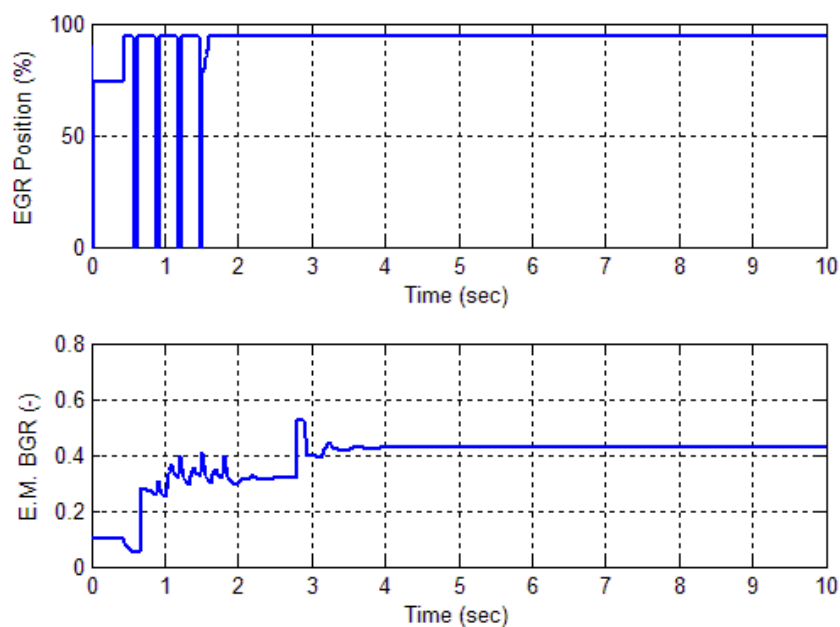
ภาพที่ 47 เปรียบเทียบค่า APC ระหว่าง APC จาก AVL – Boost, APC จาก EKF และ APC จากเซ็นเซอร์ MAF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 rpm และตำแหน่งคันเร่ง 30%

ตัวแปร State ที่ประมาณค่าด้วย EKF แสดงได้ดังภาพที่ 46 และภาพที่ 47 เป็นการแสดงค่า APC โดยเมื่อพิจารณาจากช่วงที่ระบบสู่ Steady-State (วินาทีที่ 3 ในภาพที่ 47 เป็นต้นไป) แล้ว ค่า APC ที่ได้จาก EKF ให้ผลที่ดีกว่าค่า APC ที่คำนวณจากเซ็นเซอร์ MAF โดยเมื่อเปรียบเทียบกับค่า APC อ้างอิงที่ได้จาก AVL – Boost แล้ว APC – Kalman (เส้นสีแดง) และ APC – MAF (เส้นสีเขียว) มีค่าความผิดพลาด 8.65% และ 26.81% ตามลำดับ

อัตราการไหลของอากาศจากเซ็นเซอร์ MAF และอัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียนแสดงได้ดังภาพที่ 48 คิดเป็นอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของอากาศจากเซ็นเซอร์ MAF และอัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียนได้เป็น 2.24 : 1 โดยตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR และอัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสียแสดงได้ดังภาพที่ 49 เมื่อพิจารณาจากปริมาณไอเสียหมุนเวียนและค่า BGR ในไอเสีย จะเห็นได้ว่ายังคงมีออกซิเจนที่เหลือและปะปนอยู่ในไอเสียหมุนเวียนในปริมาณที่ค่อนข้างมาก จึงทำให้การคำนวณค่า APC จากเซ็นเซอร์ MAF โดยตรง มีความคลาดเคลื่อนมากตามไปด้วย

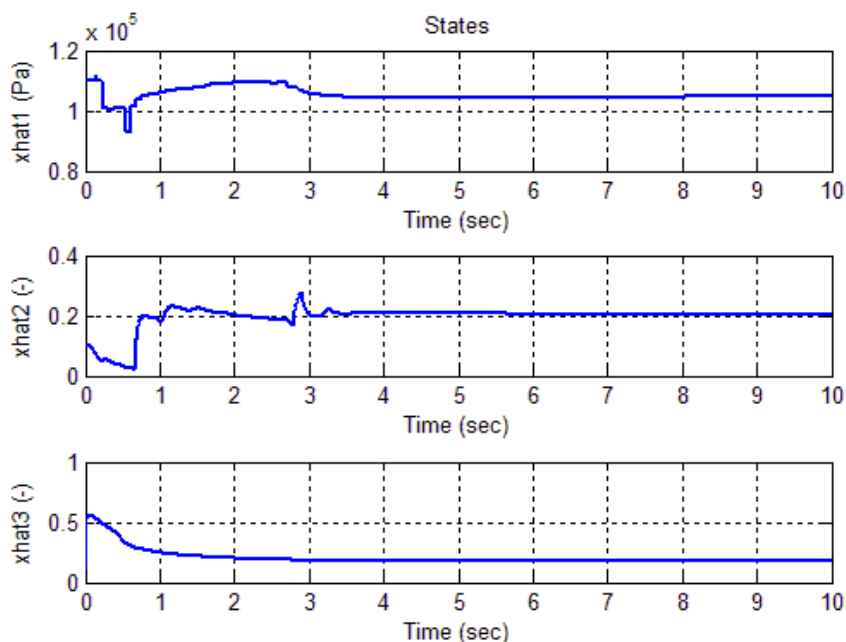


ภาพที่ 48 บน; อัตราการไหลของอากาศจาก MAF, ล่าง; อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 rpm และคันเร่ง 30%



ภาพที่ 49 บน; ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR, ล่าง; อัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสีย ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 rpm และคันเร่ง 30%

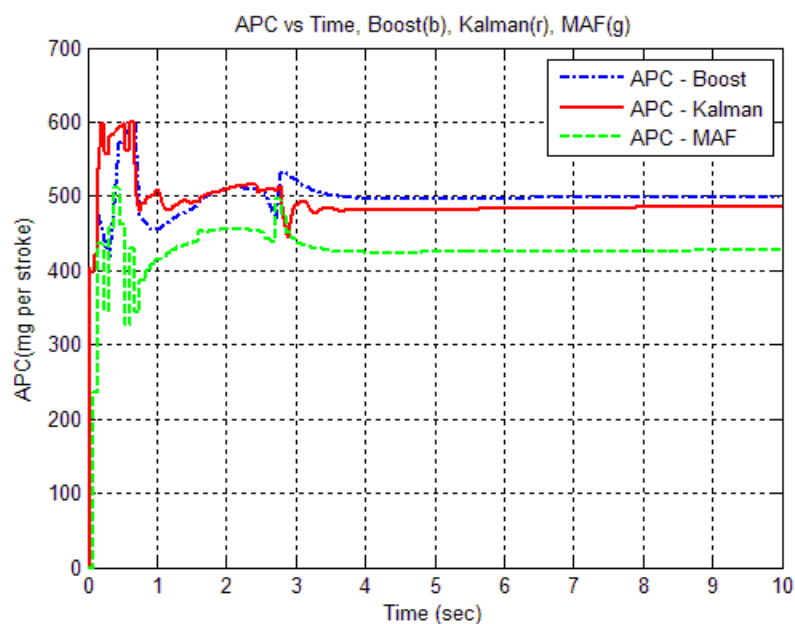
2.1.2 ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 รอบต่อนาที, ตำแหน่งคันเร่ง 50%



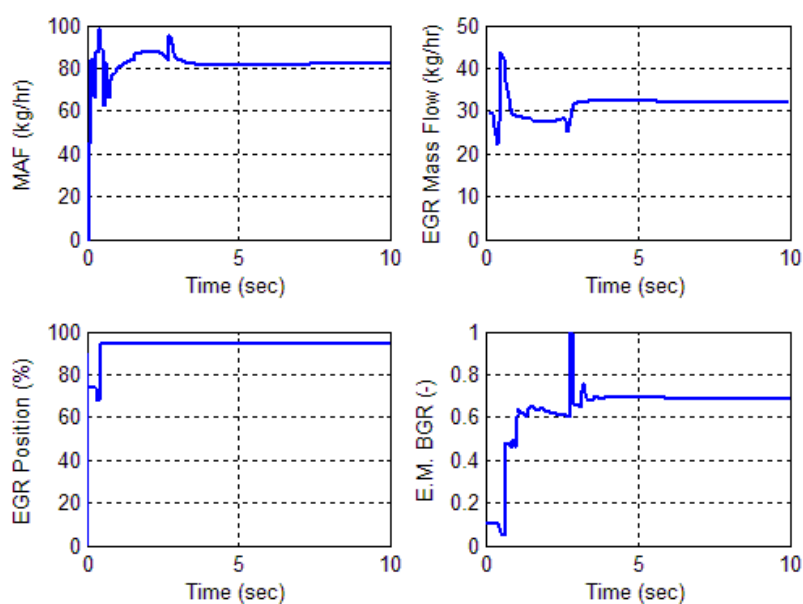
ภาพที่ 50 ตัวแปร State ที่ได้จาก EKF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 rpm และตำแหน่งคันเร่งที่ 50%

ตัวแปร State ที่ประมาณค่าด้วย EKF แสดงได้ดังภาพที่ 50 และปริมาณอากาศในกระบอกสูบแสดงได้ดังภาพที่ 51 ซึ่งค่า APC ที่ได้จาก EKF ให้ผลที่ดีกว่าค่า APC ที่คำนวณจากเซ็นเซอร์ MAF เมื่อพิจารณาจากช่วงที่ระบบเข้าสู่ Steady-State แล้ว ค่าความผิดพลาดของ APC – EKF (เส้นสีแดง) และ APC – MAF (เส้นสีเขียว) มีค่า 2.8% และ 14.43 % ตามลำดับ โดยเป็นค่าความผิดพลาดที่พิจารณาเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง APC – Boost (เส้นสีน้ำเงิน)

ภาพที่ 51 แสดงอัตราการไหลของอากาศจากเซ็นเซอร์ MAF, อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน, ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR และอัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสีย โดยปริมาณอากาศจากเซ็นเซอร์ MAF และไอเสียหมุนเวียนคิดเป็นอัตราส่วนได้เป็น 2.55 : 1 เมื่อสังเกตปริมาณของไอเสียหมุนเวียนและอัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสีย จะพบว่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่คำนวณจากเซ็นเซอร์ MAF มีความคลาดเคลื่อนน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับข้อ 2.2.1

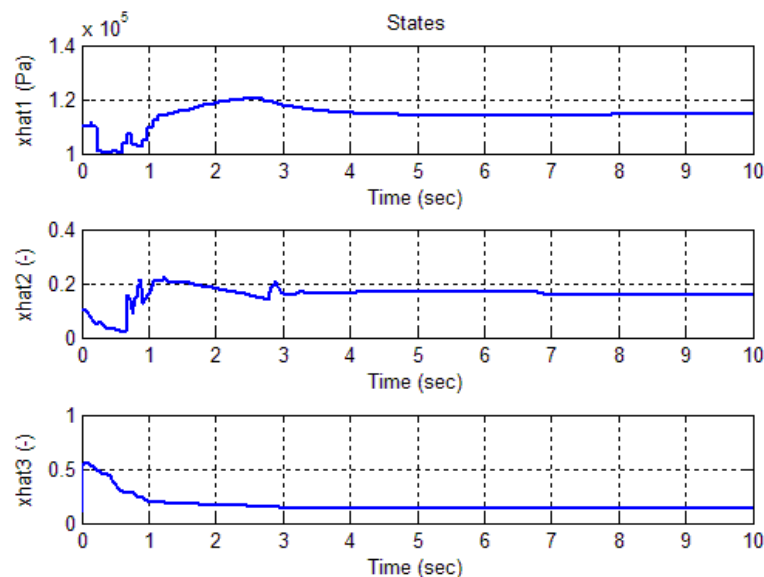


ภาพที่ 51 เปรียบเทียบค่า APC ระหว่าง APC จาก AVL – Boost, APC จาก EKF และ APC จากเซ็นเซอร์ MAF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 rpm และตำแหน่งคันเร่ง 50%

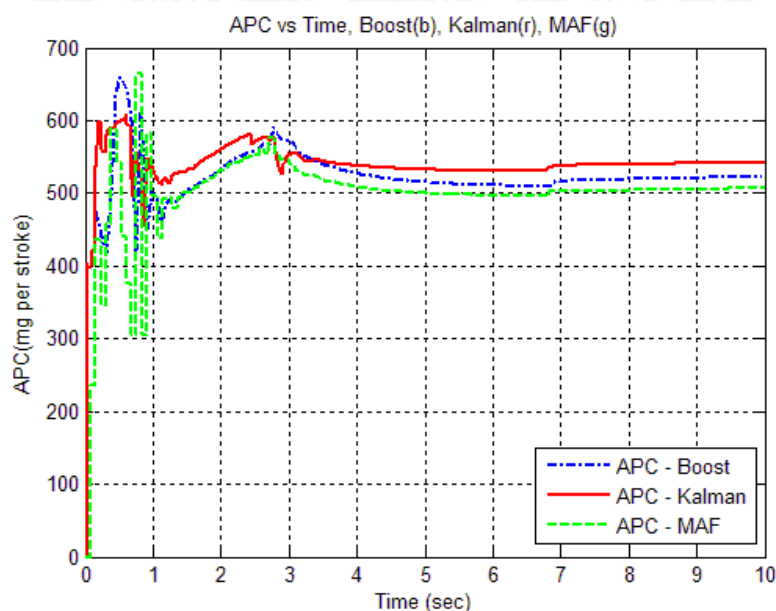


ภาพที่ 52 บน - ซ้าย; อัตราการไหลของอากาศจาก MAF, บน - ขวา; อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน, ล่าง-ซ้าย; ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR, ล่าง-ขวา; อัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสีย ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 rpm และคันเร่ง 50%

2.1.3 ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 รอบต่อนาที, ตำแหน่งคันเร่ง 70%



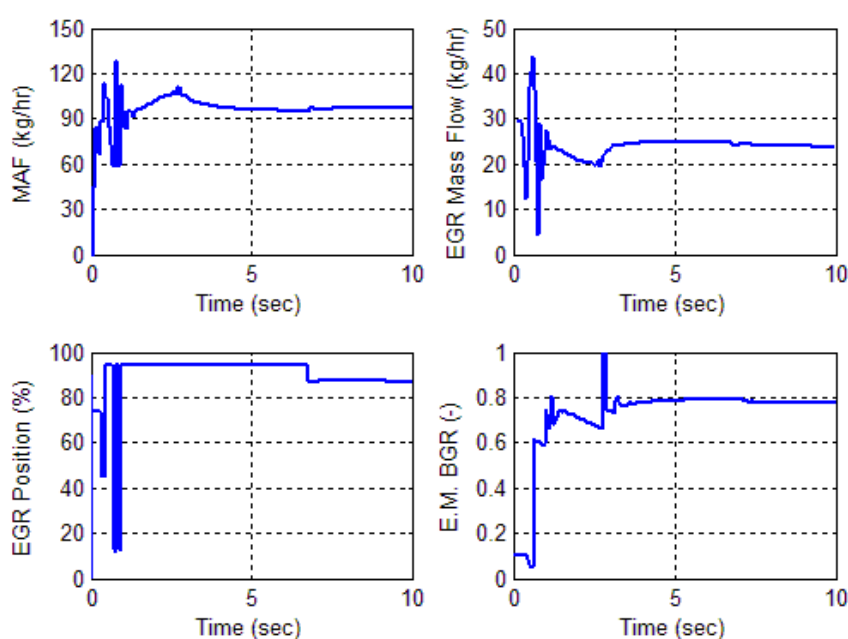
ภาพที่ 53 ตัวแปร State ที่ได้จาก EKF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 rpm และตำแหน่งคันเร่งที่ 70%



ภาพที่ 54 เปรียบเทียบค่า APC ระหว่าง APC จาก AVL – Boost, APC จาก EKF และ APC จากเซ็นเซอร์ MAF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 rpm และตำแหน่งคันเร่ง 70%

การจำลองที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 รอบต่อนาที และตำแหน่งคันเร่งคงที่ที่ 70% แสดงตัวแปร State ที่ประมาณค่าได้จาก EKF ได้ดังภาพที่ 53 และค่าปริมาณอากาศในระบบทดสอบแสดงได้ดังภาพที่ 54 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าปริมาณอากาศในระบบทดสอบที่ได้จาก AVL – Boost แล้ว ค่า APC – Kalman (เส้นสีแดง) และ APC – MAF (เส้นสีเขียว) มีค่าความผิดพลาด 3.62% และ 2.93% ตามลำดับ ซึ่งค่า APC ที่ได้จากเซ็นเซอร์ MAF ให้ผลที่ดีกว่าค่า APC ที่ได้จาก EKF เล็กน้อย

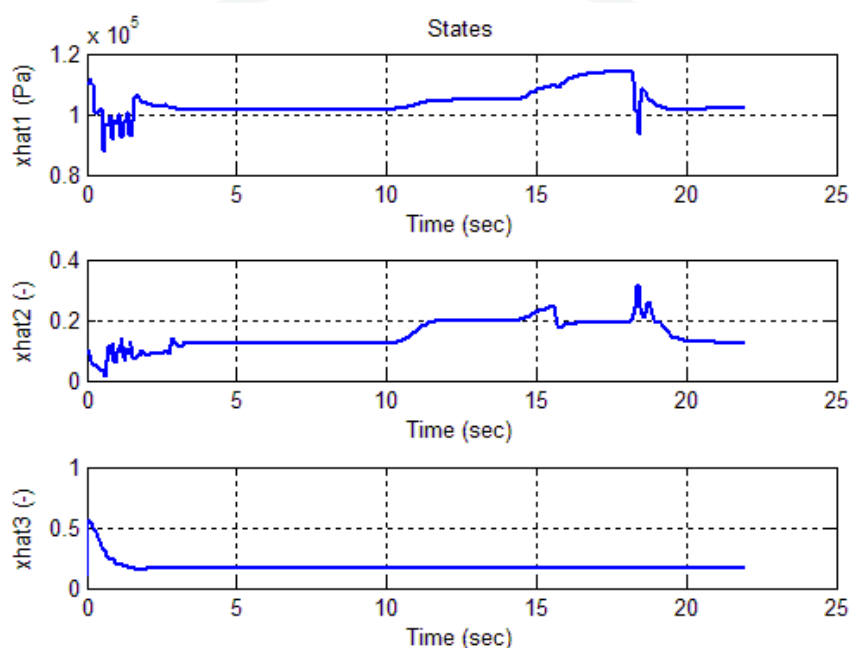
อัตราการไหลของอากาศที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ MAF, อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน, ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR และอัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสีย แสดงได้ดังภาพที่ 55 โดยอัตราการไหลของอากาศที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ MAF และอัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียนคิดเป็นอัตราส่วนได้เป็น 3.94 : 1



ภาพที่ 55 บน - ซ้าย; อัตราการไหลของอากาศจาก MAF, บน - ขวา; อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน, ล่าง-ซ้าย; ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR, ล่าง-ขวา; อัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสีย ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 rpm และคันเร่ง 70%

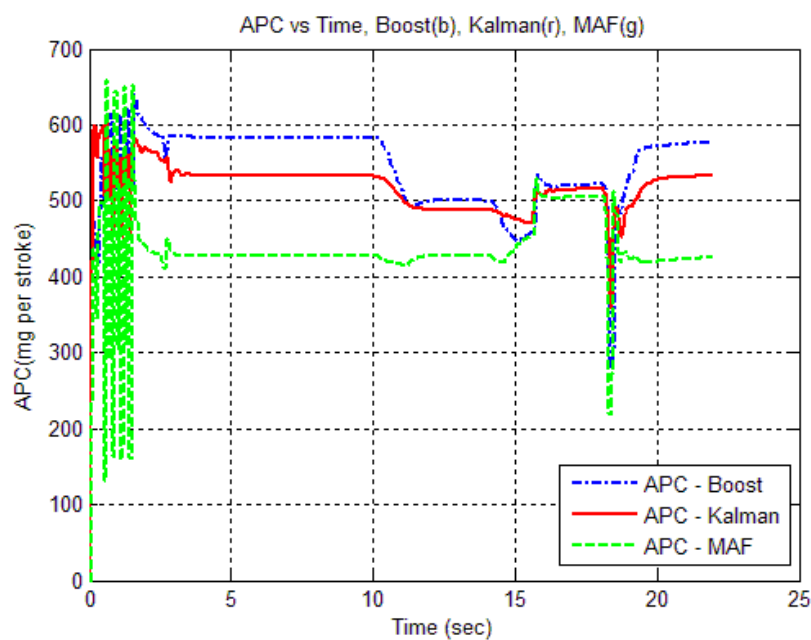
2.2 การจำลองที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 rpm, คับเร่งเปลี่ยนแปลง (Load-Transient)

ทำการจำลองตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงคับเร่งในลักษณะเดียวการจำลองที่หัวข้อ 1.2 แสดงได้ดังภาพที่ 40

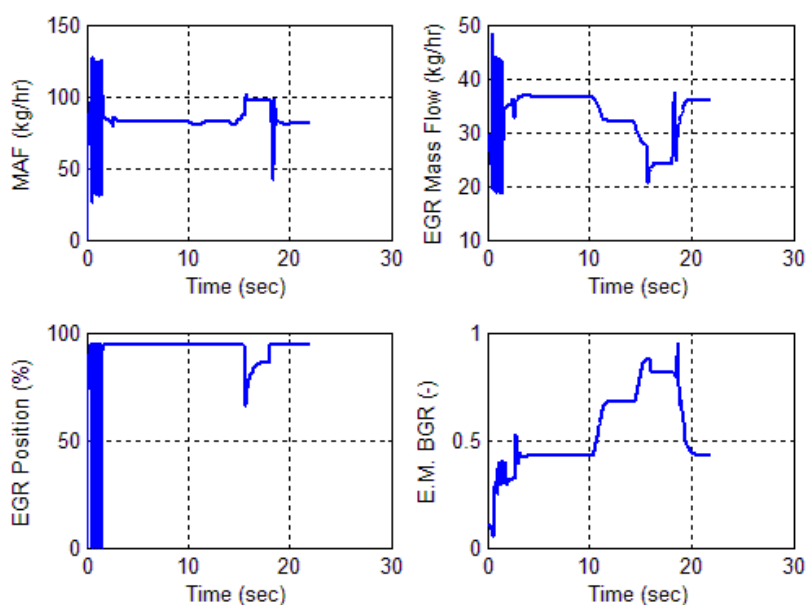


ภาพที่ 56 ตัวแปร State ที่ได้จาก EKF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 rpm และตำแหน่งคับเร่งเปลี่ยนแปลง

แสดงตัวแปร State ที่ได้จากการประมาณค่าด้วย EKF ของการจำลองที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 รอบต่อนาที และมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งคับเร่งได้ดังภาพที่ 56 เมื่อนำ State ที่ได้จากการประมาณค่าไปคำนวณหาค่า APC แล้ว สามารถแสดงค่า APC – Kalman ได้ดังเส้นสีแดงในภาพที่ 57 เมื่อนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่า APC อ้างอิงที่ได้จาก AVL – Boost (เส้นสีน้ำเงิน) แล้ว จะเห็นได้ว่า APC – Kalman ให้ผลที่ดีกว่าค่า APC – MAF (เส้นสีเขียว) อย่างชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงการจำลองที่ตำแหน่งคับเร่ง 30% และ 50% และค่า APC – Kalman มีผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงคับเร่งอยู่ในเกณฑ์ที่ดี โดยมีแนวโน้มของกราฟไปในทิศทางเดียวกับ APC – Boost

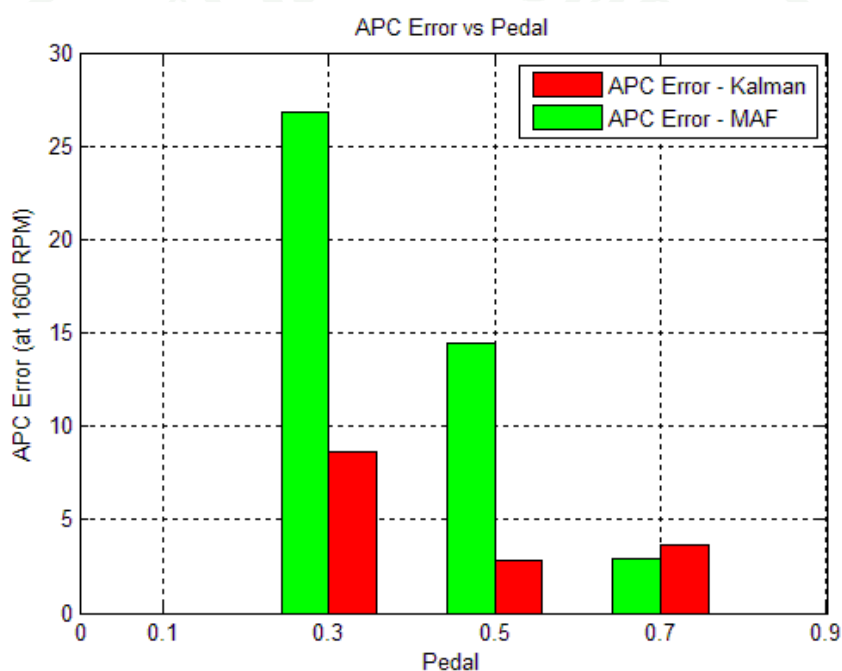


ภาพที่ 57 เปรียบเทียบค่า APC ระหว่าง APC จาก AVL – Boost, APC จาก EKF และ APC จากเซ็นเซอร์ MAF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 rpm และตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 58 บน - ซ้าย; อัตราการไหลของอากาศจาก MAF, บน - ขวา; อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน, ล่าง-ซ้าย; ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR, ล่าง-ขวา; อัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสีย ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 rpm และคันเร่งเปลี่ยนแปลง

จากหัวข้อ 2.1 และ 2.2 นำมาสรุปเป็นค่าความผิดพลาดของค่า APC – Kalman (เส้นสีแดง) และค่า APC – MAF (เส้นสีเขียว) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง APC – Boost (เส้นสีน้ำเงิน) ได้ดังภาพที่ 59 โดยในช่วงการจำลองที่ตำแหน่งคันเร่ง 30% และ 50% นั้น ตัวกรองคาดหมายให้ค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบได้ดีกว่าค่า APC ที่คำนวณได้จากเซ็นเซอร์ MAF โดยตรง อย่างชัดเจน และมีค่าความผิดพลาดเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงจาก AVL – Boost ใกล้เคียงกันที่ตำแหน่งคันเร่ง 70%



ภาพที่ 59 ค่าความผิดพลาดของการทำนายปริมาณอากาศในกระบอกสูบเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงจาก AVL – Boost ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 rpm

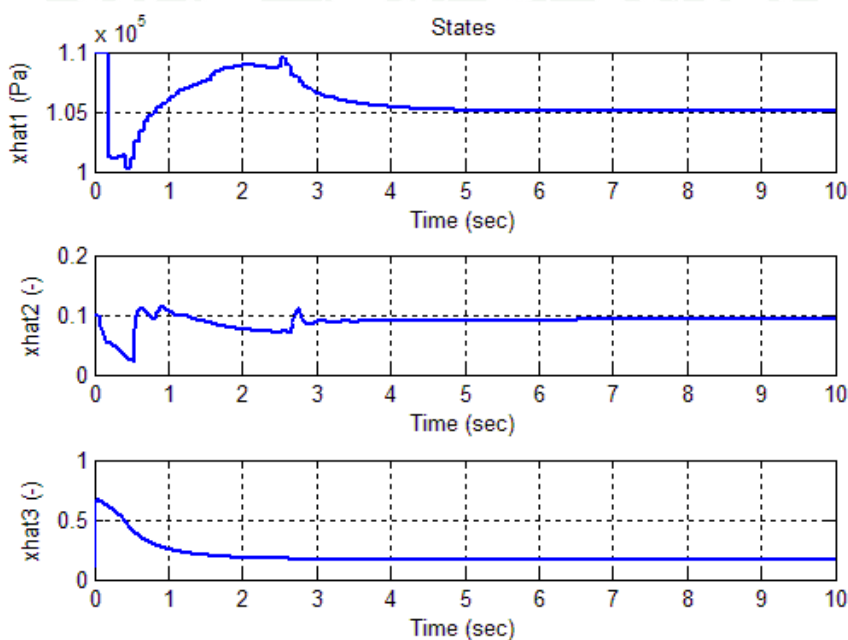
3. ผลการจำลองที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 รอบต่อนาที

3.1 การจำลองที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm, ตำแหน่งคันเร่งคงที่ (Steady-State)

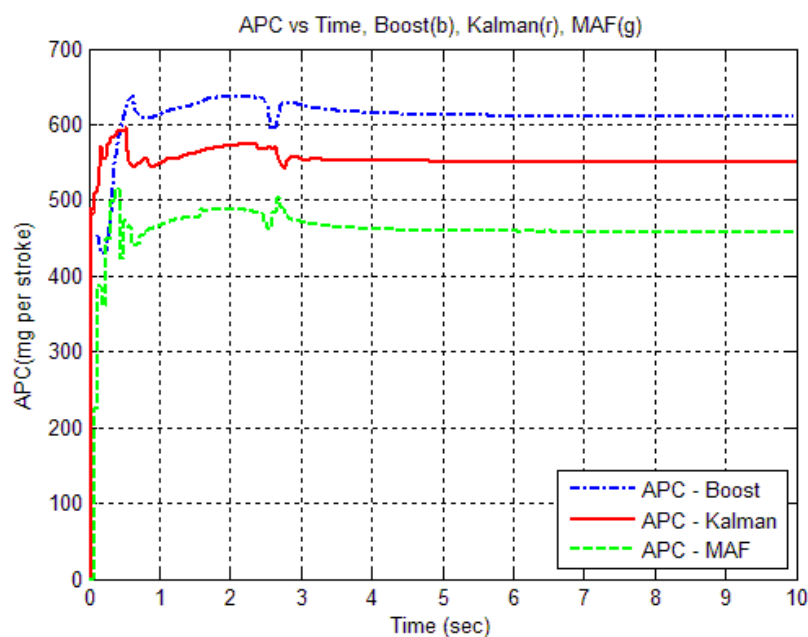
ทำการจำลองการทำงานที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 รอบต่อนาที โดยใช้ตำแหน่งคันเร่งคงที่ที่ 30%, 50% และ 70% เช่นเดียวกับการจำลองในข้อ 1 และ 2 ดังนี้

3.1.1 ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 รอบต่อนาที, ตำแหน่งคันเร่ง 30%

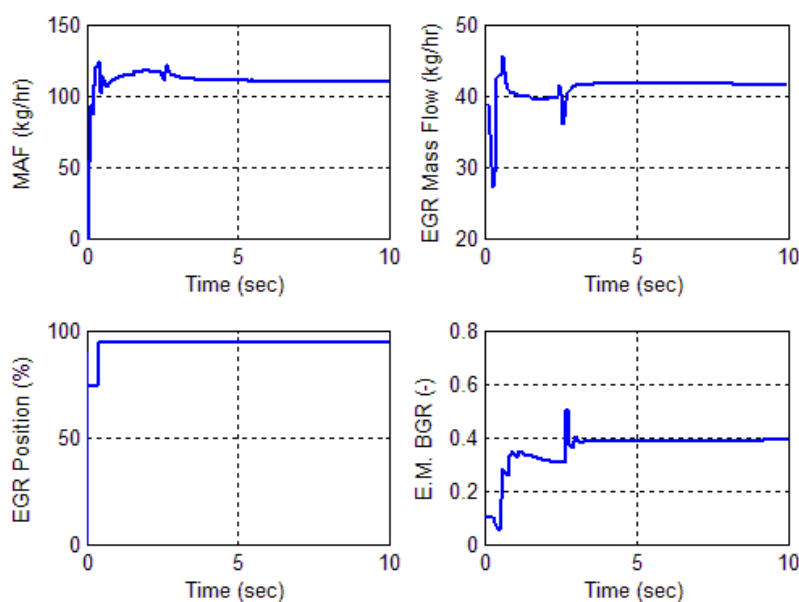
ตัวแปร State ที่ประมาณค่าได้จาก EKF ของการจำลองที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 รอบต่อนาที และตำแหน่งคันเร่งคงที่ที่ 30% แสดงได้ดังภาพที่ 60 ค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบแสดงได้ดังภาพที่ 61 ซึ่งผลของ APC ในช่วงการจำลองที่ตำแหน่งคันเร่งต่ำ (30%) เป็นไปในทิศทางเดียวกับหัวข้อ 1.1.1 และ 2.1.1 คือค่า APC – Kalman (เส้นสีแดง) ยังคงให้ผลที่ดีกว่าค่า APC – MAF (เส้นสีเขียว) อย่างชัดเจน โดยเมื่อนำทั้งสองค่านี้ไปเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง APC – Boost (เส้นสีน้ำเงิน) ในช่วงที่ระบบเข้าสู่ Steady-State แล้ว ค่าความผิดพลาดของ APC – Kalman และ APC – MAF มีค่า 11.98% และ 24.9% ตามลำดับ โดยค่าความผิดพลาดของ APC – MAF ยังคงมีค่ามาก เนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่ยังเหลือและปะปนอยู่ในไอเสียหมุนเวียนนั้นมีค่ามาก ซึ่งอัตราการไหลของอากาศที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ MAF และอัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียนคิดเป็นอัตราส่วนได้เป็น 2.65 : 1 โดยอัตราการไหลของอากาศที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ MAF, อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน, ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR และอัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสียแสดงได้ดังภาพที่ 62



ภาพที่ 60 ตัวแปร State ที่ได้จาก EKF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm และตำแหน่งคันเร่งที่ 30%

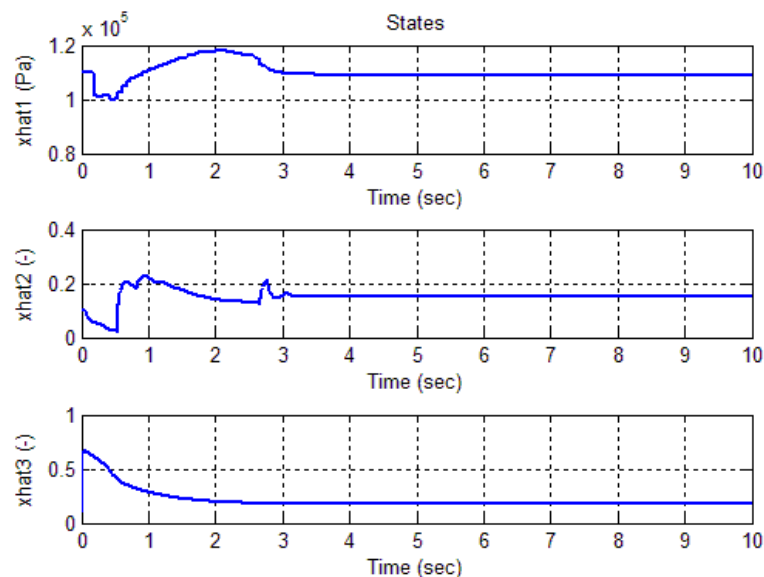


ภาพที่ 61 เปรียบเทียบค่า APC ระหว่าง APC จาก AVL – Boost, APC จาก EKF และ APC จากเซ็นเซอร์ MAF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm และตำแหน่งคันเร่ง 30%

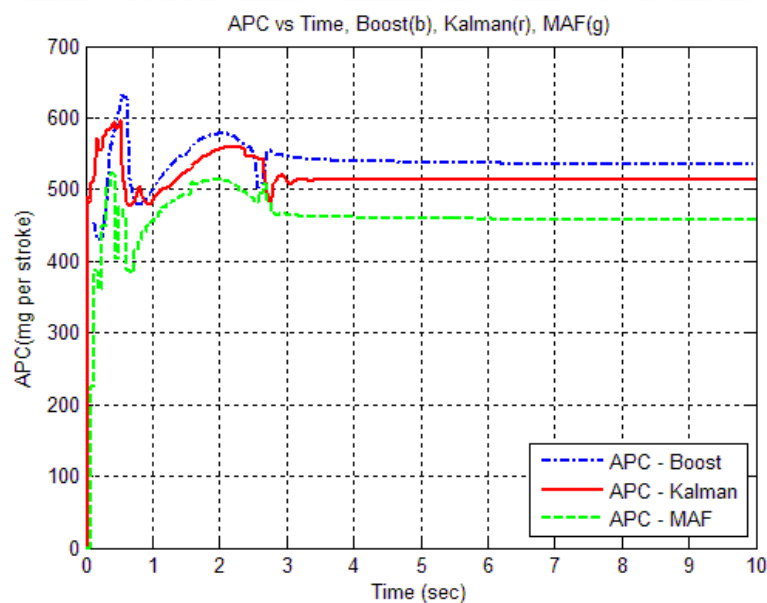


ภาพที่ 62 บน - ซ้าย; อัตราการไหลของอากาศจาก MAF, บน - ขวา; อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน, ล่าง-ซ้าย; ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR, ล่าง-ขวา; อัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสีย ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm และคันเร่ง 30%

3.1.2 ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 รอบต่อนาที, ตำแหน่งคันเร่ง 50%

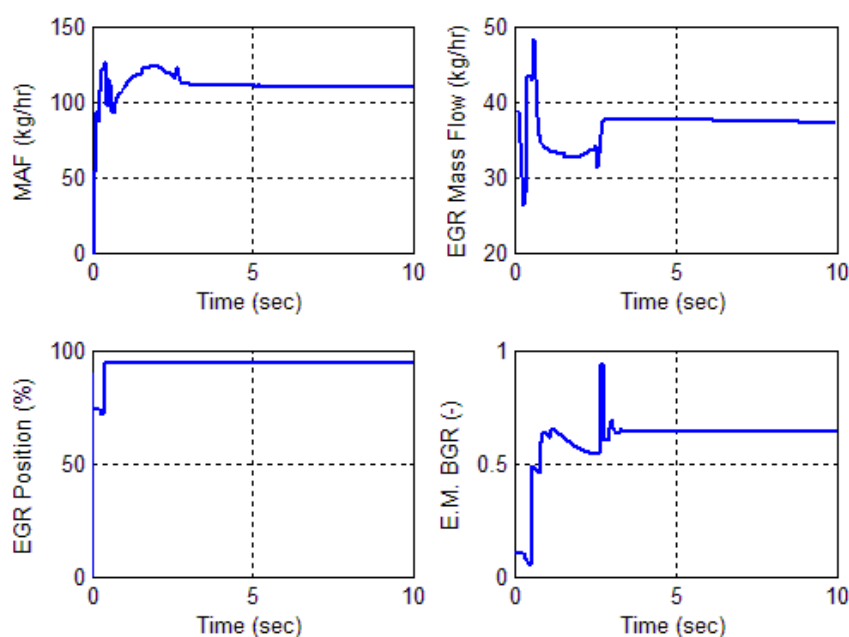


ภาพที่ 63 ตัวแปร State ที่ได้จาก EKF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm และตำแหน่งคันเร่งที่ 50%



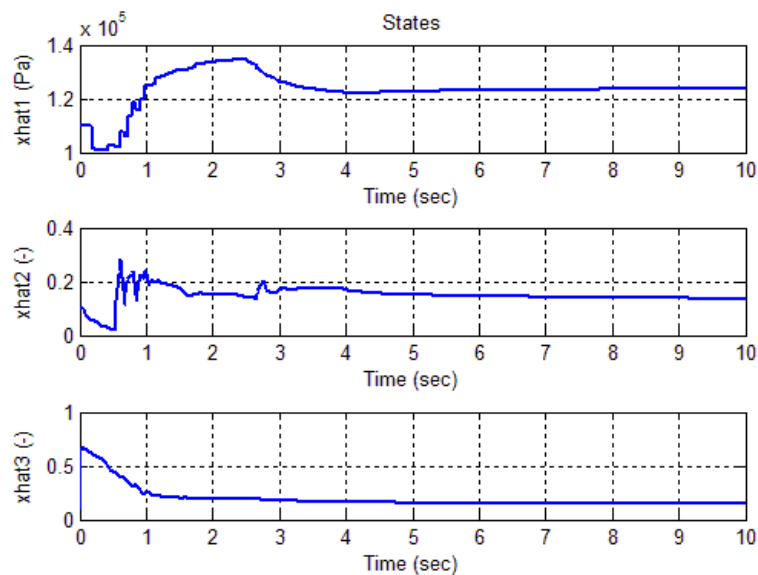
ภาพที่ 64 เปรียบเทียบค่า APC ระหว่าง APC จาก AVL – Boost, APC จาก EKF และ APC จากเซ็นเซอร์ MAF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm และตำแหน่งคันเร่ง 50%

จากภาพที่ 64 เป็นการเปรียบเทียบปริมาณอากาศในกระบอกสูบระหว่างค่าอ้างอิงที่ได้จาก AVL – Boost, ค่าที่ประมาณค่าด้วย EKF และค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยเซ็นเซอร์ MAF โดยจะเห็นได้ว่าค่า APC – Kalman (เส้นสีแดง) ให้ผลที่ดีกว่าค่า APC – MAF (เส้นสีเขียว) ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง APC - Boost (เส้นสีน้ำเงิน) แล้ว พบว่าค่าความผิดพลาดของ APC – Kalman และ APC – MAF อยู่ที่ 4.29% และ 14.47% ตามลำดับ โดยค่าอัตราการไหลของอากาศที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ MAF, อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน, ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR และอัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสียแสดงได้ดังภาพที่ 65 ซึ่งอัตราการไหลของอากาศที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ MAF และอัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียนคิดเป็นอัตราส่วนได้เป็น 2.94 : 1 และเมื่อพิจารณาจากปริมาณของไอเสียหมุนเวียนและอัตราส่วน Burned gas ในไอเสีย จะเห็นได้ว่ามีปริมาณออกซิเจนที่เหลือปะปนอยู่ในไอเสียหมุนเวียนมีค่าน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับข้อ 3.1.2 จึงทำให้ค่าความผิดพลาดของการคำนวณค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบด้วยเซ็นเซอร์ MAF โดยตรงมีค่าน้อยลง

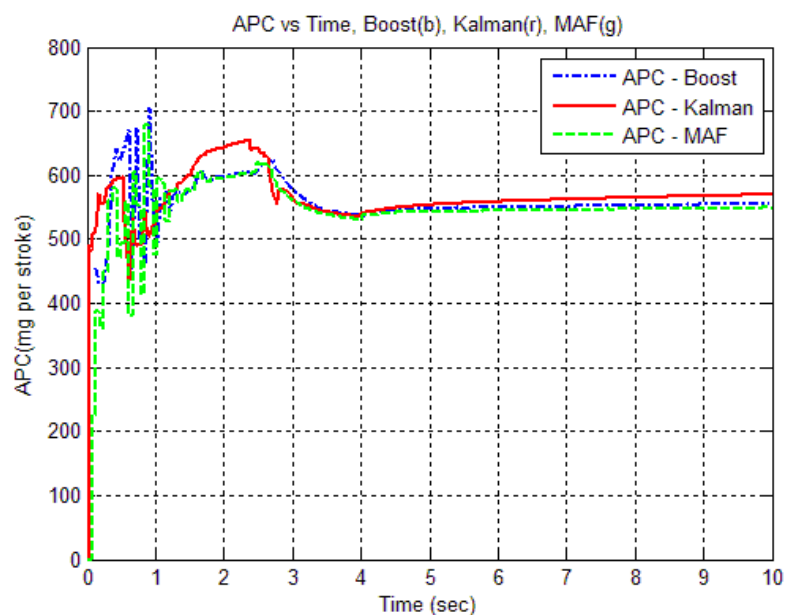


ภาพที่ 65 บน - ซ้าย; อัตราการไหลของอากาศจาก MAF, บน - ขวา; อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน, ล่าง-ซ้าย; ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR, ล่าง-ขวา; อัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสีย ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm และคันทรง 50%

3.1.3 ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 รอบต่อนาที, ตำแหน่งคันเร่ง 70%

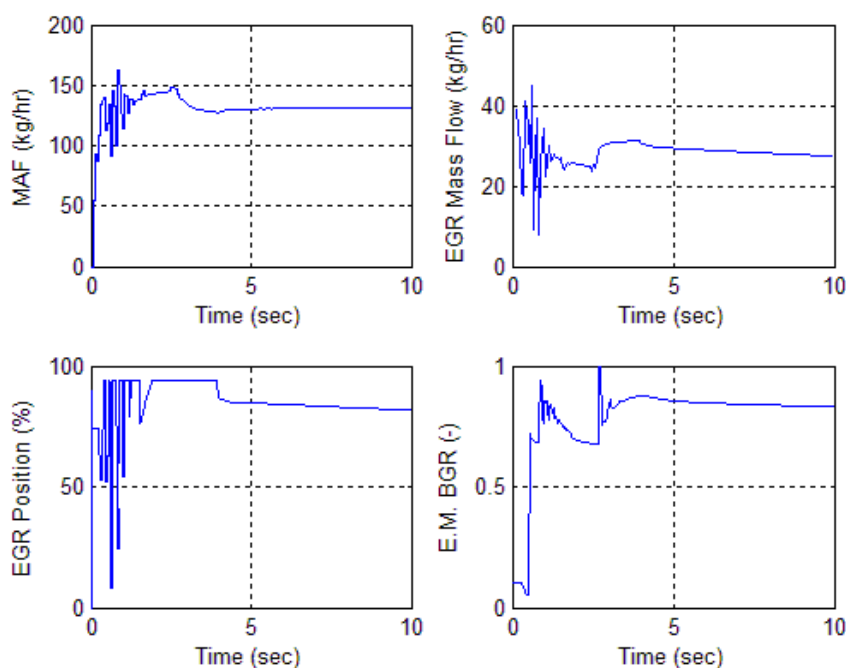


ภาพที่ 66 ตัวแปร State ที่ได้จาก EKF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm และตำแหน่งคันเร่งที่ 70%



ภาพที่ 67 เปรียบเทียบค่า APC ระหว่าง APC จาก AVL – Boost, APC จาก EKF และ APC จากเซ็นเซอร์ MAF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm และตำแหน่งคันเร่ง 70%

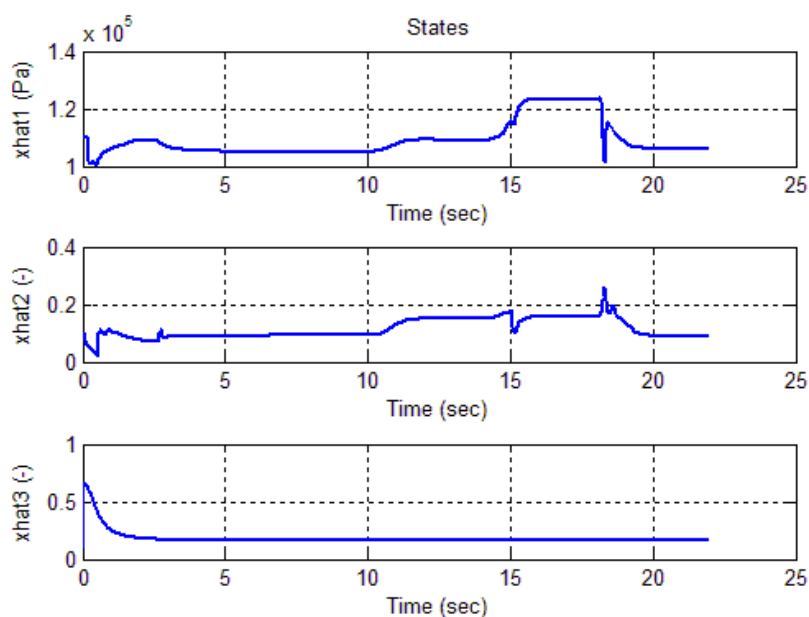
ตัวแปร State ที่ประมาณค่าได้จาก EKF แสดงได้ดังภาพที่ 66 และปริมาณอากาศในกระบอกสูบแสดงได้ดังภาพที่ 67 โดยทั้งค่า APC – Kalman (เส้นสีแดง) และค่า APC – MAF (เส้นสีเขียว) มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าอ้างอิง APC – Boost (เส้นสีน้ำเงิน) ซึ่ง APC – Kalman และ APC – MAF มีค่าความผิดพลาดเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง APC – Boost อยู่ที่ 1.76% และ 1.02% ตามลำดับ ซึ่งข้อมูลที่คำนวณได้จากเซ็นเซอร์ MAF ให้ผลที่ดีกว่าข้อมูลที่ได้จาก EKF เล็กน้อย เนื่องจากปริมาณไอเสียหมุนเวียนมีค่าน้อย แสดงได้ดังภาพที่ 68 โดยคิดเป็นอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของอากาศที่ได้จาก MAF และไอเสียหมุนเวียนได้เป็น 4.58 : 1 และยังมีอัตราส่วน Burned gas ในไอเสียที่สูงอีกด้วย



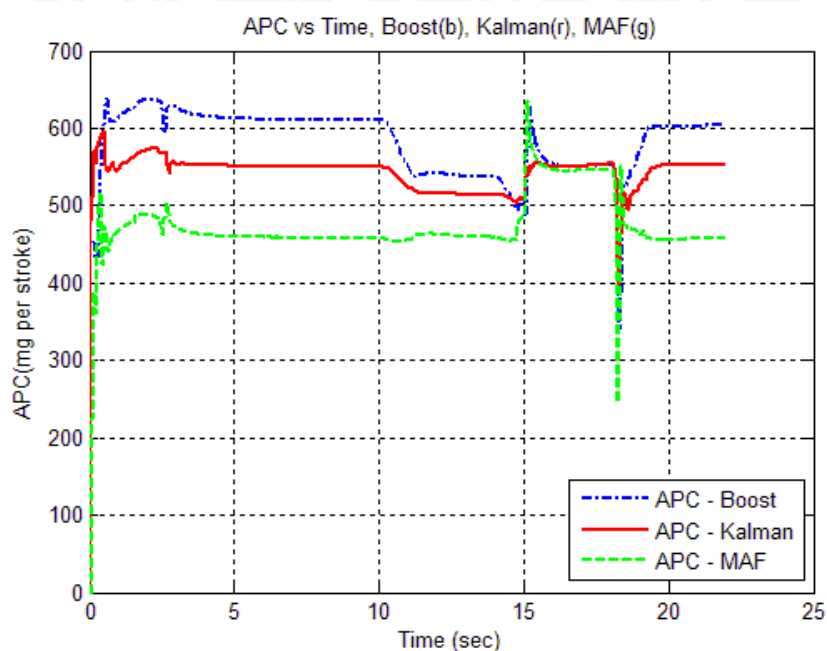
ภาพที่ 68 บน - ซ้าย; อัตราการไหลของอากาศจาก MAF, บน - ขวา; อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน, ล่าง-ซ้าย; ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR, ล่าง-ขวา; อัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสีย ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm และคันเร่ง 70%

3.2 การจำลองที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1600 rpm, คันเร่งเปลี่ยนแปลง (Load-Transient)

ทำการจำลองตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงคันเร่งในลักษณะเดียวการจำลองที่หัวข้อ 1.2 แสดงได้ดังภาพที่ 40 และค่าตัวแปร State ที่ประมาณค่าได้จาก EKF แสดงได้ดังภาพที่ 69

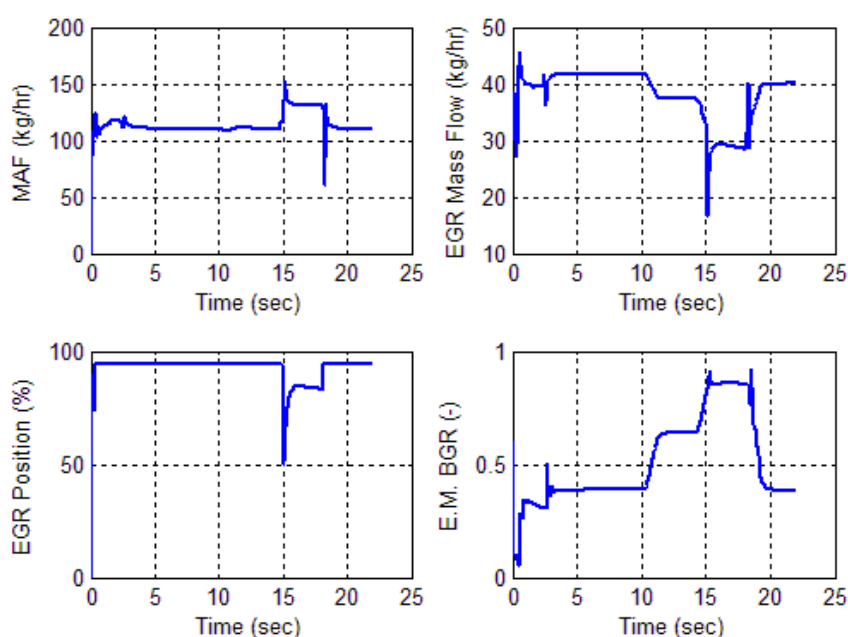


ภาพที่ 69 ตัวแปร State ที่ได้จาก EKF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm และตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 70 เปรียบเทียบค่า APC ระหว่าง APC จาก AVL – Boost, APC จาก EKF และ APC จากเซ็นเซอร์ MAF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm และตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง

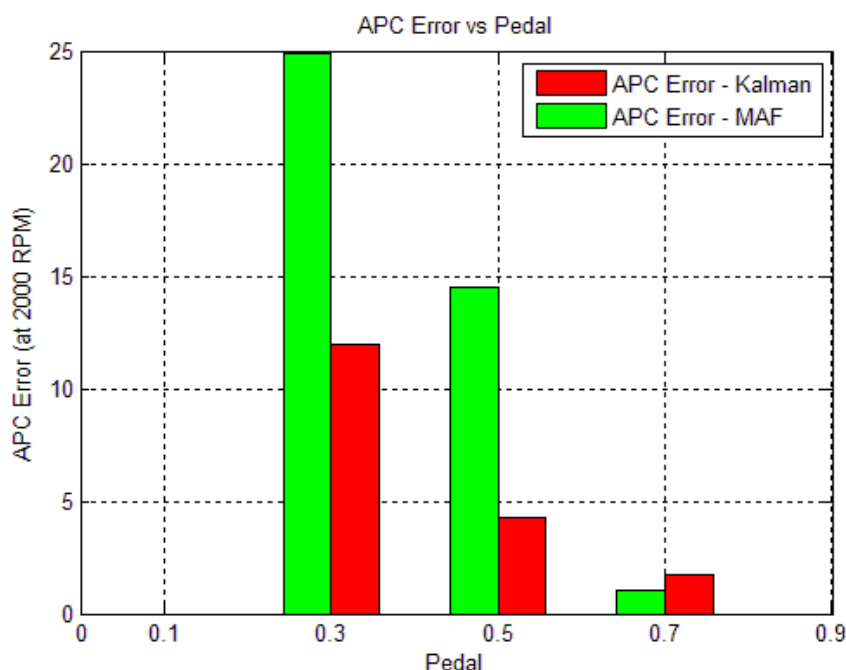
การเปรียบเทียบปริมาณอากาศในกระบอกสูบแสดงได้ดังภาพที่ 70 โดยจะเห็นได้ว่า ภาพรวมของการจำลองที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 รอบต่อนาที การประมาณค่า APC ด้วย EKF (เส้นสีแดง) ให้ผลที่ดีกว่าการคำนวณค่า APC จากเซ็นเซอร์ MAF (เส้นสีเขียว) โดยเป็นการเปรียบเทียบจากค่าอ้างอิง APC – Boost (เส้นสีน้ำเงิน) และผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงคันเร่ง ของ APC – Kalman เมื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง APC – Boost ก็ยังคงให้ผลที่น่าพอใจ โดยมี แนวโน้มของกราฟเป็นไปในลักษณะเดียวกับเส้นสีน้ำเงิน



ภาพที่ 71 บน - ซ้าย; อัตราการไหลของอากาศจาก MAF, บน - ขวา; อัตราการไหลของไอเสีย
หมุนเวียน, ล่าง-ซ้าย; ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR, ล่าง-ขวา; อัตราส่วน Burned gas ต่อ
ก๊าซทั้งหมดในไอเสีย ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm และคันเร่งเปลี่ยนแปลง

จากการจำลองในข้อ 3.1 และ 3.2 นำมาสรุปเป็นค่าความผิดพลาดของปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่ประมาณค่าได้จาก EKF และที่ได้จากการคำนวณด้วยเซ็นเซอร์ MAF ได้ดังภาพที่ 72 โดยสำหรับการจำลองที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 รอบต่อนาทีนั้น ค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่ได้จาก EKF ให้ผลที่ดีกว่าค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่คำนวณได้จากเซ็นเซอร์ MAF อย่างชัดเจนในช่วงการจำลองที่ตำแหน่งคันเร่ง 30% และ 50% โดยค่า APC ที่คำนวณได้จาก

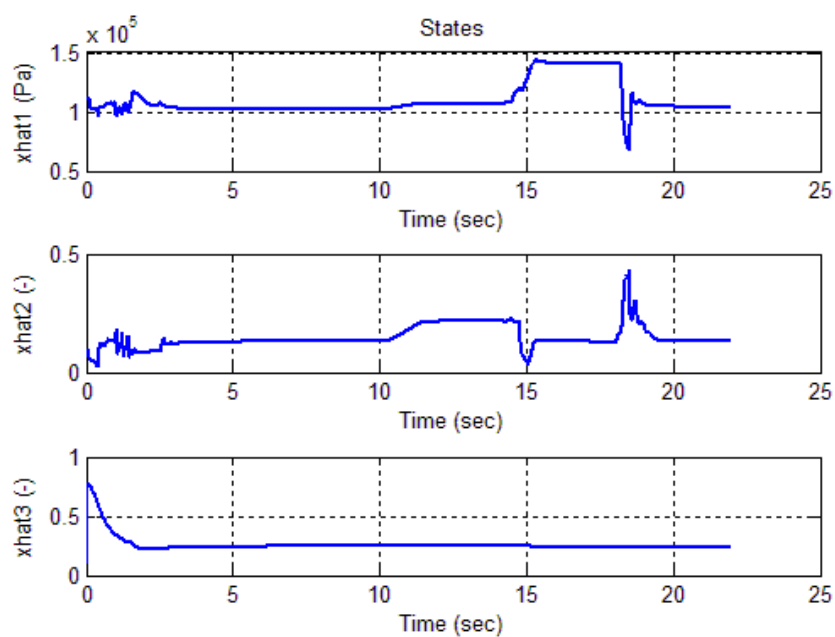
เซ็นเซอร์ MAF โดยตรง ให้ผลที่ดีกว่าค่า APC ที่ได้จาก EKF เล็กน้อยที่การจำลองที่ตำแหน่งคันเร่ง 70%



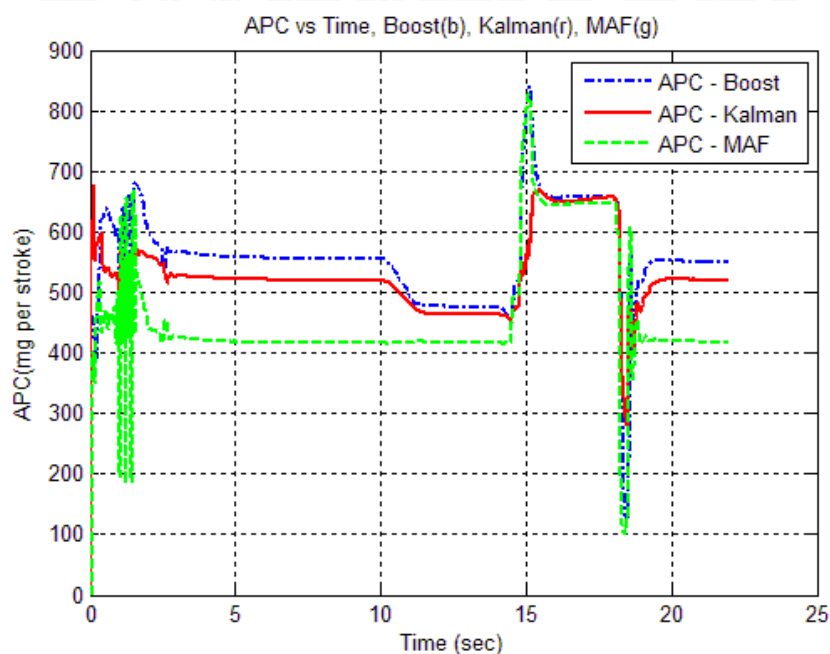
ภาพที่ 72 ค่าความผิดพลาดของการทำนายปริมาณอากาศในกระบอกสูบเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงจาก AVL – Boost ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm

4. ผลการจำลองที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2400 รอบต่อนาที

จากข้อ 1, 2 และ 3 การจำลองที่ตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง มีทิศทางของข้อมูลคล้ายกับการนำตำแหน่งคันเร่งที่ 30%, 50% และ 70% มาจำลองติดต่อกัน ดังนั้นในการจำลองที่ 2400 รอบต่อนาทีจึงขอทำการจำลองเฉพาะที่คันเร่งเปลี่ยนแปลง เมื่อตำแหน่งคันเร่งแสดงดังภาพที่ 40 โดยภาพที่ 73 แสดงตัวแปร State ที่ประมาณค่าได้จาก EKF และนำไปทำการคำนวณหาค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบแสดงได้ดังภาพที่ 74 เมื่ออัตราการไหลของอากาศที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ MAF, อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน, ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR และอัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสีย แสดงดังภาพที่ 75

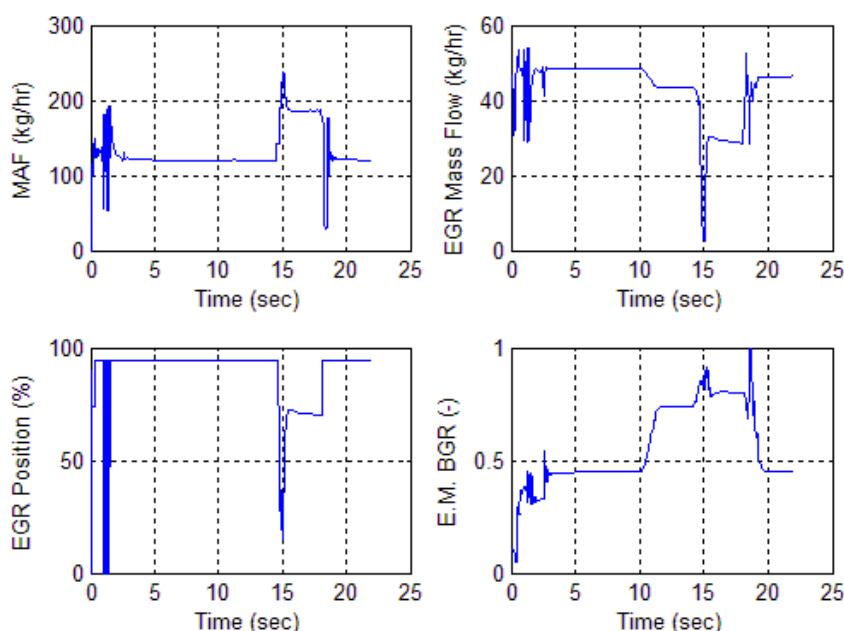


ภาพที่ 73 ตัวแปร State ที่ได้จาก EKF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2400 rpm และตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง



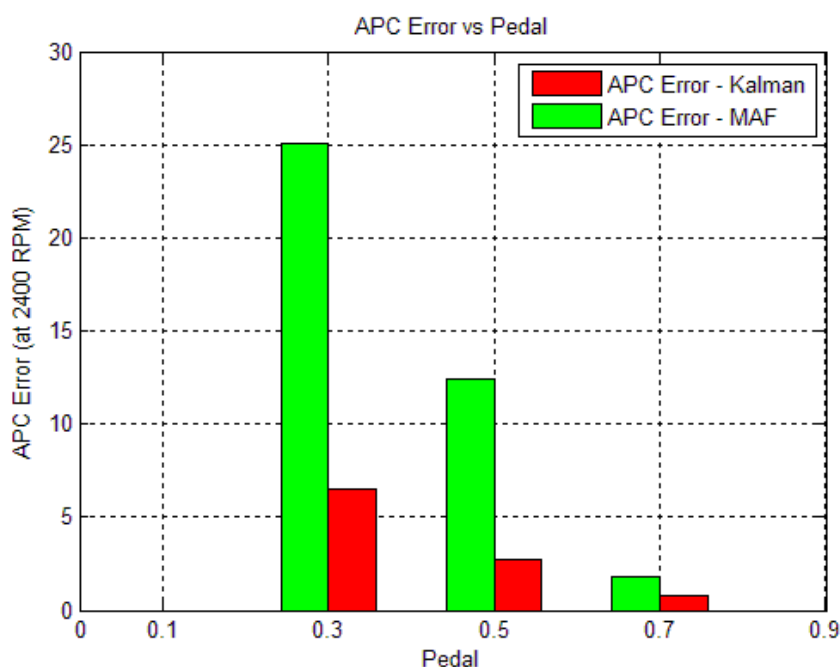
ภาพที่ 74 เปรียบเทียบค่า APC ระหว่าง APC จาก AVL – Boost, APC จาก EKF และ APC จากเซ็นเซอร์ MAF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2400 rpm และตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง

จากภาพที่ 74 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่ได้จาก AVL – Boost แล้ว ค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่ได้จากตัวกรองคลาแมน (เส้นสีแดง) ให้ผลที่ดีกว่าค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่คำนวณได้จากเซ็นเซอร์ MAF โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงตำแหน่งคันเร่งต่ำ (30% และ 50%) สาเหตุที่ค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่คำนวณได้จากเซ็นเซอร์ MAF ในช่วงคันเร่งต่ำมีค่ามากนั้น เกิดเนื่องจากในช่วงคันเร่งต่ำมีปริมาณไอเสียหมุนเวียนสูง อีกทั้งยังมีอัตราส่วน Burned gas ในไอเสียไม่สูง ซึ่งหมายถึงยังคงมีออกซิเจนเหลือปะปนอยู่ในไอเสียหมุนเวียนในปริมาณที่ค่อนข้างมาก และกราฟเส้นสีแดงยังคงมีผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงคันเร่งที่น่าพอใจ โดยมีแนวโน้มของกราฟลักษณะเดียวกับเส้นสีน้ำเงิน



ภาพที่ 75 บน - ซ้าย; อัตราการไหลของอากาศจาก MAF, บน - ขวา; อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน, ล่าง-ซ้าย; ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR, ล่าง-ขวา; อัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสีย ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2400 rpm และคันเร่งเปลี่ยนแปลง

จากค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบดังภาพที่ 74 นำมาสรุปเป็นค่าความผิดพลาดของ APC – Kalman (เส้นสีแดง) และ APC – MAF (เส้นสีเขียว) เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง APC – Boost (เส้นสีน้ำเงิน) ได้ดังภาพที่ 76 โดยจะเห็นได้ว่าค่า APC – Kalman ให้ผลที่ดีกว่าในทุกช่วงของตำแหน่งคันเร่ง

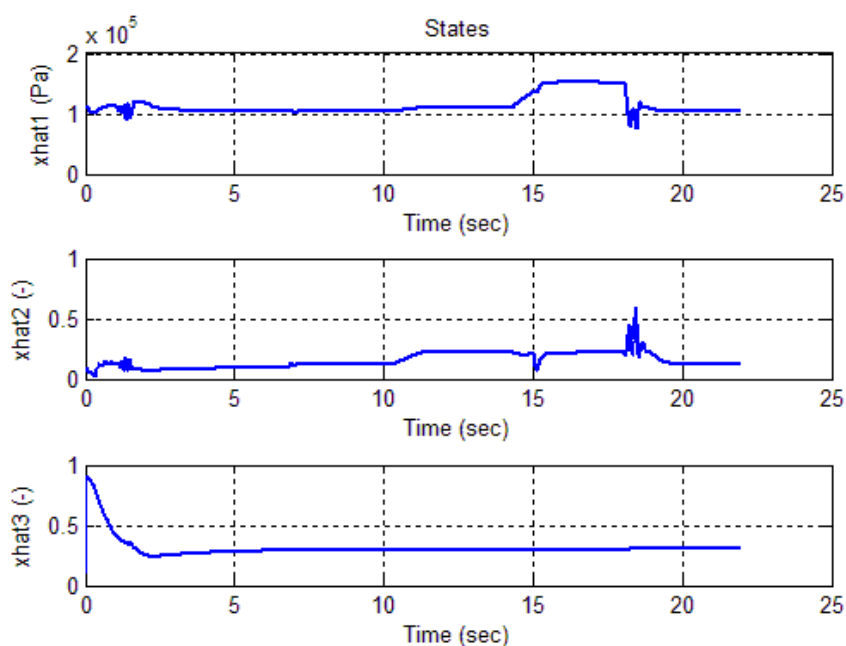


ภาพที่ 76 ค่าความผิดพลาดของการทำนายปริมาณอากาศในกระบอกสูบเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงจาก AVL – Boost ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2400 rpm

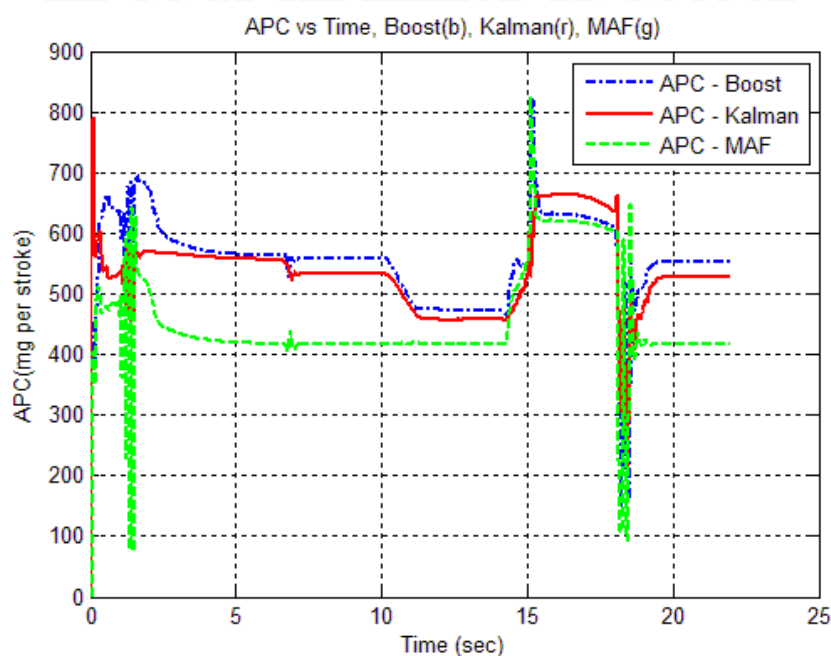
5. ผลการจำลองที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2800 รอบต่อนาที

ทำการจำลองที่ตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง โดยตำแหน่งคันเร่งแสดงได้ดังภาพที่ 40 โดยตัวแปร State ที่ประมาณค่าด้วย EKF แสดงได้ดังภาพที่ 77, ปริมาณอากาศในกระบอกสูบแสดงดังภาพที่ 78 และภาพที่ 79 แสดงอัตราการไหลของอากาศที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ MAF, อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน, ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR และอัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสีย

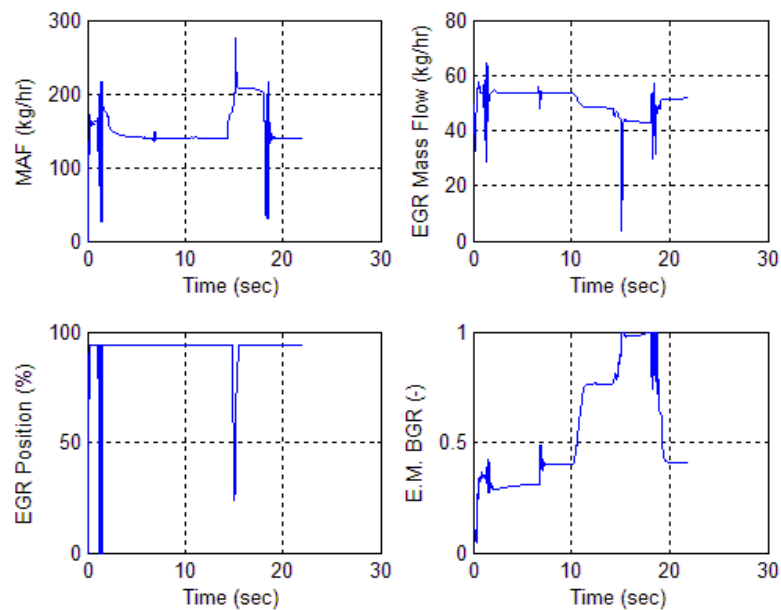
จากภาพที่ 78 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบอ้างอิงจาก AVL – Boost แล้ว ค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่ได้จาก EKF ให้ผลที่ดีกว่าค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่คำนวณได้จากเซ็นเซอร์ MAF ที่ช่วงตำแหน่งคันเร่ง 30% และ 50% อย่างชัดเจน แต่อย่างไรก็ตาม ที่ตำแหน่งคันเร่ง 70% นั้น ค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่คำนวณได้จากเซ็นเซอร์ MAF ให้ผลที่ดีกว่าค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่ได้จาก EKF



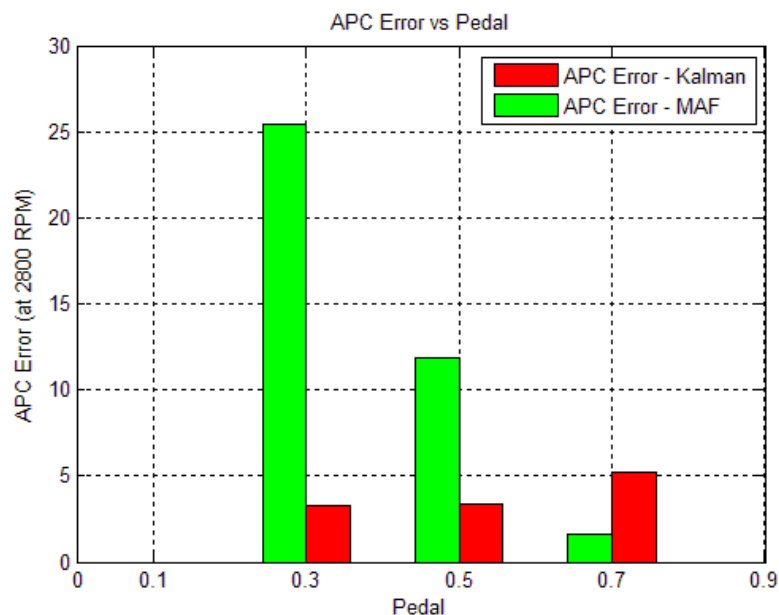
ภาพที่ 77 ตัวแปร State ที่ได้จาก EKF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2800 rpm และตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 78 เปรียบเทียบค่า APC ระหว่าง APC จาก AVL – Boost, APC จาก EKF และ APC จากเซ็นเซอร์ MAF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2800 rpm และคันเร่งตำแหน่งเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 79 บน - ซ้าย; อัตราการไหลของอากาศจาก MAF, บน - ขวา; อัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียน, ล่าง-ซ้าย; ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR, ล่าง-ขวา; อัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสีย ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2800 rpm และคันเร่งเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 80 ค่าความผิดพลาดของการทำนายปริมาณอากาศในกระบอกสูบเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงจาก AVL – Boost ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2800 rpm

ภาพที่ 80 เป็นการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดระหว่างปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่ได้จาก EKF และค่าที่คำนวณได้จากเซ็นเซอร์ MAF โดยเป็นค่าความผิดพลาดเมื่อเปรียบเทียบกับค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบอ้างอิงจาก AVL – Boost

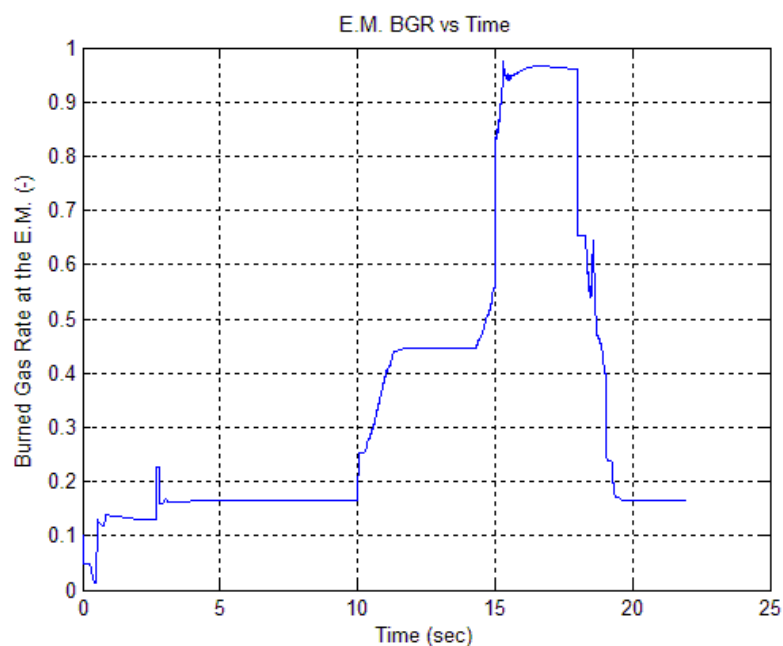
6. การจำลองโดยการปรับปรุงค่าอัตราส่วน Burned gas ในไอเสีย

จากการจำลองในข้อ 1 ถึง 5 แม้ว่าการประมาณค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่ได้จาก EKF จะให้ผลในภาพรวมที่ดีกว่าการประมาณค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบจากการคำนวณด้วยเซ็นเซอร์ MAF แต่ค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่ได้จาก EKF ก็ยังคงเกิดความคลาดเคลื่อนอยู่ โดยเฉพาะที่ตำแหน่งคันเร่ง 30% ซึ่งในส่วนนี้จะทำการปรับปรุงค่าอัตราส่วน Burned gas ในไอเสียให้มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จาก AVL – Boost โดยการคูณอัตราขยายเข้าไปที่ค่าอัตราส่วน Burned gas ในไอเสียเดิม ในแต่ละช่วงของคันเร่ง ทำการจำลองและวิเคราะห์ผลที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 และ 2800 รอบต่อนาที

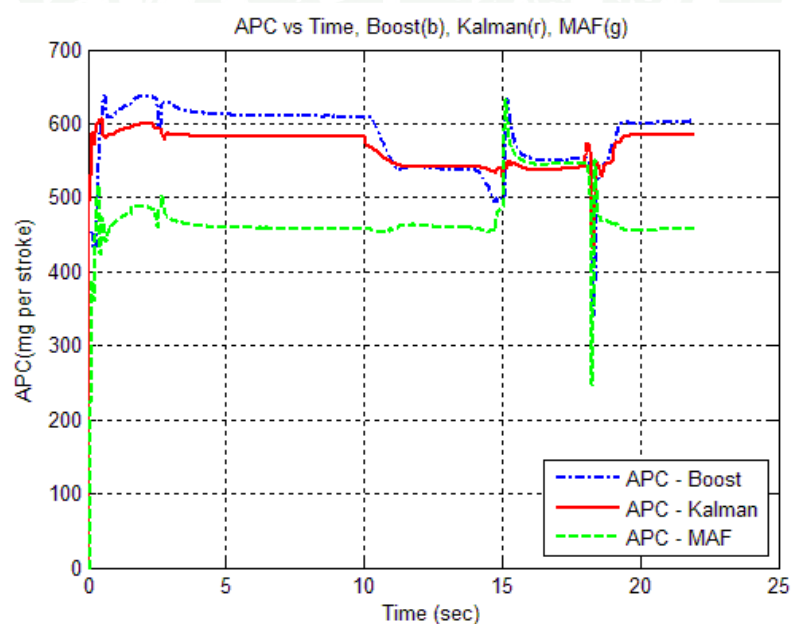
6.1 การจำลองโดยการปรับปรุงค่า F_{exh} ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 รอบต่อนาที

ทำการจำลองโดยมีตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง แสดงดังภาพที่ 40 โดยมีการปรับแต่งค่าอัตราส่วน Burned gas ในไอเสียให้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จาก AVL – Boost แสดงดังภาพที่ 81 ซึ่งทำการปรับปรุงค่าอัตราส่วน Burned gas ในไอเสียด้วยการคูณอัตราขยาย 0.49, 0.75 และ 1.1 เข้าไปที่ค่าอัตราส่วน Burned gas ในไอเสียเดิม ที่ช่วงตำแหน่งคันเร่ง 30%, 50% และ 70% ตามลำดับ

ค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบแสดงได้ดังภาพที่ 82 โดยในส่วนของค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่ได้จาก EKF เป็นค่าที่ได้จากการนำค่าอัตราส่วน Burned gas ในไอเสียที่ได้รับการปรับปรุงค่าแล้วไปใช้ในสมการ State ที่ได้ออกแบบไว้ โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบผลกับภาพที่ 70 ซึ่งคือผลการจำลองที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 รอบต่อนาทีและตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง ที่ยังใช้ค่าอัตราส่วน Burned gas ในไอเสียค่าเดิมอยู่ จะพบว่าค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่ได้จาก EKF ในภาพที่ 81 ให้ผลโดยรวมที่ดีกว่าค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่ได้จาก EKF ในภาพที่ 70

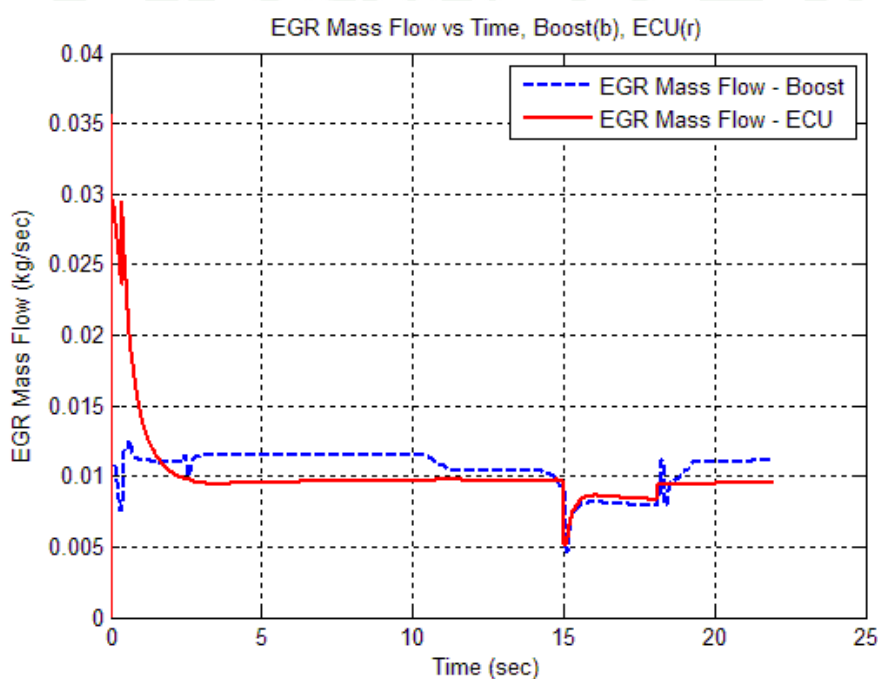


ภาพที่ 81 อัตราส่วน Burned gas ในไอเสียที่ทำการปรับแต่งค่าแล้ว ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm และตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 82 เปรียบเทียบค่า APC ระหว่าง APC จาก AVL – Boost, APC จาก EKF (เมื่อทำการปรับปรุงค่า F_{exh} ดังภาพที่ 81) และค่า APC จากเซ็นเซอร์ MAF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm และตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง

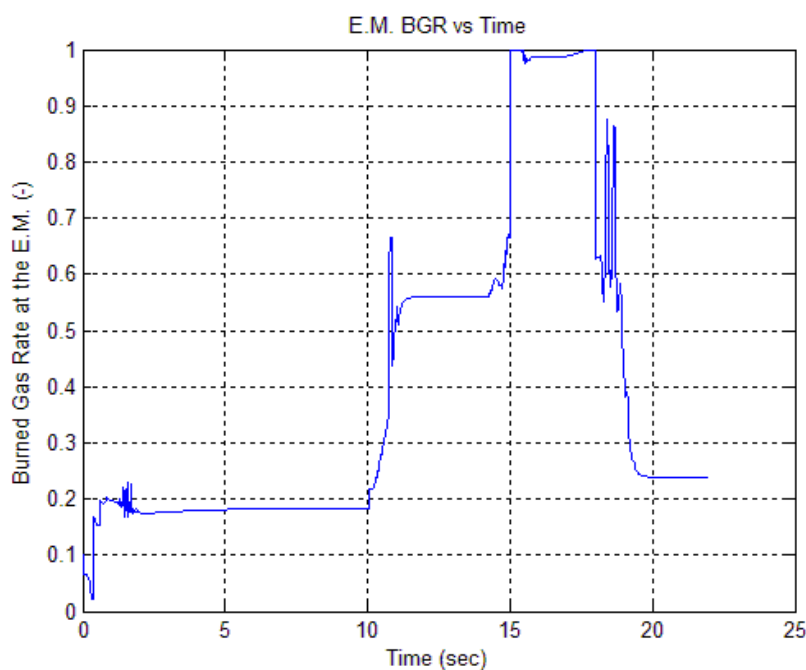
แต่อย่างไรก็ตามค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่ได้จาก EKF เมื่อทำการปรับปรุค่า F_{exh} แล้ว ก็ยังคงมีความคลาดเคลื่อนให้เห็นอยู่ โดยเฉพาะที่ตำแหน่งคันเร่ง 30% สาเหตุของความคลาดเคลื่อนนั้นเกิดจากค่าอัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียนที่คำนวณได้จากตัวแปร State ตัวที่ 3 ดัง (24) มีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าอัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียนที่ได้จาก AVL – Boost โดยจากภาพที่ 83 จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่งคันเร่ง 30% ค่าอัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียนที่ได้จาก ECU (เส้นสีแดง) ให้ค่าที่น้อยกว่าค่าอัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียนที่ได้จาก AVL – Boost (เส้นสีน้ำเงิน) อีกทั้งค่าอัตราส่วน Burned gas ในไอเสียที่ทำการปรับปรุค่าแล้วดังภาพที่ 81 มีค่าไม่สูง จากทั้งสองเหตุผลนี้จึงทำให้ค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่ได้จาก EKF มีค่าที่น้อยกว่าค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบอ้างอิงจาก AVL – Boost เล็กน้อย



ภาพที่ 83 เปรียบเทียบอัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียนระหว่าง AVL – Boost และค่าที่คำนวณจากตัวแปร State ตัวที่ 3 (เมื่อทำการปรับปรุค่า F_{exh} ดังภาพที่ 81) ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2000 rpm, ตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง

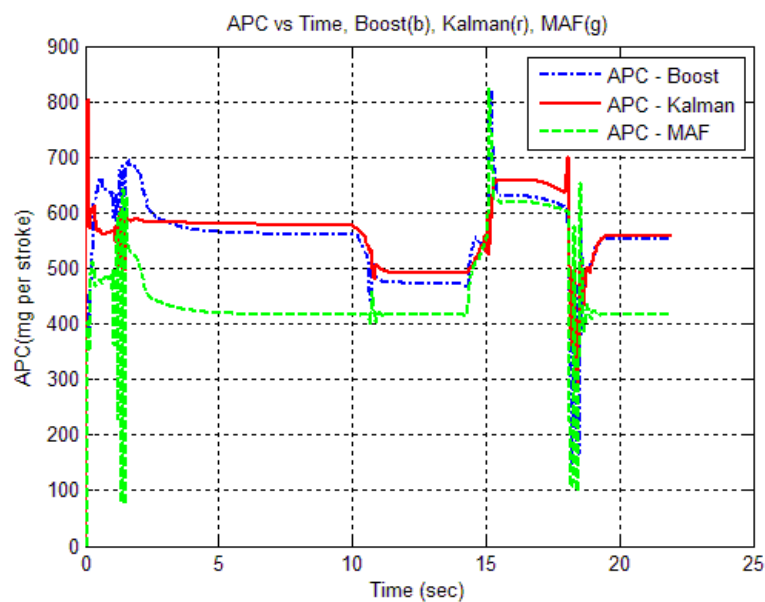
6.2 การจำลองโดยการปรับปรุงค่า F_{exh} ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2800 รอบต่อนาที

ทำการจำลองที่ตำแหน่งคันเร่งดังภาพที่ 40 โดยในการจำลองนี้ได้ใช้ค่าอัตราส่วน Burned gas ในไอเสียที่ได้ทำการปรับปรุงค่าใหม่เพื่อให้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จาก AVL - Boost ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 84

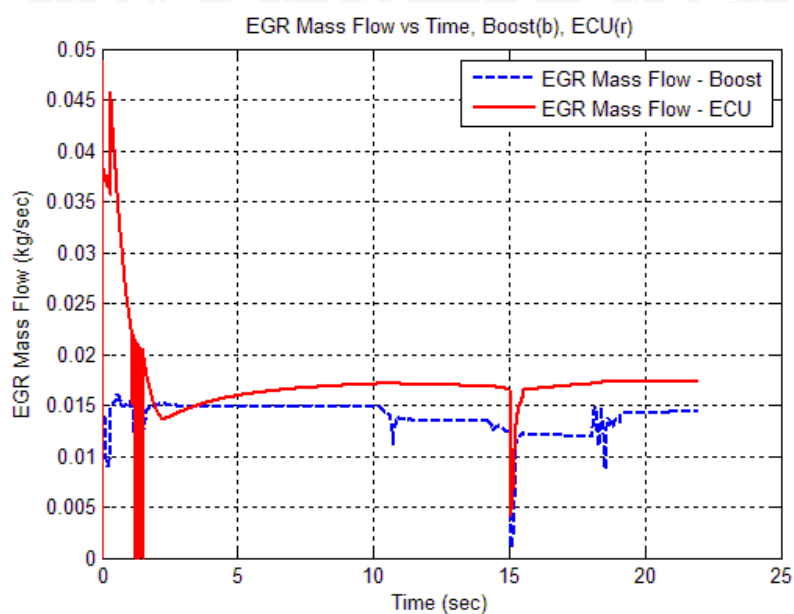


ภาพที่ 84 อัตราส่วน Burned gas ในไอเสียที่ทำการปรับแต่งค่าแล้ว ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2800 rpm และตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง

ผลของค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบเมื่อทำการปรับปรุงค่า F_{exh} แล้วแสดงได้ดังภาพที่ 85 ซึ่งค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่ได้จาก EKF ในภาพที่ 85 มีความคลาดเคลื่อนใกล้เคียงกับค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่ได้จาก EKF ในภาพที่ 78 แต่ APC - Kalman (เส้นสีแดง) ในภาพที่ 85 มีความคลาดเคลื่อนไปในทิศทางที่มีปริมาณอากาศในกระบอกสูบมากกว่าค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบอ้างอิงจาก AVL - Boost ซึ่งสาเหตุความคลาดเคลื่อนของ APC - Kalman ในภาพที่ 85 เนื่องมาจากอัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียนที่คำนวณได้จาก (24) มีค่ามากกว่าอัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียนที่ได้จาก AVL - Boost ในทุกช่วง และมากที่สุดในช่วงตำแหน่งคันเร่ง 70%



ภาพที่ 85 เปรียบเทียบค่า APC ระหว่าง APC จาก AVL – Boost, APC จาก EKF (เมื่อทำการปรับปรุ่ค่า F_{exh} ดังภาพที่ 84) และค่า APC จากเซ็นเซอร์ MAF ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2800 rpm และตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 86 เปรียบเทียบอัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียนระหว่าง AVL – Boost และค่าที่คำนวณจากตัวแปร State ตัวที่ 3 (เมื่อทำการปรับปรุ่ค่า F_{exh} ดังภาพที่ 84) ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 2800 rpm, ตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง

เมื่ออัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียนที่ได้จาก ECU มีค่ามากกว่าอัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียนที่ได้จาก AVL – Boost จึงทำให้ค่าออกซิเจนที่ปะปนมากับไอเสียหมุนเวียนที่ได้จาก ECU มีค่ามากขึ้นด้วย จึงส่งผลให้การประมาณค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบด้วย EKF มีค่าที่มากกว่าค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบอ้างอิงจาก AVL – Boost แต่อยู่ในปริมาณที่ไม่มาก



สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ทำการศึกษาและออกแบบการประมาณค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมโดยใช้เทคนิคตัวกรองคาลมาน โดยทำการจำลองการทำงานที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1200, 1600, 2000, 2400 และ 2800 รอบต่อนาที เมื่อทำการจำลองแบบตำแหน่งคันเร่งคงที่ และตำแหน่งคันเร่งเปลี่ยนแปลง สามารถสรุปผลจากการศึกษาได้ดังนี้

1. สามารถนำตัวกรองคาลมานแบบขยายในรูปของ Discrete-time มาใช้ประมาณค่าสำหรับระบบที่เป็น Continuous-time ได้ แต่ต้องทำการ Discretized สมการระบบก่อน โดยสามารถใช้วิธี Forward Euler's Method ในการ Discretized ได้

2. การประมาณค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมโดยใช้เทคนิคตัวกรองคาลมานในช่วงตำแหน่งคันเร่ง 30% และ 50% ให้ผลที่ดีกว่าการคำนวณค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบจากเซ็นเซอร์ MAF อย่างชัดเจนในทุกความเร็วรอบเครื่องยนต์ที่ทำการจำลอง โดยสาเหตุที่การคำนวณค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบจากเซ็นเซอร์ MAF ในช่วงตำแหน่งคันเร่งต่ำนั้นมีความคลาดเคลื่อนที่ค่อนข้างสูง เนื่องมาจากว่าในช่วงตำแหน่งคันเร่งที่ 30% และ 50% นั้น ได้มีการนำไอเสียหมุนเวียนมาใช้ในปริมาณที่ค่อนข้างมาก อีกทั้งอัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสียยังมีค่าไม่สูงอีกด้วย แสดงได้ว่าในช่วงการทำงานที่ตำแหน่งคันเร่งต่ำนั้น ยังคงมีปริมาณออกซิเจนที่ปะปนอยู่ในไอเสียหมุนเวียนค่อนข้างมาก และเนื่องจากการคำนวณค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบจากเซ็นเซอร์ MAF ไม่ได้คำนึงถึงปริมาณออกซิเจนที่เหลือและปะปนอยู่ในไอเสียหมุนเวียน จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูง

3. การประมาณค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมโดยใช้เทคนิคตัวกรองคาลมานในช่วงตำแหน่งคันเร่ง 70% ให้ค่าความผิดพลาดที่ใกล้เคียงกับค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่คำนวณจากเซ็นเซอร์ MAF เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบอ้างอิงจาก AVL – Boost ซึ่งทั้งสองข้อมูลมีค่าความผิดพลาดที่ค่อนข้างน้อย โดยในช่วงตำแหน่งคันที่ 70% มีการนำไอเสียหมุนเวียนมาใช้ในปริมาณที่ไม่สูง และอัตราส่วน Burned gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสียที่คำนวณได้ยังมีค่าที่สูงอีกด้วย ซึ่งจากทั้งสองเหตุผลนี้ หมายความว่า

ออกซิเจนเหลือปะปนอยู่ในไอเสียในปริมาณที่น้อย จึงทำให้ความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบจากเซ็นเซอร์ MAF มีค่าน้อย

4. ค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบโดยใช้เทคนิคตัวกรองคาลมานเกิดเนื่องจากค่าอัตราส่วน Burned gas ในไอเสีย แต่เมื่อทำการปรับปรุงค่าอัตราส่วน Burned gas ในไอเสียให้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จาก AVL – Boost แล้ว ผลปรากฏว่าค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่ได้จากตัวกรองคาลมานให้ผลที่ดีขึ้น แต่ก็ยังคงมีความคลาดเคลื่อนจากค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบอ้างอิงจาก AVL – Boost โดยสาเหตุคืออัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียนที่คำนวณได้จาก (24) มีค่าคลาดเคลื่อนไปจากอัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียนที่อ้างอิงจาก AVL – Boost ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของออกซิเจนที่เหลือปะปนอยู่ในไอเสียหมุนเวียน จึงส่งผลไปถึงประมาณค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบด้วย

5. ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงคันเร่งของค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบที่ได้จากตัวกรองคาลมานอยู่ในเกณฑ์ที่ดี เนื่องจากมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงข้อมูลเป็นไปในทิศทางเดียวกับค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบอ้างอิงจาก AVL – Boost

ข้อเสนอแนะ

1. ปรับปรุงวิธีการคำนวณค่าอัตราส่วน Burned gas ในไอเสียให้ดีขึ้น โดยอาจมีการนำเซ็นเซอร์ตรวจวัดก๊าซออกซิเจนมาใช้ตรวจวัดที่ไอเสีย เพื่อช่วยการคำนวณ

2. ปรับปรุงวิธีทราบค่าอัตราการไหลของไอเสียหมุนเวียนให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เพื่อนำไปใช้ในสมการ State ได้เลย โดยจะสามารถตัดตัวแปร State ตัวที่ 3 ออกไปได้

3. เนื่องจากเซ็นเซอร์พื้นฐานที่มาพร้อมกับเครื่องยนต์รุ่นที่นำมาจำลองนั้นไม่มีเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิที่ท่อร่วมไอดี และในเบื้องต้นได้มีการทำเซ็นเซอร์เสมือนเพื่อทราบข้อมูลอุณหภูมิที่ท่อร่วมไอดี โดยมีการทำอัลกอริทึมในส่วนนี้ไว้ก่อนที่จะมีการออกแบบตัวประมาณค่า ซึ่งเป็นตัวแปรที่จำเป็นตัวแปรหนึ่งที่ใช้สำหรับการประมาณค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมด้วย โดยข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์เสมือนนี้ยังมีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่อ่านได้

จากโปรแกรมอ้างอิง AVL – Boost เพื่อประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ควรทำการปรับปรุงการได้ข้อมูล อุณหภูมิที่พร้อมไอดีให้มีความแม่นยำและถูกต้องมากขึ้น

4. ในอนาคตควรมีการนำการประมาณค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมไปใช้ทดสอบกับรถจริง โดยสิ่งที่ต้องเปลี่ยนแปลงคือ การหาค่าประสิทธิภาพเชิง ปริมาตรของรถคันนั้น และทำการหาค่า Process Noise Covariance และ Measurement Noise Covariance ของระบบขึ้นใหม่

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กฤษฎา แสงเพชรส่อง, นาวาตรี. 2547. **แนะนำ Kalman Filter Algorithm**. โรงเรียนนายเรือ, สมุทรปราการ. (อัดสำเนา)

พฤทธิ นาครัตน์. 2550. การออกแบบการควบคุมแรงสำหรับกระบอกสูบไฮดรอลิกด้วยวิธีการลาพูนอฟเบซคอนโทรลแบบเบคสเตปปีง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

วโรดม ตู้จินดา. 2550. การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

อิทธิเดช มุลมั่งมี, บัณฑิต จิรนนทศักดิ์ และ วิฑิต จัตรรัตนกุลชัย. 2554. การคำนวณปริมาณอากาศในกระบอกสูบโดยตัวสังเกตแบบแผนเลื่อนสำหรับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดแบบ DF-PCCI, น. (ม.ป.ป.). ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25. จังหวัดกระบี่.

Barbarisi, O., A.D. Gaeta, L. Glielmo and S. Santini. n.d. **An Extended Kalman Observer for the In-Cylinder Air Mass Flow Estimation**. n.p.

Chatlatanagulchai, W., K. Yaovaja, S. Rhienprayoon and K. Wannatong. 2010. Air-Fuel Ratio Regulation with Optimum Throttle Opening in Diesel-Dual-Fuel Engine. In **2010 SAE World Congress**. 13-15 April 2010, Detroit, Michigan, USA.

Chauvin, J., N. Petit and P. Rouchon. 2006. Air Path Estimation on Diesel HCCI Engine. In **2006 SAE World Congress**. 3-6 April 2006, Detroit, Michigan, USA.

Chauvin, J., P. Moulin, G. Corde, N. Petit and P. Rouchon. 2006. Kalman Filtering for Real-Time Individual Cylinder Air Fuel Observer on a Diesel Engine Test Bench. In **2006 American Control Conference**. 14-16 June 2006, Minneapolis, Minnesota, USA.

Guzzella, L. and C.H. Onder. 2010. **Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, n.p.

Heywood, J. B. 1988. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. McGraw – Hill, Singapore.

Moulin, P., G. Corde, M. Castagne and G. Rousseau. 2004. Cylinder Individual AFR Estimation based on a Physical Model and using Kalman Filters. *In 2004 SAE World Congress*. 8-11 March 2004, Detroit, Michigan, USA.

Simon, D. 2001. Kalman Filtering. **Embedded Systems Programming**: 72-79.

Simon, D. 2006. **Optimal State Estimation**. John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey

Takahashi, S., T. Sekozawa. 1995. **Air-Fuel Ratio Control in Gasoline Engines Based on State Estimation and Prediction Using Dynamic Models**. Systems Development Laboratory, Hitachi Ltd. Ohzenji, Asao-ku, Kawazaki, 215 Japan.





ตารางผนวกที่ ก1 ข้อมูลเครื่องยนต์

Engine	2KD-FTV (2008)
Cylinder	4 Cylinders แถวเรียง
Displaced Volume	2494 cc
Intake Manifold Volume	0.001583 m ³
Bore	92 mm
Stroke	93.8 mm

ตารางผนวกที่ ก2 ค่าประสิทธิภาพเชิงปริมาตร

Engine Speed (rpm)						
I.M. Pressure (x 10 ⁵ Pascal)	1200	1600	2000	2400	2800	3200
1	0.9793	0.9576	0.9485	0.9522	0.9685	0.9975
1.05	0.9576	0.9267	0.9085	0.9029	0.9101	0.9299
1.1	0.9466	0.9065	0.8791	0.8644	0.8624	0.873
1.15	0.9464	0.8971	0.8606	0.8366	0.8254	0.8269
1.2	0.9569	0.8985	0.8527	0.8196	0.7992	0.7915
1.25	0.9782	0.9106	0.8556	0.8133	0.7838	0.7669
1.3	1.01	0.9334	0.8693	0.8178	0.779	0.753
1.35	1.053	0.967	0.8936	0.833	0.7851	0.7498
1.4	1.106	1.011	0.9288	0.859	0.8018	0.7574
1.45	1.171	1.066	0.9746	0.8956	0.8293	0.7757
1.5	1.246	1.132	1.031	0.9431	0.8676	0.8047



1. การประมาณค่าตัวแปรสถานะและคำนวณอัตราการไหลของอากาศที่เข้าสู่กระบอกสูบ

```
function [P,K,Fexh,Mb_a,Mb_eg,ASPCONS,y,xhat,x] = fcn(P0, Alpha, Beta, MAF, GASCONS,
EGR_Pcnt, VE, MAP, V_d, T_m, Ne, Rg, Replacement, FB_VAL, TimeSinceRun, dt, Fexh0,
xhat0, x0)

% Initial Values
Fexh = 0.1; % Burned gas ratio at exhaust manifold (-)
Mb_a = 0.01; % Air Flow to cylinder (kg/s)
Mb_eg = 0.01;%Burned Gas Flow to cylinder (kg/s)
ASPCONS = MAF/3600; % Total (kg/s)

% Convert Unit
MAF = MAF/3600; % Convert unit from kg/hr to kg/sec
T_m = T_m + 273; % Convert unit from celcius to kelvin

% Norminal value for simulation
x = [0; 0; 0];
xhat = [0; 0; 0];
P = [0 0 0; 0 0 0; 0 0 0];
K = [0; 0; 0];
xhat1 = 0;
xhat2 = 0;
xhat3 = 0;

% Linearization
L = [1 0 0; 0 1 0; 0 0 1]; % Partial x(k) by w
H = [1 0 0]; % Partial h(k) by x
M = 1; % Partial h(k) by v
I = [1 0 0; 0 1 0; 0 0 1]; % Identity matrix
e1 = [1 0 0];
e2 = [0 1 0];
e3 = [0 0 1];
```

```

ControlNoise = 0.5/1650; % Error of EGR Valve

R = 0; % measurement variance (Pa^2)

u = EGR_Pcnt/1650;

if TimeSinceRun < 0.01
    x = [MAP; 0.13; 0.19]; % x(+)(k-1) initial conditions
    xhat = [MAP; 0.1; 0.1]; % xhat(+)(k-1) initial conditions
    P = [0 0 0; 0 0.0009 0; 0 0 0.0016]; % P(+)(k-1) initial conditions
elseif TimeSinceRun >= 0.01
    xhat1 = e1*xhat0;
    xhat2_ori = (e2*xhat0);
    xhat3_ori = e3*xhat0;
    if xhat2_ori > 1
        xhat2 = 1;
    elseif xhat2_ori <= 1
        xhat2 = xhat2_ori;
    end
    if xhat2_ori < 0
        xhat2 = 0;
    end
    if xhat3_ori < 0
        xhat3 = 0;
    elseif xhat3_ori >= 0
        xhat3 = xhat3_ori;
    end
    if Fexh0 > 1
        Fexh = 1;
    elseif Fexh0 <= 1
        Fexh = Fexh0;
    end
end

```

```

if Fexh0<0
Fexh = 0;
end

% Linearization the transition matrix
F11 = 1 - (dt*Alpha*VE*Beta);
F12 = 0;
F13 = dt*Alpha*u;
F21 = -(dt*Alpha/(xhat1)^2)*((Fexh*(xhat3)*u) - (MAF*(xhat2)) - ((xhat3)*u*(xhat2)) -
(GASCONS*(xhat2)));
F22 = (dt*Alpha/(xhat1))*(-MAF - ((xhat3)*u) - GASCONS) + 1;
F23 = (dt*Alpha/(xhat1))*((Fexh*u) - (u*(xhat2)));
F31 = 0;
F32 = 0;
F33 = 1;
F = [F11 F12 F13; F21 F22 F23; F31 F32 F33];

Bh = [dt*Alpha*(xhat3); (dt*Alpha/(xhat1))*(Fexh*(xhat3)-(xhat2)*(xhat3)); 0];
Q = (ControlNoise^2)*[(e1*Bh)^2 0 0; 0 (e2*Bh)^2 0; 0 0 (e3*Bh)^2]; % Process noise
covariance

% P(-)(k)
Pm = F*P0*F' + L*Q*L';

% xhat(-)(k)
xhat1m = (dt*Alpha)*(MAF + ((xhat3)*u) + GASCONS) + (1 -
(dt*Alpha*VE*Beta))*(xhat1);
xhat2m = (dt*Alpha/(xhat1))*((Fexh*(xhat3)*u) - (MAF*(xhat2)) - (xhat3)*u*(xhat2) -
(GASCONS*(xhat2))) + (xhat2);
xhat3m = (xhat3);
xhatm = [xhat1m; xhat2m; xhat3m];

```

% Kalman gain

$$K = P_m * H' * (H * P_m * H' + M * R * M')^{-1};$$

% xhat(+)(k)

$$\hat{x} = \hat{x}_{atm} + K * (MAP - H * \hat{x}_{atm});$$

% P(+)(k)

$$P = (I - K * H) * P_m;$$

%Cal Air

$$\hat{x}_{at1p} = e_1 * \hat{x};$$

$$\hat{x}_{at2p} = e_2 * \hat{x};$$

$$\hat{x}_{at3p} = e_3 * \hat{x};$$

$$ASPCONS = (VE * (\hat{x}_{at1p}) * V_d * (Ne/60)) / (R_g * T_m * 2); \quad \% \text{ (kg_sec)}$$

$$Mb_{eg} = (ASPCONS - GASCONS) * (\hat{x}_{at2p}); \quad \% \text{ flow of the burned gas into the cylinder (kg_sec)}$$

$$Mb_a = (ASPCONS - GASCONS) * (1 - \hat{x}_{at2p}); \quad \% \text{ flow of fresh air into the cylinder (kg_sec)}$$

end

โดยตัวแปรต่างต่างมีความหมายดังตารางผนวกที่ ข1 ดังนี้

ตารางผนวกที่ ข1 ชื่อและหน่วยของอินพุตและเอาต์พุตที่ใช้ในการเขียน โปรแกรม

Name	Description	Unit
P0	Estimation Error Covariance ที่ช่วงเวลาก่อนหน้า	-
Alpha	α_{int} จากหน้า 40	J/kg.m ³
Beta	β_{int} จากหน้า 40	kg.m ³ .rpm/J
V_m	ปริมาตรห้องรวมไอดี	m ³
MAF	อัตราการไหลของอากาศที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ MAF	kg/hr

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

Name	Description	Unit
GASCONS	อัตราการฉีดก๊าซธรรมชาติ	kg/sec
EGR_Pcnt	ตำแหน่งการเปิดวาล์ว EGR	%
VE	ค่าประสิทธิภาพเชิงปริมาตร	-
MAP	ความดันที่ท่อร่วมไอดี	Pa
V_d	ปริมาตรกระบอกสูบ (Displaced Volume)	m ³
T_m	อุณหภูมิที่ท่อร่วมไอดี	Celcius
Ne	ความเร็วรอบเครื่องยนต์	Rpm
Rg	ค่าคงที่ของก๊าซ	287 J/kgK
Replacement	อัตราส่วนเชื้อเพลิง (Replacement Ration)	-
FB_VAL	อัตราการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล	kg/sec
TimeSinceRun	เวลาที่นับตั้งแต่เริ่มทำการจำลอง	Sec
dt	เวลาในการสุ่ม (Sampling time)	Sec
Fexh0	อัตราส่วน Burned gas ในไอเสียในช่วงเวลาก่อนหน้า	-
xhat0	ตัวแปรสถานะที่ประมาณค่าได้ที่ช่วงเวลาก่อนหน้า	[Pa; - ; -]
P	Estimation Error Covariance ที่ช่วงเวลาปัจจุบัน	-
K	Kalman Gain	-
Fexh	อัตราส่วน Burned gas ในไอเสีย	-
Mb_a	อัตราการไหลของอากาศที่เข้ากระบอกสูบ	kg/sec
Mb_eg	อัตราการไหลของ Burned gas ที่เข้ากระบอกสูบ	kg/sec
ASPCONS	อัตราการไหลของก๊าซทั้งหมดที่เข้ากระบอกสูบ	kg/sec
xhat	ตัวแปรสถานะที่ประมาณค่าได้ที่ช่วงเวลาปัจจุบัน	[Pa; - ; -]

การเขียนโปรแกรมที่แสดงข้างต้นเป็นการเขียนด้วย Toolbox ของ MATLAB-Simulink ที่ชื่อว่า “Embedded MATLAB Function” เมื่อได้ค่า Mb_a แล้วก็นำมาคำนวณหาค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบในหน่วยของมิลลิกรัมต่อสโตรก โดยแสดงวิธีการคำนวณไว้ดัง (56) ซึ่งโปรแกรมในส่วนของการคำนวณค่าปริมาณอากาศในกระบอกสูบในหน่วยมิลลิกรัมต่อสโตรกนั้นเขียนด้วย Component ของ MATLAB-Simulink โดยตรง แต่ไม่ได้นำมาแสดงไว้ ณ ที่นี้

2. การคำนวณอัตราส่วน Burned Gas ต่อก๊าซทั้งหมดในไอเสีย

```
function Fexh_ori = fcn(Mb_a,Mb_eg,FB_VAL,GASCONS,Replacement,TimeSinceRun,Ne)

Fexh_ori = 0.1;

Fexh = (Mb_eg + (15.6 + 1.7*Replacement)*(FB_VAL + GASCONS))/(Mb_eg + Mb_a +
FB_VAL + GASCONS);

if TimeSinceRun < ((3/Ne)*60*(22/7))
Fexh_ori = 0.1;
elseif TimeSinceRun >= ((3/Ne)*(22/7))
Fexh_ori = Fexh;
end
```

ในส่วนนี้ก็ยังคงเขียนด้วยฟังก์ชัน “Embedded MATLAB Function” เช่นกัน โดยตัวแปรต่างๆ แสดงได้ดังตารางผนวกที่ ข1 ข้างต้น

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายบัณฑิต จิรนนทศักดิ์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	15 กรกฎาคม 2530
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพฯ
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

