

การควบคุมอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์เทอร์โบแบบจุด
ระเบิดด้วยประกายไฟที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงด้วยวิธีโครงข่ายประสาท
เทียมฟัซซีเวฟเลต

A/F RATIO CONTROL FOR TURBOCHARGED SI CNG ENGINES USING
FUZZY WAVELET NEURAL NETWORKS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

KMITL-2010-EN-M-230-127

การควบคุมอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์เทอร์โบแบบจุด
ระเบิดด้วยประกายไฟที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงด้วยวิธีโครงข่ายประสาท
เทียมฟัซซีเวฟเลต

A/F RATIO CONTROL FOR TURBOCHARGED SI CNG ENGINES USING
FUZZY WAVELET NEURAL NETWORKS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

KMITL-2010-EN-M-230-127

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A/F RATIO CONTROL FOR TURBOCHARGED SI CNG ENGINES USING
FUZZY WAVELET NEURAL NETWORKS**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INFORMATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2010

KMITL-2010-EN-M-230-127

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2010

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นใบใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การควบคุมอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์เทอร์โบแบบจุดระเบิดด้วยประกายไฟที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมพีซซีเวฟเลต

Thesis Title A/F Ratio Control for Turbocharged SI CNG Engines Using Fuzzy Wavelet Neural Networks

นักศึกษา นายเฉลิมพงษ์ กล้าขยัน


รหัสประจำตัว 51061003

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสารสนเทศ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ปิติเขต สุรักษา

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2010-EN-M-230-127

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.จินดา	เจริญพรพาณิชย์	
รศ.ดร.ครรชิต	ไมตรี	
รศ.ดร.เอื้อน	ปิ่นเงิน	
รศ.ประสิทธิ์	จตุเสวีวงศ์	
รศ.ดร.ปิติเขต	สุรักษา	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 6 สิงหาคม พ.ศ. 2553 เวลา 09.00-11.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เตชะหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 6 สิงหาคม พ.ศ. 2553 ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สำนักทะเบียนและประมวลผล สจล.
วันที่ส่งเอกสารฉบับพร้อมฉบับสมบูรณ์
วันที่ 27 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 53
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา

มหาวิทยาลัยฯ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์เทอร์โบแบบจุดระเบิดด้วยประกายไฟที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมฟัซซีเวฟเลต
นักศึกษา	นายเฉลิมพงษ์ กล้าขันธ์
รหัสนักศึกษา	51061003
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
พ.ศ.	2553
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ปิติเขต สุรักษา

บทคัดย่อ

ก๊าซธรรมชาติ (Compressed Natural Gas, CNG) เป็นพลังงานทางเลือกที่สำคัญที่มีตลาดเติบโตอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะในส่วนของกรมคมนาคมขนส่งในประเทศไทย ในปี ค.ศ. 2006 มีรถยนต์ประมาณ 23,273 คันได้เปลี่ยนไปใช้ CNG เป็นเชื้อเพลิงและมีแนวโน้มมากขึ้นเรื่อยๆ ในอนาคต ในรถบางชนิด เช่น รถบรรทุก ต้องดัดแปลงเครื่องยนต์ทำให้จำเป็นต้องตัดเทอร์โบชาร์จทิ้งไป เป็นผลทำให้กำลังของเครื่องยนต์ลดลง การควบคุมอัตราส่วนอากาศและเชื้อเพลิงก็เป็นหนทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอการควบคุมอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิง (A/F ratio) ของเครื่องยนต์เทอร์โบแบบจุดระเบิดด้วยประกายไฟที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง โดยได้ศึกษาบนพื้นฐานของแบบจำลองเครื่องยนต์ชนิด MVEM (Mean Value Engine Models) ซึ่งเป็นที่นิยมมาก เพราะมีคุณลักษณะเป็นพลวัตตามเวลาจริง การควบคุมอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงนั้นได้ใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียมฟัซซีเวฟเลต (Fuzzy Wavelet Neural Networks, FWNN) และใช้วิธีวิธีการเรียนรู้แบบเกรเดียนต์ (gradient method) ในการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสม โดยมีวัตถุประสงค์ให้อัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงนั้นเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์หรือใกล้เคียงที่สุดเพื่อความประหยัดและให้ได้กำลังสูงสุด

Thesis Title	A/F RATIO CONTROL FOR TURBOCHARGED SI CNG ENGINES USING FUZZY WAVELET NEURAL NETWORKS
Student	Mr. Chalermpong Klakayan
Student ID.	51061003
Degree	Master of Engineering
Program	Information Engineering
Year	2010
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Pitikhate Sooraksa

ABSTRACT

Compressed Natural Gas (CNG) is an important part of alternative energy by which the market is rapidly growing, particularly in transportation sectors of Thailand. In 2006, around 23,273 vehicles in Thailand switched to use CNG and had been continually increased. Since the engines of the trucks have to retrofit, they must cut off the turbocharger platform. As a result, the engine power is decreased. This technical problem is the motivation of our research by controlling the air/fuel (A/F) ratio.

This thesis presents A/F ratio control of turbocharged SI engines using CNG fuel based on Mean Value Engine Models (MVEMs). The method is promising because most of dynamic characters and real-time quality can be achieved. Unlike the original methodology, our control design uses Fuzzy Wavelet Neural Networks. The optimal parameters of the system are found by using gradient method. The objective is that A/F ratio is equal or closed to stoichiometric combustion. The simulation results demonstrate the effectiveness of the developed method.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดีด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก รศ.ดร. ปิติเขต สุริรักษา ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ของท่านอาจารย์และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณพี่ๆทุกๆท่าน ในห้อง Industrial Informatics Lab ในภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำต่างๆอันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์และคอยให้ความช่วยเหลือ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

เฉลิมพงษ์ กล้าขยัน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	1
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
บทที่ 2 แบบจำลองเครื่องยนต์เทอร์โบ.....	3
2.1 โครงสร้างของแบบจำลอง.....	3
2.1.1 สัญลักษณ์แทน.....	4
2.1.2 ส่วนประกอบแบ่งตามการทำงาน.....	6
2.1.3 ข้อกำหนดของแบบจำลอง.....	7
2.2 ระบบการไหลแบบไม่อัดตัว.....	7
2.2.1 หม้อกรองอากาศ.....	8
2.2.2 เครื่องหล่อเย็น.....	9
2.2.2.1 อัตราการไหลของมวลก๊าซ.....	9
2.2.2.2 อุณหภูมิของก๊าซหลังออกจากเครื่องหล่อเย็น.....	9
2.2.3 ระบบไอเสีย.....	11
2.2.3.1 อัตราการไหลของมวลก๊าซ.....	11
2.2.3.2 อุณหภูมิที่เข้าสู่ระบบไอเสีย.....	11
2.3 ระบบการไหลแบบอัดตัว.....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.1 ลิ่นเร่ง.....	13
2.3.2 เวสต์เกต.....	14
2.4 เครื่องยนต์.....	14
2.4.1 อัตราการไหลของมวลอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้.....	15
2.4.2 อัตราการไหลของมวลก๊าซที่ออกจากห้องเผาไหม้.....	16
2.4.2.1 การหน่วงเวลาในหัวฉีดเชื้อเพลิง.....	17
2.4.3 อุณหภูมิขาเข้าที่ร่วมไอเสีย.....	18
2.4.4 แรงบิดของเครื่องยนต์.....	19
2.5 เทอร์โบชาร์จ.....	20
2.5.1 คอมเพรสเซอร์.....	20
2.5.1.1 อัตราการไหลของมวลอากาศ.....	21
2.5.1.2 ประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์.....	22
2.5.1.3 อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากคอมเพรสเซอร์.....	23
2.5.1.4 แรงบิดของคอมเพรสเซอร์.....	24
2.5.2 กังหัน.....	24
2.5.2.1 อัตราการไหลของมวลไอเสีย.....	24
2.5.2.2 ประสิทธิภาพของกังหัน.....	25
2.5.2.3 อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากกังหัน.....	26
2.5.2.4 แรงบิดของกังหัน.....	26
2.5.3 ความเร็วพลวัตของเทอร์โบชาร์จ.....	26
2.6 ระบบปริมาตรควบคุม.....	27
2.7 ค่าหน่วงเวลาของตัวรับรู้ออกซิเจน.....	27
บทที่ 3 โครงข่ายประสาทเทียม.....	30
3.1 ทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียมเบื้องต้น.....	30
3.1.1 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียม.....	32
3.1.1.1 โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว.....	32
3.1.1.2 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.1.3 โครงข่ายประสาทเทียมแบบโครงผลึกร่างตาข่าย.....	33
3.1.2 การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม.....	34
3.1.2.1 การเรียนรู้แบบมีการสอน.....	34
3.1.2.2 การเรียนรู้แบบไม่มีการสอน.....	34
3.1.3 ฟังก์ชันกระตุ้น.....	34
3.2 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ.....	34
3.3 โครงข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลต.....	36
3.3.1 ตรรกศาสตร์พีชชีแบบ TSK	36
3.3.2 เวฟเลตแม่.....	37
3.3.3 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลต.....	38
3.3.4 การเรียนรู้และการปรับค่าตัวแปร.....	41
บทที่ 4 การออกแบบระบบควบคุมและผลการทดลอง.....	44
4.1 การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลต.....	46
4.1.1 การกำหนดข้อมูลชุดฝึกสอน.....	46
4.1.2 ค่าอัตราการเรียนรู้และโมเมนตัม.....	51
4.2 การกำหนดค่าตัวแปรเริ่มต้นของโครงข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลต.....	52
4.3 ระบบควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว.....	57
4.3.1 ผลการทดลอง.....	59
4.3.2 สรุปผลการทดลอง.....	69
4.4 ระบบควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้หลายตัว.....	70
4.3.1 ผลการทดลอง.....	73
4.3.2 สรุปผลการทดลอง.....	81
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	83
เอกสารอ้างอิง.....	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก.....	88
ภาคผนวก ก. ค่าตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองเครื่องยนต์.....	89
ภาคผนวก ข. แบบจำลองในโปรแกรม Matlab.....	92
ข.1 แบบจำลองเครื่องยนต์เทอร์โบ.....	92
ข.2 แบบจำลองระบบควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีเอฟเลต.....	100
ภาคผนวก ค. ฟังก์ชันสมาชิกโครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีเอฟเลต.....	103
ภาคผนวก ง. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	106
ประวัติผู้เขียน.....	116



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สัญลักษณ์แทนชื่อ.....	4
2.2 สัญลักษณ์ได้ชื่อ.....	5
4.1 ค่าอินพุตของแบบจำลองเครื่องยนต์.....	45
4.2 กฎ 4 ข้อของระบบควบคุม FWNN ที่ใช้กำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปร... ..	52
4.3 ตัวอย่างค่าตัวแปรแบบกำหนดตามกฎของระบบควบคุมฟิวซีใน FWNN แบบ 4 กฎ ก่อนการเรียนรู้และหลังการเรียนรู้.....	53
4.4 กฎ 16 ข้อของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียวที่ใช้กำหนดค่าเริ่มต้น ของตัวแปร.....	58
4.5 ค่าตัวแปรที่ได้หลังจากการเรียนรู้ของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ ตัวเดียวแบบ 16 กฎ.....	58
4.6 ผลลัพธ์ที่ได้ทั้ง 5 กรณีของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียวเปรียบเทียบกับ กับวิธีการ PID และแบบไม่มีระบบควบคุม.....	67
4.7 ผลลัพธ์ที่ได้ทั้ง 5 กรณีของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียวเปรียบเทียบกับ กับวิธีการ PID แบบเป็นเปอร์เซ็นต์.....	68
4.8 กฎ 24 ข้อของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้หลายตัวที่ใช้กำหนดค่าเริ่มต้น ของตัวแปร.....	72
4.9 ค่าตัวแปรที่ได้หลังจากการเรียนรู้ของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้หลายตัว แบบ 24 กฎ.....	72
4.10 ค่าตัวแปรที่ได้หลังจากการเรียนรู้ของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว แบบ 25 กฎ.....	74
4.11 ผลลัพธ์ที่ได้ทั้ง 5 กรณีของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้หลายตัวเปรียบเทียบกับ กับวิธี PID และวิธี FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว.....	80
4.12 ผลลัพธ์ที่ได้ทั้ง 5 กรณีของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้หลายตัวเปรียบเทียบกับ เป็นเปอร์เซ็นต์กับวิธี PID และวิธี FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว.....	81

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของระบบเครื่องยนต์เทอร์โบแบบจุดระเบิดด้วยประกายไฟ.....	4
2.2 สัญลักษณ์อัตราการผลิตมวล ความดัน และอุณหภูมิของเครื่องยนต์เทอร์โบแบบจุดระเบิดด้วยประกายไฟ.....	5
2.3 การเชื่อมต่อของระบบเครื่องยนต์เทอร์โบ แสดงค่าอินพุตและเอาต์พุต	6
2.4 การไหลแบบไม่อัดตัวในหม้อกรองอากาศ.....	8
2.5 การไหลของอากาศผ่านเครื่องหล่อเย็น และการแลกเปลี่ยนความร้อนของอากาศที่ไหลตัดกัน แต่ไม่ผสมกันในเครื่องหล่อเย็น.....	10
2.6 กราฟความสัมพันธ์ของ ΔP และ \dot{m} ของแบบจำลองและค่าจากผลการทดลองของหม้อกรองอากาศ เครื่องหล่อเย็น และระบบไอเสีย.....	12
2.7 โครงสร้างของลิ้นเร่ง.....	14
2.8 ช่วงเวลาการทำงานของหัวฉีดใน 1 วัฏจักร.....	17
2.9 ช่วงเวลาที่หัวฉีดทำงานและเวลาที่ลิ้นไอเสียเปิด.....	18
2.10 โครงสร้างของเทอร์โบชาร์จ์ที่ใช้ในรถยนต์.....	20
2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Π_{com} และ Corrected Mass Flow จากแบบจำลองและข้อมูลจากโรงงาน.....	22
2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ψ_{com} และ ϕ_{com} จากข้อมูลโรงงานที่ความเร็วรอบต่างๆกัน และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ψ_{com} และ ϕ_{com} จากแบบจำลองและข้อมูลจากโรงงาน...	22
2.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง η_{com} และ ϕ_{com} จากข้อมูลโรงงานที่ความเร็วรอบต่างๆกัน และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง η_{com} และ \dot{m}_{com_corr} จากแบบจำลองเปรียบเทียบข้อมูลจากโรงงาน.....	23
2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง \dot{m}_{t_corr} กับ $1/\Pi_t$ เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองและข้อมูลจากโรงงาน.....	25
2.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง BSR กับ η_t	26
2.16 ตำแหน่งที่ติดตั้งตัวรับรู้ออกซิเจน.....	28
2.17 ค่าเอาต์พุตและช่วงของค่า λ ที่สามารถวัดได้.....	29
3.1 โครงข่ายประสาทของมนุษย์เปรียบเทียบกับโครงข่ายประสาทเทียมเบื้องต้น.....	31
3.2 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว.....	32
3.3 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4	โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมแบบโครงผลิกร่างตาข่าย..... 33
3.5	ตัวอย่างโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ..... 35
3.6	โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมเวฟเลต..... 38
3.7	เม็ทริกกันเสตเวฟเลต เมื่อ $a=1, b=0$ 39
3.8	โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลต..... 40
4.1	ห้องเผาไหม้และสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของ ECU 44
4.2	ค่าเอาต์พุตและช่วงของค่า λ ที่กำหนด..... 45
4.3	โครงสร้างการควบคุมอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงของระบบเครื่องยนต์เทอร์โบ.. 46
4.4	ฟังก์ชันการเรียนรู้และปรับค่าตัวแปร..... 47
4.5	กราฟการเลื่อนค่า λ ด้วยค่าหนึ่งเวลาเพื่อหาค่าเอาต์พุตที่ต้องการในอุดมคติ 48
4.6	ค่า λ ที่ได้เมื่อใส่ค่าเอาต์พุตที่ต้องการกลับลงไปในระบบเพื่อทดสอบ..... 49
4.7	องศาอิสระของชุดข้อมูลฝึกสอน..... 49
4.8	สัญญาณเวสท์เกทของชุดข้อมูลฝึกสอน..... 50
4.9	สัญญาณอินพุตโครงข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลตของชุดข้อมูลฝึกสอน..... 50
4.10	สัญญาณเอาต์พุตที่ต้องการโครงข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลตของชุดข้อมูลฝึกสอน..... 51
4.11	ความผิดพลาดที่เกิดจากการกำหนดค่าอัตราการเรียนรู้ไม่เหมาะสม..... 51
4.12	ประสิทธิภาพการเรียนรู้ที่ค่าอัตราการเรียนรู้และโมเมนตัมต่างๆ..... 52
4.13	กราฟฟังก์ชันสมาชิกแบบเกาส์ของค่า $e(k)$ และ $e'(k)$ ก่อนการเรียนรู้..... 54
4.14	กราฟเปรียบเทียบฟังก์ชันสมาชิกแบบเกาส์ของค่า $e(k)$ และ $e'(k)$ การเรียนรู้และหลังการเรียนรู้ทั้ง 4 กฎ..... 54
4.15	กราฟค่าเริ่มต้นก่อนการเรียนรู้ของค่าเอาต์พุตที่ต้องการในรูปแบบสามมิติ แสดงแต่ละด้านในแนวแกน $e(k) - u$ และแกน $e'(k) - u$ 55
4.16	กราฟค่าหลังการเรียนรู้ของค่าเอาต์พุตที่ต้องการในรูปแบบสามมิติ แสดงแต่ละด้านในแนวแกน $e(k) - u$ และแกน $e'(k) - u$ 55
4.17	กราฟเปรียบเทียบของค่าเอาต์พุตในรูปแบบสามมิติก่อนการเรียนรู้และหลังการเรียนรู้..... 56
4.18	กราฟฟังก์ชันสมาชิกค่า $e'(k)$ ใน FWNN แบบ 16 กฎหลังการเรียนรู้..... 56
4.19	กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเรียนรู้เมื่อกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรในแบบกฎพีชชีและแบบสุ่ม..... 57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 โครงสร้างของระบบควบคุม โครงข่ายประสาทเทียมพีซีเวฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้ ตัวเดียว.....	57
4.21 กราฟองศาของคลื่นแรงในกรณีที่ 1 ของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ ตัวเดียว.....	60
4.22 สัญญาณควบคุมของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียวในกรณีที่ 1 เปรียบเทียบกับวิธี PID	60
4.23 กราฟผลลัพธ์ค่า λ ที่ได้จากกรณีที่ 1 ของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ ตัวเดียวเปรียบเทียบกับวิธี PID และไม่มีระบบควบคุม.....	61
4.24 กราฟองศาของคลื่นแรงในกรณีที่ 2 ของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ ตัวเดียว.....	61
4.25 สัญญาณควบคุมของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียวในกรณีที่ 2 เปรียบเทียบกับวิธี PID.....	62
4.26 กราฟผลลัพธ์ค่า λ ที่ได้จากกรณีที่ 2 ของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ ตัวเดียวเปรียบเทียบกับวิธี PID และไม่มีระบบควบคุม.....	62
4.27 กราฟสัญญาณเปิด-ปิดวาล์วเกทในกรณีที่ 3 ของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณ ตัวรับรู้ตัวเดียว.....	63
4.28 สัญญาณควบคุมของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียวในกรณีที่ 3 เปรียบเทียบกับวิธี PID.....	63
4.29 กราฟผลลัพธ์ค่า λ ที่ได้จากกรณีที่ 3 ของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ ตัวเดียวเปรียบเทียบกับวิธี PID และไม่มีระบบควบคุม.....	64
4.30 กราฟองศาของคลื่นแรงในกรณีที่ 4 ของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ ตัวเดียว.....	64
4.31 สัญญาณควบคุมของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียวในกรณีที่ 4 เปรียบเทียบกับวิธี PID.....	65
4.32 กราฟผลลัพธ์ค่า λ ที่ได้จากกรณีที่ 4 ของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ ตัวเดียวเปรียบเทียบกับวิธี PID และไม่มีระบบควบคุม.....	65
4.33 กราฟองศาของคลื่นแรงในกรณีที่ 5 ของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ ตัวเดียว.....	66

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.34 สัญญาณควบคุมของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียวในกรณีที่ 5 เปรียบเทียบกับวิธี PID.....	66
4.35 กราฟผลลัพธ์ค่า λ ที่ได้จากกรณีที่ 5 ของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ ตัวเดียวเปรียบเทียบกับวิธี PID และไม่มีระบบควบคุม.....	67
4.36 กราฟสัญญาณค่า λ และกราฟสัญญาณควบคุมที่เกิดการแกว่งเพิ่มมากขึ้นเมื่อฉีด เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นเพื่อพยายามลดข้อผิดพลาดในวิธีการควบคุมแบบ FWNN.....	70
4.37 โครงสร้างการควบคุมของ FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้หลายตัว.....	71
4.38 สัญญาณควบคุมของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้หลายตัวในกรณีที่ 1 เปรียบเทียบกับวิธี PID และวิธี FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว.....	75
4.39 กราฟผลลัพธ์ค่า λ ที่ได้จากกรณีที่ 1 ของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ หลายตัวเปรียบเทียบกับวิธี PID และวิธี FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว.....	75
4.40 สัญญาณควบคุมของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้หลายตัวในกรณีที่ 2 เปรียบเทียบกับวิธี PID และวิธี FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว.....	76
4.41 กราฟผลลัพธ์ค่า λ ที่ได้จากกรณีที่ 2 ของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ หลายตัวเปรียบเทียบกับวิธี PID และวิธี FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว.....	76
4.42 สัญญาณควบคุมของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้หลายตัวในกรณีที่ 3 เปรียบเทียบกับวิธี PID และวิธี FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว.....	77
4.43 กราฟผลลัพธ์ค่า λ ที่ได้จากกรณีที่ 3 ของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ หลายตัวเปรียบเทียบกับวิธี PID และวิธี FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว.....	77
4.44 สัญญาณควบคุมของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้หลายตัวในกรณีที่ 4 เปรียบเทียบกับวิธี PID และวิธี FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว.....	78
4.45 กราฟผลลัพธ์ค่า λ ที่ได้จากกรณีที่ 4 ของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ หลายตัวเปรียบเทียบกับวิธี PID และวิธี FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว.....	78
4.46 สัญญาณควบคุมของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้หลายตัวในกรณีที่ 5 เปรียบเทียบกับวิธี PID และวิธี FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว.....	79
4.47 กราฟผลลัพธ์ค่า λ ที่ได้จากกรณีที่ 5 ของระบบควบคุม FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ หลายตัวเปรียบเทียบกับวิธี PID และวิธี FWNN จากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว.....	79
ก.1 Compressor map.....	90

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.2 Turbine map.....	91
ข.1 แบบจำลองเครื่องยนต์แบบจุดระเบิดด้วยประกายไฟพร้อมระบบควบคุม.....	92
ข.2 แบบจำลองระบบการไหลไม่อัดตัว.....	93
ข.3 แบบจำลองอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากเครื่องหล่อเย็น.....	93
ข.4 แบบจำลองอุณหภูมิที่เข้าสู่ระบบไอเสีย.....	93
ข.5 แบบจำลองระบบการไหลแบบอัดตัว.....	94
ข.6 แบบจำลองอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้.....	94
ข.7 แบบจำลองการหน่วงเวลาในหัวฉีดเชื้อเพลิง.....	95
ข.8 แบบจำลองอุณหภูมิขาเข้าพร้อมไอเสีย.....	95
ข.9 แบบจำลองแรงบิดของเครื่องยนต์.....	96
ข.10 แบบจำลองอัตราการไหลของมวลอากาศของคอมเพรสเซอร์.....	96
ข.11 แบบจำลองประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์.....	97
ข.12 แบบจำลองอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากคอมเพรสเซอร์.....	97
ข.13 แบบจำลองแรงบิดของคอมเพรสเซอร์.....	97
ข.14 แบบจำลองอัตราการไหลของมวลอากาศของกังหัน.....	98
ข.15 แบบจำลองประสิทธิภาพของกังหัน.....	98
ข.16 แบบจำลองอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากกังหัน.....	98
ข.17 แบบจำลองแรงบิดของกังหัน.....	99
ข.18 แบบจำลองความเร็วพลวัตของเทอร์โบชาร์จ.....	99
ข.19 แบบจำลองปริมาตรควบคุม.....	99
ข.20 แบบจำลองค่าหน่วงเวลาของตัวรับรู้ออกซิเจน.....	100
ข.21 ระบบควบคุม FWNN แบบกฎ 4 ข้อ.....	100
ข.22 ค่าพีชชีของระบบควบคุม FWNN แบบกฎ 4 ข้อ.....	101
ข.23 โครงข่ายประสาทเทียมของระบบควบคุม FWNN แบบกฎ 4 ข้อ.....	102
ค.1 กราฟฟังก์ชันสมาชิกแบบเกาส์เซียนของค่า $e(k)$ และ $e'(k)$ ก่อนการเรียนรู้.....	104
ค.2 กราฟฟังก์ชันสมาชิกแบบสามเหลี่ยมของค่า $e(k)$ และ $e'(k)$ ก่อนการเรียนรู้.....	105
ค.3 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพเมื่อใช้ฟังก์ชันสมาชิกเป็นฟังก์ชันเกาส์เซียนและฟังก์ชันสามเหลี่ยม.....	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ก๊าซธรรมชาติเป็นทิศทางใหม่ของอุตสาหกรรมยานยนต์ที่จะเข้ามาแทนที่เชื้อเพลิงในปัจจุบัน ตลาดมีการเติบโตอย่างรวดเร็วและมีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นในอนาคต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทย เนื่องจากปัญหาการใช้น้ำมันแพง นอกจากนี้ ก๊าซธรรมชาติยังช่วยลดมลพิษทางอากาศโดยการปล่อย CO, HC และ SO_x ลง 45%, 67.4%, และ 80.5% ตามลำดับ[1] อย่างไรก็ตามรถยนต์ที่เปลี่ยนมาใช้ก๊าซธรรมชาติต้องผ่านการดัดแปลงเครื่องยนต์ เป็นผลให้กำลังของเครื่องยนต์ลดลงหรือเกิดปัญหาอื่น ๆ ที่มีสาเหตุมาจากการฉีดเชื้อเพลิงไม่สม่ำเสมอหรือตอบสนองไม่ทันการ ดังนั้น การควบคุมอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงก็นับเป็นหนทางหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ ให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดและก่อให้เกิดมลพิษน้อยที่สุด

1.2 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

นับตั้งแต่แบบจำลองเครื่องยนต์ MVEM ซึ่งเป็นแบบจำลองเครื่องยนต์แบบง่ายและมีค่าพลวัตในเวลาจริง แบบจำลองนี้นำเสนอโดย Hendricks ในปี ค.ศ. 1989 และได้รับการพัฒนาต่อเรื่อยมา เช่น แบบจำลองเครื่องยนต์เทอร์โบแบบจุดระเบิดด้วยประกายไฟของ Müller (2008)[2] และแบบจำลองของ Eriksson (2007)[3] วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาถึงการควบคุมอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์เทอร์โบแบบจุดระเบิดด้วยประกายไฟที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง โดยใช้แบบจำลองเครื่องยนต์ MVEM เป็นพื้นฐานร่วมกับวิธีการควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลต

โครงข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลตนั้นเป็นการรวมกันของเวฟเลต ตรรกศาสตร์พีชชี และโครงข่ายประสาทเทียม โดยมีโครงสร้างระบบควบคุมเป็นแบบ Takagi-Sugeno-Kang (TSK) และใช้กฎพื้นฐานเป็น IF-THEN และใช้วิธีการเรียนรู้แบบเกรเดียนต์ในการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสม ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายกว่าพีชชี TSK ในการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ เพราะวิธีการพีชชี TSK จำเป็นต้องใช้ประสบการณ์และความรู้ของมนุษย์ในการปรับแต่งพารามิเตอร์ให้เหมาะสม

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาการควบคุมอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์เทอร์โบแบบจุดระเบิดด้วยประกายไฟที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง โดยมีมุ่งหมายให้อัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์หรือใกล้เคียงที่สุดเพื่อความประหยัดและให้ได้กำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือทรัพย์สินทางปัญญาอื่นใด ผู้ใช้เอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารหรือผู้ถือลิขสิทธิ์อื่น ๆ ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้ซ้ำหรือเผยแพร่ต่อผู้อื่นได้

สูงสุด และในวิทยานิพนธ์นี้จึงเสนอวิธีการที่ง่ายกว่าวิธีที่นิยมในปัจจุบันในการปรับแต่งพารามิเตอร์การควบคุมให้ได้ค่าอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น

1.4 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการโครงข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลตในการควบคุมอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงโดยเปรียบเทียบกับวิธีการ PID ซึ่งเป็นวิธีแบบพื้นฐานที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบัน โดยใช้คอมพิวเตอร์ในการจำลองระบบเครื่องยนต์เทอร์โบแบบจุดระเบิดด้วยประกายไฟที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ผลที่ได้แสดงสมรรถนะเปรียบเทียบค่าในรูปแบบค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาด (Mean Square Error, MSE), ค่าสูงสุดต่ำสุด (Max/Min) ของค่า λ และ เวลาเข้าที่ (settling time) กับวิธีการแบบพื้นฐาน

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ทฤษฎีที่ใช้ ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของแบบจำลองเครื่องยนต์เทอร์โบ

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลต

บทที่ 4 กล่าวถึงวิธีการควบคุมที่ใช้และผลการทดลอง

บทที่ 5 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

แบบจำลองเครื่องยนต์เทอร์โบ

นับตั้งแต่ Hendricks ได้เสนอแบบจำลองเครื่องยนต์ MVEM ขึ้นมาในปี ค.ศ. 1989 แบบจำลองที่เสนอนั้น มีลักษณะเป็นพลวัต (dynamic) มีสมการในแบบจำลองเป็นสมการไม่เป็นเชิงเส้นทำให้แบบจำลองมีความซับซ้อนและมีคุณสมบัติให้ค่าตามเวลาจริง การจำลองและวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองนี้จึงเป็นที่นิยมอย่างมาก ทำให้มีการพัฒนาแบบจำลองเรื่อยมา ในเครื่องยนต์เทอร์โบแบบจุดระเบิดด้วยประกายไฟก็เช่นกัน มีการศึกษามากมายไม่ว่าจะเป็น Bergström และ Brügård (1999)[4] Pettersson (2000)[5] และ Eriksson (2007)[3] เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ระบบของเครื่องยนต์โดยไม่ต้องใช้เครื่องยนต์จริง เช่น การควบคุมระบบต่างๆของเครื่องยนต์ เป็นต้น

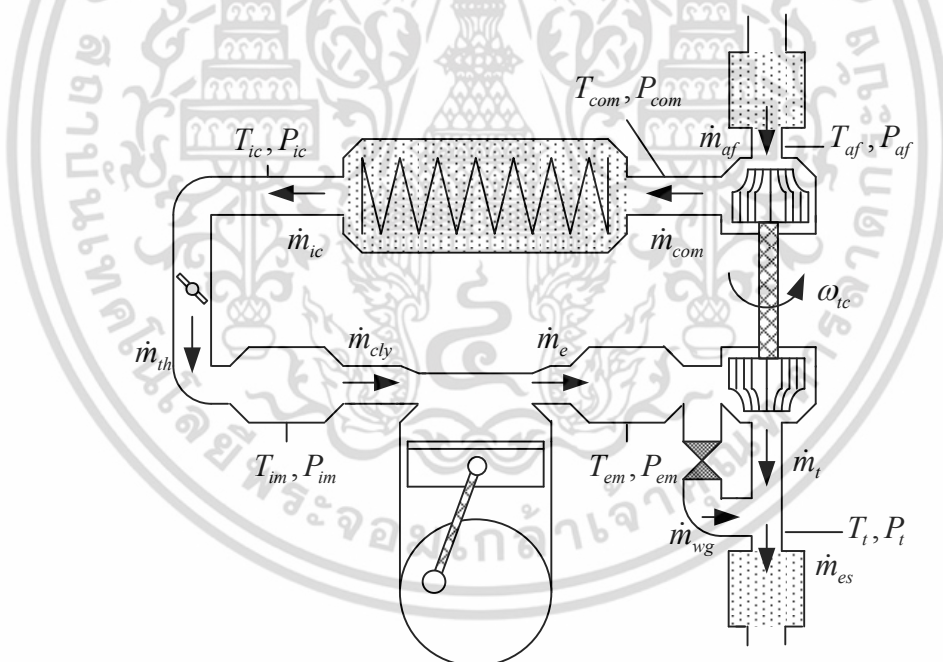
ในวิทยานิพนธ์นี้ก็ใช้แบบจำลองเครื่องยนต์ MVEM เช่นกัน การออกแบบแบบจำลองได้ออกแบบชิ้นส่วนของระบบแต่ละชิ้นแยกออกจากกัน เป็นอิสระต่อกัน อยู่ภายใต้เงื่อนไขของสมการ ตัวแปร ค่าคงที่ สภาวะ สัญญาณอินพุต และสัญญาณเอาต์พุต โดยเลือกใช้แบบจำลองที่ง่ายไม่ซับซ้อน แต่ให้ค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงตามผลการทดลองที่สุด แล้วนำมาประกอบเข้าด้วยกันโดยเชื่อมต่อกันด้วยระบบปริมาตรควบคุม (Control volume, CV) ซึ่งทำหน้าที่กำหนดให้ระบบเป็นพลวัต

2.1 โครงสร้างของแบบจำลอง

แบบจำลองเครื่องยนต์เทอร์โบแบบจุดระเบิดด้วยประกายไฟที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง ในวิทยานิพนธ์นั้น ประกอบไปด้วยหม้อกรองอากาศ (Air filter) คอมเพรสเซอร์ (Compressor) เครื่องหล่อเย็น (Intercooler) ลิ้นเร่ง (Throttle) ท่อร่วมไอดี (Intake manifold) เครื่องยนต์ (Engine) ท่อร่วมไอเสีย (Exhaust manifold) กังหัน (Turbine) เวสท์เกต (Waste gate) และ ระบบไอเสีย (Exhaust system) ซึ่งมีโครงสร้างของระบบเป็นดังในรูป 2.1 เมื่อนำชิ้นส่วนต่างๆมาแปลงเป็นแบบจำลองด้วยสมการทางคณิตศาสตร์และนำมาประกอบเข้าด้วยกัน จะมีชิ้นส่วนที่เรียกว่าระบบปริมาตรควบคุมมาคั่นกลางระหว่างในแต่ละส่วนประกอบดังกล่าวมาข้างต้นทั้งสองชิ้น ทำหน้าที่เชื่อมต่อในระบบแทนท่อที่เชื่อมส่วนประกอบทั้งสองชิ้นนั้นเข้าด้วยกันในโครงสร้างของเครื่องยนต์จริง

ตารางที่ 2.2 สัญลักษณ์ใต้ชื่อ

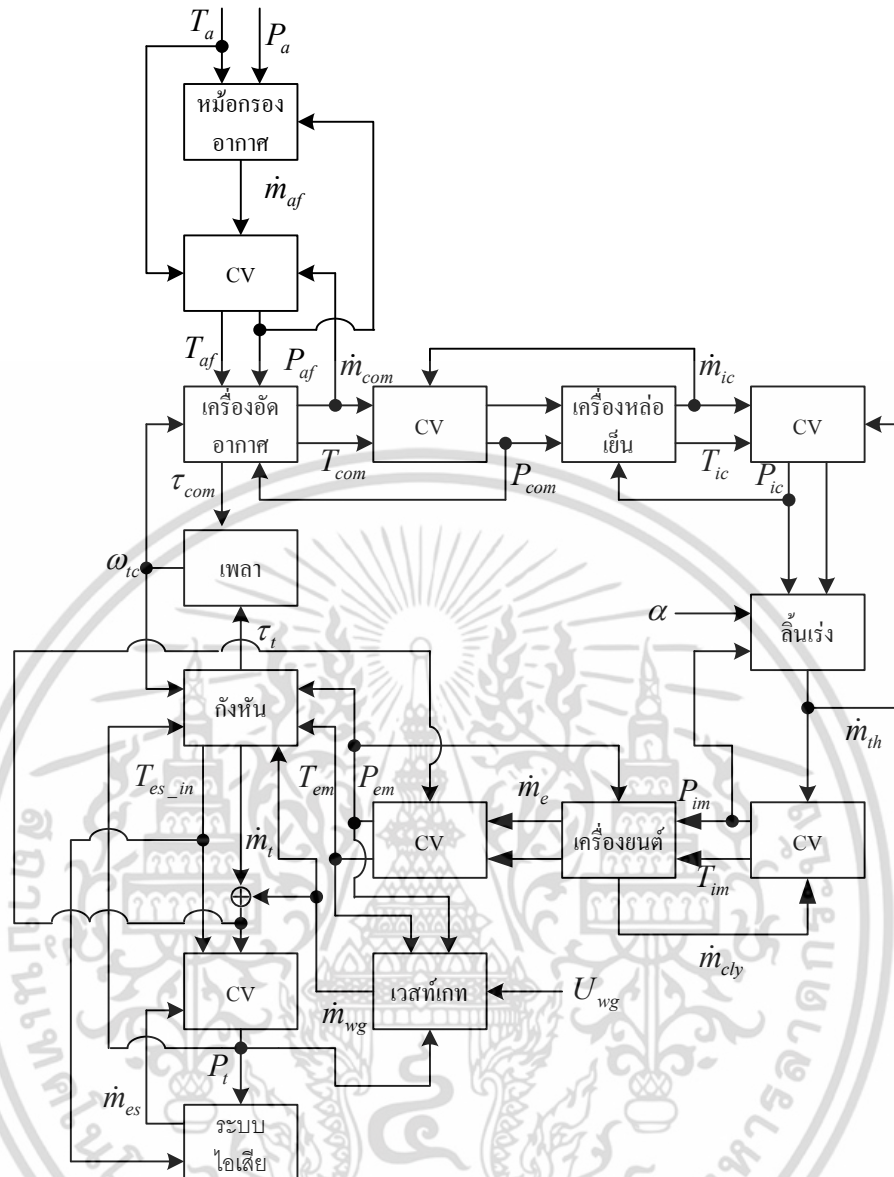
สัญลักษณ์	รายละเอียด
a	สิ่งแวดล้อม
af	หม้อกรองอากาศ
com	คอมเพรสเซอร์
ic	เครื่องหล่อเย็น
th	ลิ้นเร่ง
im	ท่อร่วมไอดี
em	ท่อร่วมไอเสีย
t	กังหัน
wg	เวสท์เกต
es	ระบบไอเสีย



รูปที่ 2.2 สัญลักษณ์อัตราการใช้ของมวลก๊าซ ความดัน และอุณหภูมิของเครื่องยนต์เทอร์โบแบบจุดระเบิดด้วยประกายไฟ

เมื่อนำส่วนประกอบของเครื่องยนต์เทอร์โบที่แปลงเป็นแบบจำลองและระบุสัญลักษณ์แทนลงไปมาเชื่อมต่อกันด้วยระบบปริมาตรควบคุม จะเป็นดังรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 การเชื่อมต่อของระบบเครื่องยนต์เทอร์โบ แสดงค่าอินพุตและเอาต์พุต

2.1.2 ส่วนประกอบแบ่งตามการทำงาน

2.1.1.1 ส่วนควบคุม

เป็นส่วนที่กำหนดการไหลของมวลรวมถึงอุณหภูมิของก๊าซที่ออกจากส่วนนั้น เพื่อใช้ในการหาค่าความดันและอุณหภูมิก่อนและหลังระบบควบคุมนั้นๆ

1. ระบบการไหลแบบไม่อัดตัว: ประกอบไปด้วย หม้อกรองอากาศ เครื่องหล่อเย็น และ ระบบไอเสีย ดังแสดงในหัวข้อ 2.2
2. ระบบการไหลแบบอัดตัว: ประกอบไปด้วย ลิ้นเร่ง และ เวสท์เกต ดังแสดงในหัวข้อ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ระบบอื่นๆ: ประกอบไปด้วยเครื่องยนต์ คอมเพรสเซอร์ กังหัน และตัวรับรู้ ออกซิเจน ดังแสดงในหัวข้อ 2.4, 2.5 และ 2.7 ตามลำดับ

2.1.1.2 การรวมแบบไม่สูญเสียความร้อน

ใช้ในการรวมการไหลของส่วนควบคุมสองส่วนเข้าด้วยกันคือกังหันและเวสท์เกต

2.1.1.3 ส่วนพลวัต

1. ระบบปริมาตรควบคุม: ใช้ในการเชื่อมต่อส่วนควบคุมสองส่วนเข้าด้วยกัน จะให้ค่าออกมาสองค่าคือค่าความดันและอุณหภูมิ ดังแสดงในหัวข้อ 2.6
2. แรงเฉื่อยและแรงเสียดทาน: มีอยู่ในเครื่องยนต์และเพลลาของกังหันที่เชื่อมกับคอมเพรสเซอร์ ดังแสดงในหัวข้อ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ

2.1.3 ข้อกำหนดของแบบจำลอง

1. การไหลของก๊าซไม่มีการไหลย้อนกลับ
2. ไม่มีความร้อนเข้าหรือออกจากระบบควบคุมปริมาตร (adiabatic)
3. ไม่มีการส่งผ่านความดันโดยตรง
4. ก๊าซในระบบพิจารณาเป็นก๊าซในอุดมคติ
 - 4.1 ให้อากาศในด้านไอเดิมิค่าอัตราส่วนความร้อนจำเพาะเป็น γ_a
 - 4.2 ให้ก๊าซที่เผาไหม้แล้วมีค่าอัตราส่วนความร้อนจำเพาะเป็น γ_c

2.2 ระบบการไหลแบบไม่อัดตัว

ในหม้อกรองอากาศ เครื่องหล่อเย็น และระบบไอเสีย สมมติให้เป็นการไหลแบบไม่อัดตัวและเป็นกระบวนการไอเซนทรอปิก (isentropic) จากกระบวนการไอเซนทรอปิกจะได้ว่าอุณหภูมิ $T_{after} = T_{before}$ ยกเว้นในเครื่องทำความเย็นที่ระบบไม่เป็นไอเซนทรอปิก ภายใต้เงื่อนไขการสูญเสียความดันการไหล (pressure head loss) ความดันที่ลดลง (ΔP) สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังสมการ (2.1)

$$\Delta P = P_{before} - P_{after} = \zeta(\text{Re}) \frac{RT_{before} \dot{m}^2}{P_{before}} \quad (2.1)$$

โดยที่ P_{before}, P_{after} = ความดันก่อนและหลังเข้าสู่ระบบ (Pa)

T_{before} = อุณหภูมิก่อนเข้าสู่ระบบ (K)

ค่า ζ นั้นขึ้นกับค่าเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) เพียงเล็กน้อยทำให้ค่า $\zeta(\text{Re})$ สามารถ

กำหนดให้เป็นค่าคงที่ (H) ได้ เมื่อนำมาแทนลงในสมการ (2.1) ได้แล้วจะได้ดังสมการ (2.2)[6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta P = P_{before} - P_{after} = H \frac{T_{before} \dot{m}^2}{P_{before}} \quad (2.2)$$

โดยที่ $H =$ การสูญเสียความดันการไหล ($\text{Pa}^2 \text{s}^2 / \text{KKg}^2$)

จากสมการ (2.2) และข้อกำหนดในหัวข้อ 2.1.3 จะได้อัตราการไหลของมวลก๊าซเป็นไปดังสมการ

$$\dot{m} = \begin{cases} \sqrt{P_{before} \frac{\Delta P}{HT_{before}}} & , \Delta P > 0 \\ 0 & , \Delta P < 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

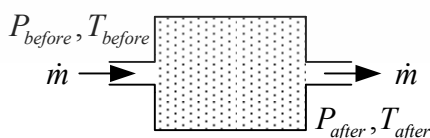
ค่า H สามารถหาได้จากวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square) จากผลการทดลอง โดยใช้คำสั่ง *lsqcurvefit* ในโปรแกรม Matlab

2.2.1 หม้อกรองอากาศ

หม้อกรองอากาศทำหน้าที่กรองอากาศที่เข้าสู่ระบบ เพื่อป้องกันฝุ่นละอองเข้าไปทำให้คอมเพรสเซอร์เสียหาย หม้อกรองอากาศมีความสามารถลดความดันอากาศลงได้ถึง 5 % ขึ้นอยู่กับระบบไอดีและเครื่องยนต์ รูปของหม้อกรองอากาศที่แสดงดังในรูปที่ 2.4 ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงพื้นที่แบบกระแทกหน้าถึง 3 ส่วน คือ ท่อเข้า ตัวกรอง และ ท่อออก จากสมการที่ (2.2) ค่าความดันที่ลดลง (ΔP) หาได้จากสมการ (2.4)

$$P_a - P_{af} = H_{af} \frac{T_a \dot{m}_{af}^2}{P_a} \quad (2.4)$$

อัตราการไหลของมวลก๊าซของหม้อกรองอากาศเป็นไปตามสมการที่ (2.3) ผลลัพธ์ที่ได้จากสมการเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.4 การไหลแบบไม่อัดตัวในหม้อกรองอากาศ

2.2.2 เครื่องหล่อเย็น

เครื่องหล่อเย็นทำหน้าที่ลดอุณหภูมิที่ออกจากคอมเพรสเซอร์ให้มีอุณหภูมิลดลงให้ใกล้เคียงกับสิ่งแวดล้อมเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของอากาศให้มากขึ้น เป็นการลดการสึกหรอ และเพิ่มแรงม้าให้กับเครื่องยนต์ไปพร้อมกัน

2.2.2.1 อัตราการไหลของมวลก๊าซ

จากสมการที่ (2.2) ความดันที่ลดลง (ΔP) หาได้จากสมการ (2.5)

$$P_{com} - P_{ic} = H_{ic} \frac{T_{com} \dot{m}_{ic}^2}{P_{com}} \quad (2.5)$$

อัตราการไหลของมวลก๊าซของเครื่องหล่อเย็นเป็นไปตามสมการที่ (2.3) ผลลัพธ์ที่ได้จากสมการเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 2.6

2.2.2.2 อุณหภูมิของก๊าซหลังออกจากเครื่องหล่อเย็น

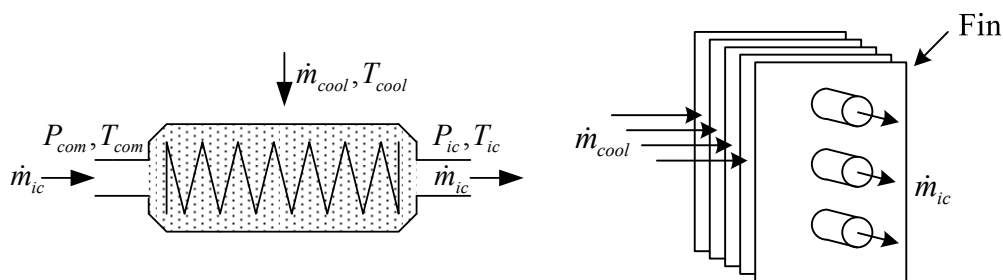
เครื่องหล่อเย็นเป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนของอากาศที่ไหลตัดกันแต่อากาศไม่ผสมกันดังที่แสดงในรูป 2.5 จากสมการประสิทธิภาพเครื่องหล่อเย็นที่เสนอโดย Holman (1997)[7] มีสมการดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{\text{การถ่ายเทความร้อนแท้จริง}}{\text{ค่าสูงสุดที่สามารถถ่ายเทความร้อนได้}}$$

เมื่อแทนค่าลงไปจะได้ค่าประสิทธิภาพ (ε) ดังสมการ (2.6)

$$\varepsilon = \frac{T_{com} - T_{ic}}{T_{com} - T_{cool}} \quad (2.6)$$

โดยที่ T_{cool} = อุณหภูมิเครื่องหล่อเย็น (K)



รูปที่ 2.5 การไหลของอากาศผ่านเครื่องหล่อเย็น (ซ้าย) และการแลกเปลี่ยนความร้อนของอากาศที่ไหลตัดกันแต่ไม่ผสมกันในเครื่องหล่อเย็น (ขวา)

จากสมการที่ (2.6) เมื่อแปลงสมการกลับ จะได้สมการอุณหภูมิที่ออกจากเครื่องหล่อเย็นดังสมการที่ (2.7)

$$T_{ic} = \max(T_{cool}, T_{com} - \varepsilon(T_{com} - T_{cool})) \quad (2.7)$$

ค่าประสิทธิภาพเครื่องหล่อเย็นสามารถหาได้โดยวิธี Regression efficiency (REG)[8] ซึ่งจะให้ผลถูกต้องกว่าวิธี Number of heat Transfer Units (NTU)[4] โดยวิธี REG เป็นดังสมการ (2.8)

$$\varepsilon = a_0 + a_1 \left(\frac{T_{com} + T_{cool}}{2} \right) + a_2 \dot{m}_{ic} + a_3 \frac{\dot{m}_{ic}}{\dot{m}_{cool}} \quad (2.8)$$

โดยที่ a_0, a_1, a_2, a_3 = ค่าคงที่

อัตราการไหลของมวลอากาศของเครื่องหล่อเย็น (\dot{m}_{cool}) หาได้จากการประมาณค่าความเร็วของอากาศจากการที่พัดลมทำงานที่ความเร็วสูงสุด โดยสมมุติว่าความเร็วที่ไหลเป็นสัดส่วนกับความเร็วของพัดลมและถือว่าเป็นความเร็วคงที่ ซึ่งจะนำไปดังสมการ (2.9)[4]

$$\dot{m}_{cool} = \rho_a A v_{cool} \quad (2.9)$$

โดยที่ ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศในสิ่งแวดล้อม (kg/m^3)

A = พื้นที่ด้านหน้าของเครื่องหล่อเย็น (m^2)

v_{cool} = ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่าน (m/s)

2.2.3 ระบบไอเสีย

ระบบไอเสียถือเป็นระบบความดันไม่อัดตัวระบบหนึ่ง มีสมการความดันที่ลดลงเหมือนหม้อกรองอากาศซึ่งจำเป็นต้องรู้อุณหภูมิที่เข้ามาในระบบ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (2.11)

2.2.3.1 อัตราการไหลของมวลก๊าซ

จากสมการที่ (2.2) ความดันที่ลดลง (ΔP) หาได้จากสมการ

$$P_t - P_a = H_{es} \frac{T_{es_in} \dot{m}_{es}^2}{P_t} \quad (2.10)$$

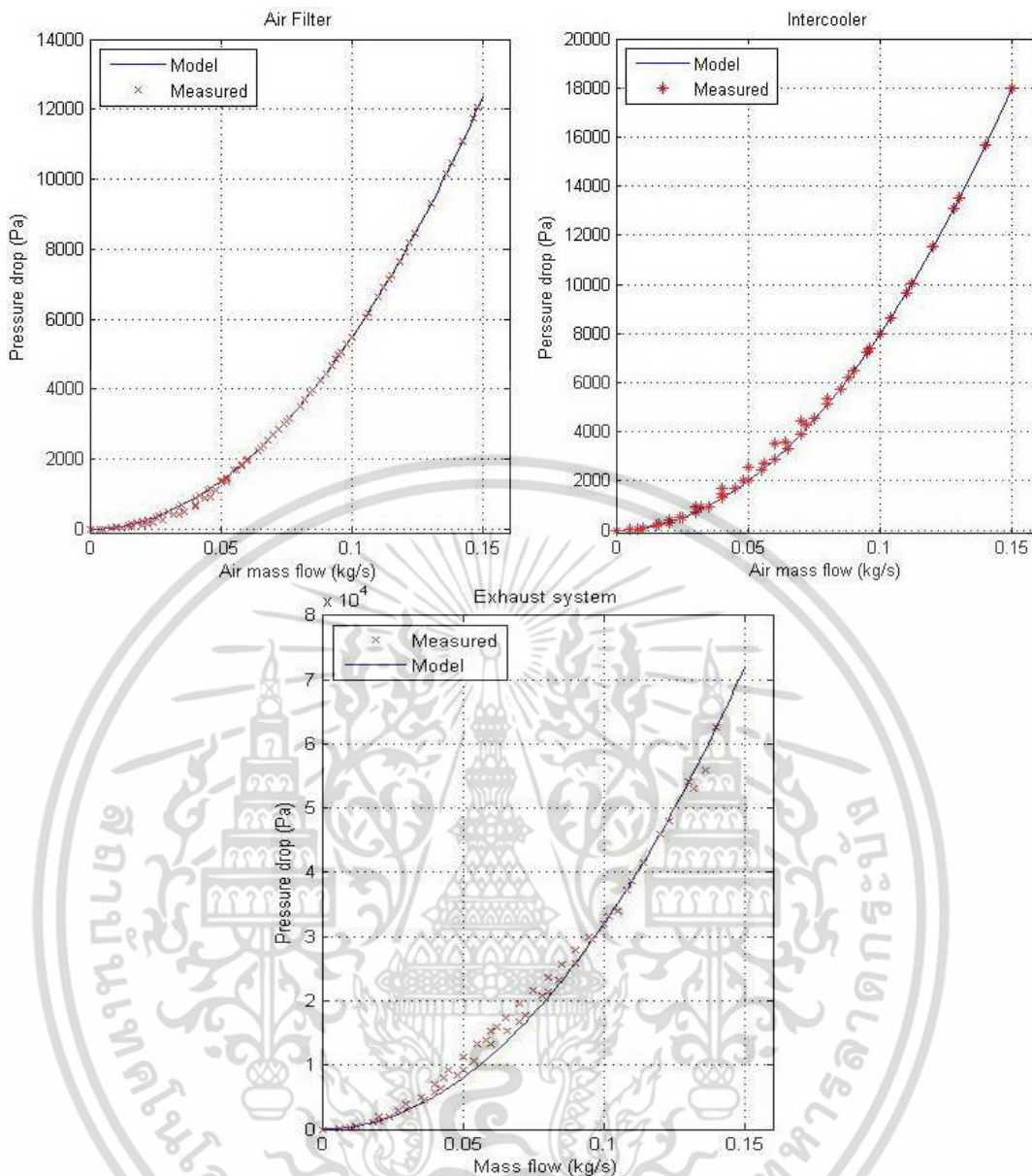
อัตราการไหลของมวลก๊าซของระบบไอเสียเป็นไปตามสมการที่ (2.3) ผลลัพธ์ที่ได้จากสมการเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 2.6

2.2.3.2 อุณหภูมิที่เข้าสู่ระบบไอเสีย

อุณหภูมิที่เข้าสู่ระบบไอเสีย (T_{es_in}) เป็นการผสมกันของก๊าซจากกังหันและเวสต์เกต อุณหภูมินั้นให้เป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงานของการผสมกันของก๊าซแบบแอเดียเบติก โดยสมมติว่าค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงตัวของค่าก๊าซหลังการเผาไหม้มีค่าคงที่

$$T_{es_in} = \frac{T_{t_out} \dot{m}_t + T_{em} \dot{m}_{wg}}{\dot{m}_t + \dot{m}_{wg}} \quad (2.11)$$

โดยที่ T_{t_out} = อุณหภูมิหลังกังหัน (K)



รูปที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์ของ ΔP และ \dot{m} ของแบบจำลองและค่าจากผลการทดลอง[11] ของหม้อกรองอากาศ เครื่องหล่อเย็น และระบบไอเสียจากขั้วไปขวา บนลงล่าง ตามลำดับ

2.3 ระบบการไหลแบบอัดตัว

สมการอัตราการไหลของมวลก๊าซผ่านช่องจำกัดในกระบวนการอัดตัวแบบไอเซนทรอปิก ถูกนำมาใช้อธิบายการไหลของก๊าซผ่านลิ้นเร่งและเวสท์เกต และกำหนดให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในกระบวนการนี้ อัตราการไหลของมวลก๊าซเป็นไปดังสมการ (2.12)[9]

$$\dot{m} = \frac{P_{before}}{\sqrt{RT_{before}}} \Psi(\Pi) C_d A(\alpha) \tag{2.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Pi = \begin{cases} \frac{P_{after}}{P_{before}}, & P_{after} < P_{before} \\ 1, & otherwise \end{cases} \quad (2.13)$$

$$\Psi(\Pi) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1}} (\Pi)^{1/\gamma} \left(1 - (\Pi)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right)^{1/2} & \text{if } \Pi > \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \\ \gamma^{1/2} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} & \text{if } \Pi \leq \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \end{cases} \quad (2.14)$$

โดยที่ P_{before}, T_{before} = ความดันและอุณหภูมิหน้าระบบ (Pa, K)

P_{after} = ความดันหลังลิ้นระบบ (Pa)

C_d = สัมประสิทธิ์อัตราไหล

R = ค่าคงตัวของก๊าซ (J/kgK)

$A(\alpha)$ = พื้นที่เปิด α องศา (m²)

$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ โดยที่ c_p = ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงตัว (J/kgK)

c_v = ความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงตัว (J/kgK)

เมื่ออัตราส่วนความดันน้อยกว่าค่าวิกฤต อัตราการไหลของมวลก๊าซจะมีความเร็วคงที่ และค่า C_d นั้นหาได้จากกราฟทดลอง

2.3.1 ลิ้นเร่ง

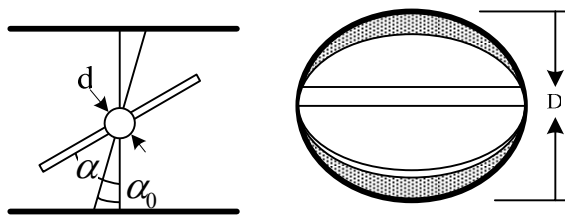
ลิ้นเร่งเป็นอุปกรณ์ควบคุมการไหลของอากาศ มีรูปร่างเป็นแผ่นกลมติดกับแกนหมุนดังรูปที่ 2.7 เมื่อลิ้นเร่งปิดเต็มที่มุมของลิ้นเร่งจะไม่เป็นศูนย์ อัตราการไหลของมวลอากาศหาได้จากสมการ (2.12), (2.13) และ (2.14) โดยมีพื้นที่เปิดลิ้นเร่ง ($A_{th}(\alpha)$) เป็นไปตามสมการ (2.15)

$$A_{th}(\alpha) = \frac{\pi D^2}{4} \left(1 - \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_0}\right) + \frac{D^2}{2} \left\{ \frac{k}{\cos \alpha} (\cos^2 \alpha - k^2 \cos^2 \alpha_0)^{1/2} - \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_0} \sin^{-1} \left(\frac{k \cos \alpha_0}{\cos \alpha} \right) - k(1 - k^2)^{1/2} + \sin^{-1} k \right\} \quad (2.15)$$

โดยที่ D = เส้นผ่าศูนย์กลางรูเสื่อลิ้นเร่ง (m)

α = มุมของแผ่นลิ้นเร่ง (rad)

$k = d/D$ โดย d คือเส้นผ่าศูนย์กลางแกนลิ้นเร่ง (m)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของลิ้นเร่ง

จากสมการ (2.15) จะเห็นได้ว่าสมการมีความซับซ้อนมาก เราสามารถลดความยุ่งยากของสมการ (2.15) โดยหันมาใช้สมการของ Nyberg และ Nielsen (1997)[10] ตามสมการที่ (2.16) แทนได้

$$C_d(\alpha)A_{th}(\alpha) = A_1(1 - \cos(a_2\alpha^2 + a_1\alpha + a_0)) + A_0 \quad (2.16)$$

โดยที่ A_0 = พื้นที่รูรั่วเมื่อลิ้นเร่งปิดสนิท (m^2)

A_1 = พื้นที่ของแผ่นลิ้นเร่ง (m^2)

a_0, a_1, a_2 = ค่าคงที่หาได้จากการทดลอง

2.3.2 เวสท์เกต

เวสท์เกตคือตัวควบคุมประตูไอเสีย ทำหน้าที่คอยคุมไม่ให้แรงดันในท่อรวมไอดีสูงเกินกว่าที่กำหนด เพื่อไม่ให้เครื่องยนต์เป็นอันตรายจากแรงดัน อัตราการไหลของมวลก๊าซผ่านเวสท์เกตนั้น ใช้สมการการไหลผ่านพื้นที่จำกัดพื้นฐานสมการที่ (2.12), (2.13) และ (2.14) โดยกำหนดให้ค่า γ เป็น γ_e และค่าผลของการเปิด-ปิดเวสท์เกต (A_{eff_wg}) เป็นไปตามสมการ (2.17)

$$A_{eff_wg} = C_d A_{wg_max} u_{wg} \quad (2.17)$$

โดยที่ A_{wg_max} = พื้นที่เมื่อเมื่อเวสท์เกตเปิดเต็มที่ (m^2)

$u_{wg} \in (0,1)$ = การเปิดและปิดของเวสท์เกต

2.4 เครื่องยนต์

แบบจำลองเครื่องยนต์ประกอบไปด้วยส่วนของอัตราการไหลของมวลอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ (combustion chamber) อัตราการไหลของมวลก๊าซออกจากห้องเผาไหม้ อุณหภูมิหลังห้องเผาไหม้ และ แรงบิดของเครื่องยนต์

2.4.1 อัตราการไหลของมวลอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้

อัตราการไหลของมวลอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้นั้น ขึ้นกับหลายตัวแปรแต่ตัวแปรที่ส่งผลกระทบมากที่สุดคือความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ความดันในท่อร่วมไอดี และอุณหภูมิในท่อร่วมไอดี กำหนดให้แบบจำลองไม่มีการไหลกลับของไอเสียจากห้องเผาไหม้ และระบบลิ้นไอดีไม่ใช่ระบบแปรผันได้จากสมการพื้นฐานของ Heywood (1988)[9] จะได้อัตราการไหลของมวลอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ (\dot{m}_{cyl}) ดังสมการ (2.18)

$$\dot{m}_{cyl} = \eta_v \frac{V_d}{60n_r RT_{im}} N_e P_{im} \quad (2.18)$$

โดยที่ n_r = จำนวนรอบการหมุนของเพลาคือเหวี่ยงในหนึ่งวัฏจักร
 η_v = ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร
 V_d = ปริมาตรกระบอกสูบ (m^3)
 N_e = อัตราเร็วรอบของการหมุนของเพลาคือเหวี่ยง (RMP)
 R = ค่าคงตัวของก๊าซ

ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรจะเป็นการวัดสมรรถนะในการบีบอัดของกระบอกสูบ ช่องไอดี และวาล์วไอดี ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรของวัฏจักรอุดมคติที่ไม่ขึ้นกับความเร็วรอบของเครื่องยนต์สามารถหาได้จากสมการ (2.19)

$$\eta_v = \left(\frac{M}{M_a} \right) \left(\frac{P_{im}}{P_{ic}} \right) \left(\frac{T_{ic}}{T_{im}} \right) \left(\frac{1}{1 + (F/A)} \right) \left\{ \frac{r_c}{r_c - 1} - \frac{1}{\gamma(r_c - 1)} \left[\left(\frac{P_{em}}{P_{im}} \right) + (\gamma - 1) \right] \right\} \quad (2.19)$$

โดยที่ M = น้ำหนักโมเลกุลของก๊าซก่อนลิ้นไอดี (kg)
 M_a = น้ำหนักโมเลกุลของอากาศ (kg)
 r_c = อัตราส่วนการอัดในกระบอกสูบ
 F/A = อัตราส่วนระหว่างเชื้อเพลิงต่ออากาศ

เมื่อ $P_{em}/P_{im} = 1$ พจน์ในวงเล็บปีกกาจะเท่ากับหนึ่ง นอกจากนี้เราสามารถใช้อัตราการไหลของมวลอากาศจากกราฟที่ความสัมพันธ์อยู่ในรูปสมการ $\eta_v = f(P_{im}, N_e)$ เมื่อ $\lambda \approx 1$ ในอีกกรณีหนึ่ง เราสามารถประมาณค่าอัตราการไหลของมวลอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ตามสมการที่ (2.20)

$$\dot{m}_{cyl} = (a_0 P_{im} + a_1) \frac{V_d N_e}{60 n_r RT_{im}} \quad (2.20)$$

โดยที่ a_0 และ a_1 เป็นค่าคงที่

ค่าคงที่นั้นสามารถหาได้จาก Andersson (2005)[11] ด้วยการใช้ฟังก์ชัน *lscurvefit* ใน Matlab

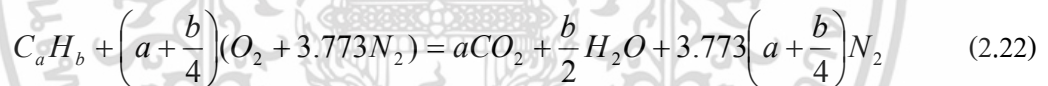
2.4.2 อัตราการไหลของมวลก๊าซที่ออกจากห้องเผาไหม้

อัตราการไหลของมวลก๊าซที่ออกจากห้องเผาไหม้คือการรวมตัวกันในการเผาไหม้ระหว่างมวลอากาศและมวลเชื้อเพลิง และกำหนดให้ไม่มีก๊าซเหลือค้างในห้องเผาไหม้เมื่อลิ้นไอเสียเปิดในจังหวะคาย อัตราการไหลของมวลก๊าซที่ออกจากห้องเผาไหม้ (\dot{m}_{em}) จะเป็นดังสมการ (2.21)

$$\dot{m}_{em} = \dot{m}_{cyl} + \dot{m}_f \quad (2.21)$$

โดยที่ \dot{m}_f = ปริมาณมวลเชื้อเพลิงที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ (kg/s)

อัตราการฉีดเชื้อเพลิงนั้นขึ้นกับอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิง ปกติแล้วจะให้เป็นอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ ซึ่งอัตราส่วนนี้หาได้จากสมการเคมี (2.22) กำหนดให้ในแบบจำลอง หัวฉีดเชื้อเพลิงสามารถฉีดได้แม่นยำ 100%



ในก๊าซธรรมชาติสำหรับใช้ในยานพาหนะ อัตราส่วนจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของสารประกอบของก๊าซธรรมชาติ เช่น ในประเทศไทยอัตราส่วน A/F นั้นอยู่ที่ประมาณ 12.3 [12] สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้มีอัตราส่วน A/F อยู่ที่ 14.5 โดยอ้างอิงจาก Heywood (1988)[9] เมื่อฉีดเชื้อเพลิงออกมาจะมีสถานะเป็นก๊าซ และจะฟุ้งกระจายอยู่บริเวณหน้าช่องลิ้นไอดี เชื้อเพลิงที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้จะไม่เข้าไปทั้งหมดแต่จะเข้าไปเป็นสัดส่วน และมีการหน่วง (delay) ของหัวฉีดที่เกิดขึ้นจาก Electronic Control Unit (ECU) และการหน่วงอื่นๆทำให้การฉีดของหัวฉีดเชื้อเพลิงผิดเพี้ยนไปจากที่ต้องการ อัตราส่วน A/F ที่แท้จริงจึงเป็นไปตามสมการ (2.23)

$$\frac{A}{F} = \frac{\dot{m}_{cyl}}{\dot{m}_f}, \quad \dot{m}_f = X_f \dot{m}_{fv} \quad (2.23)$$

$$\lambda = \frac{A/F}{(A/F)_s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ A/F = อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง

A/F_s = อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ (Stoichiometric)

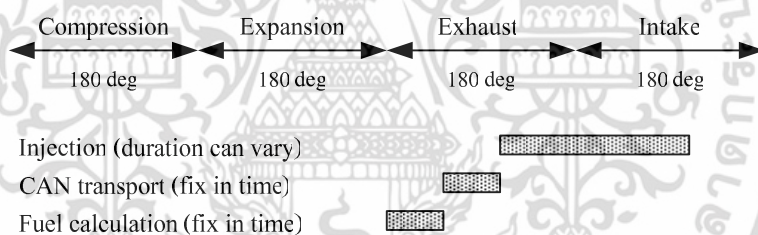
X_f = สัดส่วนเชื้อเพลิงจากหัวฉีดที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้โดยประมาณ

ดังนั้นค่าอัตราการผลิตมวลก๊าซที่ออกจากห้องเผาไหม้จึงเป็นไปตามสมการ (2.24)

$$\dot{m}_{em} = \dot{m}_{cyl} \left(1 + \frac{1}{\lambda(A/F_s)} \right) \quad (2.24)$$

2.4.2.1 การหน่วงเวลาในหัวฉีดเชื้อเพลิง[13]

หัวฉีดเชื้อเพลิงจะมีช่วงเวลาก่อนฉีดเชื้อเพลิงใน 1 วัฏจักรดังรูปที่ 2.8 ซึ่งจะเห็นว่าหัวฉีดไม่ได้ตอบสนองตลอดเวลาที่เครื่องยนต์ทำงาน การหน่วงในหัวฉีดเชื้อเพลิงจะเกิดจากตัวหัวฉีดเองที่ไม่ได้ตอบสนองต่อคำสั่งทันที (หน่วงประมาณ 3-12 มิลลิวินาที) รอบวัฏจักรเครื่องยนต์ และจากสาเหตุอื่นๆ เช่นจาก ECU ความเร็ว 400 Hz จะมีการหน่วงที่เกิดจากการคำนวณ 1/400 วินาที เป็นต้น



รูปที่ 2.8 ช่วงเวลาการทำงานของหัวฉีดใน 1 วัฏจักร

เวลาในการหน่วงของหัวฉีดที่เกิดขึ้น เกิดขึ้นได้ 2 กรณีคือเวลาที่ทำการฉีดเชื้อเพลิงเสร็จสิ้นก่อนสิ้นไอดีปิดและฉีดเสร็จสิ้นหลังสิ้นไอดีปิดดังรูปที่ 2.9 ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (2.25) และ (2.26)

$$t_1 = \frac{2\pi}{n_{cyl}\omega} + \frac{(\theta_{inj} - \theta_{civ})}{\omega} + t_{cont} \quad (2.25)$$

$$t_2 = \frac{4\pi}{\omega} \quad (2.26)$$

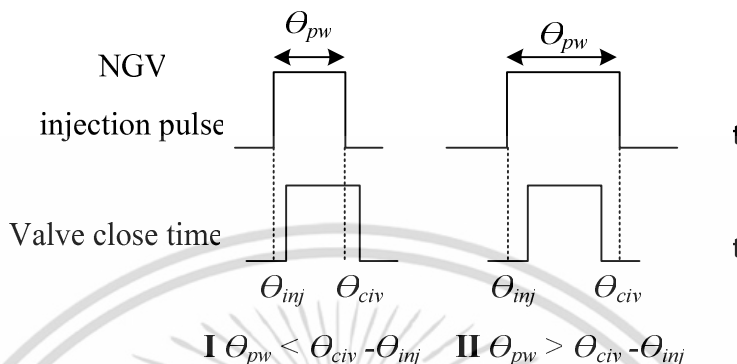
โดยที่ n_{cyl} = จำนวนสูบของเครื่องยนต์

θ_{inj} = เวลาที่หัวฉีดเริ่มทำการฉีดเชื้อเพลิง โดยแปลงเป็น rad

θ_{civ} = เวลาที่สิ้นไอดีปิด โดยแปลงเป็น rad

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ω = ความเร็วเครื่องยนต์ (rad/s)
- t_{cont} = เวลาการหน่วงที่เกิดจากการตอบสนองของหัวฉีด, การคำนวณของ ECU, CAN-bus transport และอื่นๆที่มีค่าคงที่ (s)



รูปที่ 2.9 ช่วงเวลาที่หัวฉีดทำงานและช่วงเวลาที่ลิ้นไอดีเปิด

มวลเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ที่มีการหน่วงนั้นจะเป็นไปตามสมการ (2.27)

$$\dot{m}_{fv} = \begin{cases} \dot{m}_f(t - t_1) & \text{if } \theta_{pw} < \theta_{civ} - \theta_{inj} \\ Km_f(t - t_1) + (1 - K)\dot{m}_f(t - (t_1 + t_2)) & \text{else} \end{cases} \quad \text{others} \quad (2.27)$$

$$K = \frac{\theta_{civ} - \theta_{inj}}{\theta_{pw}} \quad (2.28)$$

โดยที่ θ_{pw} = ความกว้างของสัญญาณสั่งฉีด (injection pulse) (s)

\dot{m}_f = มวลเชื้อเพลิงที่ฉีดออกมาจากหัวฉีด (kg)

2.4.3 อุณหภูมิขาเข้าท่อร่วมไอเสีย

อุณหภูมิของมวลอากาศที่เข้าไปในท่อร่วมไอเสียนั้นสำคัญมากเพราะเป็นตัวกำหนดพลังงานที่จะถ่ายเทความร้อนรวมทั้งกำหนดค่าเอนทัลปีด้วย ก๊าซจะถ่ายเทความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมเมื่อไหลผ่านท่อทำให้อุณหภูมิลดลง กำหนดให้เป็นการไหลเป็นการไหลในท่อตรงที่มีอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมคงที่ การลดลงของอุณหภูมิเป็นฟังก์ชันของอัตราการไหลของมวลก๊าซและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในซึ่งขึ้นกับการกำหนดความสัมพันธ์ จากสมการของ Eriksson (2002)[14]

$$T_e = T_{e0} + \Delta T_{e\max} \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}_{e\max}} \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\dot{m}_{pipe} = \frac{\dot{m}_e}{n_{pipe}} \quad (2.30)$$

$$T_{em_in} = T_a + (T_e - T_a) e^{\frac{-h_{tot}\pi D_{em} l_{em}}{\dot{m}_{pipe} c_p}} \quad (2.31)$$

โดยที่ D_{em} = เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อไอเสียรวม (m)

l_{em} = ความยาวของท่อไอเสียรวม (m)

n_{pipe} = จำนวนท่อรวมไอเสีย

h_{tot} = ผลรวมของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในและภายนอก

ในกรณีที่เป็นเครื่องยนต์เทอร์โบค่า h_{tot} สามารถกำหนดเป็นค่าคงที่ได้เนื่องจากมีอัตราการไหลของมวลก๊าซมากพอ ค่าตัวแปรสามารถหาได้จากผลการทดลองโดยใช้ฟังก์ชัน *lsqcurvefit* ใน Matlab

2.4.4 แรงบิดของเครื่องยนต์

กำลังบิดของเครื่องยนต์ขึ้นอยู่กับพื้นฐานของความดันยังผลเฉลี่ยเบรก (BMEP) ที่ได้จากนิยามของงานบ่งชี้วรรวมยอดและนิยามงานเสียดทานรวม เมื่อเขียนให้อยู่ในรูปของความดันยังผลเฉลี่ย จะนำไปดังสมการ (2.32)

$$\tau_e = \frac{BMEP \cdot V_d}{2\pi} \quad (2.32)$$

$$BMEP = IMEP - PMEP - FMEP \quad (2.33)$$

โดยค่าความดันยังผลเฉลี่ยความเสียดทาน (FMEP) ความดันยังผลเฉลี่ยการบีบ (PMEP) และความดันยังผลเฉลี่ยงานบ่งชี้วรรวมยอด (IMEP) เป็นไปตามสมการ (2.34), (2.35) และ (2.36) ตามลำดับ

$$IMEP = \dot{m}_{cyl} \frac{120}{N_e} \frac{q_{HV}}{\lambda \cdot \left(\frac{A}{F}\right)_s} \frac{\min(\lambda, 1)}{V_d} \eta_e \quad (2.34)$$

$$PMEP = P_{em} - P_{im} \quad (2.35)$$

$$FMEP = 100000 \cdot \left[0.97 + 0.15 \left(\frac{N_e}{1000} \right) + 0.05 \left(\frac{N_e}{1000} \right)^2 \right] \quad (2.36)$$

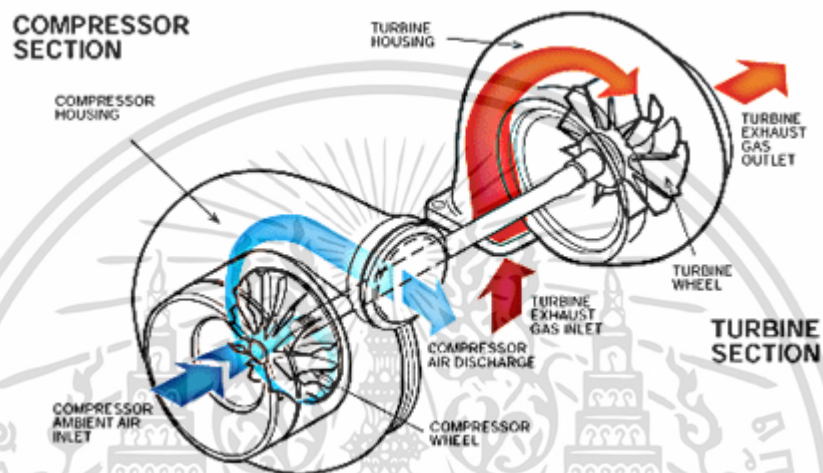
โดยที่ q_{HV} = Lower heating value (J/Kg)

η_e = ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์โดยรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 เทอร์โบชาร์จ

เทอร์โบชาร์จเป็นกลไกที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครื่องยนต์โดยการเพิ่มปริมาณอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ไอเสียจะหมุนกังหันไอเสียด้วยการไหลและการขยายตัวของไอเสียที่ถูกส่งเข้ามาที่กังหันไอเสีย กังหันไอเสียที่ติดตั้งอยู่บนแกนเดียวกันอีกฟากหนึ่งก็จะหมุนดูดอากาศแล้วอัดเข้าสู่กระบอกสูบซึ่งเป็นดังรูปที่ 2.10 ในแบบจำลองของเทอร์โบชาร์จจะประกอบไปด้วยแบบจำลองย่อยๆอีก 3 แบบจำลองคือ คอมเพรสเซอร์ กังหัน และความเร็वलวดของเทอร์โบชาร์จ



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของเทอร์โบชาร์จที่ใช้ในรถยนต์[15]

ในข้อมูลของคอมเพรสเซอร์และกังหันจะมีการอ้างอิงถึง Corrected Mass Flow ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากโรงงานผู้ผลิต โดยเทียบกับอัตราการไหลของมวลก๊าซที่อุณหภูมิและความดันอ้างอิง โดยจะเป็นไปตามสมการ (2.37)

$$\dot{m}_{corr} = \dot{m} \frac{\sqrt{T_0 / T_{std}}}{P_0 / P_{std}} \quad (2.37)$$

โดยที่ T_{std} = อุณหภูมิอ้างอิง (K)

P_{std} = ความดันอ้างอิง (Pa)

2.5.1 คอมเพรสเซอร์

คอมเพรสเซอร์เป็นส่วนที่ดูดอากาศและอัดอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ด้วยปริมาณที่มากกว่าปกติ ค่า γ ในสมการต่างๆของคอมเพรสเซอร์กำหนดให้เป็น γ_a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1.1 อัตราการไหลของมวลอากาศ

สมมติว่าอัตราการไหลของมวลอากาศสามารถทำให้เป็นค่าปกติ (normalize) ได้ตามแบบจำลองของ Jensen และ Kristensen (1991)[16] จากความสัมพันธ์ระหว่าง Ψ_{com} และ Φ_{com} เราจะสามารถหาอัตราการไหลของมวลอากาศได้ตามสมการ (2.38) และค่าตัวแปรหาได้โดยใช้ฟังก์ชัน *lsqcurvefit* ในโปรแกรม MATLAB

$$\dot{m}_{com} = \left(\frac{P_{af}}{RT_{af}} \frac{\pi}{4} D_c^2 U_{com} \right) \Phi_{com} \quad (2.38)$$

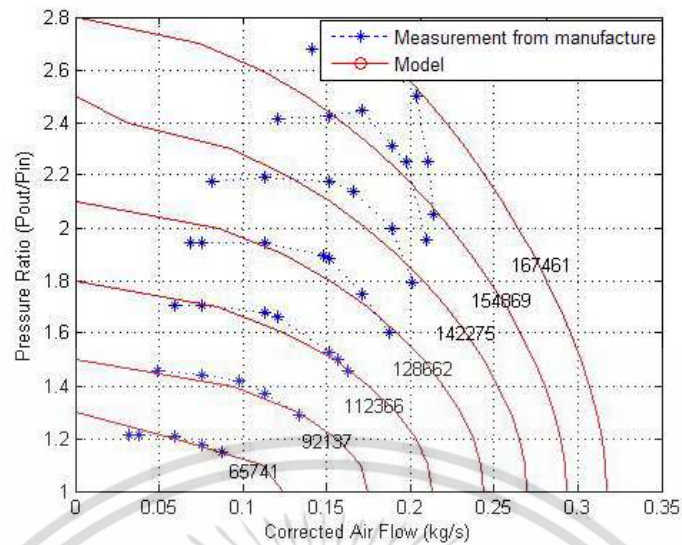
$$U_{com} = \omega_{TC} \frac{D_c}{2} \quad (2.39)$$

$$\Phi_{com} = \sqrt{\frac{1 - \min(K_1 \Psi_{com}^2, 1)}{K_2}} \quad (2.40)$$

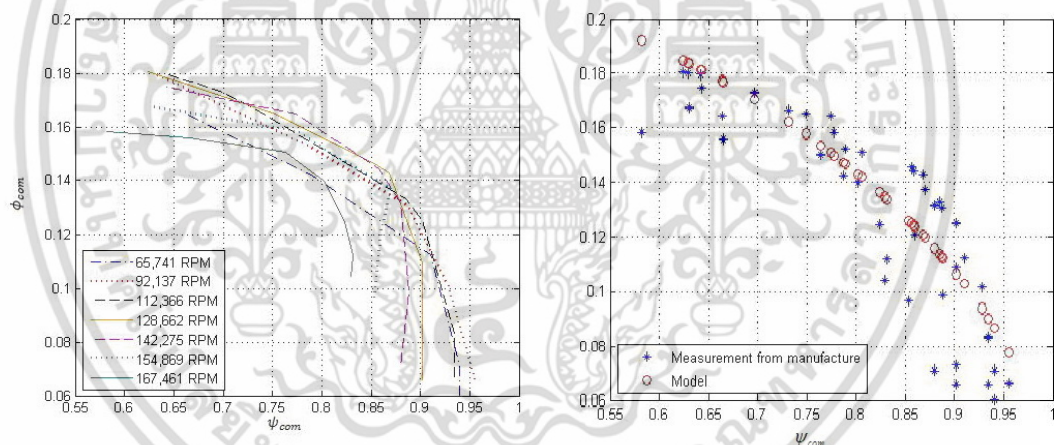
$$\Psi_{com} = c_p T_{af} \frac{\Pi_{com}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\frac{1}{2} U_{com}^2} \quad (2.41)$$

โดยที่ K_1, K_2 = ค่าคงที่
 D_c = เส้นผ่าศูนย์กลางของใบพัดคอมเพรสเซอร์ (m)
 c_p = ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงตัว (J/kgK)
 ω_{TC} = ความเร็วของเทอร์โบชาร์จ (rad/s)
 $\Pi_{com} = \frac{P_{com}}{P_{af}}$

จากสมการข้างต้นความสัมพันธ์ระหว่าง Π_{com} และ Corrected Mass Flow ที่ได้จากแบบจำลองและข้อมูลจากโรงงานจะได้กราฟที่แสดงดังรูปที่ 2.11 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Ψ_{com} และ Φ_{com} ที่ได้จากแบบจำลองและข้อมูลจากโรงงานแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Π_{com} และ Corrected Mass Flow จากแบบจำลอง (สีแดง) และข้อมูลจากโรงงาน (สีน้ำเงิน)



รูปที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Ψ_{com} และ Φ_{com} จากข้อมูลโรงงานที่ความเร็วรอบต่างๆกัน (ซ้าย) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Ψ_{com} และ Φ_{com} จากแบบจำลองและข้อมูลจากโรงงาน (ขวา)

2.5.1.2 ประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์[8]

ประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์เป็นแบบจำลองที่อยู่บนพื้นฐานของแบบจำลองของ Guzzella และ Amstutz ซึ่งได้มีการปรับปรุงให้ดีขึ้น ค่าตัวแปร Q หาได้จากฟังก์ชัน *lsqcurvefit* ในโปรแกรม MATLAB และเพื่อให้เป็นการแน่ใจว่าค่าประสิทธิภาพจะไม่เป็นจำนวนเชิงซ้อน กำหนดให้ค่า $\Pi_{com} \geq 1$

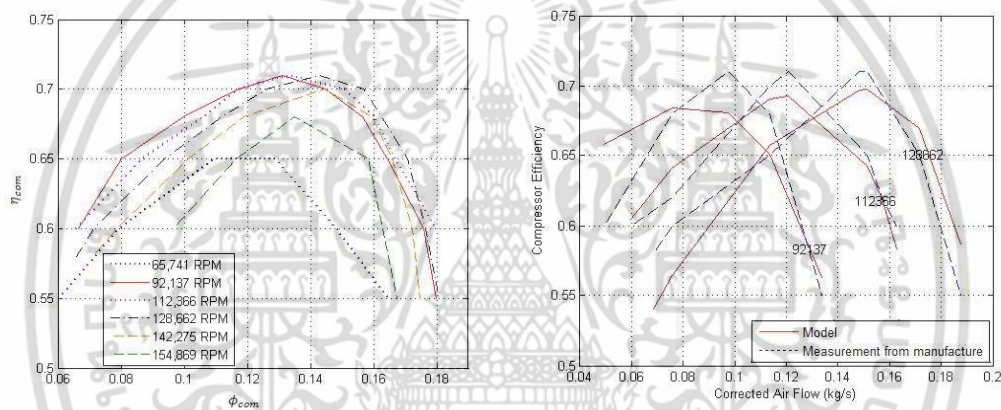
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\eta_{com} = \eta_{com_max} - X^T Q X \quad (2.42)$$

$$X = \left[\begin{array}{c} \dot{m}_{com_corr} - \dot{m}_{com_max} \\ 1 + \sqrt{\Pi_{com} - 1} - \Pi_{com_max} \end{array} \right] \quad (2.43)$$

โดยที่ Q = เมทริกซ์มิติ 2 x 2

\dot{m}_{com_corr} = Corrected Mass Flow ของอัตราการใช้ไหลของมวลอากาศของคอมเพรสเซอร์ ซึ่งประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์สามารถแสดงอยู่ในรูปความสัมพันธ์ได้ โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง η_{com} และ ϕ_{com} จากข้อมูลโรงงานและกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง η_{com} และ \dot{m}_{com_corr} จากแบบจำลองที่ได้จากสมการข้างบนเปรียบเทียบกับข้อมูลจากโรงงานจะเป็นกราฟดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง η_{com} และ ϕ_{com} จากข้อมูลโรงงานที่ความเร็วรอบต่างๆกัน (ซ้าย) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง η_{com} และ \dot{m}_{com_corr} จากแบบจำลองเปรียบเทียบกับข้อมูลจากโรงงาน (ขวา)

2.5.1.3 อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากคอมเพรสเซอร์

ได้มาจากการแปลงสมการประสิทธิภาพของ Heywood[9] กลับมาจะได้ดังสมการ

$$T_{com} = T_{af} \left(1 + \frac{\Pi_{com}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\eta_{com}} \right) \quad (2.44)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1.4 แรงบิดของคอมเพรสเซอร์

แบบจำลองนี้ได้จากการสมดุลของพลังงานคอมเพรสเซอร์ $P = \tau_{com} \omega_{TC}$ ซึ่งเท่ากับงานที่กระทำโดยคอมเพรสเซอร์

$$\tau_{com} = \frac{c_p \dot{m}_{com} (T_{com} - T_{af})}{\omega_{TC}} \quad (2.45)$$

2.5.2 กังหัน

กังหันเป็นส่วนที่ไอเสียจากห้องเผาไหม้ไหลออกมาหมุนใบพัดซึ่งเป็นต้นกำลังของเทอร์โบชาร์จ ค่า γ ในสมการต่างๆของกังหันกำหนดให้เป็น γ_e

2.5.2.1 อัตราการไหลของมวลไอเสีย

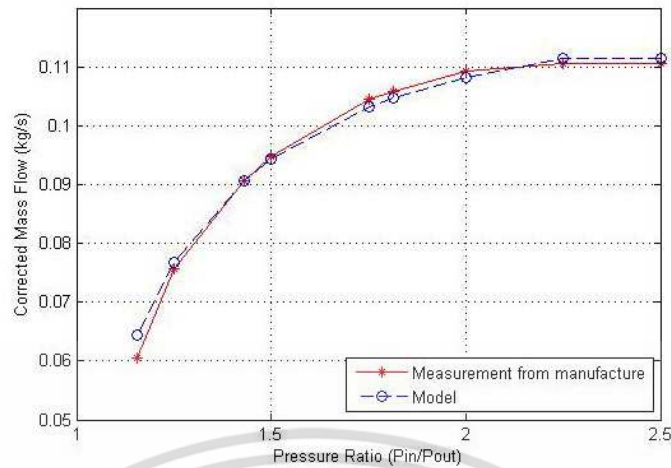
อัตราการไหลของมวลไอเสียที่ผ่านกังหันจะไม่ขึ้นกับความเร็วของเทอร์โบชาร์จ แต่จะขึ้นกับอัตราส่วนแรงดันก่อนและหลังกังหัน Corrected mass flow ของกังหันซึ่งเป็นไปตามสมการ (2.46)

$$\dot{m}_{t_corr} = \begin{cases} k_1 \sqrt{1 - \Pi_t^{k_2}} & , \Pi_t^{k_2} \leq 1 \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (2.46)$$

โดยที่ k_1, k_2 = ค่าคงที่

$$\Pi_t = \frac{P_t}{P_{em}}$$

ค่าตัวแปร k_1, k_2 หาได้จากฟังก์ชัน *lsqcurvefit* ในโปรแกรม MATLAB ซึ่งผลที่ได้จากสมการมีข้อผิดพลาดน้อยกว่า 5% เมื่อเทียบจากข้อมูลของทางโรงงานผู้ผลิต กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง \dot{m}_{t_corr} กับ $1/\Pi_t$ ของกังหันแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\dot{m}_{t,corr}$ กับ $1/\Pi_t$ เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองและข้อมูลจากโรงงาน

2.5.2.2 ประสิทธิภาพของกังหัน

ประสิทธิภาพหาจากอัตราความเร็วใบพัด (BSR) จากสมการของ Watson & Janota (1982)[17] และ Dixon (1998)[18]

$$BSR = \frac{D_t}{2} \frac{\omega_{TC}}{\sqrt{2c_p T_{em} \left(1 - \left(\frac{1}{\Pi_t} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \right)}} \quad (2.47)$$

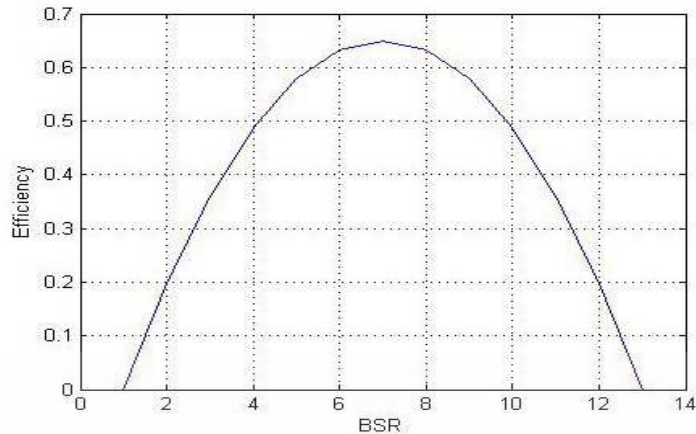
$$\eta_t = \eta_{t,max} \left(1 - \left(\frac{BSR - BSR_{\eta,max}}{BSR_{\eta,max}} \right)^2 \right) \quad (2.48)$$

โดยที่ D_t = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของใบพัดกังหัน (m)

c_p = ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงตัว (J/kgK)

$\left(\frac{1}{\Pi_t} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} < 1$ เพื่อให้แน่ใจว่าค่าที่ได้จะไม่เป็นจำนวนเชิงซ้อน

ความสัมพันธ์ระหว่าง BSR กับ η_t จะเป็นดังกราฟในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง BSR กับ η_t

2.5.2.3 อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากกังหัน

ได้จากการแปลงสมการประสิทธิภาพของ Heywood กลับมาจะได้ดังสมการ (2.49)

$$T_t = T_{em} - T_{em} (1 - \Pi_t^{\gamma'})^{\gamma'} \eta_t \quad (2.49)$$

2.5.2.4 แรงบิดของกังหัน

แรงบิดของกังหันประมาณจากการเปลี่ยนแปลงในอุณหภูมิของก๊าซในช่วงประสิทธิภาพหนึ่งๆ เป็นดังสมการ (2.50)

$$\tau_t = \frac{\eta_t c_p \dot{m}_t T_{em} (1 - \Pi_t^{\gamma'})^{\gamma'}}{\omega_{TC}} \quad (2.50)$$

2.5.3 ความเร็วพลวัตของเทอร์โบชาร์จ

แบบจำลองความเร็ว (ω_{TC}) พลวัตของเทอร์โบชาร์จเป็นไปตามกฎข้อสองของ Newton โดยมีแรงบิดของกังหันเป็นแรงขับและแรงบิดของคอมเพรสเซอร์เป็นโหลด นอกจากนี้ยังมีโหลดที่เกิดจากความเสียดทานเพิ่มเข้าไปในสมการโดยกำหนดให้เป็นค่าคงที่ ความเร็วของเทอร์โบชาร์จสามารถหาได้จากสมการ

$$I_{TC} \dot{\omega}_{TC} = \tau_t - \tau_{com} - \omega_{TC} \cdot friction_{TC} \quad (2.51)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ I_{TC} = ความเฉื่อยของเทอร์โบ (Js^2/rad)
 $friction_{TC}$ = ความเสียดทาน (Js/rad)

2.6 ระบบปริมาตรควบคุม

ระบบปริมาตรควบคุมถูกคั่นอยู่ระหว่างส่วนควบคุมซึ่งเป็นส่วนที่กำหนดความดันและอุณหภูมิในแบบจำลองให้เป็นพลวัตโดยมีปริมาตรคงที่ โดยแบ่งเป็น 2 รูปแบบ รูปแบบแรก กำหนดให้อุณหภูมิเข้าและออกจากระบบมีค่าคงที่ และเป็นไปตามกฎทรงมวล รูปแบบที่ 2 นั้นอยู่บนพื้นฐานกฎการอนุรักษ์พลังงานและกฎทรงมวล โดยความดันนั้นได้มาจากกฎของก๊าซในอุดมคติ ส่วนอุณหภูมินั้นได้มาจากกฎการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งความแตกต่างระหว่างรูปแบบทั้งสองสามารถดูได้ใน Hendricks (2001)[19]

รูปแบบที่ 1.

$$\frac{dP}{dT} = \frac{RT}{V} (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}) \quad (2.52)$$

รูปแบบที่ 2.

$$m = \frac{PV}{RT} \quad (2.53)$$

$$\frac{dP}{dT} = \frac{RT}{V} (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}) + \frac{mR}{V} \frac{dT}{dt} \quad (2.54)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{mc_v} [\dot{m}_{in} c_v (T_{in} - T) + R(\dot{m}_{in} T_{in} - \dot{m}_{out} T) + \dot{Q}] \quad (2.55)$$

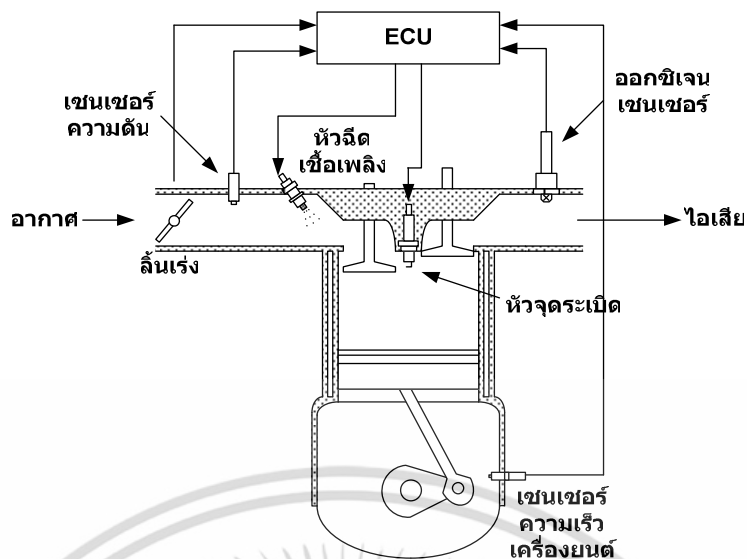
โดยที่ R = ค่าคงตัวของก๊าซ (J/kgK)

\dot{Q} = ค่าอัตราการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างภายในและภายนอกระบบ (J/s)

2.7 กำหนดเวลาของตัวรับรู้ออกซิเจน

ในการควบคุมอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงนั้นเราจำเป็นต้องใช้ตัวรับรู้ออกซิเจน (Universal exhaust gas oxygen sensor, UEGO) มาวัดค่าของไอเสียที่ออกมาจากหม้อเผาไหม้ว่าการเผาไหม้เกิดขึ้นสมบูรณ์หรือไม่ และโดยปกติตัวรับรู้ออกซิเจนจะติดตั้งอยู่หลังลิ้นไอเสียดังแสดงในรูปที่

2.16



รูปที่ 2.16 ตำแหน่งที่ติดตั้งตัวรับรู้ออกซิเจน

ทำให้ค่า λ ที่วัดได้มีค่าหนึ่งเวลาเกิดขึ้น ค่าหนึ่งเวลาจากตัวรับรู้ออกซิเจนสามารถหาได้จากฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ดังสมการ (2.56) [20]

$$\lambda_d = \frac{\lambda e^{-T_d s}}{T_s s + 1} \tag{2.56}$$

โดยที่ T_s = ค่าเวลาคงที่ของตัวรับรู้ออกซิเจน (s)

T_d = Transport delay จากหัวฉีดไปตัวรับรู้ออกซิเจน (s)

และค่า T_d สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.57)

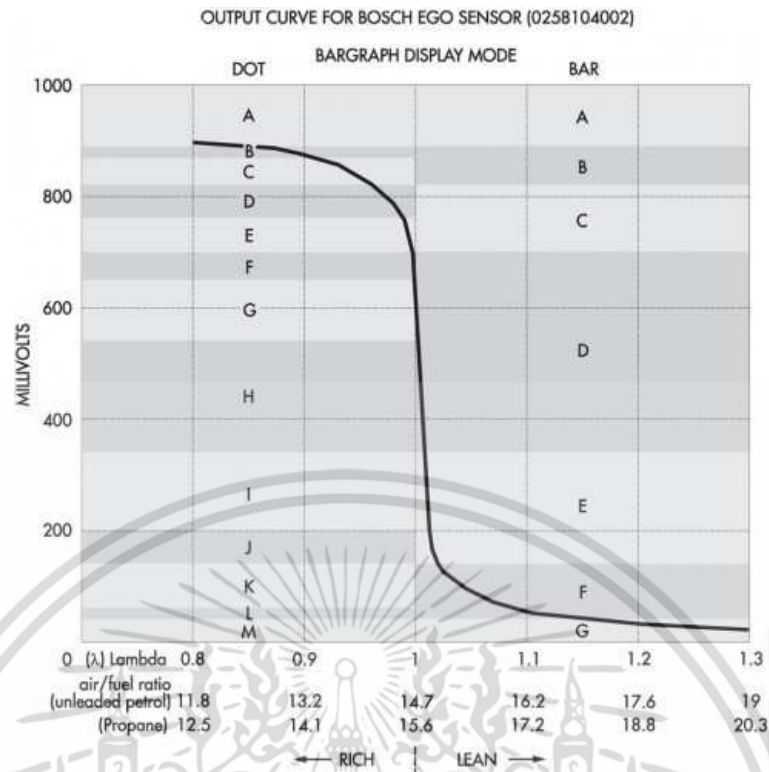
$$T_d = \frac{120}{N} + \frac{\rho_{im}}{\dot{m}_{cyl}} (l_{im} A_{im} + 0.5 l_{em} A_{em}) \tag{2.57}$$

โดยที่ ρ_{im} = ความหนาแน่นของอากาศที่ห้องร่วมไอดี

l_{im}, A_{im} = ความยาวและพื้นที่หน้าตัดของท่อร่วมไอดี

l_{em}, A_{em} = ความยาวและพื้นที่หน้าตัดของท่อร่วมไอเสีย

นอกจากนี้ตัวรับรู้ออกซิเจนแต่ละยี่ห้อแต่ละรุ่นจะมีข้อจำกัดในการวัดค่า λ ได้ไม่เท่ากัน โดยทั่วไปแล้วจะอยู่ในช่วง 0.8-1.2 ดังแสดงในรูป 2.17



รูปที่ 2.17 ค่าเอาต์พุตและช่วงของค่า λ ที่สามารถวัดได้[21]

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีแบบจำลองเครื่องยนต์เทอร์โบแบบจุดระเบิดด้วยประกายไฟซึ่งพื้นฐานความรู้นี้ได้นำไปใช้ในการจำลองเครื่องยนต์สำหรับทดสอบการควบคุมอัตราอากาศต่อเชื้อเพลิงในงานวิจัย ส่วนวิธีการควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียมพีซีวีเฟลตที่นำมาใช้ในงานวิจัยนั้นจะกล่าวถึงรายละเอียดในบทถัดไป

บทที่ 3

โครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network) หรือที่มักจะเรียกสั้น ๆ ว่า ข่ายงานประสาท (neural network หรือ neural net) คือโมเดลทางคณิตศาสตร์สำหรับประมวลผลด้วยการคำนวณแบบคอนเนคชันนิสต์ (connectionist) เพื่อจำลองการทำงานของเครือข่ายประสาทในสมองมนุษย์ ด้วยวัตถุประสงค์ที่จะสร้างเครื่องมือซึ่งมีความสามารถในการเรียนรู้การจดจำแบบรูป (pattern recognition) และการอุปมาความรู้ (knowledge deduction) เช่นเดียวกับความสามารถที่มีในสมองมนุษย์ ปัจจุบันมีการนำโครงข่ายประสาทเทียม มาใช้งานอย่างกว้างขวาง เนื่องจากลักษณะเฉพาะตัวของมัน อย่างเช่นใน พฤติกรรมประดิษฐ์ ปัญญาประดิษฐ์ ระบบควบคุม การทำนาย การตัดสินใจ (decision making) การระบุ (identification) และหุ่นยนต์ แต่ในการแก้ปัญหาส่วนใหญ่ โครงข่ายประสาทอาจต้องใช้โครงข่ายขนาดใหญ่เพื่อให้ได้ข้อผิดพลาดน้อยที่สุด ทำให้ความเร็วอัตราการเข้าสู่จุดที่ต้องการของกระบวนการเรียนรู้โครงข่ายประสาทเทียมมีค่าต่ำ เพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้จึงมีการนำเอาฟังก์ชันเวฟเลต (wavelet) มาใช้ใน โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม โดยใช้เป็นฟังก์ชันพื้นฐานอยู่ในชั้นซ่อน (hidden layer) ซึ่งผลที่ได้เมื่อนำมาใช้กับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นซับซ้อน โครงข่ายประสาทเทียมเวฟเลต (Wavelet Neural Network, WNN) ให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าโครงข่ายประสาทเทียมธรรมดา

โครงข่ายประสาทเทียมฟัซซีเวฟเลตนั้นก็เป็นการรวมกันของโครงข่ายประสาทเทียม วิธีการควบคุมแบบฟัซซี (fuzzy control) และเวฟเลตเข้าไว้ด้วยกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งใช้กฎพื้นฐาน IF-THEN ของฟัซซี

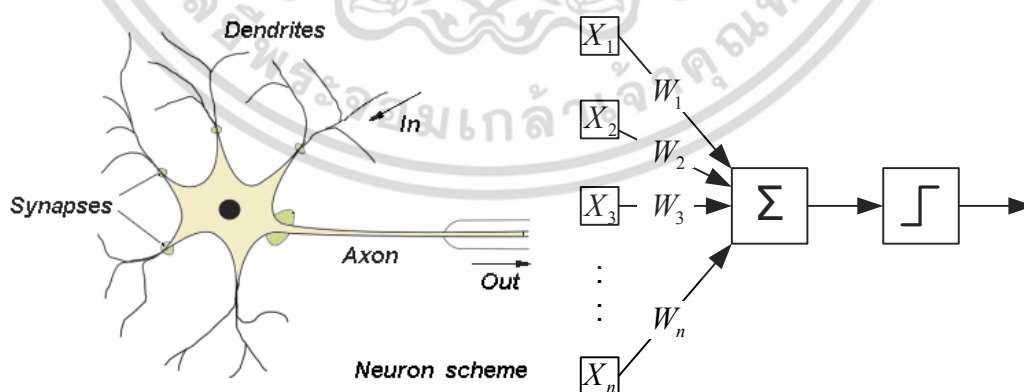
3.1 ทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียมเบื้องต้น

โครงข่ายประสาทเทียมคือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งมีพื้นฐานบนโครงข่ายทางธรรมชาติของสมองซึ่งประกอบไปด้วยเซลล์ประสาทจำนวนหลายหมื่นล้านเซลล์ที่มีการเชื่อมต่อกันอย่างหนาแน่น เซลล์ประสาทมีหน้าที่ในการจัดการกับข้อมูลข่าวสารต่างๆที่เข้ามาในระบบสมองของมนุษย์จัดเป็นระบบที่มีความซับซ้อน ในแต่ละเซลล์ประสาทมีการเชื่อมต่อกับเซลล์ประสาทอื่นประมาณ 100-1,000 เซลล์ จากรูปที่ 3.1 เซลล์ประสาทประกอบไปด้วยตัวเซลล์ (Cell body) หรือโซมา (Soma) มีแขนงที่แยกจากตัวเซลล์คือ แอกซอน (Axon) และ เดนไดรต์ (Dendrite) ในตัวเซลล์มีนิวเคลียส (Nucleus) ซึ่งบรรจุข้อมูลที่จำเป็นในการสร้างส่วนประกอบของเซลล์ประสาท เมื่อเซลล์ประสาทได้รับสัญญาณกระตุ้นจากเซลล์ประสาทอื่นๆผ่านทางเดนไดรต์ และส่งผ่านสัญญาณที่ถูกสร้างขึ้นจากตัวเซลล์ไปตามแอกซอน ซึ่งอยู่ในส่วนท้ายของแขนงที่แยกออกจากตัวเซลล์ และที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนปลายของเส้นแขนงคือไซแนปส์ (Synapse) ซึ่งมีหน้าที่เชื่อมต่อกับเซลล์ประสาทอื่นคือเชื่อมระหว่างแอกซอนกับเดนไดรต์ของเซลล์ประสาทอื่น เมื่อมีสัญญาณกระตุ้นมาถึงส่วนปลายของไซแนปส์จะมีสารเคมีที่เรียกว่า สารสื่อประสาท (Neurotransmitters) ถูกปล่อยออกมา สารสื่อประสาทจะแพร่ข้ามผ่านช่องว่างของไซแนปส์เพื่อกระตุ้นหรือยับยั้งการการส่งผ่านกระแสประสาทซึ่งก็ขึ้นอยู่กับชนิดของไซแนปส์และแนวโน้มของการแพร่ของสัญญาณไฟฟ้าที่มากระตุ้น ในการปรับค่าของไซแนปส์จะขึ้นอยู่กับสัญญาณที่ผ่านเข้ามา ดังนั้นเซลล์ประสาทจะสามารถปรับค่าของไซแนปส์หรือทำการเรียนรู้ในขณะเดียวกันเมื่อมีสัญญาณกระตุ้นเข้ามา

โครงข่ายประสาทเทียมอาจพิจารณาเป็นขั้นตอนทางคณิตศาสตร์โดยตั้งบนพื้นฐานดังต่อไปนี้ หน่วยประมวลผลเรียกว่าเซลล์ประสาท (Neuron) และการส่งผ่านข้อมูลระหว่างเซลล์กระทำได้โดยการเชื่อมโยงเซลล์โดยการเชื่อมโยงแต่ละส่วนจะขึ้นอยู่กับค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) ข้อมูลเอาต์พุตจะถูกกำหนดด้วยฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function) ซึ่งโดยปกติความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของข้อมูลอินพุตที่คูณด้วยค่าถ่วงน้ำหนักกับข้อมูลเอาต์พุตเป็นความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear) เมื่อเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์และเซลล์ประสาทเทียมจะได้ดังนี้

- ตัวเซลล์เปรียบเทียบกับยูนิต (Unit) ของเซลล์ประสาทเทียม
- เดนไดรต์คือส่วนทำหน้าที่รับข้อมูลเข้ามาเปรียบเทียบกับชั้นข้อมูลขาเข้า (Input Layer) ของเซลล์ประสาทเทียม
- แอกซอนคือส่วนที่แปลงข้อมูลที่ได้ประมวลผลเบื้องต้นเป็นผลลัพธ์ที่ต้องการเปรียบเทียบกับชั้นข้อมูลขาออก (Output Layer) ของเซลล์ประสาทเทียม
- ไซแนปส์คือเส้นประสาทที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อเพื่อสื่อสารกับนิวรอนอื่น เปรียบเทียบกับค่าถ่วงน้ำหนักของเซลล์ประสาทเทียม



รูปที่ 3.1 โครงข่ายประสาทของมนุษย์ (ซ่าย) [22] เปรียบเทียบกับ โครงข่ายประสาทเทียมเบื้องต้น (จวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากโครงข่ายประสาทเทียมเบื้องต้นรูปที่ 3.1 ข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่โครงข่ายประสาทเทียมคือ X_1, X_2, \dots, X_n ข้อมูลแต่ละตัวจะถูกคูณด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก W_1, W_2, \dots, W_n ตามลำดับจากนั้นข้อมูลจะถูกรวมเข้าด้วยกัน ก่อนที่จะแปลงข้อมูลเป็นผลลัพธ์แล้วส่งให้เซลล์อื่นนำไปประมวลผลในลักษณะเดียวกันเพื่อสร้างผลลัพธ์ขั้นสุดท้าย สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หนึ่งหน่วยเซลล์ประสาทเทียมสามารถแสดงได้ดังสมการ (3.1)

$$y = f\left(\sum_{i=1}^n W_i X_i + b\right) \quad (3.1)$$

โดยที่ $f(\bullet)$ = ฟังก์ชันกระตุ้น

X_i = อินพุตของเซลล์ประสาทเทียมที่ i เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, n$

W_i = ค่าถ่วงน้ำหนักที่ i เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, n$

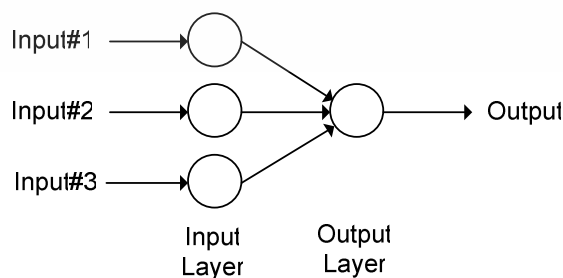
b = ค่าไบแอสของเซลล์ประสาทเทียม

3.1.1 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียม

ในการสร้างโครงข่ายประสาทขึ้นมาใช้งานนั้น ต้องใช้เซลล์ประสาทเทียมที่มีคุณลักษณะต่างกันมาเชื่อมต่อเข้าด้วยกันให้เกิดลักษณะของโครงข่ายเป็นชั้นๆ ที่เรียกว่า ชั้นเชื่อม (Layer) ซึ่งแต่ละเซลล์ที่อยู่ชั้นเดียวกันจะไม่เชื่อมต่อถึงกัน โครงสร้างเชื่อมต่อของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถแบ่งได้เป็นสามประเภทคือ

3.1.1.1 โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว (Single layer neural network)

มีโครงสร้างประกอบไปด้วยชั้น 2 ชั้น ได้แก่ ชั้นอินพุต และ ชั้นเอาต์พุต สาเหตุที่จัดเป็นโครงข่ายแบบชั้นเดียวก็เพราะเรานับชั้นเอาต์พุตชั้นเดียวเป็นของเซลล์ประสาท สำหรับชั้นอินพุตนั้นเราไม่พิจารณาเป็นชั้นของเซลล์ประสาทเพราะเป็นชั้นที่ไม่มีการประมวลใดๆ ทำหน้าที่เพียงแค่รับข้อมูลอินพุตมาเท่านั้น ดัง โครงสร้างตัวอย่างในรูปที่ 3.2

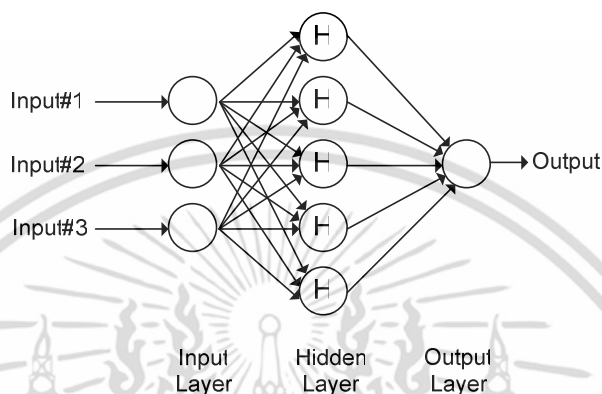


รูปที่ 3.2 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.2 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (Multi layer neural network)

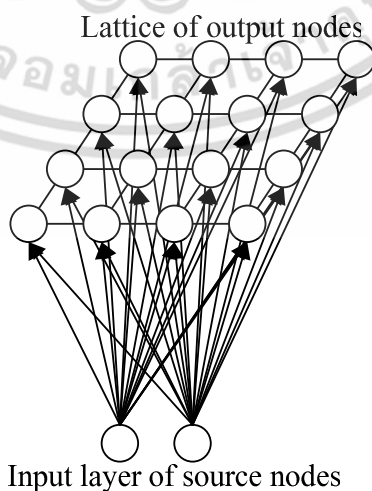
มีโครงสร้างประกอบขึ้นจากการจัดเรียงของเซลล์ประสาทตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไป (ไม่นับรวมชั้นอินพุต) โดยอยู่ในรูปแบบการทำงานป้อนไปข้างหน้า (Feed-Forward) ชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นอินพุตและชั้นเอาต์พุตเรียกว่าชั้นซ่อน (Hidden Layer) ซึ่งเป็นชั้นที่เพิ่มความสามารถให้กับโครงข่าย ดังโครงสร้างตัวอย่างในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น

3.1.1.3 โครงข่ายประสาทเทียมแบบโครงผลึกร่างตาข่าย (Lattice neural network)

โครงข่ายอาจประกอบไปด้วยอาร์เรย์ (Array) ของเซลล์มิติเดียวหรือหลายมิติก็ได้ มิติโครงข่ายแบบโครงผลึกร่างตาข่ายคือมิติของการจัดเรียงเซลล์ประสาท หรือจะอธิบายอย่างง่าย ๆ เช่น การจัดโครงข่ายแบบมิติเดียวคือการจัดเรียงเซลล์แบบแนวนอนหรือแนวตั้ง การจัดโครงข่ายแบบ 2 มิติเป็นการจัดเรียงเซลล์ทั้งในแนวตั้งและแนวนอน ดังโครงสร้างตัวอย่างในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมแบบโครงผลึกร่างตาข่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาท

เมื่อสร้างโครงข่ายประสาทจะต้องมีการฝึกสอนเพื่อให้มีคุณลักษณะตามต้องการ ซึ่งการสอนโครงข่ายประสาทก็คือการหาค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมให้แก่โครงข่ายนั้นๆ ซึ่งสามารถแบ่งการเรียนรู้ได้ออกเป็น 2 ลักษณะ

3.1.2.1 การเรียนรู้แบบมีการสอน (Supervised learning)

การเรียนรู้แบบนี้จะมีชุดข้อมูลที่เรียกว่าชุดฝึกสอน (Training pattern) โดยในชุดฝึกสอนจะมีข้อมูลอินพุตและเอาต์พุต โครงข่ายประสาทเทียมจะถูกฝึกสอนจากข้อมูลในชุดฝึกสอนนี้เพื่อหาค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสม โดยนำเอาต์พุตที่ได้จากโครงข่ายประสาทไปเปรียบเทียบกับเอาต์พุตที่ต้องการจากชุดฝึกสอน และนำค่าความผิดพลาดที่ได้จากความแตกต่างของเอาต์พุตทั้งสองป้อนกลับเข้าไปใหม่เพื่อคำนวณหาค่าถ่วงน้ำหนักใหม่ เพื่อให้ค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด

3.1.2.2 การเรียนรู้แบบไม่มีการสอน (Unsupervised learning)

การเรียนรู้วิธีการนี้เป็นการเรียนรู้ที่ไม่ต้องอาศัยชุดฝึกสอน การปรับค่าถ่วงน้ำหนัก เซลล์ประสาทจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวเอง นั่นคือไม่มีการกำหนดค่าที่ถูกต้องว่าควรจะใช้ค่าถ่วงน้ำหนักเท่าไร แต่เซลล์จะอาศัยการป้อนกลับไปของค่าความผิดพลาดและวิเคราะห์หาค่าถ่วงน้ำหนักด้วยตัวมันเอง

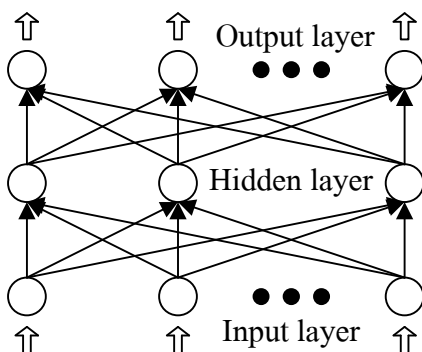
3.1.3 ฟังก์ชันกระตุ้น

ฟังก์ชันกระตุ้นหรือฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) เป็นฟังก์ชันกำหนดค่าเอาต์พุต โดยทั่วไปฟังก์ชันกระตุ้นจะจำกัดค่าเอาต์พุตอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 แต่ในการประยุกต์ใช้บางงานอาจจำเป็นต้องใช้ฟังก์ชันที่ให้ค่าออกมานอกเหนือค่าดังกล่าว ฟังก์ชันกระตุ้นที่นิยมกันอาจแบ่งได้เป็น 3 ชนิดก็คือ ฟังก์ชันเทรสโฮลด์ (Threshold function) ฟังก์ชันเชิงเส้นอิ่มตัว (Saturating linear function) และ ฟังก์ชันซิกมอยด์ (Sigmoid function)

3.2 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ

โครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ (Back Propagation neural network, BP) ประกอบด้วยเซลล์ประสาทเทียมที่เรียงกันอยู่มากกว่า 2 ชั้นซึ่งประกอบด้วยชั้นอินพุต ชั้นซ่อน และชั้นเอาต์พุต ดังโครงสร้างตัวอย่างในรูปที่ 3.5 โครงข่ายชนิดนี้มีลักษณะเป็นโครงข่ายที่ป้อนไปข้างหน้า มีการเชื่อมโยงในแต่ละชั้นแบบต่อถึงกันหมด นั่นคือทุกๆอินพุตจะส่งสัญญาณไปยังทุกๆเซลล์ประสาทในชั้นซ่อนแรก และทุกเซลล์ประสาทในชั้นซ่อนแรกจะส่งสัญญาณไปยังทุกเซลล์ประสาทในชั้นถัดไปจนในที่สุดเซลล์ประสาทในชั้นสุดท้ายจะส่งสัญญาณไปยังทุกเซลล์ประสาทในชั้นเอาต์พุต ขั้นตอนการฝึกสอนสามารถแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนด้วยกันคือ ป้อนข้อมูลอินพุตไปข้างหน้า แพร่ค่าย้อนกลับของค่าผิดพลาดที่เกี่ยวข้อง และ ปรับค่าถ่วงน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ

การป้อนข้อมูลอินพุตไปข้างหน้า จะเริ่มต้นด้วยการนำค่าอินพุตที่ได้รับมาคำนวณหาผลรวมที่ได้รับในแต่ละเซลล์ แล้วส่งผลลัพธ์ไปยังชั้นซ่อนที่ 1 แต่ละเซลล์ในชั้นซ่อนที่ 1 จะทำการคำนวณด้วยฟังก์ชันกระตุ้นในชั้นซ่อนนั้นแล้วส่งผลลัพธ์ไปยังชั้นซ่อนถัดไป และกระทำอย่างนี้ซ้ำๆ จนสุดท้ายแต่ละเซลล์ในชั้นเอาต์พุตจะทำการคำนวณด้วยฟังก์ชันกระตุ้นในชั้นเอาต์พุตเพื่อหาคำตอบหรือผลตอบสนองของโครงข่ายสำหรับแต่ละรูปแบบข้อมูลที่ป้อนให้ วิธีการคำนวณของโครงข่ายลักษณะนี้มีชื่อตามลักษณะดังกล่าวว่า Forward Propagation

ขั้นต่อไปเป็นการคำนวณแบบ Backward Propagation เป็นการนำเอาผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับเอาต์พุตเป้าหมายเพื่อมาคำนวณหาค่าความผิดพลาดที่เกี่ยวข้อง แล้วค่าผลต่างระหว่างเอาต์พุตทั้งสองจะถูกส่งถอยกลับมายังชั้นซ่อนสุดท้ายและส่งต่อไปยังเซลล์ต่างๆภายในชั้นซ่อนนั้น แต่ละโหนดจะได้รับค่าผิดพลาดเพียงบางส่วนขึ้นอยู่กับว่าเซลล์นั้นส่งผลมากหรือน้อยต่อค่าเอาต์พุต เพื่อปรับค่าถ่วงน้ำหนักระหว่างชั้นเอาต์พุตกับชั้นซ่อนสุดท้าย กระบวนการของการส่งค่าความผิดพลาดกลับมานั้นจะซ้ำกับชั้นถัดลงมาอีกจนกระทั่งทุกโหนดในโครงข่ายได้รับส่วนแบ่งค่าความผิดพลาดนั้น

ขั้นตอนสุดท้ายจะนำค่าความผิดพลาดที่ได้มาใช้ในการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก ซึ่งค่าถ่วงน้ำหนักจะเปลี่ยนไปมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของค่าความผิดพลาดที่ได้รับ กระบวนการจะกลับไปกระทำซ้ำในขั้นตอนแรกจนกระทั่งค่าความผิดพลาดที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่าความผิดพลาดต่ำสุดที่กำหนดไว้

จำนวนเซลล์ประสาทในชั้นซ่อนนั้นมีผลต่อระยะเวลาในการฝึกสอนด้วย นั่นคือถ้ามีเซลล์ประสาทมากก็จะใช้เวลามากตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามเซลล์ประสาทจำนวนมากไม่ได้บ่งชี้ว่าโครงข่ายจะมีประสิทธิภาพมากตามไปด้วย ต้องมีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างเพื่อหาโครงข่ายที่เหมาะสมที่สุด

3.3 โครงข่ายประสาทเทียมฟัซซีเวฟเลต[23]

โครงข่ายประสาทเทียมมีจุดเด่นด้านการเรียนรู้จากข้อมูล แต่มีจุดด้อยในการตีความหาเหตุผล โดยไม่สามารถให้เหตุผลได้ว่าเพราะเหตุใดจึงมีข้อสรุปออกมาดังที่ปรากฏที่เอาต์พุตของโครงข่าย จุดด้อยนี้รู้จักกันในนามกล่องดำ (Black box) ในขณะที่ตรรกศาสตร์ฟัซซีมีข้อดีในเรื่องการมีเหตุผลเชิงตรรกะ เข้าใจได้ง่ายเนื่องจากสามารถตีความให้อยู่ในรูปแบบ IF-THEN ซึ่งสอดคล้องกับตรรกะความคิดของมนุษย์ แต่ก็มีข้อเสียคือไม่มีกระบวนการเรียนรู้ปรับแต่งโครงสร้างและตัวแปรต่างๆในระบบ ซึ่งโดยปกติจะต้องกำหนดโดยผู้เชี่ยวชาญ ปัจจุบันได้มีการนำสองศาสตร์นี้มารวมกันกลายเป็นระบบที่มีกระบวนการเรียนรู้ในตนเองและโครงสร้างของระบบสามารถตีความหมายและให้เหตุผลได้เช่นเดียวกับตรรกศาสตร์ฟัซซี

โครงข่ายประสาทเทียมฟัซซีเวฟเลตเองก็เช่นกัน เป็นการรวมกันของโครงข่ายประสาทวิธีการควบคุมแบบฟัซซี และฟังก์ชันเวฟเลตเข้าไว้ด้วยกัน การสังเคราะห์ของการอนุมานของโครงข่ายประสาทเทียมฟัซซีเวฟเลตได้ใช้โครงข่ายประสาทเทียมเวฟเลตมากำหนดค่าที่เหมาะสมของตัวแปรในกฎ IF-THEN เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

3.3.1 ตรรกศาสตร์ฟัซซีแบบ TSK

ในโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมฟัซซีเวฟเลตส่วนของฟัซซีได้ใช้ Takagi-Sugeno-Kang (TSK) fuzzy เป็นพื้นฐาน ซึ่งโดยปกติมักจะนิยมเลือกใช้ในงานที่มีระบบไม่เป็นเชิงเส้น ระบบกฎฟัซซีแบบ TSK ที่ถูกนำเสนอโดย Takagi และ Sugeno ในปี ค.ศ. 1984 และ Sugeno และ Kang ได้นำมาศึกษาวิจัยต่อ ระบบกฎฟัซซีแบบ TSK จะอยู่ในรูปแบบของกฎดังด้านล่าง

$$\begin{aligned} \text{IF } x_1 \text{ is } A_{11} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{12} \text{ and } \dots \text{ and } x_m \text{ is } A_{1m} \text{ THEN } y_1 &= f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \text{IF } x_1 \text{ is } A_{21} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{22} \text{ and } \dots \text{ and } x_m \text{ is } A_{2m} \text{ THEN } y_2 &= f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ &\vdots \\ \text{IF } x_1 \text{ is } A_{n1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{n2} \text{ and } \dots \text{ and } x_m \text{ is } A_{nm} \text{ THEN } y_n &= f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{aligned}$$

โดยที่ x_j = ตัวประกอบที่ j ($j = 1, \dots, m$) ของตัวแปรอินพุต x
 A_{ij} = ฟังก์ชันสมาชิก (antecedent membership function) ของกฎข้อที่ i ($i = 1, \dots, n$)
 y_i = เอาต์พุตของกฎข้อที่ i ($i = 1, \dots, n$)
 f_i = Consequent function ของกฎข้อที่ i ($i = 1, \dots, n$)

ถ้ามีกำหนดให้อินพุตเข้ามาเป็น $x_1 = x'_1, x_2 = x'_2, \dots, x_m = x'_m$ จะได้ค่าฟัซซี (μ_i) ของแต่ละกฎจะเป็น

$$\begin{aligned}\mu_1 &= \min(A_{11}(x'_1), A_{12}(x'_2), \dots, A_{1m}(x'_m)) \\ \mu_2 &= \min(A_{21}(x'_1), A_{22}(x'_2), \dots, A_{2m}(x'_m)) \\ &\vdots \\ \mu_n &= \min(A_{n1}(x'_1), A_{n2}(x'_2), \dots, A_{nm}(x'_m))\end{aligned}$$

ค่าเอาต์พุตของระบบ (u) จะเป็นการหาค่าเฉลี่ยของการถ่วงน้ำหนัก โดยได้จากการดีฟัซซี (defuzzy) ตามสมการ (3.2)

$$u = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i y_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \quad (3.2)$$

3.3.2 เวฟเลตแม่

เวฟเลตแม่ (Mother wavelet) สามารถนิยามได้ตามสมการที่ (3.3)

$$\Psi(x) = |a|^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right), \quad a \neq 0 \quad (3.3)$$

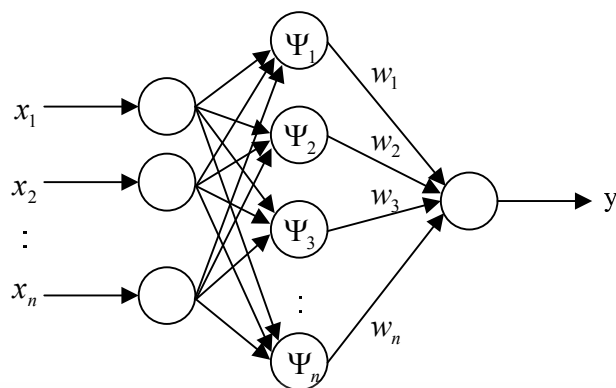
โดย ψ = ฟังก์ชันการเปลี่ยนขนาดและการเลื่อนขนาน
 a, b = การเปลี่ยนขนาดและการเลื่อนขนาน
 x = สัญญาณอินพุต

เมื่อนำมาใช้ที่ชั้นซ่อนของโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อเป็นฟังก์ชันกระตุ้นดังในรูปที่ 3.6 ค่าเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมเวฟเลตจะเป็นไปตามสมการ (3.4)

$$y = \sum_{j=1}^k w_j \Psi_j(x) = \sum_{j=1}^k w_j |a_j|^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{x-b_j}{a_j}\right) \quad (3.4)$$

โดย Ψ_j = ฟังก์ชันเวฟเลตของชั้นซ่อนหน่วยที่ j
 ψ_j = ฟังก์ชันการเปลี่ยนขนาดและการเลื่อนขนานของชั้นซ่อนหน่วยที่ j
 a_j, b_j = ตัวแปรของฟังก์ชันเวฟเลตตามสมการ (3.3)
 w_j = ค่าถ่วงน้ำหนักระหว่างอินพุตและชั้นซ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมเวฟเลต

ภายใต้การการเปลี่ยนขนาดและการเลื่อนขนาดของเวฟเลตจะช่วยดึงลักษณะเด่นที่สำคัญของรูปแบบไม่เป็นเชิงเส้นออกมาใช้ในโครงข่ายประสาทเทียม

3.3.3 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมฟัซซีเวฟเลต

เมื่อนำสมการ (3.4) แทนลงในกฎของฟัซซี TSK โดยกำหนดให้เวฟเลตแม่เป็นเม็กซิกันแฮตเวฟเลต (Mexican Hat wavelet) ซึ่งมีฟังก์ชันดังสมการ (3.5) ซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 3.7

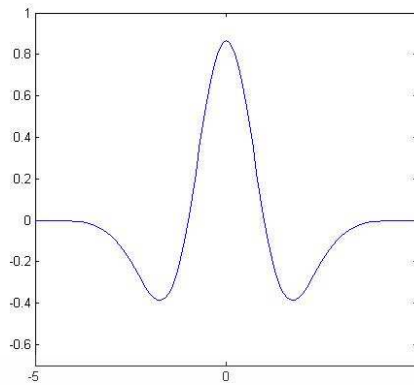
$$\Psi(x) = \frac{2}{\sqrt{3}} \pi^{-1/4} |a|^{-1/2} (1 - z^2) e^{-\frac{z^2}{2}} \quad (3.5)$$

กฎของโครงข่ายประสาทเทียมฟัซซีเวฟเลตจะเป็นไปตามกฎด้านล่าง

$$\begin{aligned} \text{IF } x_1 \text{ is } A_{11} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{12} \text{ and } \dots \text{ and } x_m \text{ is } A_{1m} \text{ THEN } y_1 &= \sum_{i=1}^m w_{i1} (1 - z_{i1}^2) e^{-\frac{z_{i1}^2}{2}} \\ \text{IF } x_1 \text{ is } A_{21} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{22} \text{ and } \dots \text{ and } x_m \text{ is } A_{2m} \text{ THEN } y_2 &= \sum_{i=1}^m w_{i2} (1 - z_{i2}^2) e^{-\frac{z_{i2}^2}{2}} \\ &\vdots \\ \text{IF } x_1 \text{ is } A_{n1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{n2} \text{ and } \dots \text{ and } x_m \text{ is } A_{nm} \text{ THEN } y_n &= \sum_{i=1}^m w_{in} (1 - z_{in}^2) e^{-\frac{z_{in}^2}{2}} \end{aligned}$$

โดย A_{ij} = ฟังก์ชันสมาชิกที่กำหนดให้เป็นฟังก์ชันแบบเกาส์เซียน (Gaussian)
 x_i = อินพุตที่ i ($i=1, \dots, m$)
 y_j = เอาท์พุตของกฎข้อที่ j ($j=1, \dots, n$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 เมื่อกันเซตเวฟเลต เมื่อ $a=1, b=0$

โครงข่ายประสาทเทียมฟัซซีเวฟเลตมีโครงสร้างเป็นไปตามรูปที่ 3.8 โดยชั้นเชื่อมแรก จะเป็นจุดต่อที่จะกระจายอินพุตเข้าสู่ชั้นเชื่อมอื่นๆ ในชั้นเชื่อมที่ 2 แต่ละอินพุตจะกระจายเข้าสู่สมาชิกของฟัซซีเซตของแต่ละกฎที่ถูกกำหนดเป็นฟังก์ชันสมาชิกแบบเกาส์เซียนดังสมการ (3.6)

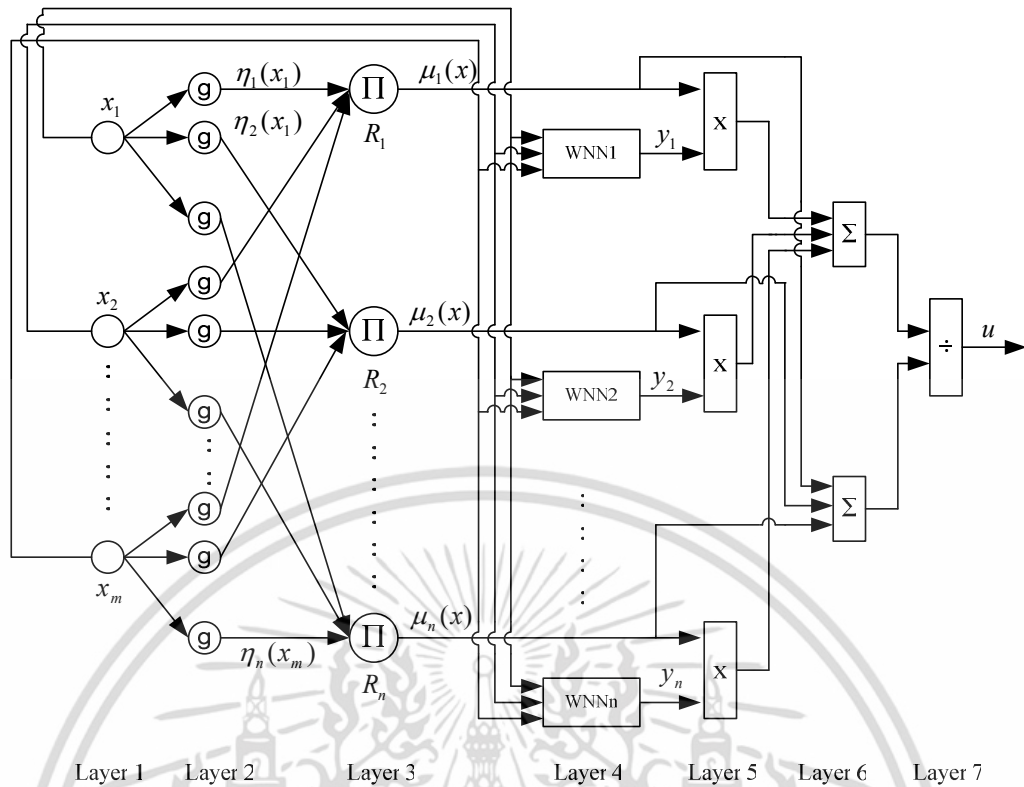
$$\eta_j(x_i) = e^{-\frac{(x_i - c_{ij})^2}{\sigma_{ij}^2}}, \quad i = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, n \quad (3.6)$$

โดยที่ m = จำนวนสัญญาณอินพุตจากภายนอก

n = จำนวนกฎของฟัซซี

c_{ij}, σ_{ij} = ศูนย์กลางและความกว้างของฟังก์ชันสมาชิกเกาส์เซียนของเทอมที่ j อินพุตที่ i ชั้นเชื่อมที่ 3 จำนวนจุดต่อจะเชื่อมสัมพันธ์กันตามกฎ R_1, R_2, \dots, R_n ตามที่ออกแบบไว้ แต่ละจุดต่อถือเป็นหนึ่งกฎฟัซซี และใช้ AND (min) ทำการคำนวณหาค่าเอาต์พุตที่ออกไปยังชั้นเชื่อมถัดไป โดยมีสมการดังนี้

$$\mu_j(x) = \prod_i \eta_j(x_i), \quad i = 1 \dots m, \quad j = 1 \dots n \quad (3.7)$$



รูปที่ 3.8 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมฟัซซีเวฟเลต

ในชั้นเชื่อมที่ 4 เป็นโครงข่ายประสาทเทียมเวฟเลตจำนวน n เทอมซึ่งมีจำนวนเท่ากับกฎของฟัซซีค่าเอาต์พุตที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมเวฟเลตจะนำไปคูณกับเอาต์พุตของชั้นเชื่อมที่ 3 ในชั้นเชื่อมที่ 5 เอาต์พุตของเวฟเลตที่ j หาได้จากสมการ (3.8)

$$y_j = w_j \Psi_j(z), \quad \Psi_j(z) = \sum_{i=1}^m |a_{ij}| \frac{1}{2} (1 - z_{ij}^2) e^{-\frac{z_{ij}^2}{2}} \quad (3.8)$$

โดย $z_{ij} = (x_i - b_{ij}) / a_{ij}$

a_{ij} และ b_{ij} = ตัวแปรของฟังก์ชันเวฟเลตระหว่างอินพุตที่ i ($i = 1, \dots, m$) และเอาต์พุตที่

j ($j = 1, \dots, n$)

ในชั้นเชื่อมที่ 6 และ 7 เป็นการดีฟัซซีเพื่อหาค่าเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมฟัซซีเวฟเลตโดยค่าเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมฟัซซีเวฟเลตหาจากสมการ (3.9)

$$u = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_j(x) y_j}{\sum_{j=1}^n \mu_j(x)} \quad (3.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย y_j = ค่าเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมเวฟเลต

3.3.4 การเรียนรู้และการปรับค่าตัวแปร

ในวิทยานิพนธ์นี้ วิธีการเรียนรู้แบบเกรเดียนต์ถูกนำมาใช้ในการปรับค่าตัวแปรเพื่อเป็นการมั่นใจว่าการเรียนรู้จะเข้าสู่ค่าที่ต้องการด้วยความรวดเร็ว และได้ใช้โมเมนตัม (momentum) เพื่อเพิ่มความเร็วของการเรียนรู้ให้มากขึ้น ตัวแปรที่ต้องการปรับค่านั้นจะเป็นตัวแปรของฟังก์ชันสมาชิก (c_{ij}, σ_{ij}) เวฟเลต และ ค่าถ่วงน้ำหนักในโครงข่ายประสาท (a_{ij}, b_{ij}, w_{ij}) โดยค่าเริ่มต้นนั้นกำหนดโดยการสุ่มค่าจากขอบเขตของข้อมูลชุดฝึกสอน และกำหนดให้ตัวแปร a และ σ มีค่ามากกว่า 0 โดยเริ่มแรกค่าความผิดพลาดหาได้จากสมการ (3.10)

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^o (u_i^d - u_i)^2 \quad (3.10)$$

โดยที่ o = จำนวนเอาต์พุตของโครงข่าย ในที่นี้มีค่าเท่ากับ 1
 u_i^d = ค่าเอาต์พุตที่ต้องการ
 u_i = ค่าเอาต์พุตที่ได้

การปรับตัวแปรของฟังก์ชันสมาชิก เวฟเลต และ ค่าน้ำหนัก ในโครงข่ายประสาทในแต่ละเหตุการณ์ (Epoch) ใช้ตามสมการที่ (3.11) และ (3.12) ตามลำดับ

$$w_j(t+1) = w_j(t) - \gamma \frac{\partial E}{\partial w_j} + \beta(w_j(t) - w_j(t-1)) \quad (3.11)$$

$$a_{ij}(t+1) = a_{ij}(t) - \gamma \frac{\partial E}{\partial a_{ij}} + \beta(a_{ij}(t) - a_{ij}(t-1))$$

$$b_{ij}(t+1) = b_{ij}(t) - \gamma \frac{\partial E}{\partial b_{ij}} + \beta(b_{ij}(t) - b_{ij}(t-1))$$

$$c_{ij}(t+1) = c_{ij}(t) - \gamma \frac{\partial E}{\partial c_{ij}} \quad (3.12)$$

$$\sigma_{ij}(t+1) = \sigma_{ij}(t) - \gamma \frac{\partial E}{\partial \sigma_{ij}}$$

โดยที่ γ = อัตราการเรียนรู้ (learning rate)

β = โมเมนตัม

m = จำนวนอินพุต, $i = 1, \dots, m$

n = จำนวนกฎของฟัชซี, $j = 1, \dots, n$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าอัตราการเรียนรู้และโมเมนต์ได้จากการสุ่มหาค่าที่เหมาะสม และค่าอนุพันธ์ในสมการด้านบนสามารถหาได้จากสมการ

$$\frac{\partial E}{\partial w_j} = \frac{\partial E}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial y_j} \frac{\partial y_j}{\partial w_j} \quad (3.13)$$

$$= (u(t) - u^d(t)) \mu_j \Psi_j(z) / \sum_{j=1}^n \mu_j$$

$$\frac{\partial E}{\partial a_{ij}} = \frac{\partial E}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial y_j} \frac{\partial y_j}{\partial \Psi_j} \frac{\partial \Psi_j}{\partial z_{ij}} \frac{\partial z_{ij}}{\partial a_{ij}}$$

$$= \delta_j (3.5z_{ij}^2 - z_{ij}^4 - 0.5) e^{-\frac{z_{ij}^2}{2}} / |a_{ij}|^{\frac{3}{2}}$$

$$\frac{\partial E}{\partial b_{ij}} = \frac{\partial E}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial y_j} \frac{\partial y_j}{\partial \Psi_j} \frac{\partial \Psi_j}{\partial z_{ij}} \frac{\partial z_{ij}}{\partial b_{ij}}$$

$$= \delta_j (3z_{ij} - z_{ij}^3) e^{-\frac{z_{ij}^2}{2}} / |a_{ij}|^{\frac{3}{2}}$$

โดยที่ $\delta_j = (u(t) - u^d(t)) \mu_j w_j / \sum_{j=1}^n \mu_j, i=1, \dots, m, j=1, \dots, n$

$$\frac{\partial E}{\partial c_{ij}} = \sum_j \frac{\partial E}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial \mu_j} \frac{\partial \mu_j}{\partial c_{ij}} \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial E}{\partial \sigma_{ij}} = \sum_j \frac{\partial E}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial \mu_j} \frac{\partial \mu_j}{\partial \sigma_{ij}}$$

$$\frac{\partial E}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial \mu_j} = (u(t) - u^d(t)) \frac{y_j - u}{\sum_{j=1}^n \mu_j}$$

$$\frac{\partial \mu_j(x_i)}{\partial c_{ij}} = \begin{cases} \mu_j(x_i) \frac{2(x_i - c_{ij})}{\sigma_{ij}^2} & \text{if } j \text{ node is connected to rule node } j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{\partial \mu_j(x_i)}{\partial \sigma_{ij}} = \begin{cases} \mu_j(x_i) \frac{2(x_i - c_{ij})^2}{\sigma_{ij}^3} & \text{if } j \text{ node is connected to rule node } j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

เมื่อ $i=1, \dots, m, j=1, \dots, n$ โดยใช้สมการ (3.13) และ (3.14) แทนในสมการ (3.11) และ (3.12)

ตามลำดับเพื่อใช้ในการปรับค่าตัวแปร โครงข่ายประสาทเทียมฟัซซีเวฟเลตต่อไป

บทนี้ได้กล่าวถึงพื้นฐานโครงข่ายประสาทเทียม และ ทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียมฟัซซีเวฟ

เลต ซึ่งจะนำไปใช้ออกแบบวิธีการควบคุมอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงในแบบจำลองเครื่องยนต์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MVEM บทถัดไปจะกล่าวถึงรายละเอียดในการออกแบบและผลการทดลองที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม Matlab

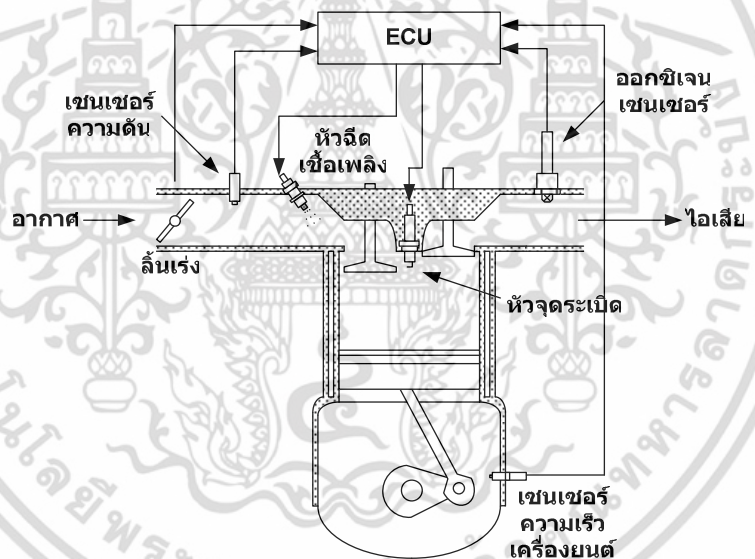


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

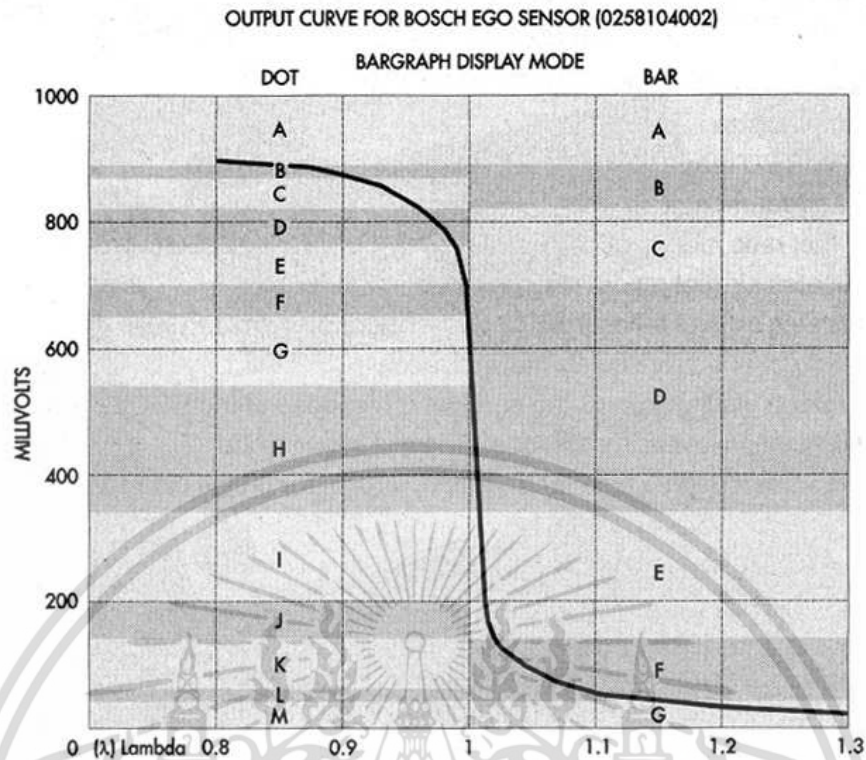
การออกแบบระบบควบคุมและผลการทดลอง

แบบจำลองเครื่องยนต์ MVEM แบบมีเทอร์โบชาร์จและเผาไหม้ภายในโดยใช้ก๊าซ CNG เป็นเชื้อเพลิงนั้น ได้ใช้แบบจำลองตามรายละเอียดที่เสนอในบทที่ 2 โดยใช้โปรแกรม Matlab/simulink เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการจำลอง การจำลองเป็นแบบ Fixed-step ด้วยวิธี ode4 (Runge-Kutta) และมีขนาดของ Fixed-step เป็น 1/400 วินาที โดยองค์ประกอบของแบบจำลองเป็นไปตามภาคผนวก ข. และกำหนดให้เครื่องยนต์นั้นกำลังทำงานอยู่แล้วขณะทำการทดลอง โดยทั่วไปแล้วการควบคุมอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงจะควบคุมโดยใช้ ECU (Electronic control unit) ซึ่งจะมีการต่อเชื่อมสัญญาณอินพุตจากส่วนต่างๆดังรูปที่ 4.1 และกำหนดให้หัวฉีดเชื้อเพลิงฉีดได้แม่นยำ 100% ในส่วนของตัวควบคุมป้อนไปข้างหน้า (Feedforward base controller)



รูปที่ 4.1 ห้องเผาไหม้และสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของ ECU

เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้สัญญาณเอาต์พุตจากตัวรับรู้ออกซิเจนมาเป็นสัญญาณอินพุตในระบบควบคุมหัวฉีด จึงกำหนดให้ตัวรับรู้ออกซิเจนมีความสามารถดังรูปที่ 4.2 นั่นคือสามารถวัดค่า λ ได้ในช่วง 0.8-1.2 เท่านั้น ค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เผาไหม้สมบูรณ์ใช้ค่า 14.5 ตาม Heywood [9]



รูปที่ 4.2 ค่าเอาต์พุตและช่วงของค่า λ ที่กำหนด[21]

โดยให้ค่าอินพุตของแบบจำลองเครื่องยนต์ประกอบไปด้วยสัญญาณดังตารางที่ 4.1

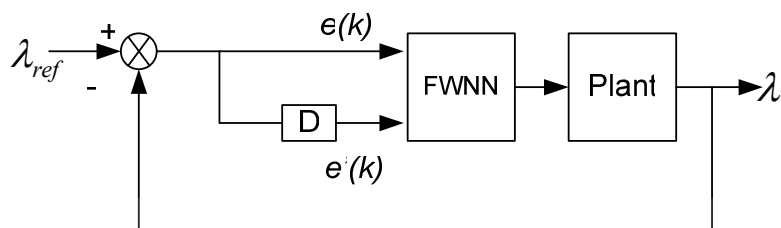
ตารางที่ 4.1 ค่าอินพุตของแบบจำลองเครื่องยนต์

ชื่อ	รายละเอียด	หน่วย
P_a	ค่าความดันบรรยากาศภายนอก	Pa
T_a	ค่าอุณหภูมิภายนอก	K
α	ค่าองศาของลิ้นเร่ง	องศา
u_{wg}	ค่าสัญญาณเปิด-ปิดวาล์วเกท (0-1)	-

ระบบควบคุม โคร่งข่ายประสาทเทียมพีชซีแวลต์ที่ใช้ในงานวิจัยมีโครงสร้างการควบคุมตามรูปที่ 4.3 โดยค่าอินพุตที่เข้ามามีเพียงค่าจากตัวรับรู้ออกซิเจนเท่านั้น โดยค่า λ เป็นสัญญาณเอาต์พุตจากตัวรับรู้ออกซิเจนมีค่าอยู่ในช่วง 0.8 ถึง 1.2 ค่า λ_{ref} คือค่าสัญญาณอ้างอิงที่ต้องการ $e(k)$ และ $e'(k)$ คือค่าสัญญาณความผิดพลาดและค่าสัญญาณอนุพันธ์ของความผิดพลาด (change in error)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามลำดับ D คือการทำอนุพันธ์ของค่าความผิดพลาด ส่วนโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม ฟังชันเวฟเลตที่ใช้เป็นตัวควบคุมเป็นไปตามรายละเอียดในบทที่ 3 ในหัวข้อ 3.3



รูปที่ 4.3 โครงสร้างการควบคุมอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงของระบบเครื่องยนต์เทอร์โบ

4.1 การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมฟังก์ชันเวฟเลต

ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีการเรียนรู้แบบเกรเดียนต์ตามหัวข้อ 3.3.4 ในการปรับค่าตัวแปรของฟังก์ชันสมาชิกแบบเกาส์เซียน ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบเวฟเลต และค่าถ่วงน้ำหนักของโครงข่ายประสาทเทียมฟังก์ชันเวฟเลตโดยใช้สมการ (3.14) และ (3.15) ในการเรียนรู้และปรับค่าตัวแปร w ของค่าถ่วงน้ำหนัก ค่าตัวแปร a และ b ของเวฟเลต และค่าตัวแปร c และ σ ของฟังก์ชันสมาชิกแบบเกาส์เซียนตามลำดับ กระบวนการเรียนรู้และปรับค่าตัวแปรมีขั้นตอนตามรูปที่ 4.4

4.1.1 การกำหนดข้อมูลชุดฝึกสอน

ข้อมูลชุดฝึกสอนกำหนดให้ค่าอินพุตคือค่า $e(k)$ และ $e'(k)$ ตามลำดับโดย $e(k) = \lambda - \lambda_{ref}$ ค่า $e'(k)$ คืออนุพันธ์ของ $e(k)$ และจากสมการ (4.1)

$$\lambda = \frac{A/F}{(A/F)_s} \quad (4.1)$$

เมื่อแปลงสมการ (4.1) เป็นสมการที่ (4.2)

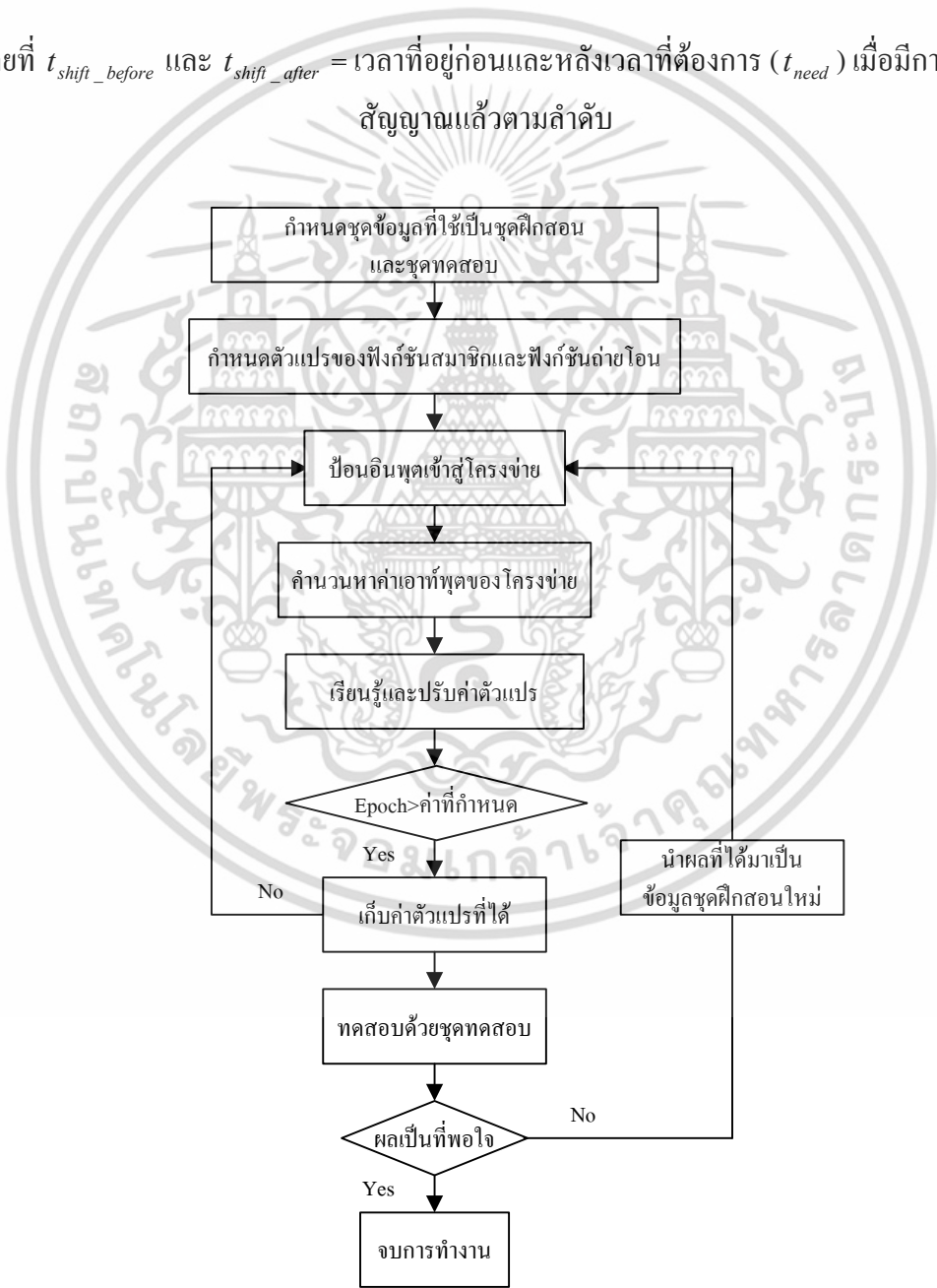
$$\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_{cyl}}{\lambda(A/F)_s} \quad (4.2)$$

จะเห็นว่าเมื่อทำการคูณมวลเชื้อเพลิงที่ฉีดออกมาด้วยค่า λ ณ ขณะนั้นจะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ในห้องเผาไหม้ ดังนั้นค่าเอาท์พุตที่ต้องการในอุดมคติของโครงข่ายประสาทเทียมฟังก์ชันเวฟเลต (u^d) จึงสามารถนำค่า λ ที่ได้จากตัวรับรู้ออกซิเจนมาสุ่มค่าด้วยความถี่ของ ECU ซึ่งในงานวิจัยนี้เท่ากับ 400 Hz และเลื่อนค่า λ ที่จุดๆนั้นด้วยความหน่วงที่คำนวณได้ที่จุดๆนั้น และทำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสุ่มตัวอย่างใหม่ด้วยความถี่เท่าเดิม ค่าเอาต์พุตที่ต้องการหลังการสุ่มค่าใหม่ (u_{new}^d) สามารถหาได้จากสมการ (4.3) ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 4.5

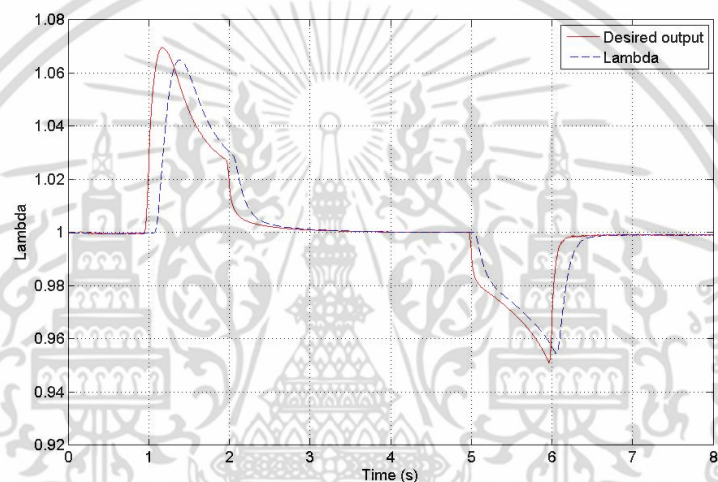
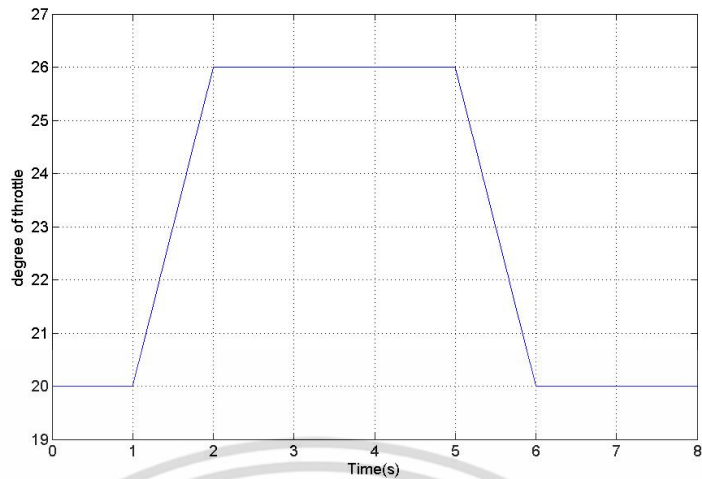
$$\begin{aligned}
 P_{before} &= \frac{t_{shift_after} - t_{need}}{t_{shift_after} - t_{shift_before}} \\
 P_{after} &= \frac{t_{need} - t_{shift_before}}{t_{shift_after} - t_{shift_before}} \\
 u_{new}^d &= (u^d(t_{shift_before}) * P_{before}) + (u^d(t_{shift_after}) * P_{after})
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

โดยที่ t_{shift_before} และ t_{shift_after} = เวลาที่อยู่ก่อนและหลังเวลาที่ต้องการ (t_{need}) เมื่อมีการเลื่อนสัญญาณแล้วตามลำดับ



รูปที่ 4.4 ผังกระบวนการเรียนรู้และปรับค่าตัวแปร

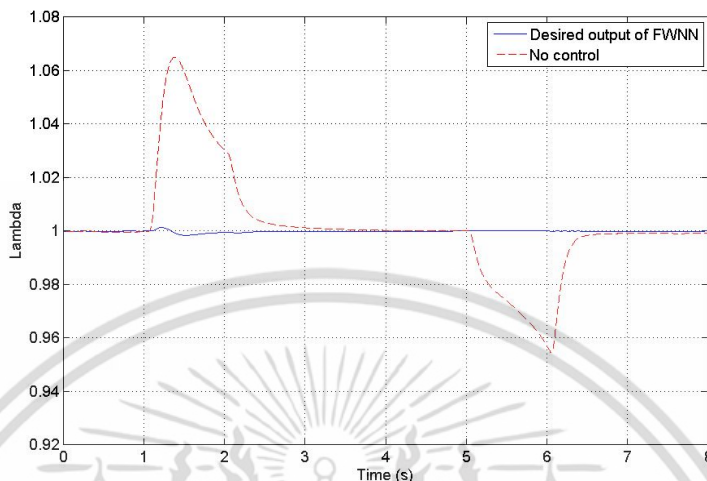
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟการเลื่อนค่า λ ด้วยค่าหน่วยเวลาเพื่อหาค่าเอาต์พุตที่ต้องการในอุดมคติของระบบควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีเอฟเอส (ล่าง) เมื่อเปิดดองสายของลิ้นเร่งตามกราฟด้านบน

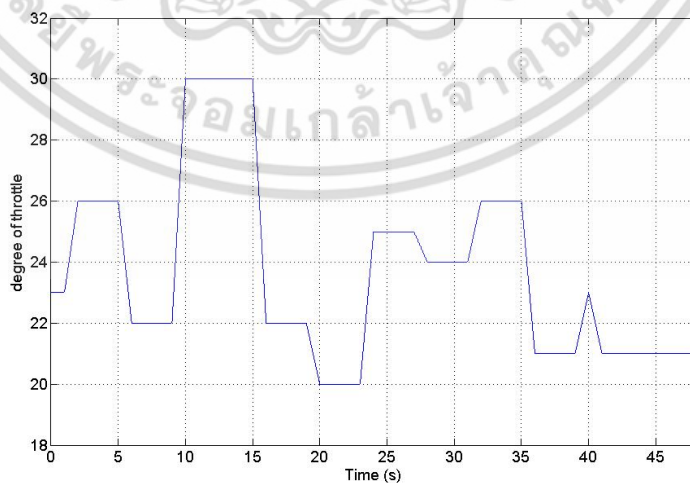
เมื่อนำค่าเอาต์พุตที่ต้องการในอุดมคติจากรูปที่ 4.5 แทนกลับลงไปในกรณีเดิมคือกรณีที่องศาลิ้นเร่งยกตัวจาก 20 องศาเป็น 26 องศาใน 1 วินาที และลดองศากลับจาก 26 องศาเป็น 20 องศาใน 1 วินาทีเช่นกัน และเวสท์เกตปิดอยู่จะได้ผลดังรูปที่ 4.6 จากรูปจะเห็นได้ว่ายังเกิดความผิดพลาดอยู่บ้าง ค่า λ ที่ได้จะมีบางช่วงเวลาที่ไม่ว่ากับ 1 พอดี ค่า λ สูงสุดของกรณีนี้มีค่าเท่ากับ 1.0014 และค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.9984 มีความผิดพลาดแค่เพียง 2.5% จากค่า λ สมบูรณ์สูงสุดเมื่อไม่มีระบบควบคุมอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิง สาเหตุของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเมื่อใส่ค่าเอาต์พุตที่ต้องการกลับไปบนเครื่องยนต์เกิดจากระบบของแบบจำลองเครื่องยนต์ MVEM เป็นพลวัตทำให้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในระบบเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้ระบบโดยรวมมีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย ทำให้ค่าเอาต์พุตที่ต้องการที่คำนวณจากในกรณีไม่มีระบบควบคุม ไม่พอดีกับ

ค่าที่ต้องการจริงของระบบเมื่อมีการใส่ค่าคงไปที่ ณ จุดนั้น แต่ก็ถือว่ามีค่าที่นำไปใช้เพื่อการเรียนรู้ได้ เพราะค่าความผิดพลาดมีค่าต่ำมาก



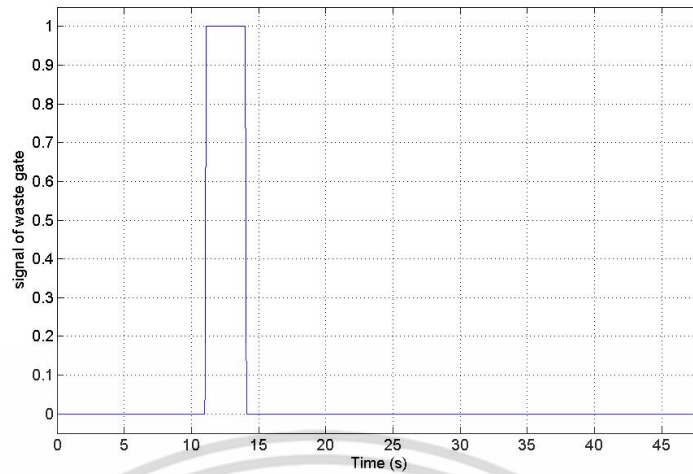
รูปที่ 4.6 ค่า λ ที่ได้เมื่อใส่ค่าเอาต์พุตที่ต้องการกลับลงไปในระบบเพื่อทดสอบ

ในงานวิจัยกำหนดให้ข้อมูลชุดฝึกสอนมีจำนวน 19,200 ข้อมูลและข้อมูลชุดทดสอบมีจำนวน 4,800 ข้อมูล โดยของสายของลิ้นเร่งและสัญญาณเวลาที่เกทของชุดข้อมูลฝึกสอนกำหนดให้เป็นดังรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตที่ต้องการของ โครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีเอฟเลตเป็นดังรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 และเพื่อลดเวลาที่ใช้ในการทำงานของโปรแกรมเรียนรู้จึงทำการสุ่มข้อมูลใหม่โดยลดความถี่ในการสุ่มลงให้ข้อมูลที่ได้อาจยังสามารถคงลักษณะเด่นเอาไว้

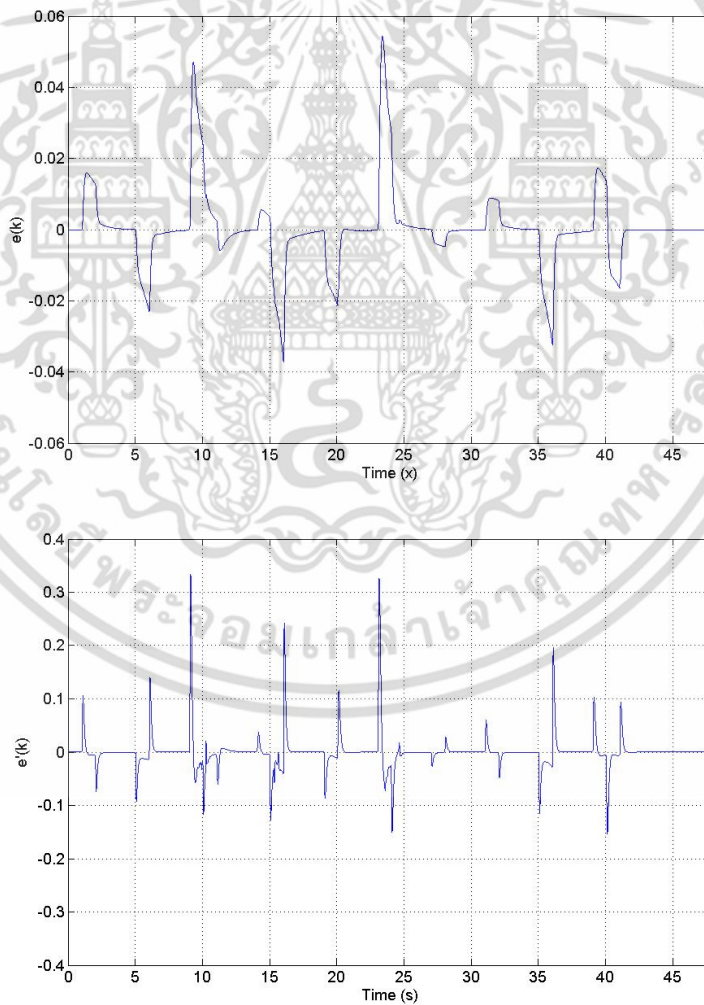


รูปที่ 4.7 องศาลิ้นเร่งของชุดข้อมูลฝึกสอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

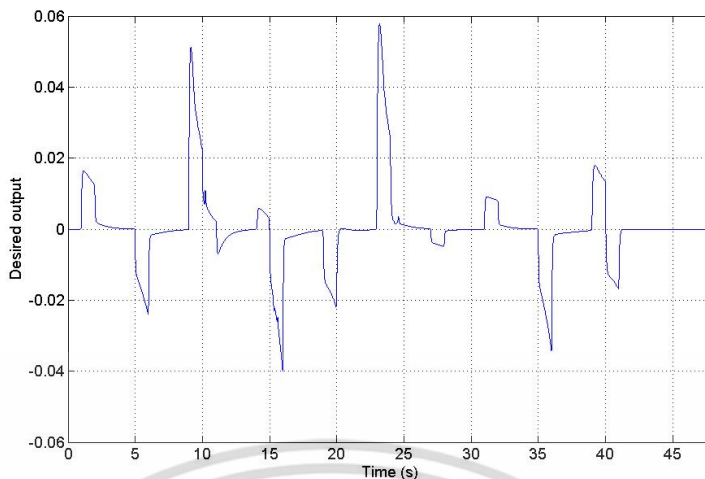


รูปที่ 4.8 สัญญาณเวสท์เกตของชุดข้อมูลฝึกสอน



รูปที่ 4.9 สัญญาณอินพุตโครงข่ายประสาทเทียมพีซีเวฟเลตของชุดข้อมูลฝึกสอน

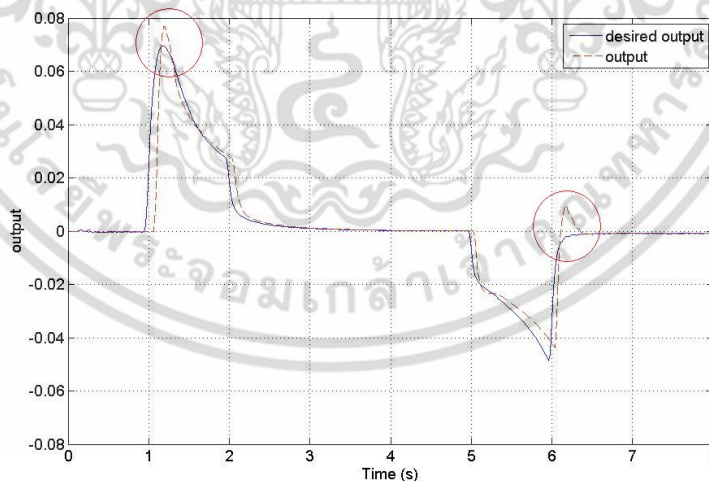
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 สัญญาณเอาต์พุตที่ต้องการ โครงข่ายประสาทเทียมพีชชีแวลต์ของชุดข้อมูลฝึกสอน

4.1.2 ค่าอัตราการเรียนรู้และโมเมนตัม

ในการเรียนรู้แบบเกรเดียนต์อาจเกิดความผิดพลาดขึ้นได้ เนื่องจากปัญหาที่ก้าวข้ามจุดต่ำสุดแท้จริง (Global minima) ไปสู่จุดต่ำสุดเทียม (Local minima) ทำให้ค่าเอาต์พุตที่ได้หลังจากการเรียนรู้ผิดพลาดเมื่อกำหนดอัตราการเรียนรู้ไม่เหมาะสมดังที่แสดงในรูปที่ 4.11 ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นที่จะกำหนดให้อัตราการเรียนรู้มีค่าน้อยๆ

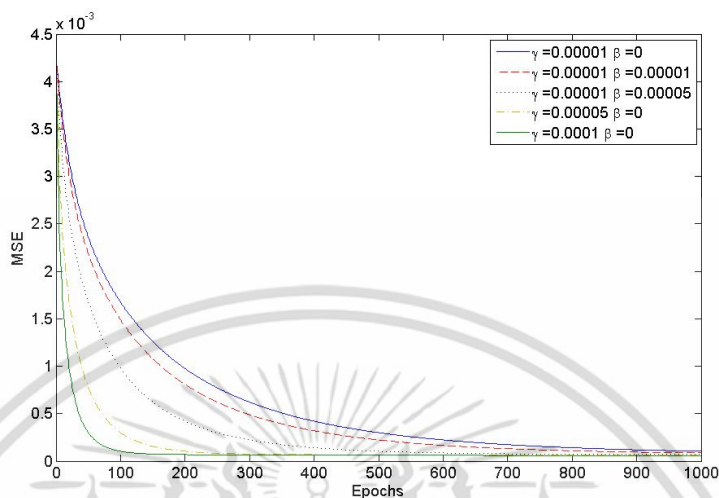


รูปที่ 4.11 ความผิดพลาดที่เกิดจากการกำหนดค่าอัตราการเรียนรู้ไม่เหมาะสม

จากรูปที่ 4.12 กำหนดให้ค่าเริ่มต้นของตัวแปรในโครงข่ายประสาทเทียมพีชชีแวลต์มีค่าเท่ากัน จะเห็นว่าเมื่อค่าอัตราการเรียนรู้และโมเมนตัมยิ่งมากความเร็วในการลู่เข้ายิ่งมาก แต่ยังคงต้องระวัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความผิดพลาดดั้งที่กล่าวมาข้างต้น ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ค่าอัตราการเรียนรู้เท่ากับ 0.00003 และ โมเมนตัมเท่ากับ 0.00009



รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการเรียนรู้ที่ค่าอัตราการเรียนรู้และ โมเมนตัมต่างๆ

4.2 การกำหนดค่าตัวแปรเริ่มต้นของโครงข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลต

การกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรในโครงข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลต โดยทั่วไปแล้วมักจะกำหนดโดยการสุ่มในขอบเขตของชุดทดลองและให้ตัวแปร a และ σ มีค่ามากกว่า 0 ขึ้นไป แต่เนื่องจากโครงข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลตเป็นระบบควบคุมที่มีพื้นฐานเป็นการควบคุมแบบ TSK พีชชี จึงใช้วิธีการกำหนดค่าเริ่มต้นตัวแปรแบบง่ายๆด้วยวิธีการกำหนดตัวแปรแบบการกำหนดกฎของพีชชีเหมือนอย่างในระบบควบคุมพีชชี โดยแบ่งออกเป็นกลุ่มๆตามพื้นฐานตามฟังก์ชันของแต่ละส่วน เพื่อง่ายต่อความเข้าใจจะทำการยกตัวอย่างโดยกำหนดให้โครงข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลตใช้กฎเพียง 4 กฎตามตารางที่ 4.2 ใช้ข้อมูลฝึกสอนชุดเดียวกันทั้งหมด และให้ค่าอัตราการเรียนรู้และ โมเมนตัมมีค่าเท่ากันในทุกกรณี

ตารางที่ 4.2 กฎ 4 ข้อของระบบควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลตที่ใช้กำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปร

$e'(k)$ \ $e(k)$	Positive	Negative
Positive	Positive	Positive
Negative	Negative	Negative

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

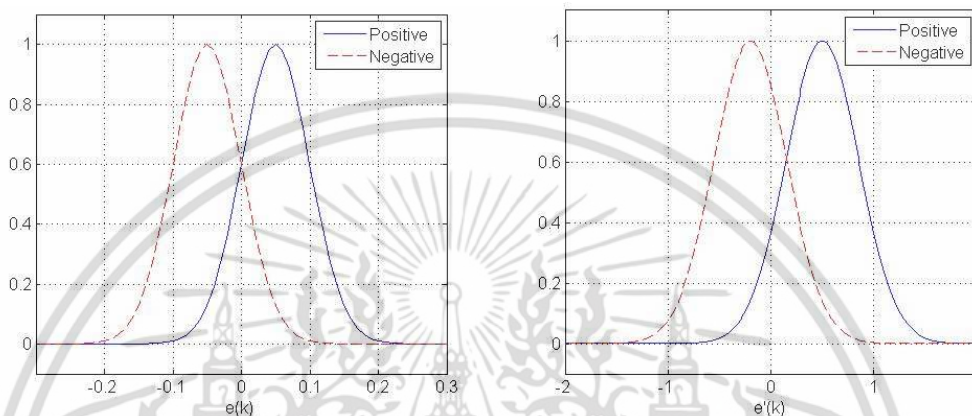
ค่าตัวแปรของตัวอย่างโครงข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลตก่อนการเรียนรู้และหลังการเรียนรู้ 1 ครั้ง 1,000 รอบสำหรับค่าที่กำหนดตามกฎของพีชชีในตัวอย่างเป็นไปดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ตัวอย่างค่าตัวแปรแบบกำหนดตามกฎของระบบควบคุมพีชชีในโครงข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลตแบบ 4 กฎก่อนการเรียนรู้และหลังการเรียนรู้

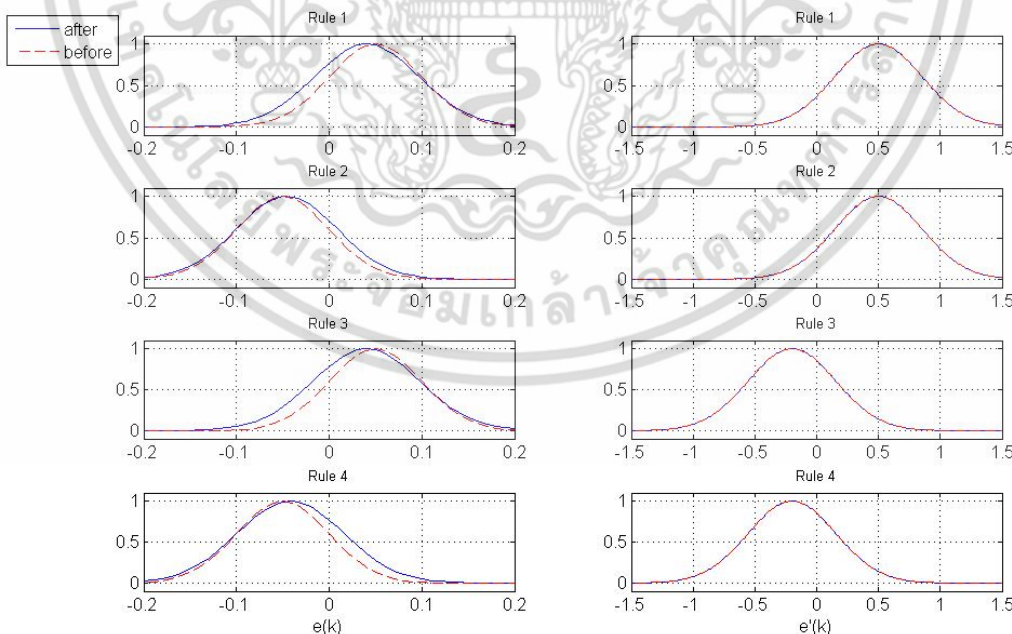
Parameter	Rule	before learning		after learning	
		e(k)	e'(k)	e(k)	e'(k)
a	1	0.07	0.5	0.0842	0.5000
	2	0.07	0.5	0.0806	0.4999
	3	0.07	0.5	0.0810	0.5001
	4	0.07	0.5	0.0781	0.4999
b	1	0.05	0.5	0.0428	0.4999
	2	-0.05	0.5	-0.0519	0.5003
	3	0.05	-0.2	0.0532	-0.2004
	4	-0.05	-0.2	-0.0592	-0.2006
c	1	0.05	0.5	0.0405	0.4996
	2	-0.05	0.5	-0.0458	0.5003
	3	0.05	-0.2	0.0402	-0.1996
	4	-0.05	-0.2	-0.0419	-0.2001
σ	1	0.07	0.5	0.0797	0.5003
	2	0.07	0.5	0.0770	0.4999
	3	0.07	0.5	0.0810	0.5003
	4	0.07	0.5	0.0812	0.5000
w	1	0.05		0.0356	
	2	-0.05		-0.0275	
	3	0.05		0.0039	
	4	-0.05		-0.0117	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกรณีค่าตัวแปรเริ่มต้นแบบกำหนดกฎระบบควบคุมฟัซซีในตารางที่ 4.3 กราฟค่าฟังก์ชันสมาชิกของฟัซซีก่อนการเรียนรู้แสดงดังในรูปที่ 4.13 และเมื่อทำการเรียนรู้ ฟังก์ชันสมาชิกของกฎฟัซซีจะเป็นไปตามรูปที่ 4.14 ส่วนค่าเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมฟัซซีเวฟเลตก่อนการเรียนรู้แสดงดังในรูปที่ 4.15 และเมื่อทำการเรียนรู้ค่าเอาต์พุตจะเป็นไปตามรูปที่ 4.16 รูปที่ 4.17 เป็นการเปรียบเทียบค่าเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมฟัซซีเวฟเลตก่อนและหลังการเรียนรู้



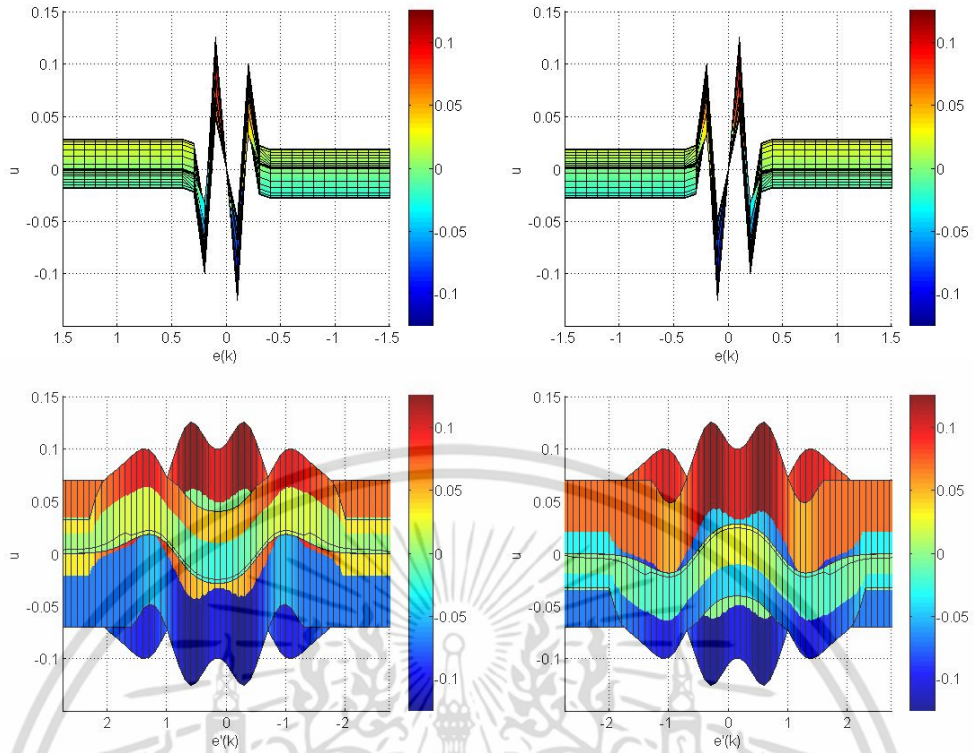
รูปที่ 4.13 กราฟฟังก์ชันสมาชิกแบบเกาส์เซียนของค่า $e(k)$ (ซ้าย) และ $e'(k)$ (ขวา) ก่อนการเรียนรู้ โดยค่าลบเป็นเส้นประและค่าบวกเป็นเส้นทึบ



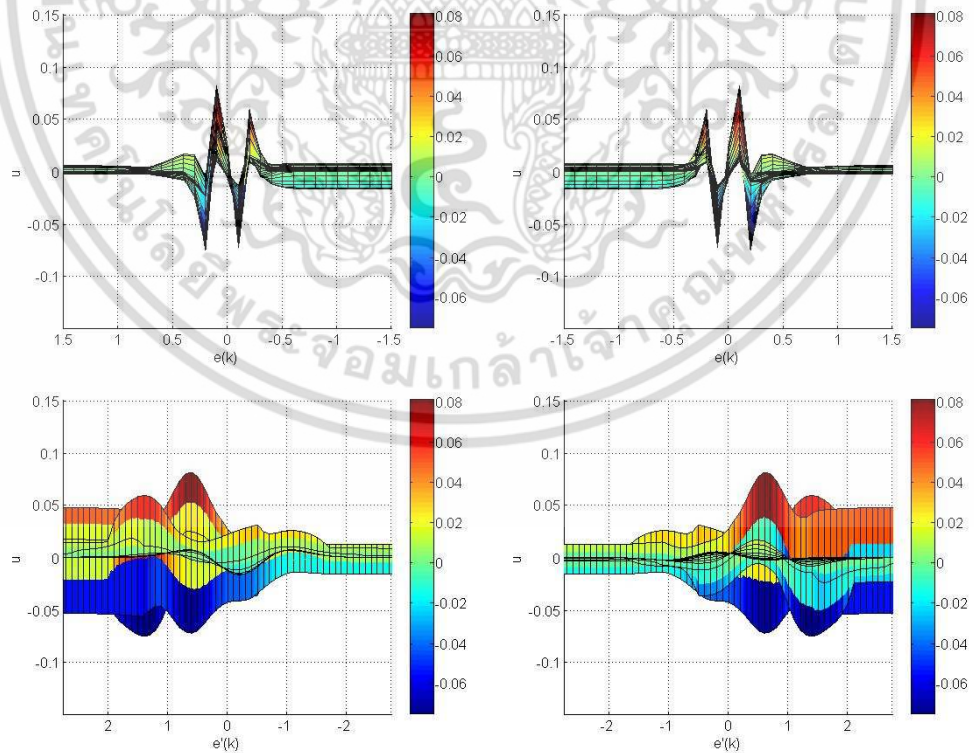
รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบฟังก์ชันสมาชิกแบบเกาส์เซียนของค่า $e(k)$ (ซ้าย) และ $e'(k)$ (ขวา) ทั้ง

4 กฎ โดยค่าก่อนการเรียนรู้เป็นเส้นประและค่าที่ได้หลังการเรียนรู้เป็นเส้นทึบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



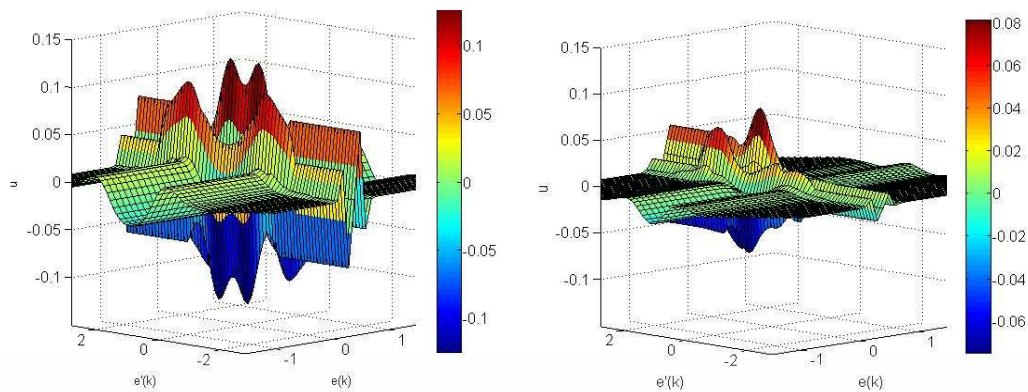
รูปที่ 4.15 กราฟค่าเริ่มต้นก่อนการเรียนรู้ของค่าเอาต์พุตที่ต้องการในรูปแบบสามมิติ แสดงแต่ละด้านในแนวแกน $e(k) - u$ และแกน $e'(k) - u$



รูปที่ 4.16 กราฟค่าหลังการเรียนรู้ของค่าเอาต์พุตที่ต้องการในรูปแบบสามมิติ แสดงแต่ละด้านใน

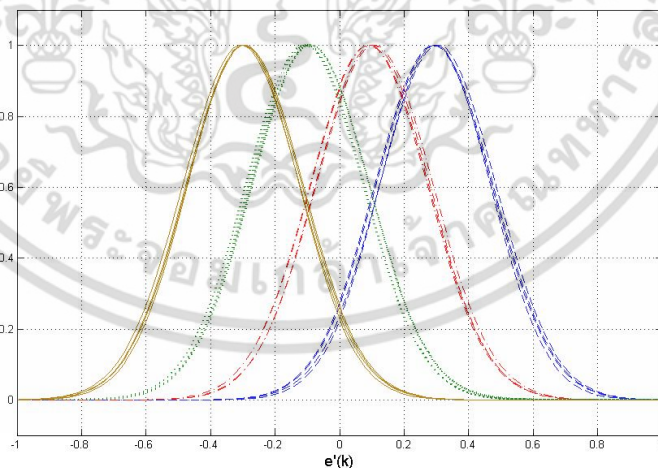
แนวแกน $e(k) - u$ และแกน $e'(k) - u$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบของค่าเอาท์พุทในรูปแบบสามมิติ ก่อนการเรียนรู้ (ซ้าย) และหลังการเรียนรู้ (ขวา)

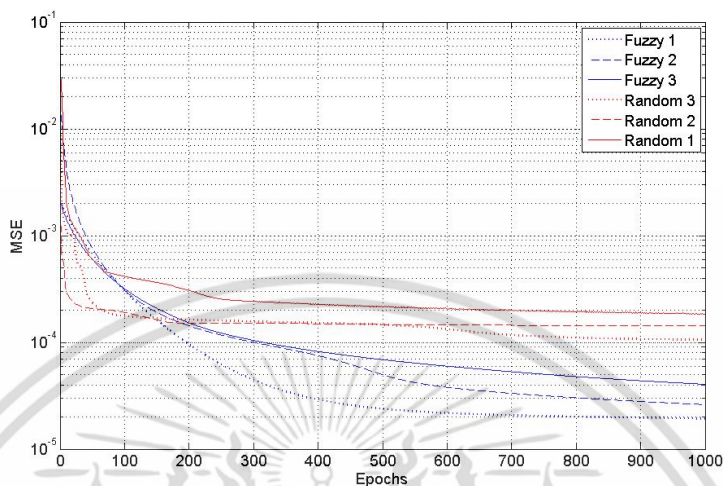
โดยทั่วไปแล้วตรรกะแบบกลุ่มที่ทำการแบ่งเพื่อกำหนดสมาชิกในกฎของฟัซซีจะเป็นค่าเดียวกันไม่ว่าจะถูกนำไปใช้ในกฎข้อใดก็ตาม แต่ในวิทยานิพนธ์นี้แต่ละกฎจะมีกลุ่มเฉพาะของตัวเอง ถึงแม้ค่ากลุ่ม เช่น กลุ่ม Positive ของฟังก์ชันสมาชิกในกฎฟัซซีที่ผ่านการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมฟัซซีเวฟเลตจะเป็นค่าเดียวกันถ้าดูอย่างผิวเผิน แต่เมื่อดูค่าฟังก์ชันสมาชิกของ $e'(k)$ ในรูปที่ 4.18 เราจะเห็นว่าต่างกันอย่างชัดเจน นี่นับเป็นข้อดีอีกข้อหนึ่งของโครงข่ายประสาทเทียมฟัซซีเวฟเลตที่ปรับให้ฟังก์ชันสมาชิกเป็นไปตามความเหมาะสมของแต่ละกฎ



รูปที่ 4.18 กราฟฟังก์ชันสมาชิกค่า $e'(k)$ ใน FWNN แบบ 16 กฎหลังการเรียนรู้โดยค่าฟังก์ชันสมาชิกแต่ละกฎจะมองเห็นถึงความแตกต่างได้ชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

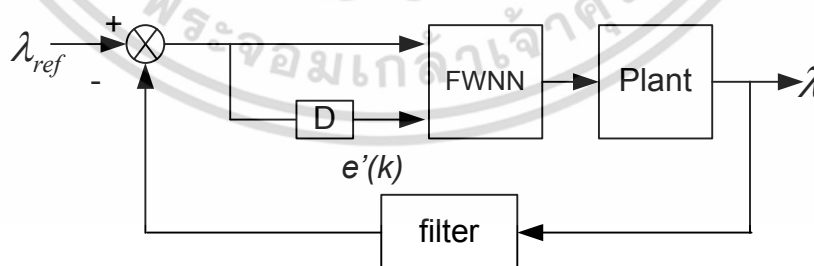
จากรูปที่ 4.19 จะเห็นว่า การกำหนดค่าเริ่มต้นตัวแปรตามพื้นฐานกลุ่มแบบการกำหนดกฎของฟัซซี่มีส่วนช่วยในลดความผิดพลาดของการเรียนรู้มากกว่าการกำหนดค่าแบบสุ่ม



รูปที่ 4.19 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเรียนรู้เมื่อกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรในแบบกฎฟัซซี่และแบบสุ่ม

4.3 ระบบควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมฟัซซี่เวฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว

โครงสร้างการควบคุมของโครงข่ายประสาทเทียมฟัซซี่เวฟเลตมีโครงสร้างตามรูปที่ 4.20 โดยสัญญาณอินพุตที่เข้ามาามีเพียงแค่ค่าจากตัวรับรู้่ออกซิเจนเท่านั้น λ_{ref} คือค่าสัญญาณอ้างอิง ถ้าต้องการให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ค่า λ_{ref} ต้องมีค่าเท่ากับ 1 มีตัวกรองสัญญาณ (filter) เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวน



รูปที่ 4.20 โครงสร้างของระบบควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมฟัซซี่เวฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว

ระบบควบคุมใช้กฎฟัซซี่ 16 กฎและให้ค่าตัวแปรเริ่มต้นเป็นไปตามตารางที่ 4.4 โดยกำหนดให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P = Positive, N = Negative, LP = Large positive, SP = Small positive, SN = Small negative และ LN = Large negative ใช้ชุดฝึกสอนตามหัวข้อที่ 4.1 ค่าตัวแปรที่ได้หลังจากกระบวนการเรียนรู้ที่ใช้ในหัวข้อนี้เป็นไปตามตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 กฎ 16 ข้อของระบบควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียวที่ใช้กำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปร

$e(k)$ \ $e'(k)$	LP	SP	SN	LN
LP	P	P	P	P
SP	P	P	P	P
SN	N	N	N	N
LN	N	N	N	N

ตารางที่ 4.5 ค่าตัวแปรที่ได้หลังจากการเรียนรู้ของระบบควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียวแบบ 16 กฎ

Rule	$e(k)$				$e'(k)$				w
	a	b	c	σ	a	b	c	σ	
1	0.0308	0.0639	0.0546	0.0412	0.2499	0.2998	0.2946	0.2562	0.0506
2	0.0246	0.0693	0.0524	0.0431	0.2495	0.1011	0.0924	0.2581	0.0503
3	0.0245	0.0694	0.0580	0.0366	0.2504	-0.1003	-0.1020	0.2516	0.0482
4	0.0276	0.0658	0.0548	0.0413	0.2494	-0.3006	-0.3052	0.2563	0.0513
5	0.0401	0.0082	0.0107	0.0413	0.2507	0.2989	0.2907	0.2563	0.0550
6	0.0411	0.0060	0.0099	0.0418	0.2485	0.1018	0.0899	0.2568	0.0487
7	0.0442	0.0054	0.0116	0.0414	0.2511	-0.0999	-0.1084	0.2564	0.0291
8	0.0380	0.0196	0.0218	0.0301	0.2492	-0.3008	-0.2982	0.2451	0.0513
9	0.0395	-0.0196	-0.0238	0.0278	0.2493	0.3010	0.2962	0.2428	-0.0399
10	0.0456	-0.0081	-0.0119	0.0414	0.2511	0.0993	0.1081	0.2564	-0.0288
11	0.0424	-0.0075	-0.0097	0.0411	0.2484	-0.1011	-0.0897	0.2561	-0.0495
12	0.0400	-0.0108	-0.0132	0.0399	0.2507	-0.2992	-0.2932	0.2549	-0.0524

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

Rule	e(k)				e'(k)				w
	a	b	c	σ	a	b	c	σ	
13	0.0257	-0.0668	-0.0554	0.0399	0.2494	0.3008	0.3046	0.2549	-0.0513
14	0.0218	-0.0694	-0.0581	0.0366	0.2504	0.1001	0.1019	0.2516	-0.0490
15	0.0213	-0.0696	-0.0512	0.0435	0.2492	-0.1010	-0.0912	0.2585	-0.0517
16	0.0318	-0.0636	-0.0567	0.0392	0.2501	-0.2998	-0.2967	0.2542	-0.0500

4.3.1 ผลการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 5 กรณี นำผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีโครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีเวฟเลตมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากวิธีการ Proportional Integral Derivative controller (PID) ซึ่งใช้กันอยู่ในปัจจุบันซึ่งเป็นไปตามสมการ (4.4)

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (4.4)$$

การปรับค่าพารามิเตอร์ของวิธีการควบคุมแบบ PID อ้างอิงตาม Andersson[11] และทำการปรับค่าพารามิเตอร์เพิ่มเติมอีกเล็กน้อย และค่าที่ใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพผลิตจากค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดซึ่งหาได้จากสมการ (4.5)

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^2 \quad (4.5)$$

โดยที่ N = จำนวนข้อมูล

e = ค่าความผิดพลาด

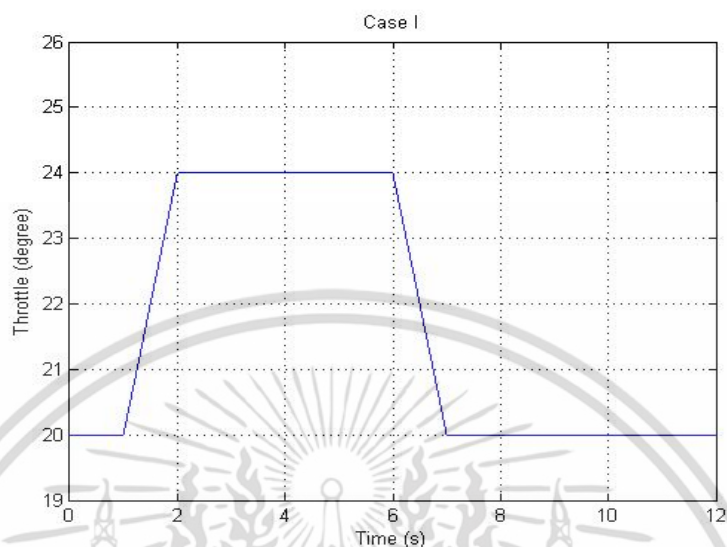
ค่าเวลาเข้าที่ซึ่งกำหนดให้เป็น $\pm 2\%$ ของค่า $MAX|\lambda|$ เมื่อระบบเครื่องยนต์ไม่มีระบบควบคุมอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง และค่าสูงสุดต่ำสุดของค่า λ

4.3.1.1 กรณีที่ 1

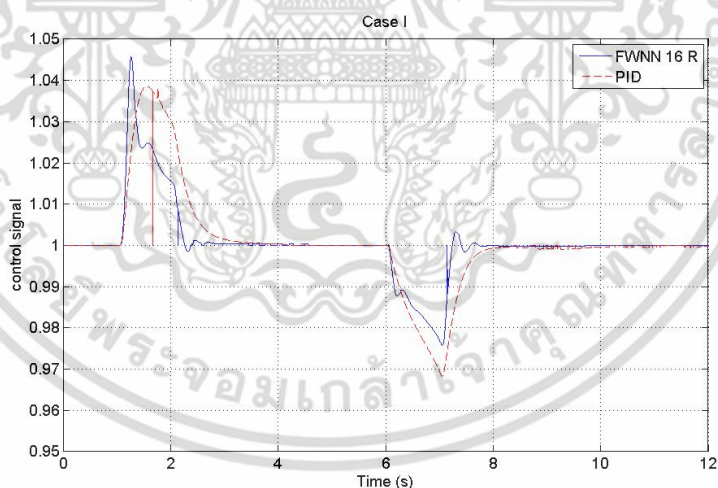
เป็นกรณีเมื่อขับรถตามปกติ ได้ทำการเร่งเครื่องจากความเร็วประมาณ 2,000 RPM เป็น 3,500 RPM ก่อนลดคันเร่งกลับมาที่ความเร็วรอบเท่าเดิม กำหนดให้เวลาที่เกทปิดอยู่คือมีสัญญาณเวลาที่เกทเท่ากับ 0 องศาของลิ้นเร่งมีการเปลี่ยนแปลงจาก 20 องศาเป็น 24 องศาด้วยอัตราเร่งคงที่ใน

1 วินาที และเปลี่ยนแปลงกลับจาก 24 องศาเป็น 20 องศาด้วยอัตราเร่งคงที่ใน 1 วินาทีเช่นเดิม ตามเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นต้นการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.21 ค่า λ ที่ต้องการคือ 1 ค่าเอาต์พุตของระบบควบคุมแสดงดังในรูปที่ 4.22 และผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 4.23

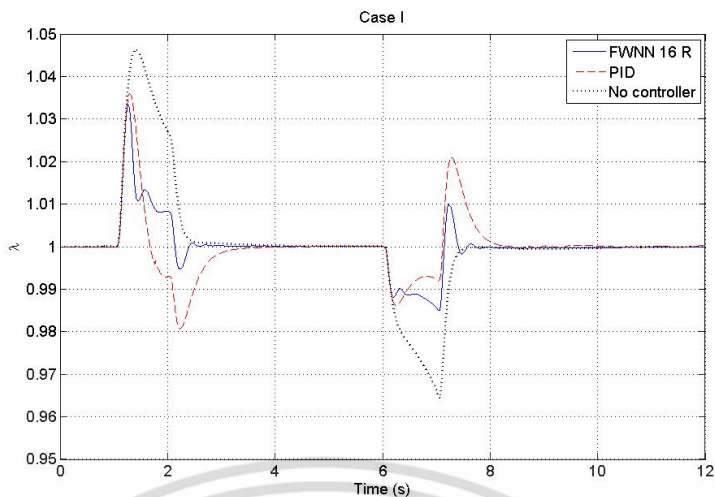


รูปที่ 4.21 กราฟองศาของลิ้นเร่งในกรณีที่ 1 ของระบบควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีเอฟ เลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว



รูปที่ 4.22 สัญญาณควบคุมของระบบควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีเอฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียวในกรณีที่ 1 เปรียบเทียบกับวิธี PID

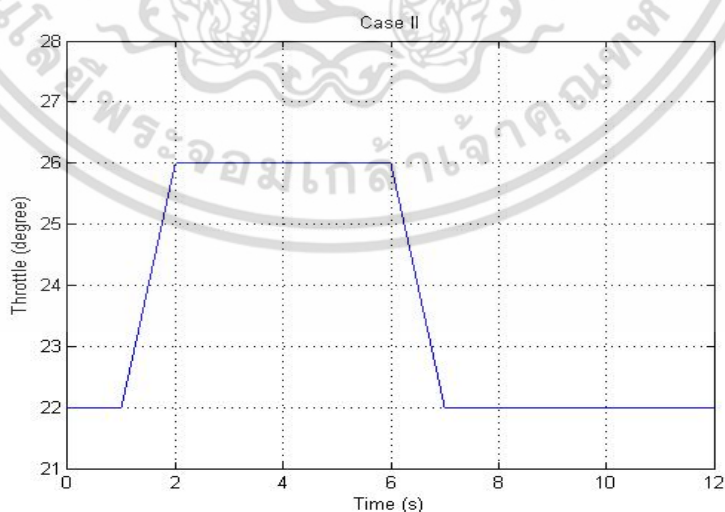
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 กราฟผลลัพธ์ค่า λ ที่ได้จากกรณีที่ 1 ของระบบควบคุม โคร่งข่ายประสาทเทียมพีซีซีเอฟ เลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียวเปรียบเทียบกับวิธี PID และ ไม่มีระบบควบคุม

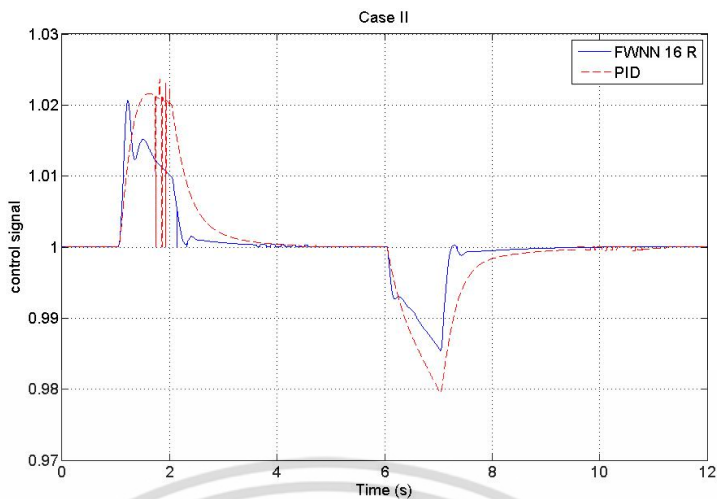
4.3.1.2 กรณีที่ 2

เป็นกรณีเมื่อข้อบกพร่องตามปกติเช่นเดียวกันกับกรณีที่ 1 แต่ทำการเร่งเครื่องที่ความเร็วรอบ เริ่มต้นสูงขึ้นคือจากความเร็วรอบประมาณ 2,800 RPM เป็น 4,400 RPM และถอนคันเร่งกลับมาที่ ความเร็วรอบเท่าเดิม กำหนดให้เวลาที่เกทปิดอยู่คือมีสัญญาณเวลาที่เกทเท่ากับ 0 องศาของลิ้นเร่งมีการเปลี่ยนแปลงจาก 22 องศาเป็น 26 องศาด้วยอัตราเร่งคงที่ใน 1 วินาทีและเปลี่ยนแปลงกลับจาก 26 องศาเป็น 22 องศาด้วยอัตราเร่งคงที่ใน 1 วินาทีเช่นเดิมตามรูปที่ 4.24 ค่า λ ที่ต้องการคือ 1 ค่า เอาท์พุทของระบบควบคุมแสดงดังในรูปที่ 4.25 และผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 4.26

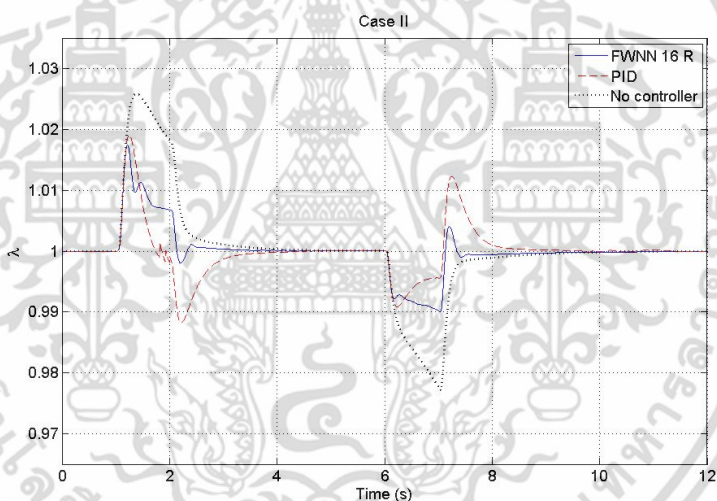


รูปที่ 4.24 กราฟองศาของลิ้นเร่งในกรณีที่ 2 ของระบบควบคุม โคร่งข่ายประสาทเทียมพีซีซีเอฟ เลต จากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 สัญญาณควบคุมของระบบควบคุม โคร่งจ่ายประสาทเทียมพีชชีแวลแสดงจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียวในกรณีที่ 2 เปรียบเทียบกับวิธี PID

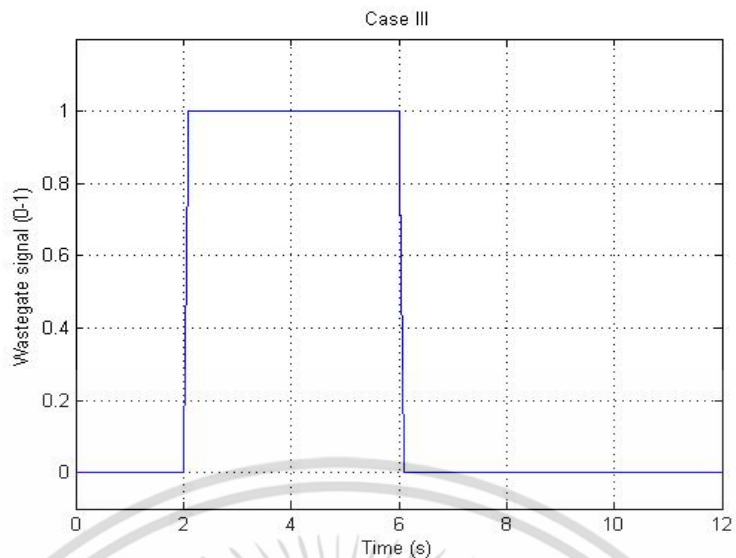


รูปที่ 4.26 กราฟผลลัพธ์ค่า z ที่ได้จากกรณีที่ 2 ของระบบควบคุม โคร่งจ่ายประสาทเทียมพีชชีแวลแสดงจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียวเปรียบเทียบกับวิธี PID และ ไม่มีระบบควบคุม

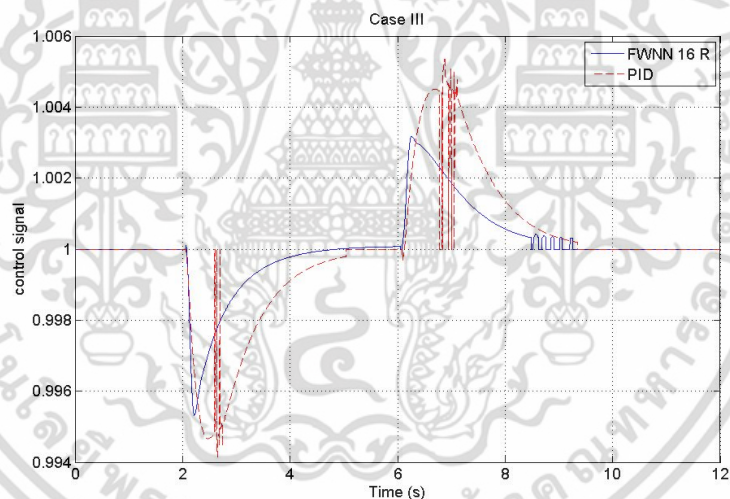
4.3.1.3 กรณีที่ 3

เป็นกรณีที่ขั้วรถจนความเร็วรอบถึงจุดหนึ่ง ความดันในระบบเครื่องยนต์สูงขึ้นจนเป็นอันตรายต่อเครื่องยนต์เวสต์เกตจึงเปิดออกเพื่อลดความดันในระบบ กำหนดให้ห้องสาลีนเร่งมีค่าคงที่เท่ากับ 30 องศา ความเร็วรอบเครื่องยนต์ประมาณ 5,800 RPM สัญญาณเวสต์เกตมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 ถึง 1 ใน 0.1 วินาที ก่อนเปลี่ยนกลับจาก 1 เป็น 0 ตามเดิมใน 0.1 วินาทีเช่นกันตามรูปที่ 4.27 ค่า z ที่ต้องการคือ 1 ค่าเอาต์พุตของระบบควบคุมแสดงดังในรูปที่ 4.28 และผลลัพธ์ที่ได้แสดงใน

รูปที่ 4.29 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

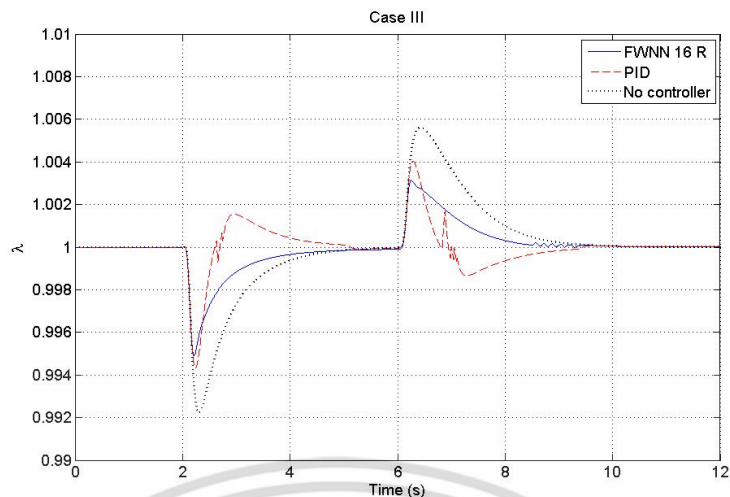


รูปที่ 4.27 กราฟสัญญาณเปิด-ปิดวาล์วเกทในกรณีที่ 3 ของระบบควบคุม โครงข่ายประสาทเทียม ฟัซซีเวฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว



รูปที่ 4.28 สัญญาณควบคุมของระบบควบคุม โครงข่ายประสาทเทียมฟัซซีเวฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียวในกรณีที่ 3 เปรียบเทียบกับวิธี PID

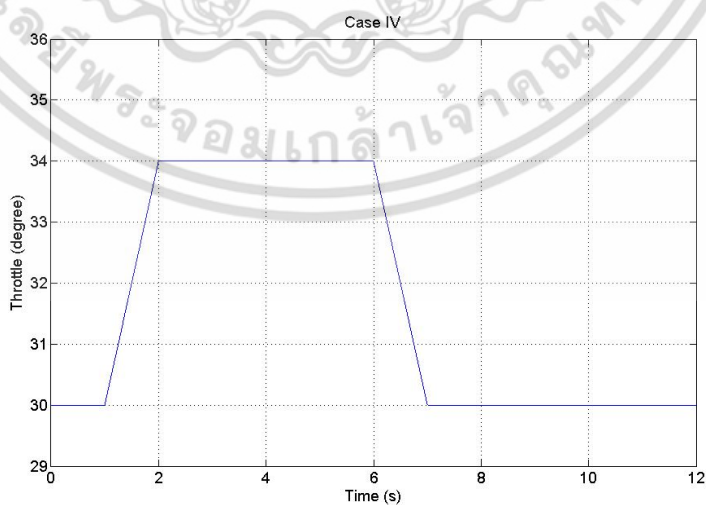
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 กราฟผลลัพธ์ค่า λ ที่ได้จากกรณีที่ 3 ของระบบควบคุม โคร่งข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟ เลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียวเปรียบเทียบกับวิธี PID และ ไม่มีระบบควบคุม

4.3.1.4 กรณีที่ 4

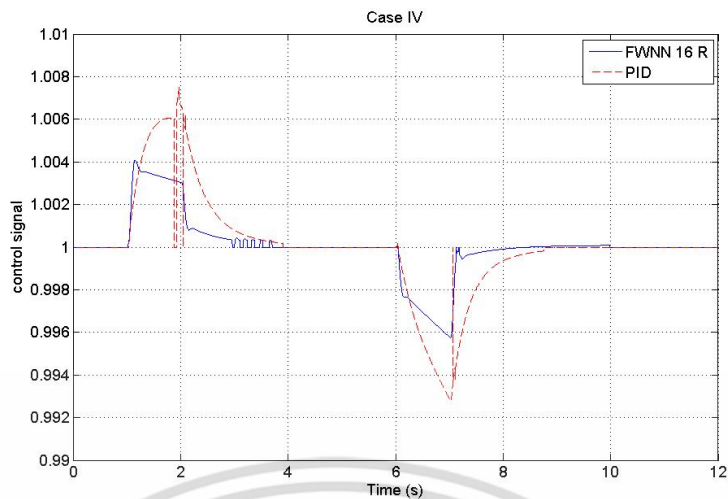
เป็นกรณีที่วาล์วเปิดอยู่เพื่อลดความดันในระบบ และมีการเร่งเครื่องจากความเร็รรอบประมาณ 5,100 RPM ถึง 6,000 RPM ก่อนจะลดความเร็วลงเหลือความเร็วรอบเท่าเดิม กำหนดให้วาล์วเปิดอยู่คือมีสัญญาณวาล์วเท่ากับ 1 องศาของลิ้นเร่งมีการเปลี่ยนแปลงจาก 30 องศา เป็น 34 องศา ก่อนจะลดลงกลับมาตามเดิมด้วยอัตราเร่งคงที่ใน 1 วินาทีตามรูปที่ 4.30 ค่า λ ที่ต้องการคือ 1 ค่าเอาท์พุทของระบบควบคุมแสดงดังในรูปที่ 4.31 และผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 4.32



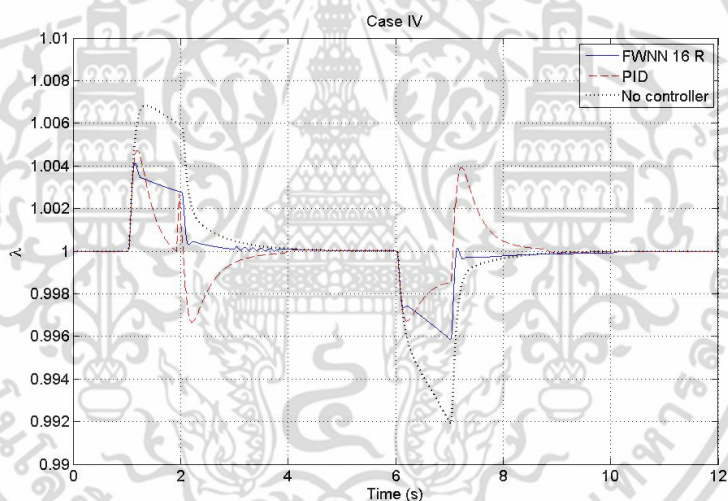
รูปที่ 4.30 กราฟองศาของลิ้นเร่งในกรณีที่ 4 ของระบบควบคุม โคร่งข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลต

จากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 สัญญาณควบคุมของระบบควบคุม โคร่งจ่ายประสาทเทียมพีชชีแวลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียวในกรณีที่ 4 เปรียบเทียบกับวิธี PID



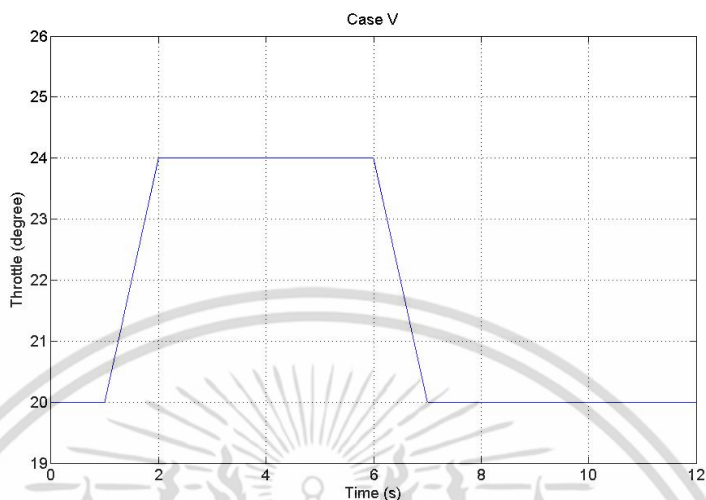
รูปที่ 4.32 กราฟผลลัพธ์ค่า λ ที่ได้จากกรณีที่ 4 ของระบบควบคุม โคร่งจ่ายประสาทเทียมพีชชีแวลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียวเปรียบเทียบกับวิธี PID และ ไม่มีระบบควบคุม

4.3.1.5 กรณีที่ 5

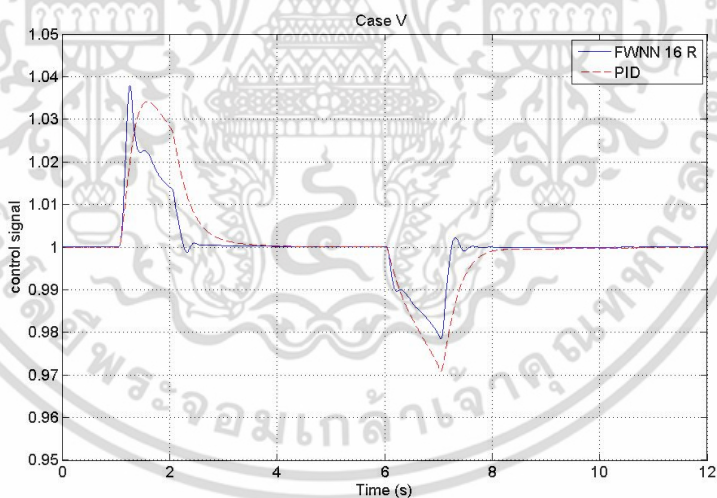
เป็นการเร่งเครื่องจากความเร็รรอบประมาณ 2,100 RPM ถึง 3,700 RPM ก่อนจะลดความเร็วรอบกลับมาที่ความเร็วเดิมในกรณีที่เครื่องยนต์ต้องการกำลังซึ่งต้องฉีดเชื้อเพลิงมากขึ้น โดยค่า λ ที่ต้องการในกรณีนี้คือ 0.9 ดังนั้นค่าอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงจากเดิมคือ 14.5 จะเปลี่ยนไปเป็น 13.05 แทน กำหนดให้เวสต์เกตปิดอยู่คือมีสัญญาณเวสต์เกตเท่ากับ 0 องศาของลิ้นเร่งมีการเปลี่ยนแปลงจาก 20 องศาเป็น 24 องศา ก่อนจะเปลี่ยนกลับมาเป็น 20 องศาเช่นเดิม ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราเร่งคงที่ใน 1 วินาทีตามรูปที่ 4.33 ค่าเอาต์พุตของระบบควบคุมแสดงดังในรูปที่ 4.34 และผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 4.35

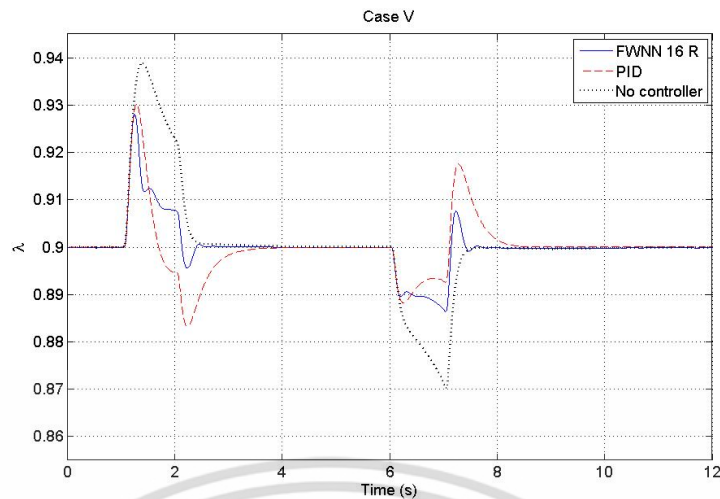


รูปที่ 4.33 กราฟของค่าของลิ้นเร่งในกรณีที่ 5 ของระบบควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีเอฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว



รูปที่ 4.34 สัญญาณควบคุมของระบบควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีเอฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียวในกรณีที่ 5 เปรียบเทียบกับวิธี PID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 กราฟผลลัพธ์ค่า λ ที่ได้จากกรณีที่ 5 ของระบบควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมฟิวชันเวฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียวเปรียบเทียบกับวิธี PID และไม่มีระบบควบคุม

4.3.1.6 ตารางผลการทดลอง

ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาด ค่าสูงสุดต่ำสุดของค่า λ และเวลาเข้าที่ของวิธีการควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมฟิวชันเวฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียวแบบ 16 กฎ เปรียบเทียบกับวิธีการ PID และแบบไม่มีระบบควบคุมของทั้ง 5 กรณีแสดงดังในตารางที่ 4.6 และในตารางที่ 4.7 เมื่อเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.6 ผลลัพธ์ที่ได้ทั้ง 5 กรณีของระบบควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมฟิวชันเวฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียวเปรียบเทียบกับวิธีการ PID และแบบไม่มีระบบควบคุม

		Max (λ)	Min (λ)	MSE (λ) 10^{-5}	Settling Time (s)
Case I	FWNN 16 Rule	1.0333	0.9849	3.0988	1.425
	PID	1.0360	0.9807	5.0350	2.005
	No controller	1.0462	0.9644	15.250	1.415
Case II	FWNN 16 Rule	1.0175	0.9901	1.3229	1.645
	PID	1.0191	0.9882	1.6756	2.220
	No controller	1.0258	0.9771	6.0681	2.545
Case III	FWNN 16 Rule	1.0031	0.9949	0.1069	3.563
	PID	1.0040	0.9943	0.1045	3.160
	No controller	1.0056	0.9922	0.4087	3.335

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและข้อมูลทั้งหมด ห้ามทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

		Max (λ)	Min (λ)	MSE (λ) 10^{-5}	Settling Time (s)
Case IV	FWNN 16 Rule	1.0041	0.9958	0.1618	2.095
	PID	1.0047	0.9967	0.1544	2.420
	No controller	1.0068	0.9919	0.6199	2.445
Case V	FWNN 16 Rule	0.9281	0.8864	2.4719	1.395
	PID	0.9302	0.8833	3.7887	2.155
	No controller	0.9388	0.8701	10.878	1.410

ตารางที่ 4.7 ผลลัพธ์ที่ได้ทั้ง 5 กรณีของระบบควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมฟิวชันเชิงเวลาจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียวเปรียบเทียบกับวิธีการ PID แบบเป็นเปอร์เซ็นต์

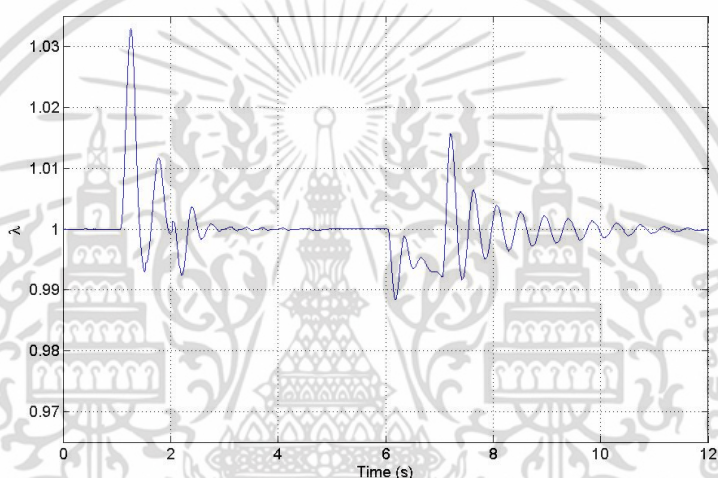
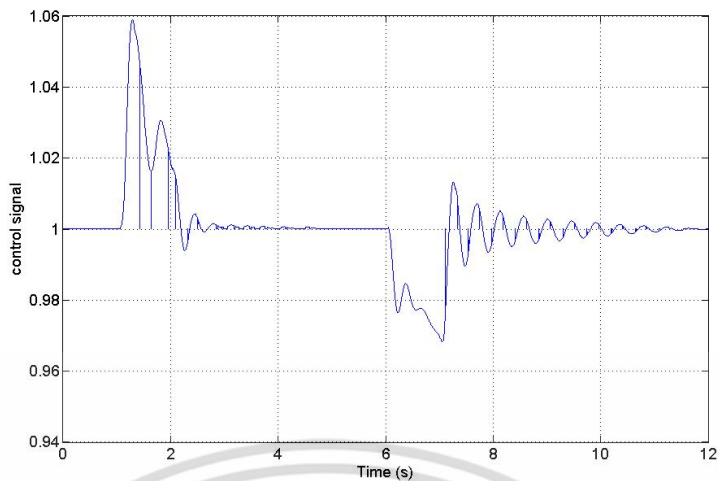
		Error max (λ)	Error min (λ)	MSE (λ)	Settling Time
Case I	FWNN 16 Rule	72.078	42.416	20.320	100.707
	PID	77.922	54.213	33.016	141.696
Case II	FWNN 16 Rule	67.829	43.231	21.801	64.637
	PID	74.031	51.528	27.613	87.230
Case III	FWNN 16 Rule	55.357	65.385	26.156	106.837
	PID	71.429	73.077	25.569	94.753
Case IV	FWNN 16 Rule	60.294	51.852	26.103	85.685
	PID	69.118	40.741	24.903	98.978
Case V	FWNN 16 Rule	72.423	87.452	22.724	98.936
	PID	77.835	89.838	34.829	152.837

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.6 และ 4.7 จะเห็นว่าวิธีการควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลตจะให้ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดและเวลาเข้าที่น้อยกว่าวิธี PID ในกรณีที่เวสท์เกทปิดอยู่ทั้งในกรณีที่ 1, 2 และ 5 โดยมีค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดน้อยกว่า 12.7%, 5.8% และ 12.1% และค่าเวลาเข้าที่น้อยกว่า 41%, 22.6% และ 53.9% ตามลำดับ แต่จะใช้เวลาเข้าที่มากกว่าเมื่อไม่มีระบบควบคุมในกรณีความเร็วรอบของเครื่องยนต์ต่ำเช่นในกรณีที่ 1 โดยใช้เวลามากกว่า 0.7% ซึ่งถือว่าน้อยมาก เมื่อความเร็วรอบของเครื่องยนต์สูงขึ้นความไวในการเปลี่ยนแปลงและพลวัตของระบบเครื่องยนต์จะน้อยลงทำให้เวลาเข้าที่ของระบบจะยืดยาวมากขึ้น ถึงตอนนี้เวลาเข้าที่ของวิธีการควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลตจะดีกว่าการไม่มีระบบควบคุม เช่นในกรณีที่ 2 ที่ดีกว่าถึง 35.7% และค่า λ สูงสุดต่ำสุดของวิธีโครงข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลตก็ดีกว่าอีก 2 วิธีด้วยเช่นกัน ค่า λ สูงสุดดีกว่า 5.8%, 6.2% และ 5.4% และค่า λ ต่ำสุดดีกว่า 11.8%, 8.3% และ 2.4% ในกรณีที่ 1, 2 และ 5 ตามลำดับเมื่อเทียบกับวิธี PID

ในกรณีเปิดเวสท์เกทคือกรณีที่ 3 และ 4 จะพบว่าเวลาเข้าที่ของวิธีการควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลตจะดีกว่าอีก 2 วิธีในกรณีที่ 4 โดยดีกว่าวิธี PID 13.3% และไม่มีระบบควบคุม 14.3% แต่จะแย่กว่าอีก 2 วิธีในกรณีที่ 3 โดยแย่กว่าวิธี PID 12.1% และไม่มีระบบควบคุม 6.8% และค่า λ ต่ำสุดของวิธีโครงข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลตในกรณีที่ 3 ให้ค่าดีกว่าวิธี PID 7.7% ในกรณีที่ 4 ให้ค่าแย่กว่าวิธี PID 11.1% ส่วนค่า λ สูงสุดของวิธีโครงข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลตมีค่าดีกว่าวิธี PID 16.1% และ 8.8% ในกรณีที่ 3 และ 4 ตามลำดับ แต่วิธีการ PID กลับให้ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดดีกว่าวิธีโครงข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลตทั้งในกรณีที่ 3 และ 4 ซึ่งมีค่า 0.6% และ 1.2% ตามลำดับ ทั้งนี้ก็เนื่องจากความไวต่อการเปลี่ยนแปลงและพลวัตของระบบเครื่องยนต์จะน้อยลงเพราะรอบเครื่องยนต์สูงและค่าห้วงเวลาของหัวฉีดเปลี่ยนไปตามรอบเครื่องยนต์ ทำให้วิธีโครงข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลตที่ออกแบบมาเพียงใช้กฎ 16 ข้อนั้นไม่เพียงพอจะครอบคลุมถึงการเปลี่ยนแปลงในข้อนี้ นอกจากนั้นสัญญาณอินพุตของระบบควบคุมได้ใช้เพียงสัญญาณจากตัวรับรู้เดียวจากตัวรับรู้ออกซิเจน ทำให้เมื่อเพิ่มการฉีดเชื้อเพลิงให้มากขึ้นเพื่อให้ค่า λ เข้าใกล้ค่าที่ต้องการมากขึ้นก็จะเกิดความขัดแย้งกันในกฎบางข้อของพีชชีทำให้เกิดการแกว่งของสัญญาณเป็นอย่างมาก เช่น ภาวะเงื่อนไขดังกรณีที่ 1 ดังในรูปที่ 4.36 เป็นต้น จึงเป็นเหตุให้ค่าเวลาเข้าที่เพิ่มมากขึ้นหรือในกรณีเลวร้ายที่สุดจะทำให้ระบบไม่เสถียรโดยจะเกิดการแกว่งของสัญญาณและไม่ยอมลู่เข้าสู่ค่าที่ต้องการ



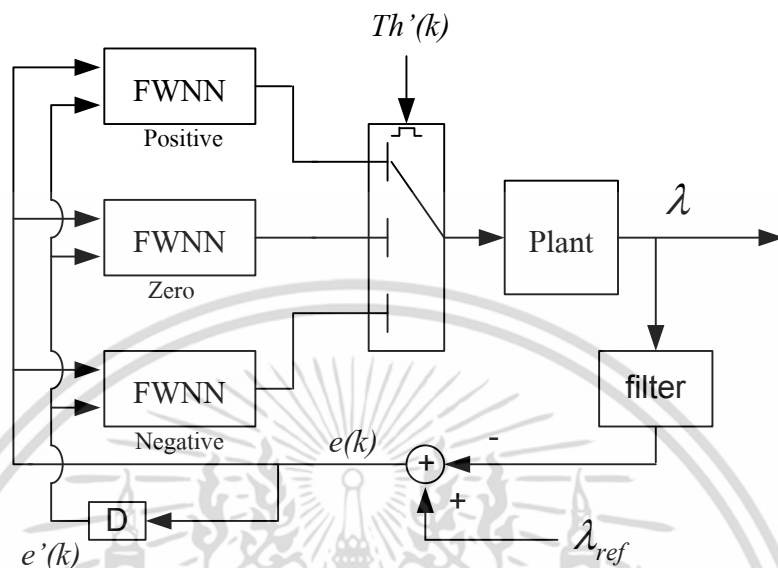
รูปที่ 4.36 กราฟสัญญาณค่า λ (ล่าง) และกราฟสัญญาณควบคุม (บน) ที่เกิดการแกว่งเพิ่มมากขึ้น เมื่อนัดเชื่อเพลิงเพิ่มขึ้นเพื่อพยายามลดข้อผิดพลาดในวิธีการควบคุมแบบ FWNN

4.4 ระบบควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีแวลต์จากสัญญาณตัวรับรู้หลายตัว

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับวิธีการควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีแวลต์ จึงจำเป็นต้องเพิ่มสัญญาณอินพุตจากตัวรับรู้อื่นนอกเหนือจากตัวรับรู้ออกซิเจน ในที่นี้พิจารณาเพิ่มสัญญาณอนุพันธ์ของลิ้นเร่งมาแยกโครงสร้างของระบบควบคุมให้ละเอียดย่อยลงไป โดยแยกออกเป็น 3 กรณีคือเป็นบวก ศูนย์ และลบ แต่ละกรณีมีโครงสร้างระบบควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีแวลต์เป็นของตนเอง โดยยังมีพื้นฐานเหมือนกับระบบควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีแวลต์จากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว สัญญาณอินพุตของแต่ละโครงสร้างยังเป็นค่า $e(k)$ และ $e'(k)$ คือเป็นค่าสัญญาณความผิดพลาดและค่าสัญญาณอนุพันธ์ของความผิดพลาดที่เกิดจากนำค่า λ จากตัวรับรู้ออกซิเจนไปลบกับค่า λ_{ref} โดยมีสัญญาณอนุพันธ์ของสัญญาณองศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของลื่นแรง $Th'(k)$ เป็นตัวเลือกว่าจะใช้ระบบควบคุมย่อยตัวใด โครงสร้างการควบคุมเป็นดังรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.37 โครงสร้างการควบคุมของระบบควบคุมโครงข่ายประสาทดัดเฟสชี่เวฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้หลายตัว

ระบบควบคุมโครงข่ายประสาทดัดเฟสชี่เวฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้หลายตัวในกรณีนี้กำหนดให้ใช้ฟัซซี่ 24 กฎ ค่าพารามิเตอร์ของตัวแปรเริ่มต้นเป็นไปตามตารางที่ 4.8 โดยกำหนดให้

P = Positive, N = Negative, Z = Zero, LP = Large positive, SP = Small positive,

SN = Small negative และ LN = Large negative

ตารางที่ 4.8 กฎ 24 ชื่อของระบบควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีเอฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้หลายตัวที่ใช้กำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปร

		$e'(k)$				
		P		N		
$Th'(k)$	P	LP		LP		LP
		SP		SP		SP
		LP	SP	SN	LN	
	Z	P	P	P	P	LP
		P	P	P	P	SP
		N	N	N	N	SN
		N	N	N	N	LN
	N	P		N		
		SN		SN		SN
		LN		LN		LN

ใช้ชุดฝึกสอนตามหัวข้อที่ 4.1 ค่าตัวแปรที่ได้หลังผ่านกระบวนการเรียนรู้ที่ใช้ในหัวข้อนี้เป็นไปตามตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าตัวแปรที่ได้หลังจากการเรียนรู้ของระบบควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีเอฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้หลายตัวแบบ 24 กฎ

Rule	Th'(k)	e(k)				e'(k)				w
		a	b	c	σ	a	b	c	σ	
1	P	0.0506	0.0583	0.0330	0.0700	0.2978	0.2031	0.1730	0.3200	0.0587
2		0.0193	0.0897	0.0560	0.0545	0.3005	-0.1010	-0.1040	0.3045	0.0420
3		0.0568	-0.0025	0.0114	0.0489	0.2987	0.2020	0.2114	0.2989	0.0244
4		0.0528	-0.0115	-0.0052	0.0492	0.3001	-0.1012	-0.1052	0.2992	-0.0133

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 (ต่อ)

Rule	Th'(k)	e(k)				e'(k)				w	
		a	b	c	σ	a	b	c	σ		
5	Z	0.0311	0.0637	0.0547	0.0413	0.2500	0.2998	0.2947	0.2563	0.0505	
6		0.0227	0.0703	0.0529	0.0426	0.2495	0.1009	0.0929	0.2576	0.0502	
7		0.0236	0.0699	0.0578	0.0368	0.2503	-0.1003	-0.1022	0.2518	0.0483	
8		0.0270	0.0664	0.0574	0.0372	0.2495	-0.3006	-0.3026	0.2522	0.0505	
9		0.0405	0.0069	0.0097	0.0418	0.2509	0.2988	0.2897	0.2568	0.0547	
10		0.0403	0.0089	0.0120	0.0407	0.2483	0.1017	0.0920	0.2557	0.0493	
11		0.0437	0.0079	0.0151	0.0402	0.2512	-0.0998	-0.1049	0.2552	0.0299	
12		0.0351	0.0221	0.0238	0.0275	0.2491	-0.3009	-0.2962	0.2425	0.0505	
13		0.0387	-0.0217	-0.0259	0.0257	0.2492	0.3011	0.2941	0.2407	-0.0389	
14		0.0451	-0.0093	-0.0131	0.0408	0.2513	0.0994	0.1069	0.2558	-0.0272	
15		0.0391	-0.0099	-0.0122	0.0386	0.2482	-0.1013	-0.0922	0.2536	-0.0521	
16		0.0375	-0.0123	-0.0135	0.0392	0.2508	-0.2991	-0.2935	0.2542	-0.0535	
17		0.0246	-0.0672	-0.0563	0.0381	0.2494	0.3008	0.3037	0.2531	-0.0510	
18		0.0216	-0.0694	-0.0583	0.0360	0.2504	0.1000	0.1017	0.2510	-0.0490	
19		0.0206	-0.0697	-0.0508	0.0436	0.2491	-0.1011	-0.0908	0.2586	-0.0521	
20		0.0317	-0.0638	-0.0577	0.0380	0.2501	-0.2997	-0.2977	0.2530	-0.0499	
21		N	0.0449	-0.0669	-0.0325	0.0571	0.2498	0.1550	0.1675	0.2671	-0.0448
22			0.0506	-0.0497	-0.0237	0.0565	0.2472	-0.1047	-0.0737	0.2665	-0.0568
23			0.0465	0.0102	0.0001	0.0431	0.2492	0.1523	0.1501	0.2531	0.0127
24			0.0492	0.0054	-0.0133	0.0420	0.2496	-0.1020	-0.1133	0.2520	-0.0073

4.4.1 ผลการทดลอง

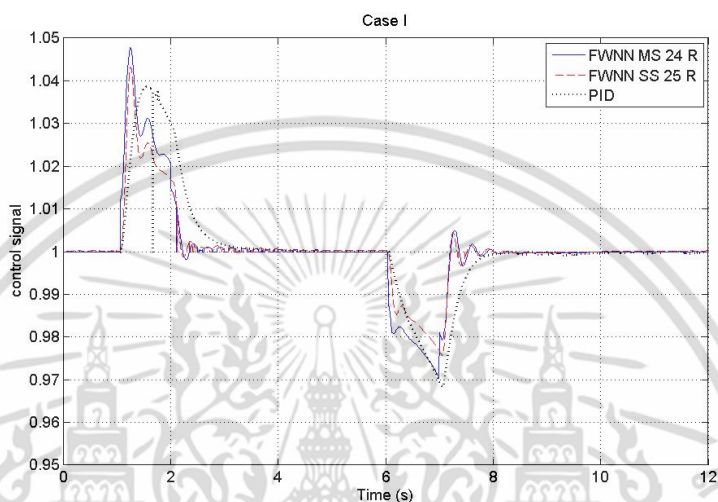
ทดลองซ้ำตามหัวข้อที่ 4.3.1 ทั้ง 5 กรณีด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีเอฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้หลายตัว (FWNN MS) แบบ 24 กฎ และนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากวิธีการ PID และวิธีโครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีเอฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว (FWNN SS) แบบ 25 กฎซึ่งมีค่าตัวแปรที่ได้หลังผ่านกระบวนการเรียนรู้ตามตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ค่าตัวแปรที่ได้หลังจากการเรียนรู้ของระบบควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีเอฟ
 เลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียวแบบ 25 กฎ

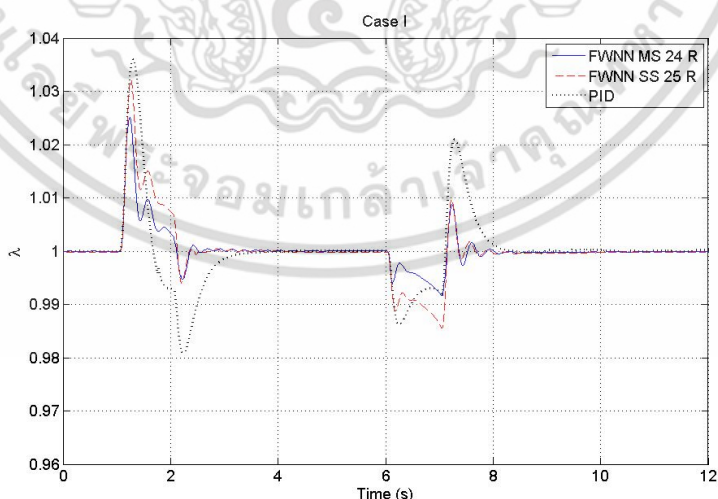
Rule	e(k)				e'(k)				w
	a	b	c	σ	a	b	c	σ	
1	0.0293	0.0606	0.0570	0.0338	0.2001	0.2999	0.2992	0.2014	0.0504
2	0.0220	0.0671	0.0523	0.0385	0.1994	0.1012	0.0991	0.2005	0.0508
3	0.0216	0.0674	0.0573	0.0335	0.2004	0.0004	-0.0002	0.1999	0.0489
4	0.0211	0.0675	0.0565	0.0337	0.2002	-0.1006	-0.0999	0.1999	0.0493
5	0.0269	0.0625	0.0532	0.0380	0.1996	-0.3002	-0.2986	0.2018	0.0514
6	0.0328	0.0154	0.0188	0.0308	0.2004	0.2996	0.2995	0.2001	0.0509
7	0.0347	0.0176	0.0158	0.0328	0.1989	0.1017	0.1031	0.1979	0.0416
8	0.0378	0.0204	0.0165	0.0294	0.2009	0.0017	0.0028	0.2004	0.0493
9	0.0360	0.0201	0.0214	0.0272	0.2003	-0.1011	-0.1018	0.1997	0.0296
10	0.0306	0.0206	0.0208	0.0296	0.1996	-0.3002	-0.3011	0.1986	0.0475
11	0.0306	-0.0017	0.0001	0.0324	0.2002	0.2998	0.2989	0.2013	0.0225
12	0.0259	-0.0071	-0.0023	0.0373	0.1993	0.1006	0.0994	0.1999	0.0285
13	0.0250	-0.0107	-0.0039	0.0357	0.2002	0.0009	0.0013	0.2002	0.0204
14	0.0236	-0.0138	-0.0015	0.0352	0.2004	-0.1002	-0.0988	0.2009	0.0139
15	0.0289	-0.0025	0.0014	0.0322	0.1998	-0.3001	-0.2996	0.2006	0.0187
16	0.0301	-0.0187	-0.0632	0.0256	0.1998	0.3001	0.3004	0.1996	-0.0490
17	0.0409	-0.0032	-0.0067	0.0377	0.2012	0.0992	0.0982	0.2016	-0.0386
18	0.0407	-0.0020	-0.0008	0.0409	0.1996	-0.0020	-0.0038	0.1992	-0.0461
19	0.0389	-0.0028	-0.0035	0.0424	0.1989	-0.0999	-0.1004	0.1983	-0.0544
20	0.0337	-0.0155	-0.0192	0.0304	0.2003	-0.2998	-0.2997	0.2002	-0.0498
21	0.0268	-0.0625	-0.0555	0.0355	0.1997	0.3003	0.2993	0.2008	-0.0509
22	0.0225	-0.0661	-0.0594	0.0309	0.2001	0.1002	0.1000	0.1999	-0.0493
23	0.0229	-0.0659	-0.0588	0.0319	0.2001	-0.0003	0.0001	0.2000	-0.0494
24	0.0227	-0.0662	-0.0559	0.0352	0.1996	-0.1005	-0.0995	0.2004	-0.0504
25	0.0299	-0.0603	-0.0588	0.0318	0.2001	-0.2999	-0.2997	0.2006	-0.0500

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพใช้ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาด ค่าเวลาเข้าที่ และค่าสูงสุดต่ำสุดของค่า λ เช่นเดียวกับหัวข้อ 4.3.1 กราฟสัญญาณควบคุมที่ได้จากกรณีที่ 1-5 แสดงดังรูป 4.38, 4.40, 4.42, 4.44 และ 4.46 ตามลำดับ กราฟผลลัพธ์ค่า λ ของกรณีที่ 1-5 แสดงดังรูป 4.39, 4.41, 4.43, 4.45 และ 4.47 ตามลำดับ และตารางผลการทดลองเปรียบเทียบแสดงตามตารางที่ 4.11 และในตารางที่ 4.12 เมื่อเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์

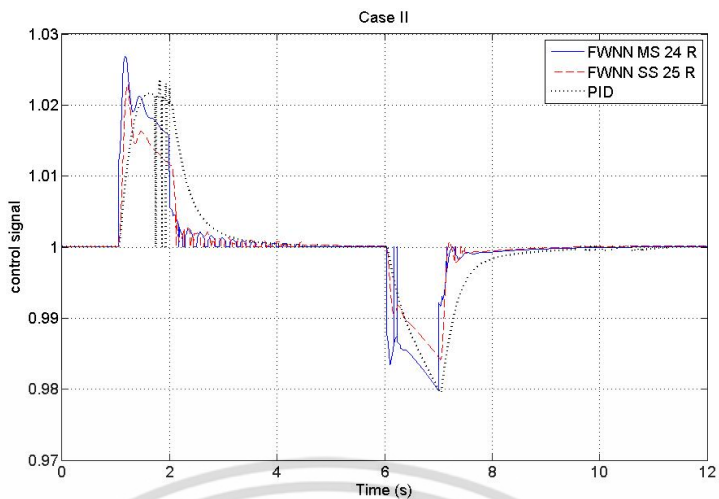


รูปที่ 4.38 สัญญาณควบคุมของระบบควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีแวลต์จากสัญญาณตัวรับรู้หลายตัวในกรณีที่ 1 เปรียบเทียบกับวิธี PID และวิธี โครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีแวลต์จากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว

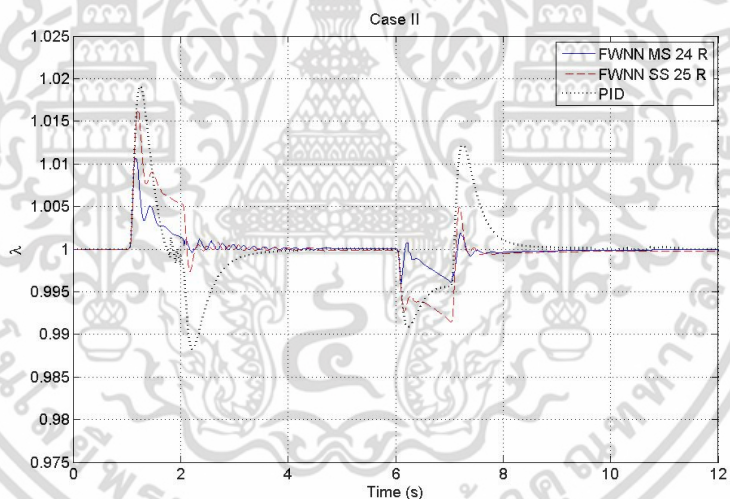


รูปที่ 4.39 กราฟผลลัพธ์ค่า λ ที่ได้จากกรณีที่ 1 ของระบบควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีแวลต์จากสัญญาณตัวรับรู้หลายตัวเปรียบเทียบกับวิธี PID และวิธี โครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีแวลต์จากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

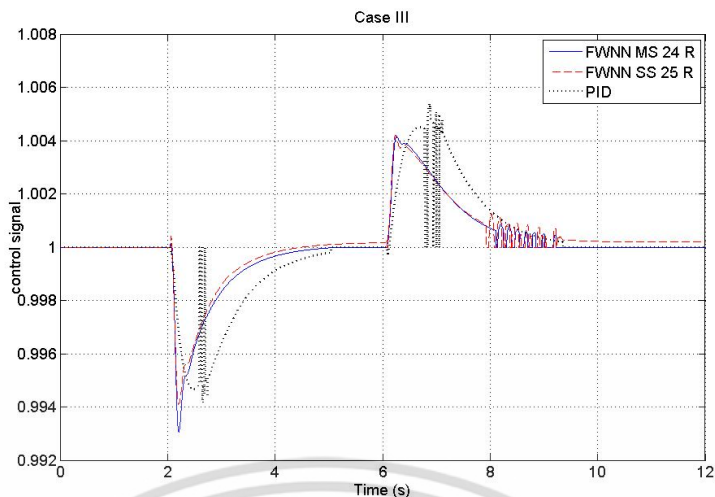


รูปที่ 4.40 สัญญาณควบคุมของระบบควบคุม โคร่งข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้หลายตัวในกรณีที่ 2 เปรียบเทียบกับวิธี PID และวิธี โคร่งข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว

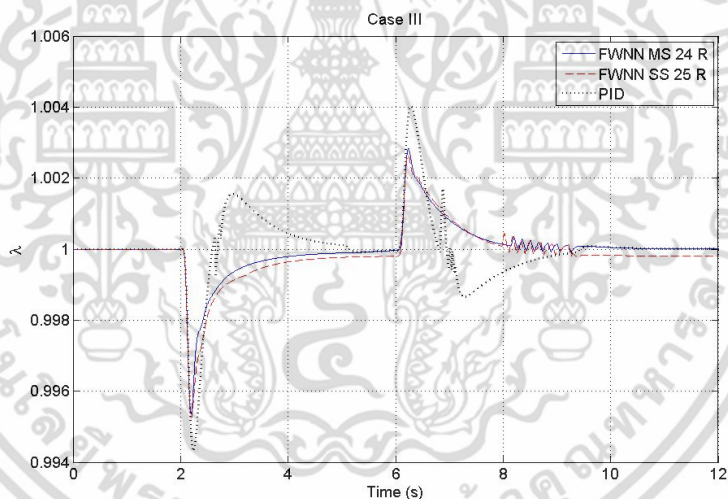


รูปที่ 4.41 กราฟผลลัพธ์ค่า λ ที่ได้จากกรณีที่ 2 ของระบบควบคุม โคร่งข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้หลายตัวเปรียบเทียบกับวิธี PID และวิธี โคร่งข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

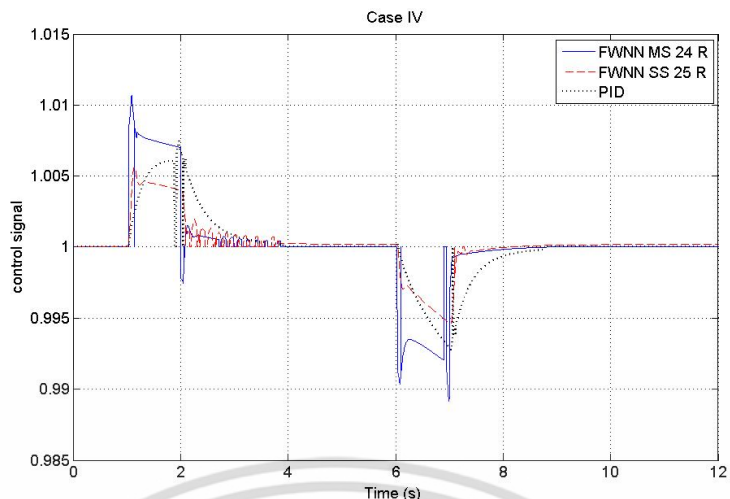


รูปที่ 4.42 สัญญาณควบคุมของระบบควบคุม โคร่งข่ายประสาทเทียมพีชชีแวลต์จากสัญญาณตัวรับรู้หลายตัวในกรณีที่ 3 เปรียบเทียบกับวิธี PID และวิธี โคร่งข่ายประสาทเทียมพีชชีแวลต์จากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว

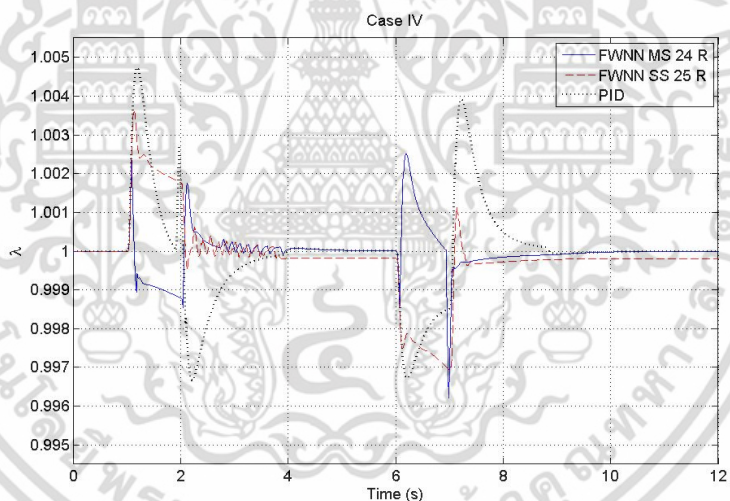


รูปที่ 4.43 กราฟผลลัพธ์ค่า λ ที่ได้จากกรณีที่ 3 ของระบบควบคุม โคร่งข่ายประสาทเทียมพีชชีแวลต์จากสัญญาณตัวรับรู้หลายตัวเปรียบเทียบกับวิธี PID และวิธี โคร่งข่ายประสาทเทียมพีชชีแวลต์จากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

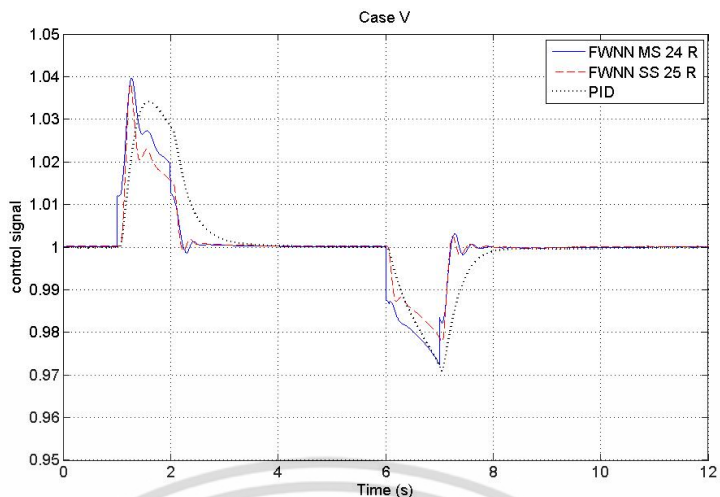


รูปที่ 4.44 สัญญาณควบคุมของระบบควบคุม โคร่งข่ายประสาทเทียมพีชชีแอฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้หลายตัวในกรณีที่ 4 เปรียบเทียบกับวิธี PID และวิธี โคร่งข่ายประสาทเทียมพีชชีแอฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว

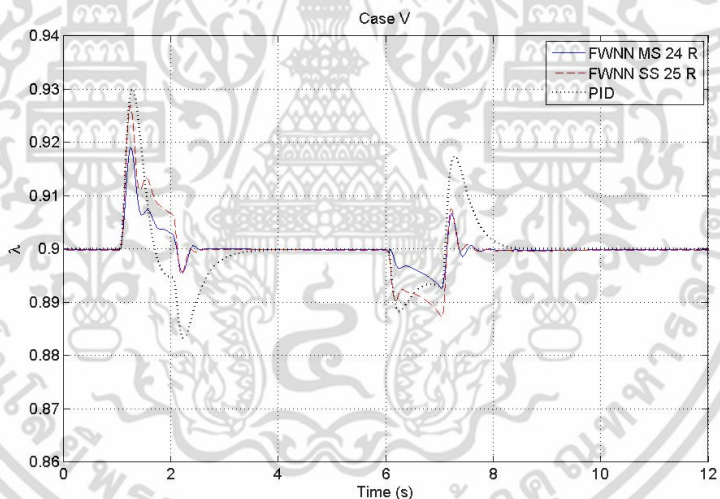


รูปที่ 4.45 กราฟผลลัพธ์ค่า λ ที่ได้จากรณีที่ 4 ของระบบควบคุม โคร่งข่ายประสาทเทียมพีชชีแอฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้หลายตัวเปรียบเทียบกับวิธี PID และวิธี โคร่งข่ายประสาทเทียมพีชชีแอฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.46 สัญญาณควบคุมของระบบควบคุม โคร่งข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้หลายตัวในกรณีที่ 5 เปรียบเทียบกับวิธี PID และวิธี โคร่งข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว



รูปที่ 4.47 กราฟผลลัพธ์ค่า λ ที่ได้จากรณีที่ 5 ของระบบควบคุม โคร่งข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้หลายตัวเปรียบเทียบกับวิธี PID และวิธี โคร่งข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ผลลัพธ์ที่ได้ทั้ง 5 กรณีของระบบควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมพีชชีแอฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้หลายตัวเปรียบเทียบกับวิธี PID และวิธีโครงข่ายประสาทเทียมพีชชีแอฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว

		Max (λ)	Min (λ)	MSE (λ) 10^{-5}	Settling Time (s)
Case I	FWNN MS 24 Rule	1.0251	0.9916	1.2297	1.500
	FWNN SS 25 Rule	1.0322	0.9855	2.8140	1.413
	PID	1.0360	0.9807	5.0350	2.005
Case II	FWNN MS 24 Rule	1.0106	0.9957	0.2107	1.575
	FWNN SS 25 Rule	1.0164	0.9914	0.9470	2.088
	PID	1.0191	0.9882	1.6756	2.220
Case III	FWNN MS 24 Rule	1.0028	0.9954	0.0525	3.145
	FWNN SS 25 Rule	1.0026	0.9952	0.0646	4.475
	PID	1.0040	0.9943	0.1045	3.160
Case IV	FWNN MS 24 Rule	1.0025	0.9962	0.0267	1.875
	FWNN SS 25 Rule	1.0037	0.9969	0.0941	2.735
	PID	1.0047	0.9967	0.1544	2.420
Case V	FWNN MS 24 Rule	0.9191	0.8926	0.8153	1.370
	FWNN SS 25 Rule	0.9270	0.8872	2.1567	1.400
	PID	0.9302	0.8833	3.7887	2.155

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ผลลัพธ์ที่ได้ทั้ง 5 กรณีของระบบควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีเอฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้หลายตัวเปรียบเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์กับวิธี PID และวิธีโครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีเอฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว

		Error max (λ)	Error min (λ)	MSE (λ)	Settling Time
Case I	FWNN MS 24 R	54.329	23.596	8.064	106.007
	FWNN SS 25 R	69.697	40.730	18.452	99.859
	PID	77.922	54.213	33.016	141.696
Case II	FWNN MS 24 R	41.085	18.777	3.472	61.886
	FWNN SS 25 R	63.566	37.555	15.606	82.043
	PID	74.031	51.528	27.613	87.230
Case III	FWNN MS 24 R	50.000	58.974	12.846	94.303
	FWNN SS 25 R	46.429	61.538	15.806	134.183
	PID	71.429	73.077	25.569	94.753
Case IV	FWNN MS 24 R	36.765	46.914	4.302	76.687
	FWNN SS 25 R	54.412	38.272	15.174	111.861
	PID	69.118	40.741	24.903	98.978
Case V	FWNN MS 24 R	49.227	82.679	7.495	97.163
	FWNN SS 25 R	69.588	86.836	19.826	99.291
	PID	77.835	89.838	34.829	152.837

4.4.2 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.11 และ 4.12 จะเห็นว่าวิธีการโครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีเอฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้หลายตัวจะให้ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดและเวลาเข้าที่ต่ำกว่าวิธีการ PID และวิธีการโครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีเอฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียวในทุกกรณี โดยมีค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดน้อยกว่าวิธี PID 25%, 24.1%, 12.7%, 20.6% และ 27.33% และน้อยกว่าวิธีโครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีเอฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว 10.4%, 12.1%, 3%, 10.9% และ 12.3% จากกรณีที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับ ค่าเวลาเข้าที่ต่ำกว่าวิธีการ PID 35.7%, 25.3%, 0.5%, 22.3% และ 55.7% จากกรณีที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับและดีกว่าวิธีการโครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีเอฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว 20.2%, 39.9%, 35.2% และ 2.1%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกรณีที่ 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับ ยกเว้นที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่ำและเวสท์เกทปิดนั้นก็คือ กรณีที่ 1 ค่าเวลาเข้าที่ของวิธีการ โครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีเวฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียวจะ ดีกว่าวิธีการ โครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีเวฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้หลายตัว 6.2% ในกรณีที่เวสท์ เกทปิด โครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีเวฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้หลายตัวจะให้ค่า ๑ สูงสุดต่ำสุด ดีกว่าอีก 2 วิธี และในกรณีที่เวสท์เกทเปิดทำงานก็จะให้ค่าที่ดีกว่าเช่นกัน ยกเว้นในกรณีที่ 3 ที่ให้ค่า ๑ สูงสุดจะแย่กว่าวิธีการ โครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีเวฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว 3.6% และในกรณีที่ 4 ที่ให้ค่า ๑ ต่ำสุดจะแย่กว่าอีก 2 วิธี โดยแย่กว่าวิธี PID 6.2% และแย่กว่าวิธีการ โครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีเวฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียว 8.6% เมื่อมองภาพ โดยรวมแล้ว ถึง เวลาเข้าที่ของระบบควบคุม โครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีเวฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้หลายตัวจะเพิ่ม มากขึ้นจากระบบควบคุม โครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีเวฟเลตจากสัญญาณตัวรับรู้ตัวเดียวที่ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ต่ำประมาณ 2% แต่ก็ยังให้ค่าเวลาเข้าที่ที่ดีกว่าวิธี PID ประมาณ 45.7% และให้ค่าที่ดีขึ้นเมื่อความเร็วรอบของเครื่องยนต์สูงขึ้น ซึ่งจัดว่าประสบความสำเร็จในการเพิ่ม ประสิทธิภาพของระบบควบคุม

ผลการทดลองที่ได้นำเสนอในบทนี้ทำให้ทราบถึงปัญหาและปัจจัยที่สำคัญในการนำ โครงข่าย ประสาทเทียมพีซีซีเวฟเลตมาใช้ควบคุมอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงซึ่งจะนำเสนอข้อสรุป และข้อเสนอแนะในบทถัดไป

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

ความต้องการใช้เชื้อเพลิงในยานยนต์มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังจะเห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของรถยนต์ในปัจจุบัน ก๊าซธรรมชาตินับเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะเข้ามาแทนน้ำมันที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในปัจจุบันและกำลังจะหมดไปในอนาคต ซึ่งการใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงนั้นมิให้เห็นแล้วในปัจจุบันว่าการคิดแปลงเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันอยู่เดิมให้เปลี่ยนมาสามารถใช้ก๊าซธรรมชาติแทนได้ แต่ก็มักประสบกับปัญหาเรื่องกำลังของเครื่องยนต์ลดลงแทนเนื่องมาจากระบบควบคุมการฉีดจ่ายน้ำมันที่ฉีดจ่ายไม่ดีพอ การควบคุมอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงก็นับเป็นวิธีหนึ่งในการแก้ปัญหาที่ดังนั้นก็จึงต้องหาวิธีการที่เหมาะสมมาช่วยในการควบคุมระบบเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว

โครงข่ายประสาทเทียมฟuzzyเป็นวิธีการควบคุมวิธีหนึ่งซึ่งกำลังเป็นที่นิยมในปัจจุบัน เพราะเป็นระบบที่มีกระบวนการเรียนรู้ในตนเองและ โครงสร้างของระบบสามารถตีความหมายและให้เหตุผลได้ โครงข่ายประสาทเทียมฟuzzyเวฟเลตที่ใช้ควบคุมอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์เทอร์โบแบบจุดระเบิดด้วยประกายไฟได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก็เช่นเดียวกัน เป็นการรวมกันของเวฟเลต ตรรกะฟuzzy และ โครงข่ายประสาทเทียม โดยมีโครงสร้างระบบควบคุมเป็นแบบฟuzzy TSK และมีกฎพื้นฐานเป็น IF-THEN โดยมีเวฟเลตมาช่วยโครงข่ายประสาทเทียมสังเคราะห์และอนุมาน

จากการทดสอบระบบควบคุมอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงที่ใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียมฟuzzyเวฟเลตทั้งห้ากรณีจากแบบจำลองเครื่องยนต์เทอร์โบแบบจุดระเบิดด้วยประกายไฟที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงใน โปรแกรม Matlab แสดงให้เห็นว่าสามารถลดความผิดพลาดลงมาได้มาก และทำให้ระบบเข้าสู่จุดเสถียรได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ระบบมีสมรรถนะที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการ PID ซึ่งเป็นวิธีการพื้นฐานที่ใช้กันในปัจจุบัน โดยค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดนั้นดีกว่าประมาณ 5.77% และค่าเวลาเข้าที่ดีกว่าประมาณ 23.74% โดยเฉลี่ยเมื่อใช้ระบบควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียมฟuzzyเวฟเลตแบบ 16 กฎจากสัญญาณตัวรับรู้ออกซิเจนเพียงตัวเดียว นอกจากนั้นยังเป็นวิธีการที่ปรับแต่งพารามิเตอร์ได้ง่ายกว่าวิธีควบคุมแบบฟuzzyซึ่งจำเป็นต้องใช้ประสบการณ์และความรู้ของมนุษย์ในการปรับแต่งพารามิเตอร์ให้เหมาะสม จากข้อดีที่กล่าวมาข้างต้นทำให้วิธีโครงข่ายประสาทเทียมฟuzzyเวฟเลตสามารถนำไปใช้อุตสาหกรรมยานยนต์ได้จริง

นอกจากนี้เรายังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบควบคุมที่ใช้วิธีการนี้โดยการเพิ่มกฎของฟuzzyให้เพิ่มขึ้น หรือนำสัญญาณจากตัวรับรู้อื่นมาแยกย่อยระบบควบคุมซึ่งทำให้กฎในแต่ละระบบควบคุมย่อยมีจำนวนน้อยลงกว่าเดิมและมีความสามารถโดยรวมมากขึ้น หรือให้สัญญาณอินพุตจากตัวรับรู้อื่นๆที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติมในโครงข่ายประสาทเทียมเวฟเลตก็จะช่วยให้สามารถควบคุมระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้แม่นยำยิ่งขึ้น เช่น ระบบควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีวีฟเลตแบบ 25 กฎจากสัญญาณตัวรับรู้ออกซิเจนและองศาสิ้นเร่ง โดยค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดนั้นดีกว่าวิธี PID ประมาณ 21.95% และค่าเวลาเข้าที่ดีกว่าประมาณ 27.89%

วิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์เป็นเทคนิคหนึ่งเท่านั้นที่ช่วยในการปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องยนต์ ยังมีเทคนิควิธีการอื่นที่สามารถนำมาใช้ร่วมกันได้ เช่น ใช้ร่วมกับวิธีควบคุมแบบ PID กลายเป็นการควบคุมอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงปรับตัวได้ (Adaptive Air-Fuel Ratio Control) หรือใช้ร่วมกับการควบคุมแบบ Smith Predictor เป็นต้น ซึ่งจะทำให้ระบบมีสมรรถนะที่ดีมากยิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Z. Zhang, H. Huang. “Research on Exhaust of CNG and Gasoline Dual Engine.” **Journal of Xihua University**, 2005. pp. 22-24.
- [2] M. Müller “Estimation and Control of Turbocharged Engines.” **SAE technical paper series**, no. 2008-01-1013, 2008.
- [3] L. Eriksson. “Modeling and Control of Turbocharged SI and DI Engines.” **Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP**, vol. 62, no. 4, 2007. pp. 523-538.
- [4] J. Bergström and J. Brugård. “Modeling of a turbo charged spark ignited engine.” Master’s thesis of *Linköping University*. 1999.
- [5] F. Pettersson. “Simulation of a Turbo Charged Spark Ignited Engine.” Master’s thesis of *Linköping University*. 2000.
- [6] Y.A. Cengel. **Heat Transfer – A Practical Approach**. 2nd ED. McGraw-Hill. 2003. pp. 433.
- [7] J.P. Holman. **Heat Transfer**. 2nd ED. McGraw-Hill. 1997.
- [8] L. Eriksson, L. Nielsen, J. Brugård, J. Bergström, F. Pettersson and P. Andersson. “Modeling of Turbocharged SI Engine.” **Annual Reviews in Control**, vol. 26, 2002. pp. 129-137.
- [9] J.B. Heywood. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. New York : McGraw-Hill 1988.
- [10] M. Nyberg and L. Nielsen. “Model Based Diagnosis for the Air Intake System of the SI-engine.” **International Congress & Exposition**, 1997. pp. 1-12.
- [11] P. Andersson. “Air charge estimation in turbocharged spark ignition engines.” Ph.D. dissertation of *Linköping University*. 2005.
- [12] ยศพงษ์ ลอนนวล, สำเรง จักรใจ, สมชาย จันทร์ชานนา และ นวรงค์ ชลคุป. “การวิเคราะห์ส่วนประกอบที่แปรผันของก๊าซธรรมชาติสำหรับรถยนต์ที่ใช้ในประเทศไทย” **การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 3, ปีที่ 3, พฤษภาคม 2550**. หน้า 1-6
- [13] R. Yuan, H. Feng and M. Cen, “Modeling and Simulation of Crush Natural Gas Turbo Engine.” **Journal of computers**, vol. 4, no. 11, 2009. pp. 1175-1181.
- [14] L. Eriksson. “Mean value models for exhaust system temperature.” **SAE Technical Paper**, no. 2002-01-0374, 2002.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] S. Brown. **“Turbocharging guide.”** [Online]. Available :
http://www.turbomustangs.com/turbotech/turbo_guide.pdf
- [16] J.P Jensen, A.F. Kristensen, S.C. Sorenson, N. Houbak and E. Hendricks. “Mean Value Modeling of a small Turbocharged Diesel Engine.” **SAE Technical Paper**, no. 910070, 1991.
- [17] N. Watson and M.S. Janota. **Turbocharging the Internal Combustion Engine**. The Macmillan Press Ltd. 1982.
- [18] S.L. Dixon. **Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery**. 4th ED. Butterworth-Heinemann. 1998.
- [19] E. Hendricks. “Isothermal vs. adiabatic mean value si engine models.” **3rd IFAC Workshop, Advances in Automotive Control**, vol. 3, 2001. pp. 373-378.
- [20] G. Gnanam, S.R. Habibi, R.T. Burton, and M.T. Sulatisky. “Neural Network Control of Air-to-Fuel Ratio in a Bi-Fuel Engine.” **IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics—Part C: Application and reviews**, vol. 36, no. 5, 2006. pp. 656-666.
- [21] BOSCH. **“Transfer function LSM-11.”** [Online]. Available :
http://www.techedge.com.au/vehicle/wbo2/fmd/FMD_curve.gif
- [22] A. Goda. **“Introduction to neural networks.”** [Online]. Available :
<http://home.agh.edu.pl/~vlsi/AI/intro/>. 2005.
- [23] R.H. Abiyev and O. Kaynak. “Fuzzy Wavelet Neural Networks for Identification and Control of Dynamic Plants—A Novel Structure and a Comparative Study.” **IEEE, Transactions on industrial electronics**, Vol. 55, No. 8, 2008. pp. 3133-3140.
- [24] E. Hendricks. “A generic mean value engine model for spark ignition engines.” **SIMS.**, vol. 41, 2000.
- [25] A.Y. Karnik, J.H. Buckland and J.S. Freudenberg. “Electronic Throttle and Wastegate Control for Turbocharged Gasoline Engines.” **American Control Conference**, 2005. pp. 4434-4439.
- [26] Z. Weige, J. Jiuchun, X. Yuan and Z. Xide. “CNG Engine Air-Fuel Ratio Control Using Fuzzy Neural Networks.” **The 2nd International Workshop on Autonomous Decentralized System**, vol. 2. pp. 156-161.
- [27] S. A. Frei. **“Performance and Driveability Optimization of Turbocharged Engine Systems.”** Ph.D. dissertation of Swiss Federal Institute of Technology Zurich. 2004.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [28] M. Jung. **“Mean-Value Modelling and Robust Control of the Airpath of a Turbocharged Diesel Engine.”** Ph.D. dissertation of University of Cambridge. 2003.
- [29] R. Argolini and V. Bloisi. **“On optimal control of the wastegate in a turbocharged SI engine.”** Master project of KTH Royal Institute of Technology. 2007.
- [30] M. Zerikat, M. Bendjebbar and N. Benouzza. **“Dynamic Fuzzy-Neural Network Controller for Induction Motor Drive.”** **World Academy of Science, Engineering and Technology**, vol. 10, 2005. pp. 278-283.
- [31] S. Srivastava, M. Singh, M. Hanmandlu and A.N. Jha. **“New fuzzy wavelet neural networks for system identification and control.”** **Applied Soft Computing**, vol. 6, 2005. pp. 1–17.
- [32] A. Ghaffari, A.H. Shamekhi, A. Saki, and E. Kamrani. **“Adaptive Fuzzy Control for Air-Fuel Ratio of Automobile Spark Ignition Engine.”** **World Academy of Science, Engineering and Technology**, vol. 48, 2008. pp. 284-292.
- [33] K.R. Muske. **“A Model-based SI Engine Air Fuel Ratio Controller.”** **American Control Conference Minneapolis**, 2006. pp. 3284-3289.
- [34] Y. Yildiz, A. Annaswamy, D. Yanakiev and I. Kolmanovsky. **“Adaptive Air Fuel Ratio Control for Internal Combustion Engines.”** **American Control Conference**, 2008. pp. 2058-2063.
- [35] S. Wang and D. Yu. **“Adaptive Air-Fuel Ratio Control with MLP Network.”** **International Journal of Automation and computing** , vol. 2, 2005. pp. 125-133.
- [36] Garrett. **“The garrett performance products catalog.”** [Online]. Available : http://www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/images/garrett_inside/Garrett_Cat%209%2004.pdf. 2004.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ค่าตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองเครื่องยนต์

เครื่องหล่อเย็น

- อัตราการไหลของมวลของอากาศเครื่องหล่อเย็น (\dot{m}_{cool}) = 8.33 kg/s

ลิ้นเร่ง

- เส้นผ่าศูนย์กลางรูเสื้อลิ้นเร่ง (D) = 0.06 m
- เส้นผ่าศูนย์กลางแกนลิ้นเร่ง (d) = 0.008 m
- มุมของแผ่นลิ้นเร่ง (α) = 15 องศา
- สัมประสิทธิ์อัตราการไหล (C_d) = 0.7

เวสท์เกต

- พื้นที่เมื่อเมื่อเวสท์เกตเปิดเต็มที่ (A_{wg_max}) = 0.0002 m²
- สัมประสิทธิ์อัตราการไหล (C_d) = 0.9
- ทำงานเมื่อความดันหลัง Compressor > 120,000 Pa

เครื่องยนต์

- ปริมาตรกระบอกสูบ (V_d) = 0.002 m³
- อัตราส่วนการอัดในกระบอกสูบ (r_c) = 10
- ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์โดยรวม (η_e) = 0.3469

ระบบปริมาตรควบคุม

- ปริมาตรท่อระหว่างหม้อกรองอากาศและคอมเพรสเซอร์ = 0.004 m³
- ปริมาตรท่อระหว่างคอมเพรสเซอร์และเครื่องหล่อเย็น = 0.005 m³
- ปริมาตรท่อระหว่างเครื่องหล่อเย็นและลิ้นเร่ง = 0.005 m³
- ปริมาตรท่อร่วมไอดี = 0.002 m³
- ปริมาตรท่อร่วมไอเสีย = 0.002 m³
- ปริมาตรท่อระหว่างกังหันและระบบไอเสีย = 0.01 m³

เชื้อเพลิง

- Lower heating value ของ NGV (q_{HV}) ประมาณ 38100000 J/Kg

สิ่งแวดล้อม

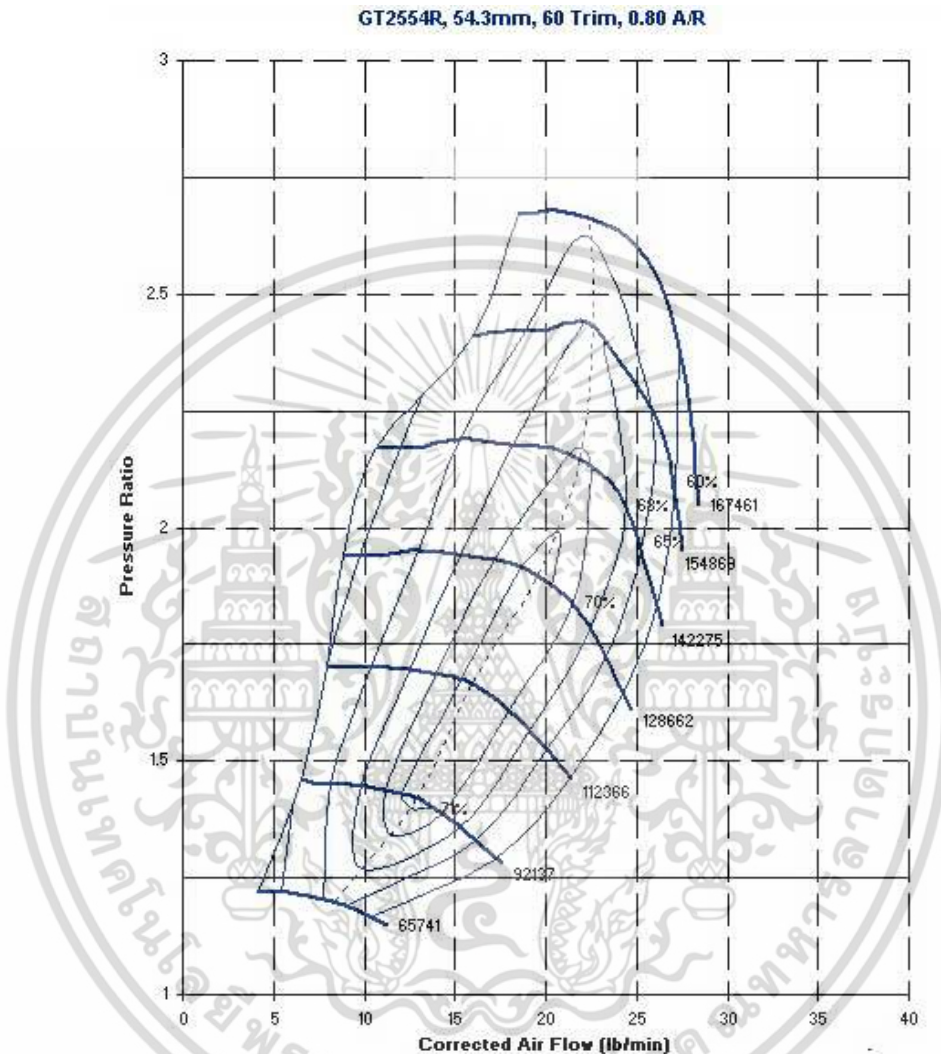
- อุณหภูมิ = 298 K
- ความดัน = 101300 Pa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอร์โบชาร์จ Model: Garrett GT2554R กำลังม้า/ความจุ = 170hp - 270hp/1.4L – 2.2L

1. คอมเพรสเซอร์ มีเส้นผ่าศูนย์กลางใบพัดวงใน (Inducer) / วงนอก (Exducer) = 42 / 54.3

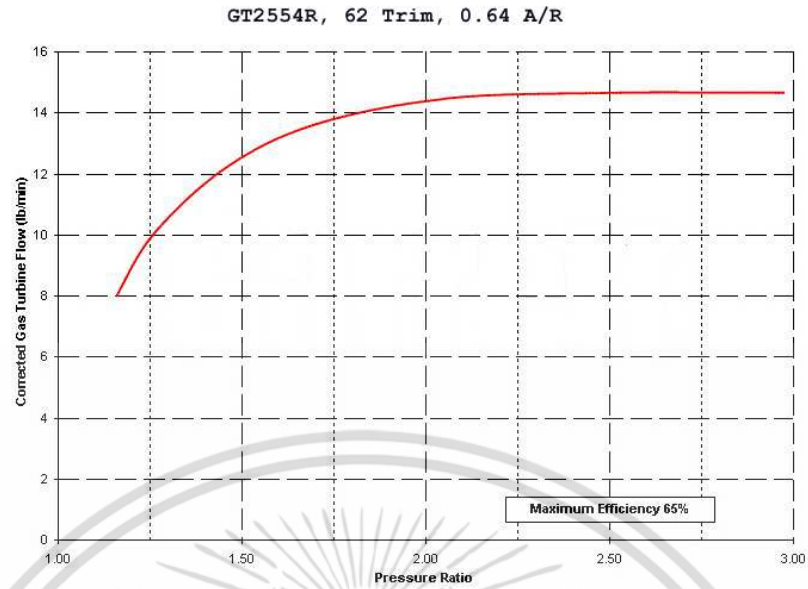
มม. Trim: 60 A/R: 0.80



รูปที่ ก.1 Compressor map [36]

2. กังหัน มีเส้นผ่าศูนย์กลางใบพัด = 53 มม. Trim: 62 A/R: 0.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



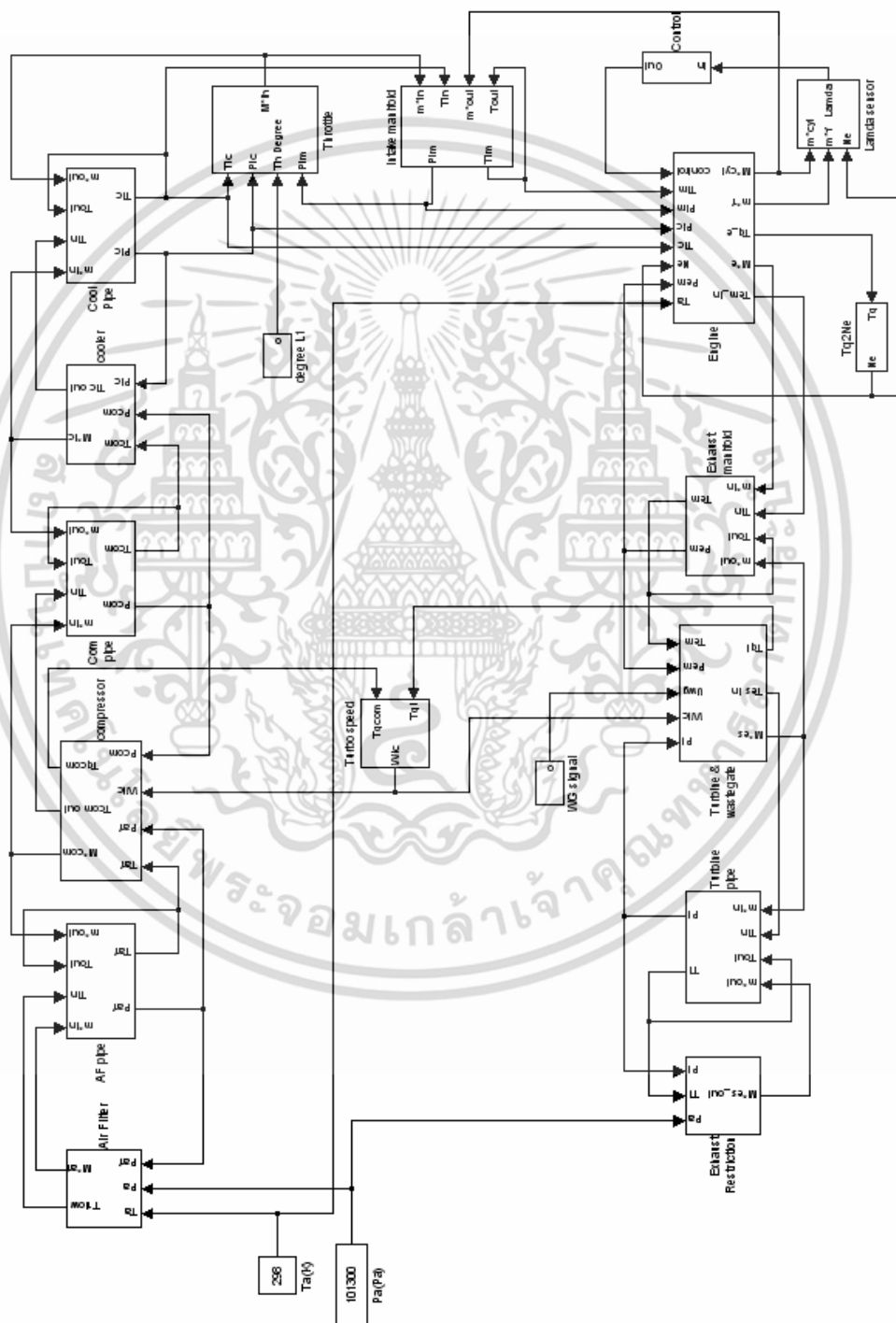
รูปที่ ก.2 Turbine map [36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

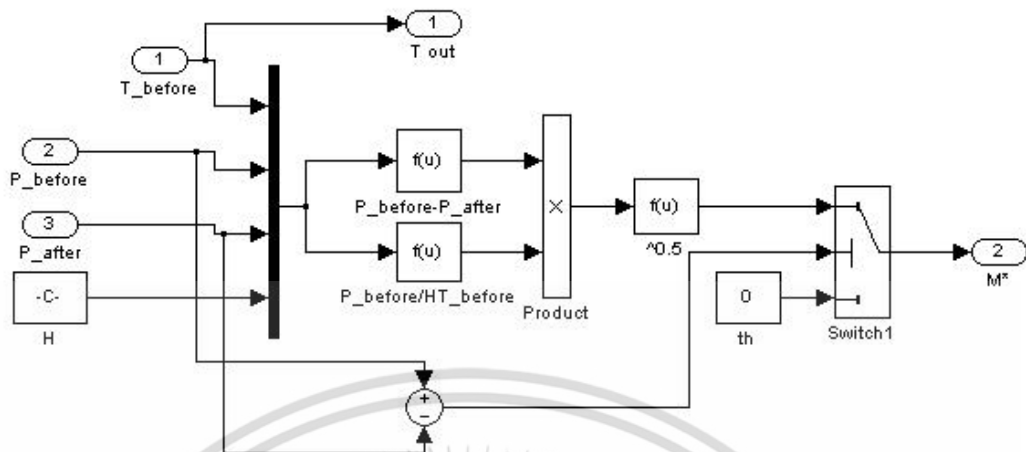
แบบจำลองในโปรแกรม Matlab

ข.1 แบบจำลองเครื่องยนต์เทอร์โบ

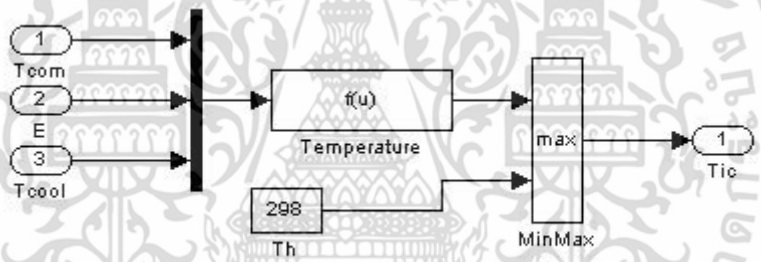


รูปที่ ข.1 แบบจำลองเครื่องยนต์แบบจอร์เจียเปิดด้วยประกายไฟพร้อมระบบควบคุม

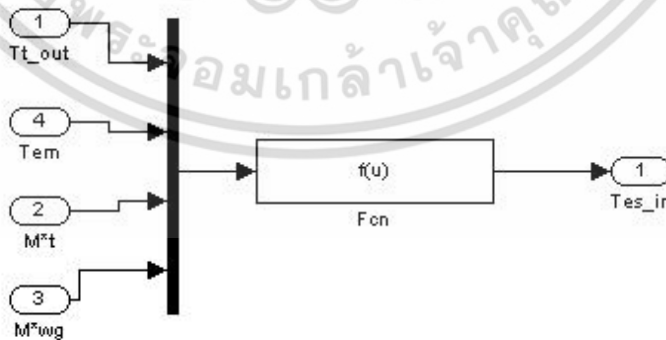
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้บริการเพื่อนักวิชาการเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์ท่านการคัดลอกหรือการนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.2 แบบจำลองระบบการไหลไม่อดตัว

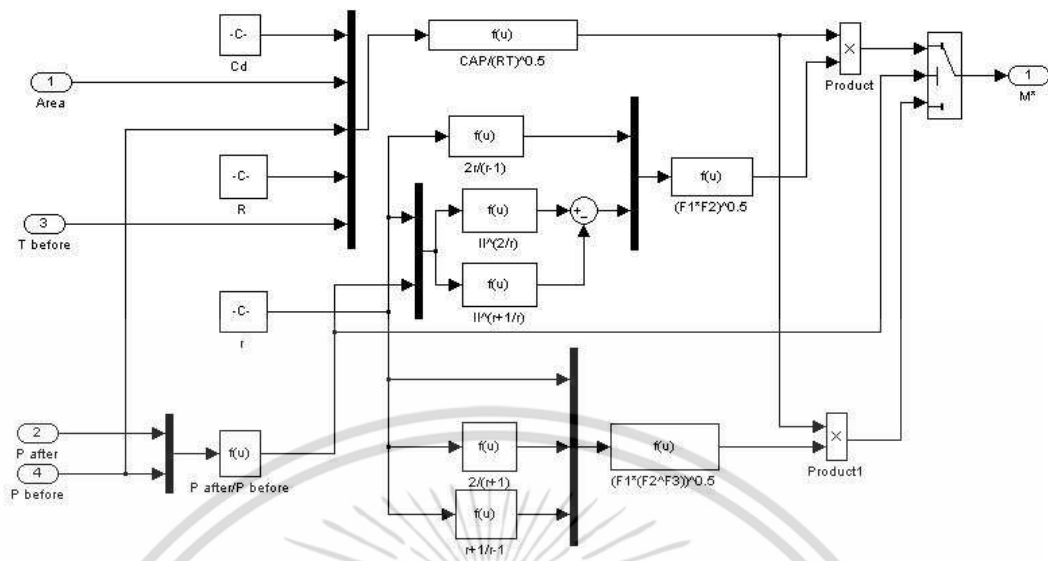


รูปที่ ข.3 แบบจำลองอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากเครื่องหล่อเย็น

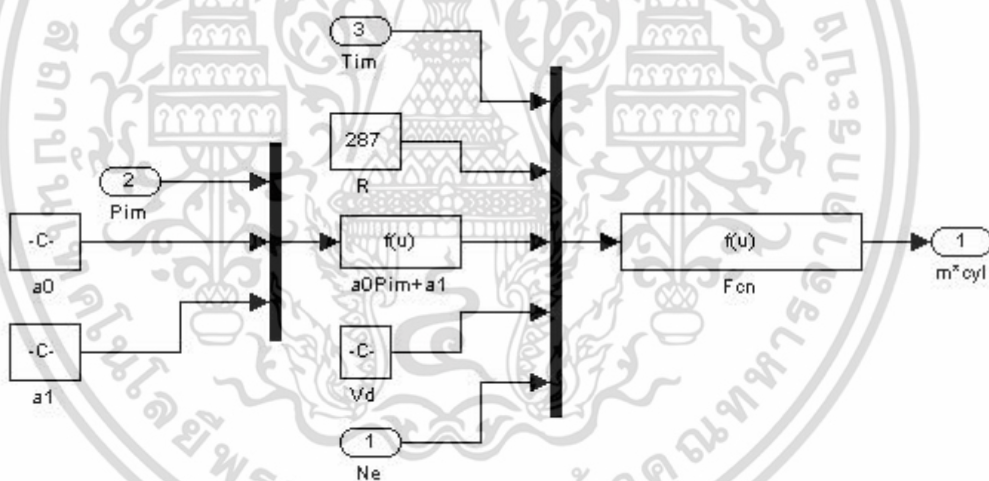


รูปที่ ข.4 แบบจำลองอุณหภูมิที่เข้าสู่ระบบไอเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

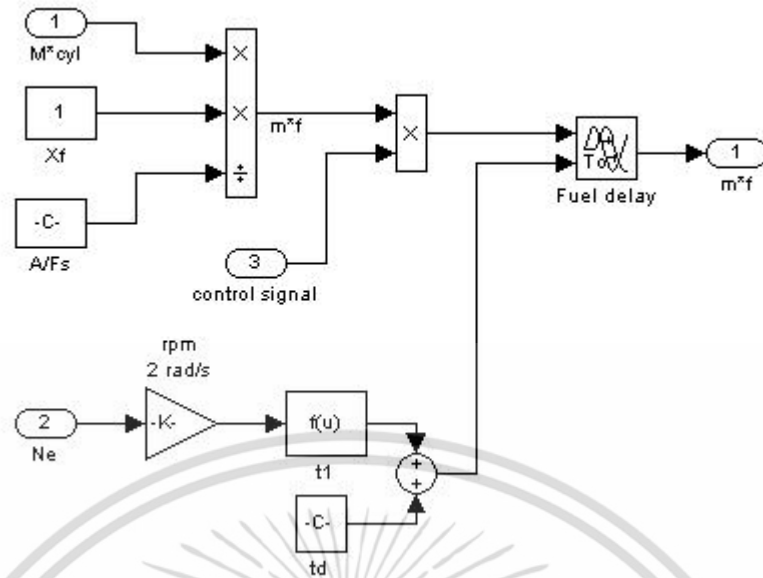


รูปที่ ข.5 แบบจำลองระบบการไหลแบบอัดตัว

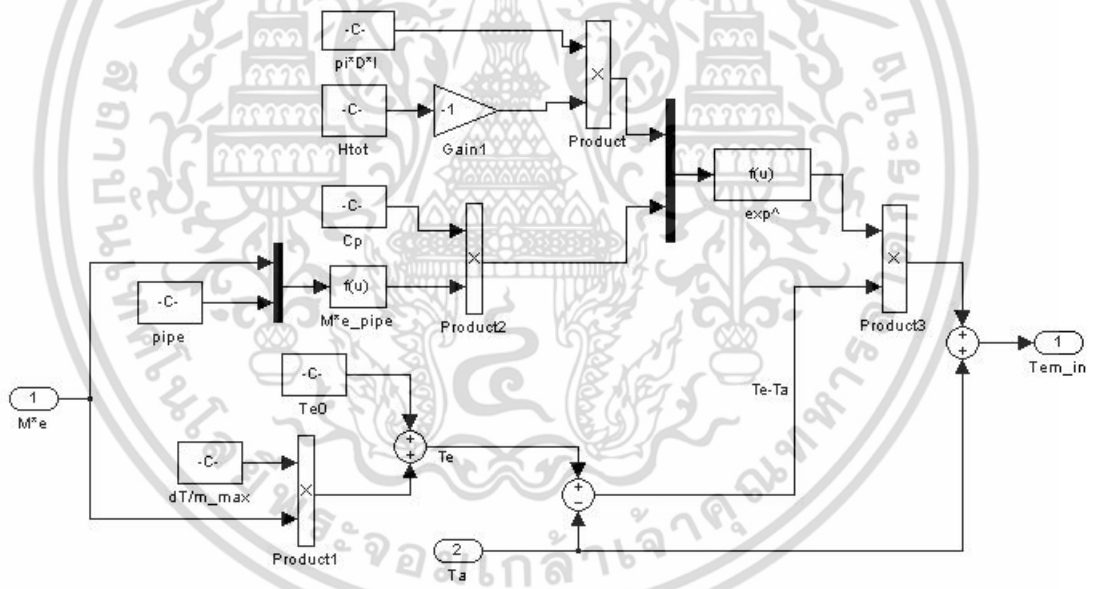


รูปที่ ข.6 แบบจำลองอัตราการผลิตของอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ $a_0 = 0.857748579470353$ และ $a_1 = -5216.7334951752$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

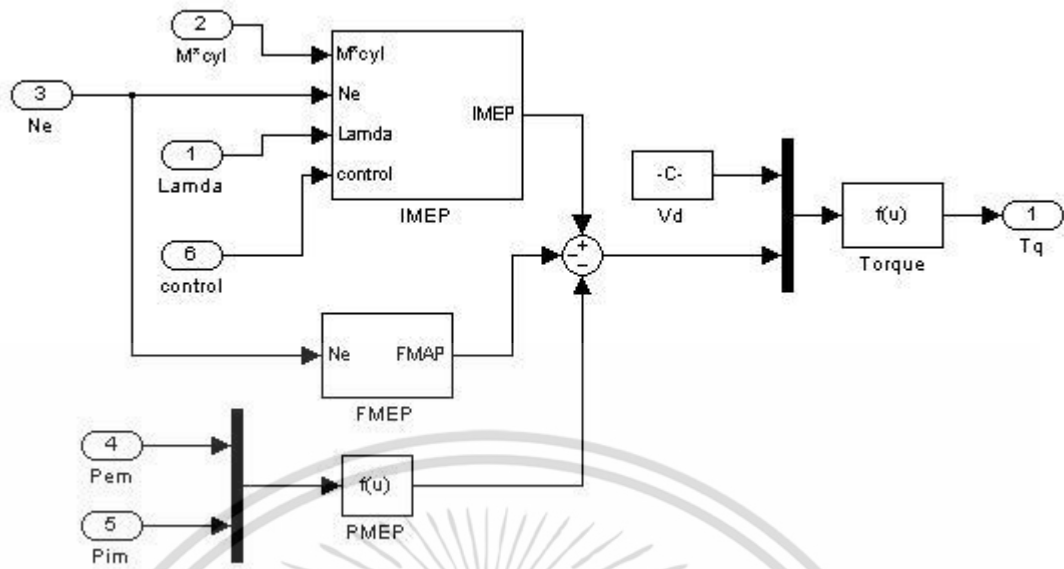


รูปที่ ข.7 แบบจำลองการหน่วงเวลาในหัวฉีดเชื้อเพลิง

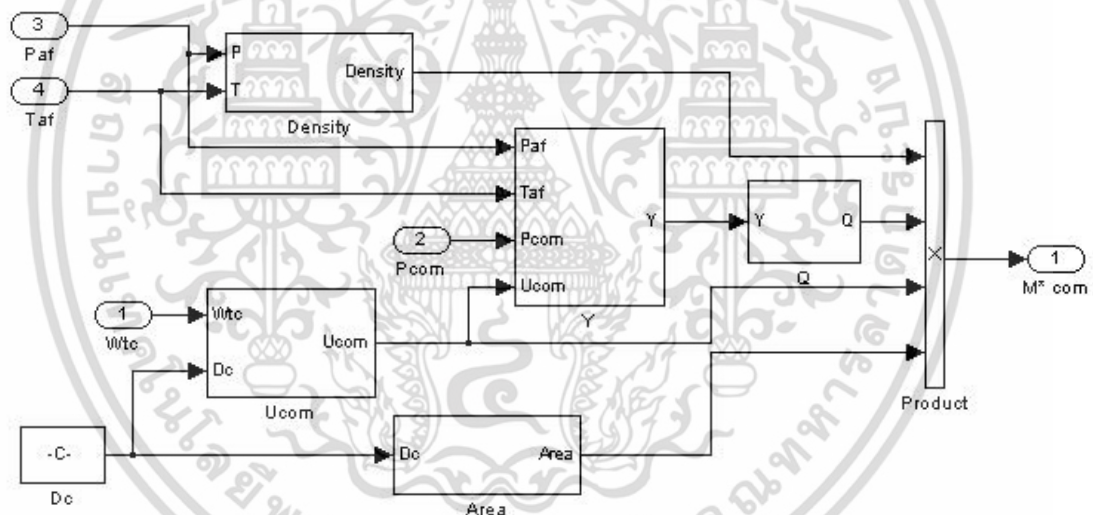


รูปที่ ข.8 แบบจำลองอุณหภูมิเผาเข้าที่ร่วมไอเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

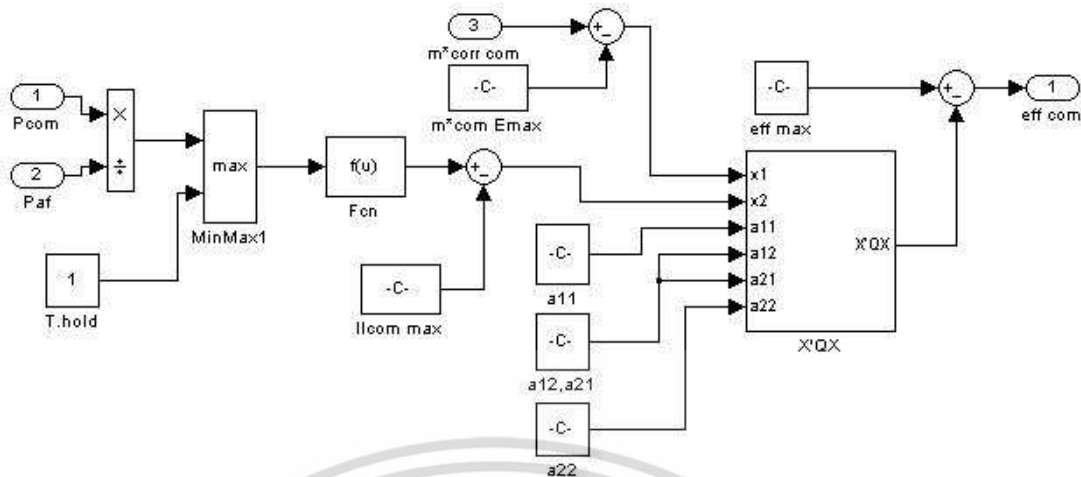


รูปที่ ข.9 แบบจำลองแรงบิดของเครื่องยนต์

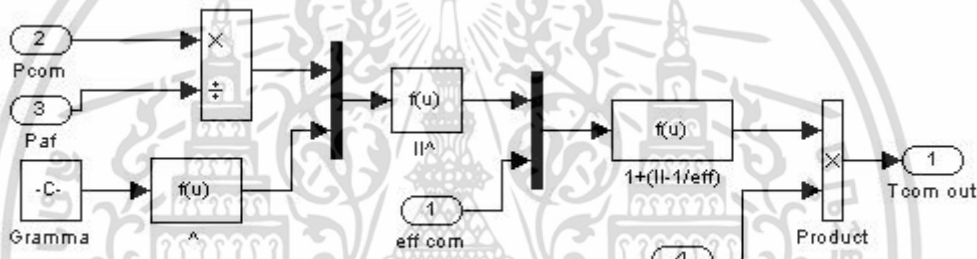


รูปที่ ข.10 แบบจำลองอัตราการใช้ของมวลอากาศของคอมเพรสเซอร์

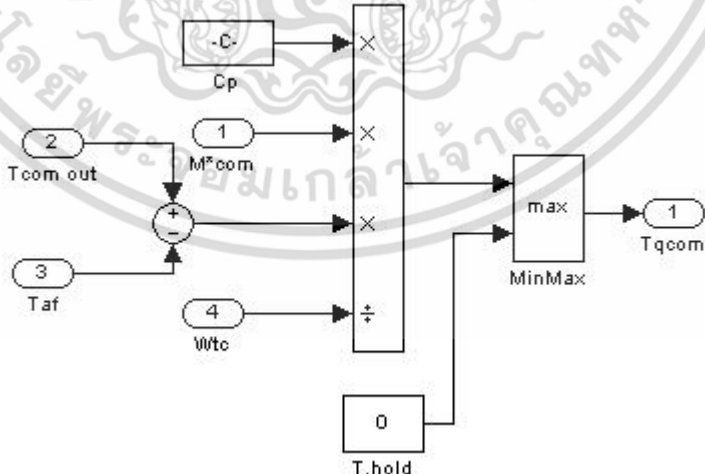
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.11 แบบจำลองประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์

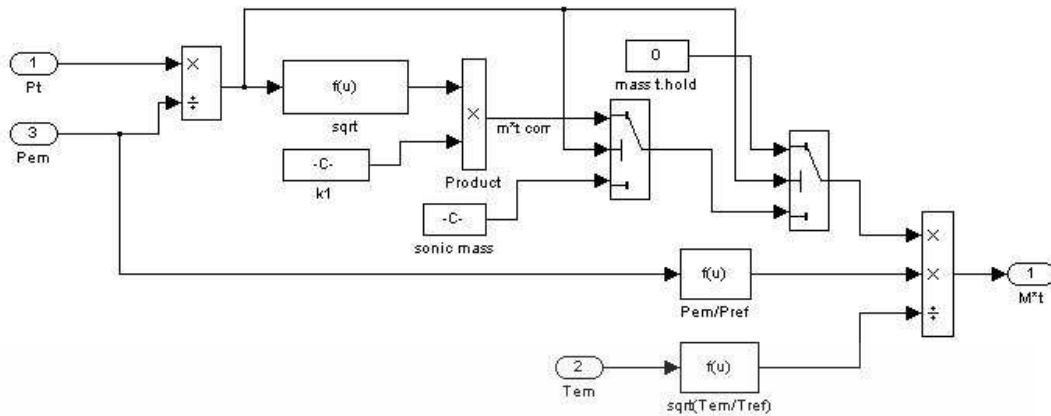


รูปที่ ข.12 แบบจำลองอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากคอมเพรสเซอร์

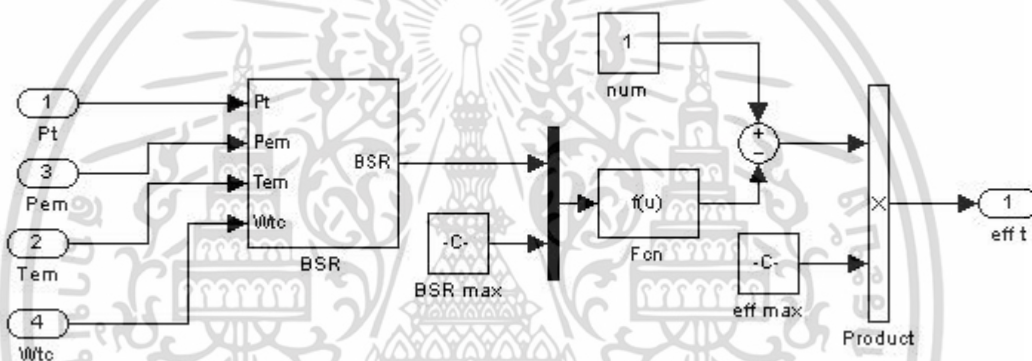


รูปที่ ข.13 แบบจำลองแรงบิดของคอมเพรสเซอร์

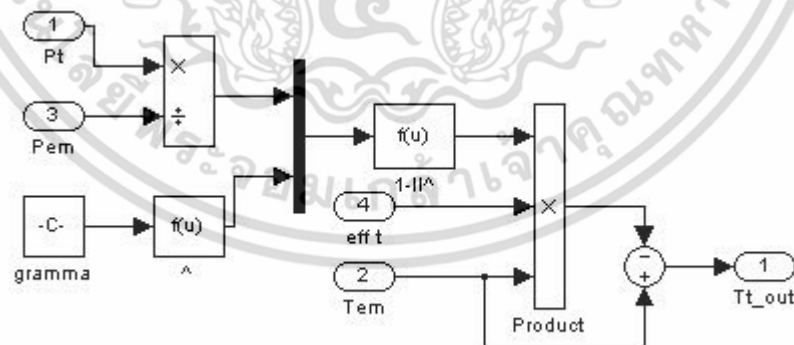
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.14 แบบจำลองอัตราไหลของมวลอากาศของกังหัน

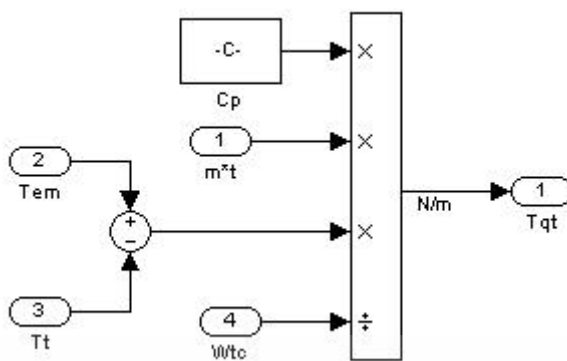


รูปที่ ข.15 แบบจำลองประสิทธิภาพของกังหัน

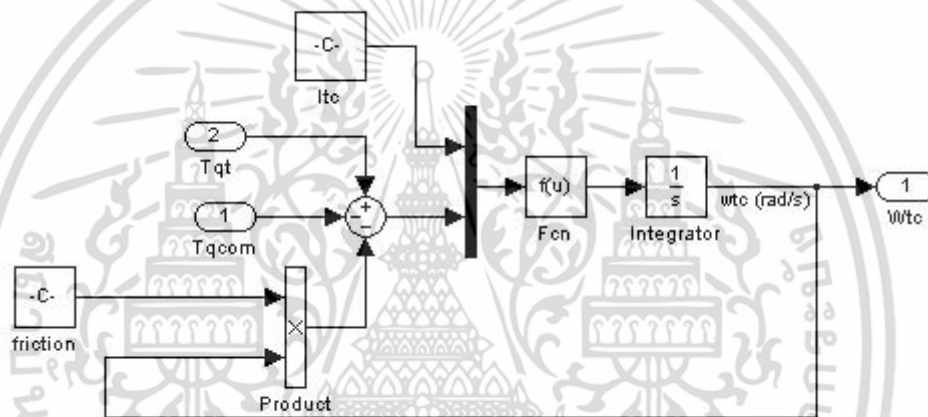


รูปที่ ข.16 แบบจำลองอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากกังหัน

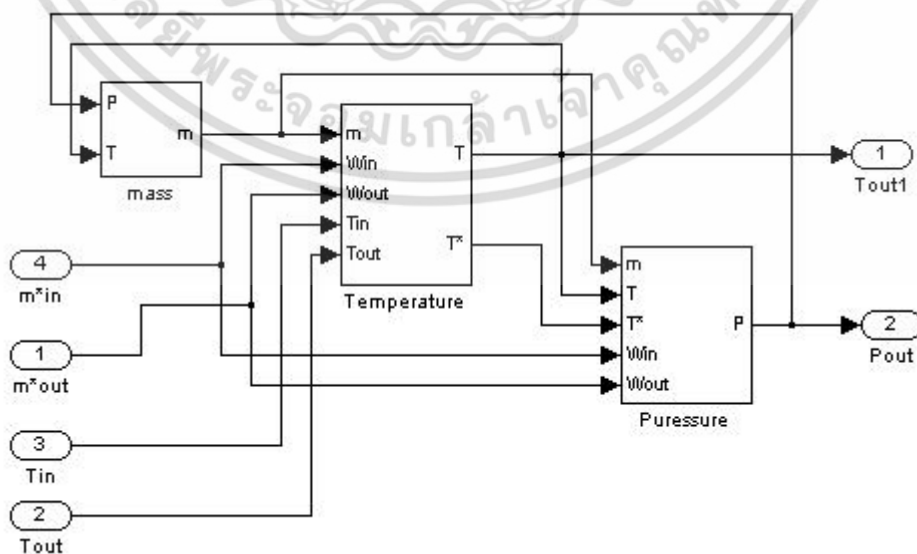
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.17 แบบจำลองแรงบิดของกังหัน

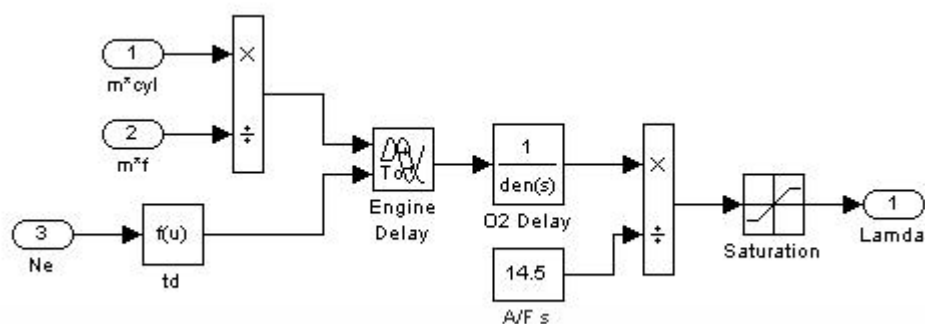


รูปที่ ข.18 แบบจำลองความเร็วพลวัตของเทอร์โบชาร์จ



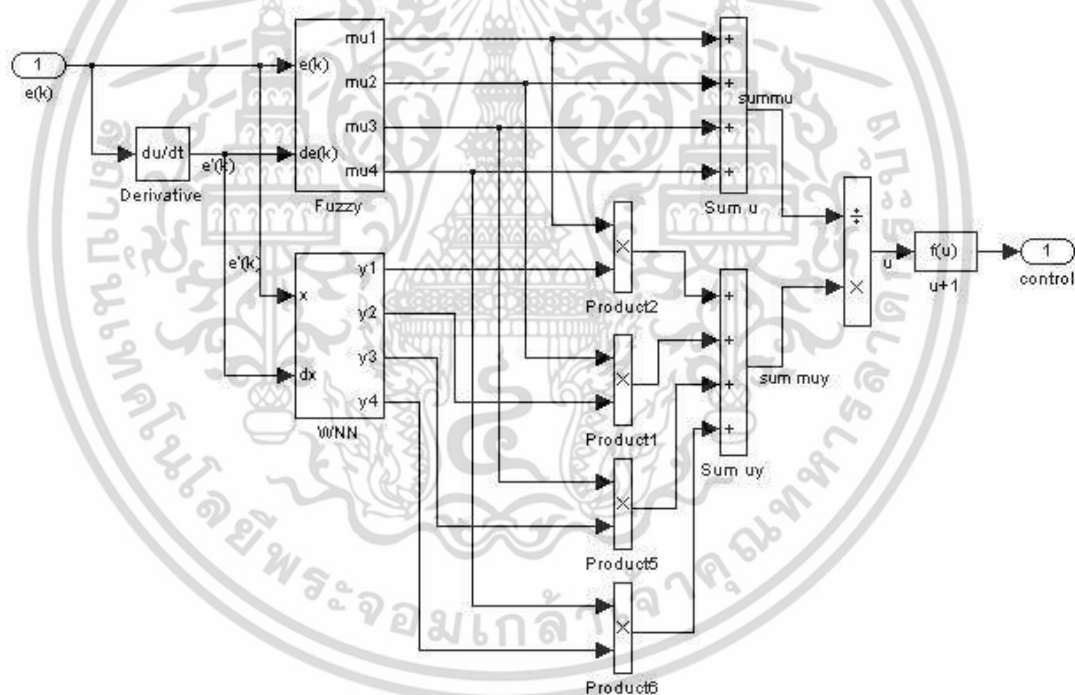
รูปที่ ข.19 แบบจำลองปริมาณควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



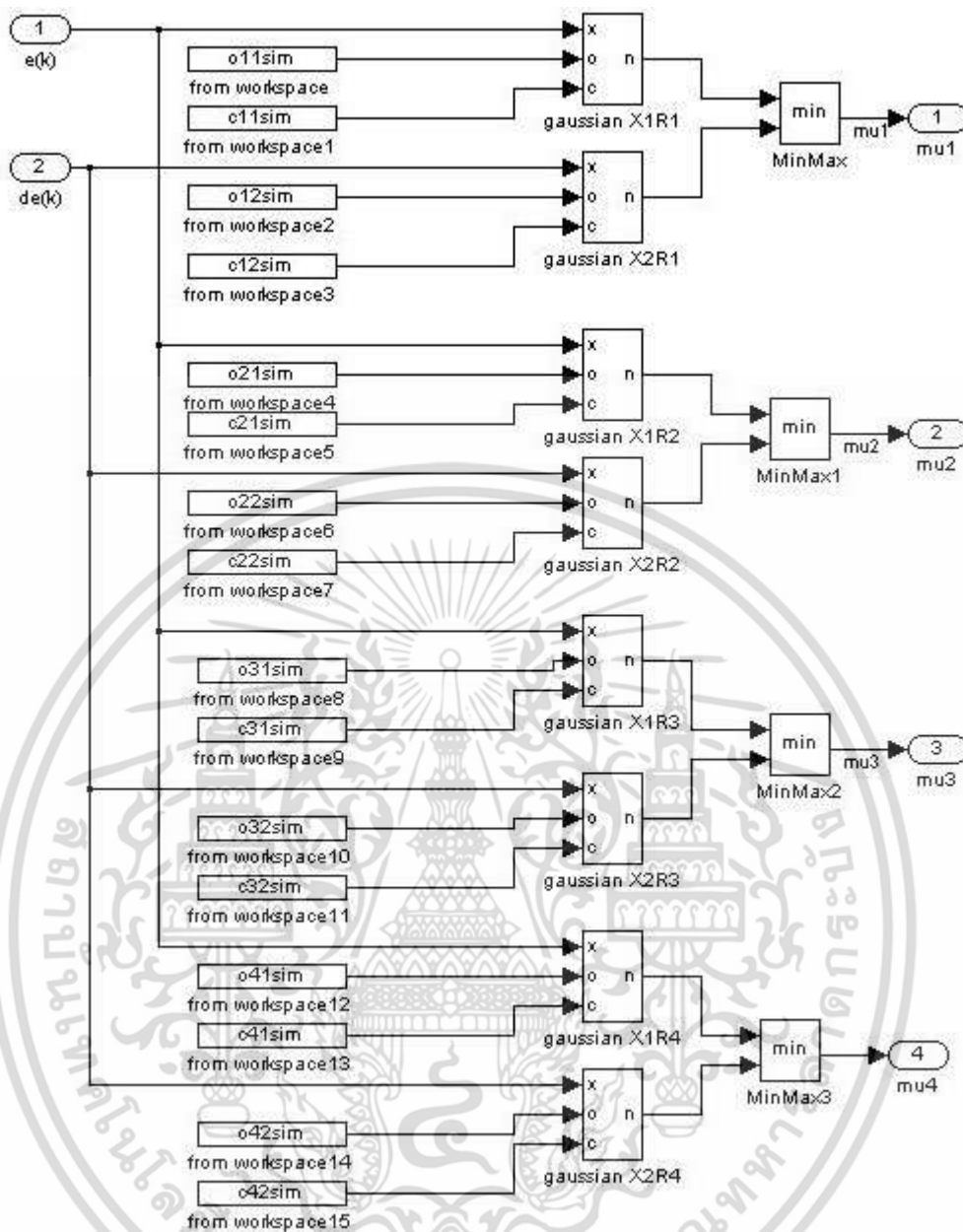
รูปที่ ข.20 แบบจำลองกำหนดเวลาของตัวรับร้ออกซิเจน

ข.1 แบบจำลองระบบควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีแวลต์



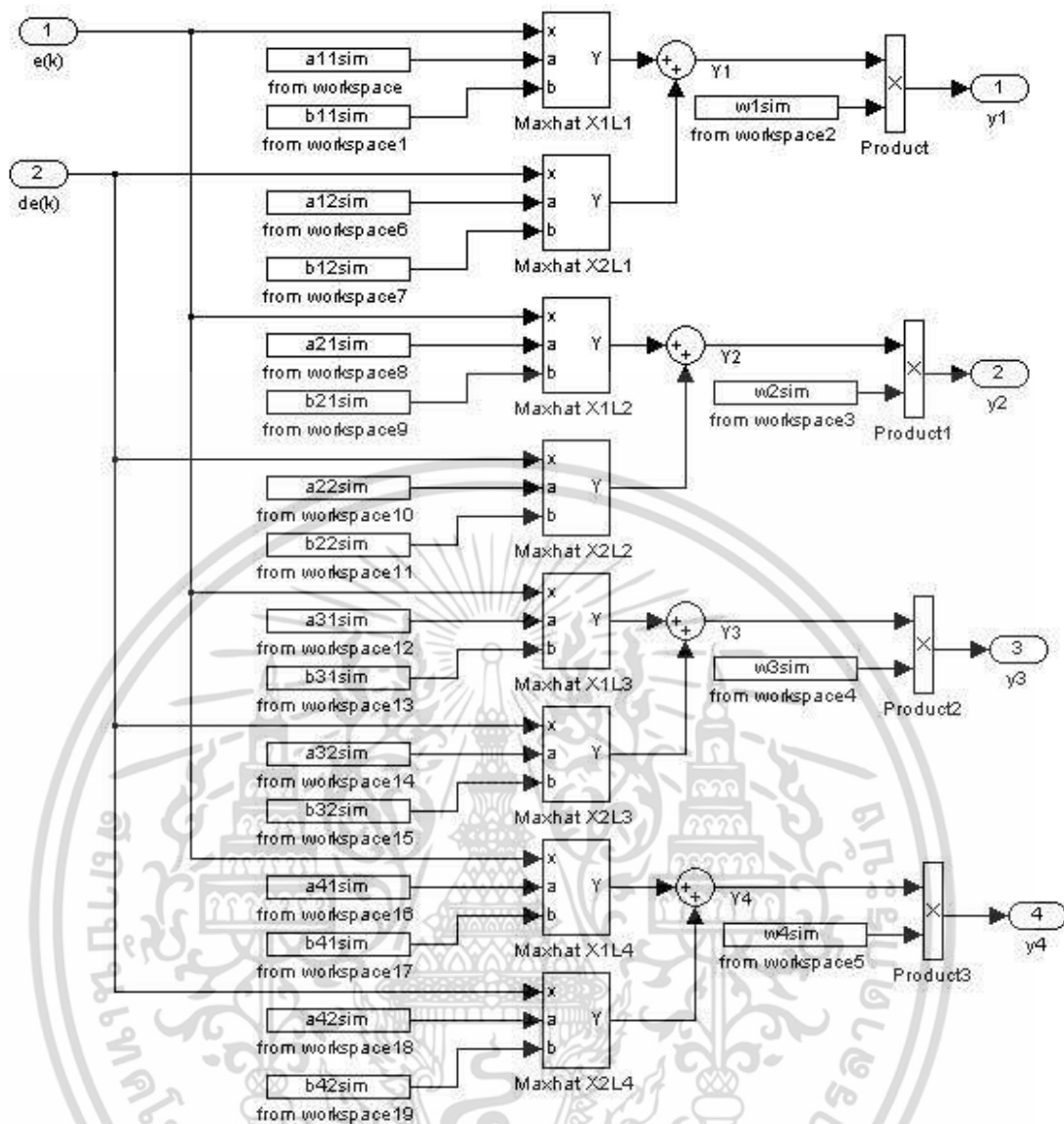
รูปที่ ข.21 ระบบควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีแวลต์แบบกฎ 4 ข้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.22 ค่าฟัซซีของระบบควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลตแบบกฎ 4 ข้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.23 โครงข่ายประสาทเทียมของระบบควบคุม โครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีเวฟเลตแบบกฎ 4 ข้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

ฟังก์ชันสมาชิกโครงข่ายประสาทเทียมพีชชีเวฟเลต

เพื่อให้ได้ฟังก์ชันสมาชิกที่เหมาะสมกับงานวิจัย กำหนดให้เลือกฟังก์ชันสมาชิกจากฟังก์ชัน 2 แบบคือ ฟังก์ชันเกาส์เซียนซึ่งปรากฏอยู่ในหัวข้อ 3.3 และฟังก์ชันสามเหลี่ยม (triangular) ที่เป็นดังสมการ (ค.1)

$$\eta_j(x_j) = \begin{cases} 0 & x_i < d_{ij} \\ \frac{x_i - d_{ij}}{e_{ij} - d_{ij}} & d_{ij} \leq x_i < e_{ij} \\ \frac{f_{ij} - x_i}{f_{ij} - e_{ij}} & e_{ij} \leq x_i < f_{ij} \\ 0 & x_i \geq f_{ij} \end{cases} \quad (\text{ค.1})$$

และจากการเรียนรู้ด้วยวิธีเกรเดียนต์ การปรับค่าตัวแปรของฟังก์ชันสามเหลี่ยมเป็นไปดังสมการ (ค.2)

$$\begin{aligned} d_{ij}(t+1) &= d_{ij}(t) - \gamma \frac{\partial E}{\partial d_{ij}} \\ e_{ij}(t+1) &= e_{ij}(t) - \gamma \frac{\partial E}{\partial e_{ij}} \\ f_{ij}(t+1) &= f_{ij}(t) - \gamma \frac{\partial E}{\partial f_{ij}} \end{aligned} \quad (\text{ค.2})$$

จากกฎลูกโซ่ค่าอนุพันธ์ในสมการด้านบนสามารถหาได้จากสมการ (ค.3)

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial d_{ij}} &= \sum_j \frac{\partial E}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial \mu_j} \frac{\partial \mu_j}{\partial d_{ij}} \\ \frac{\partial \mu_j}{\partial d_{ij}} &= \begin{cases} \frac{x_i - e_{ij}}{(e_{ij} - d_{ij})^2} & d_{ij} \leq x_i < e_{ij} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\ \frac{\partial E}{\partial e_{ij}} &= \sum_j \frac{\partial E}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial \mu_j} \frac{\partial \mu_j}{\partial e_{ij}} \end{aligned} \quad (\text{ค.3})$$

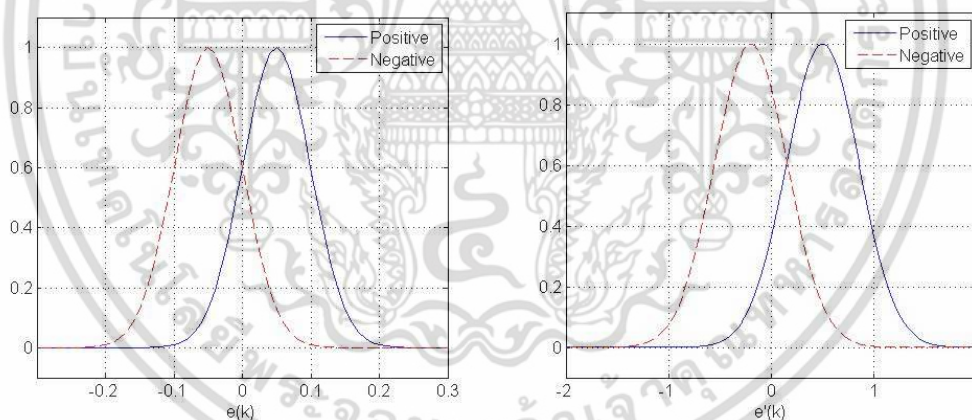
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial \mu_j}{\partial e_{ij}} = \begin{cases} \frac{d_{ij} - x_i}{(e_{ij} - d_{ij})^2} & d_{ij} \leq x_i < e_{ij} \\ \frac{f_{ij} - x_i}{(f_{ij} - e_{ij})^2} & e_{ij} \leq x_i < f_{ij} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{\partial E}{\partial f_{ij}} = \sum_j \frac{\partial E}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial \mu_j} \frac{\partial \mu_j}{\partial f_{ij}}$$

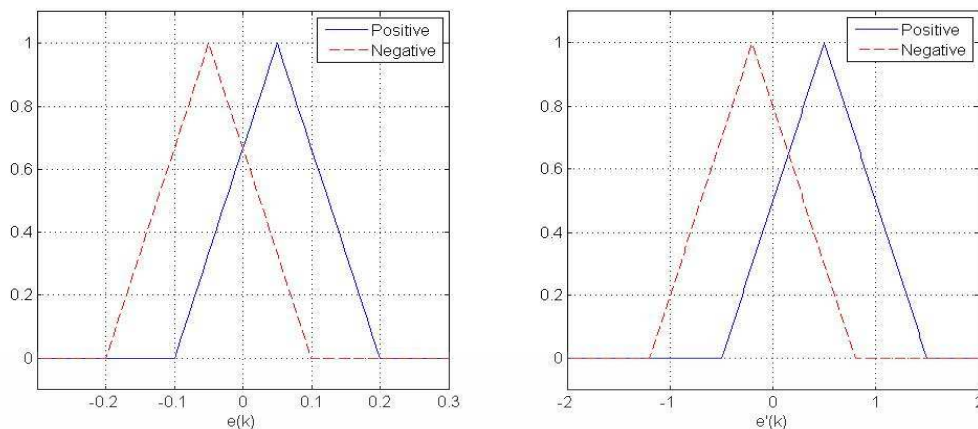
$$\frac{\partial \mu_j}{\partial f_{ij}} = \begin{cases} \frac{x_i - e_{ij}}{(f_{ij} - e_{ij})^2} & e_{ij} \leq x_i < f_{ij} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

เมื่อกำหนดให้กลุ่มสมาชิกก่อนการเรียนรู้ของฟังก์ชันทั้งสองมีค่าเท่ากันดังรูปที่ ค.1 และ ค.2 และนำฟังก์ชันทั้ง 2 มาเปรียบเทียบประสิทธิภาพกันในโครงข่ายประสาทเทียมพีซีซีเวฟเลตแบบ 4 กฎดังในหัวข้อที่ 4.2 ประสิทธิภาพหลังการเรียนรู้จะได้ดังรูปที่ ค.3 จะเห็นว่าฟังก์ชันเกาส์เซียนจะให้ประสิทธิภาพดีกว่าฟังก์ชันสามเหลี่ยม จึงได้เลือกใช้ฟังก์ชันเกาส์เซียนในงานวิจัยนี้

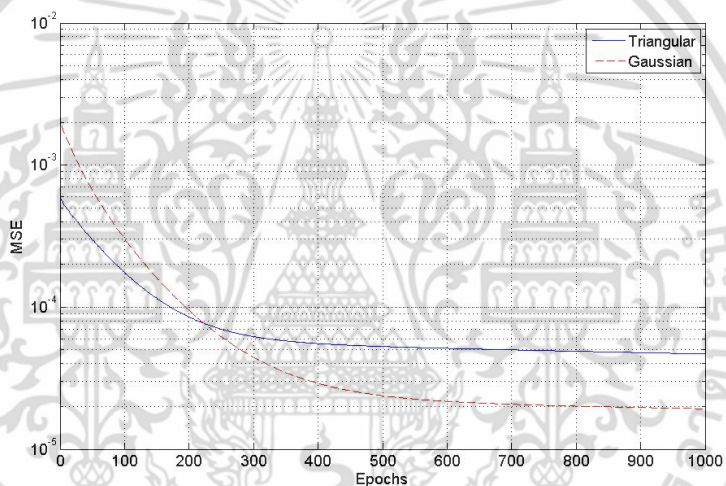


รูปที่ ค.1 กราฟฟังก์ชันสมาชิกแบบเกาส์เซียนของค่า $e(k)$ (ซ้าย) และ $e'(k)$ (ขวา) ก่อนการเรียนรู้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.2 กราฟฟังก์ชันสมาชิกแบบสามเหลี่ยมของค่า $e(k)$ (ซ้าย) และ $e'(k)$ (ขวา) ก่อนการเรียนรู้



รูปที่ ค.3 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพเมื่อใช้ฟังก์ชันสมาชิกเป็นฟังก์ชันเกาส์เซียนและฟังก์ชันสามเหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. C. Klakayan, A. Jansri and P. Sooraksa. “A/F Ratio Control for Turbocharged SI Engines using NGV Fuel.” **The Third International Conference on Dynamics, Vibration and Control, Hangzhou, China, May 12-14, 2010**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A/F Ratio Control for Turbocharged SI Engines using NGV Fuel

C. Klakayan¹, A. Jansri² and P. Sooraksa³

School of Computer Engineering, Faculty of Engineering,

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

Email: ¹chale_kmitl@yahoo.com, ²anurak_j@yahoo.com, ³kspitikh@kmitl.ac.th

Abstract: Natural Gas for Vehicles (NGV) is an important part of alternative energy by which the market is rapidly growing, particularly in transportation sectors of Thailand. In 2006, around 23,273 vehicles in Thailand switched to use NGV and had been continually increased. Since the engines of the trucks have to retrofit, they must cut off the turbocharger platform. As a result, the engine power is decreased. This technical problem is the motivation of our research by controlling the air/fuel (A/F) ratio.

In this paper, A/F ratio control of turbocharged SI engines using NGV fuel is studied based on Mean Value Engine Models (MVEMs). Since MVEMs was proposed by Elbert Hendricks in 1989, simulation and analysis for engine control is well-established. The method is promising because most of dynamic characters and real-time quality. Unlike the original methodology, the control design uses Fuzzy Wavelet Neural Networks. The optimal parameters of the system are found by using gradient method with setting goal that A/F ratio is equal to stoichiometric combustion or most near. The simulation results demonstrate the effectiveness of the developed method.

1 Introduction

NGV fuel is a new trend of Automobile industry and the market is rapidly growing, particularly in transportation sectors of Thailand due to increment of oil prices. In addition, NGV helps reduce air pollution by mitigating the emission of CO, HC and SO_x to 45%, 67.4%, and 80.5% [1]. However, the retrofitting engine for using NGV fuel has effected on reduction of engine power. To solve the problem, a CNG Electronic Control Unit (ECU) for control process, such as engine speed, spark ignition timing, fuel injection timing, and air–fuel ratio, as higher performance, and lower pollution is needed. The A/F ratio control is an alternative way for adjusting power.

Since MVEMs was proposed by Elbert Hendricks in 1989, it was simplified dynamic engine models and continuously developed. For example, Turbocharged SI Engines models were by Müller (2008)[2] and Eriksson (2007)[3]. In this paper, A/F ratio control is studied based on MVEMs combined with FWNN method [4]. The FWNN method combines wavelet, fuzzy logic and neural network required only signal from universal exhaust gas oxygen (UEGO) sensor. The structure of A/F ratio control can be employed by using Takagi-Sugeno-Kang (TSK) Fuzzy or Wavelet Neural Networks, which has been shown Hasan, Mohamed and Omar (2009)[5] and Tang, Sun, Wang and Zhai (2006)[6]. The control scheme first determines optimal parameters of fuzzy IF-THEN rules by gradient method for learning algorithms. This way is easy than simply tuning of TSK fuzzy, which needs expert human knowledge into linguistic interpretable fuzzy rules. The goal is to set A/F ratio equal to stoichiometric combustion because this value is best balance between power output and fuel consumption.

2 Engine Simulation Model

The turbocharged SI engines consist of many components which are air filter, compressor, intercooler, throttle, engine, turbine, waste gate and exhaust systems. Therefore, their multiple inputs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

and outputs make the system being dynamic and complex. The engine simulation used here has all components like the above and includes control volumes which are placed in between all flow restricting components to determine dynamic characteristics of the engine. The model based on mean value engine model had developed by Eriksson[3]. Engine power depends on input and output of air admission by throttle angular and waste gate value. Referring to the table of nomenclature, the air flow into cylinders of the engine is modeled using standard model as follow:

$$\dot{m}_{cyl} = \eta_v \frac{V_d}{120RT_{im}} N p_{im} \quad (1),$$

where V_d is the engine displacement and the volumetric efficiency of the engine (η_v) is $f(P_{im}, N)$. Here we assume that the injecting NGV fuel mass flow is accurate and is described by the following equation:

$$\dot{m}_{fi} = \frac{\dot{m}_{cyl}}{(A/F)_s} \quad (2),$$

where $(A/F)_s$ is the stoichiometric A/F ratio.

The crankshaft control system in SI engines is described in Fig. 1 and consists of many sensors output sent to the ECU.

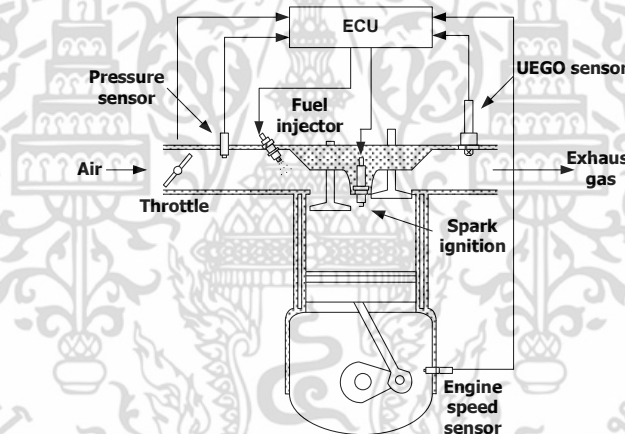


Fig 1. Crankshaft and ECU

Delays of CNG injection form ECU calculation and others are described by the following equations [8]:

$$t_1 = \frac{\pi}{2\omega} + \frac{(\theta_{inj} - \theta_{civ})}{\omega} \quad (3)$$

$$t_2 = \frac{4\pi}{\omega} \quad (4)$$

$$\dot{m}_{fv} = \begin{cases} \dot{m}_{fi}(t-t_1) & \text{if } \theta_{pw} < \theta_{civ} - \theta_{inj} \\ K\dot{m}_{fi}(t-t_1) + (1-K)\dot{m}_{fi}(t-(t_1+t_2)) & \text{else} \quad \text{others} \end{cases} \quad (5)$$

$$K = \frac{\theta_{civ} - \theta_{inj}}{\theta_{pw}} \quad (6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ω is speed of the crankshaft, θ_{inj} is the beginning time of injection, θ_{civ} is the close time of intake valve, and θ_{pw} is injection pulse width which are converted to crankshaft angel as shown in Fig. 2. Since the NGV fuel is gas, as a result, this clouding NGV fuel haven't fuel deposit effect. The equation of fuel flow into cylinders is described as follows:

$$\dot{m}_f = X_f \dot{m}_{fv} \quad (7)$$

where X_f is proportion of fuel flow into cylinders.

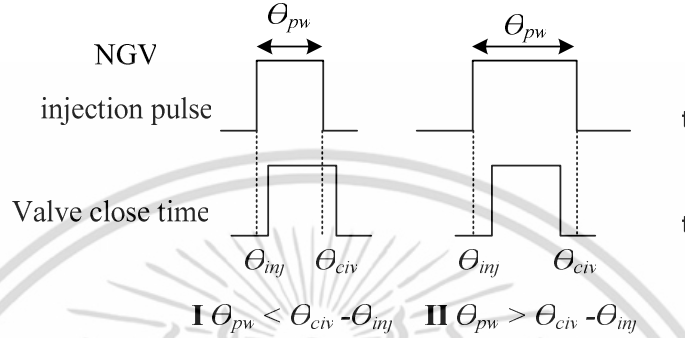


Fig 2. CNG injection and valve close-time phases

In this simulation, a model of the A/F ratio and lambda are calculated by using

$$A/F = \dot{m}_{cyl} / \dot{m}_f \quad (8),$$

$$\lambda = \frac{A/F}{(A/F)_s} \quad (9)$$

The relationship between the actual and measured lambdas is provided by the following transfer function [9]:

$$\lambda_d = \frac{\lambda e^{-T_d s}}{T_s s + 1} \quad (10)$$

where T_s is a time constant of the oxygen sensor, and T_d is the transport delay between the injector and the exhaust gas oxygen sensor and is determined from the following relationship [8]:

$$T_d = \frac{120}{N} + \frac{\rho_{im}}{\dot{m}_{cyl}} (l_{im} A_{im} + 0.5 l_{em} A_{em}) \quad (11)$$

where ρ_{im} is inlet air density.

3 Fuzzy Wavelet Neural Networks Model

The fuzzy wavelet neural network integrates wavelet functions with TSK fuzzy model. The kernel of the fuzzy system is the fuzzy knowledge base that consists of the input-output data points of the system interpreted into linguistic fuzzy rules. The consequent parts of TSK type fuzzy IF-THEN rules are represented by either a constant or a function. In the case of modeling of complex non-linear processes a high number of rules may be required to achieve the desired accuracy. Wavelet functions are employed for proposed to improve the computational power of the neuro-fuzzy system:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

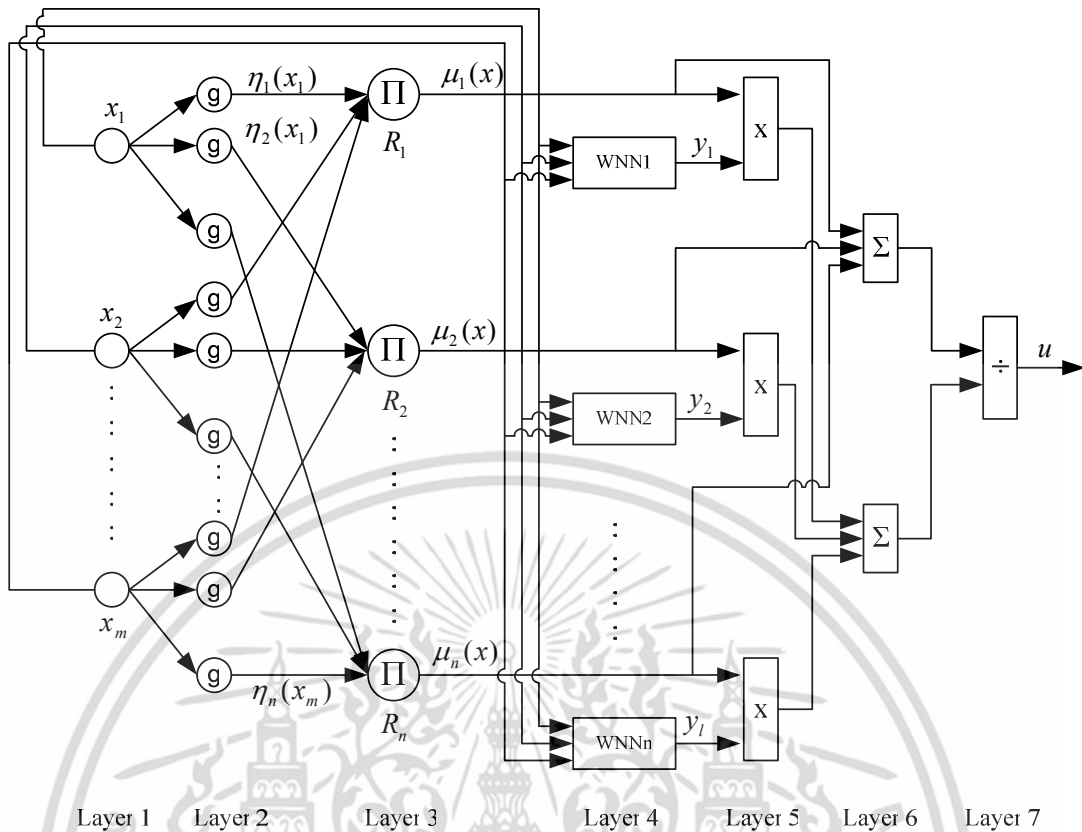


Fig. 3. Structure of FWNN.

At the first step, the error value of the following cost function is calculated.

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^o (u_{di} - u_i)^2 \quad (17)$$

Here o is the number of output signals of the network, u_{di} and u_i are the desired and the current output values of the network. The parameters of the wavelet neural network and the parameters of the membership functions of the neuro-fuzzy structure are adjusted by using the following formulas.

$$w_i(t+1) = w_i(t) - \gamma \frac{\partial E}{\partial w_i} + \lambda(w_i(t) - w_i(t-1)) \quad (18)$$

$$a_{ii}(t+1) = a_{ii}(t) - \gamma \frac{\partial E}{\partial a_{ii}} + \lambda(a_{ii}(t) - a_{ii}(t-1))$$

$$b_{ii}(t+1) = b_{ii}(t) - \gamma \frac{\partial E}{\partial b_{ii}} + \lambda(b_{ii}(t) - b_{ii}(t-1))$$

$$c_{ij}(t+1) = c_{ij}(t) - \gamma \frac{\partial E}{\partial c_{ij}}$$

(19)

$$\sigma_{ij}(t+1) = \sigma_{ij}(t) - \gamma \frac{\partial E}{\partial \sigma_{ij}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

where γ is the learning rate, λ is the momentum, m is the number of input signals of the network and n is the number of rules.

The values of the above derivatives can be calculated by the following formulas:

$$\frac{\partial E}{\partial w_l} = (u(t) - u_d(t)) \mu_l \Psi(z_l) / \sum_{l=1}^n \mu_l \quad (20)$$

$$\frac{\partial E}{\partial a_{il}} = \delta_l (3.5z_{il}^2 - z_{il}^4 - 0.5) e^{-\frac{z_{il}^2}{2}} / |a_{il}|^{\frac{3}{2}}$$

$$\frac{\partial E}{\partial b_{il}} = \delta_l (3z_{il} - z_{il}^3) e^{-\frac{z_{il}^2}{2}} / |a_{il}|^{\frac{3}{2}}$$

where $\delta_l = (u(t) - u_d(t)) \mu_l w_l / \sum_{l=1}^n \mu_l$, $i = 1, \dots, m$, $l = 1, \dots, n$

$$\frac{\partial E}{\partial c_{il}} = \sum_j \frac{\partial E}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial \mu_j} \frac{\partial \mu_j}{\partial c_{ij}} \frac{\partial E}{\partial \sigma_{il}} = \sum_j \frac{\partial E}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial \mu_j} \frac{\partial \mu_j}{\partial \sigma_{ij}} \quad (21)$$

$$\frac{\partial E}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial \mu_j} = (u(t) - u_d(t)) \frac{y_j - u}{\sum_{j=1}^n \mu_j}$$

$$\frac{\partial \mu_j(x_i)}{\partial c_{il}} = \begin{cases} \mu_j(x_i) \frac{2(x_i - c_{ij})}{\sigma_{ij}^2} & \text{if } i \text{ node is connected to rule node } j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{\partial \mu_j(x_i)}{\partial c_{il}} = \begin{cases} \mu_j(x_i) \frac{2(x_i - c_{ij})^2}{\sigma_{ij}^3} & \text{if } i \text{ node is connected to rule node } j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

where, $i=1, \dots, m$, $j=1, \dots, n$. Using (20), (21), derive from (18), (19) respectively, are calculated and an update of the parameters of the FWNN is carried out.

4. FWNN Control and Simulation Results

This paper proposes the control system which uses only output signal from UEGO sensor in order to calculate injecting fuel. The A/F ratio of NGV for stoichiometric combustion has many values depending on percent of each compound of NGV gas. In this paper, setting stoichiometric of NGV A/F ratio is 14.5 referred to Heywood[10].

The structure of FWNN-based control system is shown in Fig. 4., where λ is the output signal of UEGO sensor, λ_{ref} is the set-point signal, equal to 1 in stoichiometric combustion, $e(t)$ and $e'(t)$ are the error and the change of error, respectively, while D represents the difference of error.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

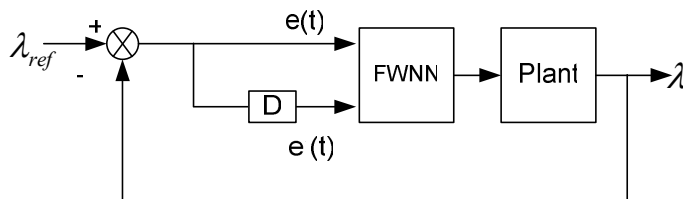


Fig. 4. The structure of FWNN-based control

The control has four fuzzy rules with FWNN structure. The initial values of the parameters of FWNNs are determined as same as set membership of Fuzzy control in Table 1. Determining parameters like setting memberships of fuzzy give less time of learning than random parameters. The training of FWNN system is performed for 8,000 data points. We used Matlab to simulate the system model. The control performance has validated in two cases; which are Case I $\theta_{pw} < \theta_{civ} - \theta_{inj}$, and and Case II $\theta_{pw} > \theta_{civ} - \theta_{inj}$. Note that the system of case II is more complexity than that of Case I. Assume that throttle angle changes according to Fig. 5. Results show in Table 2.

Table 1. Determination of parameters for each rule.

	Parameter of rule1	Parameter of rule2	Parameter of rule3	Parameter of rule4
$e(k)$	Positive	Positive	Negative	Negative
$e'(k)$	Positive	Negative	Positive	Negative

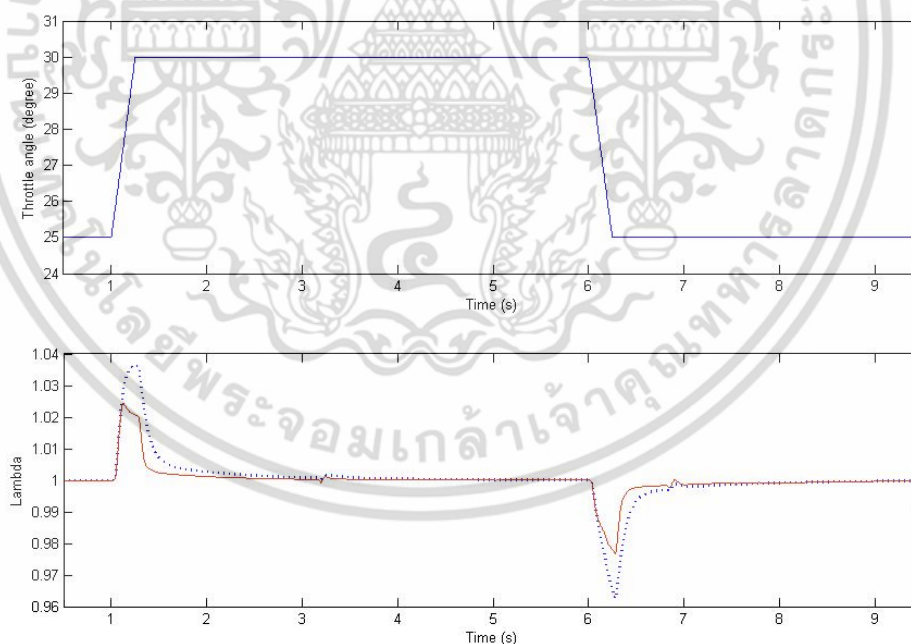


Fig. 5. Results of case I: The figure on top is for Throttle angle and the bottom figure is for Lambda corresponding to no control (dashed line) and FWNN (solid line)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 2. Parameters of A/F ratio at status of throttle angle for Fig 5.

	Max (A/F ratio)	Min (A/F ratio)	MSE (λ) 10^{-5}	Settling Time (s)
Case I No control	15.0243	13.9599	5.5147	1.20
Case I FWNN	14.8311	14.1901	1.6606	0.57
Case II No control	15.1387	13.8526	8.0893	1.37
Case II FWNN	14.9072	14.1345	2.4017	0.72

Table 2 shows performance of FWNN control. As can be seen that the set-point tracking performance is fast and precise even the feedback used only signal measured by UEGO sensor with merely four simple control rules.

5 Conclusions

This paper has proposed FWNN for A/F ratio control. The FWNN architecture can be employed to model nonlinear functions and to identify nonlinear components in a control system. FWNN controller uses TSK-type fuzzy inference system, which has a wavelet neural network in cooperated with schedule fuzzy parameters and is well-suited for modeling nonlinear systems by interpolating multiple linear models. The results show that the control performance for air–fuel ratio is well adequate to implement and integrate this function into an ECU.

Acknowledgement

This paper is supported in part by Thailand Research Funds under Grant IUG5080026 and PHD 0172/2550 and by NRCT under grant of the year 2552.

References

1. Z. Zhang, H. Huang.: Research on Exhaust of CNG and Gasoline Dual Engine, Journal of Xihua University (2005), 22-24.
2. M. Müller.: Estimation and Control of Turbocharged Engines, SAE technical paper series, Electronic Engine Controls (2008), World Congress.
3. L. Eriksson.: Modeling and Control of Turbocharged SI and DI Engines, Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP (2007), Vol. 62, No. 4, pp. 523-538.
4. R.H. Abiyev and O. Kaynak.: Fuzzy Wavelet Neural Networks for Identification and Control of Dynamic Plants—A Novel Structure and a Comparative Study, IEEE, Transactions on industrial electronics (2008), Vol. 55, No. 8, 3133-3140.
5. H.A. Yousef, M.E. Elkhatib, O.A. Sebakhy.: Wavelet network-based motion control of DC motors, Expert Systems with Applications (2009).
6. Y. Tang, W. Sun, Y. Wang and X. Zhai.: Using Recurrent Fuzzy Wavelet Neural Network to Control AC Servo System, IPEMC (2006).
7. E. Hendricks.: A generic mean value engine model for spark ignition engines, SIMS (2000).
8. R. Yuan, H. Feng and M. Cen.: Modeling and Simulation of Crush Natural Gas Turbo Engine, Journal of computers (2009), Vol. 4, No. 11, 1175-1181.
9. G. Gnanam, S.R. Habibi, R.T. Burton, and M.T. Sulatisky.: Neural Network Control of Air-to-Fuel Ratio in a Bi-Fuel Engine, IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics—Part C: Application and reviews (2006),

เอกสารนี้ใช้ Vol. 36, No. 5, 656-666. สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. J.B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", New York: McGraw-Hill (1988), 915

Appendix

Table 3. Abbreviated Nomenclature

Symbol	Description
A_{im}	Area of intake manifold.
A_{em}	Area of exhaust manifold.
l_{im}	Length of intake manifold.
l_{em}	Length of exhaust manifold
N	Engine speed.
P_{im}	Intake manifold pressure.
ρ_{im}	Inlet air density
R	Gas constant.
T_d	Transport delay between injector and exhaust gas oxygen sensor
T_{im}	Intake manifold temperature.
T_s	Time constant of the oxygen sensor
V_d	Engine displacement

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายเฉลิมพงษ์ กล้าขันธ์
 วัน เดือน ปีเกิด 17 กุมภาพันธ์ 2524
 ที่อยู่ 26 สตรีวิทยา 2 ซอย 9 ถ.สตรีวิทยา 2 แขวงลาดพร้าว
 เขตลาดพร้าว กรุงเทพฯ 10230
 ประวัติการศึกษา 2545 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ประสบการณ์การทำงาน
 พ.ศ.2546-2549 ตำแหน่ง MIS specialist บริษัทชินเน็ค ประเทศไทย จำกัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้