

การออกแบบระบบควบคุมแบบป้อนกลับของเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก

FEEDBACK CONTROL SYSTEM DESIGN OF MICRO GAS TURBINE ENGINE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

KMUTL-2013-EN-M-030-057

การออกแบบระบบควบคุมแบบป้อนกลับของเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก

FEEDBACK CONTROL SYSTEM DESIGN OF MICRO GAS TURBINE ENGINE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในที่อาคารเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
KMUTL-2013-EN-M-030-057

FEEDBACK CONTROL SYSTEM DESIGN OF MICRO GAS TURBINE ENGINE



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

2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2013-EN-M-030-057



COPYRIGHT 2013

FACULTY OF ENGINEERING

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

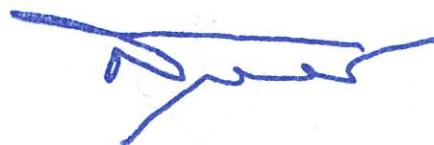
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบระบบควบคุมแบบป้อนกลับของเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก
Thesis Title Feedback Control System Design of Micro Gas Turbine Engine
นักศึกษา นายไพศาล ปานดำ
รหัสประจำตัว 53610616
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.จรรูวัตร เจริญสุข
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2013-EN-M-030-057

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.เอกพจน์	ต้นตราภิวัดน์	
ดร.อำนาจ	คณะรัฐ	
ผศ.ดร.พรชัย	นิเวศน์รังสรรค์	
รศ.ดร.จรรูวัตร	เจริญสุข	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2556 เวลา 11.00-13.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(ศาสตราจารย์ ดร.สุชชีวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
วันที่ 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2556
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบระบบควบคุมแบบป้อนกลับของ เครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก
นักศึกษา	นายไพศาล ปานดำ
รหัสประจำตัว	53610616
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2556
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร.ถาวร เบญจนราสุทธิ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบการสตาร์ทเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กแบบอัตโนมัติ และการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซ โดยในการสตาร์ทเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กแบบอัตโนมัติจะอาศัยการควบคุมแบบลำดับโดยเขียนโปรแกรมเลียนแบบการสตาร์ทของผู้ควบคุม ในด้านการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซประกอบด้วยระบบควบคุมแบบป้อนกลับแบบลบ 2 ลูป ร่วมกับตัวควบคุมในกลุ่มพีไอดี ได้แก่ การควบคุมลูบในมีหน้าที่ควบคุมตำแหน่งเปิด-ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง และการควบคุมลูบนอกมีหน้าที่ควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซ

จากผลการจำลองและผลการทดลองของการควบคุมลูบใน พบว่าตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไววอร์ปที่มีค่าเกน $K_p = 24.091$ และ $K_I = 0.4$ ซึ่งได้จากการปรับแต่งสามารถควบคุมให้ตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเข้าสู่ตำแหน่งอ้างอิงได้โดยผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกินและมีค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ และจากผลการทดลองควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซพบว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีค่าเกน $K_p = 0.001$, $K_I = 0.00005$ และ $K_D = 0.0001$ สามารถควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซให้เข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงได้เร็วโดยมีช่วงเวลาเข้าที่เพียง 19.2 วินาทีแต่มีค่าพุ่งเกิน 12.57 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าตัวควบคุมแบบพีไอที่มีค่าเกน $K_p = 0.0001$ และ $K_I = 0.0000075$ ที่สามารถควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซให้เข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงได้โดยไม่มีค่าพุ่งเกิน แต่ตัวควบคุมแบบพีไอมีช่วงเวลาเข้าที่มากถึง 49.44 วินาทีซึ่งมากกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี

จากการทดลองการสตาร์ทเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กแบบอัตโนมัติ และการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซ พบว่าระบบควบคุมการสตาร์ทที่ออกแบบสามารถทำงานแทนผู้ควบคุมได้ โดยผู้ควบคุมมีหน้าที่เพียงปิดวาล์วทางเข้าอากาศเมื่อมีการส่งสัญญาณเตือนจากส่วนประมวลผล นอกจากนี้ระบบควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซสามารถทนต่อการรบกวนภายนอกและรักษาความเร็วรอบกังหันก๊าซให้คงที่ตามความเร็วรอบอ้างอิงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Feedback Control System Design of Micro Gas Turbine Engine
Student	Mr. Paisal Pandum
Student ID.	53610616
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2013
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Jaruwat Charoensuk
Thesis Co -Advisor	Assoc.Prof.Dr.Taworn Benjanarasuth

Abstract

In this thesis, the designed automatic start and the speed control systems of the small gas turbine engine are presented. The automatic start system is designed in form of sequential control programming like operator's sequence. On the other hand, the speed control scheme employs two feedback control loops which are inner control loop and outer control loop. The inner control loop is to control the fuel valve. The outer control loop controls the turbine speed. PID-type controllers are chosen for both loops and their parameters are adjusted to investigate the responses.

From simulation and experimental results of the inner control loop, it was shown that the adjusted gains of PI controller with anti-wind up integrator, accounting for $K_p = 24.091$ and $K_I = 0.4$ could control the fuel valve without undesirable overshoot and unaccepted steady state error. For the outer loop, the gains of PID controller $K_p = 0.001$, $K_I = 0.00005$ and $K_D = 0.0001$ respectively, could control the gas turbine engine speed with 1.92 second of settling time and 12.5 percent of maximum overshoot. Conversely, the gains of PI controller, approximately $K_p = 0.0001$ and $K_I = 0.0000075$ could preserve the speed without maximum overshoot but use more settling time, 49.44 second, than PID controller.

From experiment, it is found that the automatic start system designed can operate instead of operators. Moreover, the speed control system is robust for outer disturbances and preservation of desirable turbine speeds.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข ที่ให้ความช่วยเหลือ คำชี้แนะแนวทางในการทำวิจัย ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง

ขอขอบคุณความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.ดร.ถาวร เบญจนราษฎร์ ที่ให้ความช่วยเหลือ คำชี้แนะแนวทางในการทำวิจัย ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์อันเป็นประโยชน์ ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนและทำวิจัยของผู้วิจัยรวมถึงเป็นกำลังใจและให้คำปรึกษา ในยามที่ผู้วิจัยต้องการมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ นายบัญญัติ เรืองวงศ์ นายธีระศักดิ์ จินประชา และนายสุวัชชัย กิจสำราญกุล ที่ร่วมกันพัฒนาชุดทดลองเครื่องยนต์กึ่งหุ่นขนาดเล็กที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณ นางสาวภรณ์เพ็ญ ลภีรัตนากุล ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ไพศาล ปานดำ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
คำย่อและสัญลักษณ์.....	XVI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและจุดประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	4
บทที่ 3 ทฤษฎีและหลักการ.....	8
3.1 เครื่องยนต์กังหันก๊าซ.....	8
3.1.1 ส่วนประกอบของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ.....	8
3.1.1.1 เครื่องอัดอากาศ.....	8
3.1.1.2 ห้องเผาไหม้.....	9
3.1.1.3 กังหันก๊าซ.....	9
3.1.2 หลักการทำงานของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ.....	9
3.1.3 ทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์.....	10
3.1.4 ความเบี่ยงเบนของวัฏจักรเครื่องยนต์กังหันก๊าซจริงกับวัฏจักรทางอุดมคติ.....	14
3.2 ทฤษฎีของตัวควบคุม.....	14
3.2.1 ตัวควบคุมแบบพี.....	15
3.2.2 ตัวควบคุมแบบพีไอ.....	17
3.2.3 ตัวควบคุมแบบพีไอดี.....	18
3.2.4 ตัวควบคุมแบบไอ-พีดี.....	21
3.3 การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางเดินราก.....	23
3.4 อินทิเกรเตอร์แอนไทวไวน์อัป.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 โครงสร้างและการออกแบบระบบควบคุม.....	28
4.1 โครงสร้างระบบควบคุม.....	28
4.1.1 เครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก.....	28
4.1.2 ส่วนการจ่ายเชื้อเพลิง.....	30
4.1.3 ส่วนการประมวลผล.....	32
4.1.4 ส่วนการวัด.....	35
4.1.4.1 การวัดความเร็วรอบกังหันก๊าซ.....	35
4.1.4.2 การวัดตำแหน่งเปิด-ปิดของวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง.....	36
4.1.4.3 การวัดอุณหภูมิ.....	37
4.1.4.4 การวัดความดัน.....	38
4.1.4.5 การวัดอัตราการไหลอากาศ.....	39
4.1.5 ส่วนเชื่อมต่อกับผู้ใช้งานและบันทึกผล.....	41
4.1.6 ส่วนการสตาร์ทเครื่องยนต์.....	44
4.1.7 ตัวควบคุม.....	46
4.2 การออกแบบระบบควบคุม.....	47
4.2.1 การควบคุมลูปใน หรือการควบคุมตำแหน่งเปิด-ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง.....	48
4.2.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง.....	48
4.2.1.2 การออกแบบตัวควบคุมแบบพีของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง.....	53
4.2.1.3 การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง.....	56
4.2.1.4 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง.....	58
4.2.2 การควบคุมลูปนอก หรือการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซ.....	61
บทที่ 5 ผลการจำลองและผลการทดลอง.....	62
5.1 ผลการจำลองการควบคุมตำแหน่งเปิดของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง.....	62
5.1.1 การจำลองกรณีไม่ค้ำนึ่งและค้ำนึ่งถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุม.....	63
5.1.1.1 ผลการจำลองตัวควบคุมแบบพี.....	63
5.1.1.2 ผลการจำลองตัวควบคุมแบบพีไอ.....	66
5.1.1.3 ผลการจำลองตัวควบคุมแบบพีไอดี.....	68
5.1.2 การจำลองกรณีค้ำนึ่งถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุม และแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง.....	73
5.1.2.1 ผลการจำลองตัวควบคุมแบบพี.....	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.1.2.2 ผลการจำลองตัวควบคุมแบบพีไอ.....	75
5.1.2.3 ผลการจำลองตัวควบคุมแบบพีไอดี.....	76
5.1.3 การเลือกและปรับแต่งตัวควบคุมเพื่อนำไปทดลองควบคุม ตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงระบบจริง.....	81
5.2 ผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง.....	82
5.2.1 ผลการทดลองตัวควบคุมแบบพี.....	83
5.2.2 ผลการทดลองตัวควบคุมแบบพีไอ.....	88
5.2.3 ผลการทดลองตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัฟ.....	92
5.2.4 ผลการทดลองตัวควบคุมแบบพีไอดี.....	97
5.2.5 ผลการทดลองตัวควบคุมแบบพีไอดีร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัฟ.....	101
5.2.6 ผลการทดลองตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับแต่งค่าเกน ร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัฟ.....	105
5.2.7 สรุปผลการทดลอง.....	110
5.3 การทดลองควบคุมของระบบควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซ.....	110
5.3.1 ผลการทดลองตัวควบคุมแบบพี.....	113
5.3.2 ผลการทดลองตัวควบคุมแบบพีไอ.....	113
5.3.3 ผลการทดลองตัวควบคุมแบบพีไอดี.....	121
5.3.4 ผลการทดลองตัวควบคุมแบบไอ-พี.....	129
5.3.5 ผลการทดลองตัวควบคุมแบบไอ-พีดี.....	136
5.3.6 สรุปผลการทดลอง.....	142
5.4 การทดลองสตาร์ทเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กแบบอัตโนมัติ และรักษาความเร็วรอบกังหันก๊าซ.....	142
5.4.1 ผลการทดลองตัวควบคุมแบบพีไอ.....	144
5.4.2 ผลการทดลองตัวควบคุมแบบพีไอดี.....	148
5.4.3 สรุปผลการทดลอง.....	153
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	154
6.1 บทสรุป.....	154
6.2 ปัญหาที่พบในงานวิจัยและแนวทางการแก้ไขปัญหา.....	155
6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	156
บรรณานุกรม.....	157

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก. โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง.....	160
ภาคผนวก ข. ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์.....	188
ประวัติผู้เขียน.....	198



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 ค่า K_P และ K_I ของตัวควบคุมแบบพีไอที่นำมาใช้ทดลองควบคุมระบบควบคุม ความเร็วรอบกึ่งหันท้าช.....	114
5.2 การเปรียบเทียบสมรรถนะของผลตอบสนองสำหรับการควบคุมความเร็วรอบ กึ่งหันท้าชด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ.....	121
5.3 ค่า K_P , K_I และ K_D ของตัวควบคุมแบบพีไอดีที่นำมาใช้ทดลองควบคุม ความเร็วรอบกึ่งหันท้าช.....	122
5.4 การเปรียบเทียบสมรรถนะของผลตอบสนองสำหรับการควบคุมความเร็วรอบ กึ่งหันท้าชด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี.....	128
5.5 ค่า K_I และ K_P ของตัวควบคุมแบบไอ-พีที่นำมาใช้ทดลองควบคุม ความเร็วรอบกึ่งหันท้าช.....	129
5.6 การเปรียบเทียบสมรรถนะของผลตอบสนองสำหรับการควบคุมความเร็วรอบ กึ่งหันท้าชด้วยตัวควบคุมแบบไอ-พี.....	136
5.7 ค่า K_I , K_P และ K_D ของตัวควบคุมแบบไอ-พีดีที่นำมาใช้ทดลองควบคุม ความเร็วรอบกึ่งหันท้าช.....	137
5.8 การเปรียบเทียบสมรรถนะของผลตอบสนองสำหรับการควบคุมความเร็วรอบ กึ่งหันท้าชด้วยตัวควบคุมแบบไอ-พีดี.....	141

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 วัฏจักรเครื่องยนต์กังหันก๊าซแบบเปิด.....	10
3.2 วัฏจักรเครื่องยนต์กังหันก๊าซแบบปิด.....	10
3.3 แผนภูมิ T-s และ P-V ของวัฏจักรเบร์ย์ตันอุดมคติ.....	12
3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการอัด และประสิทธิภาพของวัฏจักร.....	13
3.5 ความเป็ยงเบนของวัฏจักรเครื่องยนต์กังหันก๊าซจริงจากวัฏจักรอุดมคติ.....	14
3.6 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบป้อนกลับแบบลบนึ่งหน่วย.....	15
3.7 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบพี.....	15
3.8 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย.....	16
3.9 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบพีไอ.....	17
3.10 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย.....	18
3.11 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบพีไอดี.....	19
3.12 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบไอ-พีดี.....	21
3.13 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมป้อนกลับที่พิจารณาการอินตัว.....	25
3.14 เทคนิคอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อ์กับตัวควบคุมแบบพีไอ.....	27
4.1 บล็อกไดอะแกรมโครงสร้างระบบควบคุมเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก.....	28
4.2 โครงสร้างเครื่องยนต์กังหันขนาดเล็ก.....	29
4.3 เครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กที่พัฒนาขึ้น.....	29
4.4 มอเตอร์กระแสตรงของบริษัท Yaskawa พิกัด 24 โวลต์.....	31
4.5 องค์ประกอบน็ดเดิ้ลวาล์ว.....	31
4.6 น็ดเดิ้ลวาล์วที่นำมาใช้ในงานวิจัย.....	31
4.7 ชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง.....	32
4.8 แผงวงจรขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	32
4.9 บอร์ดพัฒนาโครงการานสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC รุ่น 40 ขา.....	34
4.10 การส่งข้อมูลแบบซิงโครนัส.....	34
4.11 การส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัส.....	35
4.12 วงจรของอุปกรณ์วัดความเร็วรอบ.....	36
4.13 การวัดความเร็วรอบ และตำแหน่งเปิด-ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง.....	37
4.14 Measurement Computing รุ่น USB-TC.....	37
4.15 การวัดอุณหภูมิ.....	38
4.16 เซ็นเซอร์วัดความดัน.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 Micro USB-Data Acquisition.....	39
4.18 ส่วนการวัดความดัน.....	39
4.19 การวัดอัตราการไหลของอากาศ.....	40
4.20 หน้าต่างแสดงและบันทึกอุณหภูมิในโปรแกรม Labview.....	42
4.21 หน้าต่างแสดงและบันทึกความดันอัตราการไหล อัตราการไหลเชิงมวล ในโปรแกรม Labview.....	43
4.22 หน้าต่างรับค่าอ้างอิง แสดงผลและบันทึกผล ความเร็วรอบก้านกังหัน และตำแหน่งเปิด-ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงในโปรแกรม Labview.....	43
4.23 อุปกรณ์จุดระเบิด.....	44
4.24 วงจรตรวจจับเปลวไฟ.....	45
4.25 ขั้นตอนการสาร์ทเครื่องยนต์ของส่วนประมวลผล.....	45
4.26 ตู้ควบคุม.....	47
4.27 ระบบควบคุมความเร็วรอบก้านกังหันของเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก.....	47
4.28 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมตำแหน่งเปิด-ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง.....	48
4.29 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	49
4.30 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	50
4.31 ผลตอบสนองวงเปิดต่อสัญญาณพัลส์วิทมอเตอร์ขนาด 50 %.....	52
4.32 แผนภาพโบทของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง.....	53
4.33 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบพีของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง.....	54
4.34 แผนภาพโบทของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพี.....	54
4.35 เส้นทางรากของระบบควบคุมชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพี.....	55
4.36 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบพีไอของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง.....	56
4.37 แผนภาพโบทของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ.....	57
4.38 เส้นทางรากของระบบควบคุมชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ.....	58
4.39 แผนภาพโบทของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี.....	59
4.40 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบพีไอดีของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง.....	59
4.41 เส้นทางรากของระบบควบคุมชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี.....	60
4.42 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมความเร็วรอบก้านกังหัน.....	61
5.1 ผลการจำลองการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีโดย ไม่คำนึงถึงการอิ่มตัวของสัญญาณควบคุม.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.2 ผลการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพี โดยคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุม.....	65
5.3 ผลการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ โดยไม่คำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุม.....	66
5.4 ผลการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ โดยคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุม.....	67
5.5 ผลการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัฟ.....	69
5.7 ผลการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยไม่คำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุม.....	70
5.8 ผลการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุม.....	71
5.9 ผลการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี ร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัฟ.....	72
5.10 ผลการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพี โดยคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมและแรงเสียดทานสถิต ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง.....	74
5.11 ผลการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ โดยคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมและแรงเสียดทานสถิต ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง.....	75
5.12 ผลการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับ อินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัฟโดยคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมและ แรงเสียดทานสถิตของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง.....	77
5.13 ผลการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมและแรงเสียดทานสถิต ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง.....	78
5.14 ผลการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีร่วมกับ อินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัฟโดยคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุม และแรงเสียดทานสถิตของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง.....	80

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.15 ผลการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ที่มีการปรับแต่งค่าเกณฑ์ร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัพโดยคำนึงถึงการอิ่มตัว ของสัญญาณควบคุมและแรงเสียดทานสถิตย์ชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง.....	82
5.16 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ.....	84
5.17 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 25 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ.....	85
5.18 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 50 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ.....	86
5.19 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 75 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ.....	87
5.20 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ.....	88
5.21 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 25 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ.....	89
5.22 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 50 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ.....	90
5.23 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 75 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ.....	91
5.24 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัพ.....	93
5.25 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 25 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัพ.....	94
5.26 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 50 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัพ.....	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.27 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 75 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัฟ.....	96
5.28 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี.....	97
5.29 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 25 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี.....	98
5.30 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 50 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี.....	99
5.31 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 75 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี.....	100
5.32 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี ร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัฟ.....	102
5.33 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 25 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี ร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัฟ.....	103
5.34 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 50 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี ร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัฟ.....	104
5.35 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 75 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี ร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัฟ.....	105
5.36 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับแต่งค่าเกน ร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัฟ.....	106
5.37 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 25 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับแต่งค่าเกน ร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัฟ.....	107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.38 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 50 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับแต่งค่าเกณฑ์ ร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัฟ.....	108
5.39 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 75 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับแต่งค่าเกณฑ์ ร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัฟ.....	109
5.40 วัฏจักรเครื่องยนต์กึ่งหนักก๊าซขนาดเล็กที่ประกอบเข้ากับอุปกรณ์วัด และอุปกรณ์ควบคุม.....	111
5.41 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกึ่งหนักก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพี.....	112
5.42 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกึ่งหนักก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ $K_p=0.005$	115
5.43 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกึ่งหนักก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ $K_p=0.002$	116
5.44 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกึ่งหนักก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ $K_p=0.001$	117
5.45 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกึ่งหนักก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ $K_p=0.0005$	118
5.46 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกึ่งหนักก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ $K_p=0.0001$	119
5.47 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกึ่งหนักก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ $K_p=0.00005$	120
5.48 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกึ่งหนักก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี $K_p = 0.001, K_I = 0.00005$	123
5.49 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกึ่งหนักก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี $K_p = 0.0001, K_I = 0.00005$	124
5.50 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกึ่งหนักก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี $K_p = 0.001, K_I = 0.00001$	125
5.51 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกึ่งหนักก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี $K_p = 0.0001, K_I = 0.00001$	126
5.52 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกึ่งหนักก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี $K_p = 0.0001, K_I = 0.0000075$	127
5.53 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกึ่งหนักก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบไอ-พี $K_I = 0.0001$ และ $K_I = 0.00001$	128
5.54 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกึ่งหนักก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบไอ-พี $K_I = 0.000005$	129
5.55 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกึ่งหนักก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบไอ-พี $K_I = 0.000004$	130

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.56 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบไอ-พี $K_I = 0.0000025$ และ $K_I = 0.000002$	133
5.57 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบไอ-พี $K_I = 0.000001$	134
5.58 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบไอ-พีดี $K_I = 0.0000025$	138
5.59 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบไอ-พีดี $K_I = 0.0000025$	139
5.60 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบไอ-พีดี $K_I = 0.000005$	139
5.61 ผลการทดลองการสตาร์ทเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กแบบอัตโนมัติ ร่วมกับการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซโดยอาศัยตัวควบคุมแบบพีไอ.....	144
5.62 ผลตอบสนองความเร็วรอบกังหันก๊าซในช่วงขั้นตอนที่ 1 ของรูปที่ 5.61.....	144
5.63 ผลตอบสนองความเร็วรอบกังหันก๊าซในช่วงขั้นตอนที่ 2 ของรูปที่ 5.61.....	145
5.64 ผลตอบสนองความเร็วรอบกังหันก๊าซในช่วงขั้นตอนที่ 3 ของรูปที่ 5.61.....	146
5.65 ผลตอบสนองความเร็วรอบกังหันก๊าซในช่วงขั้นตอนที่ 4 ของรูปที่ 5.61.....	146
5.66 ผลตอบสนองความเร็วรอบกังหันก๊าซในช่วงขั้นตอนที่ 5 ของรูปที่ 5.61.....	147
5.67 ผลตอบสนองความเร็วรอบกังหันก๊าซในช่วงขั้นตอนที่ 6 ของรูปที่ 5.61.....	148
5.68 ผลการทดลองการสตาร์ทเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กแบบอัตโนมัติ ร่วมกับการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซโดยอาศัยตัวควบคุมแบบพีไอดี.....	149
5.69 ผลตอบสนองความเร็วรอบกังหันก๊าซในช่วงขั้นตอนที่ 1 ของรูปที่ 5.68.....	149
5.70 ผลตอบสนองความเร็วรอบกังหันก๊าซในช่วงขั้นตอนที่ 2 ของรูปที่ 5.68.....	150
5.71 ผลตอบสนองความเร็วรอบกังหันก๊าซในช่วงขั้นตอนที่ 3 ของรูปที่ 5.68.....	150
5.72 ผลตอบสนองความเร็วรอบกังหันก๊าซในช่วงขั้นตอนที่ 4 ของรูปที่ 5.68.....	151
5.73 ผลตอบสนองความเร็วรอบกังหันก๊าซในช่วงขั้นตอนที่ 5 ของรูปที่ 5.68.....	152
5.74 ผลตอบสนองความเร็วรอบกังหันก๊าซในช่วงขั้นตอนที่ 6 ของรูปที่ 5.68.....	152

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

Q	พลังงานความร้อน, kW
W	พลังงานที่ถ่ายเทต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของสาร
T	อุณหภูมิ, K
P	ความดัน, Pa
c_p	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ, $J / kg - K$
s	เอนโทรปี, $J / kg - K$
h	เอนทาลปี, $kJ / kmol$
v	ปริมาตร, m^3
r	อัตราส่วนการอัด
η	ประสิทธิภาพของวัฏจักร
γ	อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ
η_c	ประสิทธิภาพของเครื่องอัดอากาศ
η_t	ประสิทธิภาพของเครื่องดูดอากาศ
$G_P(s)$	กระบวนการ
$G_C(s)$	ตัวควบคุม
$u(t)$ และ $U(s)$	สัญญาณควบคุมของตัวควบคุม
$e(t)$ และ $E(s)$	ค่าความผิดพลาด
$R(s)$	อินพุตของระบบควบคุม
$C(s)$	เอาต์พุตของระบบควบคุม
$T(s)$	ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด
e_{ss}	ความผิดพลาดที่สภาวะคงตัว
K_P	เกนหรืออัตราขยายเชิงสัดส่วน
K_I	อัตราขยายเชิงอินทิเกรต
T_i	ค่าเวลาอินทิกรัล
s	โพล
K_D	อัตราขยายเชิงอนุพันธ์ (derivative gain)
T_d	ค่าเวลาอนุพันธ์
T_S	คาบเวลาการสุ่ม, วินาที
SV	ค่าอ้างอิง
PV	ค่าที่ได้จากกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบพี
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์(ต่อ)

U_I	สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบโอ
U_D	สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบดี
U_{PID}	สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบพีไอดี
U_{I-PD}	สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบไอ-พีดี
M_p	ค่าพุ่งเกินสูงสุด
t_s	ช่วงเวลาเข้าที่
t_r	ช่วงเวลาไต่
ξ	อัตราการหน่วง
u_{max}	สัญญาณควบคุมสูงสุดที่ระบบควบคุมทำได้
u_{min}	สัญญาณควบคุมต่ำสุดที่ระบบควบคุมทำได้
u_c	สัญญาณควบคุมที่ผ่านการค้ำึงถึงการอิมิตัว
K_a	ค่าเกนของแอนไทไวน์ออฟ
φ	ค่ามุมของซีโร
$\sum \theta_p$	มุมรวมของโพล
$\sum \theta_z$	มุมรวมของซีโร
P_{total}	ความดันรวม, Pa
P_{static}	ความดันสถิต, Pa
P_a	ความดันที่ตำแหน่ง a, Pa
P_b	ความดันที่ตำแหน่ง b, Pa
P_b	ความดันที่ตำแหน่ง b, Pa
v_a, v_b	ความเร็วอากาศที่ตำแหน่ง a และ b, m / s
z_a, z_b	ระยะระหว่างผนังท่อถึงตำแหน่งที่ a และ b, มิลลิเมตร
g	แรงโน้มถ่วงโลก (gravity force) มีค่าเท่ากับ $9.81 \text{ m} / \text{s}^2$
ρ	ความหนาแน่นของอากาศ, kg / m^3
Q_a	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ, m^3 / s
\dot{m}	อัตราการไหลเชิงมวล, kg / s
A	พื้นที่หน้าตัดภายในท่อ
P_{gauge}	ความดันเกจ
P_{diff}	ความดันผลต่าง
V_{gauge}	แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเซ็นเซอร์ MPX5050GP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์(ต่อ)

V_{diff}	แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเซ็นเซอร์ MPXV5004DP
V_S	แรงดันไฟฟ้าอินพุตของเซ็นเซอร์ MPXV5004DP และ MPX5050GP
$e_a(t)$	แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
$e_b(t)$	แรงดันไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้นในอาร์เมเจอร์
$i_a(t)$	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอาร์เมเจอร์
L_a	ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด
R_a	ค่าความต้านทานของอาร์เมเจอร์
$T(t)$	แรงบิดทางกลของมอเตอร์
K_ϕ	ค่าคงที่อาร์เมเจอร์
b	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของระบบจากการเคลื่อนที่
J	สัมประสิทธิ์เนื่องจากความเฉื่อยของมอเตอร์
$\omega(t)$	ความเร็วเชิงมุม
T_m	ค่าคงที่เวลาของมอเตอร์
K_m	ค่าคงที่มอเตอร์
K_g	เกนมาร์จิ้น
γ	เฟสมาร์จิ้น
ω_{cg}	ความถี่ตัดข้ามแกน
σ	ค่าจริง

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เครื่องยนต์กังหันก๊าซเป็นเครื่องยนต์สันดาปภายในชนิดหนึ่ง ซึ่งแปรรูปพลังงานจากเชื้อเพลิงเหลวหรือก๊าซให้เป็นพลังงานกล โดยมีคุณลักษณะเฉพาะตัวที่เป็นข้อดีคือ สามารถนำไปใช้กับเชื้อเพลิงได้หลากหลายชนิด มีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ส่วนประกอบของเครื่องยนต์มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหวและซับซ้อนน้อย ลักษณะการเคลื่อนไหวของชิ้นส่วนที่ก่อให้เกิดแรงกระทำแบบสม่ำเสมอ จึงไม่มีข้อจำกัดเรื่องความเร็วรอบการทำงานการบำรุงรักษาจึงทำให้เป็นไปโดยง่าย เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการผลิตพลังงานกลที่เท่ากัน เครื่องยนต์กังหันก๊าซจะมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา มีการสั่นสะเทือน และมีความซับซ้อนของชิ้นส่วนเครื่องยนต์ที่น้อยกว่าเครื่องยนต์ลูกสูบมาก นอกจากนี้ได้มีการพัฒนาให้เครื่องยนต์กังหันก๊าซมีขนาดเล็กลง และมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ด้วยการพัฒนาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ได้แก่ ค่าประสิทธิภาพไอเซนทรอปิกของเครื่องอัดอากาศ และกังหันก๊าซ ค่าประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์มีค่าสูงขึ้นจนอยู่ในระดับที่น่าสนใจ ดังนั้นในปัจจุบันเครื่องยนต์กังหันก๊าซได้ถูกนำไปใช้เป็นเครื่องต้นกำลังขับอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้ในอากาศยานซึ่งจะใช้เครื่องยนต์กังหันก๊าซในลักษณะของเครื่องยนต์ไอพ่น (jet engine) และใช้เป็นเครื่องต้นกำลังขับสำหรับเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า ซึ่งได้มีการนำมาใช้มากขึ้นในโรงงานผลิตไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม เนื่องจากข้อได้เปรียบทางด้านประสิทธิภาพและการปลดปล่อยมลพิษที่ต่ำกว่าเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าแบบเดิม เช่น ในระบบเตาเผาไหม้ที่ใช้ร่วมกับหม้อต้มไอน้ำ หรือกังหันไอน้ำเพียงอย่างเดียว [1] และเมื่อเครื่องยนต์กังหันก๊าซมีขนาดเล็กลงจึงสามารถใช้เป็นเครื่องต้นกำลังขับสำหรับเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าขนาดเล็กได้ ซึ่งทำให้เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้ามีขนาดเล็กลงสามารถเคลื่อนย้ายไปยังสถานที่ที่ต้องการได้โดยอาศัยเพียงการขนส่งด้วยรถบรรทุก

ด้วยเงื่อนไขทางด้านสังคมที่นำไปสู่กฎหมายกำกับกิจการผลิตไฟฟ้า ทำให้การผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่สำหรับประเทศไทยเป็นไปได้ยาก การผลิตกระแสไฟฟ้าในลักษณะที่เป็นโรงไฟฟ้าขนาดเล็กที่กระจายอยู่ตามแหล่งที่มีความต้องการกระแสไฟฟ้า และใกล้กับแหล่งวัตถุดิบที่นำมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิง เช่น ก๊าซสังเคราะห์จากวัสดุทางการเกษตร ก๊าซชีวมวล ก๊าซธรรมชาติ ก๊าซชีวภาพ แต่สำหรับประเทศไทย ราคาติดตั้งต่อกำลังการผลิตไฟฟ้าเป็นอุปสรรคสำคัญที่ทำให้การใช้เครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กยังไม่เป็นที่สนใจ [1]

ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กได้นำไปใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งการนำเครื่องยนต์กังหันก๊าซไปใช้งานต้องอาศัยกำลัง และความเร็วรอบที่เกิดขึ้นจากการหมุนของ

เอกสาร กังหันก๊าซ ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซเพื่อให้ได้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วรอบและกำลังตามต้องการแล้วนำไปผลิตกระแสไฟฟ้าได้ โดยเริ่มจากการติดตั้งอุปกรณ์วัดและอุปกรณ์ขับเพื่อใช้ในการควบคุม ตลอดจนพัฒนาโปรแกรมควบคุมในไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC ร่วมกับโปรแกรม LabView ซึ่งเป็นส่วนเชื่อมต่อกับผู้ใช้งาน แต่ไม่มีการเปลี่ยนโครงสร้างทางกายภาพของเครื่องยนต์ โดยเลือกใช้ตัวควบคุมในตระกูลพีโอดี เนื่องจากมีข้อดีหลายประการเช่น โครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน และการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของตัวควบคุมทำได้ง่าย และตัวควบคุมแบบไอ-พีดี ซึ่งมีข้อดีคือ สามารถหลีกเลี่ยงการเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ในสัญญาณควบคุม (control signal) อันเนื่องมาจากการทำงานแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์ เมื่อสัญญาณอ้างอิงเกิดการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด และด้วยตัวควบคุมทั้งสองแบบนี้มีความซับซ้อนทางด้านโปรแกรมในไมโครคอนโทรลเลอร์น้อย เพื่อนำตัวควบคุมมาเปรียบเทียบหาตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งทดลองกับเครื่องยนต์จริง เพื่อยืนยันความสามารถของระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้น และศึกษาพฤติกรรมของระบบเมื่อแปรค่าอัตราขยายของตัวควบคุม อีกทั้งระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นนั้นต้องใช้ง่ายต่อการใช้งาน ปลอดภัย และมีค่าใช้จ่ายที่ไม่สูง เพื่อลดต้นทุนทางการผลิตเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก เพื่อที่จะสามารถนำไปผลิตกระแสไฟฟ้าในลักษณะที่เป็นโรงไฟฟ้าขนาดเล็กที่กระจายอยู่ตามแหล่งที่มีความต้องการกระแสไฟฟ้า โดยอาศัยเชื้อเพลิงที่ได้จาก ก๊าซสังเคราะห์จากวัสดุทางการเกษตร

1.2 ความมุ่งหมายและจุดประสงค์

1. ปรับปรุงเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กให้รองรับการควบคุมการสตาร์ทเครื่องยนต์และการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซแบบอัตโนมัติ
2. ออกแบบระบบควบคุมการสตาร์ทเครื่องยนต์แบบอัตโนมัติ
3. ออกแบบระบบควบคุม และตัวควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซสำหรับนำไปควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซให้มีความเร็วรอบตามต้องการได้
4. ออกแบบตัวควบคุมสำหรับนำไปควบคุมตำแหน่งเปิด-ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงให้มีตำแหน่งตามต้องการ และสามารถทำงานร่วมกับระบบควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กที่นำมาติดตั้งระบบควบคุม มีลักษณะเป็นวัฏจักรเบรย์ตัน (Brayton Cycle)
2. เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการพัฒนาระบบควบคุมเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กให้อยู่ในงบประมาณที่ไม่สูงนัก เพื่อลดต้นทุนทางการผลิตเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก จึงควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC4011 และพัฒนาชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงขึ้นเอง
3. การวัดความเร็วรอบกังหันก๊าซใช้หลักการวัดเดียวกับเอ็นโค้ดเดอร์ แต่เนื่องด้วยความเร็วรอบกังหันก๊าซสูงถึงประมาณ 30,000 รอบต่อนาที พัลส์ต่อรอบจึงต้องมีความละเอียดต่ำ (2 พัลส์ต่อรอบ) เพื่อให้ไฟได้เซ็นเซอร์อยู่ในสภาวะที่ทำงานได้อย่างถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การออกแบบตัวควบคุมในระบบควบคุมความเร็วรอบกึ่งกันก๊าซจำเป็นต้องอาศัยการทดลองในระบบจริงโดยใช้วิธีลองผิดลองถูก เนื่องจากไม่สามารถออกแบบตัวควบคุมและทำการจำลองก่อนได้เพราะว่าไม่ทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์กึ่งกันก๊าซขนาดเล็ก ถ้าจะสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นเองนั้น ไม่สามารถทำได้ในเวลาและงบประมาณอันจำกัดได้ ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ตัวควบคุมตระกูลพีไอดีที่มีความซับซ้อนต่ำ และง่ายต่อการหาค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมด้วยวิธีการลักษณะนี้

5. การควบคุมความเร็วรอบกึ่งกันก๊าซจะควบคุมความเร็วรอบอยู่ที่ 30,000 รอบต่อนาที โดยการควบคุมจะเริ่มควบคุมก็ต่อเมื่อเครื่องยนต์สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องเพิ่มปริมาณอากาศจากเครื่องดูดอากาศโดยมีความเร็วรอบเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 15,000 รอบต่อนาที

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาการทำงานของเครื่องยนต์กึ่งกันก๊าซขนาดเล็ก
2. พัฒนาโครงสร้างเครื่องยนต์กึ่งกันก๊าซขนาดเล็กจนสามารถควบคุมความเร็วรอบกึ่งกันก๊าซโดยอาศัยผู้ควบคุม
3. ติดตั้งอุปกรณ์วัด และอุปกรณ์ควบคุมเพิ่มเติม เพื่อใช้ในการควบคุมการสตาร์ทเครื่องยนต์ และการควบคุมความเร็วรอบกึ่งกันก๊าซแบบอัตโนมัติ
4. ออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบกึ่งกันก๊าซ
5. ออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบควบคุมตำแหน่งเปิด-ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมในตระกูลพีไอดีให้สามารถควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วเข้าสู่ตำแหน่งอ้างอิงได้
6. ออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบควบคุมความเร็วรอบกึ่งกันก๊าซด้วยตัวควบคุมในตระกูลพีไอดีให้สามารถควบคุมความเร็วรอบกึ่งกันก๊าซเข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงได้
7. สรุปผลการทดลองและวิเคราะห์เพื่อพัฒนาและปรับปรุง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงพฤติกรรมของระบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมในตระกูลพีไอดี
2. เพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับพัฒนาการออกแบบตัวควบคุมของเครื่องยนต์กึ่งกันก๊าซขนาดเล็ก
3. สามารถสตาร์ทเครื่องยนต์กึ่งกันก๊าซขนาดเล็กแบบอัตโนมัติได้ และสามารถควบคุมความเร็วรอบกึ่งกันก๊าซให้มีความเร็วรอบตามต้องการได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วรรณกรรมปรินิทรรศน์

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นเครื่องยนต์กั๊กันก๊าซขนาดเล็กมีข้อดีหลายประการ จึงมีการนำไปใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งการนำเครื่องยนต์กั๊กันก๊าซไปใช้งานต้องอาศัยความเร็วรอบที่เกิดขึ้นจากการหมุนของเพลากั๊กันก๊าซ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาระบบควบคุมความเร็วรอบกั๊กันก๊าซเพื่อให้ได้ความเร็วรอบตามต้องการ โดยมีการศึกษาและการนำตัวควบคุมหลายชนิดมาประยุกต์ใช้ในระควบคุมความเร็วรอบกั๊กันก๊าซซึ่งสามารถสรุปพอสังเขปได้ดังนี้

Francisco Jurado 2001 [2] ได้ศึกษาการออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบกั๊กันก๊าซและกำลังทางกลที่ได้จากเครื่องยนต์กั๊กันก๊าซชีวมวล โดยระบบควบคุมความเร็วรอบกั๊กันก๊าซและกำลังทางกลที่ได้จากเครื่องยนต์กั๊กันก๊าซชีวมวลประกอบด้วย 2 ระบบ ได้แก่ ระบบที่หนึ่งคือระบบควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงซึ่งควบคุมแอกชูเอเตอร์และตำแหน่งเปิดของวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง ระบบที่สองคือระบบควบคุมความเร็วรอบกั๊กันก๊าซและกำลังทางกล ซึ่งทั้งสองระบบนี้ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีซีซึ่งร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมโดยตัวควบคุมแบบพีซีล่อจิกมีหน้าที่ควบคุมระบบควบคุมทั้งหมด และโครงข่ายประสาทเทียมทำหน้าที่ปรับแต่งค่าเกนของตัวควบคุมแบบพีซีล่อจิก ในขณะที่ทำการควบคุม เมื่อสามารถออกแบบระบบควบคุมได้แล้ว จากนั้นนำระบบควบคุมที่ได้ ออกแบบไปทดสอบความสามารถในการควบคุมโดยการจำลองในโปรแกรมแมตแล็บ ซึ่งการจำลองได้ อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีลักษณะสมการเป็นเชิงเส้น และนำผลที่ได้จากการจำลองไป เปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอทีและตัวควบคุมแบบพีซีล่อจิก จากการจำลองพบว่า ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีซีซึ่งร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าพุ่งเกิน การแกว่งของ สัญญาณ และค่าความผิดพลาดน้อยกว่าตัวควบคุมแบบพีไอที อีกทั้งยังสามารถใช้งานได้ในช่วงกว้าง เนื่องจากมีโครงข่ายประสาทเทียมช่วยในการปรับแต่งค่าเกนของตัวควบคุมแบบพีซีล่อจิก

Kim, Dong Hwa (2004) [3] ได้ออกแบบและศึกษาตัวควบคุมพีไอทีแบบ 2 อันดับอิสระภาพ (2 DOF PID) โดยอาศัยการเลือกค่าเกนของตัวควบคุมผ่านตัวควบคุมแบบพีซีและระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Neural network Fuzzy System) เพื่อสร้างระบบควบคุมเครื่องยนต์กั๊กันก๊าซที่สามารถลดการสูญเสียพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยในระบบควบคุมเครื่องยนต์กั๊กันก๊าซ ประกอบด้วย การควบคุมการสตาร์ทเครื่องยนต์ การควบคุมความเร็วรอบกั๊กันก๊าซ และการควบคุม อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ ซึ่งในการทดลองควบคุมเครื่องยนต์กั๊กันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอทีที่ ผ่านการเลือกค่าเกนด้วยตัวควบคุมแบบพีซีและระบบโครงข่ายประสาทเทียมได้นำผลการทดลองไป เปรียบเทียบกับผลการทดลองของระบบที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอทีและตัวควบคุมพีไอทีแบบ 2 อันดับ อิสระภาพ จากการทดลองพบว่าตัวควบคุมพีไอทีแบบ 2 อันดับอิสระภาพที่ออกแบบใหม่มีผลตอบสนอง

เอกสารของบ่อนเชื้อเพลิงและอุณหภูมิดีกว่าตัวควบคุมอีก 2 ชนิด คือมีค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัว ค่า ไม่ว่การณืใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Steady state error) น้อยกว่า สามารถติดตามสัญญาณควบคุมได้ดี แม้ว่าตัวควบคุมพีไอดีแบบ 2 อันดับอิสระภาพจะให้สัญญาณตอบสนองที่การแกว่งน้อยกว่าก็ตาม

Youhong Yu (2004) [9] ได้นำเสนอการจำลองการควบคุมเครื่องยนต์กังหันก๊าซแบบ 3 เฟลาของเรือเดินสมุทรในโปรแกรมแมตแล็บ (Matlab) ด้วยตัวควบคุมแบบดิจิทัล เพื่อควบคุมความเร็วรอบเพลลา อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าสู่กังหันก๊าซ และอัตราการเร่งของความเร็วรอบกังหันก๊าซเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วรอบอ้างอิงอย่างกะทันหันโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งการควบคุมได้แบ่งออกเป็น 3 ลูปการควบคุมได้แก่ ลูปที่หนึ่งเป็นการควบคุมความเร็วรอบเพลลาโดยใช้ตัวควบคุมแบบพี ลูปที่สองเป็นการควบคุมอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าสู่กังหันก๊าซโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ และลูปที่สามเป็นการควบคุมอัตราการเร่งของความเร็วรอบกังหันก๊าซโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ แล้วนำสัญญาณควบคุมของทั้ง 3 ลูปส่งมายังตัวควบคุมแบบ forward-feedback เพื่อควบคุมอัตราการไหลของเชื้อเพลิง ซึ่งจากการจำลองพบว่าผลการจำลองและผลการทดลองมีสมรรถนะใกล้เคียงกัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาจำลองมีความน่าเชื่อถือ

T.R. Rangswamy (2006) [4] ได้ออกแบบระบบควบคุมของเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก โดยระบบควบคุมเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กถูกแบ่งออกเป็น 2 ลูป ได้แก่ ลูปที่หนึ่งเป็นลูปการควบคุมการเปิด-ปิดของใบครีบนำทาง (inlet guide vane) ตรงตำแหน่งทางเข้าเครื่องอัดอากาศ เพื่อควบคุมอุณหภูมิของก๊าซไอเสียตรงตำแหน่งทางออกของกังหันก๊าซให้มีอุณหภูมิตรงตามค่าอ้างอิง และลูปควบคุมที่สองเป็นลูปการควบคุมตำแหน่งเปิด-ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเพื่อควบคุมอัตราการไหลของเชื้อเพลิงซึ่งมีผลต่อความเร็วรอบของกังหันก๊าซ และปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยการควบคุมทั้งสองลูปถูกควบคุมโดยตัวควบคุมแบบพีซีซี และเพื่อเป็นการทดสอบความสามารถในการควบคุมของตัวควบคุมแบบพีซีซีจึงนำตัวควบคุมแบบพีซีซีไปจำลองและทดลองเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของผลตอบสนองกับตัวควบคุมแบบพีไอดี จากการจำลองและการทดลองพบว่าตัวควบคุมแบบพีซีซีให้ผลตอบสนองที่มีช่วงเวลาเข้าที่ ค่าพุ่งเกิน ค่าความผิดพลาดในช่วงก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัว และการแกว่งของสัญญาณน้อยกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี

F.Jurado (2006) [5] ได้นำเสนอการนำการควบคุมแบบ MPC (Model Predictive Control) มาใช้ในระบบส่งกำลัง โดยมีจุดประสงค์ของการควบคุม คือลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเมื่อมีการนำกำลังไฟฟ้าที่ได้ไปใช้งานหรือมีการต่อโหลดเข้ากับระบบส่งกำลังไฟฟ้า ซึ่งระบบส่งกำลังไฟฟ้านี้มีเครื่องยนต์กังหันก๊าซเป็นต้นกำลังขับเคลื่อนไฟฟ้ โดยในเบื้องต้นเป็นเพียงการจำลองการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซของเครื่องยนต์กังหันก๊าซให้สามารถรักษาความเร็วรอบกังหันก๊าซให้กลับเข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงได้ เมื่อมีการเปลี่ยนของการใช้กำลังไฟฟ้าอย่างกะทันหันด้วยการควบคุมแบบ MPC ในโปรแกรมแมตแล็บ ซึ่งการออกแบบการควบคุม MPC และการจำลองได้อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซของ Hammerstein ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีลักษณะของสมการไม่เป็นเชิงเส้นแต่มีความซับซ้อนน้อย อย่างไรก็ตามเพื่อให้การ

จำลองมีความซับซ้อนน้อยลงได้ทำการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Hammerstein ให้มีลักษณะสมการเป็นแบบเชิงเส้น และใช้การควบคุมแบบทำนายในลักษณะสมการเป็นแบบเชิงเส้น (Linear predictive controller) เช่นกัน ซึ่งจากการจำลองพบว่าระบบที่มีการควบคุมแบบ MPC เกิดการแกว่งของความเร็รรอบกั้นก๊าซน้อยกว่าระบบที่ไม่มีการควบคุมแบบ MPC

Zhitao Wang (2009) [6] ได้จำลองเปรียบเทียบการทำงานของตัวควบคุมพีซีพีไอดี และ พีไอดี เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความต้องการกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างกะทันหัน รวมถึงสังเกตการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองความเร็รรอบกั้นก๊าซ โดยมีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์กั้นก๊าซที่เชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งในการสร้างแบบจำลองของเครื่องยนต์ได้คำนึงถึงหลักของความเฉื่อยเชิงปริมาตร (Volume inertia) ส่วนแบบจำลองของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าได้ใช้แบบจำลองของ Parker ซึ่งแบบจำลองทั้งหมดได้ถูกนำมาทดสอบโดยการจำลองในโปรแกรมแมตแล็บ จากการจำลองพบว่าผลตอบสนองภายใต้ตัวควบคุมแบบพีซีพีไอดีมีการติดตามสัญญาณอ้างอิงที่เปลี่ยนแปลงโดยมีค่าฟุงเกินน้อยกว่า และลู่เข้าหาสัญญาณอ้างอิงที่รวดเร็วกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี

Aidong Xu (2009) [7] ได้นำเสนอการปรับใช้การควบคุมแบบปรับตัวได้ไร้โมเดล (Model Free Adaptive, MFA) สำหรับควบคุมระบบเครื่องยนต์กั้นก๊าซ ซึ่งเป็นการควบคุมที่ไม่ต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และไม่จำเป็นต้องมีข้อมูลของระบบที่จะนำมาปรับใช้ เนื่องจากโมเดลประเภทนี้จะเรียนรู้ระบบด้วยตัวเองผ่านข้อมูลขาเข้าและขาออกของระบบ ซึ่งผู้เขียนได้นำเสนอผ่านระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Neural network) ทำให้การควบคุมชนิดนี้มีความซับซ้อนน้อย ง่ายต่อการใช้งาน รวมถึงต้นทุนต่ำ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการควบคุมประเภทอื่น เช่น การควบคุมแบบป้อนล่วงหน้า-ป้อนกลับ (Feedforward-feedback control) การควบคุมแบบวงควบคุมหลายชั้น (Cascade Control) เพื่อให้การควบคุมมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการควบคุมประเภทนี้ก็ยังต้องการหลักการที่ชัดเจนกว่านี้ เช่น ความแน่นอนในการกำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้น การนำไปปรับใช้กับการควบคุมประเภทอื่นๆ เป็นต้น ดังนั้นการควบคุมประเภทนี้จึงยังคงค่อนข้างคลุมเครือต่อการเข้าใจและประยุกต์ใช้

Ebrahim Najimi (2012) [8] ได้นำเสนอการควบคุมความเร็รรอบกั้นก๊าซ และควบคุมอุณหภูมิไอเสียด้วยตัวควบคุมแบบคงทน (Robust controller) สำหรับแพลนท์ผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์กั้นก๊าซ (81.6 MW ขณะมีภาระ) เพื่อรักษาเสถียรภาพของความถี่และกำลังไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนของภาระทางไฟฟ้าอย่างกะทันหัน โดยมีการออกแบบตัวควบคุมก่อนนำตัวควบคุมไปทดสอบความสามารถในการควบคุมด้วยวิธีการจำลอง ซึ่งการออกแบบได้อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Montazer Ghaem แพลนท์ผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์กั้นก๊าซซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้มีลักษณะสมการเป็นแบบเชิงเส้น (ARX model) แต่ในส่วนของการจำลองได้นำไปจำลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีลักษณะสมการแบบไม่เป็นเชิงเส้น (NARX model) และนำผลที่ได้จากการจำลองไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองของตัวควบคุมแบบพีไอดี และ

MPC ซึ่งผลการจำลองพบว่าตัวควบคุมแบบคงทนสามารถควบคุมให้ความเร็วรอบกังหันก๊าซ และ อุณหภูมิไอเสียกลับเข้าสู่ค่าอ้างอิงได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้าอย่างกะทันหันโดยใช้เวลา เข้าที่ 20 วินาที และมีค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวประมาณ 0.01 p.u. ซึ่งน้อยกว่าตัวควบคุม แบบพีไอดี และตัวควบคุม MPC ซึ่งมีค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวเท่ากับ 0.03 p.u. และ 0.02 p.u. ตามลำดับ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า มีการนำตัวควบคุมหลายชนิดมาประยุกต์ใช้ในระบบ ควบคุมเครื่องยนต์กังหันก๊าซเพื่อควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซ เช่น ตัวควบคุมแบบพีชซี ตัวควบคุม แบบคงทน ตัวควบคุมแบบ MPC ตัวควบคุมแบบพีชซีร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียม และตัวควบคุม แบบพีไอดีที่มีการปรับแต่งค่าเกณฑ์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับตัวควบคุมแบบพีชซี เป็นต้น ซึ่ง จากการทดลองและการจำลองพบว่าตัวควบคุมเหล่านี้สามารถควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซให้เข้าสู่ ความเร็วรอบอ้างอิงได้โดยผลตอบสนองมีสมรรถนะที่สามารถยอมรับได้ แต่อย่างไรก็ตามตัวควบคุม เหล่านี้มีความซับซ้อนในการออกแบบและต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้อง ซึ่ง เป็นไปได้ยากที่จะสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซให้มีความถูกต้องใน ระยะเวลาและงบประมาณอันจำกัด เนื่องจากมีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อความเร็วรอบกังหันก๊าซ เช่น ความดันของก๊าซเชื้อเพลิง ชนิดเชื้อเพลิง อุณหภูมิและชนิดของน้ำมันหล่อลื่นในกังหันก๊าซ ระยะและขนาดหัวฉีด เป็นต้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเครื่องยนต์กังหันก๊าซแต่ละเครื่อง และปัจจัยบางอย่างอาจเปลี่ยนไปในขณะที่เครื่องยนต์กำลังทำงาน อีกทั้งตัวควบคุมเหล่านี้มีความ ซับซ้อนมากในการเขียนโปรแกรมและไม่เหมาะสมที่จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการประมวลผล ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีเนื่องจากตัวควบคุมชนิดนี้มีข้อดีหลายประการ เช่น ตัวควบคุมซับซ้อนน้อยสามารถนำไปใช้ในไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ การออกแบบไม่ต้องอาศัย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยสามารถออกแบบได้โดยวิธีลองผิดลองถูกได้ เป็นต้น ถึงแม้ว่าตัว ควบคุมดังกล่าวให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี แต่ก็ดีกว่าไม่มากนัก ซึ่งถ้า นำตัวควบคุมแบบพีไอดีมาปรับแต่งค่าเกณฑ์ใหม่อาจทำให้ตัวควบคุมแบบพีไอดีมีผลตอบสนองที่ดีขึ้น หรืออาจจะดีกว่าตัวควบคุมดังกล่าว

บทที่ 3

ทฤษฎีและหลักการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีของเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก ทฤษฎีของตัวควบคุมและการออกแบบตัวควบคุมที่นำมาใช้ในระบบควบคุมความเร็วรอบกังหัน ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนแรกอธิบายถึงทฤษฎีพื้นฐานของเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก ส่วนประกอบ หลักการทำงานของเครื่องยนต์ และทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์ ส่วนที่สองอธิบายถึง ทฤษฎีพื้นฐานของตัวควบคุมพีไอ พีไอดี และไอ-พีดี ข้อดีข้อเสียของตัวควบคุมแต่ละชนิด และในส่วนที่สามอธิบายถึงทฤษฎีที่นำมาใช้เพื่อการออกแบบตัวควบคุมของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

3.1 เครื่องยนต์กังหันก๊าซ

เครื่องยนต์กังหันก๊าซเป็นอุปกรณ์กำเนิดพลังงานชนิดหนึ่ง โดยเครื่องยนต์กังหันก๊าซนั้นให้พลังงานได้จากการอาศัยการได้เปรียบเชิงพลังงานระหว่างเครื่องอัดอากาศและกังหันก๊าซที่ทำงานระหว่างคู่ความดัน และอัตราการไหลโดยมวลที่เท่ากัน กล่าวคือพลังงานที่ใช้ของเครื่องอัดอากาศจะน้อยกว่าพลังงานที่ได้จากกังหันก๊าซจึงทำให้ได้พลังงานส่วนต่างที่เนื่องมาจากการทำงาน เป็นพลังงานที่สามารถนำไปใช้งานได้

3.1.1 ส่วนประกอบของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงส่วนประกอบหลักของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ โดยอธิบายถึงหน้าที่ ลักษณะการทำงาน และประเภทของส่วนประกอบนั้นๆ ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 ส่วนดังนี้คือ

3.1.1.1 เครื่องอัดอากาศ (Compressor)

เครื่องอัดอากาศทำหน้าที่เพิ่มความดันของของไหลด้วยการเปลี่ยนรูปแบบของพลังงานกลจากเพลลาให้เป็นพลังงานจลน์ในของไหล เพื่ออัดอากาศหรือเพิ่มความดันของอากาศที่จะเข้าสู่ห้องเผาไหม้ให้สูงขึ้น หรือทำให้อัตราส่วนระหว่างมวลของอากาศกับเชื้อเพลิงพอดีกันจนสามารถทำให้เกิดการจุดระเบิดได้ แล้วเกิดขยายตัวอย่างเต็มที่และรุนแรง ซึ่งเมื่อมีการจุดระเบิดเกิดขึ้นชุดอัดอากาศที่มีลักษณะเป็นครีบทวนติดอยู่กับแกนเพลลาซึ่งเป็นเพลลาเดียวกันกับกังหันก๊าซก็จะหมุนไปพร้อมกัน จึงทำให้เครื่องอัดอากาศสามารถอัดอากาศได้เอง ซึ่งโดยทั่วไปเครื่องอัดอากาศที่นิยมใช้ในเครื่องยนต์กังหันก๊าซมี 2 แบบคือ เครื่องอัดอากาศแบบไหลตามแนวแกน (Axial flow compressor) และเครื่องอัดอากาศแบบไหลตามแนวรัศมี (Centrifugal Compressor)

3.1.1.2 ห้องเผาไหม้ (Combustor Chamber)

ห้องเผาไหม้ มีหน้าที่ดึงพลังงานจากเชื้อเพลิงให้ออกมาในรูปของพลังงานความร้อนในของไหลทำให้ของไหลมีทั้งอุณหภูมิและความดันสูงขึ้น แล้วส่งต่อไปยังกังหันก๊าซโดยทั่วๆ ไปมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบ คือ 1.แบบแคน (can type combustion chamber) มักใช้กับเครื่องยนต์ที่ใช้เครื่องอัดอากาศแบบแรงเหวี่ยง (Centrifugal compressor) 2.แบบแอนนูลาร์ (Annular type combustion chamber) เครื่องยนต์ที่ใช้เครื่องอัดอากาศแบบไหลตามแนวแกนบางแบบและ 3.ห้องเผาไหม้แบบแคน-แอนนูลาร์ (Can-annular combustion chamber)

3.1.1.3 กังหันก๊าซ (Turbine)

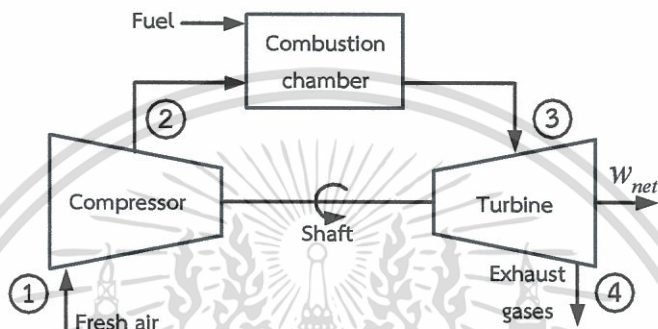
กังหันก๊าซ ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานที่เกิดจากการขยายตัวของก๊าซร้อนซึ่งถูกเผาไหม้ในห้องเผาไหม้แล้วพุ่งผ่านกังหันก๊าซ ด้วยความเร็วสูง ซึ่งจะเปลี่ยนพลังงานความร้อนและพลังงานจลน์อันเกิดจากการเคลื่อนที่ของก๊าซร้อนให้เป็นพลังงานกลในรูปของการหมุนเพลลา เครื่องอัดอากาศ และอุปกรณ์ส่วนที่ติดตั้งบนเพลลาเดียวกันกับกังหันก็ถูกขับให้หมุนไปด้วย เมื่องานที่ได้จากกังหันก๊าซมีปริมาณมากกว่างานที่ป้อนให้กับเครื่องอัดอากาศ จึงส่งผลให้เกิดงานผลประโยชน์ออกมาจากระบบซึ่งก๊าซไอเสียที่ไหลออกจากระบบของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ ถ้านำไปขับกังหันที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ก็จะสามารถผลิตไฟฟ้าออกมาใช้งานได้

3.1.2 หลักการทำงานของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

หลักการทำงานของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ เมื่อเครื่องอัดอากาศต่ออยู่บนเพลลาเดียวกับชุดกังหันก๊าซ และต่อตรงไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กล่าวคือ เมื่อเครื่องยนต์เริ่มทำงานด้วยวิธีการสตาร์ทในลักษณะต่าง ๆ เพลลาของเครื่องยนต์หมุนซึ่งทำให้ชุดอัดอากาศหมุน และดูดอากาศภายนอกเข้ามาเมื่ออากาศถูกอัดผ่านชุดอัดอากาศ อากาศจะมีความดัน อุณหภูมิ และความเร็วสูงขึ้น แล้วถูกส่งไปยังห้องเผาไหม้ เมื่ออากาศมีปริมาณ และความดันเพียงพอที่จะจุดระเบิดในห้องเผาไหม้ ในขณะเดียวกันนั้นเชื้อเพลิงจะถูกฉีดเข้ามาผสมกับอากาศ จากนั้นตัวจุดระเบิดก็จุดประกายไฟทำให้เกิดการเผาไหม้ขึ้น ก๊าซที่มีความดันสูงเกิดการเผาไหม้เป็นก๊าซร้อนจนมีอุณหภูมิสูงขึ้น แล้วขยายตัวอย่างรุนแรงพุ่งออกจากห้องเผาไหม้ ถูกส่งไปทางกังหันก๊าซซึ่งจะถูกบังคับให้เข้าปะทะกับปีกกังหันทำให้กังหันหมุน ซึ่งทำให้ชุดเครื่องอัดอากาศที่อยู่บนเพลลาเดียวกันถูกขับให้หมุนตาม เมื่อเครื่องยนต์เดินเครื่องสม่ำเสมอแล้วชุดอัดอากาศซึ่งอยู่บนเพลลาเดียวกับชุดกังหันก๊าซก็จะสามารถดูด และอัดอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง โดยไม่ต้องอาศัยชุดสตาร์ทอีกต่อไป แล้วเชื้อเพลิงจะถูกฉีดเข้าไปผสมกับอากาศที่ถูกอัดภายในห้องเผาไหม้ให้เกิดการเผาไหม้อยู่ตลอดเวลา

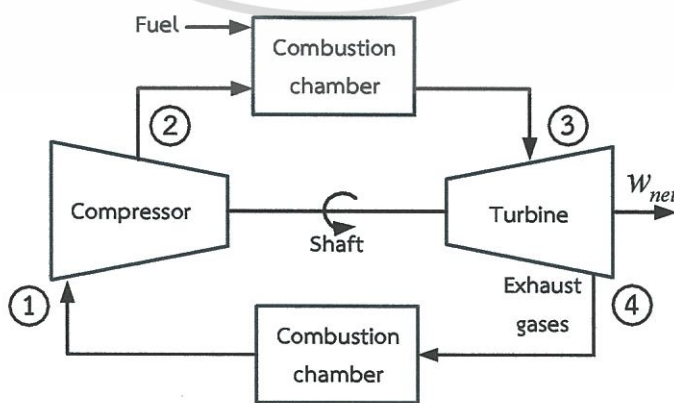
3.1.3 ทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์

วิศวกรเบรย์ตันเป็นวิศวกรทางอุณหพลศาสตร์ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซซึ่งถูกนำเสนอโดย Mr.George Broyton สำหรับใช้ในเครื่องยนต์ลูกสูบชัก ซึ่งใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงนั้นโดยพัฒนาขึ้นในราวปี ค.ศ.1800 ในปัจจุบันเป็นวัฏจักรที่ใช้สำหรับเครื่องยนต์กังหันก๊าซเท่านั้น โดยกระบวนการอัดและการขยายตัวถูกนำมาใส่ไว้ระหว่างเครื่องอัดอากาศ และกังหันก๊าซ เครื่องยนต์กังหันก๊าซปกติ แล้วมีวัฏจักรแบบเปิดดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วัฏจักรเครื่องยนต์กังหันก๊าซแบบเปิด

อากาศที่ความดันบรรยากาศถูกชักนำเข้าสู่เครื่องอัดอากาศทำให้มีอุณหภูมิและความดันสูงขึ้น แล้วไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ โดยในห้องเผาไหม้นั้นเชื้อเพลิงจะผสมกับอากาศแล้วเผาไหม้ที่ความดันคงที่ซึ่งผลที่เกิดขึ้นคือ ก๊าซร้อนที่มีอุณหภูมิ และปริมาตรจำเพาะสูงขึ้น จากนั้นก๊าซร้อนนี้ไหลผ่านเข้าสู่กังหันก๊าซ เมื่อขยายตัวในกังหันก๊าซแล้ว ก๊าซเหล่านั้นจะถูกปล่อยสู่บรรยากาศโดยมีอุณหภูมิต่ำกว่าความดันต่ำลงกว่าในห้องเผาไหม้ ดังนั้นจึงก่อให้เกิดกำลังงานขึ้นที่กังหันก๊าซ ก๊าซไอเสียที่ผลักดันกังหันก๊าซแล้วพุ่งออกจากเครื่องยนต์ไป (ไม่ไหลวนกลับ) ทำให้วัฏจักรนี้จึงถูกเรียกว่าวัฏจักรแบบเปิด ในขณะที่วัฏจักรปิดของเครื่องยนต์กังหันก๊าซมีลักษณะดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วัฏจักรเครื่องยนต์กังหันก๊าซแบบปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการวิเคราะห์วัฏจักรเบร์ย์ตันอุดมคตินั้นโดยทั่วไปมีข้อกำหนดดังนี้

1. กระบวนการอัด และกระบวนการขยายตัวเป็นกระบวนการแอดิยาบติก (Adiabatic) ที่ย้อนกลับได้ หรือเป็นกระบวนการไอเซ็นทรอปิก (Isentropic process)

2. ไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของสารตัวกลางระหว่างทางเข้า และทางออกของทุกๆ ส่วนของเครื่องยนต์ที่สารตัวกลาง หรือสารทำงานไหลผ่าน

3. ไม่มีการสูญเสียความดันที่ทางเข้า ภายในห้องเผาไหม้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน(ถ้ามี) อุปกรณ์ระบายความร้อน ช่องทางไอเสีย และช่องทางที่ใช้เชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ

4. สารตัวกลาง หรือสารทำงานในทุกๆ ตำแหน่งที่ไหลผ่านในวัฏจักรเป็นก๊าซอุดมคติซึ่งมีความร้อนจำเพาะคงที่

5. อัตราการไหลโดยมวลของก๊าซคงที่ตลอดวัฏจักร

6. การถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสมบูรณ์ให้ไหลสวนทางกัน

นั่นคือในเงื่อนไขข้อที่ 4 และ 5 เกิดขึ้นพร้อมกัน โดยอุณหภูมิทางด้านเย็นเพิ่มขึ้นมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ และเท่ากับอุณหภูมิทางด้านร้อนที่ลดลง

ก๊าซตามเงื่อนไขข้อ 4 และข้อ 5 นั้นเป็นก๊าซที่อยู่ในห้องเผาไหม้ ซึ่งเชื้อเพลิงถูกนำไปเผาไหม้ และเป็นการพิจารณาในลักษณะของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของสารตัวกลางหรือสารทำงานไม่ว่าจะเป็นการรับความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้โดยตรง หรือรับความร้อนจากแหล่งความร้อนภายนอก ดังนั้นการคำนวณสมรรถนะวัฏจักรทางอุดมคตินั้นจะไม่มี ความแตกต่างกันระหว่างวัฏจักรปิด และวัฏจักรเปิด

วัฏจักรเบร์ย์ตันอุดมคติที่กล่าวมาแล้วข้างต้นเกิดขึ้นโดยกระบวนการย้อนกลับได้ภายใน 4 กระบวนการคือ

1 – 2 เป็นกระบวนการอัดแบบไอเซ็นทรอปิก (Isentropic)

2 – 3 เป็นการรับความร้อนด้วยกระบวนการความดันคงที่

3 – 4 เป็นกระบวนการขยายตัวแบบไอเซ็นทรอปิก

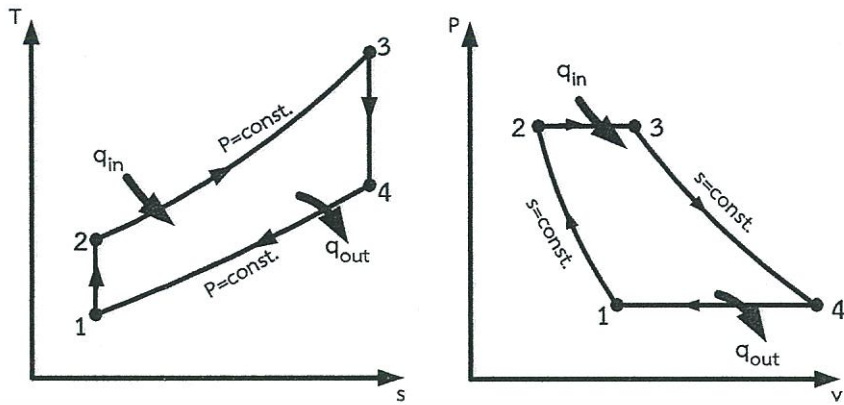
4 – 1 เป็นกระบวนการคายความร้อนด้วยกระบวนการความดันคงที่

แสดงได้ดังรูปที่ 3.3 (ก) และ 3.3 (ข)

จะเห็นได้ว่ากระบวนการทั้งหมด 4 กระบวนการของวัฏจักรเบร์ย์ตันนั้นดำเนินการอยู่ภายในเครื่องยนต์ที่ทำให้เกิดการไหลอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นการวิเคราะห์หรือการแก้ปัญหาต้องคำนึง กระบวนการไหลอย่างสม่ำเสมอภายในเครื่องยนต์นี้ด้วย ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสมการการไหลอย่างสม่ำเสมอของพลังงานดังสมการที่ (3.1)

$$Q = (h_2 - h_1) + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) + W \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) T-s diagram

(ข) P-v diagram

รูปที่ 3.3 แผนภูมิ T-s และ P-v ของวัฏจักรเบรย์ตันอุดมคติ

เมื่อ Q และ W เป็นพลังงานความร้อน และพลังงานที่ถ่ายเทต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของสารทำงานที่ไหลอยู่ในวัฏจักร และถ้าไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของสารทำงานตามเงื่อนไขข้อ 2 ตามข้อกำหนดของการวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์จะได้

$$W_{12} = -(h_2 - h_1) = -c_p(T_2 - T_1)$$

$$Q_{23} = (h_3 - h_2) = c_p(T_3 - T_2)$$

$$W_{34} = (h_3 - h_4) = c_p(T_3 - T_4)$$

ดังนั้นประสิทธิภาพทางความร้อนของวัฏจักรเบรย์ตันทางอุณหพลศาสตร์ภายใต้ข้อสมมุติฐานของวัฏจักรมาตรฐานอากาศได้ดังสมการที่ (3.2)

$$\eta = \frac{\text{งานสุทธิที่ได้จากวัฏจักร}}{\text{ปริมาณความร้อนที่ได้จากวัฏจักร}} = \frac{c_p(T_3 - T_4) - c_p(T_2 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} \quad (3.2)$$

ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิตามกระบวนการไอเซนทรอปิกดังสมการที่ (3.3)

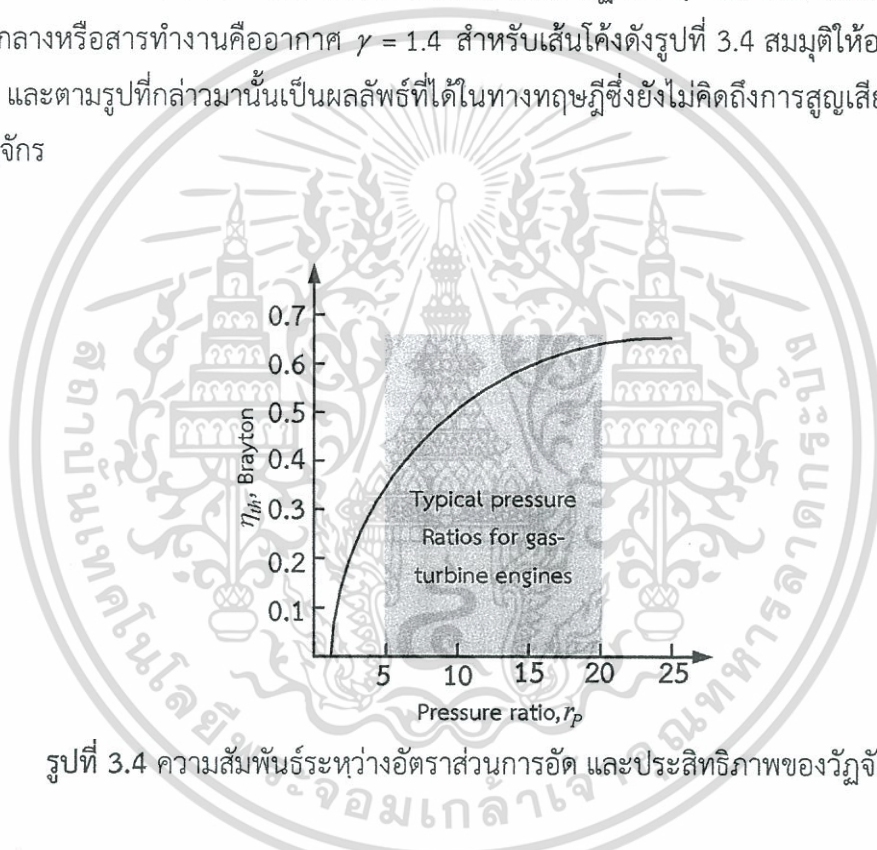
$$\frac{T_2}{T_1} = r^{(\gamma-1)} = \frac{T_3}{T_4} \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ r เป็นอัตราส่วนการอัด และอัตราส่วนการขยายตัวเพราะฉะนั้น $\frac{P_2}{P_1} = r = \frac{P_3}{P_4}$ ดังนั้น ประสิทธิภาพของวัฏจักรสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (3.4)

$$\eta = 1 - \left(\frac{1}{r}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} \quad (3.4)$$

จากสมการ (3.4) จะเห็นว่าประสิทธิภาพของวัฏจักรขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความดันเท่านั้น และจากรูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวัฏจักร η และอัตราส่วนการอัด r เมื่อสารตัวกลางหรือสารทำงานคืออากาศ $\gamma = 1.4$ สำหรับเส้นโค้งดังรูปที่ 3.4 สมมุติให้อากาศเป็นสารทำงาน และตามรูปที่กล่าวมานั้นเป็นผลลัพธ์ที่ได้ในทางทฤษฎีซึ่งยังไม่คิดถึงการสูญเสียในแต่ละส่วนของวัฏจักร



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการอัด และประสิทธิภาพของวัฏจักร

เมื่อ r เป็นอัตราส่วนการอัด และ γ คือ อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ ดังสมการ (3.4) ภายใต้สมมุติฐานทางมาตรฐานอากาศเย็น ประสิทธิภาพทางความร้อนของวัฏจักรเบรย์ตันทางอุดมคติขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ และอัตราส่วนความร้อน จำเพาะของของไหลทำงาน (ถ้าแตกต่างจากอากาศ) ประสิทธิภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้นร่วมกับตัว ประกอบทั้ง 2 นี้ ซึ่งเป็นกรณีสำหรับเครื่องยนต์กังหันก๊าซตามสภาพความเป็นจริง แผนภูมิแสดง ความสัมพันธ์ระหว่าง ประสิทธิภาพทางความร้อนที่ผันแปร กับอัตราส่วนการอัดที่กำหนดให้ดังรูปที่ 3.4

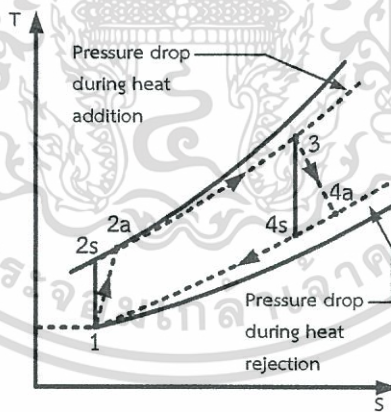
3.1.4 ความเป็ยงเบนของวัฏจักรเครื่องยนต์กังหันก๊าซจริงกับวัฏจักรทางอุดมคติ

วัฏจักรเครื่องยนต์กังหันก๊าซจริงต่างจากวัฏจักรเบรย์ตันทางอุดมคติอธิบายได้หลายสาเหตุ หนึ่งที่หนึ่งเกิดจากความดันตกจำนวนหนึ่ง ความร้อนที่รับเข้าและความร้อนที่ถ่ายเทออกจากกระบวนการเป็นสิ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้และมีความสำคัญมาก ทำให้งานที่เครื่องอัดต้องการจริงมากกว่า และงานที่ได้จากกังหันจริงจะน้อยกว่า เพราะว่าเป็นกระบวนการที่ย้อนกลับไม่ได้ พฤติกรรมการเป็ยงเบนเบนของการทำงานจริงๆ ในเครื่องอัดอากาศ และกังหันที่แปรเปลี่ยนไปจากกระบวนการไอเซนทรอปิกทางอุดมคติ พฤติกรรมนี้สามารถอธิบายได้อย่างถูกต้องโดยใช้ประโยชน์ในเรื่องประสิทธิภาพอเดียบติก (Adiabatic) ของกังหันและเครื่องอัดอากาศ

$$\eta_c = \frac{W_s}{W_a} \cong \frac{h_1 - h_{2s}}{h_1 - h_{2a}} \quad (3.5)$$

$$\eta_t = \frac{W_a}{W_s} \cong \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}} \quad (3.6)$$

สภาวะที่จุด 2a และ 4b คือสภาวะที่ทางออกจริงของเครื่องอัดและกังหันตามลำดับ ในขณะที่จุด 2s และ 4s คือที่สภาวะทางออกในอุดมคติของเครื่องอัดและกังหันตามลำดับ ดังรูปที่ 3.5



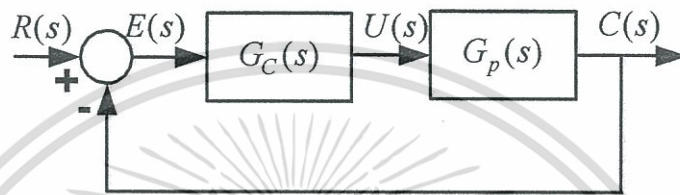
รูปที่ 3.5 ความเป็ยงเบนของวัฏจักรเครื่องยนต์กังหันก๊าซจริงจากวัฏจักรอุดมคติ

3.2 ทฤษฎีของตัวควบคุม

โครงสร้างระบบควบคุมที่เป็นพื้นฐานในการใช้งานนั้น นิยมพิจารณาระบบวงปิดในรูประบบควบคุมป้อนกลับหนึ่งหน่วยแสดงดังรูปที่ 3.6 ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการ $G_p(s)$ และตัวควบคุม (controller) หรือตัวชดเชย (compensator) $G_c(s)$ วัตถุประสงค์พื้นฐานในการออกแบบระบบควบคุมนั้น ได้แก่การออกแบบให้ระบบวงปิดมีเสถียรภาพ และมีสมรรถนะที่ดีเป็นไปตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อกำหนด โดยปกติแล้วกระบวนการที่พบและใช้อยู่ในชีวิตประจำวันนั้นมาสามารถปรับแต่งให้มีฟังก์ชันถ่ายโอน $G_p(s)$ เป็นไปตามต้องการได้ เนื่องจากฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการขึ้นกับโครงสร้างทางกายภาพของกระบวนการโดยตรง อาทิเช่น การใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง มักเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งผลิตสำเร็จจากโรงงานแล้ว และผู้ใช้งานจะไม่ไปแก้ไขให้กระทบกระเทือนโครงสร้างภายใน ดังนั้นสิ่งที่สามารถทำได้ เพื่อปรับให้ระบบควบคุมวงปิดมีสมรรถนะเป็นไปตามต้องการ คือการออกแบบตัวควบคุม $G_C(s)$ (หรือปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ในกรณีโครงสร้างของตัวควบคุมถูกเลือกไว้ก่อนหน้าแล้ว) ให้เหมาะสมกับระบบนั้นๆ

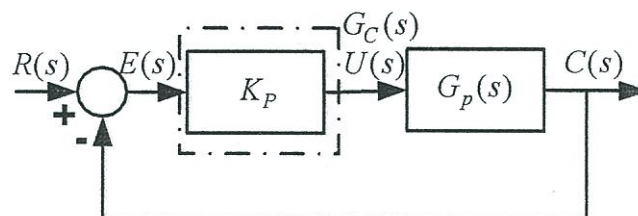


รูปที่ 3.6 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบป้อนกลับแบบลบบนึ่งหน่วย

ตัวควบคุมที่นำมาใช้ควบคุมเครื่องยนต์ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ตัวควบคุมแบบสัดส่วน หรือตัวควบคุมแบบพี (Proportional controller: P controller) ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับการอินทิเกรต หรือตัวควบคุมแบบพีไอ (Proportional plus Integral controller: PI controller) ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับการอินทิเกรตและการอนุพันธ์ หรือตัวควบคุมแบบพีไอดี (Proportional plus Integral plus Derivative controller: PID controller) และตัวควบคุมแบบอินทิเกรตลบด้วยตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับการอนุพันธ์ หรือตัวควบคุมแบบไอ-พีดี (Integral minus Proportional plus Derivative controller: I-PD controller)

3.2.1 ตัวควบคุมแบบพี

สัญญาณควบคุม $u(t)$ ของตัวควบคุมแบบพี แปรผันตรงหรือเป็นสัดส่วนกับค่าความผิดพลาด $e(t)$ โดยระบบควบคุมแบบพีมีลักษณะดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

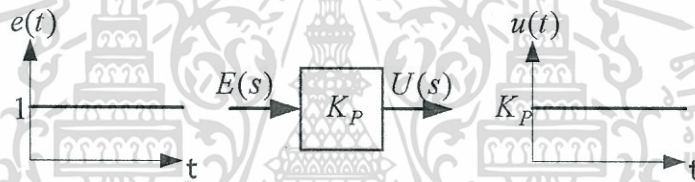
จะได้เอาต์พุตของตัวควบคุมเมื่อรับอินพุตเป็นความผิดพลาด $e(t)$ อธิบายดังสมการที่ (3.7)

$$u(t) = K_P e(t) \quad (3.7)$$

หรือฟังก์ชันถ่ายโอน $G_C(s)$ ในรูปที่ 3.7

$$G_C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P \quad (3.8)$$

เมื่อ K_P คือ เกนหรืออัตราขยายเชิงสัดส่วน (proportional gain) ซึ่งเป็นบวกและนิยมให้มีค่ามากกว่า 1 และบางครั้งอาจบอกค่าในรูป PB (proportional band) = $100 / K_P$ ดังนั้นการทำงานของตัวควบคุมแบบพีจึงเป็นไปในแนวเดียวกันกับการปรับค่าเกน (gain adjustment) โดยรูปที่ 3.8 แสดงผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย



รูปที่ 3.8 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย

การใช้ตัวควบคุมแบบพีนี้โดยมากไม่สามารถทำให้ระบบควบคุมมีผลตอบสนองเป็นไปตามข้อกำหนดได้โดยจากรูปที่ 3.7 จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดเป็น

$$T(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K_P G_P(s)}{1 + K_P G_P(s)} \quad (3.9)$$

เมื่อพิจารณากรณีกระบวนการฟังก์ชันถ่ายโอน $G_P(s)$ เป็นชนิด 0 โดย $\lim_{s \rightarrow 0} G_P(s) = K > 0$ และระบบวงปิด $T(s)$ มีเสถียรภาพแล้ว พบว่าระบบวงปิดจะมีค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัว e_{ss} ต่อสัญญาณอ้างอิงขั้นบันไดหนึ่งหน่วยเสมอ เนื่องจากระบบวงปิดมี ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น $G_C(s)G_P(s) = K_P G_P(s)$ ซึ่งจะยังคงเป็นชนิด 0 โดยสามารถคำนวณค่าคงที่ความผิดพลาดเชิงตำแหน่ง K_P ได้เป็น

$$K_P = \lim_{s \rightarrow 0} G_C(s)G_P(s) = K_P K < \infty$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นความผิดพลาดในสภาวะคงตัว e_{ss} มีค่าเท่ากับ

$$e_{ss} = \frac{1}{1+K_p} = \frac{1}{1+K_p K} > 0 \quad (3.10)$$

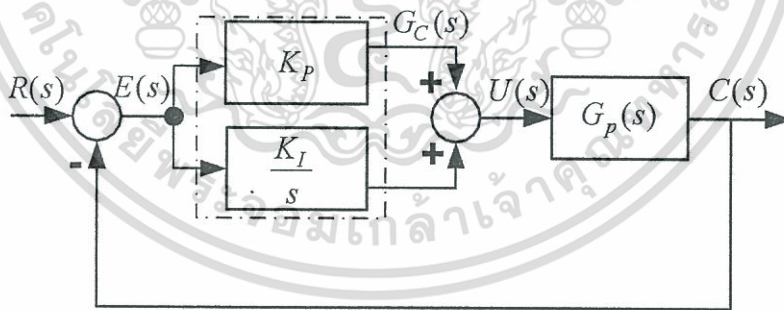
หรือจากสมการที่ (3.9) เห็นได้ว่าคุณค่าเกณฑ์ความถี่ศูนย์ของระบบวงปิดมีค่าเป็น $\frac{K_p K}{1+K_p K}$ นั่นคือเมื่อ

$r(t) = u(t)$ แล้ว $c(t)$ จะเข้าสู่ $\frac{K_p K}{1+K_p K}$ สอดคล้องกับค่า e_{ss} ในสมการที่ (3.10)

ดังนั้นจากค่า e_{ss} ในสมการที่ (3.10) สรุปได้ว่าหากปรับค่าเกณฑ์ K_p ให้มีค่ามากขึ้นแล้ว ความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวจะลดลง แต่อย่างไรก็ตามยังมีค่ามากกว่าศูนย์ นั่นคือการใช้ตัวควบคุมแบบพีสามารถลดค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวของระบบวงปิดได้ ถ้าในกรณีที่กระบวนการเป็นระบบอันดับหนึ่งมาตรฐานการปรับค่าเกณฑ์ K_p ให้มีค่ามีมากขึ้นส่งผลให้ผลตอบสนองมีความเร็วเพิ่มขึ้น ความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวลดลง และในกรณีที่กระบวนการเป็นระบบอันดับสองมาตรฐานการเพิ่มค่า K_p จะทำให้ผลตอบสนองวงปิดมีแนวโน้มที่จะเกิดค่าพุ่งเกินเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ช่วงเวลาขึ้นลดลง โดยมีช่วงเวลาเข้าที่ประมาณเท่าเดิม และมีความถี่การแกว่งสูงขึ้น

3.2.2 ตัวควบคุมแบบพีไอ

ตัวควบคุมแบบพีไอนั้น สัญญาณควบคุม $u(t)$ ของ แปรผันตรงหรือเป็นสัดส่วนกับค่าความผิดพลาด $e(t)$ และอินทิเกรตของค่าความผิดพลาด โดยระบบควบคุมแบบพีไอนี้มีลักษณะดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบพีไอ

จะได้เอาต์พุตของตัวควบคุมเมื่อรับอินพุตเป็นความผิดพลาด $e(t)$ อธิบายดังสมการที่ (3.11)

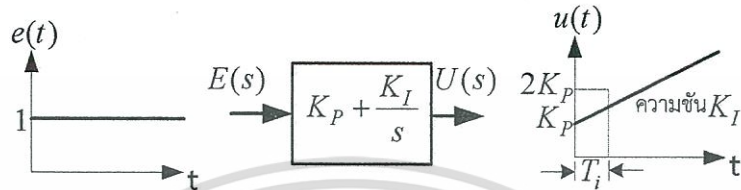
$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^1 e(t) dt = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^1 e(t) dt \right) \quad (3.11)$$

สอดคล้องกับฟังก์ชันถ่ายโอน $G_C(s)$ ในรูปที่ 3.9 เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P + \frac{K_I}{s} = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) \quad (3.12)$$

เมื่อ K_I คืออัตราขยายเชิงอินทิเกรต (integral gain) และ T_I คือค่าเวลาอินทิกรัล (integral time) โดยมีผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วยแสดงในรูปที่ 3.10

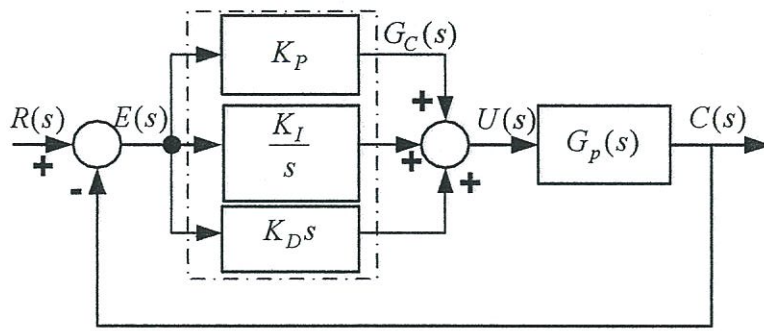


รูปที่ 3.10 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย

สังเกตได้ว่าตัวควบคุมแบบพีไอมีโพลหนึ่งตัวอยู่ที่จุดกำเนิด ($s = 0$) และซีโรที่ $s = 1/T_I$ โดยเฉพาะการที่มีโพลอยู่ที่จุดกำเนิด ทำให้เพิ่มชนิดของระบบวงเปิดขึ้นหนึ่งระดับ ซึ่งจะช่วยปรับปรุงสมรรถนะในสภาวะอยู่ตัว อาทิเช่น ถ้ากระบวนการ $G_p(s)$ เป็นระบบชนิด 0 และเลือกใช้ตัวควบคุมแบบพีไอแล้ว จะทำให้ความผิดพลาดที่สภาวะอยู่ตัวของผลตอบสนองวงปิดต่อสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันไดเป็นศูนย์ (หากระบบวงปิดมีเสถียรภาพ) อย่างไรก็ตามการใส่ตัวควบคุมที่มีคุณลักษณะแบบการอินทิเกรต เช่นตัวควบคุมแบบพีไอนี้จะเพิ่มมุมเฟส (phase lag) ในช่วงความถี่ต่ำ ซึ่งอาจจะทำให้ระบบที่ได้รับการชดเชยแล้วมีเสถียรภาพลดลงหรืออาจไม่มีเสถียรภาพได้ ดังนั้นการเลือกพารามิเตอร์ K_I และ T_I ต้องเลือกอย่างเหมาะสม เพื่อรับรองเสถียรภาพและผลตอบสนองชั่วคราวที่เหมาะสมของระบบวงปิด นอกจากนี้แล้วเห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบพีไอมีลักษณะเป็นวงจรความถี่ต่ำผ่าน (low-pass filter) จึงช่วยลดผลขององค์ประกอบความถี่สูง (high frequency component) ซึ่งมักเป็นผลจากสัญญาณรบกวนในระบบได้

3.2.3 ตัวควบคุมแบบพีไอดี

สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอนั้น สัญญาณควบคุม $u(t)$ แปรผันตรงหรือเป็นสัดส่วนกับค่าความผิดพลาด $e(t)$ รวมทั้งผลการอินทิเกรตและอนุพันธ์ของค่าความผิดพลาด โดยระบบควบคุมแบบพีไอดีมีลักษณะดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบพีไอดี

จะได้เอาต์พุตของตัวควบคุมเมื่อรับอินพุตเป็นความผิดพลาด $e(t)$ อธิบายดังสมการที่ (3.13)

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} = K_P \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3.13)$$

ซึ่งให้ฟังก์ชันถ่ายโอน $G_C(s)$ ในรูปที่ 3.11 เป็น

$$\begin{aligned} G_C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} &= K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s = K_P \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \\ &= \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{s} \end{aligned} \quad (3.14)$$

เมื่อ K_D คืออัตราขยายเชิงอนุพันธ์ (derivative gain) และ T_d คือค่าเวลาอนุพันธ์ (derivative time) โดยการควบคุมแบบพีไอดีจะเพิ่มจำนวนซีโรให้กับระบบเท่ากับ 2 ตัวและเพิ่มจำนวนโพล 1 ตัวและทำให้ชนิดของระบบเพิ่มขึ้น 1 ดังนั้นตัวควบคุมแบบพีไอดีจึงสามารถปรับปรุงผลตอบสนองชั่วคราวและผลตอบสนองในสภาวะอยู่ตัว แต่ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ K_P , T_i และ T_d ให้มีค่าเหมาะสม

ซึ่งตัวควบคุมทั้ง 3 ชนิดที่กล่าวมาข้างต้นเป็นระบบเวลาต่อเนื่อง แต่ในงานวิจัยนี้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการประมวลผลจึงจำเป็นต้องหาระบบควบคุมเวลาไม่ต่อเนื่อง ที่สอดคล้องกับตัวควบคุมแบบเวลาต่อเนื่องที่กล่าวมา เมื่อพิจารณาระบบเวลาไม่ต่อเนื่องที่มีคาบเวลาการสุ่ม (Sampling Period) T_S วินาที ได้สัญญาณควบคุมของตัวควบคุม ณ เวลา $t = nT_S$ ดังนี้

ตัวควบคุมแบบพี ดีดังสมการ (3.15)

$$U_P(nT_S) = K_P e(nT_S) \quad (3.15)$$

ตัวควบคุมแบบไอ (อาศัยการประมาณการอินทิเกรตเชิงตัวเลขด้วยวิธีสี่เหลี่ยมคางหมู)
 ดังสมการ (3.16)

$$U_I(nT_S) = U_I((n-1)T_S) + K_I \frac{T_S}{2} (e((n-1)T_S) + e(nT_S)) \quad (3.16)$$

ตัวควบคุมแบบดี (อาศัยการประมาณอนุพันธ์ด้วยวิธีผลต่างสองจุด) ดังสมการ (3.17)

$$U_D(nT_S) = K_D \left(\frac{e(nT_S) - e((n-1)T_S)}{T_S} \right) \quad (3.17)$$

ดังนั้นสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมแบบพีไอดี อธิบายได้ดังสมการที่ (3.18)

$$U_{PID}(nT_S) = U_P(nT_S) + U_I(nT_S) + U_D(nT_S) \quad (3.18)$$

เมื่อนำสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมแต่ละชนิดมาแปลงแซต (z -transform) ได้สัญญาณ
 ควบคุมของตัวควบคุมแต่ละชนิดดังนี้

ตัวควบคุมแบบพี ดังสมการที่ (3.19)

$$U_P(z) = K_P E(z) \quad (3.19)$$

ตัวควบคุมแบบไอ ดังสมการที่ (3.20)

$$U_I(z) = z^{-1} U_I(z) + K_I \frac{T_S}{2} (z^{-1} E(z) + E(z)) = K_I \frac{T_S}{2} \left(\frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} \right) E(z) \quad (3.20)$$

ตัวควบคุมแบบดี ดังสมการที่ (3.21)

$$U_D(z) = K_D \left(\frac{E(z) - z^{-1} E(z)}{T_S} \right) = K_D \left(\frac{1-z^{-1}}{T_S} \right) E(z) \quad (3.21)$$

ซึ่งจะได้สัญญาณควบคุมของตัวควบคุมแบบพีไอดีเวลาไม่ต่อเนื่องดังนี้สมการที่ (3.22)

$$U_{PID}(z) = \left[K_P + K_I \frac{T_S}{2} \left(\frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} \right) + K_D \left(\frac{1-z^{-1}}{T_S} \right) \right] E(z) \quad (3.22)$$

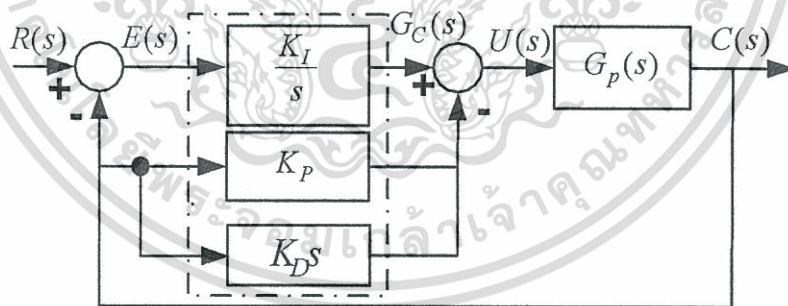
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.19), (3.20), (3.21) และ (3.22) จะนำสมการทั้งสี่สมการนำไปใช้เขียนโปรแกรมในไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับตัวควบคุมแบบพี ไอ และพีไอดี ตามลำดับ เพื่อควบคุมความเร็วรอบกึ่งหันของเครื่องยนต์กึ่งหันก๊าซขนาดเล็ก และควบคุมตำแหน่งเปิดปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง โดยการเลือกใช้คาบเวลาการสุ่ม T_s จะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมเพื่อทำให้ระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมซึ่งได้นำเสนอในงานวิจัยฉบับนี้มีเสถียรภาพ

3.2.4 ตัวควบคุมแบบไอ-พีดี

เมื่อสังเกตจากสมการที่ (3.8), (3.12) และ (3.14) ซึ่งเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบพี ไอ และพีไอดี ตามลำดับ จะพบว่าเมื่อป้อนสัญญาณอินพุตที่มีลักษณะเป็นขั้นบันไดหนึ่งหน่วย ขนาดของสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากตัวควบคุม หรือสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมทั้ง 3 ชนิดมีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมครั้งละมากๆ เกิดจากการทำงานแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์ซึ่งมีผลต่อการควบคุมความเร็วรอบกึ่งหัน คือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมครั้งละมากๆ วาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจะเปิดครั้งละมากๆ ซึ่งทำให้ผลตอบสนองของความเร็วรอบกึ่งหันมีค่าพุ่งเกินมาก และอาจทำให้กึ่งหันก๊าซเกิดการเสียหายเนื่องจากความร้อนที่สูงเกินไป ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอตัวควบคุมแบบไอ-พีดีซึ่งเป็นอีกหนึ่งตัวเลือกสำหรับตัวควบคุมความเร็วรอบกึ่งหันก๊าซ

ตัวควบคุมแบบไอ-พีดีจะมีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุม $u(t)$ ครั้งละไม่มาก เนื่องจากสัญญาณควบคุมแปรผันตรงกับการอินทิเกรตของค่าความผิดพลาด $e(t)$ ลบด้วยผลรวมระหว่างสัดส่วนและอนุพันธ์ของค่าป้อนกลับ $c(t)$ ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบไอ-พีดี

จะได้เอาต์พุตของตัวควบคุมเมื่อรับอินพุตเป็นความผิดพลาด และค่าป้อนกลับ ดังสมการที่ (3.23)

$$u(t) = K_I \int_0^1 e(t) dt - \left(K_P c(t) + K_D \frac{dc(t)}{dt} \right) = K_P \left(\frac{1}{T_i} \int_0^1 e(t) dt \right) - K_P \left(c(t) + T_d \frac{dc(t)}{dt} \right) \quad (3.23)$$

ซึ่งให้ฟังก์ชันถ่ายโอน $G_C(s)$ ในรูปที่ 3.12 เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_I}{s} E(s) - (K_P + K_D s) C(s) = K_P E(s) \left(\frac{1}{T_I s} \right) - K_P C(s) (1 + T_D s)$$

$$= \frac{K_I E(s) - (K_D s^2 + K_P s) C(s)}{s} \quad (3.24)$$

แต่ด้วยตัวควบคุมแบบโอ-พีดีที่ได้กล่าวมาข้างต้นเป็นระบบเวลาต่อเนื่อง ดังนั้นเพื่อให้สามารถนำไปเขียนโปรแกรมในไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ จึงจำเป็นต้องหาระบบควบคุมเวลาไม่ต่อเนื่อง ที่สอดคล้องกับตัวควบคุมโอ-พีดีแบบเวลาต่อเนื่อง ดังนี้

ตัวควบคุมแบบพี ดังสมการ (3.25)

$$U_P(nT_S) = K_P c(nT_S) \quad (3.25)$$

ตัวควบคุมแบบดี (อาศัยการประมาณอนุพันธ์ด้วยวิธีผลต่างสองจุด) ดังสมการ (3.26)

$$U_D(nT_S) = K_D \left(\frac{c(nT_S) - c((n-1)T_S)}{T_S} \right) \quad (3.26)$$

ตัวควบคุมแบบไอ (อาศัยการประมาณการอินทิเกรตด้วยวิธีสี่เหลี่ยมคางหมู) ดังสมการ (3.27)

$$U_I(nT_S) = U_I((n-1)T_S) + K_I \frac{T_S}{2} (e((n-1)T_S) + e(nT_S)) \quad (3.27)$$

ดังนั้นสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมแบบโอ-พีดี อธิบายได้ดังสมการที่ (3.28)

$$U_{I-PD}(nT) = U_I(nT) - (U_P(nT) + U_D(nT)) \quad (3.28)$$

เมื่อนำสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมแต่ละชนิดมาแปลงแซด (z-transform) ได้สัญญาณควบคุมของตัวควบคุมแต่ละชนิดดังนี้

ตัวควบคุมแบบพี ดังสมการที่ (3.29)

$$U_P(z) = K_P C(z) \quad (3.29)$$

ตัวควบคุมแบบดี ดังสมการที่ (3.30)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U_D(z) = K_D \left(\frac{C(z) - z^{-1}C(z)}{T_S} \right) = K_D \left(\frac{1 - z^{-1}}{T_S} \right) C(z) \quad (3.30)$$

ตัวควบคุมแบบโอ ดังสมการที่ (3.31)

$$U_I(z) = z^{-1}U_I(z) + K_I \frac{T_S}{2} (z^{-1}E(z) + E(z)) = K_I \frac{T_S}{2} \left(\frac{1 + z^{-1}}{1 - z^{-1}} \right) E(z) \quad (3.31)$$

ซึ่งจะได้สัญญาณควบคุมของตัวควบคุมแบบพีไอทีเวลาไม่ต่อเนื่องดังนี้สมการที่ (3.32) ตามลำดับ

$$U_{I-PD}(z) = \left[K_I E(z) \frac{T_S}{2} \left(\frac{1 + z^{-1}}{1 - z^{-1}} \right) - C(z) \left[K_P + K_D \left(\frac{1 - z^{-1}}{T_S} \right) \right] \right] \quad (3.32)$$

จากสมการที่ (3.32) จะสามารถนำไปเขียนโปรแกรมในไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับตัวควบคุมแบบโอ-พีดี เพื่อควบคุมความเร็วรอบกังหัน โดยการเลือกใช้คาบเวลาการสุ่ม T_S จะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมเพื่อทำให้ระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมซึ่งได้นำเสนอในงานวิจัยฉบับนี้มีเสถียรภาพ

3.3 การออกแบบตัวควบคุมด้วยเส้นทางราก

เส้นทางราก (Root Locus) เป็นวิธีการนำเสนอโพลของระบบวงปิด เมื่อปรับค่าอัตราขยายของระบบจาก $-\infty < K < \infty$ ในรูปแบบกราฟฟิก ดังนั้นการวาดทางเดินรากนั้นสามารถนำมาใช้เพื่อการวิเคราะห์ถึงความมีเสถียรภาพของระบบ และสามารถนำมาออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้ได้ผลตอบสนองชั่วคราว (transient response) ที่สมรรถนะที่ต้องการได้ และลดค่าความผิดพลาดที่สถานะคงตัว เนื่องจากระบบควบคุมแบบป้อนกลับนั้นยากในการทำความเข้าใจถึงคุณภาพของระบบ และต้องใช้คณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อนมาก ดังนั้นการแสดงเส้นทางเดินรากในรูปแบบกราฟฟิกช่วยอธิบายถึงสมรรถนะโดยคร่าวๆ ของระบบได้ และสามารถแสดงกราฟฟิกของความเสถียรของระบบ ทำให้เราสามารถทราบขอบเขตความเสถียร ขอบเขตที่ไม่เสถียร และเงื่อนไขที่เป็นสาเหตุให้ระบบอยู่สถานะภาพการแกว่งไม่หยุด (oscillation) ได้อย่างชัดเจน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้วาดเส้นทางเดินรากโดยอาศัยโปรแกรมแมตแล็บ (MATLAB) ซึ่งมีความสะดวก ถูกต้อง และอ่านค่าได้ง่ายกว่าการวาดด้วยตนเอง ส่วนการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางเดินรากเมื่อกำหนดคุณลักษณะของผลตอบสนองชั่วคราวหรือค่าพุ่งเกินสูงสุด (maximum overshoot : M_p) และคุณลักษณะของผลตอบสนองที่สถานะคงตัวหรือช่วงเวลาเข้าที่ (settling time: $t_s(\pm 2\%)$) มีขั้นตอนดังนี้

การออกแบบตัวควบคุมแบบพี

1. หาลักษณะเฉพาะของค่าโพลเด่นใหม่ที่สอดคล้องกับผลตอบสนองชั่วคราวที่ต้องการ จากการกำหนดค่าพุงเกินสูงสุด แล้วคำนวณหาอัตราการหน่วง (damping ratio : ζ) จากสมการ (3.33) เมื่อทราบ ζ ก็สามารถคำนวณหามุมของเส้นตรงที่มีโพลเด่นอยู่บนเส้นตรงนี้

$$\%M_p = 100 \times e^{\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (3.33)$$

2. หาดำแหน่งของโพลเด่นใหม่บนเส้นตรงที่หาได้จากข้อที่ 1 โดยลากเส้นจากตำแหน่งของโพลและซีโรเดิมมายังโพลเด่นใหม่ แล้วตรวจสอบมุมรวมว่าเป็นไปตามเงื่อนไขดังสมการที่ (3.34) หรือไม่

$$\sum \theta_z + \sum \theta_p = -180 \quad (3.34)$$

3. หาค่า K_p หรืออัตราขยายที่ทำให้เกิดโพลใหม่ จากระยะของซีโรและโพลเดิมทุกตัวลากเส้นไปที่โพลใหม่นี้ได้ดังสมการที่ (3.35)

$$K_p = \frac{\prod \text{pole length}}{\prod \text{zero length}} \quad (3.35)$$

การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ

1. หาลักษณะเฉพาะของค่าโพลเด่นใหม่ที่สอดคล้องกับผลตอบสนองชั่วคราวที่ต้องการ จากการกำหนดค่าพุงเกินสูงสุดและช่วงเวลาเข้าที่ แล้วคำนวณหาอัตราการหน่วงจากสมการ (3.33) และคำนวณหาค่า ω_n จากสมการที่ (3.36) ดังนั้นจะได้ข้อกำหนดของโพลเด่นใหม่ของระบบที่มีสมรรถนะที่ต้องการมีค่าเท่ากับ $-\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{1-\zeta^2}j$

$$t_s(\pm 2\%) = \frac{4}{\sigma} = \frac{4}{\zeta\omega_n} \quad (3.36)$$

2. หาค่า α เพื่อหาเส้นทางเดินรากที่ผ่านโพลเด่นใหม่ จากการพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบควบคุมดังสมการที่ (3.37) โดยการลากเส้นจากตำแหน่งของโพลและซีโรเดิมมายังโพลเด่นใหม่ที่หาได้จากข้อที่ 1 แล้วใช้สมการเงื่อนไขของมุมรวมดังสมการที่ (3.34) เพื่อหาค่ามุมของซีโร ϕ เมื่อทราบค่า ϕ ก็สามารถหาค่าของ α ได้จากสมการที่ (3.38)

$$G_c(s)G_p(s) = K_p \left(\frac{s + \alpha}{s} \right) G_p(s) \quad (3.37)$$

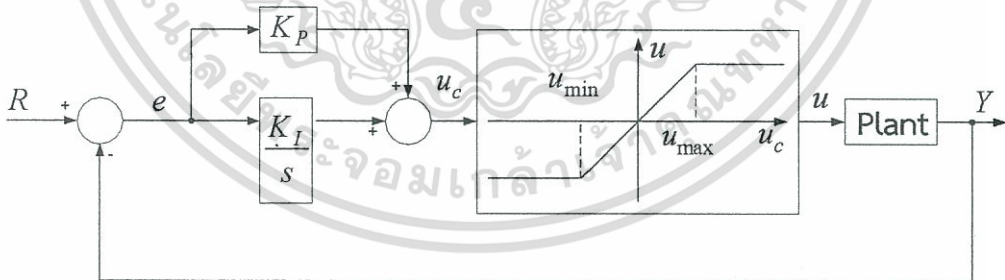
$$\alpha = -\zeta\omega_n + \left(\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \right) / \tan(\varphi^o) \quad (3.38)$$

3. หาค่า K_p บนเส้นทางเดินรากล ณ ตำแหน่งใหม่โพลเด่นต้องการ ซึ่งหาได้จากสมการเงื่อนไขของขนาดดังสมการที่ (3.35) ดังนั้นเมื่อแทนค่า K_p และ α ลงในสมการของ G_c ก็สามารถคำนวณหาค่า K_I ได้โดย $K_I = K_p \alpha$

3.4 อินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัฟ

ในระบบควบคุม เอาต์พุตของอุปกรณ์ขับอาจเกิดการอิมิตัวเนื่องจากย่านการใช้งานจริงมีขอบเขตจำกัด เช่น วาล์วเกิดการอิมิตัวเมื่อถูกเปิดหรือปิดอย่างเต็มที่ เครื่องขยายเสียงไฟฟ้าจะให้เอาต์พุตได้เพียงในขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าที่อุปกรณ์สามารถจ่ายได้

เมื่อใดก็ตามที่เกิดการอิมิตัวขึ้น สัญญาณควบคุมต่อระบบจะหยุดการเปลี่ยนแปลง แต่เมื่อสัญญาณความคลาดเคลื่อน ยังคงถูกป้อนเป็นอินพุตของอินทิเกรเตอร์อย่างต่อเนื่องแล้ว เอาต์พุตของอินทิเกรเตอร์จะมีขนาดโตขึ้น (เกิดการไวน์อัฟ) เรื่อยๆ จนกระทั่งเครื่องหมายของสัญญาณความคลาดเคลื่อนเปลี่ยนแปลงจึงจะเกิดการอินทิเกรตกลับทิศ ผลลัพธ์ทำให้ผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกินสูงเพื่อให้สัญญาณความคลาดเคลื่อนมีค่าเพียงพอจะหักล้างเอาต์พุตของอินทิเกรเตอร์ที่มีขนาดโตขึ้น ทำให้มีผลตอบสนองชั่วขณะที่ไร้ประสิทธิภาพ



รูปที่ 3.13 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมป้อนกลับที่พิจารณาการอิมิตัว

เมื่อพิจารณาระบบการป้อนกลับในรูปที่ 3.13 หากป้อนสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันไดที่มีปริมาณมากเกินไปจนทำให้อุปกรณ์ขับอิมิตัวที่ u_{\max} อินทิเกรเตอร์จะยังดำเนินการอินทิเกรตสัญญาณความคลาดเคลื่อน e ทำให้สัญญาณ u_c เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อย่างไรก็ตามอินพุต u ที่ให้แก่พลานต์ของระบบจะหยุดที่ค่าสูงสุดที่สามารถจ่ายได้ กล่าวคือ $u = u_{\max}$ โดยที่สัญญาณความคลาดเคลื่อนจะยังคงมีเครื่องหมายเดิมจนกระทั่งเอาต์พุตของระบบมีค่าเกินสัญญาณอ้างอิงทำให้

สัญญาณความคลาดเคลื่อนเกิดการกลับเครื่องหมาย แต่การเพิ่มขึ้นของ u_c ในสภาวะดังกล่าวนี้จะไม่
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

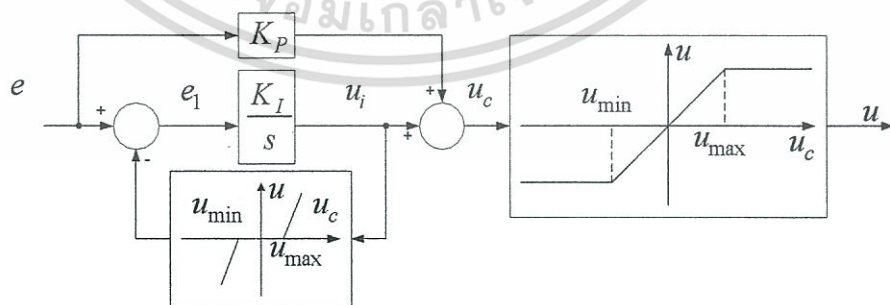
มีประโยชน์ต่อระบบเพราะค่าอินพุตของระบบไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ($u = u_{\max}$) แต่ u_c อาจมีขนาดใหญ่ขึ้นมากถ้าการอิมิตัวยังคงดำเนินอยู่เป็นเวลานาน ดังนั้นจะต้องมีสัญญาณความคลาดเคลื่อน e เป็นลบค่อนข้างมาก เพื่อนำเอาต์พุตของอินทิเกรเตอร์กลับมาภายในช่วงที่เป็นเชิงเส้นที่ซึ่งสัญญาณควบคุมนั้นไม่อิมิตัว ทำให้ได้ผลตอบสนองชั่วคราวที่ไร้ประสิทธิภาพ

วิธีการแก้ปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นคือการใช้วงจรมินิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัฟ (Integrator antiwindup) ซึ่งจะมีผลทำให้ระบบหยุดการอินทิเกรตเมื่อเกิดการอิมิตัว วิธีนี้สามารถทำได้ด้วยลอจิกอย่างง่าย ถ้าตัวควบคุมมีรูปแบบเป็นดิจิตอล โดยเขียนเป็นเงื่อนไข

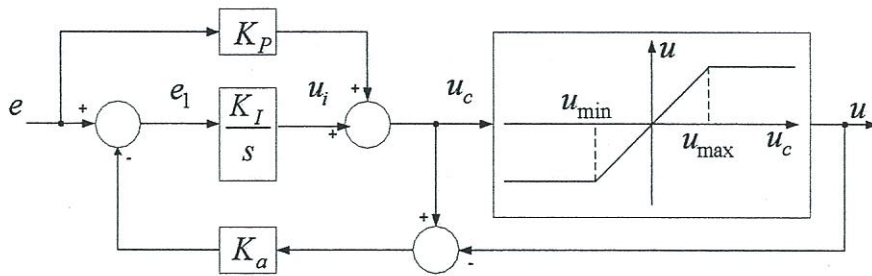
$$\text{ถ้า } |u| = u_{\max} \text{ แล้ว } K_I = 0 \quad (3.39)$$

แนวคิดแอนไทไวน์อัฟสองแบบซึ่งให้ผลตอบสนองเหมือนกันสำหรับตัวควบคุมแบบพีไอ แสดงดังรูปที่ 3.14 (ก) และ 3.14 (ข) โดยแนวคิดในรูปที่ 3.14 (ก) นั้นค่อนข้างเข้าใจง่าย แต่ในทางตรงกันข้ามแนวคิดในรูปที่ 3.14 (ข) จะง่ายต่อการนำมาใช้ ซึ่งในแนวคิดทั้งสองนี้ทันทีที่อุปกรณ์ขับเคลื่อนเกิดการอิมิตัว ลูปการป้อนกลับของอินทิเกรเตอร์จะเริ่มทำงานเพื่อรักษาค่าอินพุต e_i ของอินทิเกรเตอร์ให้มีค่าน้อย ในระหว่างช่วงนี้อินทิเกรเตอร์จะกลายเป็นระบบอันดับหนึ่งที่ตอบสนองเร็ว และเพื่อให้เห็นภาพที่ชัดเจนขึ้นเราสามารถวาดส่วนของบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.14 (ก) ใหม่จาก e ถึง u_c ให้เป็นรูปที่ 3.14 (ค) ส่วนของอินทิเกรเตอร์จะกลายเป็นระบบอันดับหนึ่งถ้าหลังดังแสดงในรูปที่ 3.14 (ง) ซึ่งค่าเกน K_a ของแอนไทไวน์อัฟควรจะถูกเลือกให้มีค่ามากพอเพื่อให้วงจรรักษาอินพุตของอินทิเกรเตอร์ให้มีค่าน้อยภายใต้ทุกเงื่อนไขของความคลาดเคลื่อน

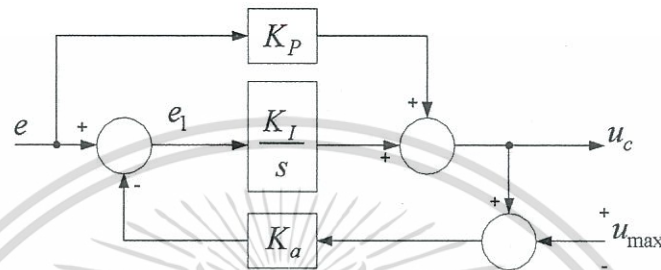
ผลจากการใช้แอนไทไวน์อัฟอินทิเกรเตอร์ที่ได้จะช่วยลดทั้งค่าพุงเกินและระดับพลังงานของสัญญาณควบคุมในระบบการป้อนกลับ แนวคิดของแอนไทไวน์อัฟจึงจำเป็นในระบบควบคุมที่ใช้งานจริงซึ่งมีการอินทิเกรต



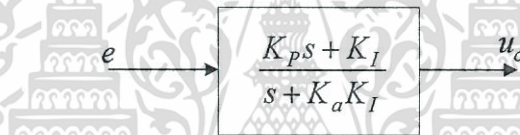
(ก) ตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัฟ



(ข) การใช้แอนไทไวน์ออฟซึ่งอาศัยความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นเพียงความสัมพันธ์เดียว



(ค) เมื่อเกิดการอิมพัลส์



(ง) ระบบอันดับหนึ่งล้าหลังเมื่อเกิดการอิมพัลส์

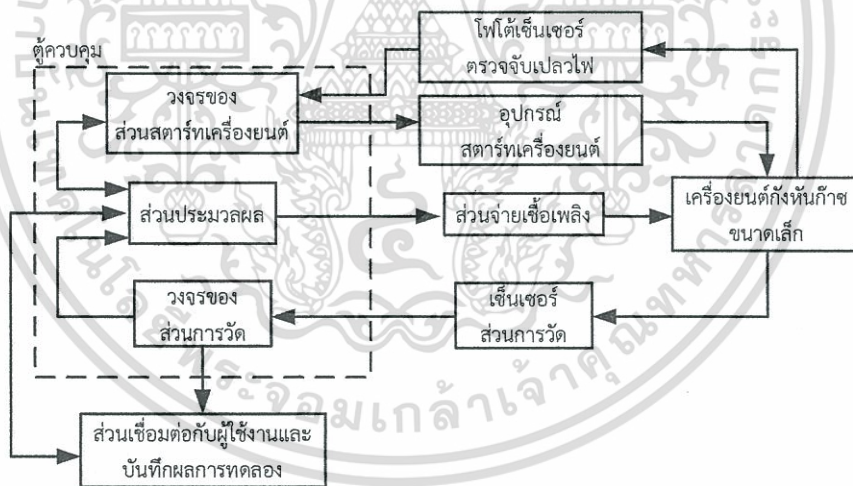
รูปที่ 3.14 เทคนิคอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์ออฟกับตัวควบคุมแบบพีไอ

โครงสร้างและการออกแบบระบบควบคุม

ในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างและการออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซซึ่งแบ่งออกเป็นสองส่วนได้แก่ ส่วนแรกกล่าวถึงโครงสร้างระบบควบคุมของเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กที่พัฒนาขึ้นในห้องปฏิบัติการ โดยอธิบายถึงส่วนประกอบต่าง ๆ ของโครงสร้างระบบควบคุม การติดตั้งหน้าที่และความสำคัญในแต่ละส่วน และส่วนที่สองเป็นการออกแบบระบบควบคุม และตัวควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซให้เป็นแบบอัตโนมัติ

4.1 โครงสร้างระบบควบคุม

โครงสร้างระบบควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซของเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้มีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังนี้ เครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก ส่วนการจ่ายเชื้อเพลิง ส่วนการประมวลผล ส่วนการสตาร์ทเครื่องยนต์ ส่วนการวัด ส่วนเชื่อมต่อผู้ใช้งานและบันทึกผลการทดลอง และส่วนสุดท้ายคือตัวควบคุม ซึ่งเมื่อนำมาประกอบเข้าด้วยกันจะมีบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 4.1

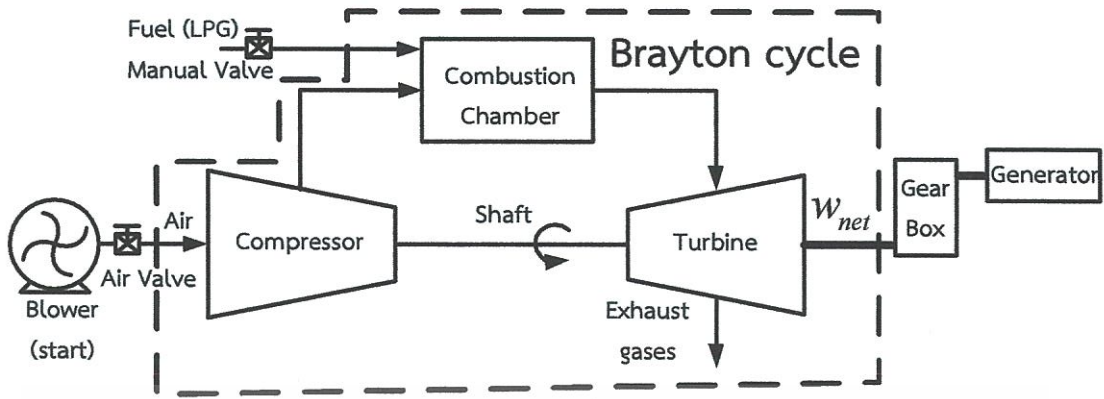


รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมโครงสร้างระบบควบคุมเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก

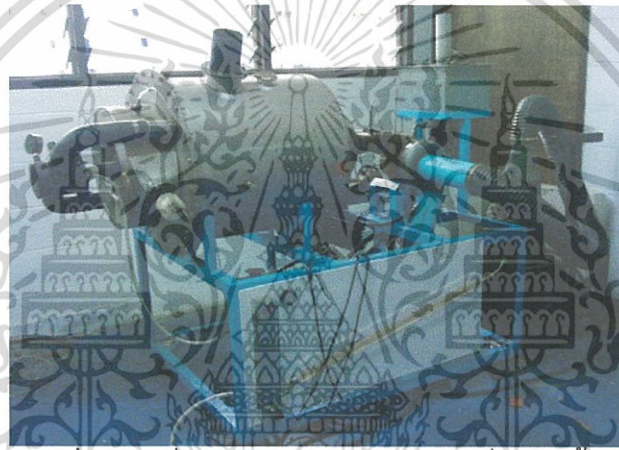
4.1.1 เครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก

โครงสร้างของเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กที่ได้พัฒนาขึ้นในห้องปฏิบัติการมีส่วนประกอบหลัก 4 ส่วน ได้แก่ เครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กที่มีลักษณะเป็นวัฏจักรเบรย์ตันแบบเปิด เครื่องดูดอากาศ (blower) กล่องเกียร์ (gearbox) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (generator) ซึ่งโครงสร้างเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กแสดงดังรูปที่ 4.2 และเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 โครงสร้างเครื่องยนต์กังหันขนาดเล็ก



รูปที่ 4.3 เครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กที่พัฒนาขึ้น

เครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กที่พัฒนาขึ้นในเบื้องต้นนี้สามารถควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซได้โดยอาศัยผู้ควบคุมในการเปิด-ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แอลพีจี อย่างไรก็ตาม เครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กนี้ยังไม่มีอุปกรณ์วัดจึงไม่สามารถแสดงค่าและบันทึกผลการทดลองของ อุณหภูมิ ความดัน และอัตราการไหลได้ นอกจากนี้ผู้ควบคุมที่สามารถควบคุมเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กนี้ได้ต้องมีความชำนาญ และความคุ้นเคยกับเครื่องนี้เป็นอย่างดีโดยเฉพาะการสตาร์ท และการดับเครื่องยนต์ สำหรับเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กที่พัฒนาขึ้นนี้มีลำดับขั้นตอนการสตาร์ท และดับเครื่องยนต์ดังนี้

1. เปิดเครื่องดูดอากาศค้างไว้ 5 วินาที แล้วปิดเครื่องดูดอากาศ
2. เปิดเครื่องจุดระเบิด จนเกิดประกายไฟขึ้นในห้องเผาไหม้
3. เปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง ที่อัตราการไหล 10 SCFH
4. หลังจากปล่อยเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้แล้ว ผู้ควบคุมจะต้องสังเกตว่าเกิดเปลวไฟขึ้นในห้องเผาไหม้หรือไม่ ถ้าเกิดเปลวไฟขึ้นในห้องเผาไหม้ให้ปิดเครื่องจุดระเบิด แล้วดำเนินการต่อในข้อ 5.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับผู้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางธุรกิจ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศ เพื่อให้อากาศถ่ายเทเชื้อเพลิงที่ค้างอยู่ในห้องเผาไหม้ออกไป เมื่อแน่ใจว่าไม่มีเชื้อเพลิงหลงเหลืออยู่ในห้องเผาไหม้แล้ว ให้ดำเนินการตามข้อ 1. ถึง 4. อีกครั้ง

5. เปิดเครื่องดูดอากาศ ในขณะเดียวกันให้ปรับอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเป็น 40 SCFH แล้วให้ผู้ควบคุมสังเกตว่ายังมีเปลวไฟอยู่ในห้องเผาไหม้หรือไม่ ถ้ามีอยู่ให้ดำเนินการตามข้อ 6. แต่ถ้าไม่มีให้ดำเนินการเช่นเดียวกับข้อ 4.

6. จากนั้นให้ผู้ควบคุมปรับเพิ่มอัตราการไหลเชื้อเพลิง ให้ความเร็วรอบของกังหันมีความเร็วอยู่ที่ 20000 รอบต่อนาทีหรือมากกว่า และรองนกว่าเครื่องยนต์สามารถเดินเครื่องได้อย่างสม่ำเสมอ

7. ปิดวาล์วทางเข้าของอากาศที่มาจากทางเครื่องดูดอากาศ และปิดเครื่องดูดอากาศ โดยหลังจากนั้นความเร็วรอบกังหันก๊าซจะมีการเปลี่ยนแปลง ผู้ควบคุมต้องปรับอัตราการไหลเชื้อเพลิงให้ได้ความเร็วรอบกังหันก๊าซมีความเร็วรอบพอที่จะทำให้เครื่องอัดอากาศดูดอากาศเข้ามายังห้องเผาไหม้ได้เพียงพอและไม่ควรปล่อยให้ความเร็วรอบกังหันสูงเกินไป

8. ส่วนการดับเครื่องยนต์ ผู้ควบคุมต้องปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงลงอย่างช้า เพื่อไม่ให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันเพื่อป้องกันความเสียหายต่อโครงสร้างของเครื่องยนต์ โดยเมื่อปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจนเปลวไฟดับลง ผู้ควบคุมต้องเปิดวาล์วทางเข้าของอากาศ และเปิดเครื่องดูดอากาศ เพื่อระบายความร้อนให้แก่เครื่องยนต์

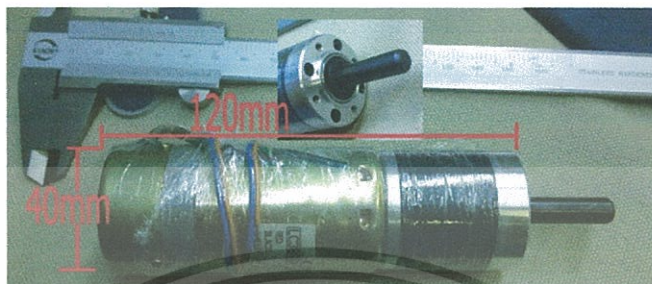
จากขั้นตอนการสตาร์ทและดับเครื่องยนต์เห็นว่าขั้นตอนมีต่อเนื่องกันอย่างทันทีจึงต้องอาศัยผู้ควบคุมมากกว่า 1 คนเพื่อให้ทำงานได้ทันทั่วทั้งที่ นอกจากปัญหาในการสตาร์ทเครื่องยนต์แล้ว อีกหนึ่งปัญหาคือเมื่อปล่อยให้เครื่องยนต์ทำงานเป็นระยะเวลาานพบว่า อุณหภูมิในถังเชื้อเพลิงลดลง และความดันก็ลดลงตามไปด้วย เป็นสาเหตุให้อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงซึ่งมีผลโดยตรงต่อการเผาไหม้ และความเร็วรอบกังหันก๊าซ ดังนั้นต้องมีผู้ควบคุมคอยสังเกตและปรับอัตราการไหลของเชื้อเพลิงอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้เครื่องยนต์สามารถรักษาความเร็วรอบกังหันก๊าซได้คงที่

4.1.2 ส่วนการจ่ายเชื้อเพลิง

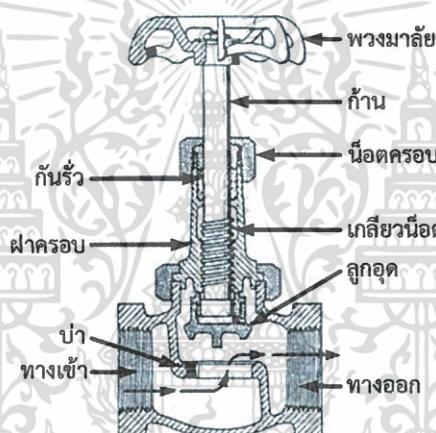
ส่วนการจ่ายเชื้อเพลิง หรือส่วนควบคุมวาล์วเพื่อปรับเปลี่ยนอัตราการไหลเชื้อเพลิง ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาคอนโทรลวาล์วโดยอาศัยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงประกอบเข้ากับวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ มอเตอร์กระแสตรงของบริษัท Yaskawa พิกัด 24 โวลต์ มีความเร็วรอบสูงสุด 150 รอบต่อนาที แรงบิดสูงสุด 20 kg.cm ชุดเกียร์มีอัตราทด 1 ต่อ 27 รอบและมีเอ็นโคเดเตอร์ 2 เฟส ประกอบด้วยเฟส A กับเฟส B เพื่อเป็นค่าป้อนกลับของทิศทาง และตำแหน่งเปิด-ปิดวาล์วให้กับส่วนการประมวลผลโดยเอ็นโค้ดเตอร์มีความละเอียด 5400 พัลส์ต่อรอบ ดังรูปที่ 4.4

ในส่วนของวาล์วเนื่องจากการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเชื้อเพลิงบ่อย ๆ จึงได้เลือกใช้ชนิดดีลวาล์ว (Needle valve) โดยวาล์วประเภทนี้ประกอบด้วยลิ้นเปิด-ปิดมีลักษณะเป็นจานหรือลูกออดเคลื่อนที่ขึ้นลง ก้านมีลักษณะตั้งฉากกับรองลิ้น ซึ่งรองลิ้นมีลักษณะเป็นแหวน ส่วนทิศทางการไหลเข้าและออกอาจทำมุม 90 องศา หรือมุมขนาด

อื่น ๆ กับช่องลึนดังรูปที่ 4.5 โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกนิตเต็ลวาล์วที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของช่อง การไหลเข้า และออก 6 มิลลิเมตร มีจำนวนรอบการหมุน 6.5 รอบ เพื่อเปิดวาล์วจากระดับปิดสนิท ไปในระดับเปิดกว้างสุด ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.4 มอเตอร์กระแสตรงของบริษัท Yaskawa พิกัด 24 โวลต์



รูปที่ 4.5 องค์ประกอบนิตเต็ลวาล์ว

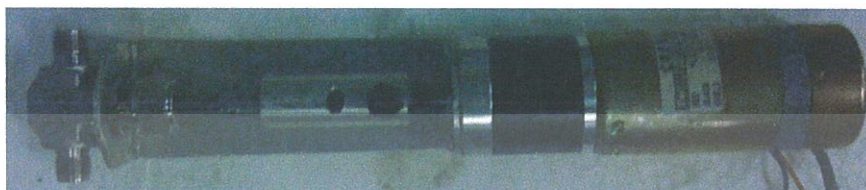


รูปที่ 4.6 นิตเต็ลวาล์วที่นำมาใช้ในงานวิจัย

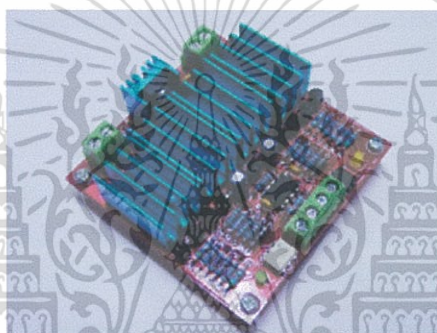
เพื่อที่จะนำมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และนิตเต็ลวาล์วมาประกอบเข้าด้วยกัน ผู้วิจัยได้สร้าง คัปปลิ่งขึ้นในห้องปฏิบัติการ เพื่อใช้เป็นเพลาคู่เชื่อมต่อการทำงานระหว่างมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเป็นเจ้าของเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นเอกสารฉบับนี้แล้ว กรุณา
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับนี้ดเดิ้ลวาล์ว โดยอาศัยหลักการทำงานเช่นเดียวกับเพลาถยนต์ เมื่อนำมอเตอร์ฟ้ากระแสตรง นีดเดิ้ลวาล์ว และคัปปลิงมาประกอบเข้าด้วยกันมีลักษณะดังรูปที่ 4.7 ส่วนด้านการควบคุมชุดวาล์ว จ่ายเชื้อเพลิงให้สามารถเปิด-ปิดในระดับที่ต้องการ จะควบคุมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ พร้อมวงจร ขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำเร็จรูปแบบ H-bridge quad power MOSFET [15] ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 ชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง



รูปที่ 4.8 แผงวงจรขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ [15]

4.1.3 ส่วนการประมวลผล

ส่วนการประมวลผลมีหน้าที่ควบคุมความเร็วรอบกัมมัน และควบคุมตำแหน่งการเปิด-ปิดของ ชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง โดยการควบคุมทั้งสองการควบคุมในงานวิจัยนี้ได้มีการออกแบบตัว ควบคุม ซึ่งการออกแบบตัวควบคุมจะกล่าวในหัวข้อที่ 4.2.1 นอกจากการควบคุมความเร็วรอบกัมมัน กับตำแหน่งเปิด-ปิดวาล์วแล้ว ส่วนประมวลผลยังควบคุมขั้นตอนในการสตาร์ทเครื่องยนต์ด้วย โดย การทำงานของส่วนประมวลผลคือ เมื่อส่วนประมวลผลรับคำสั่งจากผู้ควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ และรับ คำวัดจากอุปกรณ์วัดต่าง ๆ ส่วนการประมวลผลจะนำคำสั่งและค่าวัดที่ได้รับมาประมวลผลร่วมกัน ซึ่ง เมื่อประมวลผลเสร็จ ส่วนการประมวลผลก็จะส่งเอาต์พุตออกมายังอุปกรณ์ภายนอกที่เชื่อมต่ออยู่ และส่งข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลและค่าวัดที่ได้จากระบบกลับไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผลและ บันทึกข้อมูลต่อไป โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์มาเป็นส่วนการประมวลผล เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นไมโครโปรเซสเซอร์แบบเดียวกับหน่วยประมวลผลกลาง (CPU: Central Processing Unit) ที่ใช้ในคอมพิวเตอร์ แต่ได้รับการพัฒนาแยกเพื่อนำไปใช้ในวงจรด้านงาน ควบคุม โดยไม่ต้องต่อวงจรภายนอกเพิ่มเติมเช่นเดียวกับไมโครโปรเซสเซอร์ แต่รวมวงจรที่จำเป็น เช่น หน่วยความจำ ส่วนอินพุต เอาต์พุต บางส่วนเข้าไปในตัวไอซี และเพิ่มวงจรบางอย่างเข้าไป เพื่อให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานควบคุม เช่น วงจรตั้งเวลา วงจรการสื่อสารอนุกรม วงจรแปลง

สัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล เป็นต้น และไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง โดยนำไปสร้างระบบฝังตัวเพื่อใช้ควบคุมการทำงานบางอย่างในอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น รถยนต์ เตอบ เครื่องปรับอากาศ เป็นต้น เพราะไมโครคอนโทรลเลอร์มีข้อดีเหมาะสมกับการใช้งานควบคุมหลายประการ เช่น

- ชิพไอซีและระบบที่ได้มีขนาดเล็ก
- ระบบควบคุมที่ได้มีราคาถูกกว่าการใช้ชิพไมโครโปรเซสเซอร์
- วงจรที่ได้จะมีความซับซ้อนน้อย ช่วยลดข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้ในการต่อวงจร
- มีคุณสมบัติเพิ่มเติมสำหรับงานควบคุมโดยเฉพาะซึ่งใช้งานได้ง่าย
- ช่วยลดระยะเวลาในการพัฒนาระบบได้

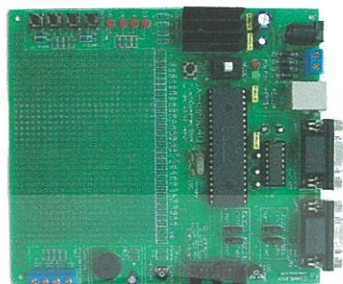
ไมโครคอนโทรลเลอร์มีหลายตระกูลและหลายรุ่นด้วยกัน แต่ละรุ่นมีโครงสร้างภายในและความสามารถในการทำงานที่แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น dsPIC30F4011 ซึ่งมีความสามารถตามที่กล่าวถึง และสามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมได้จาก [10]

- มี 84 คำสั่งภาษาแอสเซมบลีมาตรฐาน รองรับรูปแบบการอัสแอดเตรสได้อย่างอิสระ
- ความเร็วในการทำงานสูงถึง 30 ล้านคำสั่งต่อวินาที
- ชุดคำสั่งมีขนาด 24 บิต สามารถประมวลผลข้อมูลได้ 16 บิต
- มีหน่วยความจำข้อมูลอีพรอมที่ลบและเขียนใหม่ได้ไม่น้อยกว่า 1,000,000 ครั้ง
- มีอินเตอร์รัปต์เวกเตอร์จำนวนมาก จึงรองรับการตอบสนองสัญญาณอินเตอร์รัปต์ได้ดี
- มีวงจรตรวจจับแรงดันไฟเลี้ยงต่ำกว่ากำหนดแบบโปรแกรมได้
- มีวงจรตรวจสอบการทำงานของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณนาฬิกา
- ทำการคูณเลข 16 บิตได้ภายในสัญญาณนาฬิกาเพียง 1 ไซเคิล
- มีวงจรแฟลชข้อมูล จึงทำให้สามารถประมวลผลข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว
- สามารถจ่ายกระแสออกทางขาพอร์ตได้ 25 mA ทั้งแบบกระแสซิงก์และซอร์ส
- มีโมดูลตรวจจับและเปรียบเทียบสัญญาณดิจิทัล
- มีวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล 10 บิต 9 ช่อง อินพุต
- มีโมดูลสร้างสัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชัน (PWM) สำหรับควบคุมมอเตอร์ 6 ช่อง เอาต์พุต
- มีโมดูลเชื่อมต่อตัวเข้ารหัสแบบควอดราเจอร์
- มีโมดูลเชื่อมต่อ UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) สำหรับรับส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัส (asynchronous)

จากคุณสมบัติข้างต้น ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น dsPIC30F4011 จึงมีความเหมาะสมและเพียงพอต่อการนำมาใช้เป็นส่วนการประมวลผล และเพื่อความสะดวกต่อการนำมาใช้งานในงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

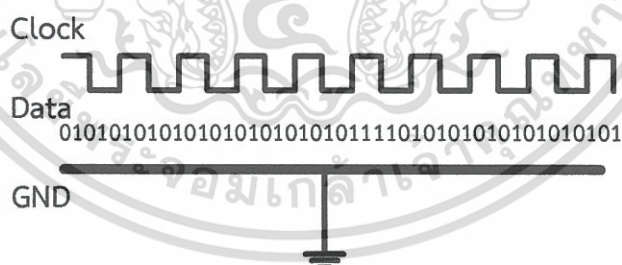
นี่จึงได้เลือกใช้ บอร์ดพัฒนาโครงงานสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC รุ่น 40 ขา ซึ่งเป็นวงจรสำเร็จรูปที่มาพร้อมกับพอร์ตอินพุต และเอาต์พุตของโมดูลในไมโครคอนโทรลเลอร์ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 บอร์ดพัฒนาโครงงานสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC รุ่น 40 ขา

ส่วนของการสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์ กับไมโครคอนโทรลเลอร์ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การสื่อสารแบบอนุกรม โดยการสื่อสารแบบอนุกรมแบ่งเป็น 2 แบบ คือ

1. การสื่อสารอนุกรมแบบซิงโครนัส (synchronous) เป็นรูปแบบที่ใช้วิธีส่งข้อมูล โดยใช้สัญญาณนาฬิกา มาเป็นตัวกำหนดจังหวะรับส่งข้อมูล การส่งข้อมูลแบบซิงโครนัสมีประสิทธิภาพและส่งได้ที่ความเร็วสูงมากกว่าการส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัสมาก มีโอกาสที่ข้อมูลจะสูญหายระหว่างการส่งน้อย ตัวอย่างการส่งข้อมูลลักษณะนี้เช่น I2C, I2S, SPI ข้อเสียของการส่งข้อมูลแบบนี้คือ ต้องใช้สายสัญญาณมากเพราะว่าต้องส่งสัญญาณนาฬิกาไปด้วย โดยมีลักษณะการส่งข้อมูลดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 การส่งข้อมูลแบบซิงโครนัส

2. การสื่อสารอนุกรมแบบอะซิงโครนัส (asynchronous) เป็นการส่งข้อมูลที่ไม่ต้องใช้สัญญาณนาฬิกาเป็นตัวกำหนดจังหวะการรับส่งข้อมูล แต่ใช้วิธีกำหนด รูปแบบการรับส่งข้อมูลขึ้นมาแทน และอาศัยการกำหนดความเร็วของการรับส่ง ที่เท่ากันทั้งฝั่งรับและฝั่งส่ง ข้อดีของการใช้ การส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัส คือสามารถสื่อสารแบบ Full Duplex ซึ่งรับและส่งได้ในเวลาเดียวกัน แต่การส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัสมีโอกาสที่ข้อมูลจะสูญหายขณะรับส่งข้อมูล หรือรับส่งข้อมูลผิดพลาดได้มากกว่าแบบการส่งข้อมูลแบบซิงโครนัส โดยการส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัสจะเริ่มทำงานจากบิต start เป็น 0 จากนั้นตามด้วยข้อมูลที่ส่ง แล้วปิดท้ายด้วยบิต stop เป็นลอจิก 1 ดังรูปที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การสื่อสารอนุกรมแบบอะซิงโครนัสที่มีมาตรฐานในการสื่อสารเป็นแบบ RS-232 เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เลือกใช้ มีโมดูล UART ที่ทำหน้าที่รับส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัสจึงมีความสะดวกต่อการเขียนโปรแกรม อย่างไรก็ตามด้วยคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กซึ่งทำหน้าที่รับส่งข้อมูลกับไมโครคอนโทรลเลอร์ไม่มีพอร์ตอนุกรมติดตั้งไว้ การเชื่อมต่อจึงต้องอาศัยพอร์ต USB แล้วใช้อุปกรณ์แปลงเป็นพอร์ตอนุกรม



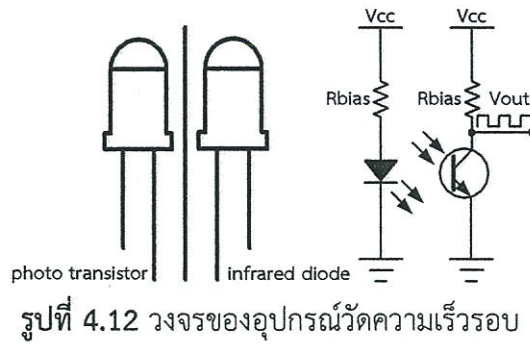
รูปที่ 4.11 การส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัส

4.1.4 ส่วนการวัด

การวัดมีความสำคัญกับการศึกษาและควบคุมเครื่องยนต์กั๊กั้นก้าชขนาดเล็ก เนื่องจากค่าวัดสามารถนำไปศึกษา วิเคราะห์พฤติกรรมของส่วนประกอบต่าง ๆ ภายในเครื่องยนต์ และประเมินประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์ยนต์ เช่น ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเครื่องอัดอากาศ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ เป็นต้น ซึ่งเมื่อเกิดปัญหาขึ้นก็สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการวัดมาวิเคราะห์เพื่อแก้ไขปัญหาได้อย่างตรงจุด โดยการวัดความเร็วรอบกั๊กั้นก้าช และตำแหน่งเปิด-ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงยังใช้เป็นค่าป้อนกลับสำหรับการควบคุม โดยค่าวัดที่ได้จะต้องมีความถูกต้องแม่นยำ ดังนั้นในส่วนการวัดจึงนำเสนอ เซ็นเซอร์ วงจร อุปกรณ์ และวิธีการวัดดังนี้

4.1.4.1 การวัดความเร็วรอบกั๊กั้นก้าช

อุปกรณ์ที่ใช้วัดความเร็วรอบกั๊กั้นก้าช ประกอบด้วยไดโอดอินฟราเรด (infrared diode) กับ โฟโตทรานซิสเตอร์ (photo transistor) แบบ NPN โดยการวัดอาศัยคุณสมบัติของอินฟราเรดที่ไม่สะท้อนกับอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เป็นสีดำ ดังนั้นการวัดความเร็วรอบกั๊กั้นก้าชจึงนำสีดำมาทาตรงคัปปลิงที่เชื่อมต่อระหว่างเครื่องอัดอากาศ กับชุดเกียร์ซึ่งมีลักษณะเป็นสีเงินโดยมีความละเอียด 2 พัลส์ต่อรอบ ซึ่งเมื่อกั๊กั้นก้าชหมุน เครื่องอัดอากาศ และคัปปลิงก็หมุนตามด้วย ดังนั้นเมื่อกระตุ้นไดโอดอินฟราเรด และคัปปลิงหมุนก็จะเกิดการสลับกันระหว่างการสะท้อนและไม่สะท้อนของรังสีอินฟราเรด และเมื่อโฟโตทรานซิสเตอร์ได้รับรังสีอินฟราเรดจากการสะท้อนทำให้เกิดเป็นสัญญาณพัลส์ โดยนำสัญญาณพัลส์ที่ได้ไปคำนวณเป็นความเร็วรอบ แสดงวงจรถัดรูปที่ 4.12



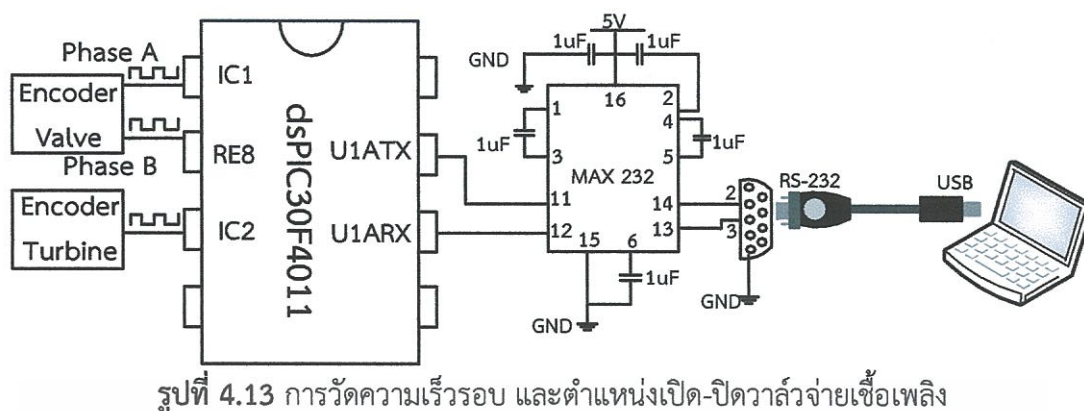
การแปลงสัญญาณพัลส์ที่ได้จากโฟโตทรานซิสเตอร์มาเป็นความเร็วรอบกัมมันต์ในหน่วยรอบต่อนาที ได้อาศัยส่วนประมวลผลโดยใช้โมดูลไทม์เมอร์ (Timer module) ของไมโครคอนโทรลเลอร์เลือกกำหนดคาบการวัด 600 ms ซึ่งทำให้ได้ความละเอียดการวัดความเร็วรอบที่ 50 รอบต่อนาที และใช้โมดูลตรวจจับสัญญาณอินพุต (input capture module) เพื่อบันทึกจำนวนสัญญาณพัลส์ต่อคาบการวัด ทำให้ได้ผลลัพธ์เป็นสามการที่ (4.1) จากนั้นนำค่าวัดความเร็วรอบที่ได้มาเป็นค่าป้อนกลับเพื่อใช้ในการควบคุม แล้วส่งไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกและแสดงผล ดังรูปที่ 4.13

$$\text{speed} = \text{pulse} \times 50 \text{ (rpm)} \quad (4.1)$$

4.1.4.2 การวัดตำแหน่งเปิด-ปิดของวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

การวัดตำแหน่งเปิด-ปิดของวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงอาศัยเอ็นโค้ดเดอร์ที่ประกอบมาพร้อมกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งมีความละเอียด 5400 พัลส์ต่อรอบมี 2 เฟสประกอบด้วยเฟส A กับเฟส B ซึ่งการแปลงสัญญาณดิจิทัลที่ได้จากเอ็นโค้ดเดอร์มาเป็นตำแหน่งเปิด-ปิดวาล์ว และการควบคุมตำแหน่งจะอาศัยส่วนประมวลผล โดยส่งสัญญาณพัลส์เข้ามายังไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านโมดูลตรวจจับสัญญาณอินพุตเพื่อบันทึกจำนวนพัลส์ และมีเฟส A กับ B เป็นตัวบอกทิศทางการเคลื่อนที่ของวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงว่าขึ้น หรือลง โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดระยะของวาล์วตั้งแต่ปิดสนิทไปอยู่ในระดับเปิดกว้างสุดอยู่ที่ 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจะได้สมการแปลงจากจำนวนพัลส์เป็นตำแหน่งของวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงดังสมการที่ (4.2) จากนั้นนำค่าตำแหน่งที่ได้มาป้อนกลับ เพื่อใช้ในการควบคุม แล้วส่งไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึก และแสดงผล ดังรูปที่ 4.13

$$\text{distance} = \frac{\text{pulse}}{357.55} \quad (4.2)$$



รูปที่ 4.13 การวัดความเร็วรอบ และตำแหน่งเปิด-ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

4.1.4.3 การวัดอุณหภูมิ

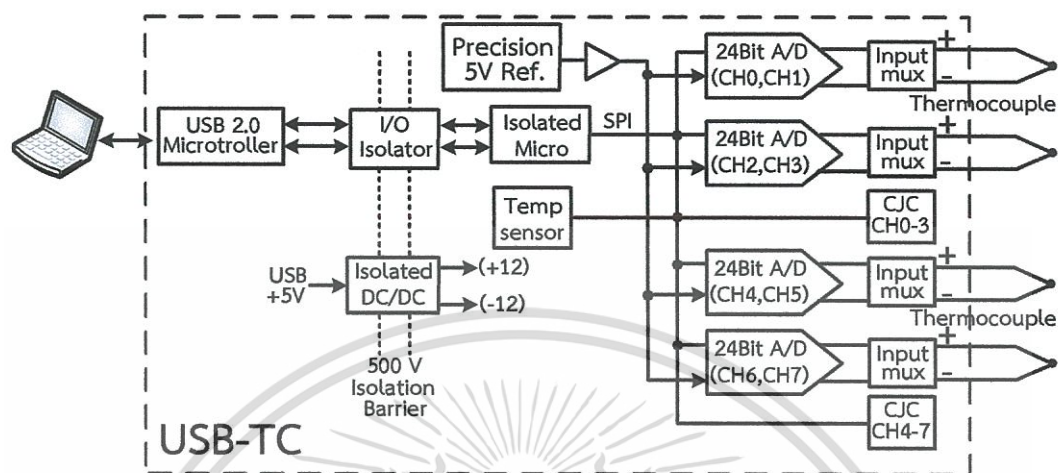
อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ เนื่องจากวัสดุของโครงสร้างเครื่องยนต์แต่ละส่วนสามารถทนอุณหภูมิสูงสุดได้ไม่เท่ากัน ดังนั้นเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับเครื่องยนต์จึงได้ติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ โดยเซ็นเซอร์ที่ใช้วัดอุณหภูมิมียุหลายประเภท เช่น RTD (resistance temperature detector) เทอร์มิสเตอร์ (thermistor) เทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยได้เลือกใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K โดยสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากเทอร์คัปเปิลเป็นสัญญาณอนาล็อกในระดับมิลลิโวลต์ ดังนั้นเพื่อให้ส่วนการแสดงผลและบันทึกผล สามารถรับค่าอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิล แล้วนำไปแสดงผล และบันทึกผลได้ จึงใช้ Measurement Computing รุ่น USB-TC ดังรูปที่ 4.14 เป็นตัวกลางระหว่างเทอร์โมคัปเปิลและคอมพิวเตอร์ในการปรับแต่งสัญญาณหรือแปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิทัล โดยสามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมได้จาก [11]



รูปที่ 4.14 Measurement Computing รุ่น USB-TC

Measurement Computing รุ่น USB-TC มีช่องรับอินพุตสำหรับเทอร์โมคัปเปิลชนิด J, K, R, S, T, N, E และ B 8 ช่อง การแปลงสัญญาณล็อกเป็นดิจิทัลมีความละเอียด 24 บิต ภายในมีเซ็นเซอร์ชดเชยของจุดต่อด้านเย็น (cold junction compensation sensor: CJC) ซึ่งทำให้มีการวัดอุณหภูมิที่ละเอียด และแม่นยำสูง ค่าสัญญาณที่ได้จาก Measurement Computing รุ่น USB-TC โดยสามารถใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่มาอุปกรณ์ หรือสามารถอาศัยโปรแกรม Labview ซึ่งมี toolkit เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับอุปกรณ์ดังกล่าวเพื่อประมวลผลเป็นอุณหภูมิ โดยอุณหภูมิจะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ต USB ส่วนการวัดอุณหภูมิแสดงได้ดังรูปที่ 4.15



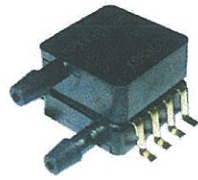
รูปที่ 4.15 การวัดอุณหภูมิ [11]

4.1.4.4 การวัดความดัน

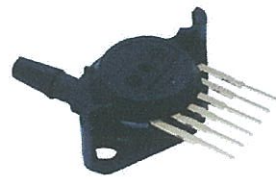
การวัดความดันมีเซ็นเซอร์หลายประเภทที่วัดได้เช่น เบลโลว์ (bellow) มาโนมิเตอร์แบบท่อรูปตัวยู เซ็นเซอร์วัดความดันแบบเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric pressure sensor) เซ็นเซอร์วัดความดันแบบเพียโซเรซิสทีฟ (piezoresistive pressure sensor) เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เซ็นเซอร์วัดความดันแบบเพียโซอิเล็กทริกซึ่งมีหลักการทำงาน คือเมื่อความดันมีการเปลี่ยนแปลงทำให้แผ่นไดอะแฟรมเกิดการโก่งตัวขึ้น และส่งแรงกระทำกับผลึกเพียโซอิเล็กทริกที่เชื่อมติดกัน ด้วยคุณสมบัติทางไฟฟ้าของผลึกเพียโซอิเล็กทริกจะทำให้เกิดประจุไฟฟ้าขึ้นโดยมีสัดส่วนแปรไปตามค่าความดันซึ่งมีสัญญาณเอาต์พุตเป็นสัญญาณอนาล็อก ซึ่งการวัดความดันในงานวิจัยนี้ต้องการวัดความดัน 2 ชนิด ได้แก่ ความดันผลต่าง (differential pressure) โดยมีย่านการวัดสูงสุดประมาณ 4 kPa และ ความดันเกจ (gauge pressure) ที่ย่านการวัดสูงสุดประมาณ 25 kPa โดยได้เลือกใช้เซ็นเซอร์รุ่น MPXV5004DP ดังรูปที่ 4.16 (ก) เป็นเซ็นต์เซอร์วัดความดันผลต่าง เพราะว่าเซ็นเซอร์รุ่นนี้มีย่านการวัดตรงตามความต้องการ และเลือกใช้เซ็นเซอร์รุ่น MPX5050GP ดังรูปที่ 4.16 (ข) เป็นเซ็นเซอร์ความดันเกจ เพราะว่าเซ็นเซอร์รุ่นนี้มีย่านการวัดใกล้เคียงกับความดันที่ต้องการซึ่งมีย่านการวัดเท่ากับ 0 ถึง 50 kPa เซ็นเซอร์ทั้งสองรุ่นให้เอาต์พุตขนาด 0-5 โวลต์ และใช้ไฟเลี้ยง 5 โวลต์ โดยสามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมได้จาก [12], [13] ตามลำดับ

ดังนั้นเพื่อให้สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้ และสามารถแสดงผลบนโปรแกรม Labview ได้จึงต้องอาศัยอุปกรณ์เพิ่มเติมเพื่อแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ Micro USB-Data Acquisition ดังรูปที่ 4.17 โดยสามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมได้จาก [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

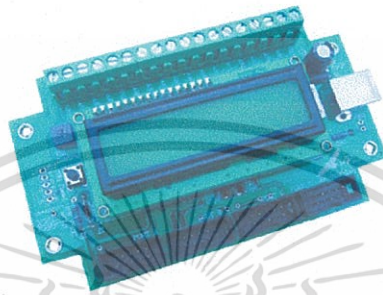


(ก) MPXV5004DP



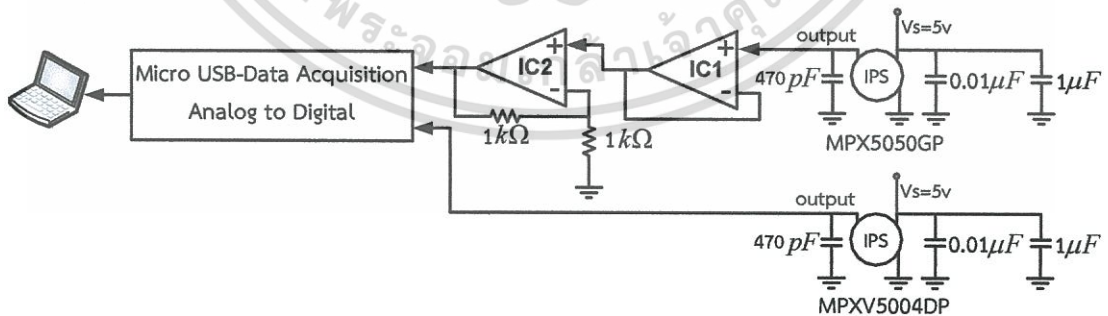
(ข) MPX5050GP

รูปที่ 4.16 เซ็นเซอร์วัดความดัน



รูปที่ 4.17 Micro USB-Data Acquisition

Micro USB-Data Acquisition มีความละเอียดในการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล ขนาด 10 บิต จึงทำให้การวัดความดันของ MPXV5004DP มีความละเอียดต่ำสุดอยู่ที่ 0.00391 kPa แต่ในส่วนของ MPX5050GP มีย่านการวัดกว้างกว่าปกติที่ใช้งาน เพื่อเพิ่มความละเอียดในการวัดจึงปรับเปลี่ยนย่านการวัดให้มีย่านการวัดความดัน 0 ถึง 25 kPa และให้สัญญาณไฟฟ้าออกมา 0 ถึง 5 โวลต์ จึงทำให้ค่าการวัดมีความละเอียดต่ำสุดเท่ากับ 0.0244 kPa แต่ถ้ายิ่งละเอียดไม่พอก็สามารถเปลี่ยนอุปกรณ์แปลงสัญญาณให้มีความละเอียดสูงขึ้นแต่จะมีราคาสูงกว่ามาก โดยส่วนการวัดความดันทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 4.18



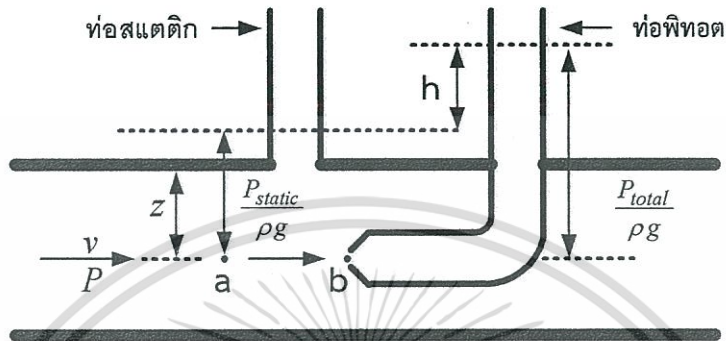
รูปที่ 4.18 ส่วนการวัดความดัน

4.1.4.5 การวัดอัตราการไหลของอากาศ

การวัดอัตราการไหลของอากาศมีวิธีการวัดหลายแบบ เช่น ท่อพิทอต-สแตติก (pitot-static tube) แอนิโมมิเตอร์แบบฮอตไวร์ (hot-wire anemometer) โรตานิเตอร์ (rotameter) เป็นต้น

โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการวัดอัตราการไหลของอากาศแบบท่อพิทอต-สแตติก ซึ่งมีวิธีการวัดไม่ต่างกันเท่าไรนัก อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือนำท่อพิทอตซึ่งเป็นท่อขนาดเล็กรูปตัวแอล มีปลายเปิดทั้งสองข้าง สอดเข้าไปขวางตรงกลางแนวทิศทางการไหลของอากาศ เพื่อวัดความดันรวม (total pressure: P_{total}) และนำท่อสแตติกซึ่งเป็นท่อขนาดเล็กตรง ไปติดตั้งที่บริเวณผนังท่อโดยการติดตั้งท่อต้องไม่ขวางแนวทิศทางการไหลของอากาศ เพื่อวัดความดันสถิต (static pressure: P_{static}) ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 การวัดอัตราการไหลของอากาศ

จากรูปที่ 4.19 การวัดความดันที่จุด a คือความดัน P_a เป็น P_{static} และการวัดความดันที่จุด b คือความดัน P_b เป็น โดยการนำค่าความดันทั้งสองไปใช้คำนวณหาอัตราการไหลอากาศนั้นจะอาศัยสมการของแบร์นูลลีระหว่างจุด a และจุด b ดังสมการที่ (4.3)

$$\frac{P_a}{\rho g} + \frac{v_a^2}{2g} + z_a = \frac{P_b}{\rho g} + \frac{v_b^2}{2g} + z_b \quad (4.3)$$

เมื่อ

- v_a, v_b คือความเร็วอากาศ ณ จุด a และ b
- z_a, z_b คือระยะระหว่างผนังท่อถึงตำแหน่งที่ต้องวัด ณ จุด a และ b
- g คือแรงโน้มถ่วงโลก (gravity force) มีค่าเท่ากับ 9.81 m/s^2
- ρ คือความหนาแน่นของอากาศ

โดยที่ $\rho = \frac{P}{RT}$

เมื่อ

- P คือความดัน ณ ตำแหน่งวัด
- T คืออุณหภูมิ ณ ตำแหน่งวัด

$$R = 0.287 \text{ kJ/kg.K}$$

โดยกำหนดให้

-ที่ตำแหน่ง B ไม่มีการไหลของของไหล ดังนั้น $v_b = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ท่อพิทอทมีขนาดเล็กมาก ดังนั้นขนาดของ $z_a = z_b$
 - และอยู่ภายใต้สมมุติฐานในการไหลผ่านอุปกรณ์วัดดังนี้
 - กระบวนการเป็นไอเซนโทรปิก
 - ไม่มีการอัดตัวของของไหลในสภาวะคงตัว (incompressible fluid) หรือ ρ มีค่าคงที่
 - ทิศทางการไหลของอากาศเป็นแนวเส้นตรง
- ดังนั้น ความเร็วของอากาศ v_a ของอากาศคำนวณได้จากสมการที่ (4.4)

$$v_a = \sqrt{2 \left(\frac{P_b - P_a}{\rho g} \right)} \quad (4.4)$$

อัตราการไหลของอากาศ Q_a สามารถหาได้จากสมการที่ (4.5) โดย A คือพื้นที่หน้าตัดภายในท่อ

$$Q_a = v_a A \quad (4.5)$$

อัตราการไหลเชิงมวล \dot{m} หาได้จากสมการที่ (4.6)

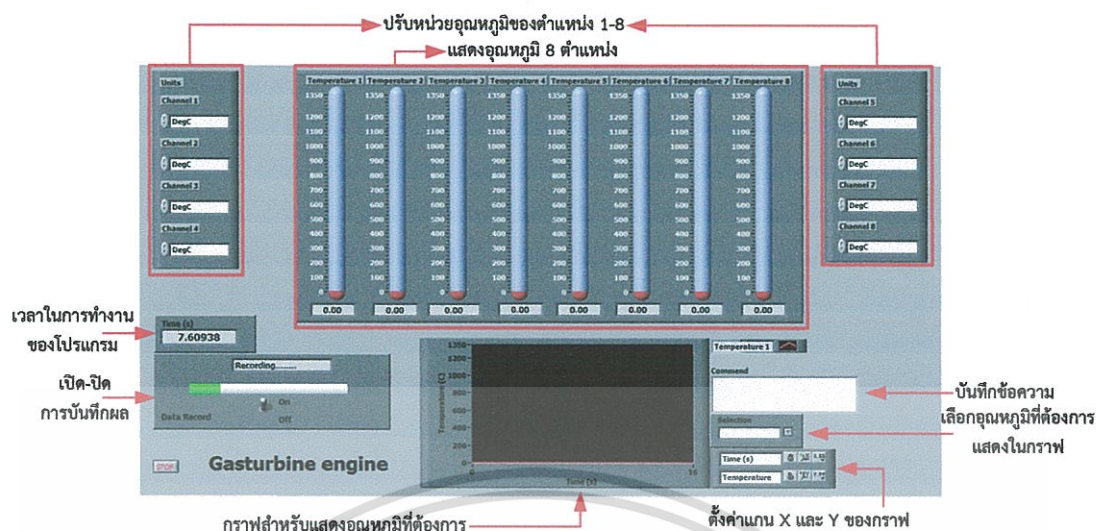
$$\dot{m} = Q_a \rho \quad (4.6)$$

จากสมการที่ (4.4) $P_b - P_a$ คือผลต่างของความดันระหว่างความดันรวมกับความดันสถิต หรือเรียกว่าความดันผลต่าง โดยในการวัดค่าความดันผลต่างได้เลือกใช้เซ็นเซอร์วัดความดันรุ่น MPXV5004DP ซึ่งให้เอาต์พุตออกมาเป็นค่าความดันผลต่าง

4.1.5 ส่วนเชื่อมต่อกับผู้ใช้งานและบันทึกผล

ส่วนเชื่อมต่อกับผู้ใช้งานและบันทึกผลมีหน้าที่ แสดงข้อมูล และบันทึกข้อมูล ที่ได้จากการวัดของ ส่วนการวัดและส่วนประมวลผล และมีหน้าที่รับค่าอ้างอิงจากค่าอ้างอิงเพื่อส่งให้กับส่วนประมวลผล โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก ร่วมกับโปรแกรม Labview โดยมีข้อมูลที่แสดงผล และบันทึกผลมีดังนี้

-อุณหภูมิ ใช้คอมพิวเตอร์ทำหน้าที่จะรับข้อมูลที่เป็นสัญญาณดิจิทัลโดยอาศัย USB-TC เป็นตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลแล้วส่งผ่านพอร์ต USB มายังคอมพิวเตอร์ และใช้ toolkit ในโปรแกรม Labview แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอุณหภูมิ ซึ่งโปรแกรมมีลักษณะดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 หน้าต่างแสดงและบันทึกอุณหภูมิในโปรแกรม Labview

-การแสดงผล และบันทึกผลของความดัน ความเร็ว อัตราการไหล และอัตราการไหลเชิงมวล มีหน้าต่าการเชื่อมต่อกับผู้ใช้งานดังรูปที่ 4.21 การทำงานเริ่มจากคอมพิวเตอร์รับข้อมูลที่เป็นสัญญาณดิจิทัลโดยอาศัย Micro USB-Data Acquisition เป็นตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลแล้วส่งผ่านพอร์ต USB มายังคอมพิวเตอร์ และใช้ toolkit ในโปรแกรม Labview แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นค่าวัดแรงดันไฟฟ้า แล้วแปลงเป็นค่าความดันที่สอดคล้อง ซึ่งความดันที่ได้มี 2 ชนิด คือ ความดันเกจ และความดันผลต่าง ซึ่งอาศัยสมการที่ (4.7) และ (4.8) ตามลำดับ

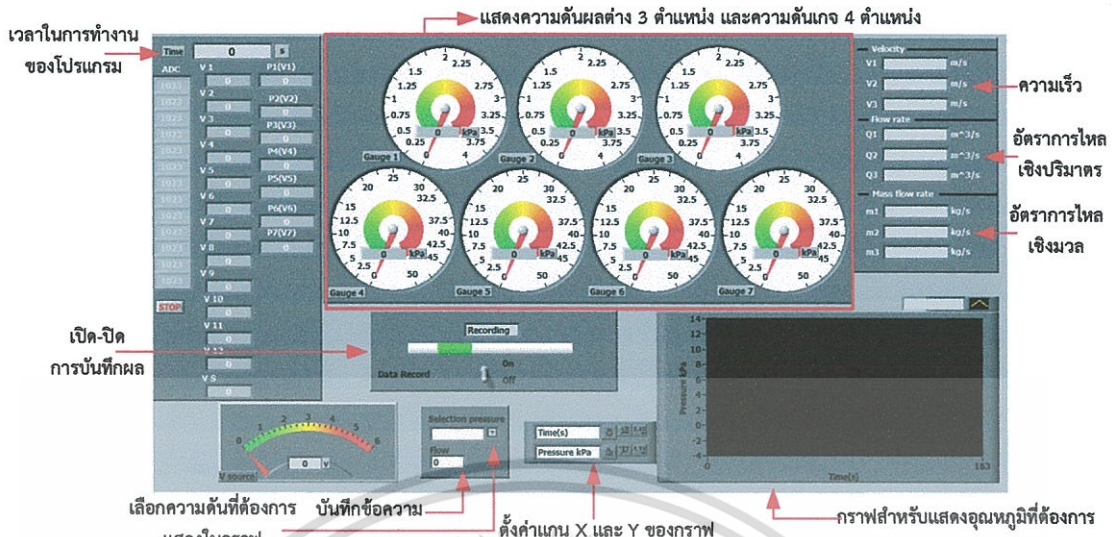
$$P_{gauge} = \left(\frac{V_{gauge}}{V_S} - 0.04 \right) / 0.018 \quad (4.7)$$

$$P_{diff} = \left(\frac{V_{diff}}{V_S} - 0.2 \right) / 0.2 \quad (4.8)$$

- เมื่อ
- P_{gauge} คือความดันเกจ
 - P_{diff} คือความดันผลต่าง
 - V_{gauge} คือแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเซ็นเซอร์ MPX5050GP
 - V_{diff} คือแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเซ็นเซอร์ MPXV5004DP
 - V_S คือแรงดันไฟฟ้าอินพุตของเซ็นเซอร์ MPXV5004DP และ MPX5050GP

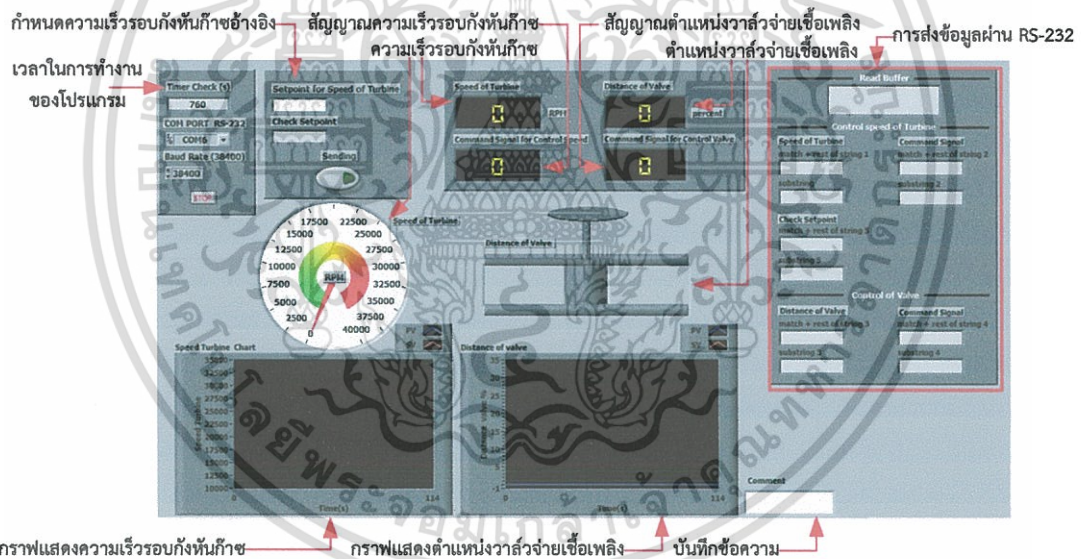
โดยความดันผลต่างที่ได้จะนำมาแปลงเป็นความเร็ว อัตราการไหล และอัตราการไหลเชิงมวล

โดยอาศัยสมการที่ (4.4) เมื่อ $P_b - P_a$ คือความดันผลต่าง P_{diff} สมการที่ (4.5) และ (4.6) ตามลำดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำมาใช้



รูปที่ 4.21 หน้าต่างแสดงและบันทึกความดัน

อัตราการไหล อัตราการไหลเชิงมวลในโปรแกรม Labview



รูปที่ 4.22 หน้าต่างรับค่าอ้างอิง แสดงผลและบันทึกผล

ความเร็วรอบกั้นก๊าซและตำแหน่งเปิด-ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงในโปรแกรม Labview

-การแสดงผลของ ความเร็วรอบกั้นก๊าซ และตำแหน่งเปิด-ปิดของวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง เริ่มจากคอมพิวเตอร์รับข้อมูลที่เป็นสัญญาณดิจิทัลจากส่วนประมวลผล ผ่านพอร์ตแปลง RS-232 เป็น USB โดยสัญญาณดิจิทัลที่ได้รับเป็นค่าความเร็วรอบกั้นก๊าซ และตำแหน่งเปิด-ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงแล้ว ซึ่งโปรแกรม Labview มีหน้าที่เพียงแสดงผลที่ได้รับเท่านั้น นอกจากความเร็วรอบกั้นก๊าซ และตำแหน่งเปิด-ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง ส่วนประมวลผลยังส่งค่าสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมความเร็วรอบกั้นก๊าซ และตำแหน่งเปิด-ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงมายังคอมพิวเตอร์ด้วยซึ่ง

โปรแกรมมีลักษณะดังรูปที่ 4.22 นอกจากการแสดงผลและบันทึกผลแล้ว ยังมีหน้าที่กำหนดความเร็วรอบอ้างอิงของการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วย

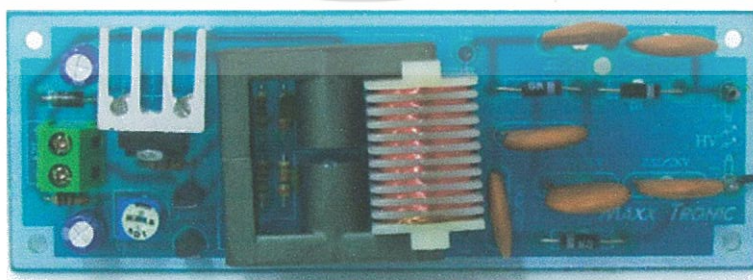
4.1.6 ส่วนการสตาร์ทเครื่องยนต์

ส่วนการสตาร์ทเครื่องยนต์มีหน้าที่สตาร์ทเครื่องยนต์แทนผู้ควบคุมโดยมีขั้นตอนตามวิธีที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.1.1 ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการสตาร์ทประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

- อุปกรณ์จุดระเบิดทำหน้าที่ให้เกิดประกายไฟขึ้นภายในห้องเผาไหม้ กล่าวคือ เมื่อส่วนประมวลผลสั่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง และเครื่องดูดอากาศ เพื่อปล่อยเชื้อเพลิงและอากาศเข้ามาภายในห้องเผาไหม้ หลังจากนั้นส่วนประมวลผลจะสั่งให้อุปกรณ์จุดระเบิดทำงาน โดยถ้าอัตราส่วนของอากาศและเชื้อเพลิงมีความเหมาะสมจะทำให้เกิดเปลวไฟขึ้นภายในห้องเผาไหม้ ซึ่งอุปกรณ์จุดระเบิดนี้ได้ติดตั้งอยู่บริเวณหัวฉีด โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วงจรสปาร์คไฟแรงสูงซึ่งเป็นวงจรสำเร็จรูปของบริษัท Maxx Tronic มาใช้เป็นอุปกรณ์จุดระเบิดมีลักษณะดังรูปที่ 4.23

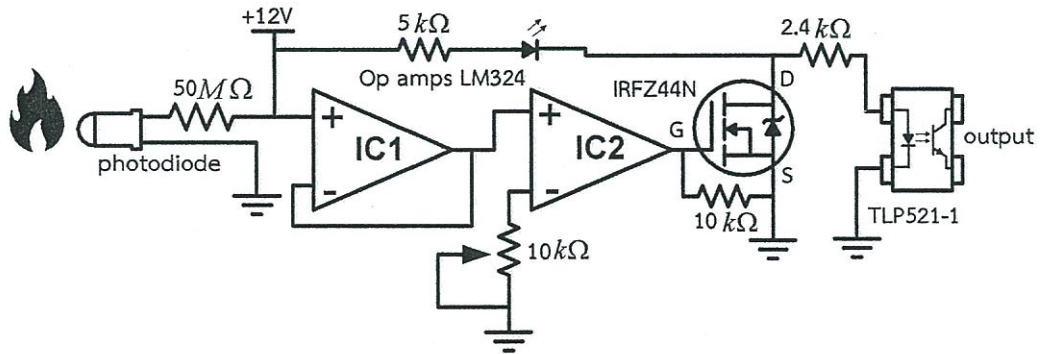
- อุปกรณ์ตรวจจับเปลวไฟมีหน้าที่ตรวจสอบว่าเกิดเปลวไฟขึ้นหรือไม่ภายหลังจากที่อุปกรณ์จุดระเบิดทำงาน โดยมีตำแหน่งตรวจจับอยู่ภายในห้องเผาไหม้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาวงจรตรวจจับเปลวไฟขึ้นเองโดยอาศัยหลักการตรวจจับแสงของโฟโตไดโอด (photodiode) ความไวสูง กล่าวคือ บริเวณภายในห้องเผาไหม้ที่ติดตั้งโฟโตไดโอด หากไม่มีเปลวไฟจะมืดสนิท ดังนั้นเมื่อเกิดเปลวไฟขึ้นภายในห้องเผาไหม้ก็จะเกิดแสงสว่างขึ้นทำให้เกิดความแตกต่างของสถานะการตรวจจับ ได้แก่ ไม่มีแสงสว่างหรือสภาวะปกติภายในห้องเผาไหม้จะมีเอาต์พุตจากโฟโตไดโอดเป็น 1 แต่ถ้าเกิดเปลวไฟขึ้นจะมีเอาต์พุตจาก โฟโตไดโอดเป็น 0 โดยมีลักษณะของวงจรดังรูปที่ 4.24

- ส่วนประมวลผลหรือไมโครคอนโทรลเลอร์ มีหน้าที่ทำตามขั้นตอนการสตาร์ทและดับเครื่องยนต์แทนผู้ควบคุมจากเดิมที่ต้องใช้ผู้ควบคุมอย่างน้อย 2 คนขึ้นไปก็จะลดจำนวนผู้ควบคุมเหลือเพียง 1 คนเท่านั้นเพื่อปิดวาล์วทางเข้าอากาศซึ่งยังไม่เป็นอัตโนมัติเพียงจุดเท่านั้น โดยมีขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 4.25

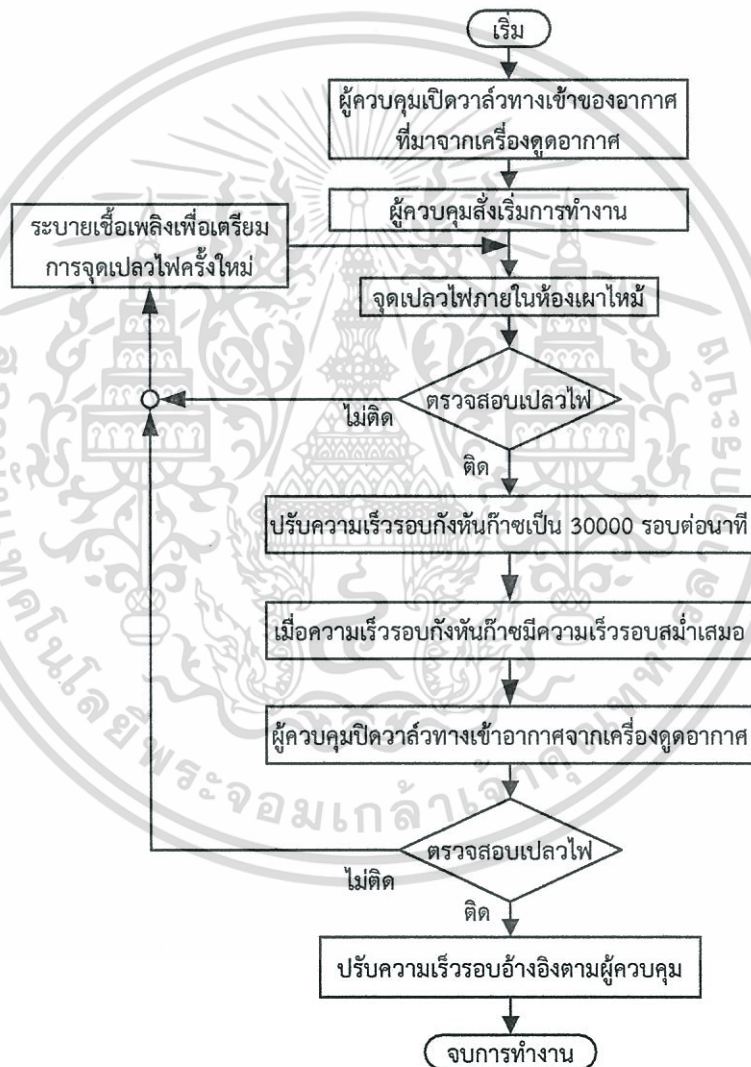


รูปที่ 4.23 อุปกรณ์จุดระเบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 วงจรตรวจจับเปลวไฟ



รูปที่ 4.25 ขั้นตอนการสตาร์ทเครื่องยนต์ของส่วนประมวลผล

แต่จากการนำส่วนประมวลผลหรือไมโครคอนโทรลเลอร์ไปทดลองควบคุมการสตาร์ทของเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กในระบบจริง พบว่าไมโครคอนโทรลเลอร์มีการทำงานผิดพลาดในช่วงที่อุปกรณ์จุดระเบิดทำงาน เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนจากวงจรจุดระเบิดมารบกวนการทำงานของเอกสารนเป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำพีแอลซี (PLC) รุ่น Fx3G - 40MR ของบริษัทมิตซูบิชิ (Mitsubishi) โดยสามารถศึกษารายละเอียดได้จาก [14]

4.1.7 ตู้ควบคุม

อุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ในการทำงานของส่วนการประมวลผล ส่วนการสตาร์ทเครื่องยนต์ และส่วนการวัดได้นำไปติดตั้งไว้ในตู้ควบคุมเพื่อให้สามารถเดินสายไฟเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ที่ทำงานร่วมกันได้ง่าย และมีความเรียบร้อย นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันการรบกวนการทำงานของส่วนประมวลผล และส่วนกาวัดจากสัญญาณรบกวนจากภายนอกตู้ควบคุมได้อีกด้วย โดยแบ่งตู้ควบคุมออกเป็น 2 ตู้ดังนี้

1. ตู้ควบคุมที่มีการติดตั้งวงจรประกอบอุปกรณ์วัด และวงจรควบคุมไว้ทั้งหมดยกเว้นวงจรควบคุมมอเตอร์ของเครื่องดูดอากาศ โดยภายในตู้ควบคุมนี้ได้ติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ เพิ่มเติมจากส่วนการประมวลผล ส่วนการสตาร์ทเครื่องยนต์ และส่วนการวัดที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นดังนี้

- เบรกเกอร์ และฟิวส์ ติดตั้งไว้เพื่อตัดวงจรไฟฟ้าช่วยป้องกันไม่ให้อุปกรณ์เสียหาย เมื่อเกิดการลัดวงจรภายในหรือภายนอกตู้

- วงจรขยายสัญญาณ ทำหน้าที่ขยายสัญญาณไฟฟ้าขนาด 5 โวลต์ที่ได้รับจากส่วนประมวลผลเป็น 24 โวลต์ เพื่อให้ส่วนประมวลผลสามารถส่งงานไปยังรีเลย์ (relay) ได้

- รีเลย์มีหน้าที่รับคำสั่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านวงจรขยายสัญญาณเพื่อทำหน้าที่เป็นสวิตช์ไปเปิดปิดอุปกรณ์อื่น ๆ เนื่องจากอุปกรณ์บางชนิดใช้พลังงานไฟฟ้ากระแสตรงมากกว่า 5 โวลต์ และใช้พลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์

- วงจรกรองสัญญาณรบกวน (noise filter) ทำหน้าที่กรองสัญญาณรบกวนที่มาทับแหล่งจ่ายให้กับอุปกรณ์ทั้งหมดที่ติดตั้งภายในตู้ควบคุม

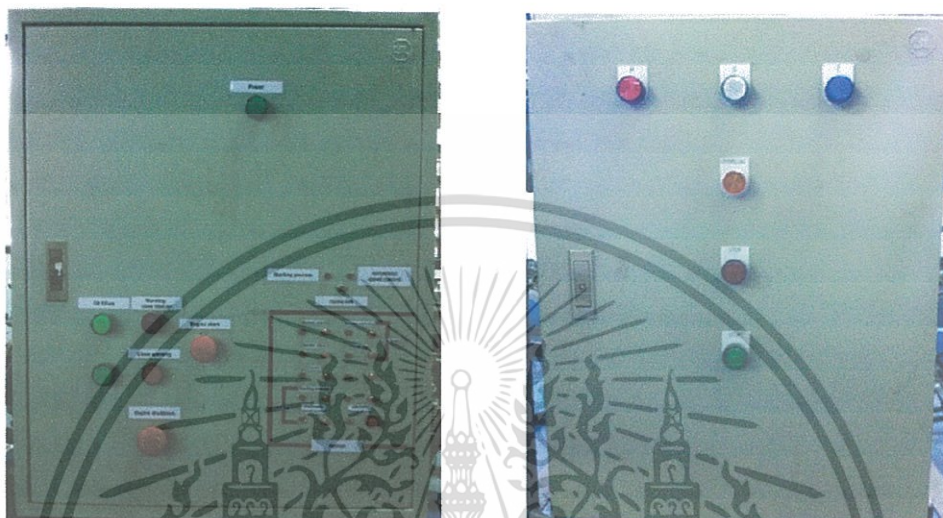
- วงจรควบคุมระดับน้ำมันหล่อลื่นของเทอร์โบชาร์จเจอร์ ทำหน้าที่ควบคุมระดับน้ำมันหล่อลื่นในถัง โดยเมื่อระดับน้ำมันหล่อลื่นในถังต่ำกว่าที่กำหนดไว้ วงจรจะสั่งให้มอเตอร์ของปั้มน้ำมันทำงานเมื่อระดับน้ำมันหล่อลื่นสูงขึ้นวงจรจะสั่งให้มอเตอร์หยุดการทำงาน โดยใช้ลูกลอยเป็นเซ็นเซอร์ในการตรวจวัดระดับน้ำมันในถัง

- แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 12 และ 24 โวลต์ ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงให้กับวงจรต่างๆ ที่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงภายในตู้ควบคุม

ในส่วนหน้าตู้ควบคุมได้ติดตั้งสัญญาณไฟเพื่อแสดงสถานะการทำงานของเครื่องยนต์ และติดตั้งสวิตช์เพื่อให้ผู้ควบคุมสามารถสั่งงานส่วนต่าง ๆ ด้วยตนเอง เช่น สวิตช์สตาร์ทเครื่องยนต์ สวิตช์ดับเครื่องยนต์ เป็นต้น ดังรูปที่ 4.26 (ก)

2. ตู้ควบคุมมอเตอร์ของเครื่องดูดอากาศมีหน้าที่ลดการกระชากกระแสไฟฟ้าเมื่อมอเตอร์เริ่มทำงาน ภายในตู้ประกอบด้วยแมกเนติกส์สวิตช์ 3 ตัว เบรกเกอร์ และไทม์เมอร์เชื่อมต่อทำงานร่วมกัน โดยมีลักษณะการทำงานคือ เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนวงจรจะต่อกันอยู่ในแบบสตาร์ทเพื่อลดการใช้

กระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ หลังจากนั้นเมื่อความเร็วรอบมอเตอร์เข้าใกล้พิกัดวงจรถะกลายเป็นการต่อแบบเดลต้าเพื่อให้มอเตอร์มีความเร็วสูงตามข้อกำหนดของมอเตอร์ตัวนั้นๆ โดยการสลับวงจรได้อาศัยการตั้งเวลาจากไทม์เมอร์ และด้านหน้าตู้ควบคุมได้ติดตั้งสัญญาณไฟเพื่อแสดงสถานะ และสวิตช์สำหรับรับคำสั่งจากผู้ควบคุมซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 4.26 (ข)



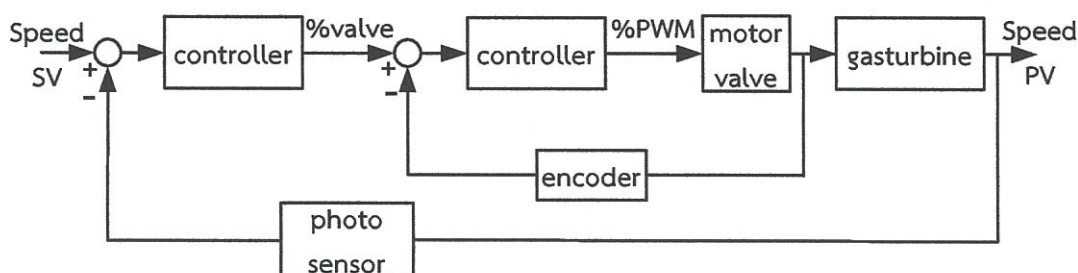
(ก) ตู้ควบคุมเครื่องยนต์

(ข) ตู้ควบคุมมอเตอร์ของเครื่องดูดอากาศ

รูปที่ 4.26 ตู้ควบคุม

4.2 การออกแบบระบบควบคุม

จากโครงสร้างที่กล่าวมาแล้วข้างต้น การควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซต้องอาศัยการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเปิด-ปิดของวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง โดยการควบคุมทั้งสองการควบคุมจะต้องมีความสัมพันธ์กัน ดังนั้นระบบควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซจึงมีลักษณะเป็นแบบป้อนกลับ 2 ลูป ได้แก่ การควบคุมลูปใน และลูปนอก ซึ่งการควบคุมลูปในมีหน้าที่ควบคุมตำแหน่งการเปิด-ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเพื่อควบคุมอัตราการไหลก๊าซโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและเอ็นโค้ดเตอร์เป็นอุปกรณ์ขับและวัดตำแหน่งตามลำดับ และการควบคุมลูปนอกมีหน้าที่ควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซ ดังรูปที่ 4.27

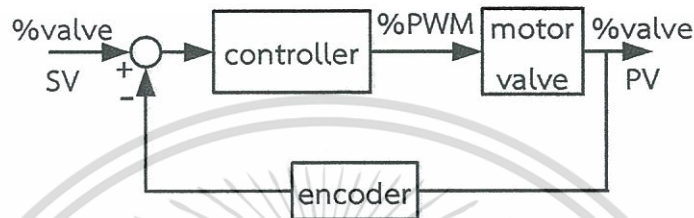


รูปที่ 4.27 ระบบควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซของเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 การควบคุมลูบใน หรือการควบคุมตำแหน่งเปิด-ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

เนื่องจากคอนโทรลเลอร์เป็นคอนโทรลเลอร์ที่พัฒนาขึ้นเอง ไม่ใช่คอนโทรลเลอร์สำเร็จรูปดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.2 ส่วนการจ่ายเชื้อเพลิงจึงไม่มีลูบการควบคุมอยู่ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งเปิด-ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง ซึ่งในขั้นต้นจะเป็นการควบคุมให้วาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเปิดได้ตามตำแหน่งอ้างอิงที่มีผู้ควบคุมเป็นผู้กำหนดดังบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.28 ก่อนที่จะนำไปใช้งานร่วมกับการควบคุมลูบนอก หรือการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซ

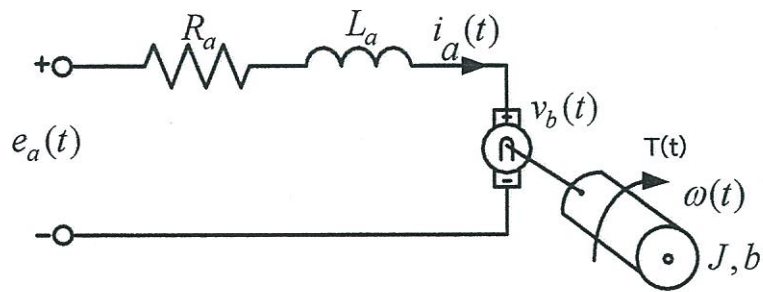


รูปที่ 4.28 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมตำแหน่งเปิด-ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

การออกแบบตัวควบคุมของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเริ่มต้นด้วยการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แล้วนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มาออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้ได้สมรรถนะตามต้องการ โดยก่อนการออกแบบตัวควบคุมได้กำหนดให้ผลตอบสนองของระบบมีค่าพ่วงเกินสูงสุดมีค่าเท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์ ช่วงเวลาเข้าที่มีค่าเท่ากับ 1 วินาที และมีค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวต่ำกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ตัวควบคุม 3 ชนิด คือตัวควบคุมแบบพี พีไอ และพีไอดี แล้วนำตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบไปจำลองในโปรแกรมแมตแล็บเพื่อทดสอบตัวควบคุมก่อนนำไปทดลองกับระบบจริง โดยก่อนการออกแบบของตัวควบคุมแต่ละชนิดได้มีการวิเคราะห์ และตั้งสมมุติฐานของผลตอบสนองเชิงเวลาเมื่อใช้ตัวควบคุมชนิดนั้นๆ กับระบบจากแผนภาพโบลด์ เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบตัวควบคุม

4.2.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง ซึ่งก็คือการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมตำแหน่งเปิด-ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง เพื่อนำไปออกแบบตัวควบคุม โดยการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงนี้ได้อาศัยการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง [17] แทน เนื่องจากชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงได้พัฒนาโดยการนำนิตเต็ลวาล์วมาต่อเข้ากับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้อาศัยวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแสดงซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

- เมื่อ $e_a(t)$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
 $e_b(t)$ คือ แรงดันไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดขึ้นในอาร์เมเจอร์
 $i_a(t)$ คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอาร์เมเจอร์
 L_a คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด
 R_a คือ ค่าความต้านทานของอาร์เมเจอร์

เมื่อพิจารณาวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรมดังรูปที่ 4.29 พบว่าเมื่อป้อนแรงดันอินพุต e_a จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า i_a ขึ้นในวงจรไฟฟ้านี้ หลังจากใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์รอบวงจรไฟฟ้าจะได้ดังสมการที่ (4.9)

$$e_a(t) = i_a(t)R_a + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_b(t) \quad (4.9)$$

และแรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้นสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (4.10)

$$T(t) = K_\phi i_a(t) \quad (4.10)$$

- เมื่อ $T(t)$ คือ แรงบิดทางกลของมอเตอร์
 K_ϕ คือ ค่าคงที่อาร์เมเจอร์

โดยเมื่อเกิดแรงบิดทำให้ส่วนทางกลของมอเตอร์หมุนอธิบายได้ดังสมการที่ (4.11)

$$T(t) - b\omega(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (4.11)$$

- เมื่อ b คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของระบบจากการเคลื่อนที่
 J คือ สัมประสิทธิ์เนื่องจากความเฉื่อยของมอเตอร์
 $\omega(t)$ คือ ความเร็วเชิงมุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อมอเตอร์หมุนจึงเหนี่ยวนำให้เกิด แรงดันไฟฟ้าต้านกลับที่เกิดในอาร์เมเจอร์ดังสมการที่ (4.12)

$$e_b(t) = K_b \omega(t) \quad (4.12)$$

เมื่อ K_b คือ ค่าคงที่ของแรงดันไฟฟ้าต้านกลับของมอเตอร์จากนั้นแปลงลาปลาซสมการที่ (4.13) ถึงสมการที่ (4.16) ได้

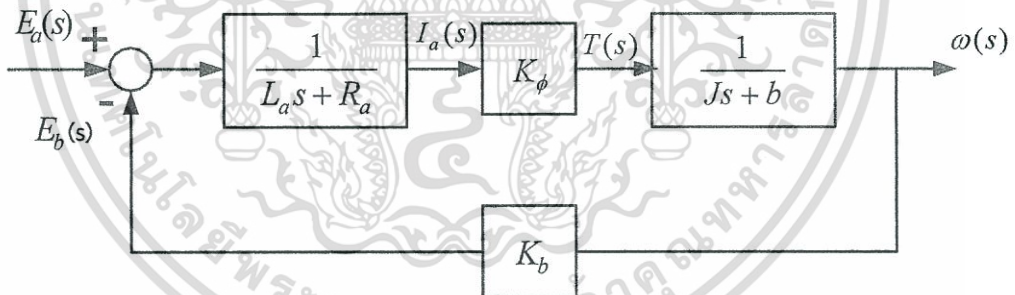
$$E_a(s) = I_a(s)R_a + L_a s I_a(s) + E_b(s) \quad (4.13)$$

$$T(s) = K_\phi I_a(s) \quad (4.14)$$

$$T(s) - b\omega(s) = Js\omega(s) \quad (4.15)$$

$$E_b(s) = K_b \omega(s) \quad (4.16)$$

สามารถจัดรูปเป็นบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

และได้ฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$\frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{K_\phi}{L_a J s^2 + (L_a b + R_a J) s + R_a b + K_b K_\phi} \quad (4.17)$$

แต่โดยปกติแล้วส่วนทางไฟฟ้าโดยเฉพาะ L_a มีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงสามารถประมาณฟังก์ชันถ่ายโอนลงเป็นอันดับ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{K_m}{T_m s + 1} \quad (4.18)$$

โดย

$$T_m = \frac{R_a J}{(R_a b + K_b K_\phi)} \quad (4.19)$$

$$K_m = \frac{K_\phi}{(R_a b + K_b K_\phi)} \quad (4.20)$$

แต่หากสนใจเอาต์พุตเป็นมุม $\theta(t)$ สามารถอธิบายได้โดยความสัมพันธ์พื้นฐาน

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (4.21)$$

หรือ

$$\omega(t) = \int_0^t \theta(t) dt \quad (4.22)$$

เมื่อแปลงลาปลาซสมการที่ (4.22)

$$\theta(s) = \frac{1}{s} \omega(s) \quad (4.23)$$

จะได้

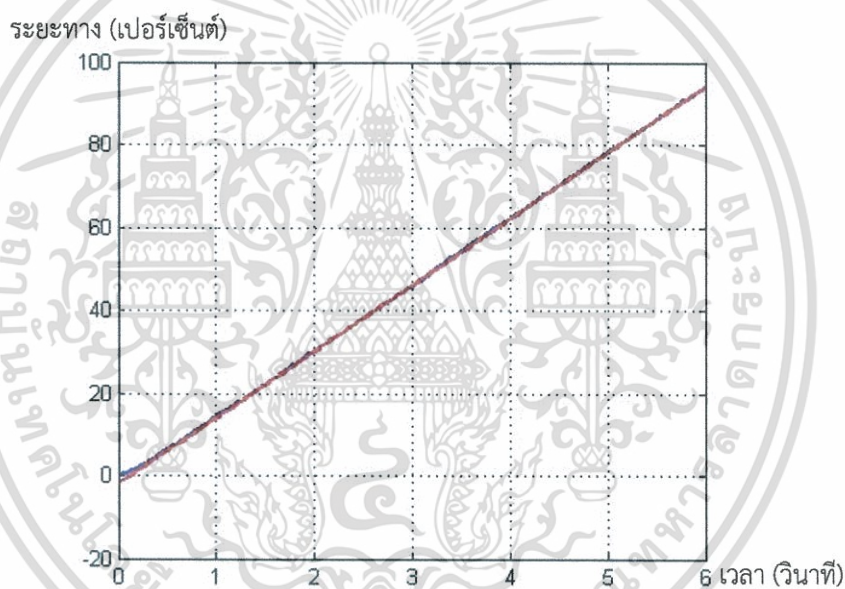
$$\frac{\theta(s)}{E_a(s)} = \frac{\omega(s)}{E_a(s)} \cdot \frac{\theta(s)}{\omega(s)} = \left(\frac{K_m}{T_m s + 1} \right) \left(\frac{1}{s} \right)$$

$$\frac{\theta(s)}{E_a(s)} = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)} \quad (4.24)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนในสมการที่ (4.24) จะถูกนำมาใช้เพื่อการออกแบบตัวควบคุมชุดควบคุม วัลส์จ่ายเชื้อเพลิง โดยค่าพารามิเตอร์ K_m และ T_m ของมอเตอร์หาได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ K_m และ T_m ของมอเตอร์ สามารถทำได้โดยจ่ายไฟเลี้ยงโดยตรงให้กับมอเตอร์ที่ประกอบอยู่กับนิตเด็ลวาล์ว จนนิตเด็ลวาล์วเคลื่อนที่เปิดจากตำแหน่ง 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์หรือจนมอเตอร์เคลื่อนที่เข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งในที่นี้ได้ทำซ้ำจำนวน 6 ครั้ง โดยในการจ่ายไฟเลี้ยงในแต่ละครั้งนั้นจะจ่ายเป็นสัญญาณพัลส์วามทูลุเลชัน โดยมีความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่แตกต่างกันซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 30% (มอเตอร์เริ่มหมุน) แล้วเพิ่มขนาดความกว้างของสัญญาณพัลส์ครั้งละ 5% จนถึง 100% จากนั้นนำกราฟผลตอบสนองของระยะทางการเปิด-ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงกับเวลาดังรูปที่ 4.31 มาพิจารณา โดยค่าคงที่เวลาของมอเตอร์ T_m หาได้จากการอ่านจุดตัดบนแกนเวลาของเส้นตรงที่ลากสัมผัสกับเส้นผลตอบสนองช่วงสภาวะคงตัว ในขณะที่ค่าคงที่มอเตอร์ K_m หาจากความชันของเส้นตรงที่ลากสัมผัส เมื่อเทียบว่าอินพุตมีขนาดหนึ่งหน่วย แล้วนำค่า K_m และที่หา T_m ได้ในแต่ละขนาดความกว้างของพัลส์มาหาเป็นค่าเฉลี่ย



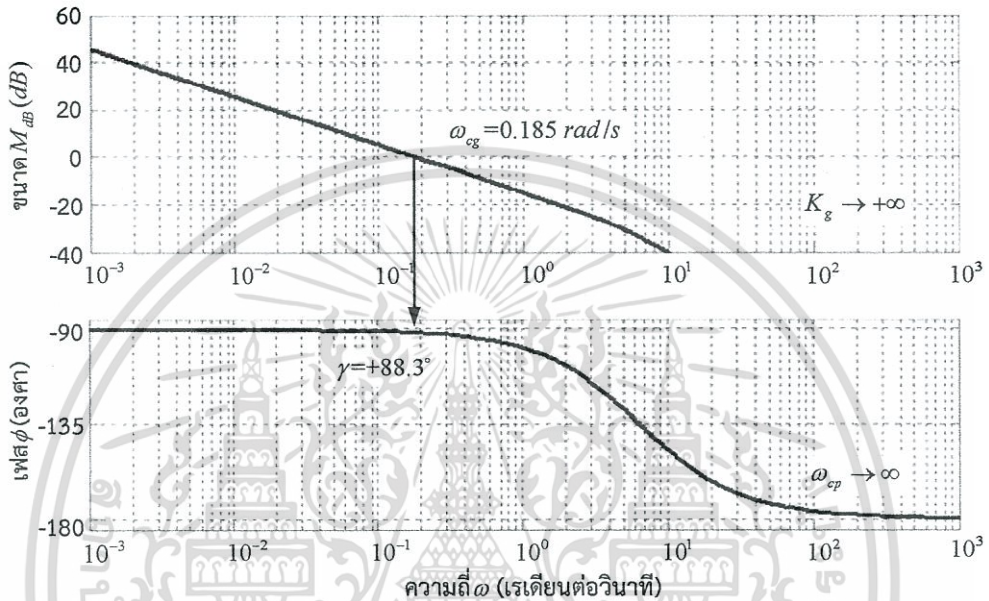
รูปที่ 4.31 ผลตอบสนองวงเปิดต่อสัญญาณพัลส์วามทูลุเลชัน ขนาด 50 %

จากการทดลองจ่ายสัญญาณพัลส์วามทูลุเลชัน ที่มีความกว้างของสัญญาณในขนาดต่างๆ นั้นสามารถหาค่าเฉลี่ยของค่าพารามิเตอร์ $K_m = 0.18517$ และ $T_m = 0.1559$ วินาทีดังนั้นเมื่อนำค่าพารามิเตอร์ทั้งสองแทนลงในสมการที่ (4.24) จึงได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่จะนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมดังสมการที่ (4.25)

$$\frac{\theta(s)}{E_a(s)} = \frac{0.18517}{s(0.1559s + 1)} \quad (4.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (4.25) ฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถนำมาวาดแผนภาพโบด (bode diagram) ได้ดังรูปที่ 4.32 ซึ่งจากแผนภาพโบดทำให้ทราบถึงค่าเกนมาร์จิ้น และเฟสมาร์จิ้น จึงสามารถระบุเสถียรภาพของระบบวงปิดตลอดจนระดับความมีเสถียรภาพได้โดยอาศัยผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบวงเปิดเพียงลำพัง ซึ่งผลตอบสนองเชิงความถี่นี้มักสามารถทดสอบหาได้ง่ายกว่าการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ



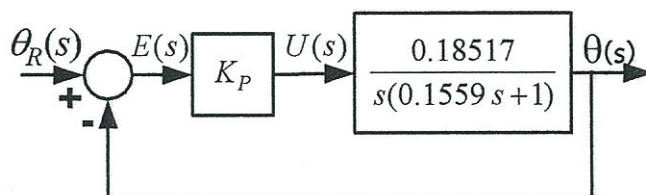
รูปที่ 4.32 แผนภาพโบดของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

จากรูปที่ 4.32 สามารถสรุปได้ว่าระบบวงปิดของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงมีเสถียรภาพแล้ว ยิ่งทราบว่าสามารถเพิ่มเกนในระบบวงเปิดได้ทุกค่าเกนที่เป็นบวกโดยระบบวงปิดยังคงมีเสถียรภาพ เนื่องจากระบบมีเกนมาร์จิ้น $K_g \rightarrow +\infty$ แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มค่าเกนวงเปิดทำให้กราฟขนาดของแผนภาพโบดยกขึ้นทั้งกราฟ ซึ่งทำให้ระบบมีเฟสมาร์จิ้นลดลง หรือระบบมีเสถียรภาพน้อยลง ดังนั้นคาดได้ว่าหากเพิ่มค่าเกนในระบบวงเปิดจะทำให้ผลตอบสนองเชิงเวลามีค่าพุ่งเกินมากขึ้นและเกิดการแกว่งมากขึ้นนั่นเอง

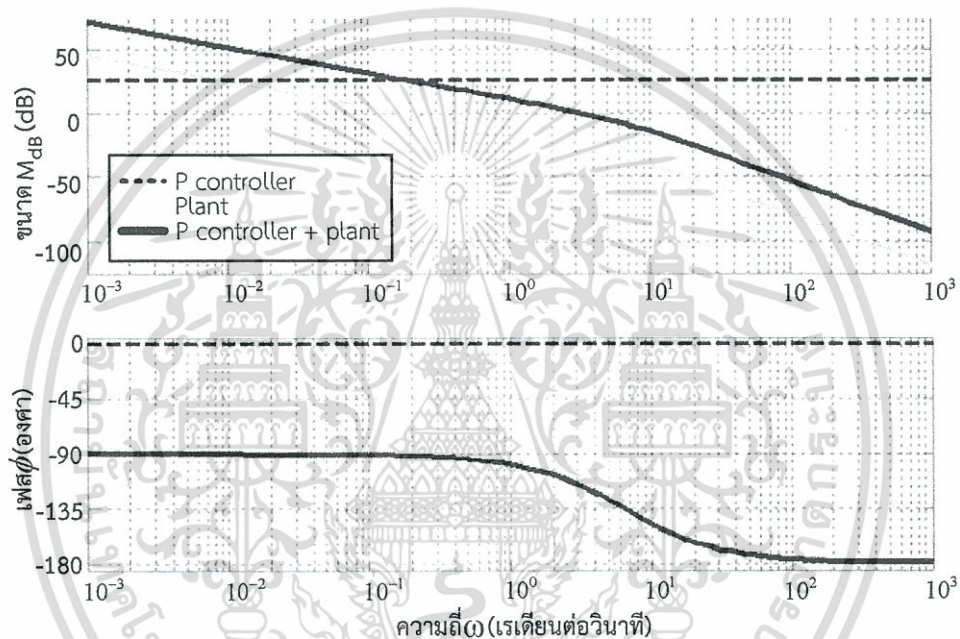
4.2.1.2 การออกแบบตัวควบคุมแบบพีของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

ระบบควบคุมแบบพีของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงมีลักษณะบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 4.33 โดยการออกแบบตัวควบคุมได้อาศัยการพิจารณาจากรูปที่ 4.32 ซึ่งพบว่าเฟสมาร์จิ้นของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับ $\gamma = +88.3^\circ$ ซึ่งมีค่าเป็นบวกอยู่มาก ดังนั้นสามารถใช้ตัวควบคุมแบบพีเพื่อเพิ่มค่าเกนให้กับระบบวงเปิดได้โดยระบบวงปิดยังคงมีเสถียรภาพ และผลตอบสนองของระบบจะเร็วขึ้นด้วย เนื่องจากระบบมีเกนมาร์จิ้น $K_g \rightarrow +\infty$ แต่ถ้าเพิ่มค่าเกนวงเปิดมากเกินไปอาจทำให้กราฟขนาดของแผนภาพโบดยกขึ้นทั้งกราฟ ซึ่งทำให้ระบบมีเฟสมาร์จิ้น

ลดลงดังรูปที่ 4.34 ดังนั้นหากเลือกค่า K_P ของตัวควบคุมแบบพีในระบบวงเปิดมากเกินไปจะทำให้ผลตอบสนองเชิงเวลามีค่าพุ่งเกินและเกิดการแกว่งมากขึ้น

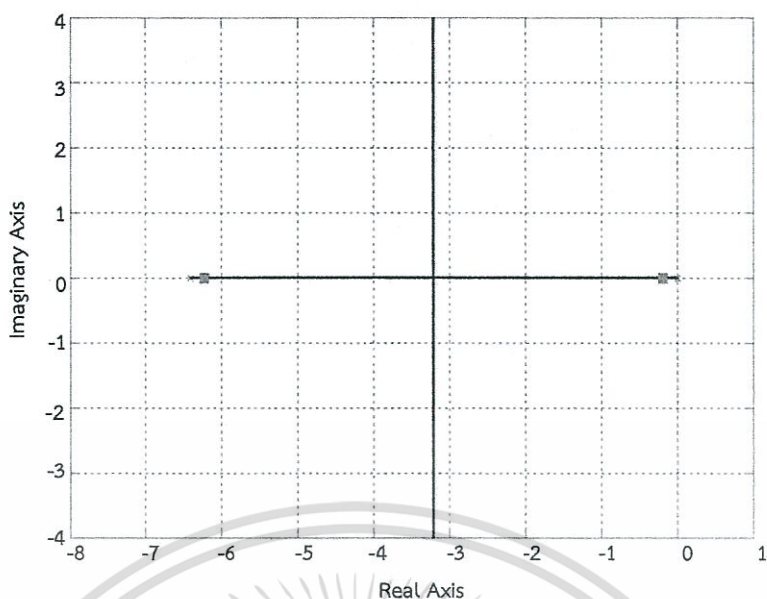


รูปที่ 4.33 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบพีของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

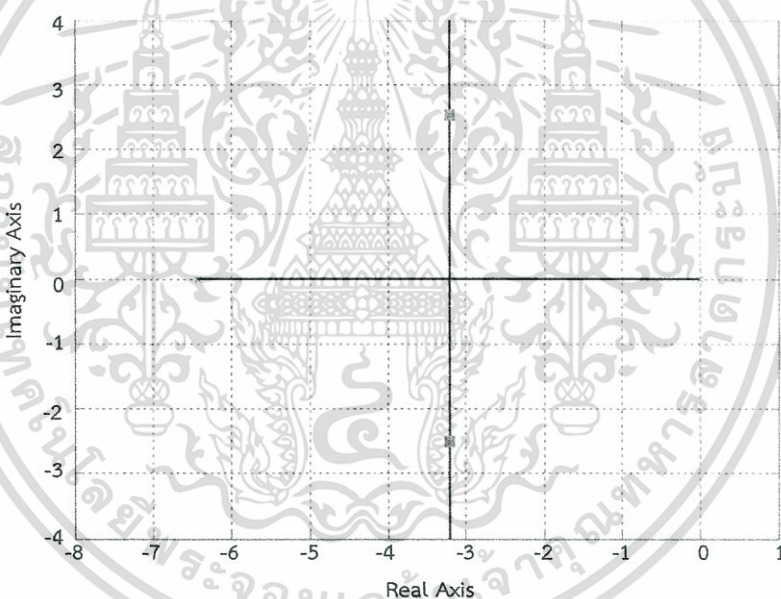


รูปที่ 4.34 แผนภาพโบดของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพี

การออกแบบตัวควบคุมแบบพี หรือการคำนวณหาค่า K_P ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการวางโพลของระบบวงเปิดโดยอาศัยเส้นทางราก (root locus) เพื่อให้ระบบมีผลตอบสนองตรงตามสมรรถนะที่กำหนดไว้ข้างต้น แต่การใช้ตัวควบคุมแบบพีอาจจะไม่สามารถปรับปรุงช่วงเวลาเข้าที่ กับปรับปรุงค่าพุ่งเกินสูงสุดพร้อมกันได้ ซึ่งอาจไม่เป็นไปตามข้อกำหนดข้างต้น และตัวควบคุมแบบพียังไม่สามารถกำจัดค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวได้



(ก) ก่อนการออกแบบ



(ข) หลังการออกแบบ

รูปที่ 4.35 เส้นทางรากของระบบควบคุมชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพี

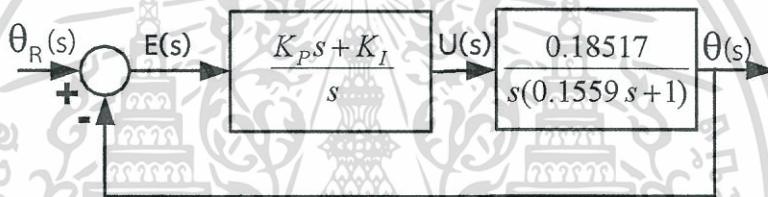
แต่อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 4.35 (ก) พบว่าระบบควบคุมนี้สามารถมีค่าช่วงเวลาเข้าที่น้อยที่สุดได้เท่ากับ 0.8 วินาที ดังนั้นจากข้อกำหนดเบื้องต้นในระบบนี้สามารถกำหนดค่าพุงเกินสูงสุดและช่วงเวลาเข้าที่ได้พร้อมกัน เนื่องจากไม่ได้ต้องการผลตอบสนองที่เร็วเท่ากับค่าสูงสุดที่ระบบนี้จะทำได้ จึงทำให้สามารถออกแบบไปตามข้อกำหนดข้างต้นได้ ดังนั้นจากข้อกำหนดทางสมรรถนะข้างต้นจึงสามารถคำนวณหาตำแหน่งโพลใหม่ได้ เมื่อทราบตำแหน่งโพลใหม่ซึ่งมีตำแหน่งอยู่ที่ $-3.21 \pm 2.51i$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก็จะสามารถคำนวณหาค่าเกณฑ์ทำให้ระบบวงปิดมีสมรรถนะตามที่กำหนดได้ซึ่งค่าเกณฑ์หรือ K_p มีค่าเท่ากับ 14 แล้วมีเส้นทางราก และตำแหน่งโพลใหม่ดังรูปที่ 4.35 (ข)

4.2.1.3 การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงมีลักษณะเป็นชนิด (type) 1 การใช้ตัวควบคุมแบบพีไอในทางทฤษฎีอาจจะเพียงพอต่อระบบ แต่ในระบบจริงนั้นอาจมีแรงเสียดทานเกิดขึ้น ซึ่งการใช้ตัวควบคุมแบบพีไออาจทำให้มีค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวได้ ดังนั้นการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอจึงจำเป็นเพื่อกำจัดค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัว แต่อาจทำให้ระบบเกิดค่าพุ่งเกินมากขึ้น และมีผลตอบสนองช้าลง ดังนั้นเพื่อให้ระบบมีสมรรถนะตรงตามที่กำหนด จึงได้นำตัวควบคุมแบบพีไอมาออกแบบซึ่งการออกแบบสามารถทำได้หลายวิธี โดยวิธีหนึ่งที่ยอมรับใช้คือวิธีการวางโพลจากฟังก์ชันถ่ายโอนระบบวงปิดดังรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.36 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบพีไอของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

จากรูปที่ 4.36 จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบวงเปิดของระบบควบคุมพีไอดังสมการที่ (4.26)

$$\frac{\theta(s)}{E(s)} = \frac{K_m(K_p s + K_I)}{s^2(T_m s + 1)} \quad (4.26)$$

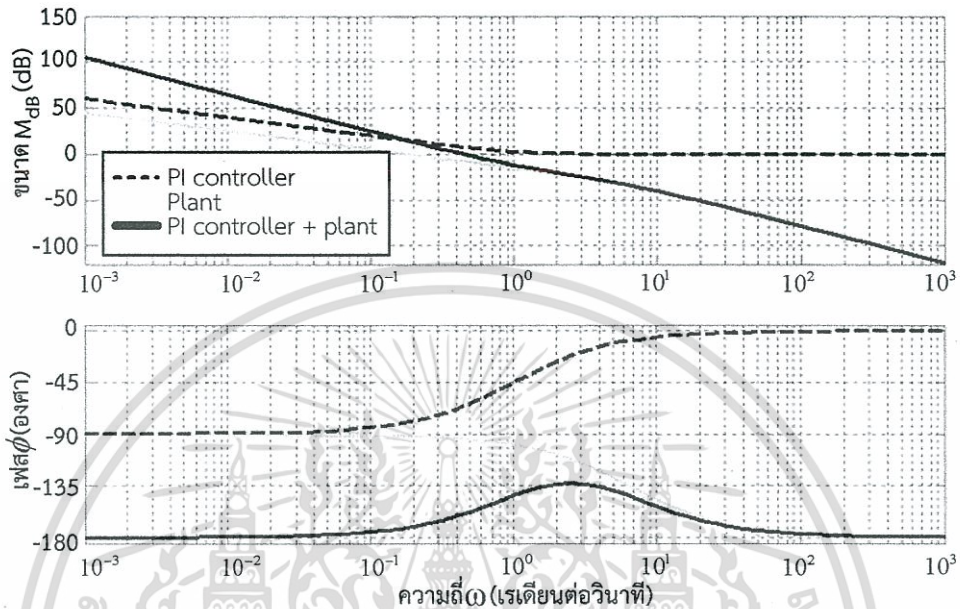
ดังนั้นจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิดดังสมการที่ (4.27)

$$\frac{\theta(s)}{\theta_R(s)} = \frac{\frac{K_m(K_p s + K_I)}{s^2(\tau_m s + 1)}}{1 + \frac{K_m(K_p s + K_I)}{s^2(\tau_m s + 1)}} = \frac{\left(\frac{K_p K_m}{\tau_m}\right)s + \left(\frac{K_I K_m}{\tau_m}\right)}{s^3 + \frac{s^2}{\tau_m} + \left(\frac{K_p K_m}{\tau_m}\right)s + \left(\frac{K_I K_m}{\tau_m}\right)} \quad (4.27)$$

จากสมการที่ (4.27) พบว่าไม่ควรออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอด้วยวิธีการวางโพล เนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิดนี้มีโพลจำนวน 3 ตัว แต่มีพารามิเตอร์ K_p และ K_I ปรับได้แค่ 2 ตัวแต่เหลือโพลอีก 1 ตัว ดังนั้นอาจทำให้ค่า K_p และ K_I ที่ได้จากการคำนวณนี้อาจไม่สามารถทำให้ระบบเกิดเสถียรภาพได้

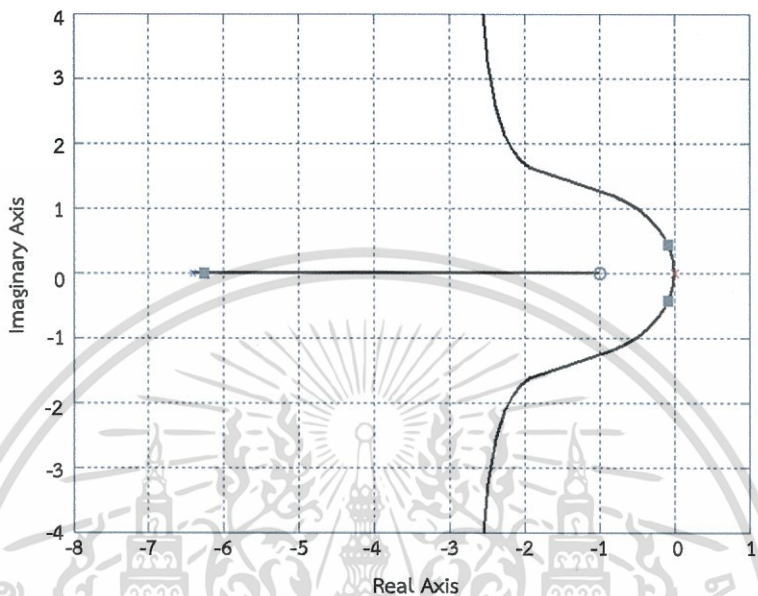


รูปที่ 4.37 แผนภาพโบดของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ

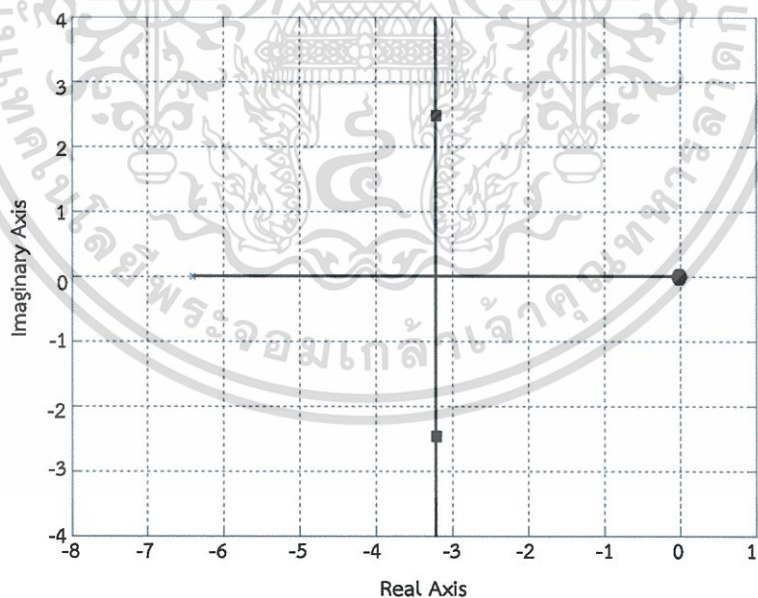
จากรูปที่ 4.37 แผนภาพโบดของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ พบว่าการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอเป็นการเพิ่มมุมตาม (phase lag) ในช่วงความถี่ต่ำให้กับระบบ และลดเฟสมาร์จินตลอดทั้งช่วงซึ่งอาจทำให้ระบบที่ได้รับการชดเชยแล้วมีเสถียรภาพลดลงโดยเกิดการแกว่งของผลตอบสนองเชิงเวลาได้ หรืออาจไม่มีเสถียรภาพได้ ดังนั้นการเลือกค่าพารามิเตอร์ K_p และ T_i ต้องเลือกอย่างเหมาะสม เพื่อรองรับเสถียรภาพและผลตอบสนองชั่วคราวที่เหมาะสมของระบบวงปิด โดยเฉพาะต้องระวังอย่างให้ผลช่วงความถี่ต่ำซึ่งมีค่าลบมาก ๆ ไปมีผลในย่านความถี่ตัดข้ามแกน ω_{cg} เดิมก่อนเพิ่มตัวควบคุมเพราะจะทำให้เกนมาร์จินของระบบลดลงมาก ส่งผลเสียต่อเสถียรภาพและสมรรถนะของระบบควบคุม โดยวิธีเลือกค่า K_p และ T_i ที่เหมาะสมให้กับระบบได้ใช้เส้นทางรากเช่นเดียวกับการออกแบบตัวควบคุมแบบพี

จากรูปที่ 4.38 (ก) พบว่าการใช้ตัวควบคุมแบบพีไออาจจะไม่สามารถทำให้ระบบวงปิดมีผลตอบสนองที่เร็วตามช่วงเวลาเข้าที่ที่กำหนดไว้ข้างต้นได้ เนื่องจากการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอเป็นการเพิ่มซีโรให้กับระบบ จึงทำให้เส้นกำกับ (asymptotes) มีตำแหน่งใกล้แกนจินตภาพ ซึ่งส่งผลให้ค่าจริงหรือ σ ที่ได้จากตำแหน่งของเส้นกำกับตัดกับแกนจริงมีค่าน้อย และทำให้ช่วงเวลาเข้าที่ที่แปรผกผันกับค่าจริงมีค่ามากขึ้น ดังนั้นการที่จะทำให้ผลตอบสนองของระบบมีสมรรถนะตรงตามข้อกำหนดจึงควรออกแบบให้เส้นกำกับมีตำแหน่งไกลจากแกนจินตภาพมากกว่าก่อนการออกแบบ โดยออกแบบให้ซีโรของตัวควบคุมมีตำแหน่งใกล้กับจุดกำเนิดมากขึ้น และวางโพลให้อยู่หนึ่งตัวให้อยู่

กับซีโร ซึ่งจากคำนวณพบว่าตำแหน่งโพลใหม่ของระบบได้เท่ากับ -0.00625 กับ $-3.2 \pm 2.47i$ และมีค่าเกนที่ทำให้ระบบวงปิดมีสมรรถนะตามที่กำหนดได้โดยมีค่า $K_p = 13.768$, $K_T = 0.086$ ซึ่งมีเส้นทางรากและตำแหน่งโพลใหม่ดังรูป 4.39 (ข)



(ก) ก่อนการออกแบบ



(ข) หลังการออกแบบ

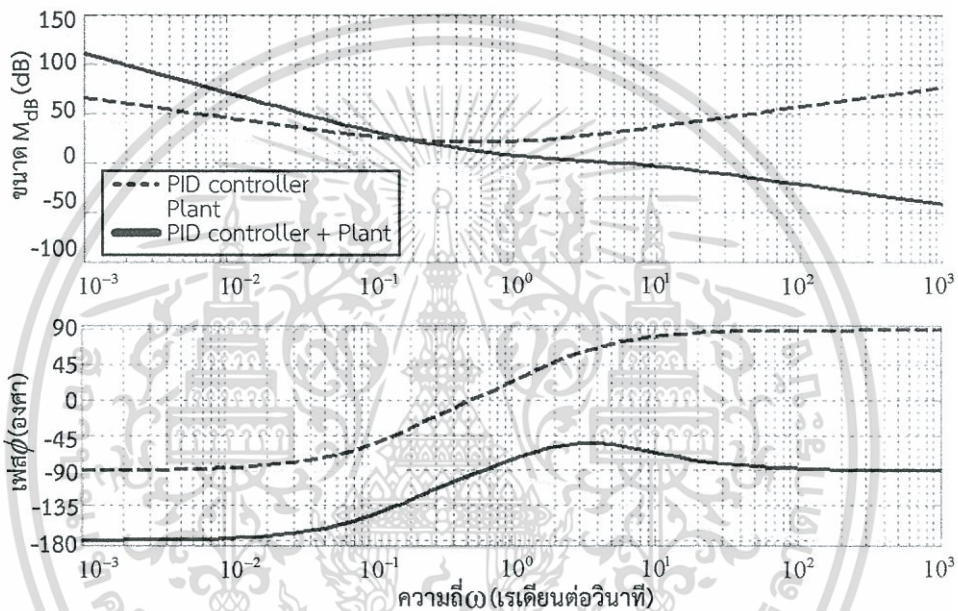
รูปที่ 4.38 เส้นทางรากของระบบควบคุมชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ

4.2.1.4 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

จากแผนภาพโบลของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีดังรูปที่

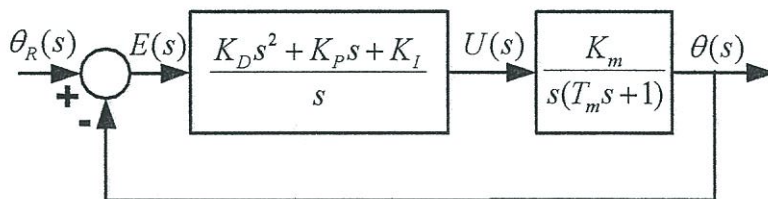
4.39 พบว่าในช่วงความถี่ต่ำมีการเพิ่มมุมตามให้กับระบบ และลดเฟสมาร์จินซึ่งอาจทำให้ระบบมีไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสถียรภาพลดลงโดยเกิดการแกว่งของผลตอบสนองเชิงเวลาได้โดยเป็นผลมาจากตัวควบคุมแบบโอแต้ในช่วงความถี่สูงพบว่าเฟสมาร์จินมีค่าเพิ่มมากขึ้นแสดงว่าระบบมีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น และจุดตัดข้ามแกน ω_{cg} มีค่ามากขึ้นแสดงว่าระบบมีผลตอบสนองเชิงเวลาเร็วขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากตัวควบคุมแบบพีและดี ดังนั้นในการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีสามารถเพิ่มเกนให้มีค่ามากได้ เนื่องจากทำให้กราฟขนาดยกขึ้นทั้งกราฟซึ่งหมายความว่าค่า ω_{cg} มีค่ามากขึ้นส่งผลให้ผลตอบสนองเชิงเวลาเร็วขึ้น และเฟสมาร์จินเพิ่มขึ้นด้วย หรือระบบมีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น แต่ในทางปฏิบัติอาจเกิดการค่อย ๆ ลู่เข้าหาค่าอ้างอิงของผลตอบสนองเชิงเวลาได้ (sluggish) ดังนั้นการเลือกค่า K_P , K_I และ K_D ต้องเลือกอย่างเหมาะสมเพื่อรองรับเสถียรภาพและผลตอบสนองชั่วคราวของระบบวงปิด



รูปที่ 4.39 แผนภาพโบดของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี

ตั้งข้อมูลที่ได้จากรูปที่ 4.39 สามารถนำมาเป็นสมมติฐานในการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีได้โดยการออกแบบจะอาศัยฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิดที่สามารถหาได้จากรูปที่ 4.40 และใช้ข้อกำหนดของช่วงเวลาเข้าที่ กับเปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินสูงสุด ที่ได้กำหนดไว้แล้วข้างต้น แล้วใช้วิธีการวางโพลเพื่อหาค่า K_P , K_I และ K_D



รูปที่ 4.40 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบพีไอดีของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

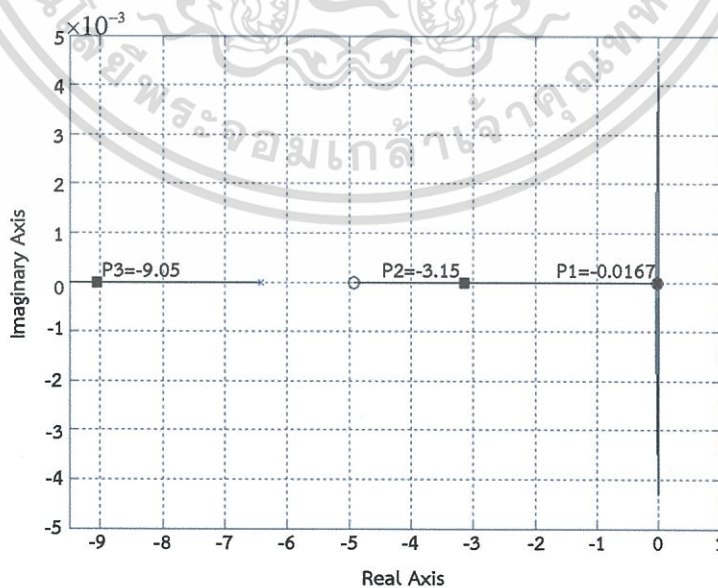
จากรูปที่ 4.40 จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงเปิดของระบบควบคุมพีไอดีดังสมการที่ (4.28)

$$\frac{\theta(s)}{E(s)} = \frac{K_m(K_D s^2 + K_P s + K_I)}{s^2(T_m s + 1)} \quad (4.28)$$

ดังนั้นจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิดดังสมการที่ (4.29)

$$\frac{\theta(s)}{\theta_R(s)} = \frac{\frac{K_m(K_D s^2 + K_P s + K_I)}{s^2(T_m s + 1)}}{1 + \frac{K_m(K_D s^2 + K_P s + K_I)}{s^2(T_m s + 1)}} = \frac{\left(\frac{K_D K_m}{T_m}\right) s^2 + \left(\frac{K_P K_m}{T_m}\right) s + \left(\frac{K_I K_m}{T_m}\right)}{s^3 + \left(1 + \frac{K_D K_m}{T_m}\right) s^2 + \left(\frac{K_P K_m}{T_m}\right) s + \left(\frac{K_I K_m}{T_m}\right)} \quad (4.29)$$

จากสมการที่ (4.29) พบว่าการออกแบบระบบควบคุมแบบพีไอดีโดยใช้วิธีการวางโพลอาจจะ เป็นวิธีที่เหมาะสมได้ เนื่องจากเมื่อวางโพล 3 ตัวให้กับระบบวงปิดนี้ และด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีมี พารามิเตอร์ K_P , K_I และ K_D จึงสามารถปรับได้ทั้ง 3 ตัวแล้วไม่เหลือโพลอีก 1 ตัวเหมือนกับ ระบบควบคุมแบบพีไอ ซึ่งจากการคำนวณภายใต้เงื่อนไขของทางสมรรถนะข้างต้น พบว่าตำแหน่ง โพลเด่นของระบบมีตำแหน่งอยู่ที่ -0.0167 โดยเลือกวางตำแหน่งโพลด้อยที่ -0.95, -3.15 แล้วแก้ สมการหาค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมซึ่งได้ค่า $K_P = 24.091$, $K_I = 0.4$, $K_D = 4.802$ และเพื่อ ตรวจสอบว่าเส้นทางเดินรากว่าสามารถเบี่ยงเบนมายังตำแหน่งโพลเด่น และโพลด้อยที่ออกแบบไว้ ข้างต้นได้หรือไม่ ดังนั้นจึงวาดเส้นทางเดินรากของระบบขึ้น ซึ่งพบว่าเส้นทางเดินรากของระบบราก ผ่าน ณ ตำแหน่งโพลเด่น และโพลด้อยที่ออกแบบไว้ได้ดังรูปที่ 4.41



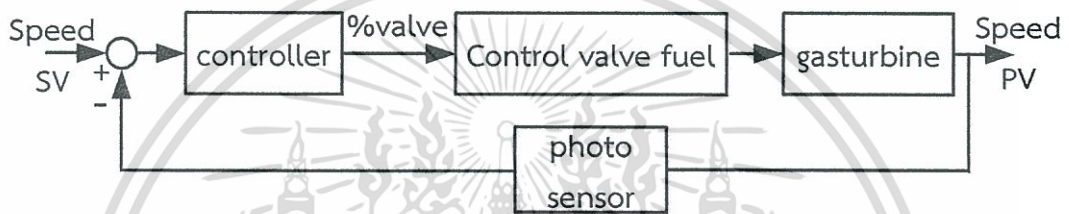
รูปที่ 4.41 เส้นทางรากของระบบควบคุมชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การควบคุมลูปนอก หรือการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซ

ในส่วนการออกแบบระบบควบคุมลูปนอก หรือระบบควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซมีลักษณะดังรูปที่ 4.42 โดยระบบควบคุมนี้ประกอบด้วยตัวควบคุมแบบป้อนกลับซึ่งมีอินพุตเป็นค่าความผิดพลาดจากความเร็วยุทธกังหันก๊าซอ้างอิงลบด้วยความเร็วยุทธกังหันก๊าซที่ได้จากกระบวนการ และมีเอาต์พุต หรือสัญญาณควบคุม คือ ตำแหน่งเปิด-ปิดวาล์วอ้างอิงซึ่งเป็นอินพุตของตัวควบคุมลูปในส่วนการออกแบบตัวควบคุมของการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซใช้วิธีลองผิดลองถูกเพื่อปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพี พีไอ พีไอดี ไอ-พี และไอ-พีดี ที่สามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงได้ เนื่องจากเครื่องยนต์กังหันก๊าซก๊าซขนาดเล็กนี้เป็นเครื่องยนต์ที่พัฒนาขึ้นเองภายในห้องปฏิบัติการ จึงไม่มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากไม่สามารถทำได้ในเวลาและงบประมาณอันจำกัดได้



รูปที่ 4.42 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซ

บทที่ 5

ผลการจำลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการจำลองการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง ผลการทดลองการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง และผลการทดลองควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซของเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก ซึ่งแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งเป็นการจำลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการออกแบบตัวควบคุมของระบบควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงในโปรแกรมแมตแล็บ ส่วนที่สองเป็นการจำลองเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพตัวควบคุมของระบบควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง ส่วนที่สามเป็นการผลการจำลองของตัวควบคุมทุกตัวมาเปรียบเทียบกัน และนำตัวควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงที่ผลการจำลองมีสมรรถนะใกล้เคียงกับข้อกำหนดมากที่สุด มาปรับแต่งค่าเกนเพื่อให้ผลการจำลองมีสมรรถนะเป็นไปตามข้อกำหนด ส่วนที่สี่เป็นการนำตัวควบคุมทั้งที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับแต่งค่าเกนแล้วมาทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงระบบจริง และในส่วนสุดท้ายเป็นการทดลองเพื่อออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซกับระบบจริงโดยอาศัยวิธีลองผิดลองถูกปรับหาค่าเกนของตัวควบคุม

5.1 ผลการจำลองการควบคุมตำแหน่งเปิดของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

เมื่อสามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงได้ดังสมการที่ (4.25) จึงนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มาใช้ในการออกแบบตัวควบคุม โดยตัวควบคุมที่นำมาใช้ในการออกแบบประกอบด้วยตัวควบคุมแบบพี พีไอ และพีไอดี อย่างไรก็ตามเมื่อทราบถึงค่าเกนของตัวควบคุมเหล่านี้แล้ว ขั้นตอนหนึ่งที่จะต้องทำก่อนจะนำตัวควบคุมไปใช้ในการควบคุมระบบจริงก็คือ ขั้นตอนการจำลอง ซึ่งในหัวข้อนี้จะจำลองโดยอาศัยโปรแกรมแมตแล็บ โดยการจำลองเป็นการจำลองเพื่อยืนยันความถูกต้องในการออกแบบตัวควบคุม นอกจากนั้นจะเพิ่มการจำลองเมื่อพิจารณาถึงผลที่เกิดขึ้นจริงในระบบการควบคุม ได้แก่ การอิมพัลส์ของสัญญาณควบคุม และแรงเสียดทานสถิตย์ชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง โดยแบ่งการจำลองออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ กรณีที่หนึ่งเป็นการจำลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการออกแบบตัวควบคุมโดยไม่คำนึงและคำนึงถึงการอิมพัลส์ของสัญญาณควบคุม กรณีที่สองเป็นการจำลองระบบควบคุมโดยคำนึงถึงการอิมพัลส์ของสัญญาณควบคุมและคำนึงถึงแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง และกรณีที่สามเป็นการนำตัวควบคุมที่มีสมรรถนะของผลตอบสนองใกล้เคียงกับข้อกำหนดทางสมรรถนะมากที่สุดในกรณีที่สองไปปรับค่าเกนให้ได้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะตรงตามข้อกำหนด และนำไปจำลองควบคุมระบบโดยคำนึงถึงการอิมพัลส์ของสัญญาณควบคุมและคำนึงถึงแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.1 การจำลองกรณีไม่คำนึงและคำนึงถึงการอึดตัวของสัญญาณควบคุม

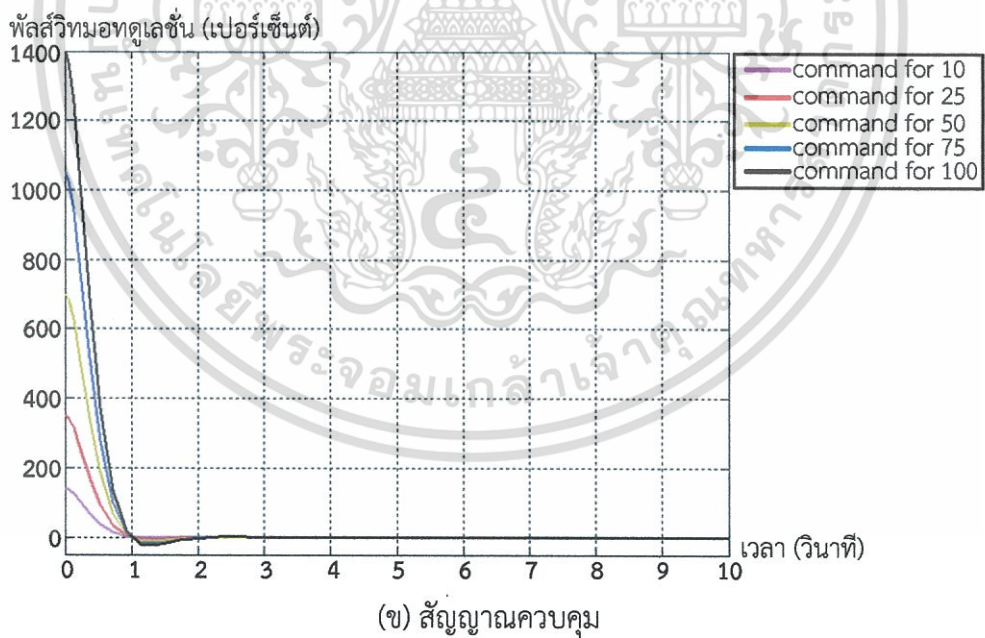
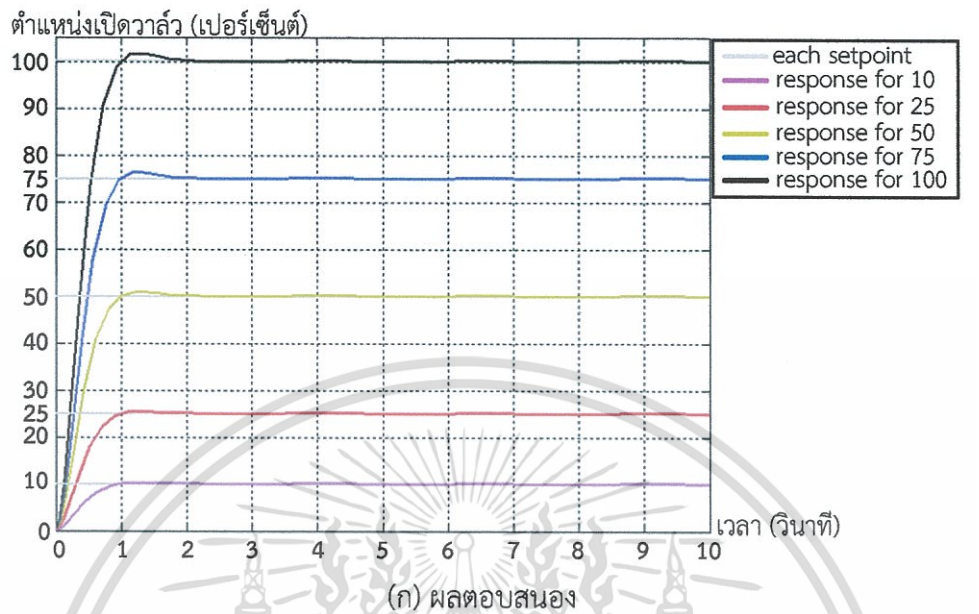
ในหัวข้อนี้เป็นการจำลองการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเพลิงเพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการออกแบบตัวควบคุมโดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี กรณีที่หนึ่งเป็นการจำลองโดยไม่คำนึงถึงการอึดตัวของสัญญาณควบคุม และกรณีที่สองเป็นการจำลองโดยคำนึงถึงการอึดตัวของสัญญาณควบคุม เนื่องจากการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงในระบบจริงมีข้อจำกัดในการจ่ายพลังงานไฟฟ้า ซึ่งการจ่ายพลังงานไฟฟ้าสามารถจ่ายได้สูงสุดที่พิกัด 12 โวลต์ หรือจ่ายเป็นสัญญาณพัลส์วิทมอดูเลชันได้สูงสุด 100 เปอร์เซ็นต์ โดยการจำลองทั้งสองกรณีจะควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10, 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์

5.1.1.1 ผลการจำลองตัวควบคุมแบบพี

ในหัวข้อนี้เป็นการจำลองการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการออกแบบตัวควบคุมแบบพี ซึ่งตัวควบคุมแบบพีมีค่าเกณฑ์ที่ได้จากการออกแบบคือ $K_p = 14$ โดยแบ่งการจำลองออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่หนึ่งเป็นการจำลองโดยไม่คำนึงถึงการอึดตัวของสัญญาณควบคุมได้ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 5.1 และกรณีที่ 2 เป็นการจำลองโดยคำนึงถึงการอึดตัวของสัญญาณควบคุมแสดงผลการจำลองดังรูปที่ 5.2 โดยการจำลองทั้งสองกรณีจะควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10, 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์

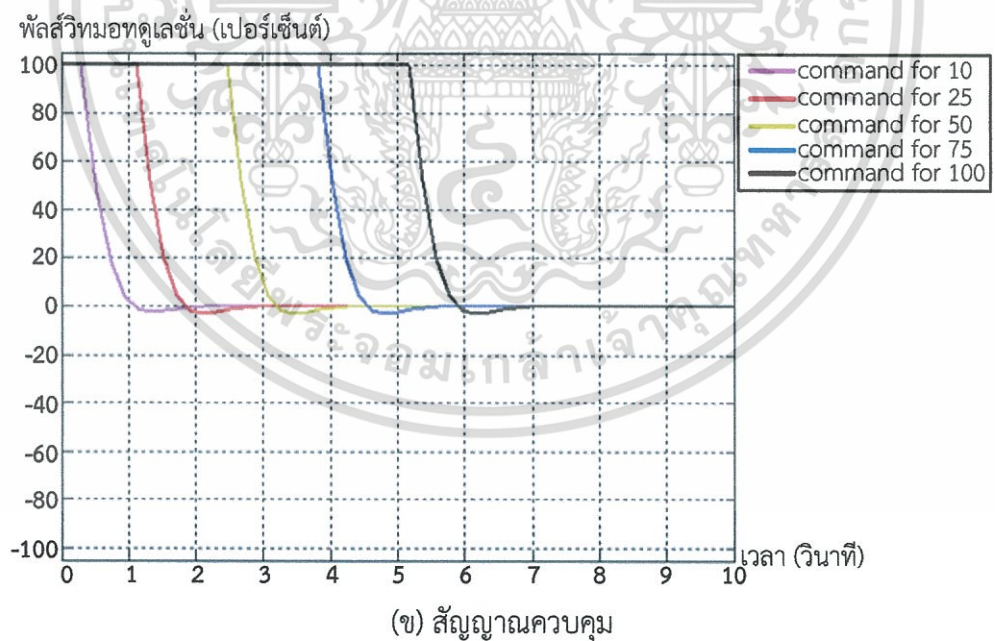
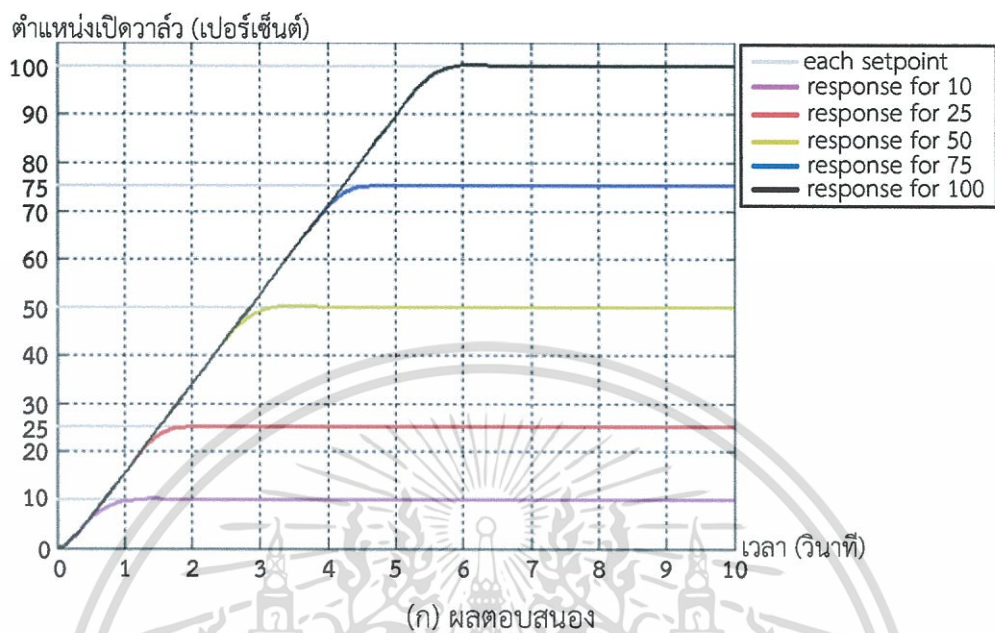
จากผลการจำลองการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10, 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยไม่คำนึงถึงการอึดตัวของสัญญาณควบคุมดังรูปที่ 5.1 พบว่าตัวควบคุมแบบพีสามารถควบคุมให้วาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเปิดจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10, 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ได้ โดยมีค่าพุ่งเกินสูงสุดประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์และมีช่วงเวลาเข้าที่ประมาณ 1 วินาที ซึ่งตรงตามที่ออกแบบไว้ดังรูปที่ 5.1 (ก) อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณาจากสัญญาณควบคุมที่แสดงดังรูปที่ 5.1 (ข) พบว่าตัวควบคุมแบบพีต้องจ่ายสัญญาณควบคุมมากกว่า 100 เปอร์เซ็นต์เพื่อควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงไปยังทุกตำแหน่งอ้างอิงโดยมีค่าพุ่งเกินและช่วงเวลาเข้าตรงตามที่ออกแบบไว้ ซึ่งไม่สามารถทำได้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นในการจำลองจึงควรคำนึงถึงการอึดตัวของสัญญาณควบคุม

จากผลการจำลองการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10, 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีโดยคำนึงถึงการอึดตัวของสัญญาณควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.2 พบว่าตัวควบคุมแบบพีสามารถควบคุมให้วาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเปิดจากตำแหน่ง 0 เปอร์เซ็นต์ไปยังทุกตำแหน่งอ้างอิงที่กำหนดไว้ได้โดยมีค่าพุ่งเกินสูงสุดตรงตามที่ออกแบบไว้ดังรูปที่ 5.2 (ก) แต่มีช่วงเวลาเข้าที่มากกว่า 1 วินาทีเนื่องจากเกิดการอึดตัวของสัญญาณควบคุมดังรูปที่ 5.2 (ข) โดยการควบคุมที่มีตำแหน่งอ้างอิง 100 เปอร์เซ็นต์มีช่วงเวลาเข้าที่มากที่สุดซึ่งมีค่าประมาณ 5.5 วินาที เนื่องจากการอึดตัวของสัญญาณควบคุมมากที่สุด



รูปที่ 5.1 ผลการจำลองการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพี โดยไม่คำนึงถึงการอิ่มตัวของสัญญาณควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

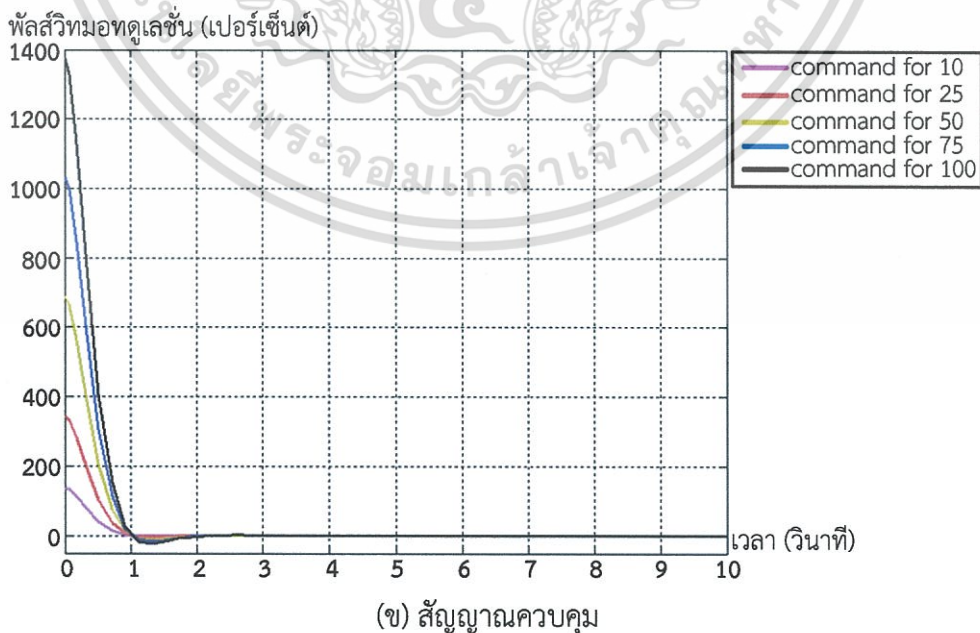
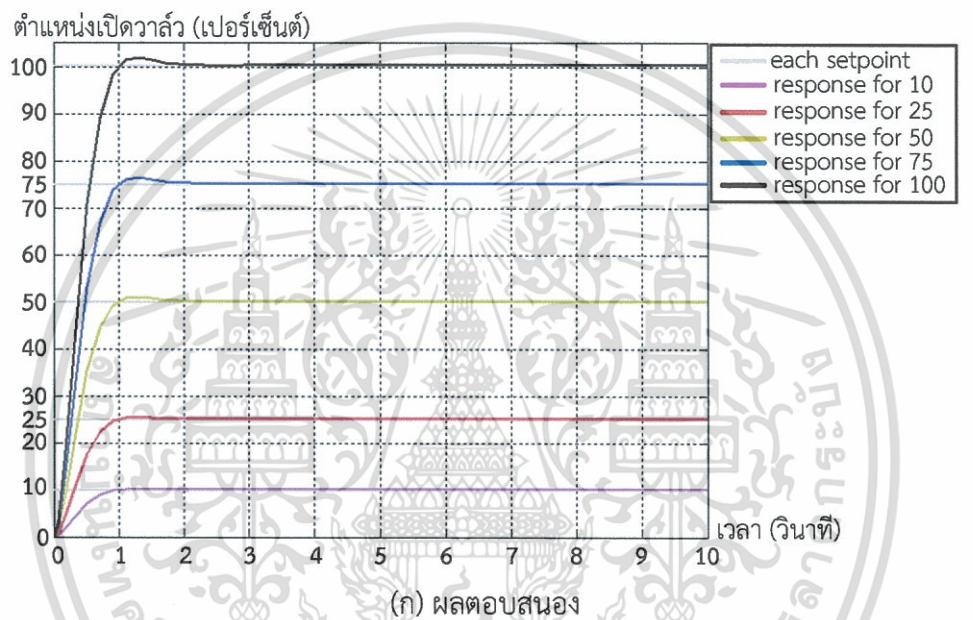


รูปที่ 5.2 ผลการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพี โดยคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.1.2 ผลการจำลองตัวควบคุมแบบพีไอ

ในหัวข้อนี้เป็นการจำลองการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ ซึ่งตัวควบคุมแบบพีไอมีค่าเกณฑ์ที่ได้จากการออกแบบคือ $K_p = 13.768$ และ $K_I = 0.086$ โดยแบ่งการจำลองออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่หนึ่งเป็นการจำลองโดยไม่มีการคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุม และกรณีที่สองเป็นการจำลองโดยคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุม แสดงผลการจำลองดังรูปที่ 5.3 และ 5.4 ตามลำดับ โดยที่การจำลองทั้งสองกรณีจะควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10, 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์

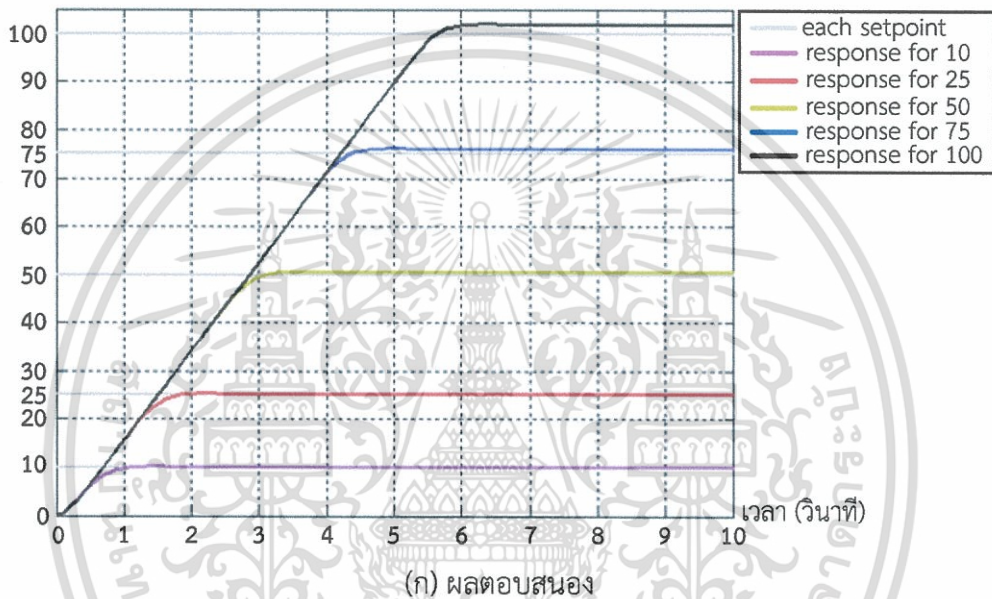


รูปที่ 5.3 ผลการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ

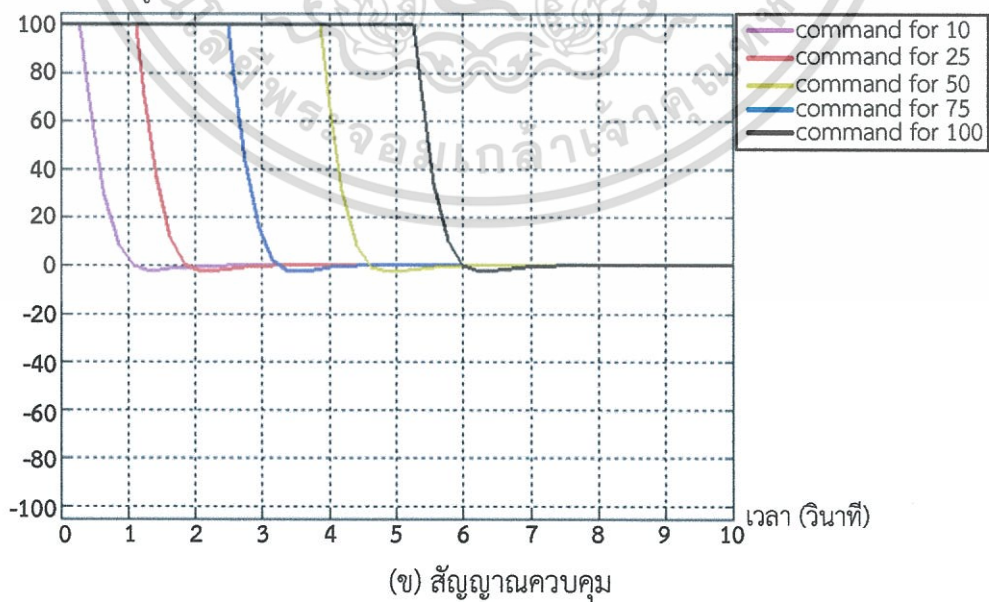
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับโดยไม่คำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการจำลองการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10, 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยไม่คำนึงถึงการอิ่มตัวของสัญญาณควบคุม ดังรูปที่ 5.3 พบว่าตัวควบคุมแบบพีไอสามารถควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจาก 0 ไปยังทุกตำแหน่งอ้างอิงได้ โดยมีค่าพุงเกินสูงสุดและมีช่วงเวลาเข้าที่ตรงตามทีออกแบบไว้ดังรูปที่ 5.3 (ก) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากสัญญาณควบคุมที่แสดงดังรูปที่ 5.3 (ข) พบว่าตัวควบคุมแบบพีไอต้องจ่ายสัญญาณควบคุมมากกว่า 100 เปอร์เซ็นต์เพื่อควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงไปยังทุกตำแหน่งอ้างอิงโดยมีค่าพุงเกินและช่วงเวลาเข้าตรงตามทีออกแบบไว้ ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถทำได้

ตำแหน่งเปิดวาล์ว (เปอร์เซ็นต์)



พัลส์วิหฆอหตุเลขัน (เปอร์เซ็นต์)



รูปที่ 5.4 ผลการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ

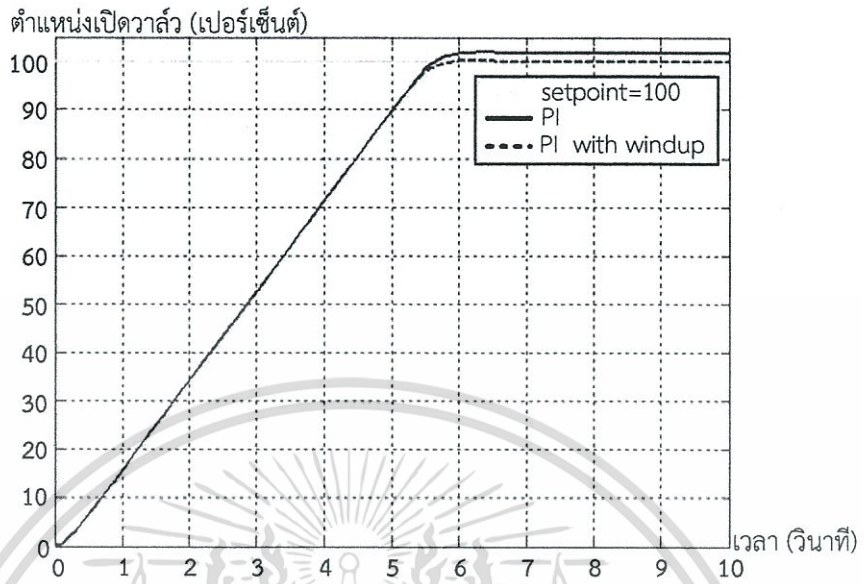
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการอ้างอิงถึงการอิ่มตัวของสัญญาณควบคุมให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10, 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอโดยคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมดังรูปที่ 5.4 พบว่าตัวควบคุมแบบพีไอสามารถควบคุมให้วาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเปิดจากตำแหน่ง 0 เปอร์เซ็นต์ไปยังทุกตำแหน่งอ้างอิงที่กำหนดไว้ได้โดยมีค่าพุ่งเกินสูงสุดใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้ดังรูปที่ 5.4 (ก) แต่มีช่วงเวลาเข้าที่มากกว่า 1 วินาทีซึ่งไม่ตรงตามการออกแบบ เนื่องจากเกิดการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมดังรูปที่ 5.4 (ข) โดยการควบคุมที่มีตำแหน่งอ้างอิงเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์มีช่วงเวลาเข้าที่และค่าพุ่งเกินมากที่สุดซึ่งมีค่าประมาณ 5.47 วินาที และในช่วงก่อนผลตอบสนองเข้าสู่สภาวะคงตัวยังคงมีค่าความผิดพลาดของตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงอยู่ซึ่งต้องใช้เวลาานานมากจึงค่อย ๆ ลู่เข้าหาตำแหน่งอ้างอิงได้ ซึ่งเกิดจากการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมประกอบกับตัวควบคุมแบบพีไอมีตัวอินทิเกรเตอร์จึงเกิดการสะสมสัญญาณควบคุมเพิ่มมากขึ้นไปอีก ซึ่งมีผลให้เมื่อเกิดค่าพุ่งเกินแล้วต้องใช้เวลาานานมากขึ้นเพื่อให้ตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงกลับเข้าสู่ตำแหน่งอ้างอิง อย่างไรก็ตามเราสามารถกำจัดการค่อย ๆ ลู่เข้าหาตำแหน่งอ้างอิง และการเกิดค่าความผิดพลาดในช่วงก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ โดยการนำตัวควบคุมแบบพีไอไปทำงานร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัพ การจำลองได้จำลองการควบคุมเปิดวาล์วจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 100 เปอร์เซ็นต์เพียงตำแหน่งเดียวโดยคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุม เนื่องจากมีค่าพุ่งเกินสูงสุด และค่าความผิดพลาดในช่วงก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ชัดเจนแสดงผลการจำลองดังรูปที่ 5.5

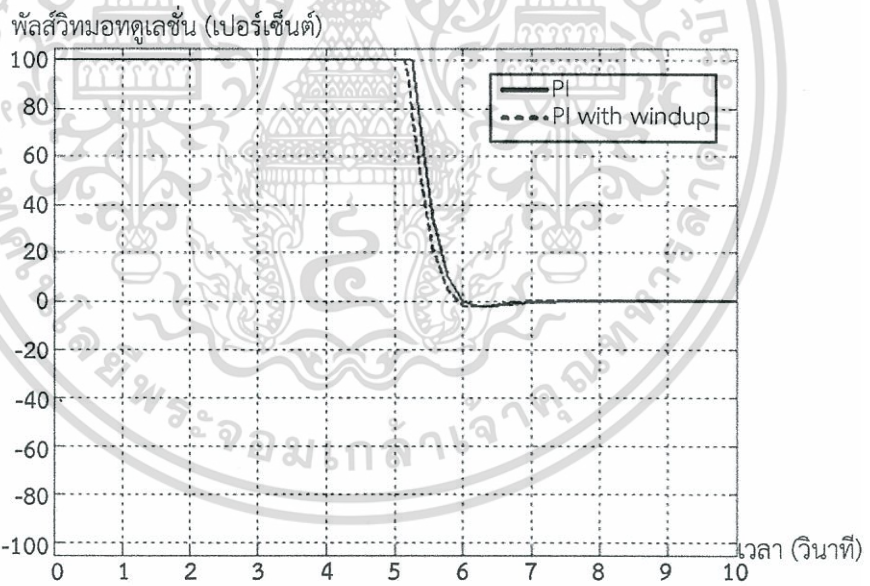
จากผลการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจาก 0 ไปยัง 100 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัพโดยคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมดังรูปที่ 5.5 (ก) พบว่าตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัพสามารถควบคุมให้วาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเปิดจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 100 เปอร์เซ็นต์ได้โดยไม่เกิดค่าพุ่งเกิน ไม่เกิดค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัว และไม่เกิดการค่อย ๆ ลู่เข้าหาตำแหน่งอ้างอิง ซึ่งเป็นผลตอบสนองที่ดีกว่าใช้ตัวควบคุมแบบพีไอเพียงอย่างเดียว แต่เมื่อพิจารณาจากสัญญาณควบคุมดังรูปที่ 5.5 (ข) พบว่ายังคงมีการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมจึงทำให้ช่วงเวลาเข้าที่มีค่ามากกว่า 1 วินาที

5.1.1.3 ผลการจำลองตัวควบคุมแบบพีไอดี

ในหัวข้อนี้เป็นการจำลองการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งตัวควบคุมแบบพีไอดีมีค่าเกณฑ์ที่ได้จากการออกแบบคือ $K_P = 24.091$, $K_I = 0.4$ และ $K_D = 4.802$ โดยแบ่งการจำลองออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่หนึ่งเป็นการจำลองโดยไม่มีคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุม และกรณีที่สองเป็นการจำลองโดยคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมแสดงผลการจำลองดังรูปที่ 5.7 และ 5.8 ตามลำดับโดยที่การจำลองทั้งสองกรณีจะควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10, 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์



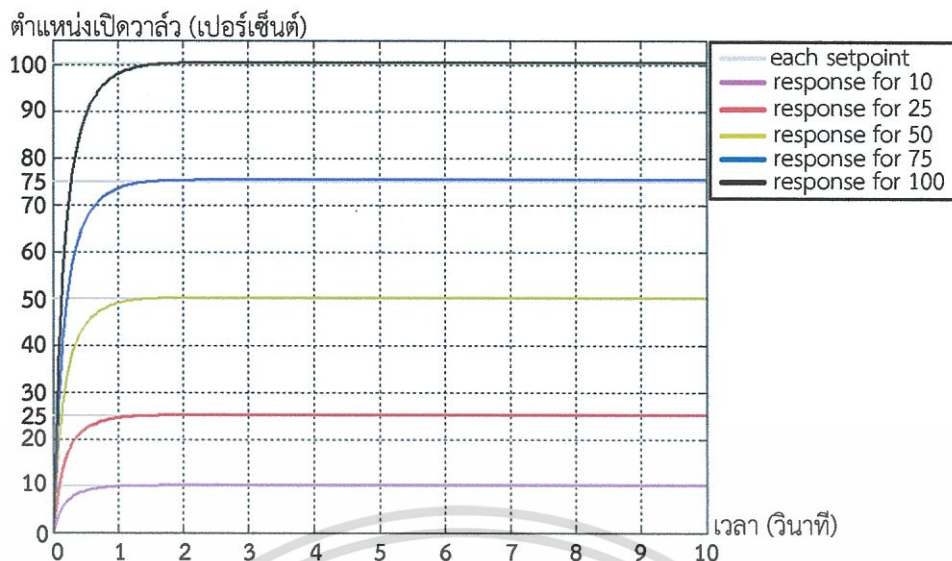
(ก) ผลตอบสนอง



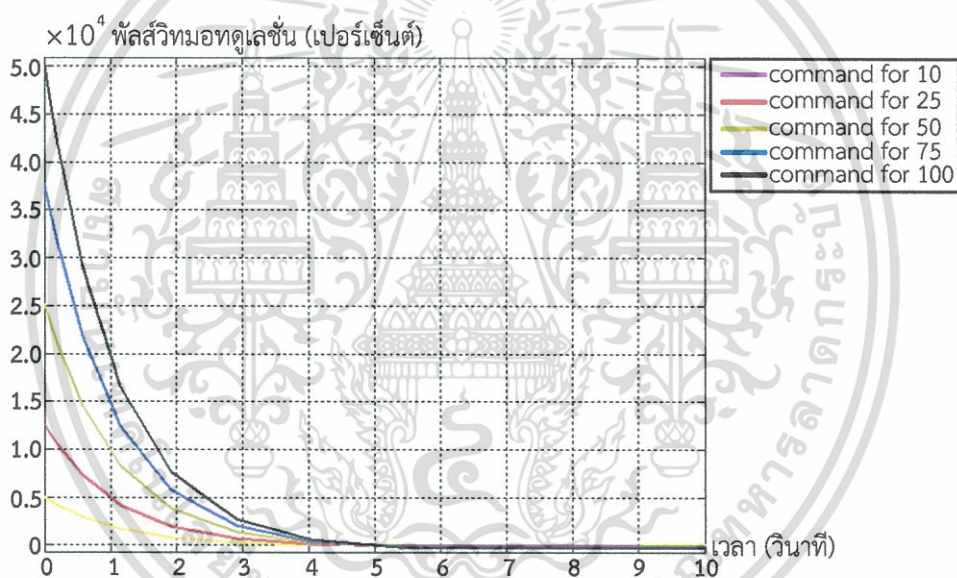
(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 5.5 ผลการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



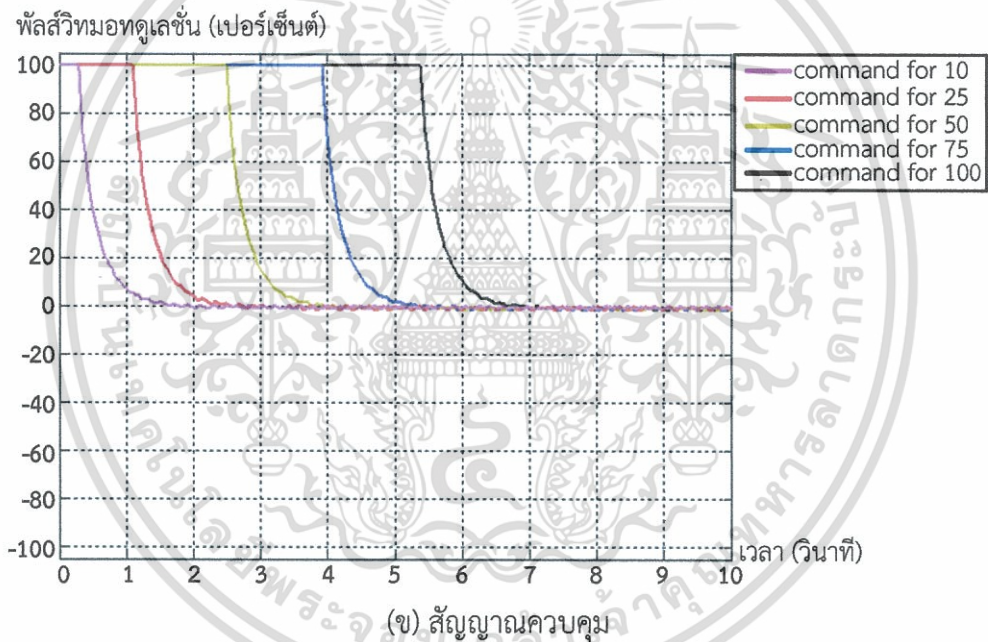
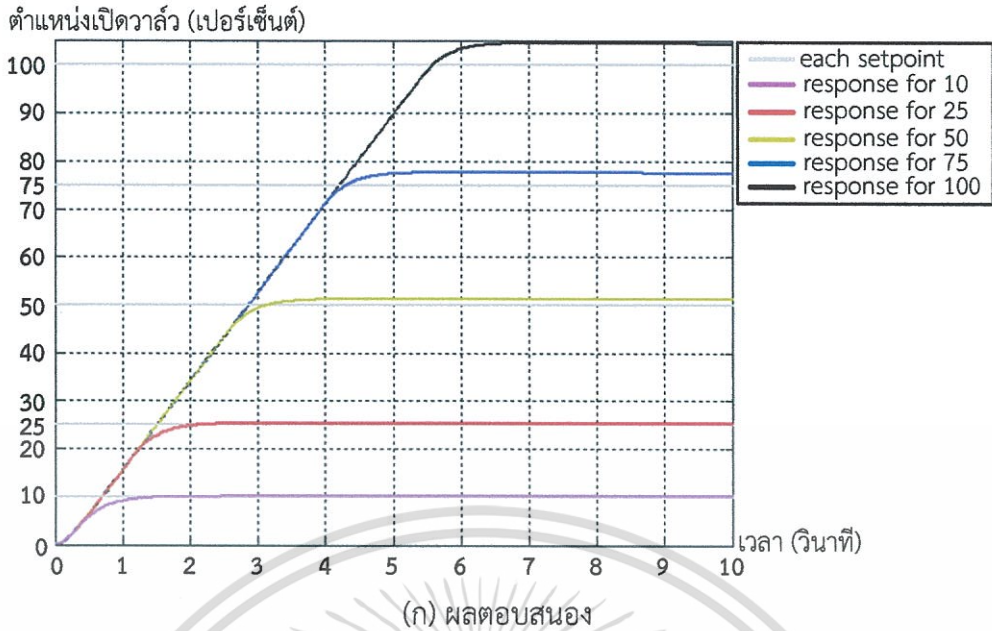
(ก) ผลตอบสนอง



(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 5.7 ผลการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี
โดยไม่คำนึงถึงการอิ่มตัวของสัญญาณควบคุม

จากผลการจำลองการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10, 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยไม่คำนึงถึงการอิ่มตัวของสัญญาณควบคุม ดังรูปที่ 5.7 พบว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีสามารถควบคุมให้วาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเปิดจากตำแหน่ง 0 ไปยังทุกตำแหน่งอ้างอิงได้ โดยมีค่าพุ่งสูงสุดเกินประมาณ 0.3 เปอร์เซ็นต์ซึ่งดีกว่าที่ออกแบบไว้ และมีช่วงเวลาเข้าที่ประมาณ 1 วินาทีซึ่งตรงตามที่ออกแบบไว้ดังรูปที่ 5.7 (ก) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากสัญญาณควบคุมที่แสดงดังรูปที่ 5.7 (ข) พบว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีจ่ายสัญญาณควบคุมมากกว่า 100 เปอร์เซ็นต์เพื่อควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงไปยังทุกตำแหน่งอ้างอิง

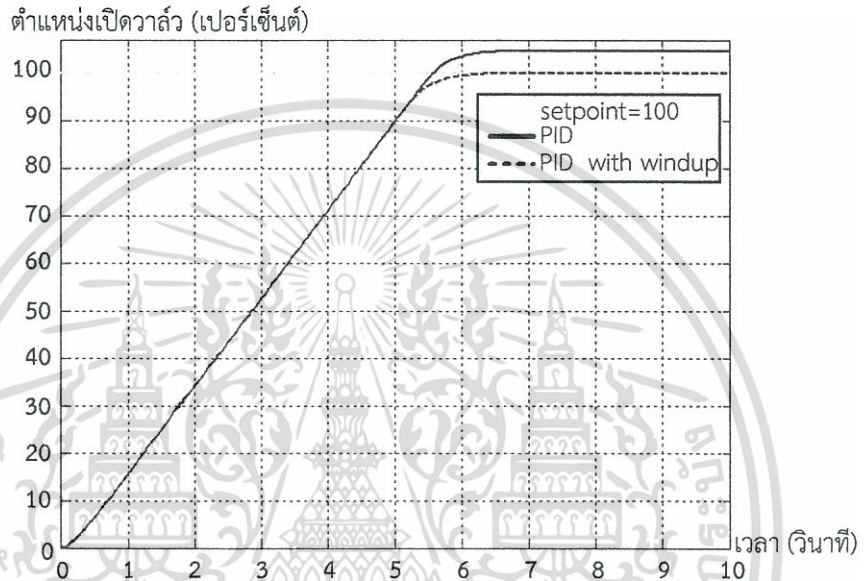


รูปที่ 5.8 ผลการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยคำนึงถึงการอิ่มตัวของสัญญาณควบคุม

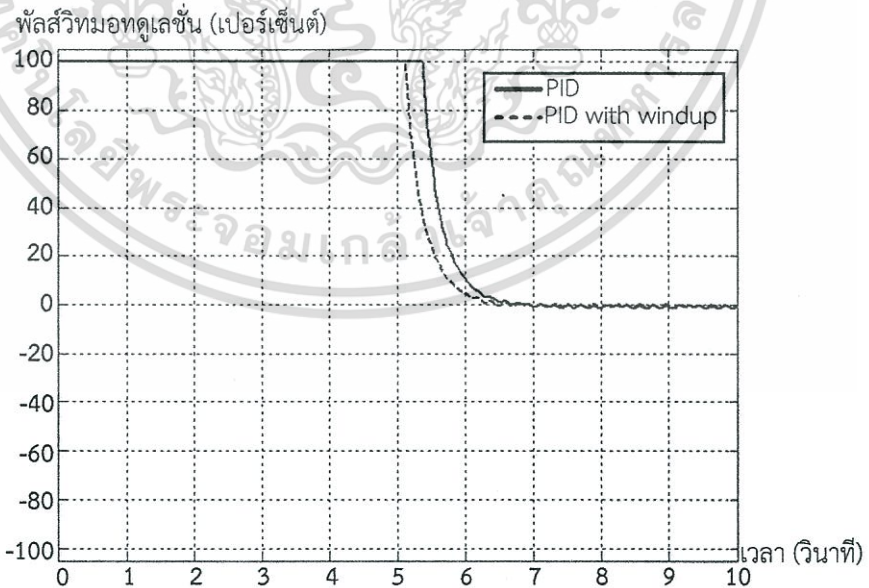
จากผลการจำลองการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10, 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยคำนึงถึงการอิ่มตัวของสัญญาณควบคุมดังรูปที่ 5.8 พบว่าการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10 และ 25 เปอร์เซ็นต์ผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกินสูงสุดใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้ แต่ในส่วนของ การควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์มีค่าพุ่งเกินสูงสุดมากกว่าที่ออกแบบไว้โดยมีค่าเท่ากับ 2.45, 3.54 และ 4.64 ตามลำดับ โดยในทุก ๆ การควบคุม

ผลตอบสนองมีช่วงเวลาเข้าที่มากกว่า 1 วินาที เนื่องจากเกิดการอิ่มตัวของสัญญาณควบคุมดังรูปที่ 5.8 (ข) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสัญญาณควบคุมมีค่าเกินขีดจำกัดของตัวควบคุม ทำให้เกิดการอิ่มตัวของสัญญาณควบคุม ซึ่งจะทำให้การตอบสนองของระบบช้าลงและไม่สามารถปรับค่าได้อย่างที่ต้องการอีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.8 (ข) และในช่วงผลตอบสนองก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวยังคงมีค่าความผิดพลาดซึ่งต้องใช้เวลานานมากจึงค่อย ๆ ลู่เข้าหาตำแหน่งอ้างอิงซึ่งมีสาเหตุมาจากที่ตัวควบคุมแบบพีไอไม่มีตัวอินทิเกรเตอร์อยู่ในตัวควบคุมเช่นเดียวกับตัวควบคุมแบบพีไอ อย่างไรก็ตามเราสามารถกำจัดการค่อย ๆ ลู่เข้าหาตำแหน่งอ้างอิง และการเกิดค่าความผิดพลาดในช่วงก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ โดยการนำตัวควบคุมแบบพีไอดีไปทำงานร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทววินด์อัป การจำลองได้จำลองการควบคุมเปิดวาล์วจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 100 เปอร์เซ็นต์เพียงตำแหน่งเดียว เนื่องจากมีค่าพุงเกินสูงสุด และค่าความผิดพลาดในช่วงก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวชัดเจนที่สุดแสดงผลการจำลองดังรูปที่ 5.9



(ก) ผลตอบสนอง



(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 5.9 ผลการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทววินด์อัป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการจำลองการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 100 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์ออฟโดยคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมดังรูปที่ 5.9 พบว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์ออฟสามารถควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจาก 0 ไปยัง 100 เปอร์เซ็นต์ได้โดยไม่เกิดค่าพุ่งเกิน ไม่เกิดการค้อย ๆ ลู่เข้าหาตำแหน่งอ้างอิง และไม่เกิดค่าความผิดพลาด ซึ่งเป็นผลตอบสนองที่ดีกว่าใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีเพียงอย่างเดียว แต่ในส่วนของช่วงเวลาเข้าที่ยังคงมีค่ามากกว่า 1 วินาทีเนื่องจากยังมีเกิดการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมอยู่

5.1.2 การจำลองกรณีคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุม และแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

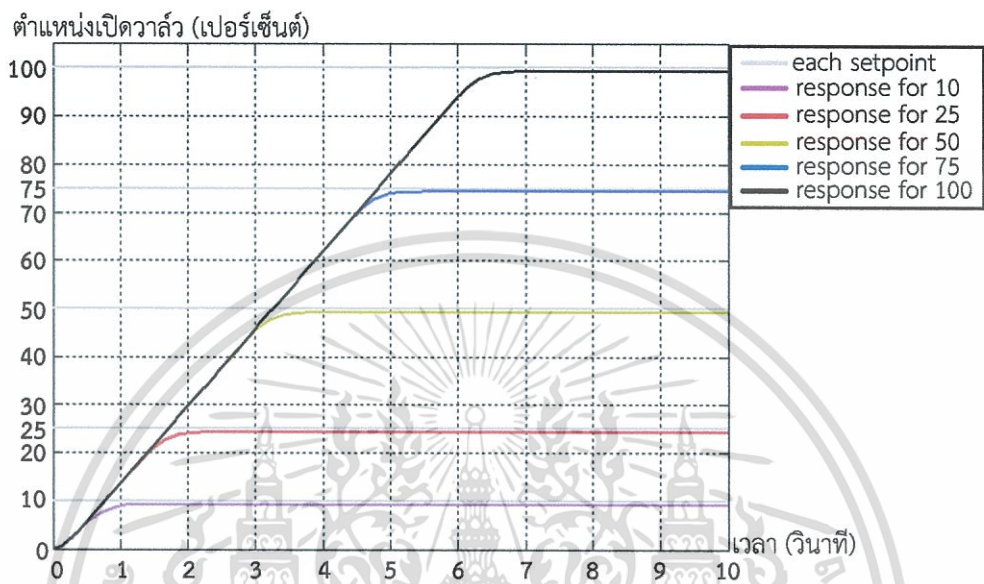
เนื่องจากชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงในระบบจริงมีแรงเสียดทานสถิตย์ที่เกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างมอเตอร์กับนิตเด็ลวาล์วด้วยคัปปลิ่ง รวมทั้งแรงเสียดทานสถิตย์ที่เกิดจากตัวนิตเด็ลวาล์ว และมอเตอร์เองด้วย ซึ่งทำให้ไม่สามารถควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงได้เมื่อตัวควบคุมจ่ายสัญญาณพัลส์วิทมอดูลุเลชั่นต่ำกว่า 13 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นเพื่อให้การจำลองมีความใกล้เคียงกับระบบจริงมากยิ่งขึ้น ในหัวข้อนี้จึงเป็นการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10, 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยมีการคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมและแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

5.1.2.1 ผลการจำลองตัวควบคุมแบบพี

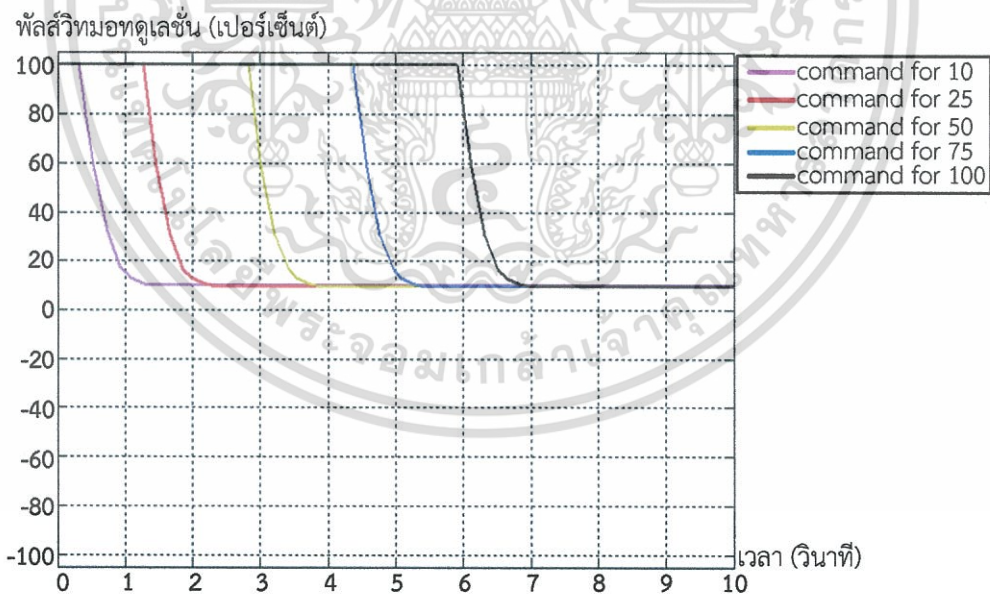
เพื่อให้การจำลองการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีมีความใกล้เคียงกับระบบจริงมากยิ่งขึ้น ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงเป็นการจำลองการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10, 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพี โดยคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุม และแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง ซึ่งตัวควบคุมแบบพีมีค่าเกนที่ได้จากการออกแบบ $K_p = 14$ แสดงผลการจำลองดังรูปที่ 5.10

จากผลการจำลองการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีโดยคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมและแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงดังรูปที่ 5.10 พบว่าตัวควบคุมแบบพีไม่สามารถควบคุมให้วาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเปิดจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10 และ 50 เปอร์เซ็นต์ได้โดยมีค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวเท่ากับ 7 และ 2.82 เปอร์เซ็นต์ซึ่งเป็นค่าที่ไม่สามารถยอมรับได้ โดยในส่วนของ การควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ตัวควบคุมแบบพีสามารถควบคุมให้ตำแหน่งเปิดวาล์วเข้าสู่ตำแหน่งอ้างอิงได้โดยไม่เกิดค่าพุ่งเกินและมีค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวที่สามารถยอมรับได้ แต่ในทุก ๆ การควบคุมมีช่วงเวลาเข้าที่มากกว่า 1 วินาที และมีค่ามากกว่าการจำลองกรณีคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมเพียงอย่างเดียวเนื่องจากในการจำลองนี้ได้มีการคำนึงถึงแรงเสียดทานสถิตย์ด้วย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากสัญญาณควบคุมของการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจาก 0 ไปยังทุก ๆ ตำแหน่งอ้างอิง จะพบว่าตัวควบคุมยังคงมีการจ่ายสัญญาณควบคุมอยู่ แต่เนื่องจากสัญญาณควบคุมมีค่าน้อยกว่า 13 เปอร์เซ็นต์ซึ่งไม่สามารถเอาชนะแรงเสียดสถิตย์ได้จึงส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงไปยังตำแหน่งอ้างอิงได้



(ก) ผลตอบสนอง

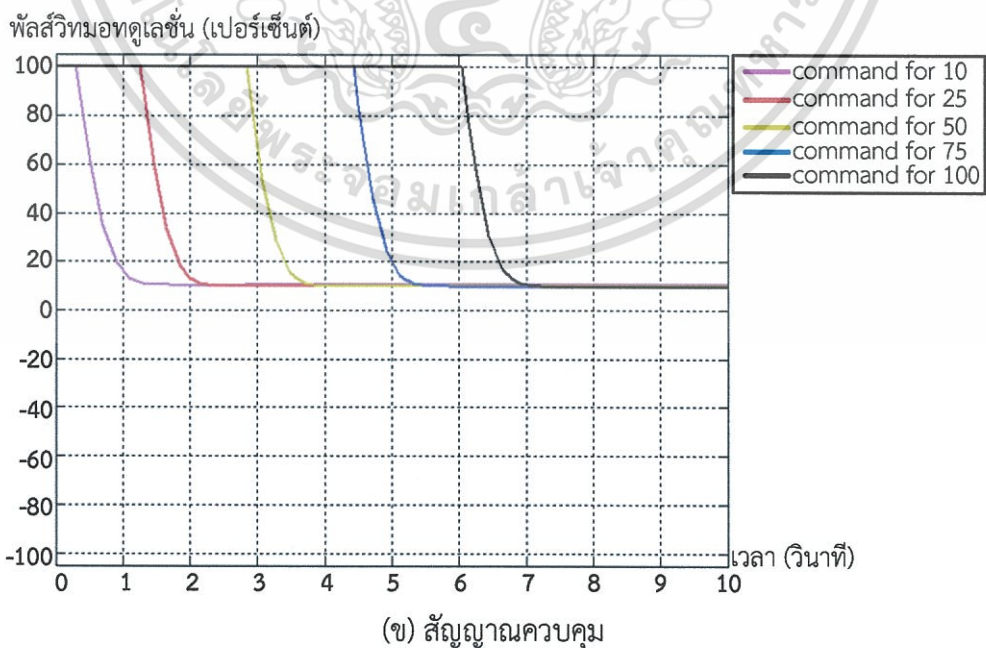
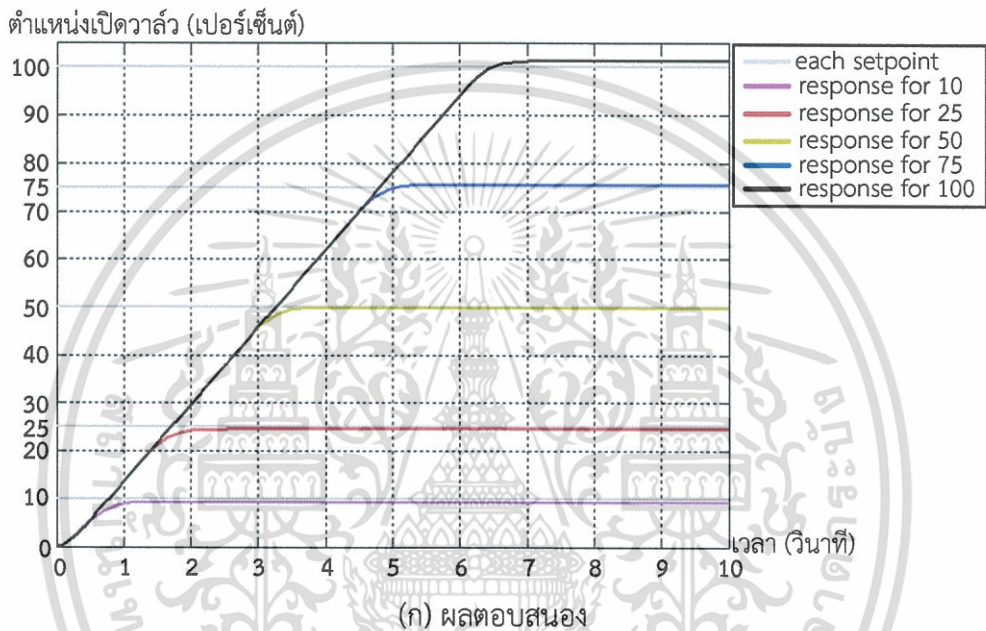


(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 5.10 ผลการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพี โดยคำนึงถึงการอิ่มตัวของสัญญาณควบคุมและแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

5.1.2.2 ผลการจำลองตัวควบคุมแบบพีไอ

เพื่อให้การจำลองการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอมีความใกล้เคียงกับระบบจริงมากยิ่งขึ้น ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงใช้โปรแกรมแมตแล็บจำลองการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10, 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอโดยคำนึงถึงการอิ่มตัวของสัญญาณควบคุมและแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง ซึ่งตัวควบคุมแบบพีไอมีค่าเกณฑ์ที่ได้จากการออกแบบคือ $K_P = 13.768$ และ $K_I = 0.086$ แสดงผลจากการจำลองดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 ผลการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ

เอกสาร โดยคำนึงถึงการอิ่มตัวของสัญญาณควบคุมและแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง ราคา
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

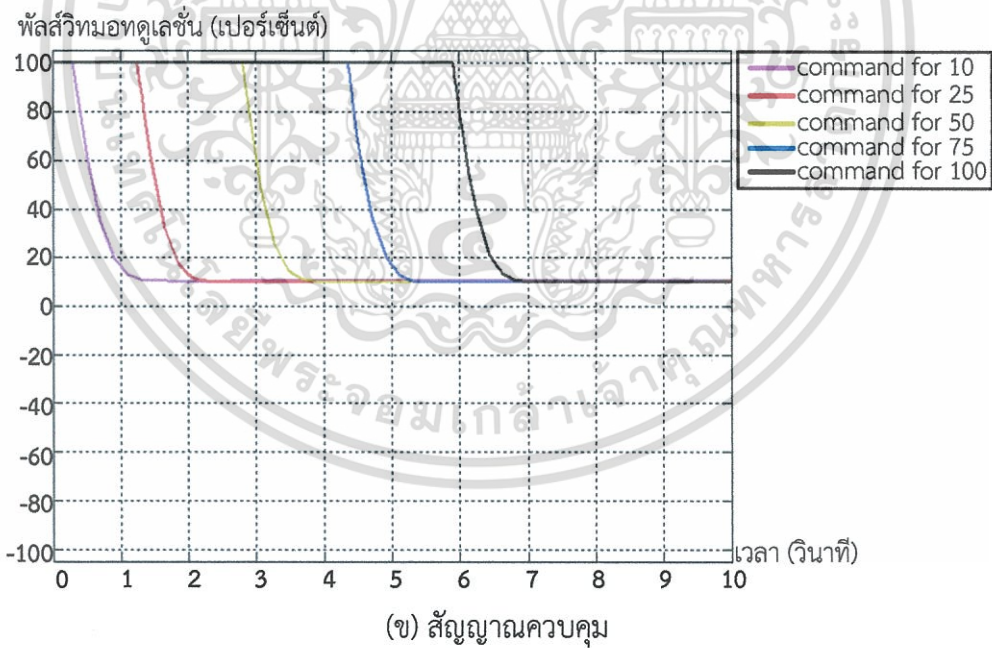
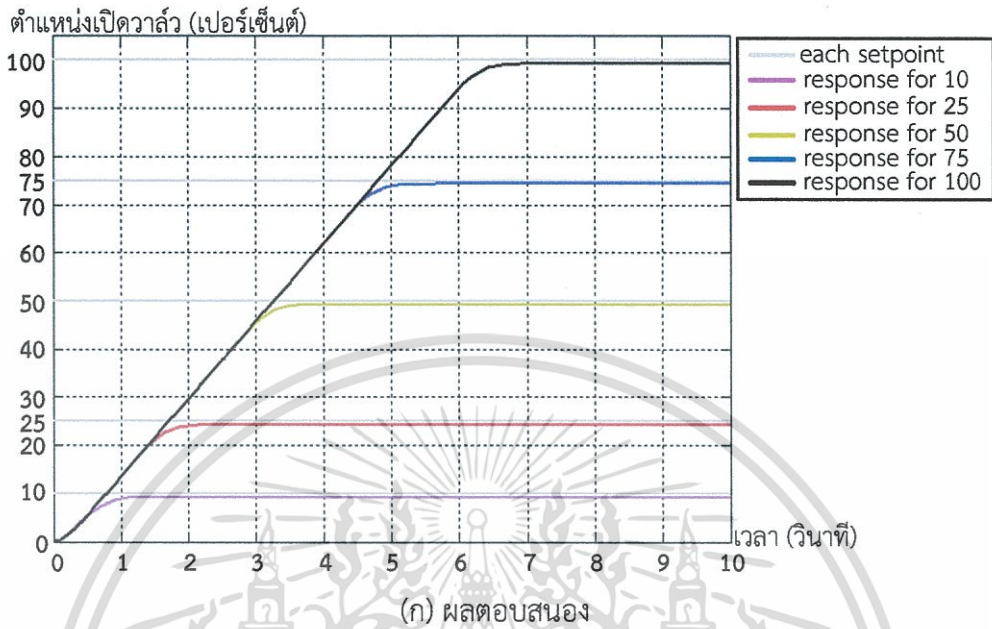
จากผลการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอโดยคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมและแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงดังรูปที่ 5.11 พบว่าผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจาก 0 ไปยัง 10 และ 25 เปอร์เซ็นต์มีค่าความผิดพลาดที่ไม่สามารถยอมรับได้ในช่วงก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยที่ผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจาก 0 ไปยัง 50 เปอร์เซ็นต์ไม่มีค่าพุ่งเกิน และมีค่าความผิดพลาดในช่วงก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวที่สามารถยอมรับได้ และในส่วนผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์พบว่าผลตอบสนองเกิดค่าพุ่งเกินสูงสุดใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้ แต่ในช่วงก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวยังคงมีค่าความผิดพลาดของตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงอยู่ซึ่งต้องใช้เวลาานานมากจึงค่อย ๆ เข้าสู่ตำแหน่งอ้างอิง อย่างไรก็ตามเราสามารถปรับปรุงระบบให้ผลตอบสนองไม่มีค่าความผิดพลาดในช่วงก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วต้องใช้เวลาานานมากตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจึงค่อย ๆ เข้าสู่ตำแหน่งอ้างอิงได้ โดยการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัพ ซึ่งการจำลองเป็นการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10, 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมและแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง แสดงผลการจำลองดังรูปที่ 5.12

จากผลการจำลองการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10, 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัพโดยคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมและแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงดังรูปที่ 5.12 พบว่าผลตอบสนองไม่เกิดค่าพุ่งเกิน แต่มีช่วงเวลาเข้าที่มากกว่า 1 วินาทีเนื่องจากเกิดการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมดังรูปที่ 5.12 (ข) และในช่วงเข้าสู่สภาวะคงตัวยังคงเกิดค่าความผิดพลาดแต่เป็นค่าที่สามารถยอมรับได้ดังรูปที่ 5.12 (ก) โดยถ้าพิจารณาจากสัญญาณควบคุมจะพบว่าสัญญาณควบคุมกำลังค่อย ๆ ขึ้นเนื่องจากตัวอินทิเกรเตอร์กำลังค่อย ๆ เพิ่มค่าสัญญาณควบคุมขึ้นซึ่งถ้าสัญญาณควบคุมอยู่มีค่ามากกว่า 13 เปอร์เซ็นต์จะสามารถควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงให้เข้าสู่ตำแหน่งอ้างอิงได้โดยต้องใช้เวลาานานมาก

5.1.2.3 ผลการจำลองตัวควบคุมแบบพีไอดี

เพื่อให้การจำลองการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีมีความใกล้เคียงกับระบบจริงมากยิ่งขึ้น ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงใช้โปรแกรมแมตแล็บจำลองการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10, 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมและแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงซึ่งตัวควบคุมแบบพีไอดีมีค่าเกณฑ์ที่ได้จากการออกแบบคือ $K_p = 24.091$, $K_I = 0.4$ และ $K_D = 4.802$ โดยผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 5.13

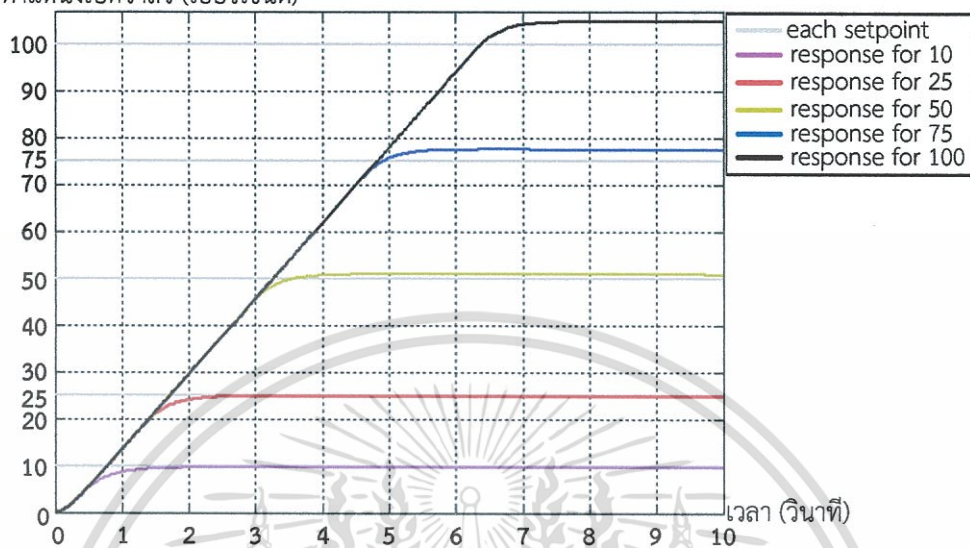
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 ผลการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับ อินทิเกรเตอร์แอนไทไวบ์โดยคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมและ แรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

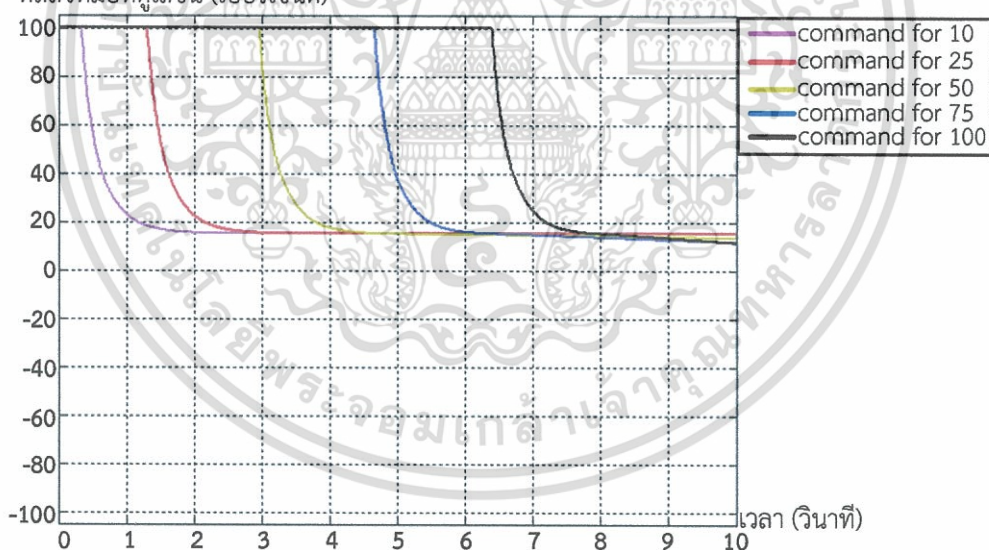
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งเปิดวาล์ว (เปอร์เซ็นต์)



(ก) ผลตอบสนอง

พัลส์วិทยอมทูละชั้น (เปอร์เซ็นต์)



(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 5.13 ผลการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี

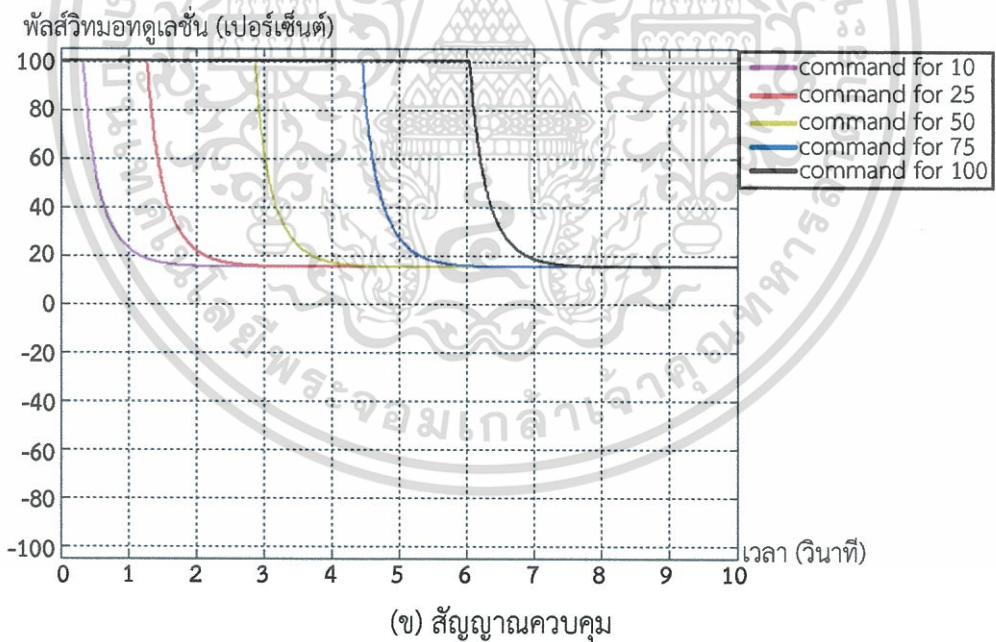
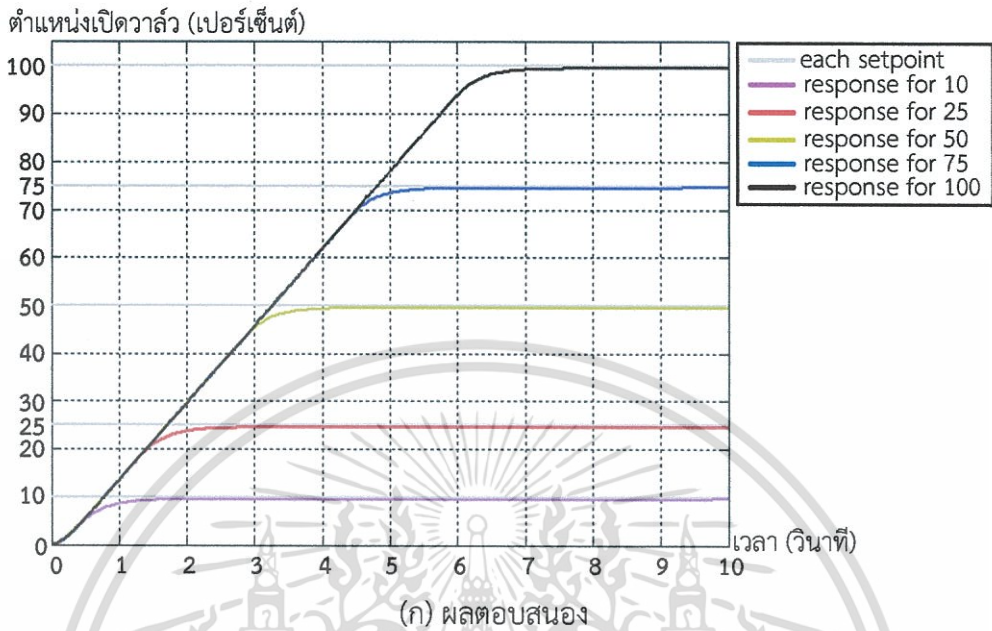
โดยคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมและแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการจำลองการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมและแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงดังรูปที่ 5.13 พบว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีสามารถควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10, 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ได้โดยมีช่วงเวลาเข้าที่มากกว่า 1 วินาทีซึ่งไม่ตรงกับที่ออกแบบไว้เนื่องจากเกิดการอิมิตัวของสัญญาณควบคุม โดยผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10, 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์ไม่มีค่าพุ่งเกิน และมีค่าความผิดพลาดในช่วงก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวยังคงที่สามารถยอมรับได้ และผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์มีค่าพุ่งเกินมากกว่าที่ออกแบบไว้โดยมีค่าเท่ากับ 3.28 และ 4.8 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และในช่วงก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวยังคงมีค่าความผิดพลาดของตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงซึ่งต้องใช้เวลาานานมากจึงค่อย ๆ ลู่เข้าหาตำแหน่งอ้างอิงโดยเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้

จากผลการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดของวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 เปอร์เซ็นต์ไปยัง 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมและแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง พบว่าผลตอบสนองเกิดค่าพุ่งเกิน แล้วค่อย ๆ ลู่เข้าหาตำแหน่งอ้างอิงในช่วงก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวซึ่งเราสามารถปรับปรุงให้ผลตอบสนองของระบบไม่เกิดสิ่งเหล่านี้ได้โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัพ โดยการจำลองเป็นการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10, 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ได้ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 5.14

จากผลการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัพโดยคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมและแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงดังรูปที่ 5.14 พบว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัพสามารถควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10, 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ได้โดยไม่เกิดค่าพุ่งเกินและการค่อย ๆ ลู่เข้าหาตำแหน่งอ้างอิง แต่ยังคงมีช่วงเวลาเข้าที่มากกว่า 1 วินาทีดังรูปที่ 5.14 (ก) ในช่วงก่อนผลตอบสนองเข้าสู่สภาวะคงตัวยังคงมีค่าความผิดพลาดอยู่แต่เป็นเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้ โดยเมื่อพิจารณาจากสัญญาณควบคุมดังรูปที่ 5.14 (ข) พบว่าตัวควบคุมยังคงมีการจ่ายสัญญาณควบคุมอยู่ แต่มีค่าน้อยกว่า 13 เปอร์เซ็นต์จึงไม่สามารถเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงให้เข้าสู่ตำแหน่งอ้างอิงได้โดยตัวอินทิเกรเตอร์กำลังค่อย ๆ เพิ่มค่าสัญญาณควบคุมขึ้นเพื่อให้สัญญาณควบคุมมีค่ามากกว่าขึ้นแต่ต้องใช้เวลาานานมาก



รูปที่ 5.14 ผลการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีร่วมกับ อินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัพโดยคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุม และแรงเสียดทานสถิตย์ชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

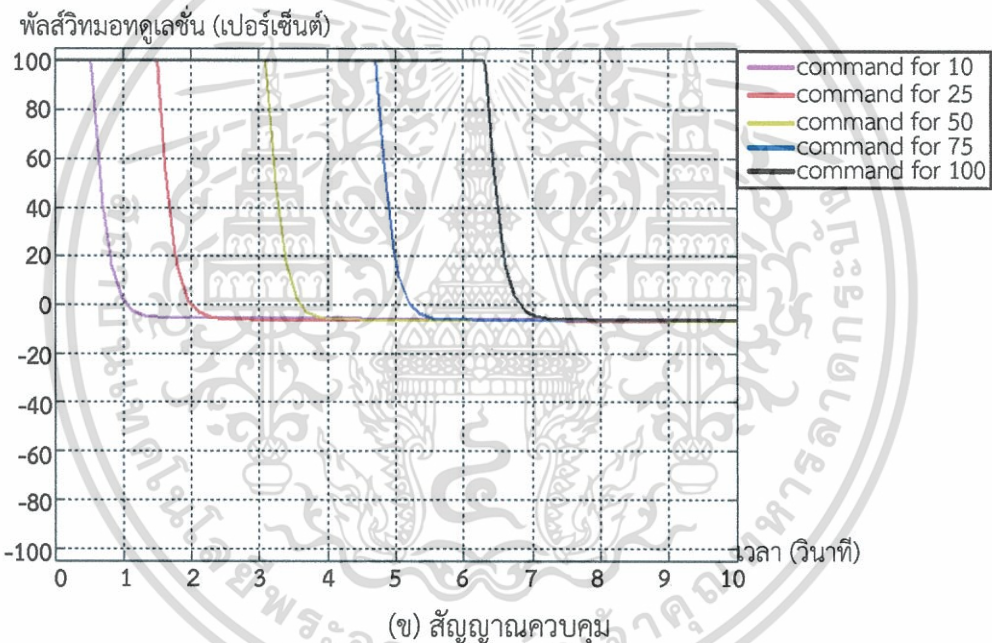
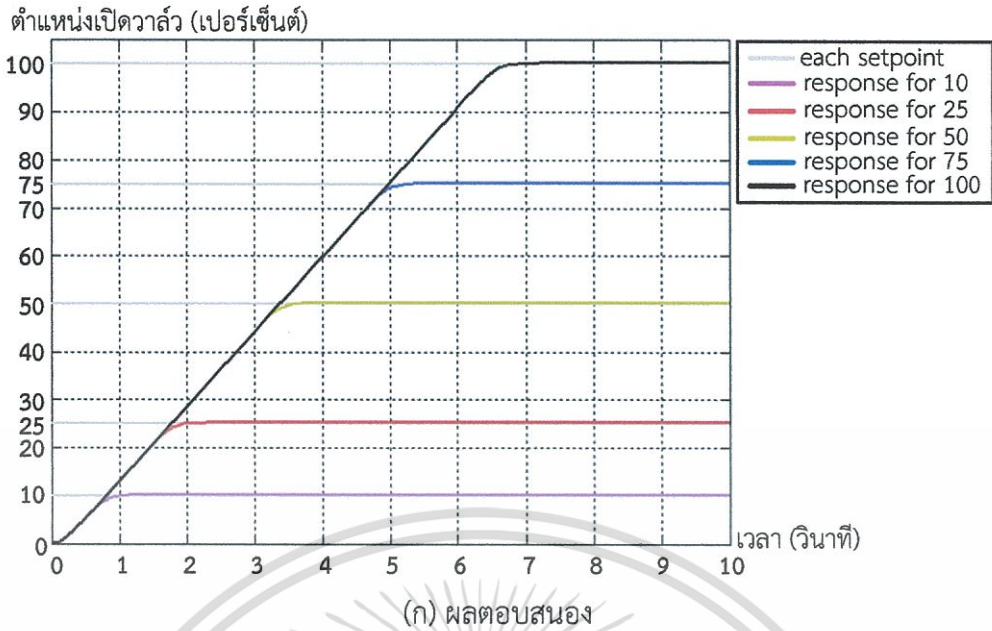
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 การเลือกและปรับแต่งตัวควบคุมเพื่อนำไปทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงระบบจริง

จากผลการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงโดยคำนึงถึงการอึดตัวของสัญญาณควบคุม และแรงเสียดทานสถิตย์ชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง พบว่าตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์ธัพและตัวควบคุมแบบพีไอดีร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์ธัพให้ผลการจำลองที่ดีที่สุดโดยมีลักษณะใกล้เคียงกัน คือ ที่ทุก ๆ ตำแหน่งอ้างอิงผลการจำลองของทั้งสองตัวควบคุมไม่มีค่าพุ่งเกินเหมือนกัน แต่ตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์ธัพมีความผิดพลาดในช่วงก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวมากกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์ธัพเล็กน้อย เนื่องจากค่าเกนที่ได้จากการออกแบบของตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์ธัพมีค่าน้อยกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์ธัพมาก ดังนั้นถ้านำตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์ธัพมาปรับแต่งค่าเกนให้มีค่ามากขึ้นอาจให้ผลตอบสนองที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์ธัพ อีกทั้งการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์ธัพมีตัวอนุพันธ์อยู่ในตัวควบคุมซึ่งอาจทำหน้าที่ขยายสัญญาณรบกวน

ก่อนนำตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์ธัพไปควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงได้ปรับแต่งค่าเกน K_p และ K_I ของตัวควบคุมพีไอร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์ธัพให้มีค่าเท่ากับตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยมีค่า $K_p = 24.091$ และ $K_I = 0.4$ แล้วนำตัวควบคุมแบบพีไอที่ผ่านการปรับแต่งค่าเกนแล้วร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์ธัพไปจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดของวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10, 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยคำนึงถึงการอึดตัวของสัญญาณควบคุมและแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงได้ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 5.15

จากผลการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10, 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยคำนึงถึงการอึดตัวของสัญญาณควบคุมและแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับแต่งค่าเกนร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์ธัพดังรูปที่ 5.15 พบว่าตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับแต่งค่าเกนร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์ธัพสามารถควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 เปอร์เซ็นต์ไปยังทุก ๆ ตำแหน่งอ้างอิงได้โดยมีค่าพุ่งเกินใกล้เคียงกับข้อกำหนดทางสมรรถนะ และมีค่าความผิดพลาดในช่วงก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวที่สามารถยอมรับได้ โดยที่ค่าความผิดพลาดนั้นมีค่าเป็นบวกซึ่งเป็นผลดีต่อการนำไปใช้ควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงในระบบจริงเพราะว่าในระบบจริงอาจมีแรงเสียดทานสถิตย์มากกว่าในการจำลอง



รูปที่ 5.15 ผลการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับแต่งค่าเกณฑ์ร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวบ์โดยคำนึงถึงการอิ่มตัวของสัญญาณควบคุมและแรงเสียดทานสถิตย์ชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

5.2 ผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

เมื่อกำหนดให้ตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับแต่งค่าเกณฑ์ร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวบ์เป็นตัวควบคุมในระบบควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงในระบบจริง เพื่อเป็นการทดสอบความสามารถของตัวควบคุม ดังนั้นก่อนที่จะนำระบบควบคุมตำแหน่งวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงไปทำงานร่วมกับระบบควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซได้ทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงโดยมีผู้ควบคุม

เป็นผู้กำหนดตำแหน่งอ้างอิงแทนระบบควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซ ซึ่งการทดลองเป็นการควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ญาติเห็นประโยชน์อันดีแก่
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

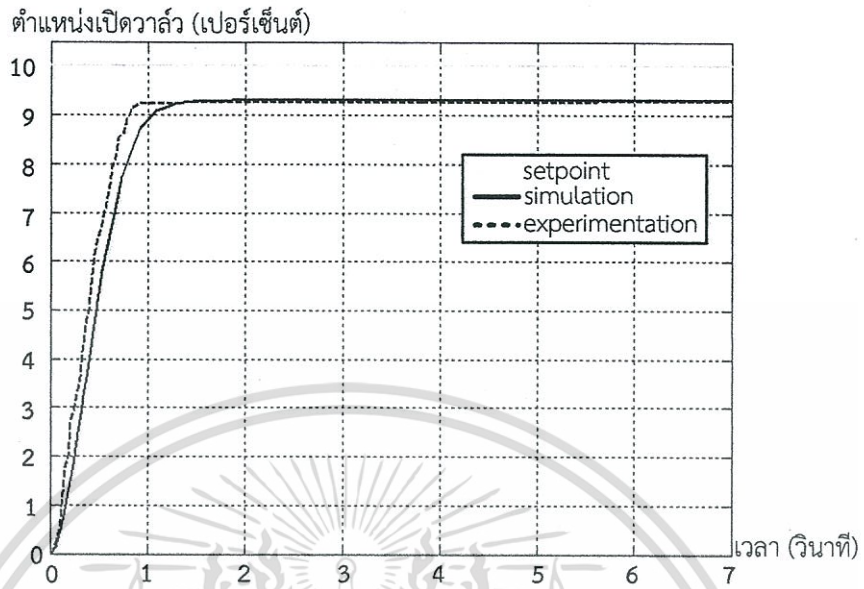
ให้วาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเปิดจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10, 25, 50 และ 75 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่มีการควบคุม วาล์วจ่ายเชื้อเพลิงให้เปิดจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 100 เปอร์เซ็นต์เช่นเดียวกับการจำลอง เนื่องจากวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงในระบบจริงสามารถเปิดได้สูงสุดที่ 103 เปอร์เซ็นต์ซึ่งถ้าเกิดค่าพุ่งเกินมากกว่า 103 เปอร์เซ็นต์ในการทดลองก็จะไม่ทราบถึงผลตอบสนองที่แท้จริง และเป็นการป้องกันไม่ให้มอเตอร์และวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเกิดความเสียหาย

อย่างไรก็ตามเพื่อแสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองที่ได้จากการจำลองเมื่อคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมและแรงเสียดทานสถิตย์ชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงของตัวควบคุมแบบพี พีไอ พีอี ร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัพ พีไอดีและพีไอดีร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัพที่ได้ค่าเกณฑ์จากการออกแบบไม่สามารถควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยังตำแหน่งทุก ๆ อังอิงได้โดยมีค่าความผิดพลาดในช่วงเข้าสู่ภาวะคงตัวที่สามารถยอมรับได้ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงมีการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมเหล่านี้ด้วย โดยมีวิธีการทดลองเช่นเดียวกับตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับแต่งค่าเกณฑ์ร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัพ นอกจากนี้การทดลองทั้งหมดยังเป็นการแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์กระแสตรงมีความถูกต้อง มีความใกล้เคียงกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง และสามารถใช้แทนกันได้

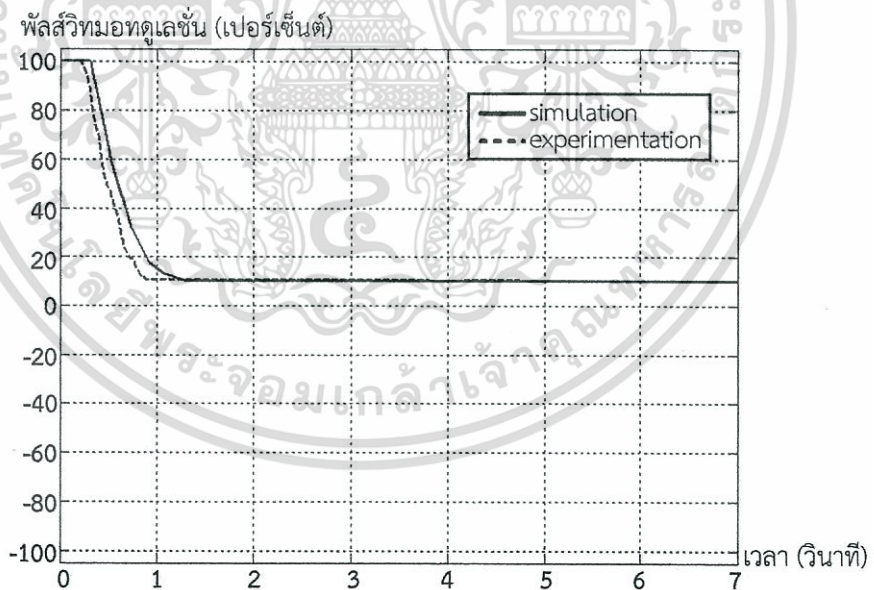
5.2.1 ผลการทดลองตัวควบคุมแบบพี

ในหัวข้อนี้เป็นการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดของวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงในระบบจริงด้วยตัวควบคุมแบบพีที่ได้ค่าเกณฑ์จากการออกแบบซึ่งมีค่า $K_p = 14$ โดยการทดลองเป็นการควบคุมให้วาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเปิดจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10, 25, 50 และ 75 เปอร์เซ็นต์ แล้วนำผลที่ได้จากการทดลองไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองเมื่อคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมและแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการจำลองดังรูปที่ 5.16, 5.17, 5.18 และ 5.19 ตามลำดับ

จากการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลการจำลองของการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีดังรูปที่ 5.16 ถึง 5.19 พบว่าผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมที่ได้จากการทดลองมีลักษณะใกล้เคียงกับการจำลอง คือตัวควบคุมแบบพีไม่สามารถควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงให้เปิดจากตำแหน่ง 0 เปอร์เซ็นต์ไปยังทุก ๆ ตำแหน่งอังอิงได้โดยมีค่าความผิดพลาดสถานะคงค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งผลการทดลองมีค่าความผิดพลาดมากกว่าผลการจำลอง แต่ผลทดลองมีช่วงเวลาขึ้นและช่วงเวลาเข้าที่เร็วกว่าผลตอบสนองที่ได้จากการจำลอง ซึ่งถ้าดูจากสัญญาณควบคุมของทั้งการจำลองและการทดลองตัวควบคุมแบบพียังคงมีการจ่ายสัญญาณออกมาเช่นกัน แต่ไม่สามารถเอาชนะแรงเสียดทานสถิตย์ได้มอเตอร์จึงไม่สามารถหมุนเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงไปยังตำแหน่งอังอิงได้



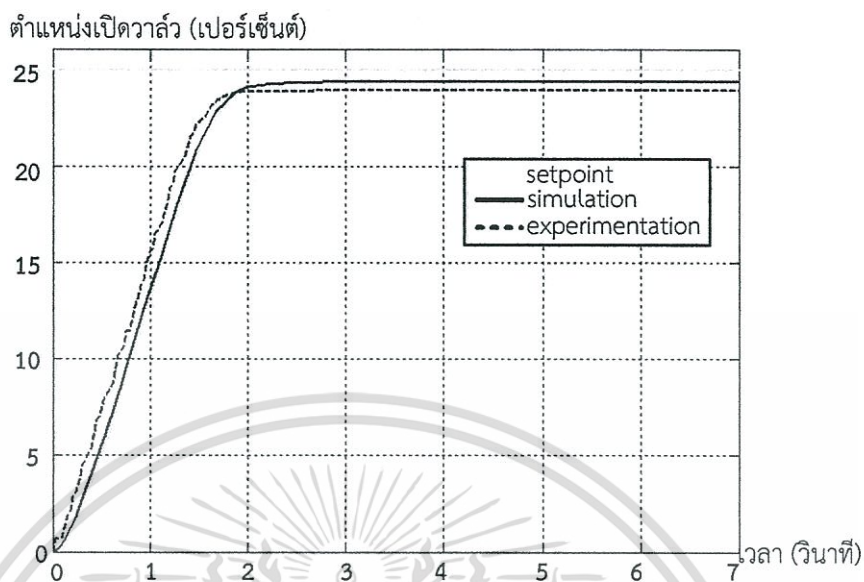
(ก) ผลตอบสนอง



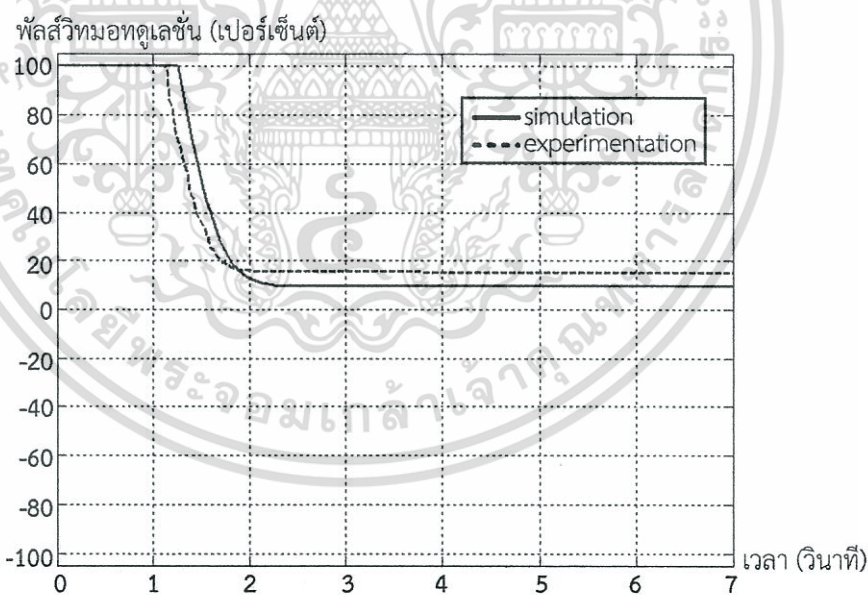
(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 5.16 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง
จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



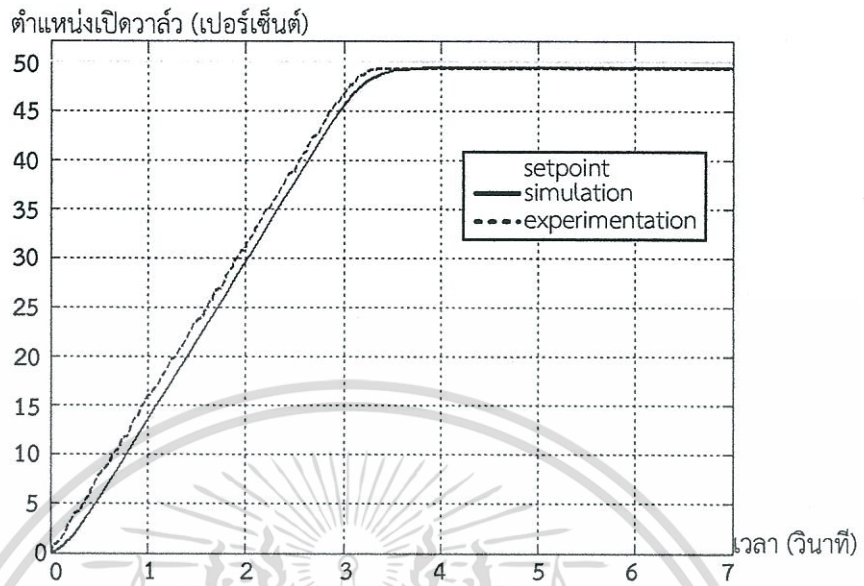
(ก) ผลตอบสนอง



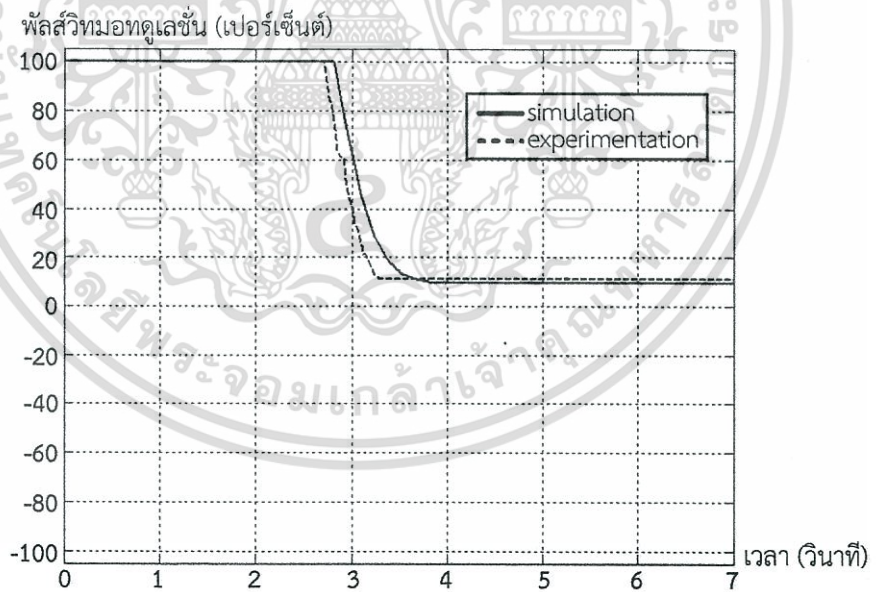
(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 5.17 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 25 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ผลตอบสนอง

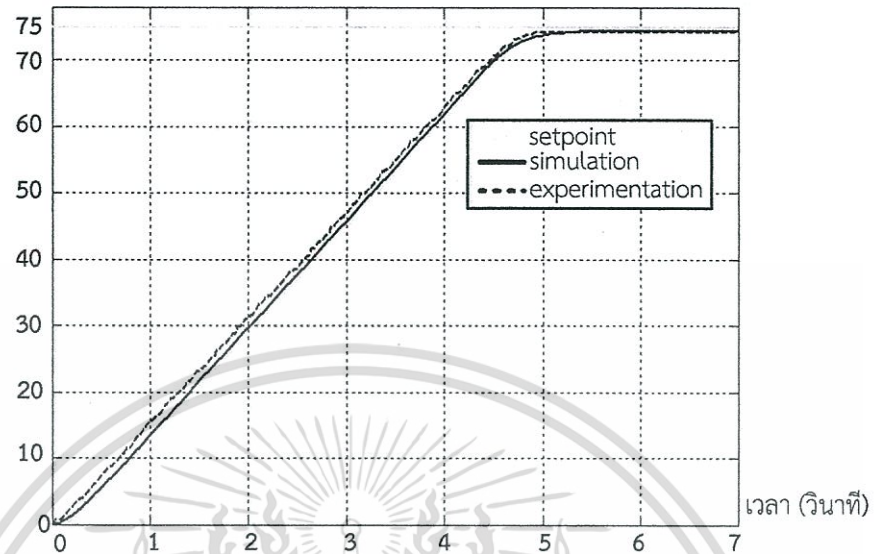


(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 5.18 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 50 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพี

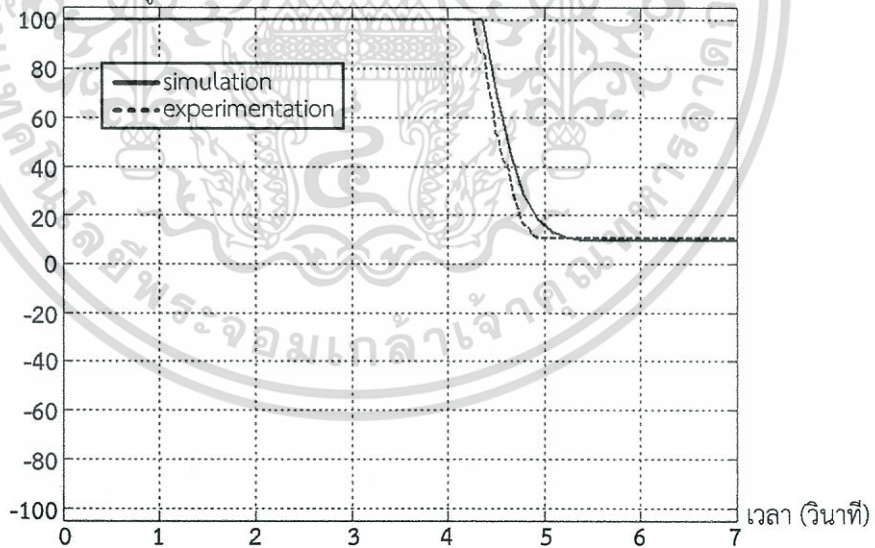
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งเปิดวาล์ว (เปอร์เซ็นต์)



(ก) ผลตอบสนอง

พัลส์วิธมอดูเลชัน (เปอร์เซ็นต์)



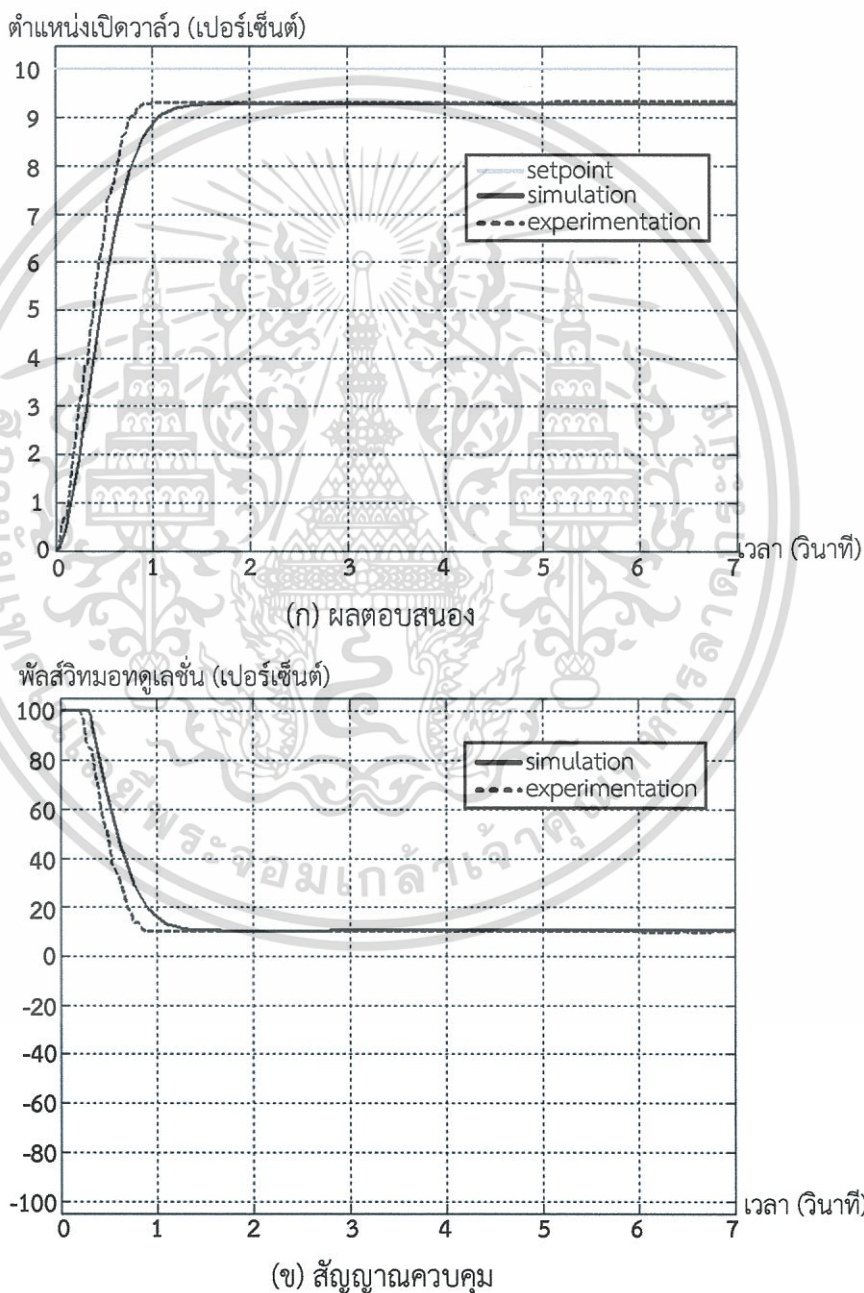
(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 5.19 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 75 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

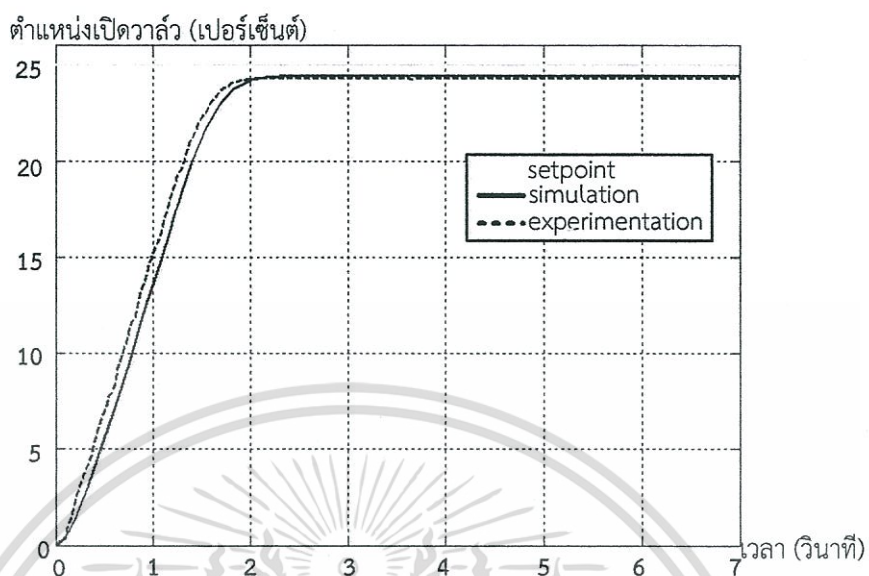
5.2.2 ผลการทดลองตัวควบคุมแบบพีไอ

ในหัวข้อนี้เป็นการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงในระบบจริงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอที่ได้ค่าเกณฑ์จากการออกแบบซึ่งมีค่า $K_p = 13.768$ และ $K_I = 0.086$ โดยการทดลองเป็นการควบคุมให้วาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเปิดจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10, 25, 50 และ 75 เปอร์เซ็นต์ แล้วนำผลการทดลองไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่มีคำนึงถึงการอิ่มตัวของสัญญาณควบคุม และแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และผลการจำลองดังรูปที่ 5.20, 5.21, 5.22 และ 5.23 ตามลำดับ

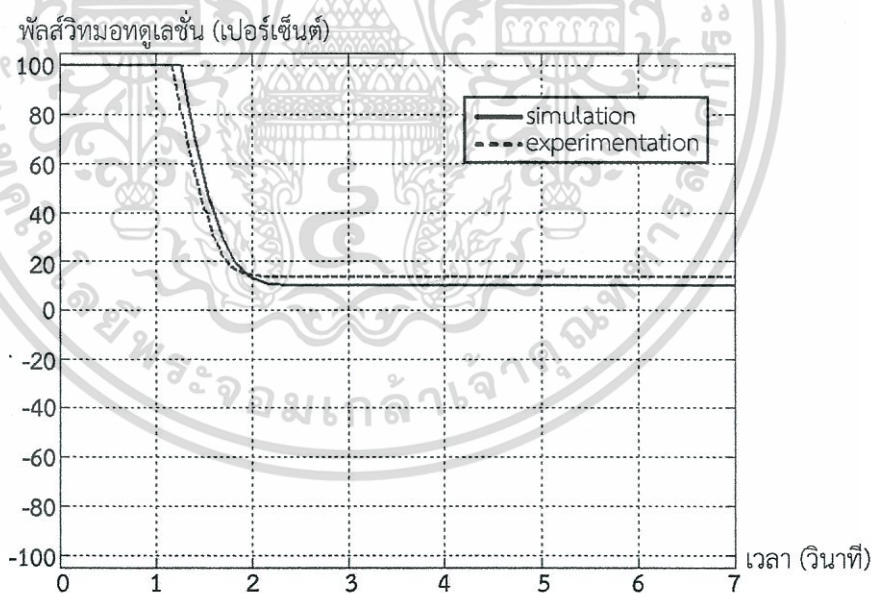


รูปที่ 5.20 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



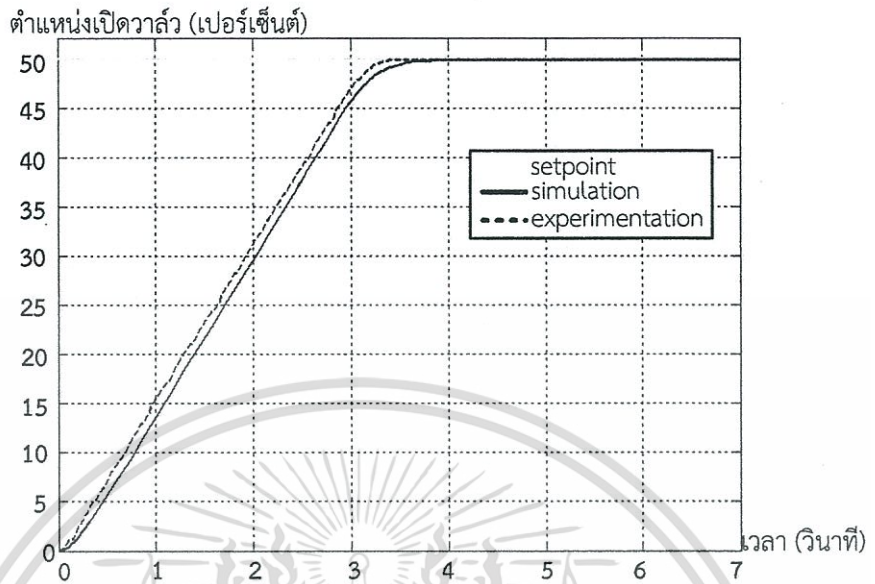
(ก) ผลตอบสนอง



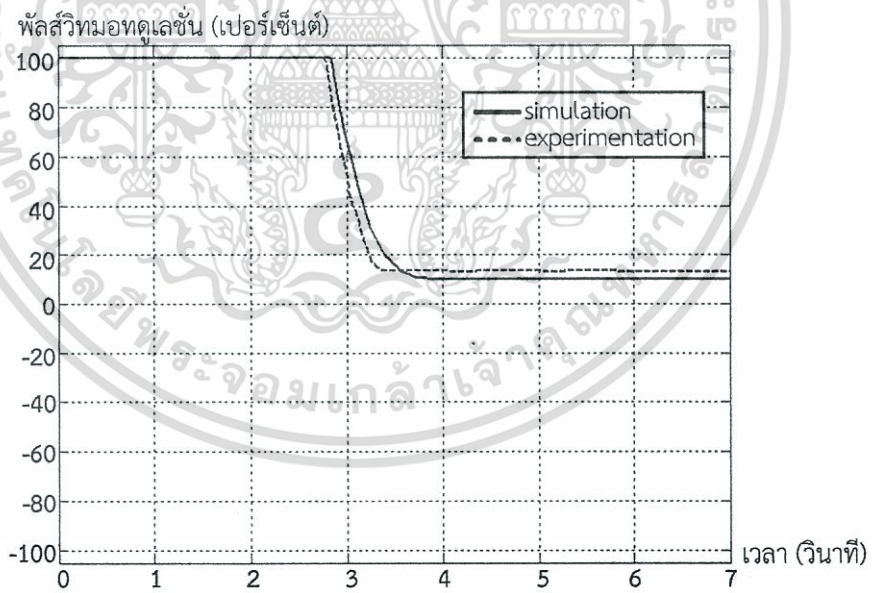
(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 5.21 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 25 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ผลตอบสนอง

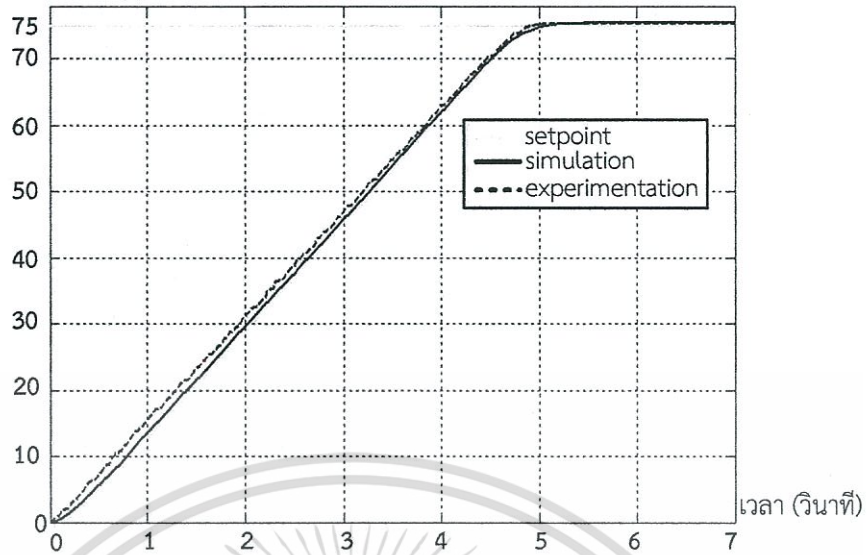


(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 5.22 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 50 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ

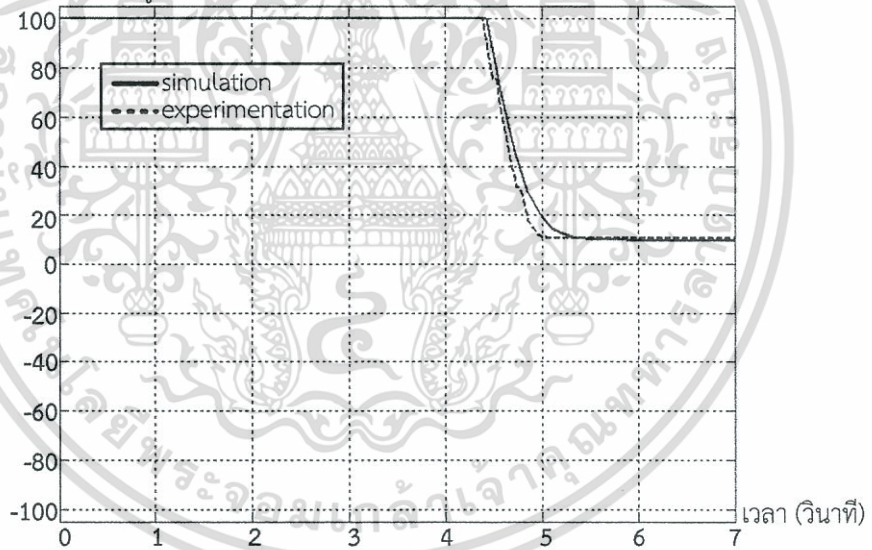
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งเปิดวาล์ว (เปอร์เซ็นต์)



(ก) ผลตอบสนอง

พัลส์วិทยอมอดูละชัน (เปอร์เซ็นต์)



(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 5.23 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 75 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ

จากการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลการจำลองของการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดังรูปที่ 5.20 ถึง 5.23 พบว่าในการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10, 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดลองมีลักษณะคล้ายกับผลการจำลองคือมีค่าความผิดพลาดในช่วงก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวโดยมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณา

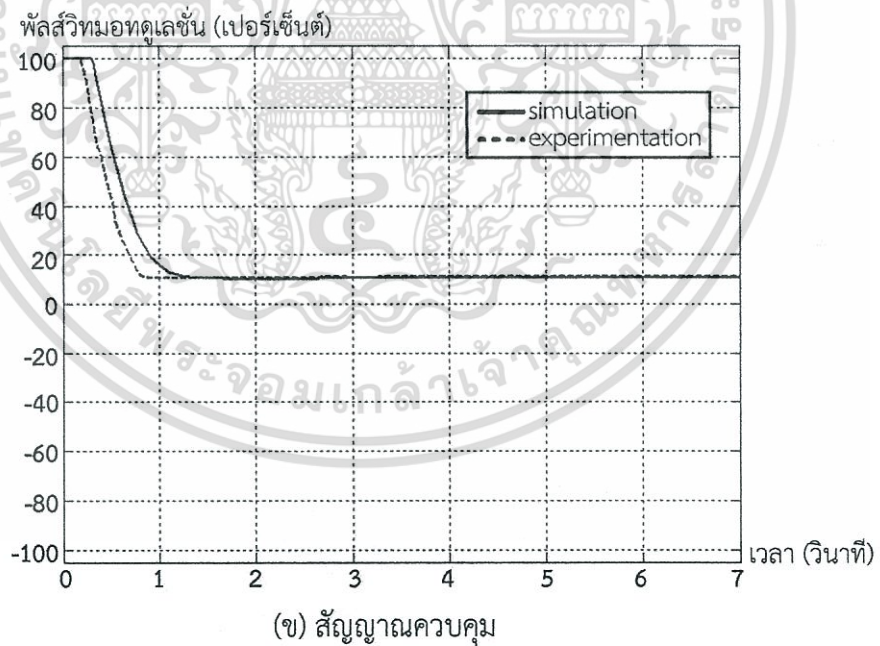
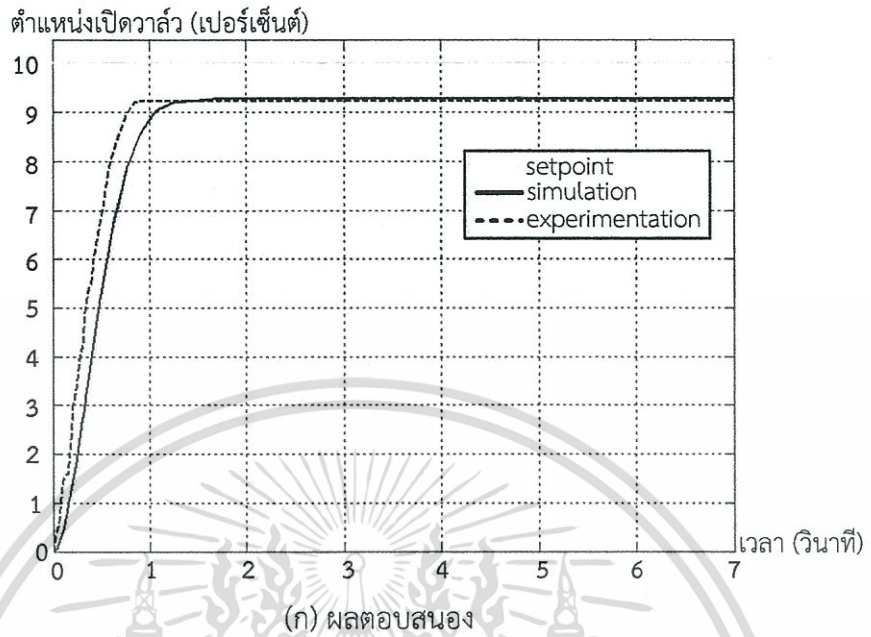
จากสัญญาณควบคุมของทั้งการทดลองและการจำลองตัวควบคุมยังคงแบบพีไอมีการจ่ายสัญญาณ เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวงนวิสาทรบการเซงานเพอการศึกษาเทานน ไม่นุญาตเหนาไปเซประยชนดเินการค่า ไม่วากรณีใดทงสิ้น อิกทงห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมือนกัน โดยที่อินทิเกรเตอร์ยังคงค่อย ๆ เพิ่มสัญญาณควบคุมแต่ต้องใช้เวลานานมากเพื่อให้สามารถเอาชนะแรงเสียดทานสถิตย์ได้มอเตอร์จึงจะสามารถหมุนเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงไปยังตำแหน่งอ้างอิงได้ ในส่วนการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 75 เปอร์เซ็นต์ผลการทดลองมีลักษณะคล้ายกับผลการจำลองคือมีค่าพุ่งเกิน และค่อย ๆ ลู่เข้าสู่ตำแหน่งอ้างอิง โดยผลการทดลองมีค่าความผิดพลาดในช่วงก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวมากกว่าการจำลอง เนื่องจากในระบบจริงมีแรงเสียดทานมากกว่าในการจำลอง ซึ่งเมื่อดูจากสัญญาณควบคุมของทั้งการทดลองและการจำลองตัวอินทิเกรเตอร์ยังคงค่อย ๆ ลดสัญญาณควบคุม แต่ต้องใช้เวลานานมากเพื่อให้สามารถเอาชนะแรงเสียดทานสถิตย์ได้ แล้วทำให้มอเตอร์หมุนกลับทิศเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงกลับไปยังตำแหน่งอ้างอิงได้ และถ้าพิจารณาจากผลตอบสนองชั่วคราวของการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยังทุก ๆ ตำแหน่งอ้างอิงพบว่าผลการทดลองมีช่วงเวลาขึ้นและช่วงเวลาเข้าที่เร็วกว่าผลจากการจำลอง

5.2.3 ผลการทดลองตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัพ

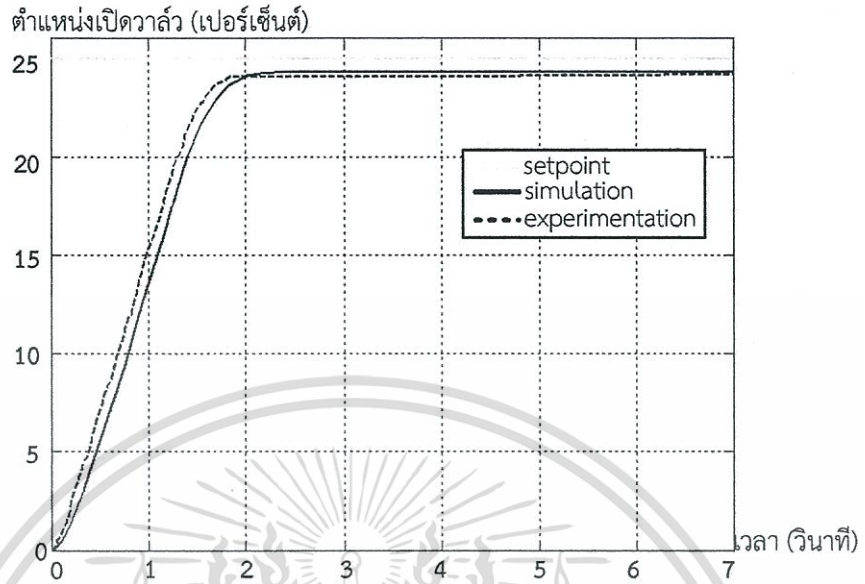
ในหัวข้อนี้เป็นการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดของวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงในระบบจริงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัพซึ่งใช้ค่า $K_p = 13.768$, $K_I = 0.086$ เช่นเดียวกับตัวควบคุมแบบพีไอ โดยการทดลองเป็นการควบคุมให้วาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเปิดจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10, 25, 50, และ 75 เปอร์เซ็นต์แล้วนำผลที่ได้จากการทดลองไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่มีคำนี้ถึงการอิมพัลส์ของสัญญาณควบคุมและแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังรูปที่ 5.24, 5.25, 5.26 และ 5.27 ตามลำดับ

จากการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลการจำลองของการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัพดังรูปที่ 5.24 ถึง 5.27 พบว่าผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมที่ได้จากการทดลองมีลักษณะคล้ายกับการจำลอง คือผลตอบสนองเกิดความผิดพลาดในช่วงก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวเหมือนกันโดยมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งถ้าดูจากสัญญาณควบคุมของทั้งการจำลองและการทดลองตัวควบคุมยังคงมีการจ่ายสัญญาณออกมาเหมือนกัน แต่ไม่สามารถเอาชนะแรงเสียดทานสถิตย์ได้มอเตอร์จึงไม่สามารถหมุนเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงไปยังตำแหน่งอ้างอิงได้ โดยผลทดลองมีค่าความผิดพลาดมากกว่าผลการจำลองในการควบคุมการตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10 และ 25 เปอร์เซ็นต์ แต่ผลการทดลองมีค่าความผิดพลาดน้อยกว่าผลการจำลองในการควบคุมการตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 50 และ 75 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณาจากผลตอบสนองชั่วคราวพบว่าผลการทดลองมีช่วงเวลาขึ้นและช่วงเวลาเข้าที่เร็วกว่าผลจากการจำลอง

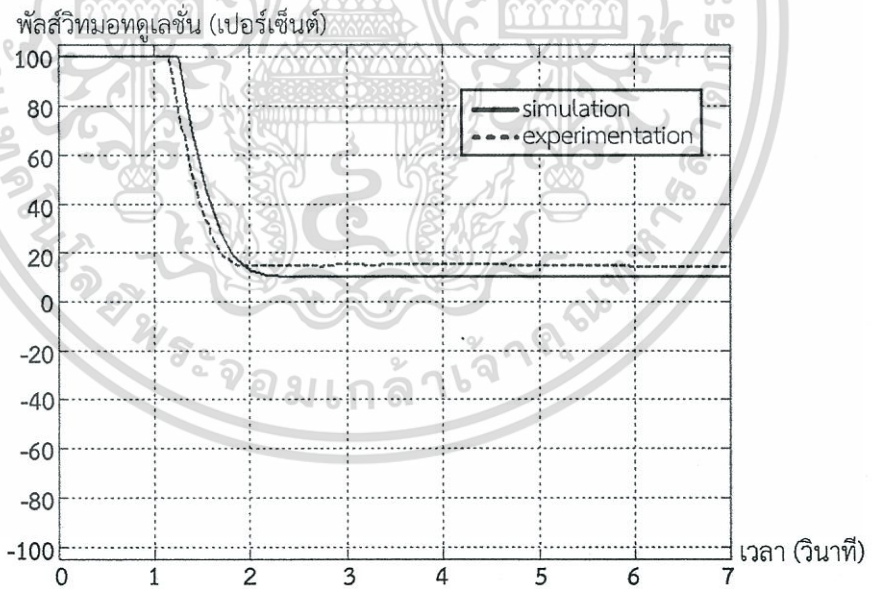


รูปที่ 5.24 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



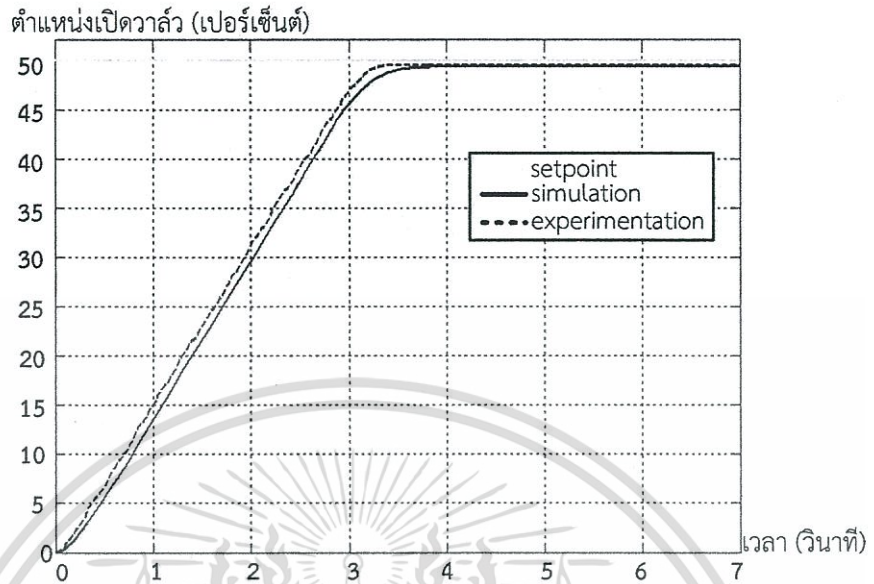
(ก) ผลตอบสนอง



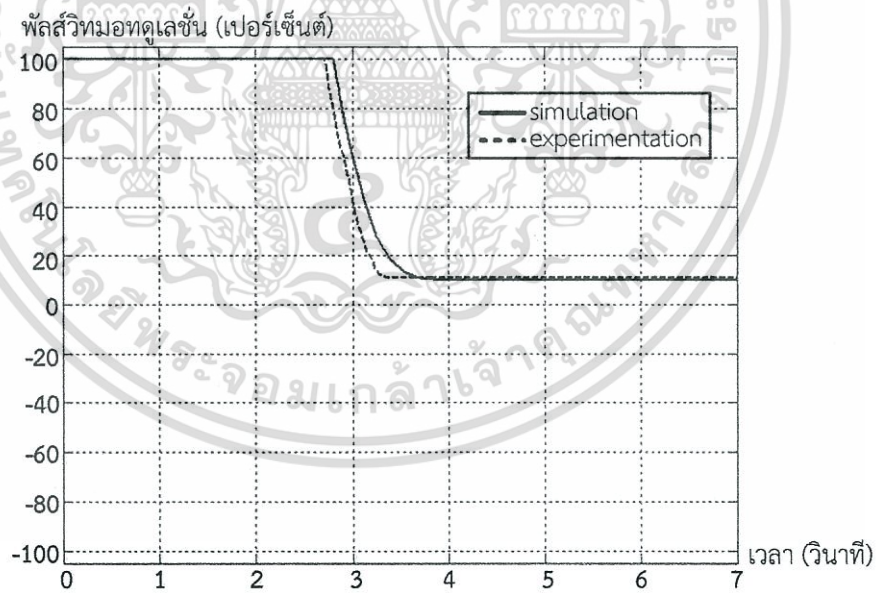
(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 5.25 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 25 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไววอว์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ผลตอบสนอง

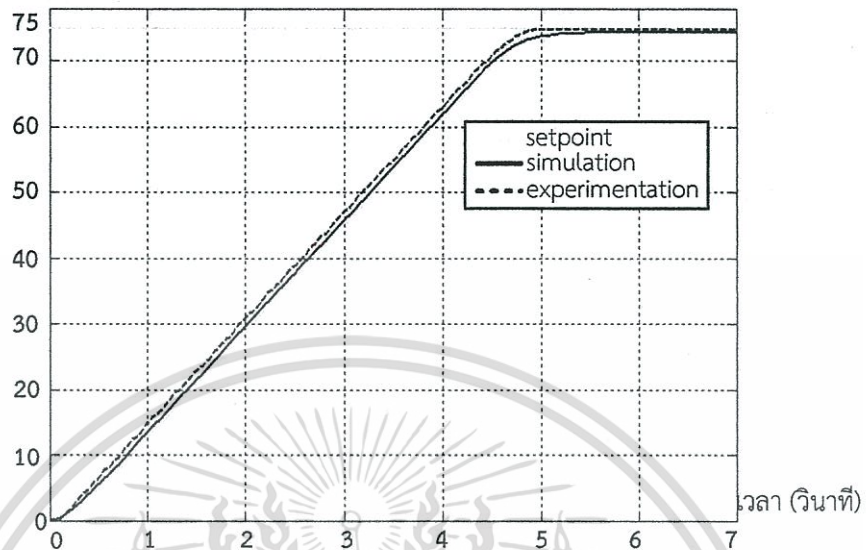


(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 5.26 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 50 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อ็อพ

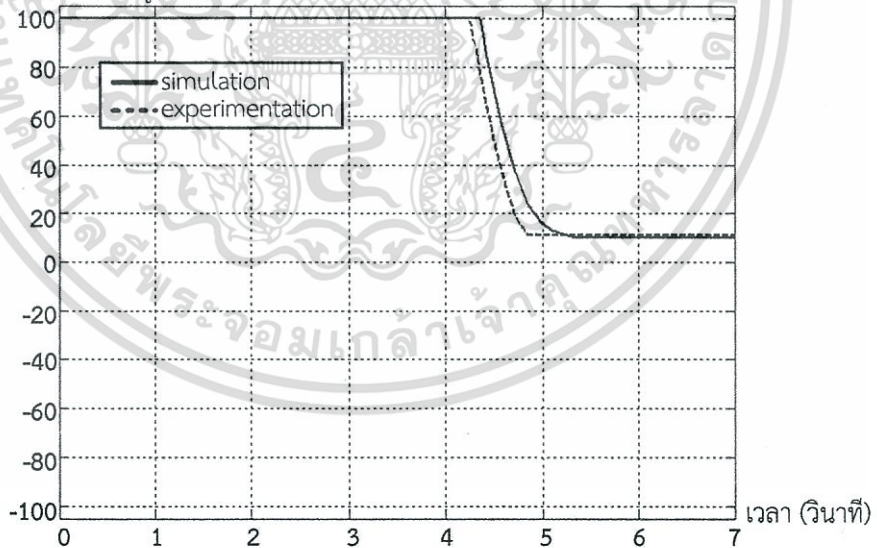
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งเปิดวาล์ว (เปอร์เซ็นต์)



(ก) ผลตอบสนอง

พัลส์วามอดูลเลชัน (เปอร์เซ็นต์)



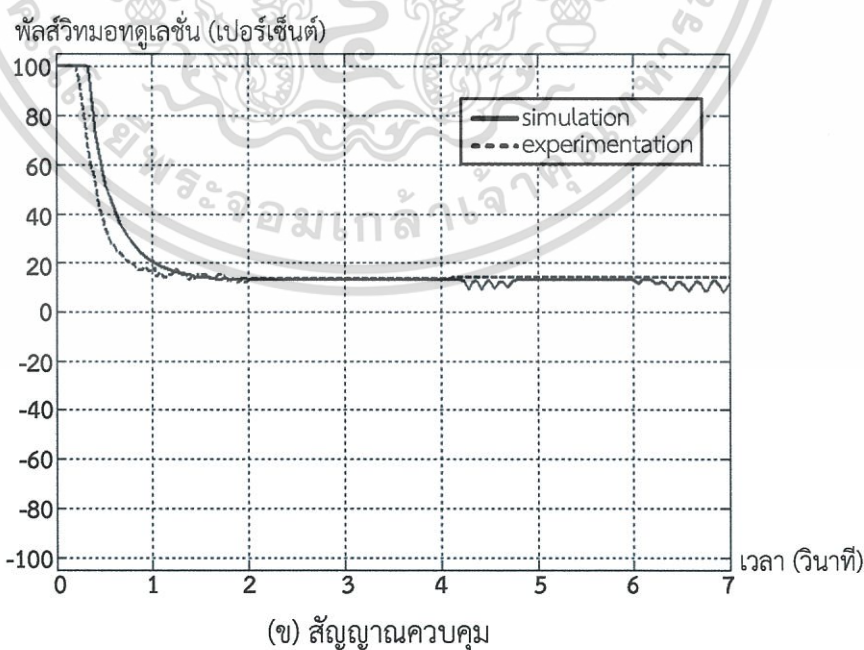
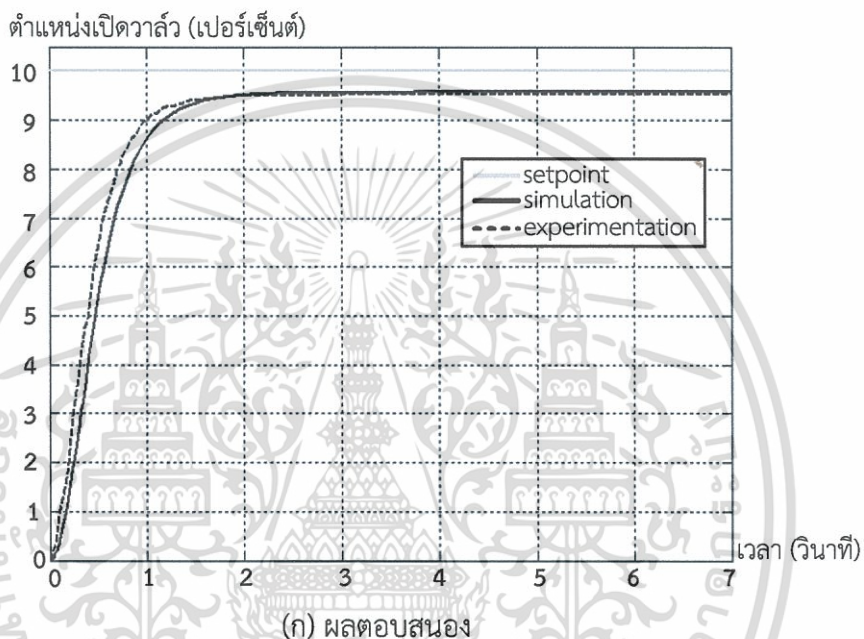
(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 5.27 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 75 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.4 ผลการทดลองตัวควบคุมแบบพีไอดี

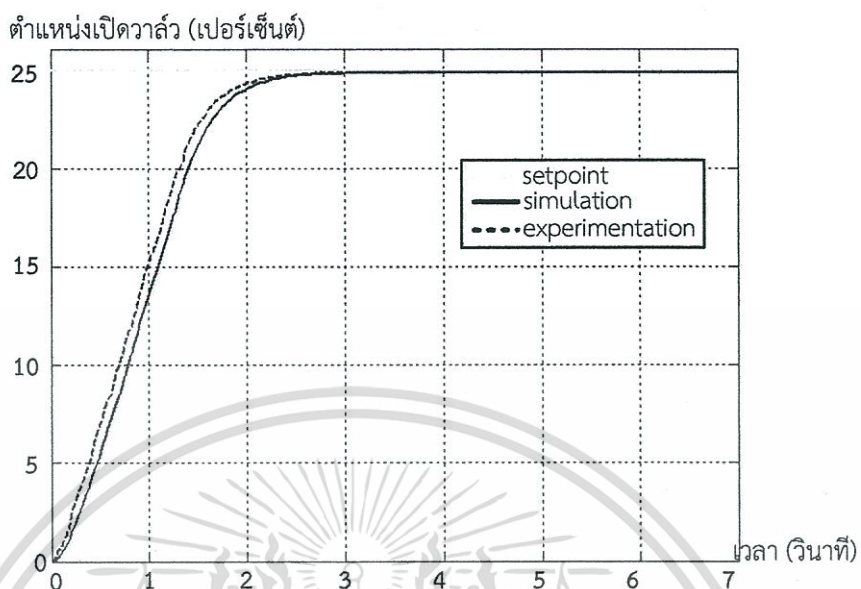
ในหัวข้อนี้เป็นการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดของวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงในระบบจริงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ได้จากการออกแบบซึ่งมีค่า $K_p=24.091$, $K_I=0.4$ และ $K_D=4.802$ โดยการทดลองเป็นการควบคุมให้วาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเปิดจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10, 25, 50 และ 75 เปอร์เซ็นต์ แล้วนำผลการทดลองไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองเมื่อคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมและแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงดังรูปที่ 5.28, 5.29, 5.30 และ 5.31 ตามลำดับ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และผลการจำลอง



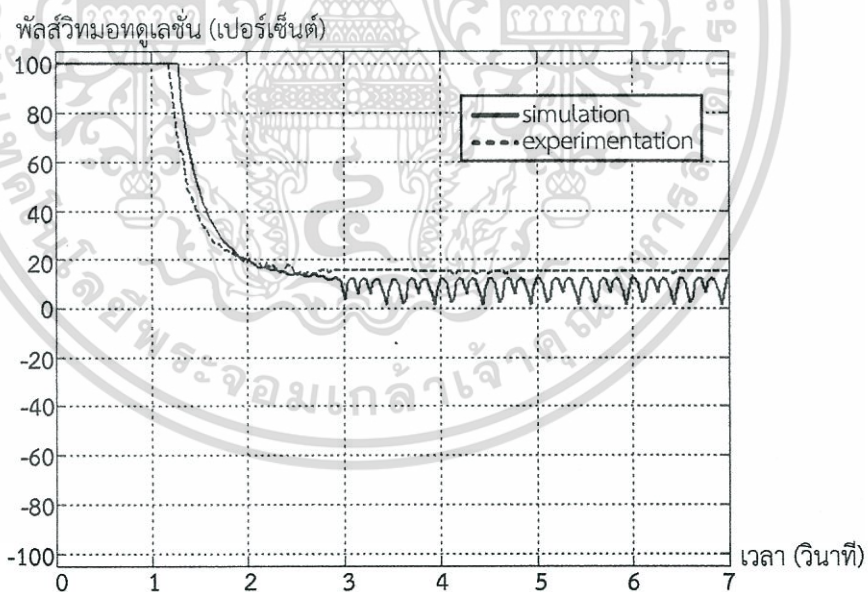
รูปที่ 5.28 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



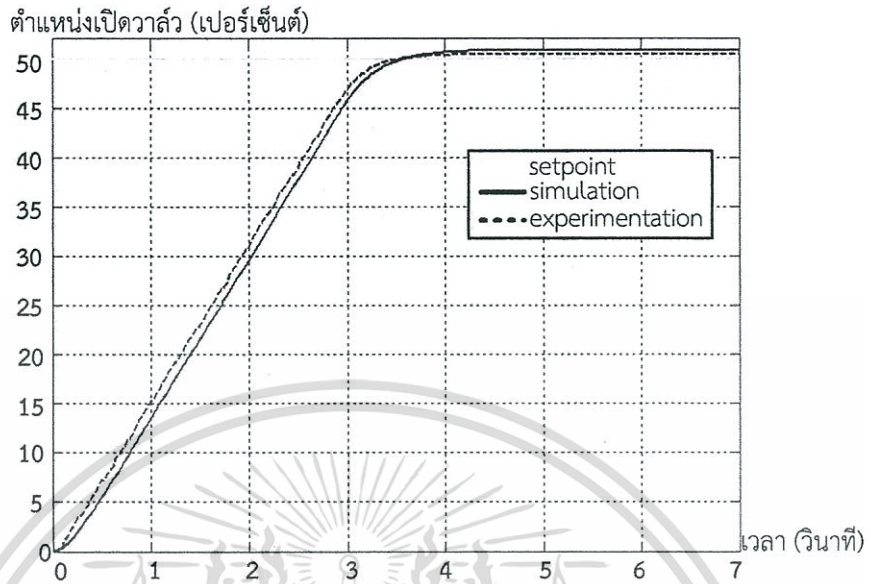
(ก) ผลตอบสนอง



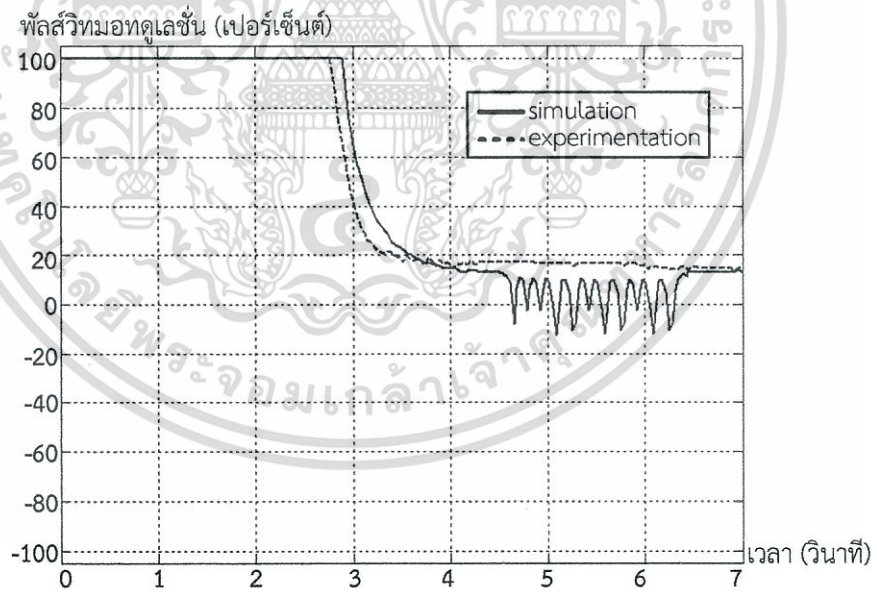
(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 5.29 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง
จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 25 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



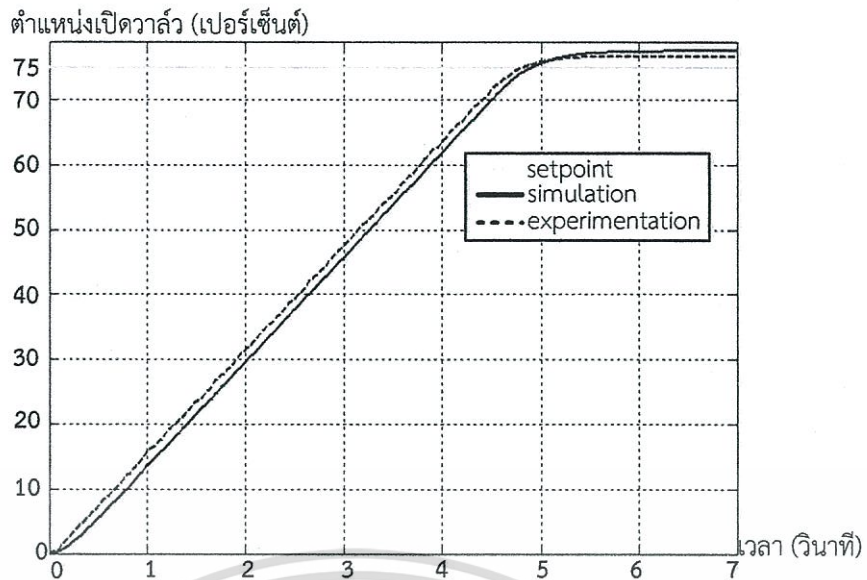
(ก) ผลตอบสนอง



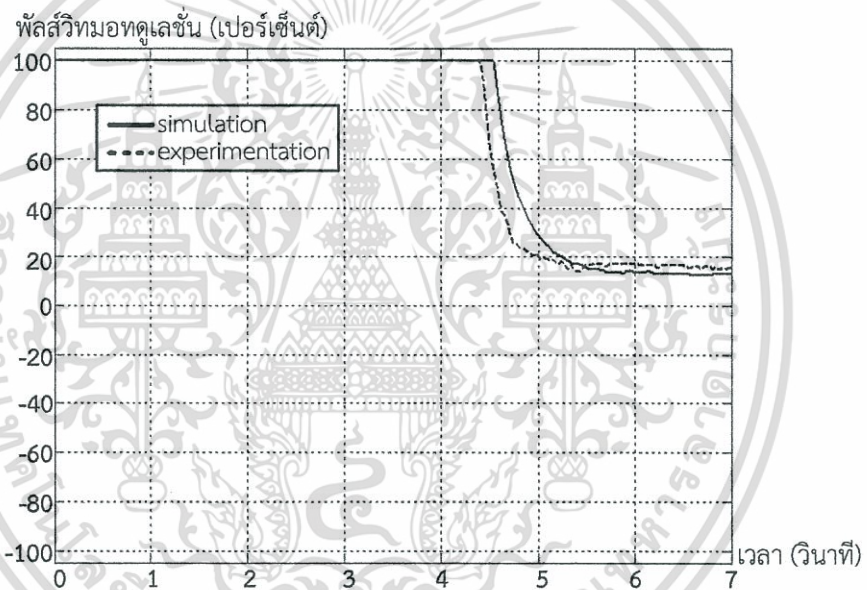
(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 5.30 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง
จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 50 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ผลตอบสนอง



(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 5.31 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 75 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี

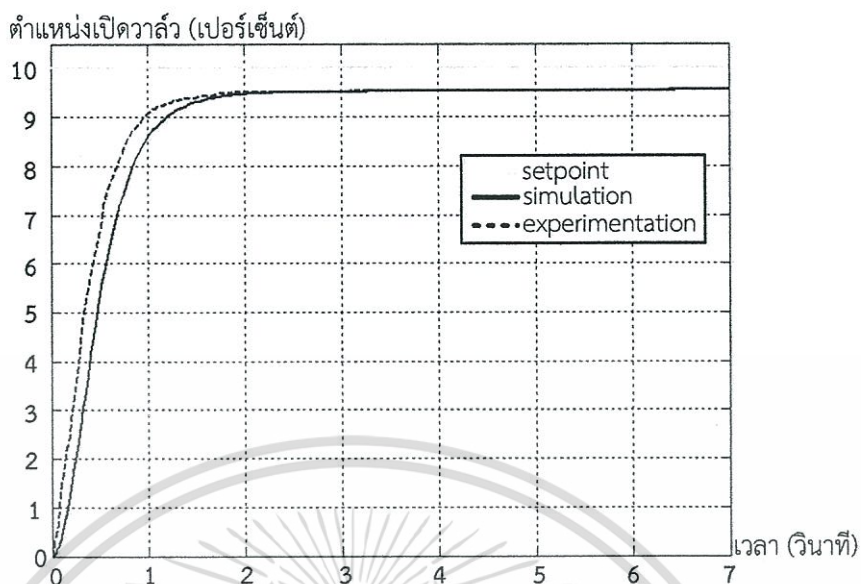
จากการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลการจำลองของการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีดังรูปที่ 5.28 ถึง 5.31 พบว่าการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10 และ 25 เปอร์เซ็นต์ผลการทดลองมีลักษณะคล้ายกับผลการจำลองคือมีค่าความผิดพลาดในช่วงก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวเหมือนกันโดยมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสัญญาณควบคุมของทั้งการจำลองและการทดลองตัวควบคุมยังคงมีการจ่ายสัญญาณออกมาเหมือนกัน โดยที่อินทิเกรเตอร์ยังคงค่อย ๆ เพิ่มสัญญาณควบคุมแต่ต้องใช้เวลาานมากเพื่อให้สามารถเอาชนะแรงเสียดทานสถิตย์ได้มอเตอร์ถึงจะสามารถหมุนเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงไปยังเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งอ้างอิงได้ ในส่วนการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 50 และ 75 เปอร์เซ็นต์ผลการทดลองมีลักษณะคล้ายกับผลการจำลองคือเกิดค่าพุ่งเกิน และค่อย ๆ ไล่เข้าสู่ตำแหน่งอ้างอิง โดยผลการทดลองมีค่าความผิดพลาดในช่วงก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวน้อยกว่าการจำลอง ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสัญญาณควบคุมของทั้งการทดลองและการจำลองตัวอินทิเกรเตอร์ยังคงค่อย ๆ ลดสัญญาณควบคุม แต่ต้องใช้เวลาานมากเพื่อให้สามารถเอาชนะแรงเสียดทานสถิตย์ได้ แล้วทำให้มอเตอร์หมุนกลับทิศปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงกลับไปยังตำแหน่งอ้างอิงได้ อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณาจากผลตอบสนองชั่วคราวของการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยังทุก ๆ ตำแหน่งอ้างอิงพบว่าผลการทดลองมีช่วงเวลาขึ้นและช่วงเวลาเข้าที่เร็วกว่าผลจากการจำลอง

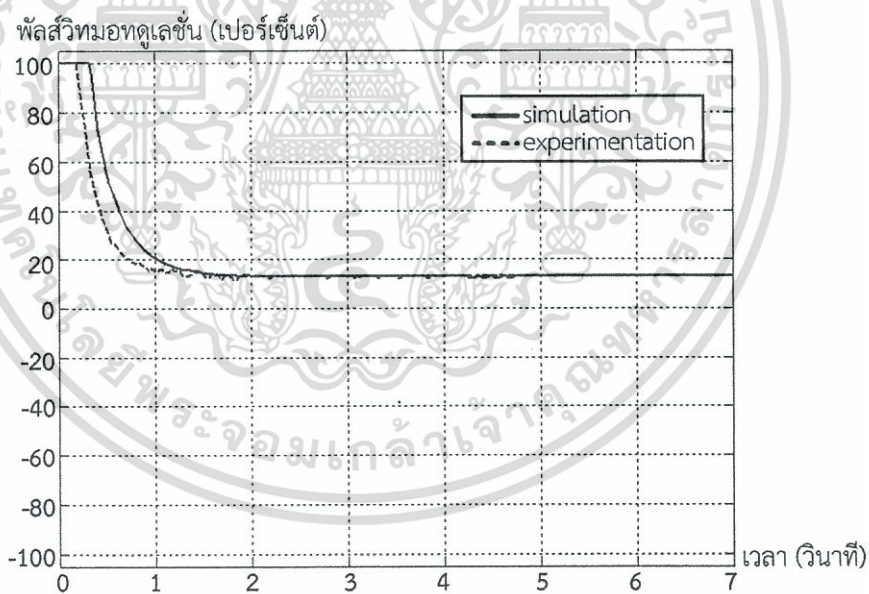
5.2.5 ผลการทดลองตัวควบคุมแบบพีไอดีร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัพ

ในหัวข้อนี้เป็นการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดของวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัพซึ่งมีค่า $K_p=24.091$, $K_I=0.4$ และ $K_D=4.802$ เช่นเดียวกับตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยการทดลองเป็นการควบคุมให้วาล์วเปิดจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10, 25, 50, และ 75 เปอร์เซ็นต์แล้วนำผลการทดลองไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการจำลอง ดังรูปที่ 5.32 ถึง 5.35 ตามลำดับ

จากการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลการจำลองของการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัพดังรูปที่ 5.24 ถึง 5.27 พบว่าผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมที่ได้จากการทดลองมีลักษณะคล้ายกับการจำลอง คือผลตอบสนองเกิดความผิดพลาดในช่วงก่อนเข้าสู่สภาวะสภาวะคงตัวเหมือนกันโดยมีค่าใกล้เคียงกันได้ โดยผลทดลองมีค่าความผิดพลาดมากกว่าผลการจำลองในการควบคุมการตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10, 25, 50 และ 75 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณาจากสัญญาณควบคุมของทั้งการจำลองและการทดลองตัวควบคุมยังคงมีการจ่ายสัญญาณควบคุมเหมือนกัน แต่ไม่สามารถเอาชนะแรงเสียดทานสถิตย์ได้มอเตอร์จึงไม่สามารถหมุนเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงไปยังตำแหน่งอ้างอิง และจากการพิจารณาผลตอบสนองชั่วคราวพบว่าผลการทดลองมีช่วงเวลาขึ้นและช่วงเวลาเข้าที่เร็วกว่าผลจากการจำลองในทุก ๆ การควบคุม



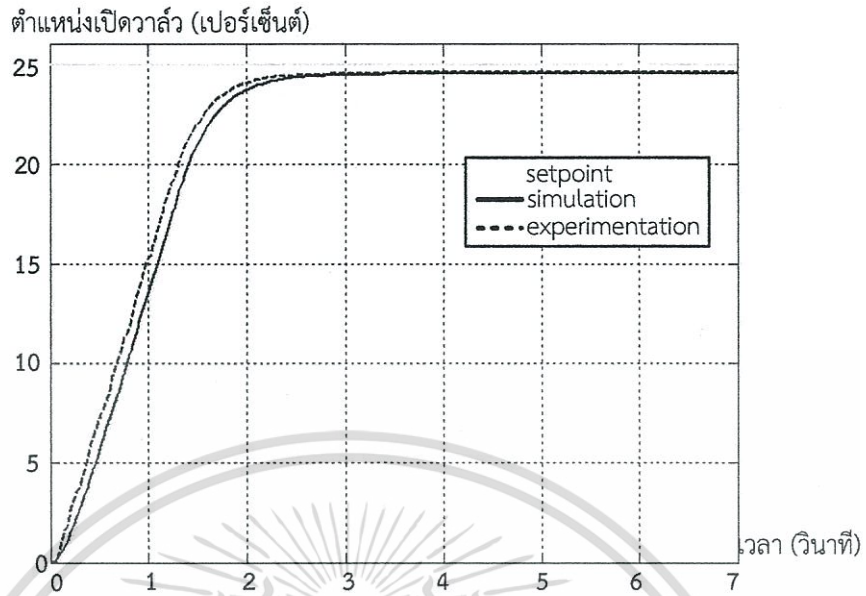
(ก) ผลตอบสนอง



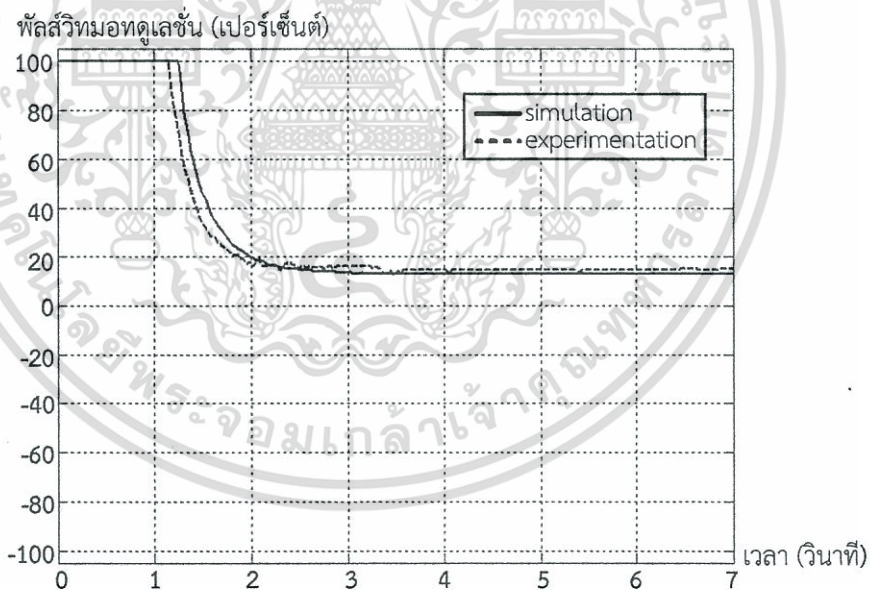
(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 5.32 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



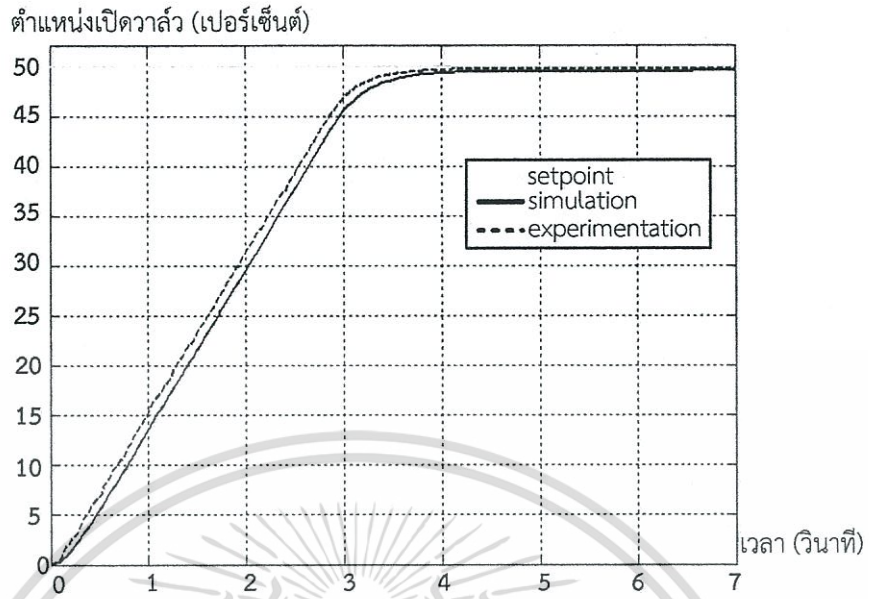
(ก) ผลตอบสนอง



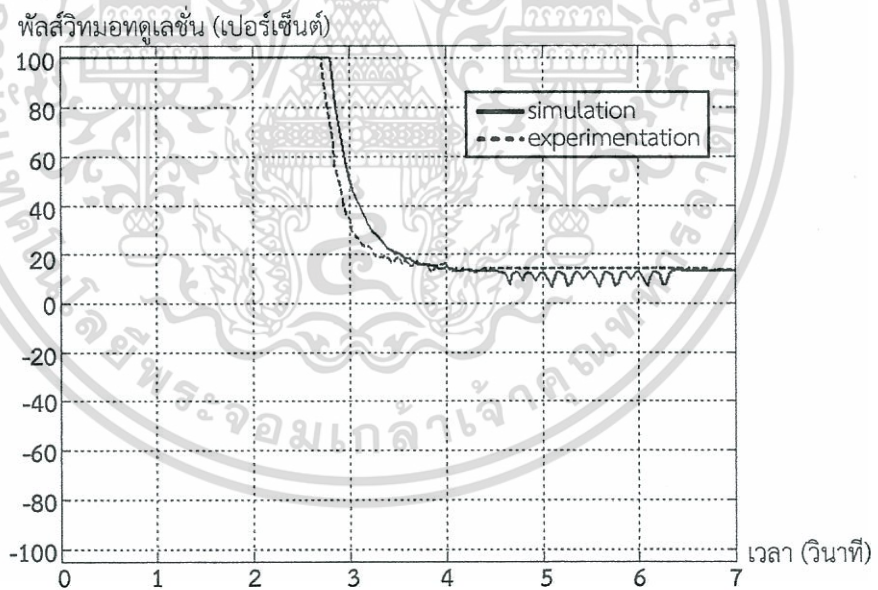
(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 5.33 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 25 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไววอร์ป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



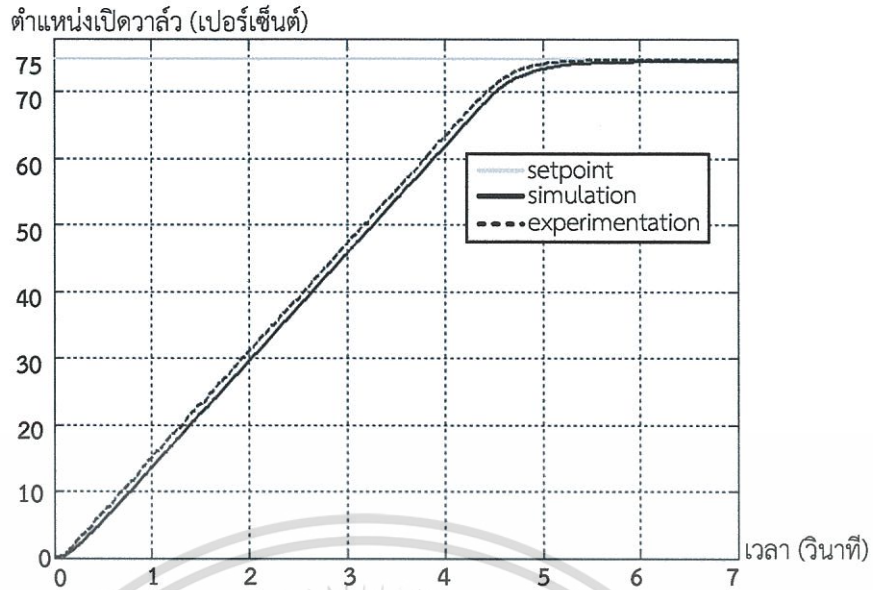
(ก) ผลตอบสนอง



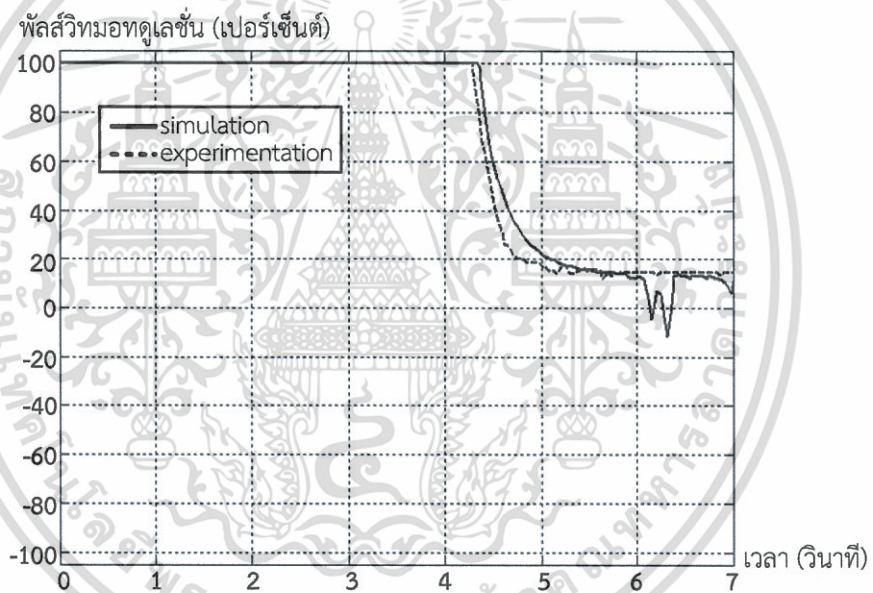
(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 5.34 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 50 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวบ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ผลตอบสนอง



(ข) สัญญาณควบคุม

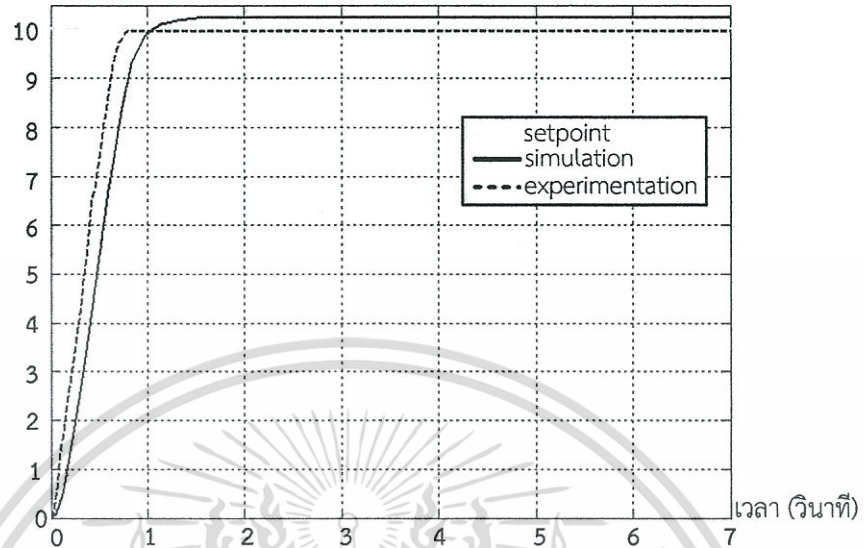
รูปที่ 5.35 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 75 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวบร้อท

5.2.6 ผลการทดลองตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการปรับแต่งค่าเกณฑ์ร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวบร้อท

ในหัวข้อนี้เป็นการกล่าวถึงการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดของวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงในระบบจริง ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการปรับแต่งค่าเกณฑ์ร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวบร้อทซึ่งมีค่าเกณฑ์ที่ได้จากการปรับแต่งคือ $K_p = 24.091$, $K_I = 0.4$ โดยการทดลองเป็นการควบคุมให้วาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเปิดจากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10, 25, 50 และ 75 เปอร์เซ็นต์ แล้วนำผลการทดลองไปเปรียบเทียบกับผล

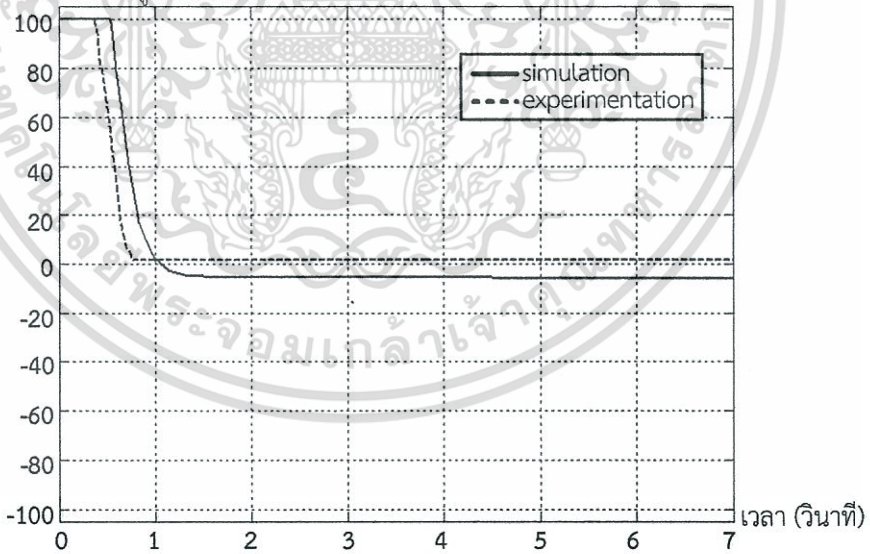
เอกสารนี้สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งเปิดวาล์ว (เปอร์เซ็นต์)



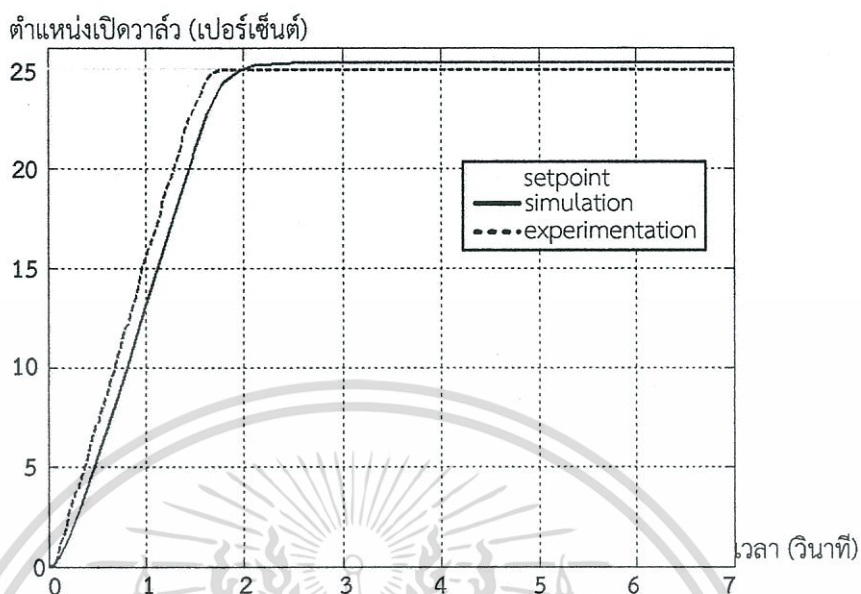
(ก) ผลตอบสนอง

ผลลัพธ์หมอดูเลขชั้น (เปอร์เซ็นต์)

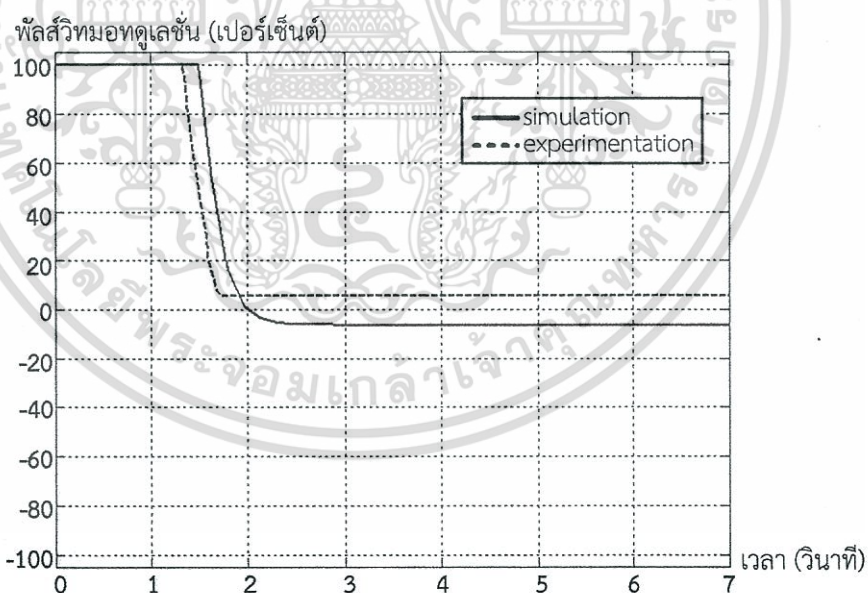


(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 5.36 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 10 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับแต่งค่าเกณฑ์ร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัพ



(ก) ผลตอบสนอง

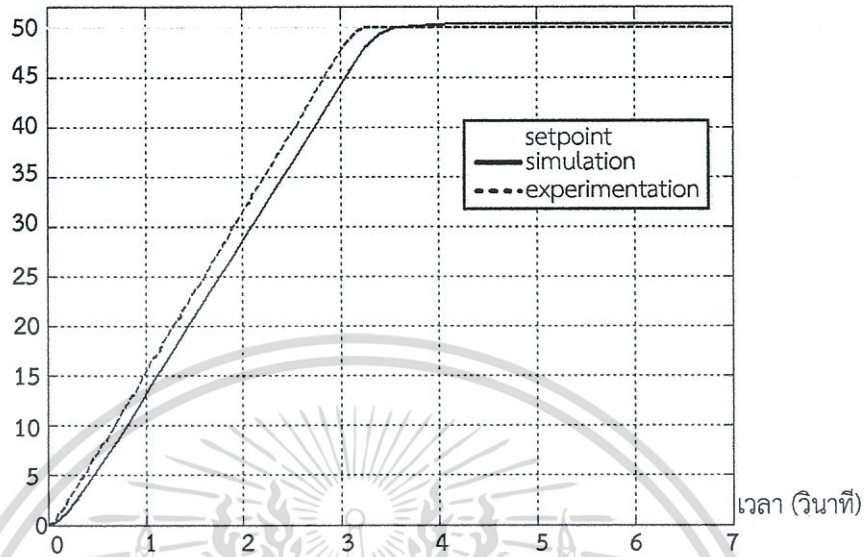


(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 5.37 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 25 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับแต่งค่าเกณฑ์ร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัพ

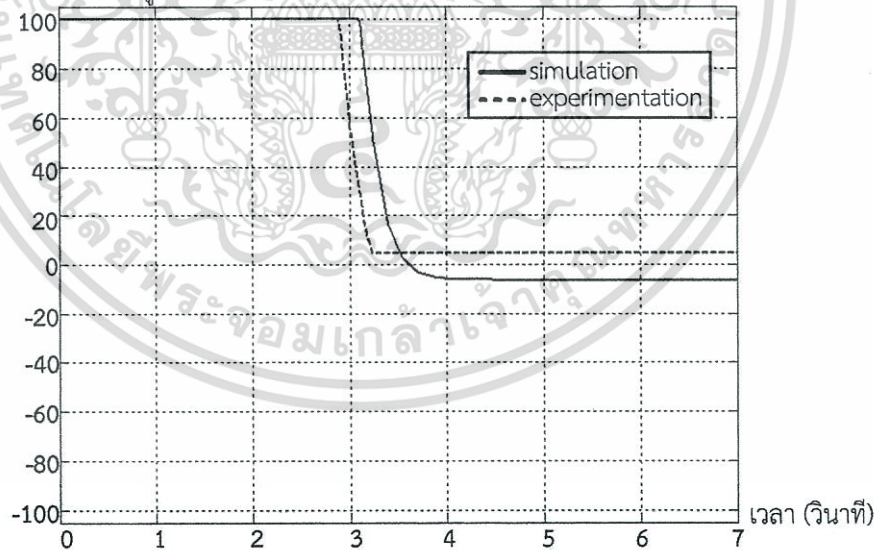
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งเปิดวาล์ว (เปอร์เซ็นต์)



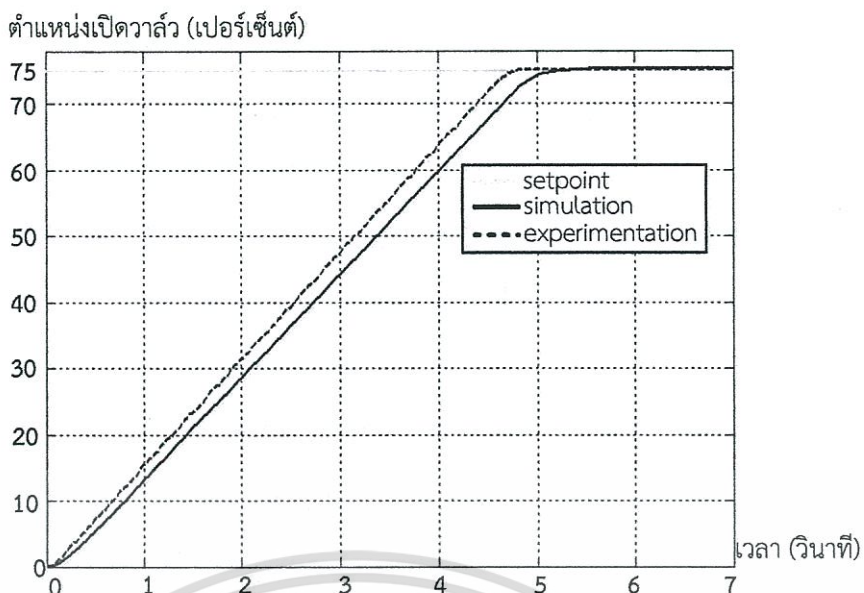
(ก) ผลตอบสนอง

ฟิลส์วิทมอทุดเลชั่น (เปอร์เซ็นต์)

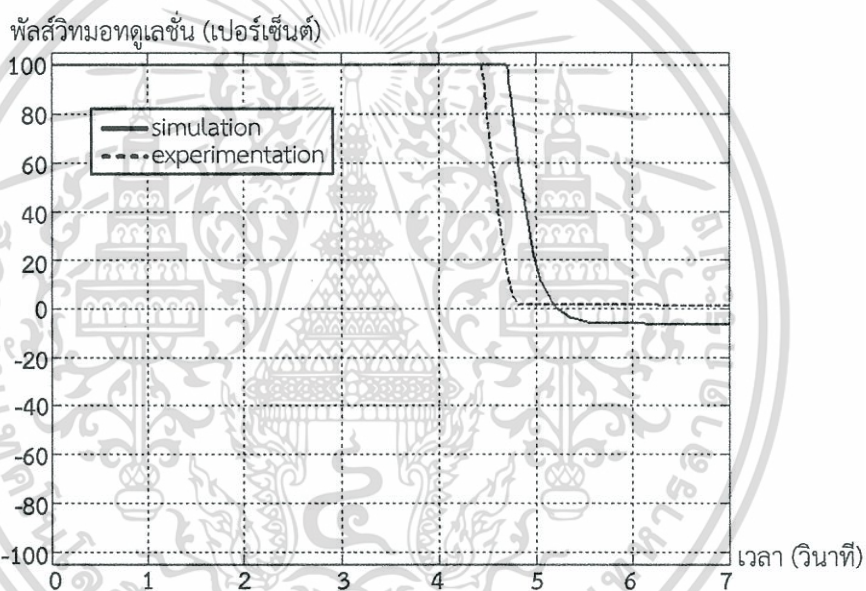


(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 5.38 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 50 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับแต่งค่าเกณฑ์ร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัฟ



(ก) ผลตอบสนอง



(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 5.39 ผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากตำแหน่ง 0 ไปยัง 75 เปอร์เซ็นต์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับแต่งค่าเกณฑ์ร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไววอว์

จากการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลการจำลองในการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอที่มีการปรับแต่งค่าเกณฑ์ร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไววอว์ดังรูปที่ 5.36 ถึง 5.39 พบว่าผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมที่ได้จากการทดลองมีลักษณะต่างกับการจำลอง คือผลตอบสนองจากการทดลองไม่มีค่าฟุงเกิน และมีค่าความผิดพลาดในช่วงก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวเพียงเล็กน้อยซึ่งเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้ ในส่วนของผลการจำลองผลตอบสนองเกิดค่าฟุงเกินและมีค่าความผิดพลาดในช่วงก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวซึ่งต้องใช้เวลาานานมากในการให้ตัวอินทิเกรเตอร์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดสัญญาณควบคุมที่สะสมไว้เพื่อเอาชนะแรงเสียดทานสถิตย์แล้วหมุนมอเตอร์กลับทิศปิตวาล์ว เชื้อเพลิงเข้าสู่ตำแหน่งอ้างอิง และถ้าพิจารณาจากผลตอบสนองชั่วคราวพบว่าผลการทดลองมีช่วงเวลาขึ้นและช่วงเวลาเข้าที่เร็วกว่าผลจากการจำลองด้วย

5.2.7 สรุปผลการทดลอง

จากการนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองพบว่าผลตอบสนองที่สถานะชั่วคราวและผลตอบสนองที่สถานะคงตัวที่ได้จากการจำลองและการทดลองมีความใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์กระแสตรงมีความถูกต้อง และสามารถนำมาใช้แทนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงได้ โดยเมื่อนำผลการทดลองของตัวควบคุมแบบพีไอที่ได้ค่าเกนจากการปรับแต่งร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไววอร์นัฟไปเปรียบเทียบกับตัวควบคุมที่ได้ค่าเกนจากการออกแบบพบว่าตัวควบคุมแบบพีไอที่ได้ค่าเกนจากการปรับแต่งร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไววอร์นัฟสามารถควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงไปยังตำแหน่งอ้างอิงได้เร็วกว่าตัวควบคุมที่ได้ค่าเกนจากการออกแบบ โดยไม่มีค่าฟุงเกินและมีค่าความผิดพลาดในช่วงก่อนเข้าสู่สถานะคงตัวตัวน้อยที่สุด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าตัวควบคุมแบบพีไอที่ได้ค่าเกนจากการปรับแต่งร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไววอร์นัฟมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในระบบควบคุมตำแหน่งวาล์วจ่ายเพลิงที่ทำงานร่วมกับระบบควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซ

5.3 การทดลองควบคุมของระบบควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซ

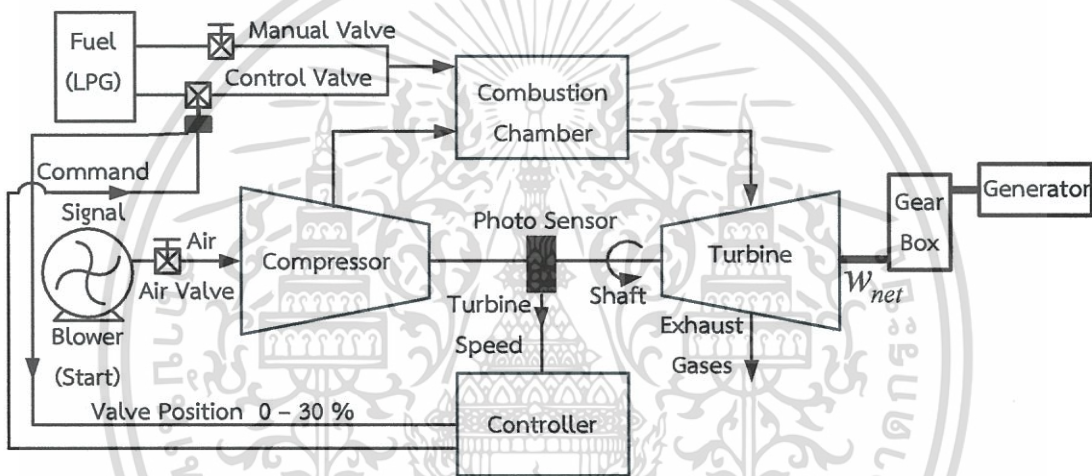
การออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซจำเป็นต้องอาศัยการทดลองกับระบบจริงโดยใช้วิธีลองผิดลองถูกปรับหาค่าเกนของตัวควบคุมแบบพี ไอ พีไอดี ไอ-พี และไอ-พีดี เนื่องจากไม่สามารถออกแบบตัวควบคุมและทำการจำลองก่อนได้เพราะว่าไม่ทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก โดยการควบคุมตำแหน่งเปิด-ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงได้อาศัยตัวควบคุมแบบพีไอที่ได้ค่าเกนจากการปรับแต่งร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไววอร์นัฟซึ่งมีค่า $K_p = 24.091$ และ $K_I = 0.4$

เพื่อให้การทดลองหาค่าเกนของตัวควบคุมแต่ละชนิดสามารถนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับกันได้จำเป็นต้องกำหนดให้เงื่อนไขการทดลองสถานะเริ่มต้นมีเหมือนกัน โดยการทดลองจะควบคุมให้ความดันของก๊าซแอลพีจีที่ออกจากถังมีความดันคงที่ที่ 3 บาร์ และปรับความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยวาล์วมือ (manual valve) ให้มีความเร็วรอบประมาณ 15000 รอบต่อนาที จากนั้นควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมจากความเร็วรอบ 15000 ไปยัง 30000 รอบต่อนาที แต่อย่างไรก็ตามการทำให้ความเร็วรอบกังหันก๊าซมีความเร็วเริ่มต้นอยู่ที่ 15000 รอบต่อนาทีเท่ากันทุก ๆ ครั้งในการทดลองเป็นไปได้ยาก ดังนั้นจึงยอมให้มีค่าความผิดพลาด ± 500 รอบต่อนาที และกำหนดให้สัญญาณควบคุมจากตัวควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซซึ่งคือตำแหน่งอ้างอิงในการเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงอยู่ที่

ตำแหน่งสุดเท่ากับ 0 วัลเปอร์เซ็นต์ และมากที่สุดเท่ากับ 30 วัลเปอร์เซ็นต์ การที่กำหนดให้สัญญาณค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์เนื่องจากการเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ก็สามารถทำให้ความเร็วรอบกังหันก๊าซมีค่าประมาณ 30000 รอบต่อนาที ถ้าเปิดมากกว่านี้อาจทำให้เชื้อเพลิงมีอัตราการไหลมากเกินไปซึ่งเป็นอันตรายทั้งโครงสร้างเครื่องยนต์และผู้ควบคุมแต่อย่างไรก็ตามเพื่อให้เห็นถึงความสามารถในการควบคุมของตัวควบคุมแต่ละชนิดจึงกำหนดให้ค่าสัญญาณควบคุมมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 30 และการที่กำหนดให้สัญญาณควบคุมมีค่าน้อยสุดเท่ากับ 0 เนื่องจากในธรรมชาติของเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กนี้ไม่สามารถดึงเอาเชื้อเพลิงออกจากระบบได้

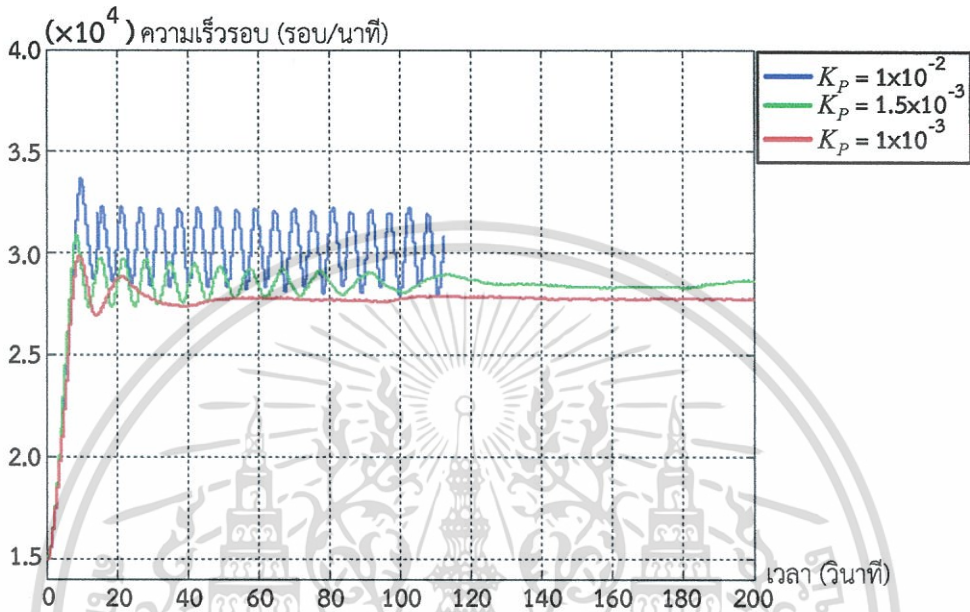
ขั้นตอนการทดลอง และเพื่อให้สามารถอธิบายถึงขั้นตอนการทดลองได้อย่างชัดเจนจะอาศัยไดอะแกรมของวัฏจักรเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กที่ประกอบเข้ากับอุปกรณ์วัด และอุปกรณ์ควบคุมประกอบารอธิบายดังรูปที่ 5.40



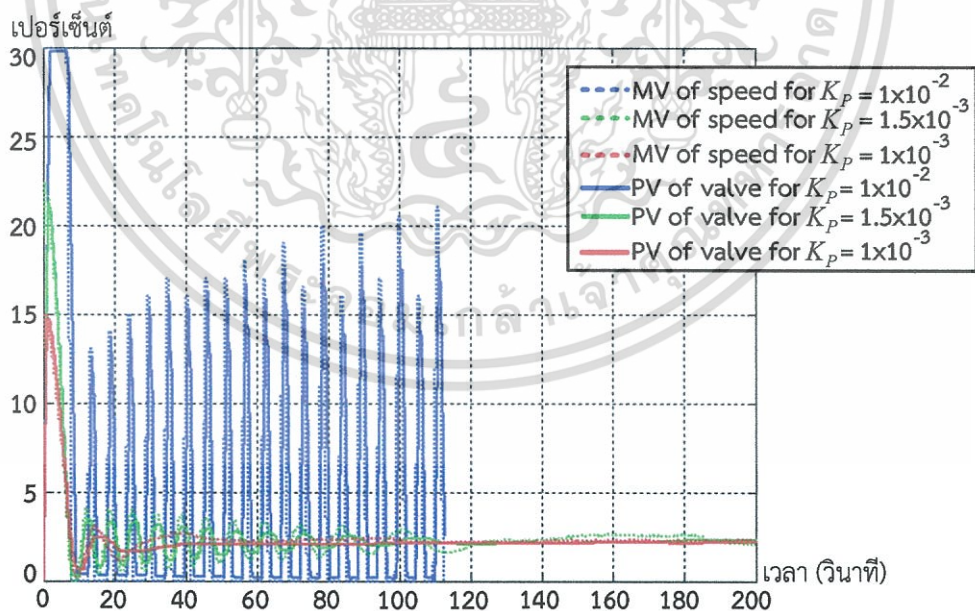
รูปที่ 5.40 วัฏจักรเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กที่ประกอบเข้ากับอุปกรณ์วัด และอุปกรณ์ควบคุม

หลังจากที่สามารถสตาร์ทเครื่องยนต์และเครื่องยนต์ยังสามารถเดินเครื่องได้โดยไม่ต้องอาศัยเครื่องดูดอากาศ เมื่อเครื่องยนต์สามารถเดินเครื่องโดยมีความเร็วรอบกังหันก๊าซที่สม่ำเสมอ ผู้ทดลองปรับอัตราการไหลของเชื้อเพลิงด้วยวาล์วมือให้ความเร็วรอบกังหันก๊าซมีความเร็วรอบประมาณ 15000 รอบต่อนาที เมื่อความเร็วรอบกังหันก๊าซมีความเร็วรอบเริ่มต้นอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้และค่อนข้างคงที่ จะสั่งการให้ระบบควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซทำงานโดยใช้ตัวควบคุมแบบอัตโนมัติและกำหนดความเร็วรอบอ้างอิงไว้ที่ 30000 รอบต่อนาทีผ่านโปรแกรม LabView โดยในการทดลองมีการกำหนดสมรรถนะที่ต้องการคือผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกินไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวไม่เกิน ± 2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในการทดลองถ้าตัวควบคุมมีผลตอบสนองที่มีสมรรถนะตรงตามข้อกำหนดก็เปลี่ยนตัวควบคุม แต่ถ้าผลตอบสนองมีสมรรถนะไม่ตรงตามข้อกำหนดก็เปลี่ยนค่าเกนของตัวควบคุมชนิดนั้น ๆ แล้วทดลองใหม่อีกครั้งซึ่งการเปลี่ยนค่าเกนของตัวควบคุมแต่ละครั้งจะค่อย ๆ ปรับเพิ่มค่าเกนขึ้นจากน้อยไปมาก โดยในการทดลองค่าเกนหนึ่งชุดของแต่ละตัวเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมจะทดลองซ้ำ 2 ครั้ง และในขณะทดลองถ้าผลตอบสนองมีความเร็วรอบกึ่งหันก๊าซมากกว่า 37000 รอบต่อนาทีนานกว่า 10 วินาทีหรือผลตอบสนองมีแกว่งอยู่ตลอดหรือมีการควบคุมแบบอัตโนมัติเป็นระยะเวลานานแล้วผลตอบสนองยังมีค่าความผิดพลาดมากจะหยุดการทดลอง โดยการทดลองได้เริ่มทดลองจากตัวควบคุมแบบพี พีไอ พีไอดี ไอ-พี และไอ-พีดี ตามลำดับ



(ก) ผลตอบสนองของความเร็วรอบกึ่งหันก๊าซ



(ข) สัญญาณควบคุมของความเร็วรอบกึ่งหันก๊าซ และผลตอบสนองของตำแหน่งวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง รูปที่ 5.41 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกึ่งหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.1 ผลการทดลองตัวควบคุมแบบพี

การทดลองของตัวควบคุมแบบพีด้วยวิธีการลองผิดลองถูกโดยปรับค่า K_p ที่ให้ผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกิน ค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวที่สามารถยอมรับได้ ซึ่งการปรับค่า K_p เริ่มต้นจากค่าน้อย ๆ เนื่องจากเมื่อปรับความเร็วรอบกังหันก๊าซจาก 15000 ไปเป็น 30000 รอบต่อ นาที ค่าความผิดพลาดเริ่มต้นจะมีค่าเท่ากับ 15000 รอบต่อนาที ดังนั้นค่าเกนจึงต้องมีค่าน้อยอยู่ในหลักทศนิยมสามหลักเพื่อให้วาล์วจ่ายเชื้อเพลิงไม่เปิดมากเกินไป โดยในเบื้องต้นจะเลือกใช้ค่า $K_p = 0.001$ เพื่อให้วาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเปิดเพียง 15 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นจะค่อย ๆ ปรับค่าเกนเพิ่มขึ้นเพื่อเป็นการกำจัดค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัว โดยในการทดลองได้ทดลองปรับจาก $K_p = 0.0011, 0.00115, 0.0012, 0.00125, 0.0015, 0.0025, 0.01, 0.05, 0.25$ ซึ่งแสดงผลการทดลองจะแสดงเพียงบางค่าเกนเท่านั้นเพื่อให้การแสดงผลมีความชัดเจนดังรูปที่ 5.41

จากการทดลองควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีดังรูปที่ 5.41 พบว่าการใช้ค่าเกนเริ่มต้นที่มีค่า $K_p = 0.001$ ทำให้ผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกินและเกิดการแกว่งของสัญญาณเพียงเล็กน้อย แต่ยังคงมีค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวอยู่มาก จึงค่อย ๆ ปรับเพิ่มค่า K_p ให้มีค่ามากขึ้นเพื่อลดค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวพบว่าผลตอบสนองมีค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวน้อยลง แต่มีค่าพุ่งเกินมากขึ้นและเกิดการแกว่งของสัญญาณมากขึ้น และเมื่อเพิ่มค่า K_p จนมีค่าเท่ากับ 0.01 พบว่าผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกินและเกิดการแกว่งของสัญญาณจนไม่สามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ การที่ผลตอบสนองมีลักษณะดังกล่าวเนื่องจากระบบควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซเป็นระบบชนิดศูนย์ ซึ่งตัวควบคุมแบบพีไม่เหมาะนำมาใช้กับระบบชนิดศูนย์ ดังนั้นการใช้ตัวควบคุมแบบพีควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซอาจไม่สามารถทำให้ระบบสามารถเข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงโดยไม่ให้เกิดค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัว

5.3.2 ผลการทดลองตัวควบคุมแบบพีไอ

จากผลการทดลองควบคุมระบบความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีทำให้ทราบว่าระบบควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซเป็นระบบอันดับศูนย์ ซึ่งการใช้ตัวควบคุมแบบพีอาจไม่สามารถทำให้ระบบสามารถเข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงโดยไม่ให้เกิดค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวได้ ดังนั้นในหัวข้อจึงทดลองควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอซึ่งตัวควบคุมแบบพีไออาจกำจัดค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวได้ โดยในการทดลองได้นำค่าเกนของตัวควบคุมแบบพีที่ผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกินที่เหมาะสมมาใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการทดลองซึ่งมีค่า $K_p = 0.001$ อย่างไรก็ตามเราทราบอยู่แล้วว่าในการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอผลตอบสนองของระบบจะมีแนวโน้มที่จะเกิดค่าพุ่งเกินมากขึ้น ดังนั้นในการทดลองจึงจำเป็นต้องทดลองปรับลดค่า K_p ลงเพื่อให้ผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกินลดลงและทดลองปรับเปลี่ยนค่า K_I ด้วย แต่เพื่อเป็นการศึกษาผลตอบสนองของระบบเมื่อเพิ่มค่า K_p ในการทดลองจึงมีการทดลองปรับเพิ่มค่า K_p ด้วยเช่นกัน ในการทดลองจึงมีการปรับค่า K_p และ K_I ต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.1 ซึ่งทำให้มีผลการทดลองเป็นจำนวนมาก แต่ไม่สามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงผลการทดลองทั้งหมด เพื่อให้การแสดงผลการทดลองมีความชัดเจนจึงแสดงผลการทดลองเพียงบางส่วนดังรูปที่ 5.42 ถึง 5.47 โดยการทดลองจะกล่าวถึงการทดลองจากค่า K_p มากไปน้อย

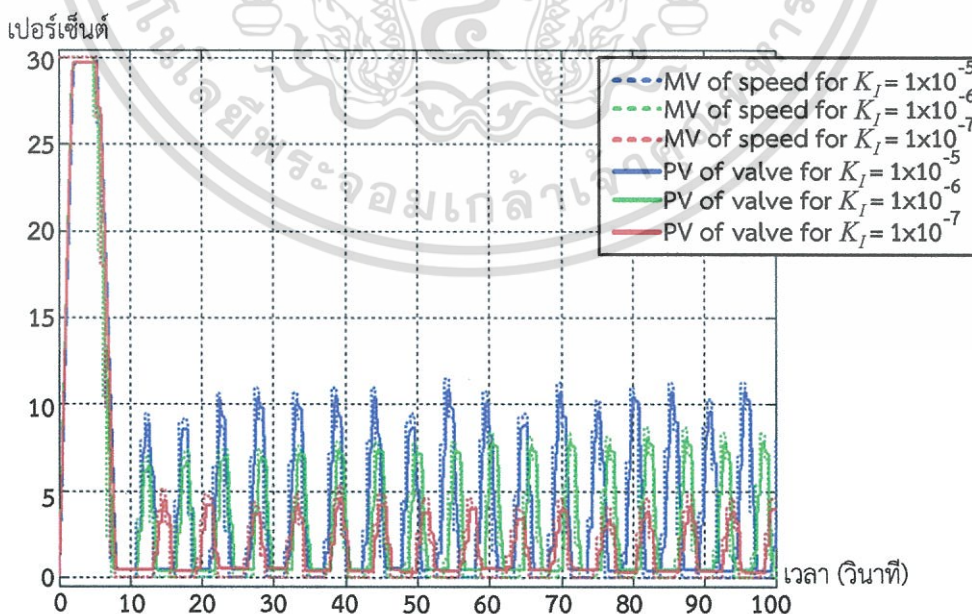
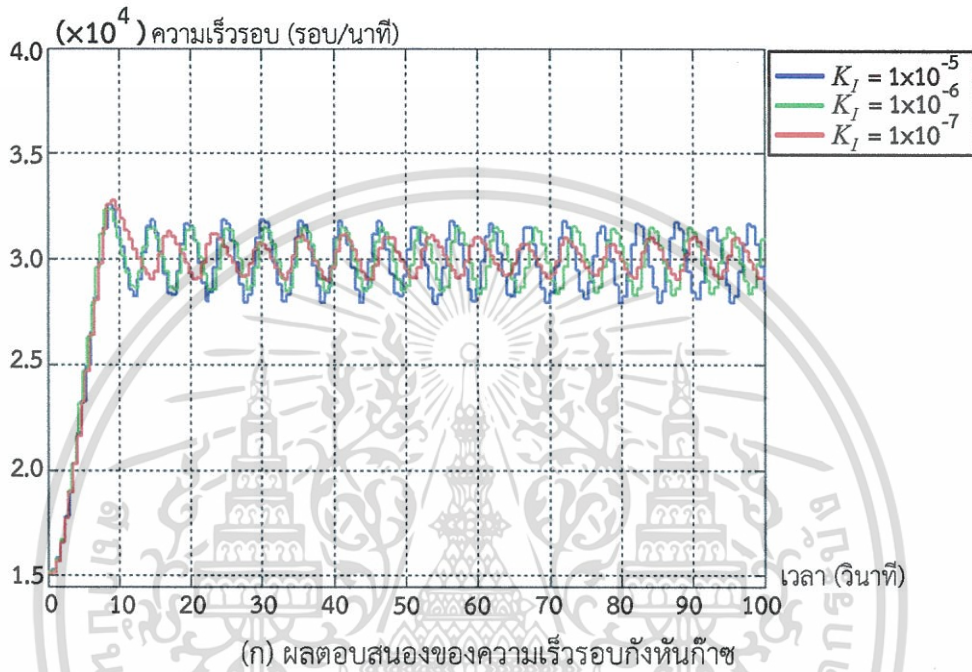
ตารางที่ 5.1 ค่า K_p และ K_I ของตัวควบคุมแบบพีไอที่นำมาใช้ทดลองควบคุมระบบควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซ

$K_I \backslash K_p$	0.005	0.002	0.001	0.0005	0.0001	0.00005
0.0001		✓	✓	✓		
0.000075			✓		✓	
0.00005			✓	✓	✓	✓
0.00001	✓		✓	✓	✓	✓
0.0000075				✓	✓	✓
0.000005	✓		✓	✓	✓	✓
0.0000025						✓
0.000001	✓	✓		✓		✓
0.0000001	✓	✓	✓			
0.00000001		✓				

จากการทดลองควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอโดยใช้วิธีลองผิดลองถูก ดังรูปที่ 5.42 ถึง 5.47 พบว่าการกำหนดค่า K_p เริ่มต้นให้มีค่ามากเกินไปคือ $K_p = 0.005, 0.002$ ทำให้ผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกิน เกิดการแกว่งของสัญญาณ และไม่สามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ ถึงแม้ปรับลดค่า K_I ให้มีค่าน้อยลงแล้วก็ตามผลตอบสนองยังคงมีลักษณะเช่นเดิมดังรูปที่ 5.42 และ 5.43 โดยเมื่อลดค่า K_p ลงให้มีค่าเท่ากับ 0.001, 0.0005 พบว่าผลตอบสนองที่ค่าเกณฑ์ $K_p = 0.001, K_I = 0.00005, 0.00001$ และ $K_p = 0.0005, K_I = 0.00001, 0.000005$ เกิดการพุ่งเกินและการแกว่งของสัญญาณแต่สามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้โดยมีค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวที่สามารถยอมรับได้ อย่างไรก็ตามยังคงมีบางค่าเกณฑ์ที่มีค่า K_I มากเกินไปจึงทำให้ผลตอบสนองมีการแกว่งและไม่สามารถเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยในการแกว่งของสัญญาณเกิดขึ้นใกล้ ๆ กับความเร็วรอบอ้างอิงดังรูปที่ 5.44 และ 5.45 จากการทดลองข้างต้นทำให้ทราบว่าลดค่า K_p ลงทำให้ผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกินและการแกว่งของสัญญาณน้อยลง ดังนั้นจึงทดลองปรับลดค่า K_p ลงอีกโดยให้มีค่าเท่ากับ 0.0001 และ 0.00005 ซึ่งทำให้ผลตอบสนองที่ได้จาก $K_p = 0.0001, K_I = 0.0000075, 0.000005$ และ $K_p = 0.00005, K_I = 0.000005$ ไม่มีค่าพุ่งเกิน ไม่เกิดการแกว่งของสัญญาณ และสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้โดยมีค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวที่สามารถยอมรับได้ แต่ที่ค่าเกณฑ์

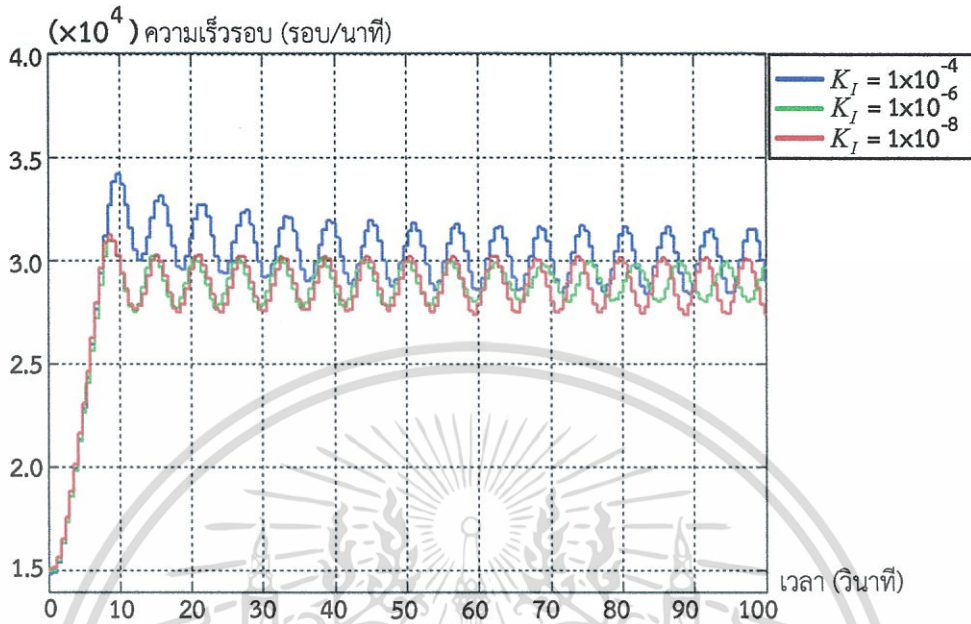
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$K_p = 0.00005$, $K_I = 0.000001$ ไม่สามารถควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซไปยังตำแหน่งอ้างอิงได้ในเวลาที่กำหนดโดยต้องใช้เวลานานมากจึงจะทำให้ความเร็วรอบกังหันก๊าซไปยังความเร็วรอบอ้างอิงได้ และที่ค่า $K_p = 0.0001$, $K_I = 0.00005$ และ $K_p = 0.00005$, $K_I = 0.00005$ พบว่าผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกิน เกิดการแกว่งของสัญญาณ และไม่สามารถเข้าสู่ที่สภาวะคงตัวได้ดังรูปที่ 5.46 และ 5.47

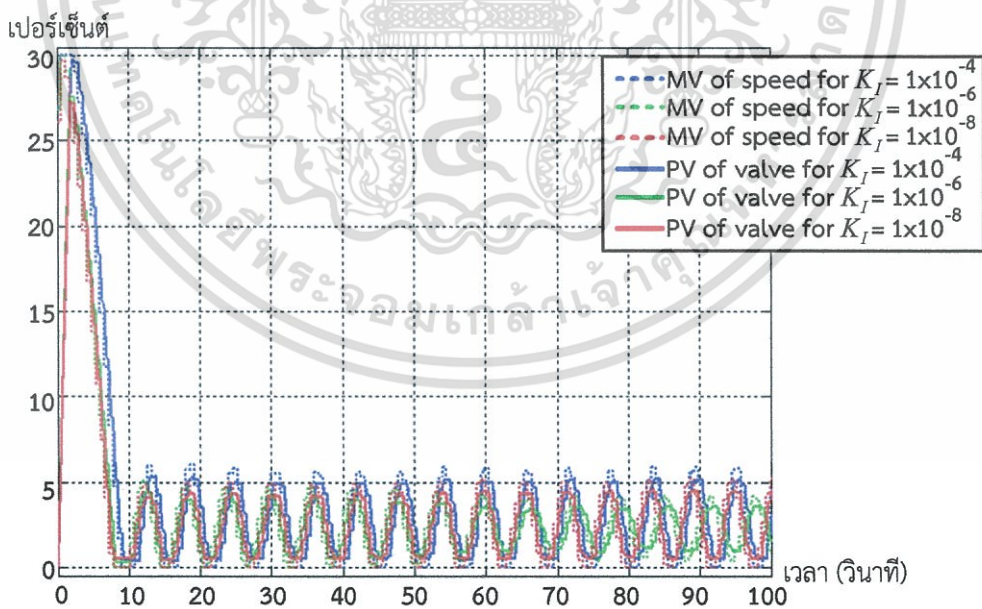


รูปที่ 5.42 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ $K_p = 0.005$

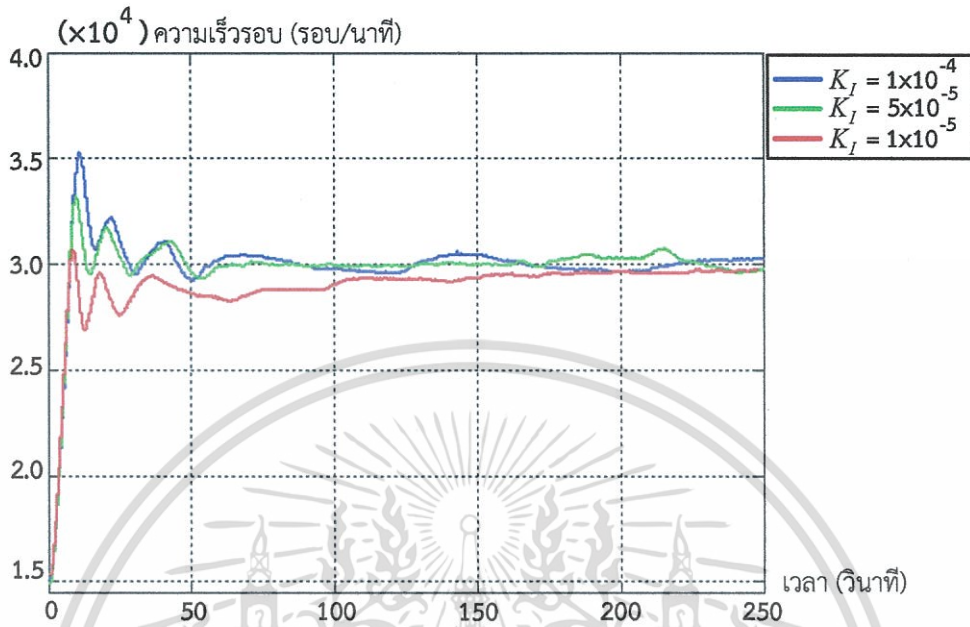
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



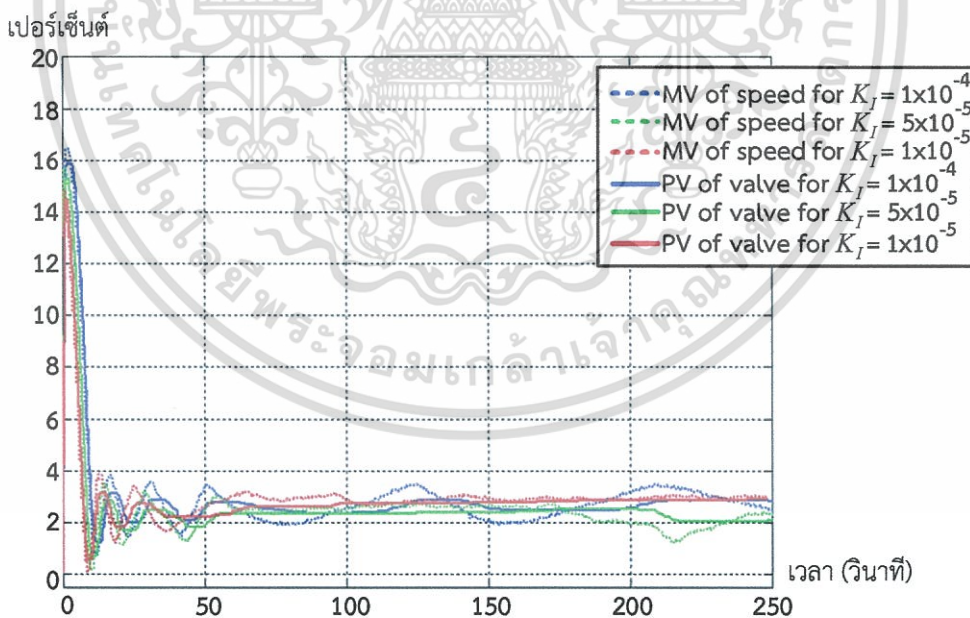
(ก) ผลตอบสนองของความเร็วรอบกัณฑ์ก๊าซ

(ข) สัญญาณควบคุมของความเร็วรอบกัณฑ์ก๊าซ และผลตอบสนองของตำแหน่งวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง รูปที่ 5.43 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกัณฑ์ก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ $K_P=0.002$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

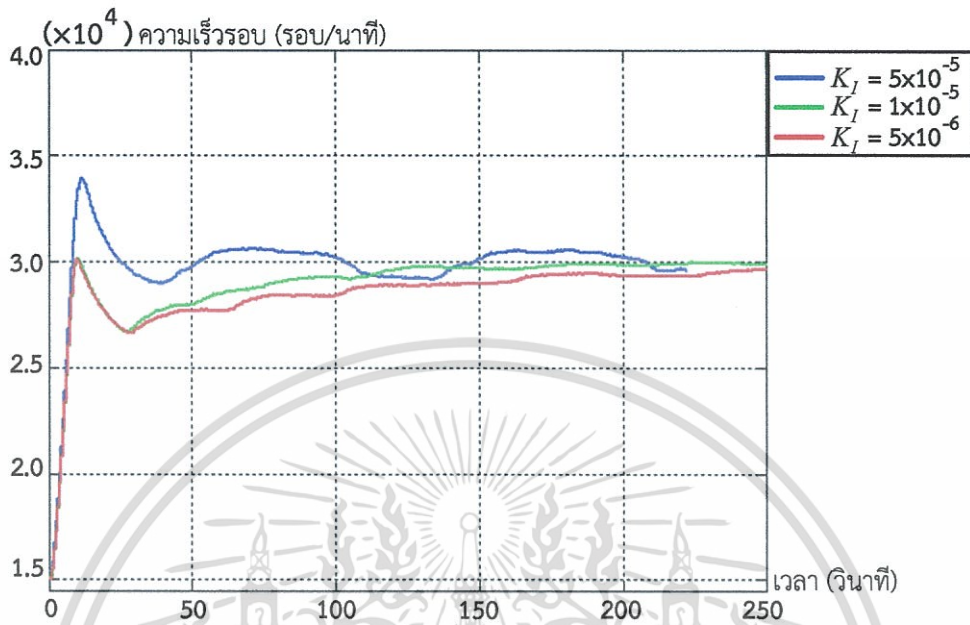


(ก) ผลตอบสนองของความเร็วรอบกังหันก๊าซ

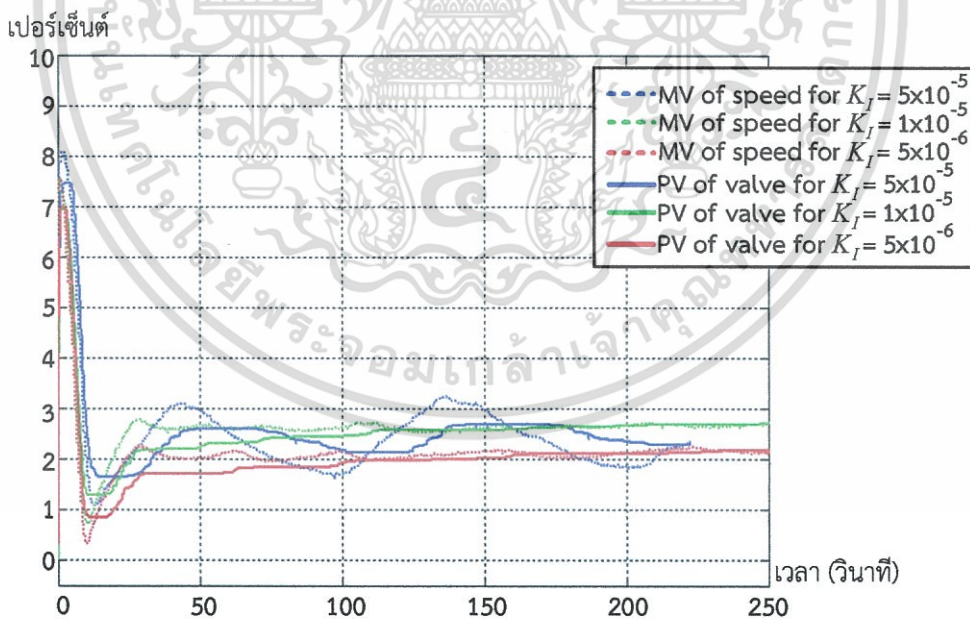


(ข) สัญญาณควบคุมของความเร็วรอบกังหันก๊าซ และผลตอบสนองของตำแหน่งวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง รูปที่ 5.44 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ $K_p=0.001$

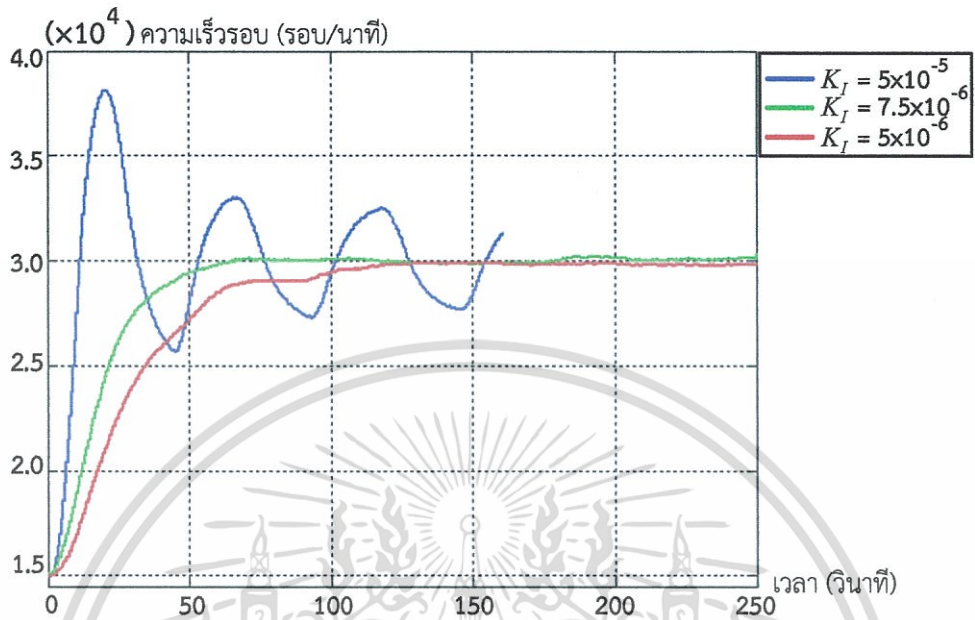
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



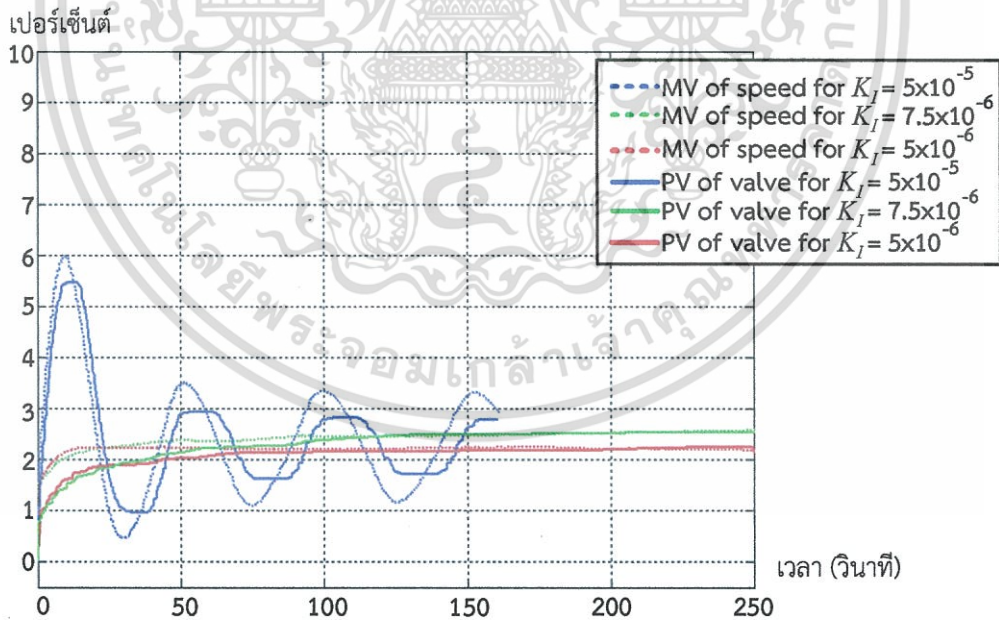
(ก) ผลตอบสนองของความเร็วรอบกังหันก๊าซ

(ข) สัญญาณควบคุมของความเร็วรอบกังหันก๊าซ และผลตอบสนองของตำแหน่งวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง รูปที่ 5.45 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ $K_P=0.0005$

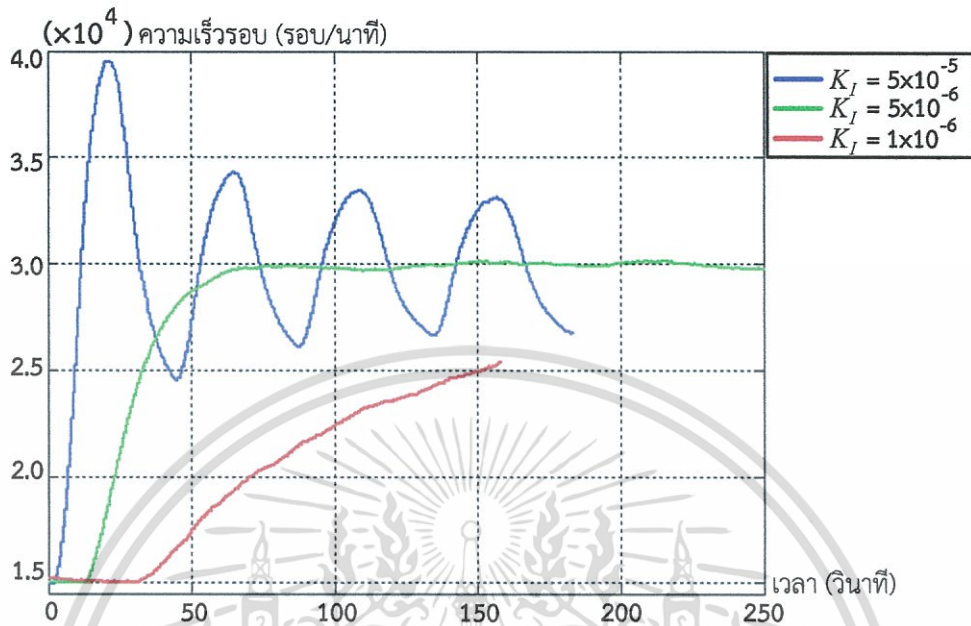
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



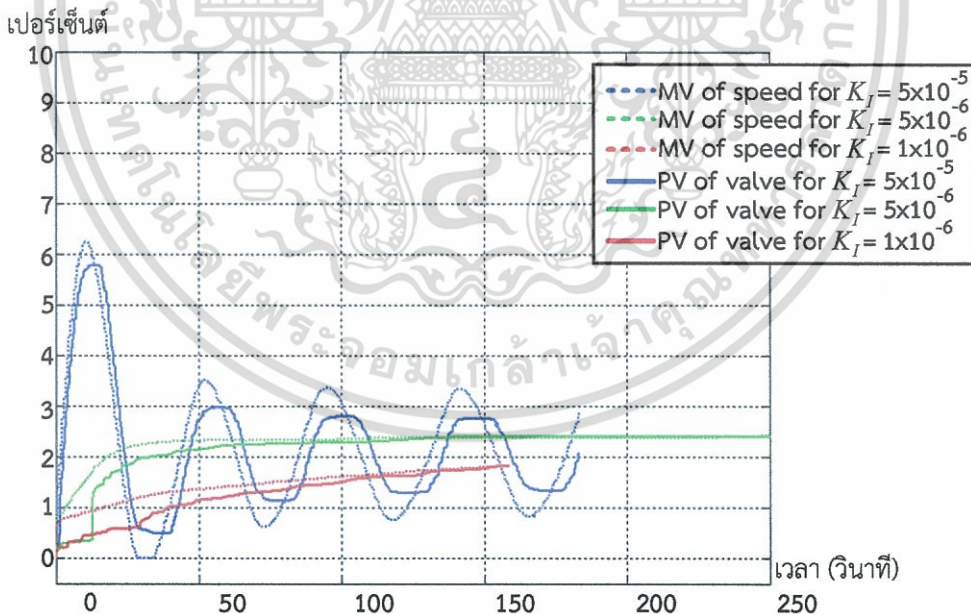
(ก) ผลตอบสนองของความเร็วรอบกังหันก๊าซ

(ข) สัญญาณควบคุมของความเร็วรอบกังหันก๊าซ และผลตอบสนองของตำแหน่งวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง รูปที่ 5.46 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ $K_P=0.0001$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ผลตอบสนองของความเร็วรอบกังหันก๊าซ



(ข) สัญญาณควบคุมของความเร็วรอบกังหันก๊าซ และผลตอบสนองของตำแหน่งวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง
รูปที่ 5.47 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ $K_p = 0.00005$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองปรับค่า K_p และ K_I ของการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซสำหรับตัวควบคุมแบบพีโอพบว่าค่าเกณฑ์ทั้งหมด 3 ค่าเกณฑ์ได้แก่ $K_p = 0.0001$, $K_I = 0.0000075$, 0.000005 และ $K_p = 0.00005$, $K_I = 0.000005$ ที่สามารถทำให้ความเร็วรอบกังหันก๊าซสามารถเข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงได้โดยมีค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวที่สามารถยอมรับได้ และไม่มีค่าพุ่งเกิน ไม่เกิดการแกว่งของสัญญาณ หรือเกิดเพียงเล็กน้อย จึงนำค่าเกณฑ์ทั้ง 3 คู่มาเปรียบเทียบกันเพื่อหาค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมแบบพีโอที่ให้ผลตอบสนองดีที่สุดดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 การเปรียบเทียบสมรรถนะของผลตอบสนองสำหรับการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีโอ

ค่าเกณฑ์	สมรรถนะ	ค่าพุ่งเกินสูงสุด (เปอร์เซ็นต์)	ช่วงเวลาขึ้น (0-95%) วินาที	ช่วงเวลาเข้าที่ (±2%) วินาที
$K_p = 0.0001$ $K_I = 0.0000075$		-	47.08	49.44
$K_p = 0.0001$ $K_I = 0.000005$		-	95.88	98.88
$K_p = 0.00005$ $K_I = 0.000005$		-	57.28	59.08

จากตารางที่ 5.2 พบว่าค่าเกณฑ์ทั้ง 3 คู่ไม่เกิดค่าพุ่งเกิน และไม่เกิดค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงหรือสามารถประมาณได้ว่าไม่เกิดขึ้นเลย แต่ในส่วนของช่วงเวลาขึ้นและช่วงเวลาเข้าที่ของค่าเกณฑ์ $K_p = 0.0001$, $K_I = 0.0000075$ มีค่าต่ำที่สุด ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการทดลองปรับค่าเกณฑ์ของการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีโอค่าเกณฑ์ที่ให้ผลตอบสนองดีที่สุดคือ $K_p = 0.0001$, $K_I = 0.0000075$

5.3.3 ผลการทดลองตัวควบคุมแบบพีโอดี

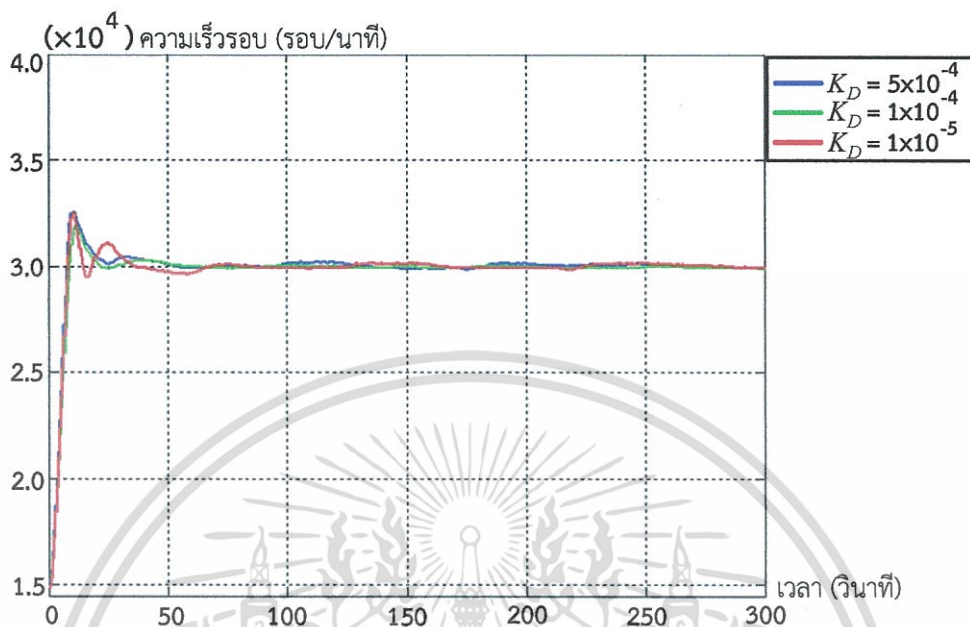
จากผลการทดลองควบคุมระบบความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีโอพบว่าผลตอบสนองของค่าเกณฑ์ $K_p = 0.001$ และ $K_I = 0.00005$ มีค่าพุ่งเกิน และเกิดการแกว่งของสัญญาณ แต่สามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ซึ่งมีค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวที่สามารถยอมรับได้ โดยถ้าสามารถลดหรือจำกัดการเกิดค่าพุ่งเกิน และการแกว่งของสัญญาณได้อาจทำให้ผลตอบสนองเข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงได้เร็วกว่าตัวควบคุมแบบพีโอที่มีค่า $K_p = 0.0001$, $K_I = 0.0000075$ ดังนั้นในหัวข้อจึงเป็นการทดลองควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีโอดี เนื่องจากในตัวควบคุมแบบพีโอดีประกอบด้วยตัวอนุพันธ์ซึ่งสามารถช่วยลดการเกิดค่าพุ่งเกินของผลตอบสนองได้ โดยการทดลองได้นำค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีโอที่ $K_p = 0.001$ และ $K_I = 0.00005$ มาเป็นค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เริ่มต้นในการทดลอง อย่างไรก็ตามการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีมีแนวโน้มทำให้ผลตอบสนองเกิดแกว่งได้ ดังนั้นในการทดลองจึงจะทดลองปรับเปลี่ยนค่า K_D และทดลองปรับลดค่า K_I ด้วย และเพื่อให้ผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกินน้อยลงจึงทดลองปรับลดค่า K_P ลงด้วย โดยในการทดลองจะมีการปรับค่า K_P , K_I และ K_D ต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.3 จึงทำให้มีผลการทดลองเป็นจำนวนมาก แต่เพื่อให้การแสดงผลการทดลองมีความชัดเจนจึงเลือกแสดงผลการทดลองเพียงบางส่วนเท่านั้นดังรูปที่ 5.48 ถึง 5.53 โดยการทดลองจะกล่าวถึงการทดลองค่าเกนเดิมที่ได้จากตัวควบคุมแบบพีไอก่อน จากนั้นจะกล่าวถึงการปรับลดค่า K_P โดยกำหนดให้ค่า K_I มีค่าเท่ากับค่าเริ่มต้น และจะกล่าวถึงการปรับลดค่า K_I โดยกำหนดให้ค่า K_P มีค่าเท่ากับค่าเริ่มต้น ซึ่งในแต่ละกรณีจะปรับเปลี่ยนค่า K_D จากน้อยไปมาก

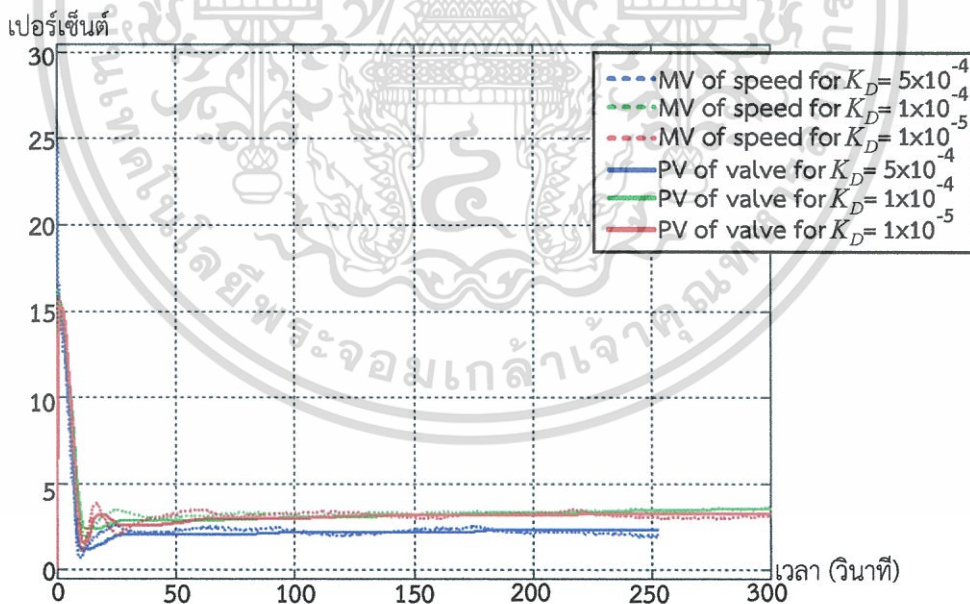
ตารางที่ 5.3 ค่า K_P , K_I และ K_D ของตัวควบคุมแบบพีไอดีที่นำมาใช้ทดลองควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซ

K_P	K_I	K_D	K_P	K_I	K_D
0.001	0.00005	0.005	0.001	0.00001	0.0001
		0.001			0.00002
		0.0005			0.00001
		0.0001			0.000005
		0.00005			0.000001
		0.00001			0.0000005
0.0001	0.00005	0.01	0.0001	0.00001	0.0000001
		0.001			0.00001
		0.0005			0.000001
		0.0001			0.000005
		0.00005			0.000001
		0.00001			0.0000005
0.001	0.00001	0.01	0.0000001	0.0000001	0.0000001
		0.001			0.0000005
		0.0005			0.0000001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



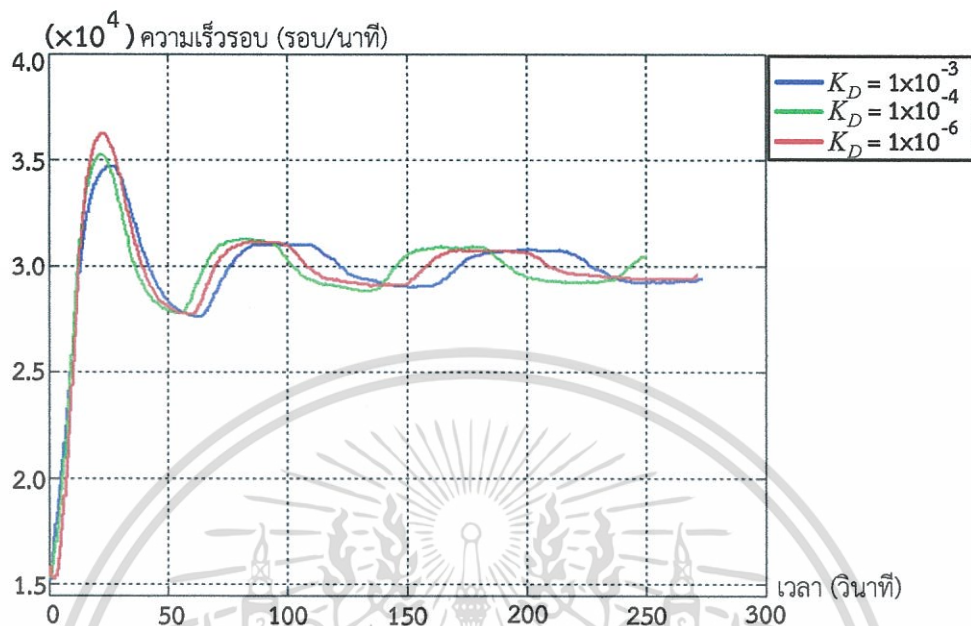
(ก) ผลตอบสนองของความเร็วรอบกังหันก๊าซ



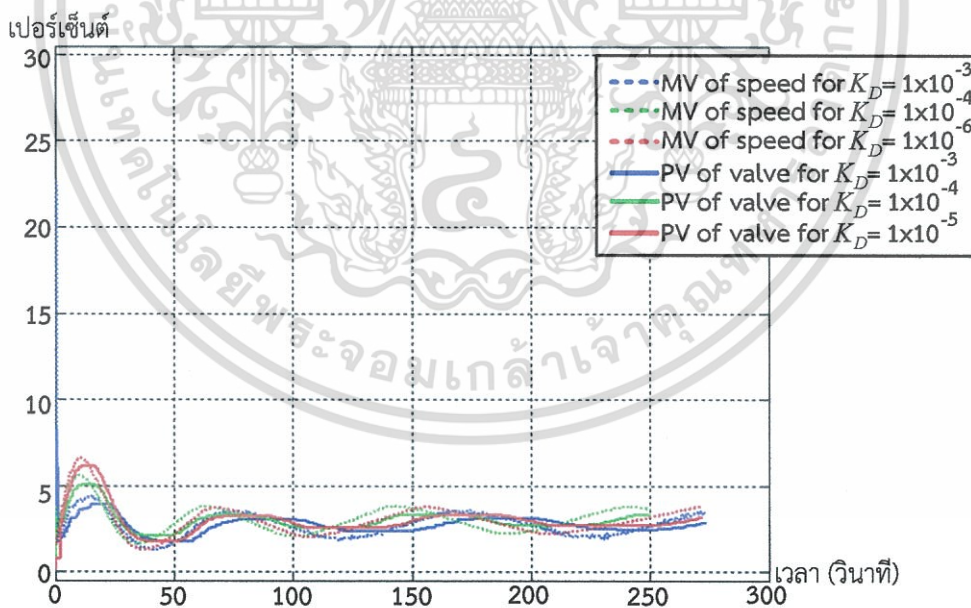
(ข) สัญญาณควบคุมของความเร็วรอบกังหันก๊าซ และผลตอบสนองของตำแหน่งวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง
รูปที่ 5.48 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี

$$K_P = 0.001, K_I = 0.00005$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



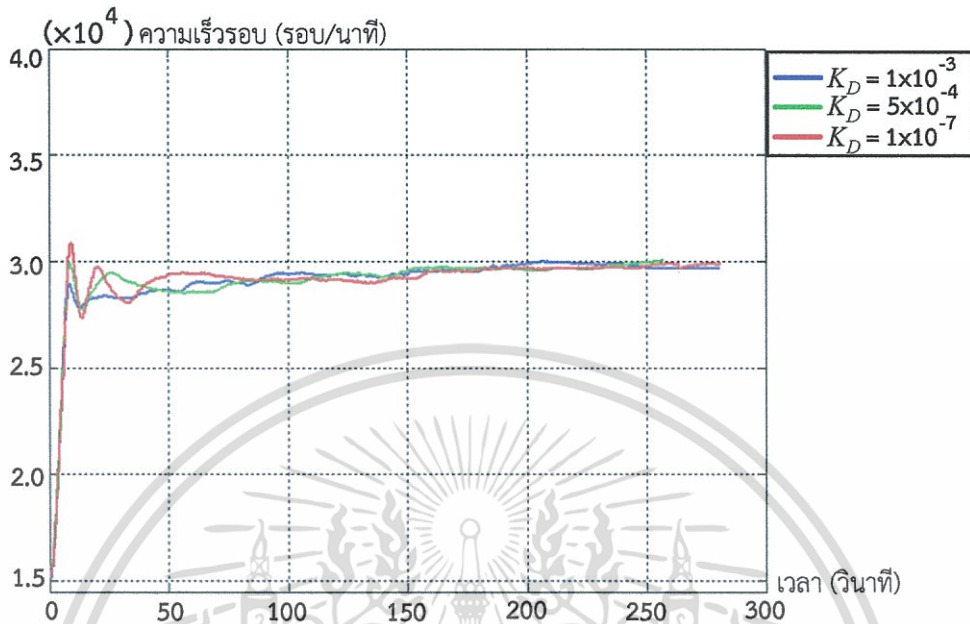
(ก) ผลตอบสนองของความเร็วรอบกังหันก๊าซ



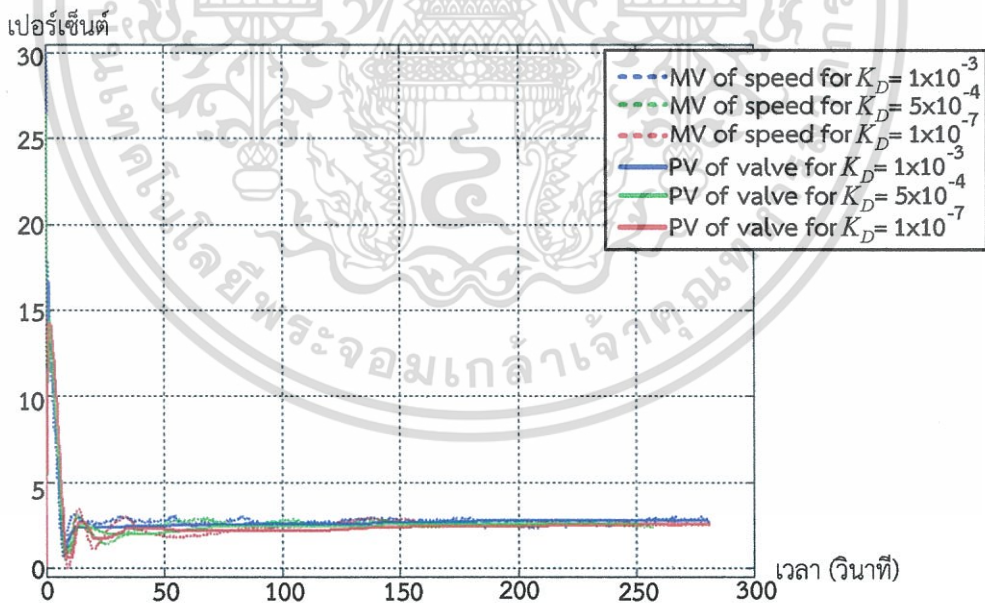
(ข) สัญญาณควบคุมของความเร็วรอบกังหันก๊าซ และผลตอบสนองของตำแหน่งวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง
รูปที่ 5.49 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี

$$K_P = 0.0001, K_I = 0.00005$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



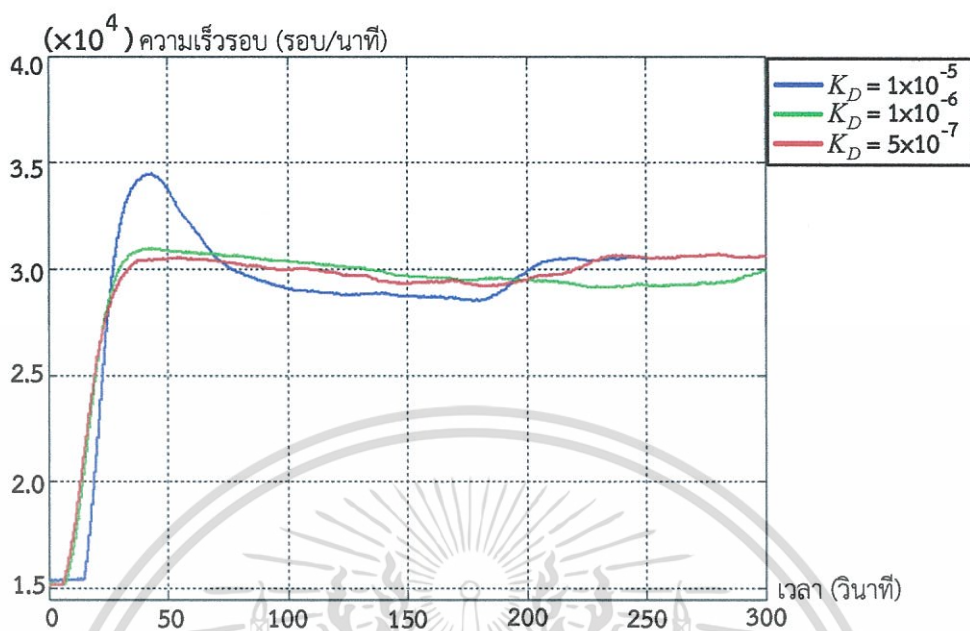
(ก) ผลตอบสนองของความเร็วรอบกังหันก๊าซ



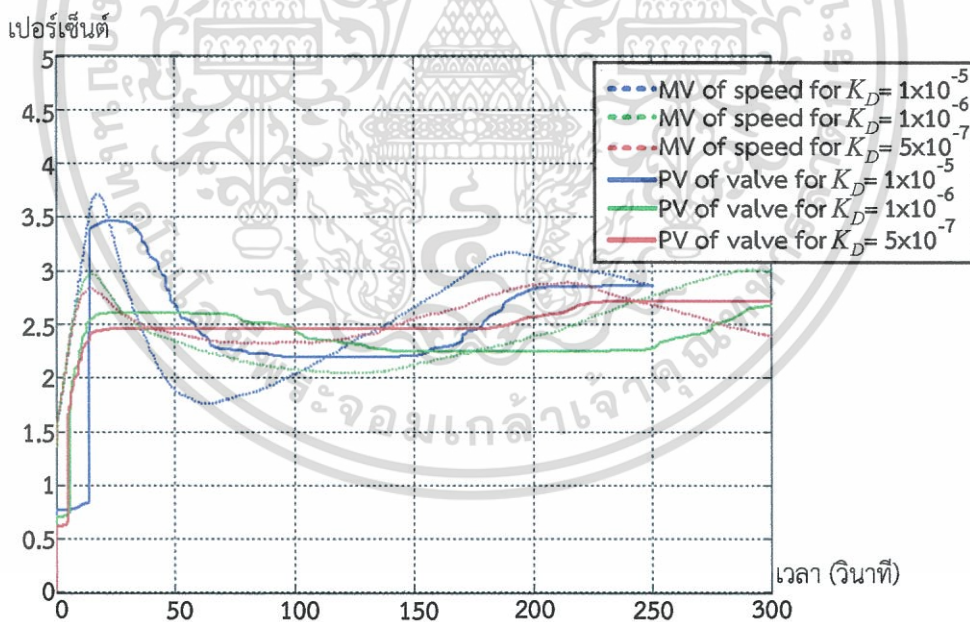
(ข) สัญญาณควบคุมของความเร็วรอบกังหันก๊าซ และผลตอบสนองของตำแหน่งวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง รูปที่ 5.50 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี

$$K_P = 0.001, K_I = 0.00001$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

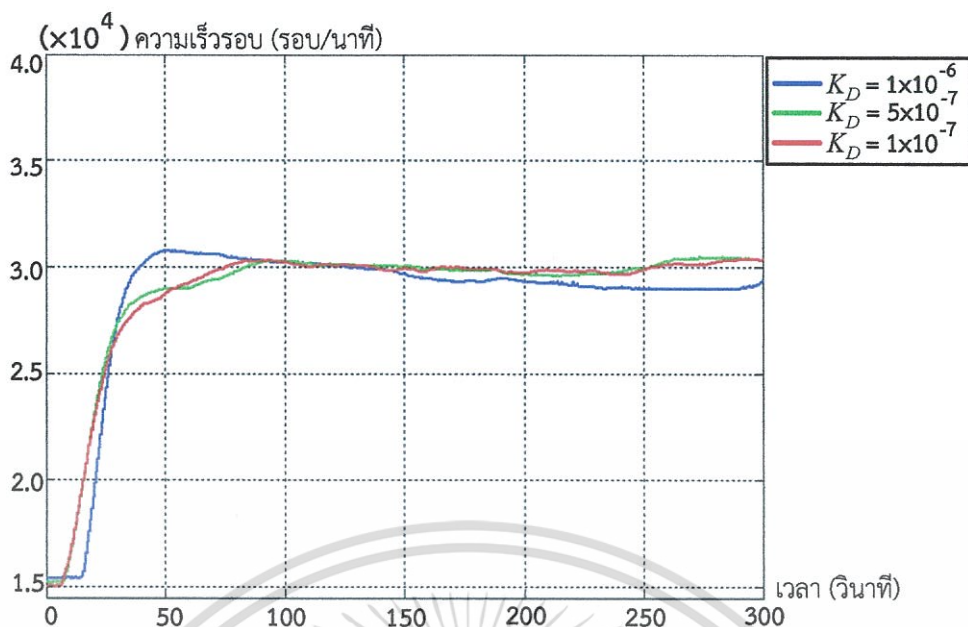


(ก) ผลตอบสนองของความเร็วรอบกังหันก๊าซ

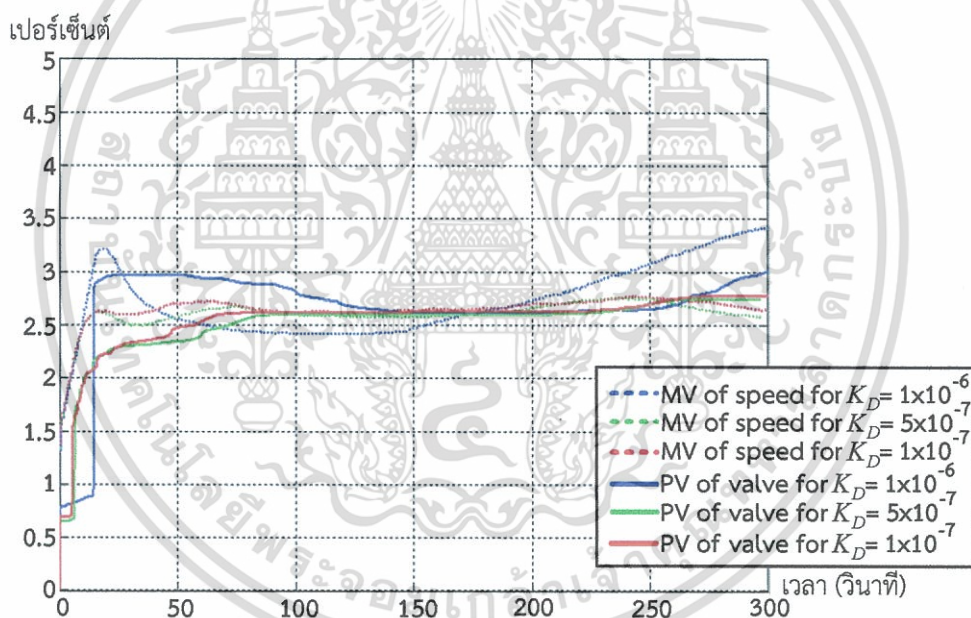
(ข) สัญญาณควบคุมของความเร็วรอบกังหันก๊าซ และผลตอบสนองของตำแหน่งวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง
รูปที่ 5.51 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี

$$K_p = 0.0001, K_I = 0.00001$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ผลตอบสนองของความเร็วยวรอบกังหันก๊าซ



(ข) สัญญาณควบคุมของความเร็วยวรอบกังหันก๊าซ และผลตอบสนองของตำแหน่งวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง รูปที่ 5.52 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วยวรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี

$$K_P = 0.0001, K_I = 0.0000075$$

จากการทดลองปรับค่า K_P , K_I และ K_D ของตัวควบคุมแบบพีไอดีด้วยวิธีลองผิดลอง ถูกดังรูปที่ 5.48 ถึง 5.53 พบว่าการนำค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมแบบพีไอที่มีค่า $K_P = 0.001$, $K_I = 0.00005$ มาเป็นค่าเกณฑ์เริ่มต้นในการทดลองแล้วเพิ่มตัวอนุพันธ์เข้าไปโดยใช้ค่า K_D เริ่มต้นเท่ากับ 0.00001 พบว่าผลตอบสนองที่ได้มีค่าพุ่งเกินและการแกว่งของสัญญาณน้อยกว่าตัวควบคุมแบบพีไอที่มี K_P และ K_I ค่าเท่ากัน และสามารถเข้าสู่ความเร็วยวรอบอ้างอิงได้เร็วขึ้น โดยเมื่อทดลองปรับเพิ่ม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า K_D ขึ้นพบว่าผลตอบสนองเกิดการแกว่งของสัญญาณก่อนเข้าสู่ความเร็วอ้างอิงมากขึ้น แต่ถ้ากำหนดให้ K_D มีค่ามากเกินไปคือมีค่าเท่ากับ 0.005 ทำให้ผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกิน เกิดการแกว่งของสัญญาณ และไม่สามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ดังรูปที่ 5.48 จากการทดลองดังกล่าวพบว่าผลตอบสนองยังคงมีค่าพุ่งเกินอยู่ ดังนั้นเพื่อลดหรือกำจัดค่าพุ่งเกินจึงทดลองปรับลดค่า K_P ให้มีค่าเท่ากับ 0.0001 และกำหนดให้ K_I มีค่าเท่ากับค่าเริ่มต้น แล้วทดลองปรับเปลี่ยนค่า K_D พบว่าผลตอบสนองที่ทุก ๆ K_D ที่นำมาทดลองมีค่าพุ่งเกิน เกิดการแกว่งของสัญญาณ และไม่สามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ดังรูปที่ 5.49 ดังนั้นจึงปรับค่า K_P กลับมามีค่าเท่ากับค่าเริ่มต้น และทดลองปรับลดค่า K_I ลงให้มีค่าเท่ากับ 0.00001 แล้วทดลองปรับเปลี่ยนค่า K_D พบว่าผลตอบสนองที่ทุก ๆ ค่า K_D ที่นำมาทดลองเกิดการแกว่งของสัญญาณโดยมีการแกว่งอยู่ภายใต้ความเร็วรอบอ้างอิง แล้วจึงค่อย ๆ เข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิง และเข้าสู่สภาวะคงตัวโดยมีค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวที่สามารถยอมรับได้ดังรูปที่ 5.50 จากนั้นจึงทดลองปรับลดให้ค่า $K_P = 0.0001$ และ $K_I = 0.00001$ และ 0.0000075 พบว่าผลตอบสนองที่ทุก ๆ K_D ที่นำมาทดลองมีค่าพุ่งเกิน เกิดการแกว่งของสัญญาณ และไม่สามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ดังรูปที่ 5.51 และ 5.52

จากผลการทดลองปรับหาค่า K_P , K_I และ K_D ของตัวควบคุมแบบพีไอดีพบว่าค่าเกณฑ์ที่สามารถทำให้ความเร็วรอบกังหันก๊าซสามารถเข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงได้โดยมีค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวที่สามารถยอมรับได้ จึงนำค่าเกณฑ์ให้ผลตอบสนองแล้วมีสมรรถนะดีที่สุด 3 ค่าเกณฑ์มาเปรียบเทียบกันเพื่อหาค่าเกณฑ์ให้ผลตอบสนองดีที่สุดดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 การเปรียบเทียบสมรรถนะของผลตอบสนองสำหรับการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี

ค่าเกณฑ์	สมรรถนะ	ค่าพุ่งเกินสูงสุด (เปอร์เซ็นต์)	ช่วงเวลาขึ้น (0-95%) วินาที	ช่วงเวลาเข้าที่ (±2%) วินาที
$K_P = 0.001$ $K_I = 0.00005$ $K_D = 0.0001$		12.67	8.40	19.2
$K_P = 0.001$ $K_I = 0.00005$ $K_D = 0.00005$		16.67	8.38	34.2
$K_P = 0.001$ $K_I = 0.00005$ $K_D = 0.00001$		16.67	7.78	31.8

จากตารางที่ 5.4 พบว่าค่าเกน $K_P = 0.001$, $K_I = 0.00005$ และ $K_D = 0.0001$ มีค่าพุ่งเกินต่ำที่สุด และช่วงเวลาเข้าที่น้อยที่สุดหรือใช้เวลาควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซจาก 15000 ไปยัง 30000 รอบต่อนาทีน้อยที่สุด ในส่วนของช่วงเวลานี้ และค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวทั้ง 3 ค่าเกนมีค่าใกล้เคียงดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการทดลองปรับค่าเกนของการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีค่าเกนที่ให้ผลตอบสนองดีที่สุดคือ $K_P = 0.001$, $K_I = 0.00005$ และ $K_D = 0.0001$

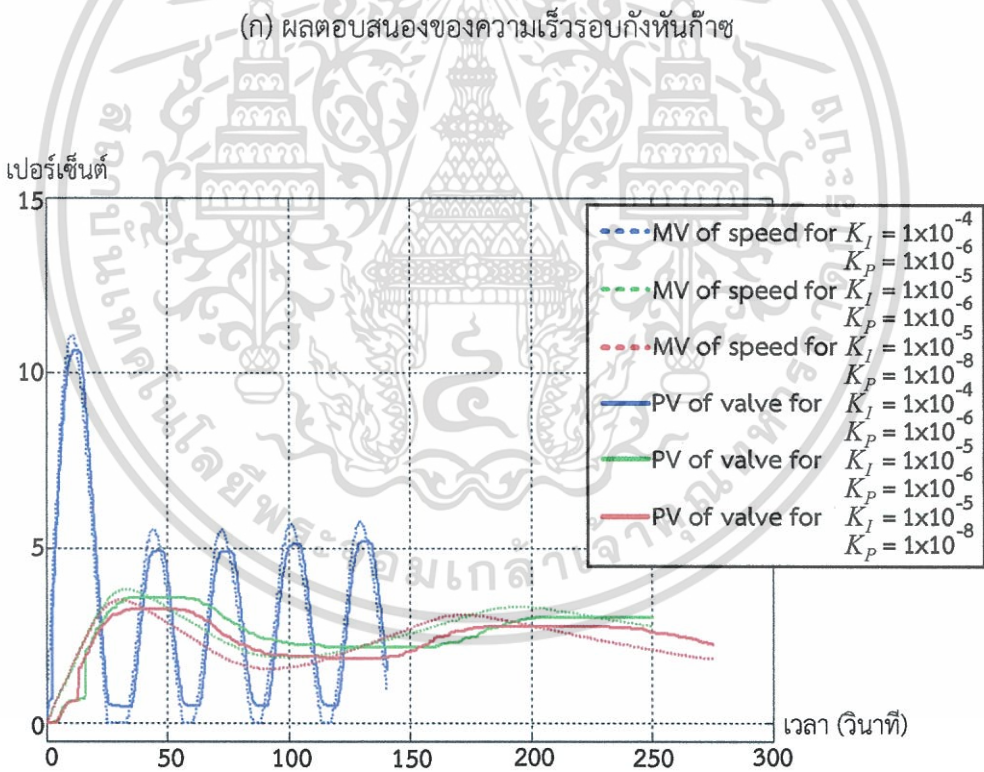
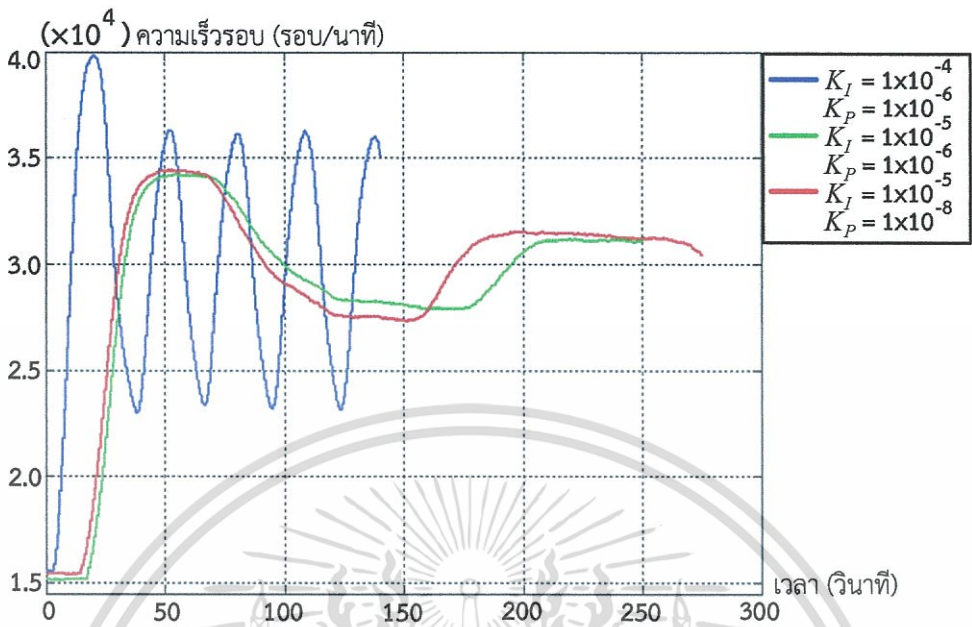
5.3.4 ผลการทดลองตัวควบคุมแบบไอ-พี

จากการทดลองควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพี ไอ และพีไอดีตามลำดับซึ่งมีตัวควบคุมแบบสัดส่วนประกอบอยู่ด้วย พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบอ้างอิงจาก 15000 ไปยัง 300000 รอบต่อนาทีทำให้ค่าความผิดพลาดมีค่ามากขึ้นอย่างทันทีทันใด ส่งผลให้สัญญาณควบคุมมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างกะทันหัน ดังนั้นถ้าหากต้องการหลีกเลี่ยงพฤติกรรมดังกล่าวจึงทดลองใช้ตัวควบคุมแบบไอ-พีซึ่งเป็นการนำตัวควบคุมแบบพีไปไว้ในเส้นทางป้อนกลับแทน ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงเป็นการทดลองควบคุมความเร็วรอบกังหันด้วยตัวควบคุมแบบไอ-พี ซึ่งในการทดลองเป็นการปรับค่า K_I และ K_P ดังตารางที่ 5.5 แต่ในการแสดงผลการทดลองจะแสดงเพียงบางค่าเกนเท่านั้น เพื่อให้การแสดงผลการทดลองมีความชัดเจนดังรูปที่ 5.53 ถึง 5.57

ตารางที่ 5.5 ค่า K_I และ K_P ของตัวควบคุมแบบไอ-พีที่นำมาใช้ทดลองควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซ

K_I	K_P	K_I	K_P
0.0001	0.000001	0.0000025	0.000000002
0.00001	0.000001		0.000000001
	0.000005	0.00000001	0.00000001
0.000001		0.0001	
0.0000001		0.000001	
0.000004	0.00000001	0.000001	0.0000005
	0.00000015		0.0000001
	0.00000002		0.00000001
	0.00000001		0.000000001
0.0000025	0.00000001	0.0000005	0.0000001
	0.000000005		

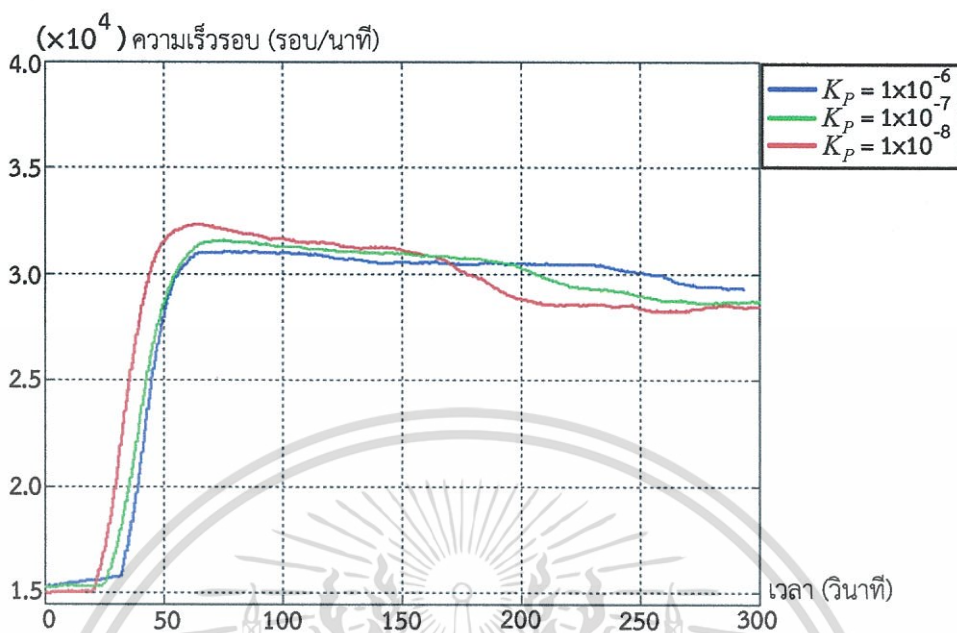
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



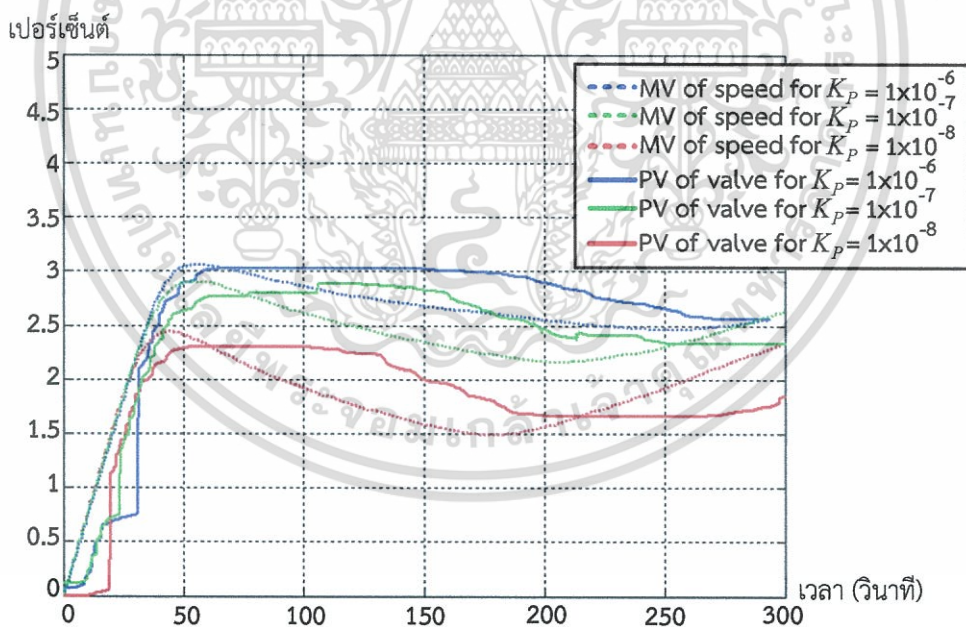
รูปที่ 5.53 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกึ่งตันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบไอ-พี

$$K_I = 0.0001 \text{ และ } K_P = 0.00001$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

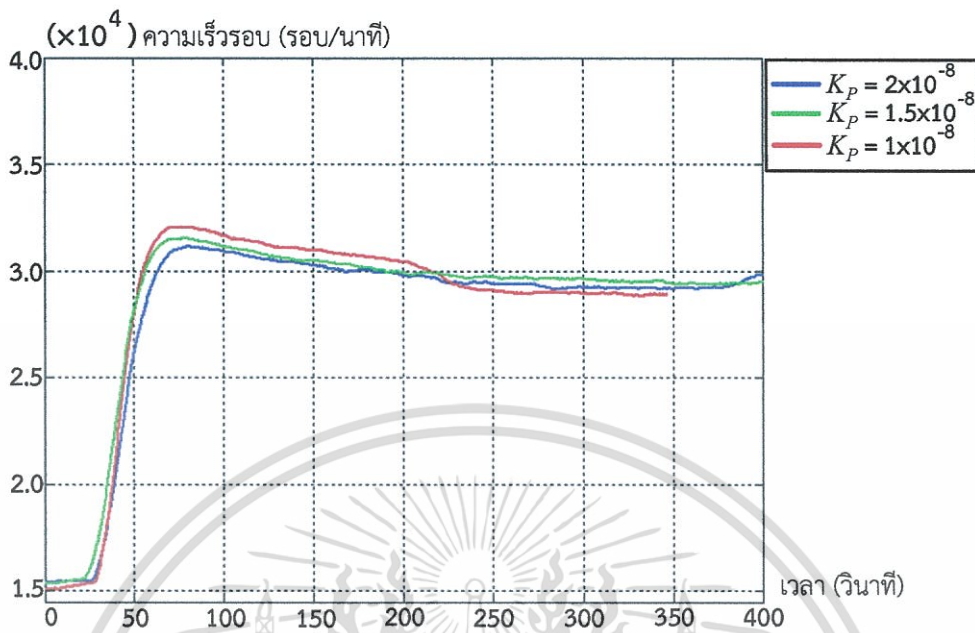


(ก) ผลตอบสนองของความเร็วรอบกัณฑ์แก๊ซ

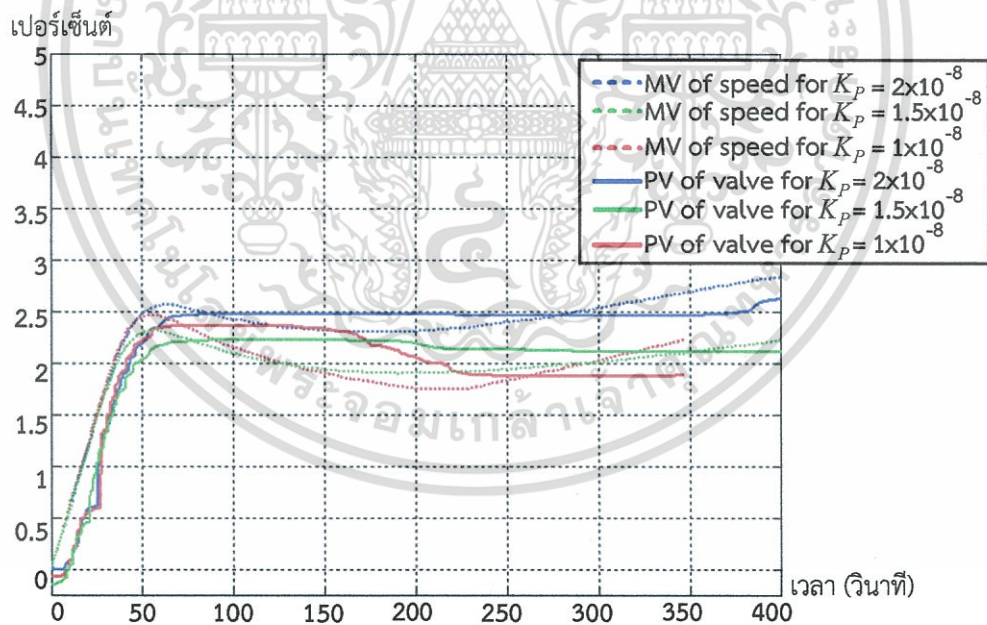
(ข) สัญญาณควบคุมของความเร็วรอบกัณฑ์แก๊ซ และผลตอบสนองของตำแหน่งวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง
รูปที่ 5.54 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกัณฑ์แก๊ซด้วยตัวควบคุมแบบไอ-พี

$$K_I = 0.000005$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

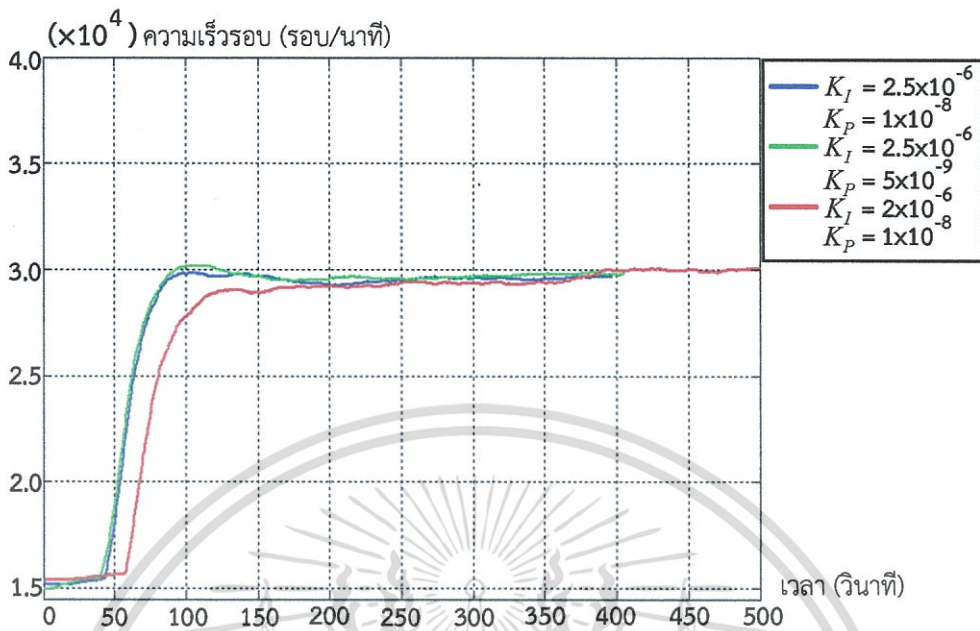


(ก) ผลตอบสนองของความเร็วรอบกังหันก๊าซ

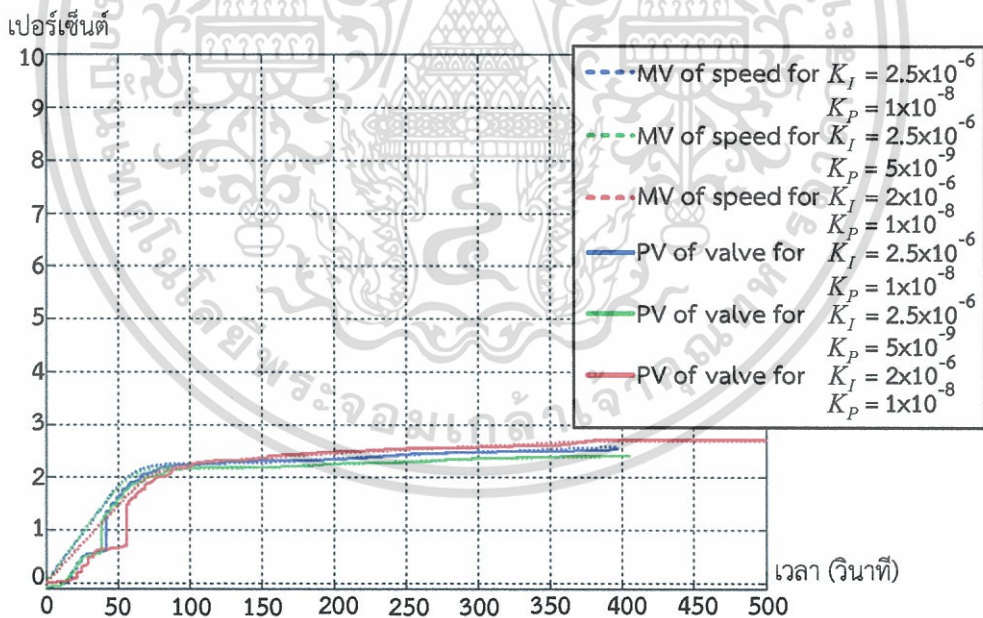
(ข) สัญญาณควบคุมของความเร็วรอบกังหันก๊าซ และผลตอบสนองของตำแหน่งวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง
รูปที่ 5.55 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบโอ-พี

$$K_I = 0.000004$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ผลตอบสนองของความเร็วรอบกังหันก๊าซ

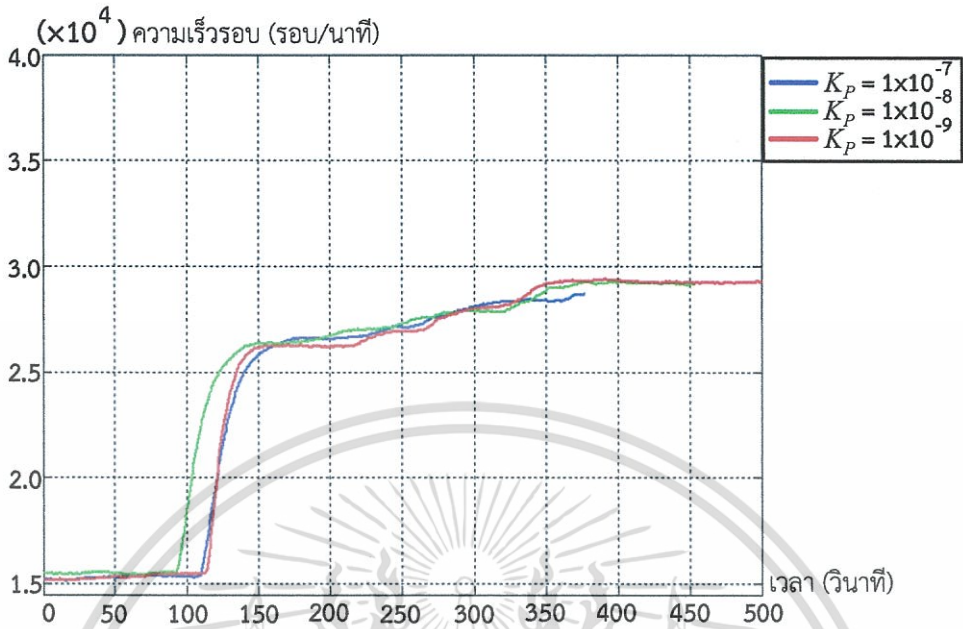


(ข) สัญญาณควบคุมของความเร็วรอบกังหันก๊าซ และผลตอบสนองของตำแหน่งวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

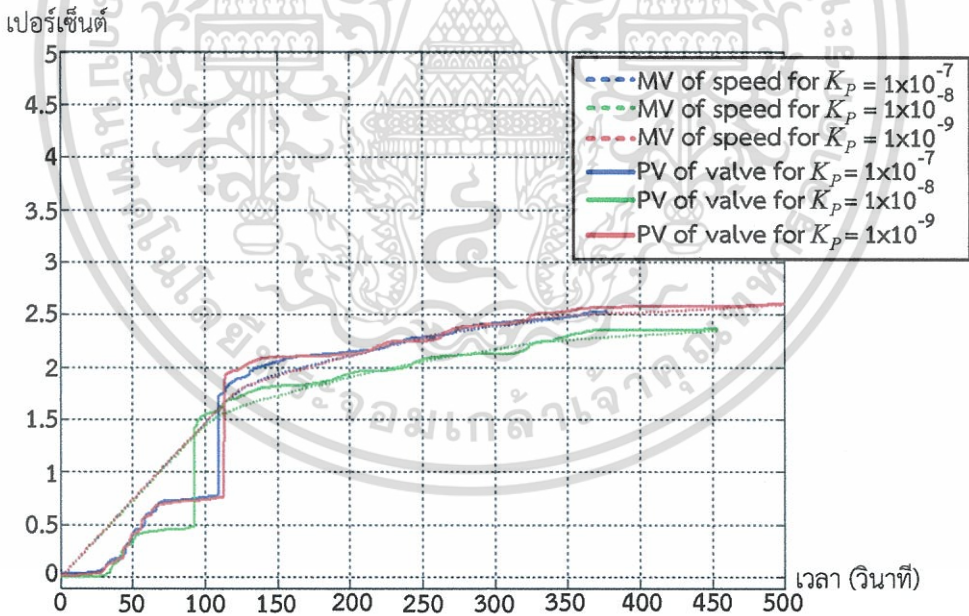
รูปที่ 5.56 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบไอ-พี

$$K_I = 0.0000025 \text{ และ } K_P = 0.000002$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ผลตอบสนองของความเร็วรอบกังหันก๊าซ



(ข) สัญญาณควบคุมของความเร็วรอบกังหันก๊าซ และผลตอบสนองของตำแหน่งวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

รูปที่ 5.57 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบไอ-พี

$$K_I = 0.000001$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบไอ-พีโดยใช้วิธีสองมิติลองถูกปรับค่า K_I และ K_P ดังรูปที่ 5.53 ถึง 5.57 พบว่า การกำหนดให้ค่า $K_I = 0.0001$ และ 0.00001 ทำให้ผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกินและการแกว่งของสัญญาณถึงแม้ลดค่า K_P ให้มีค่าน้อยลง ผลตอบสนองก็ยังคงเกิดค่าพุ่งเกิน และการแกว่งของสัญญาณ แต่ค่าพุ่งเกินและการแกว่งของสัญญาณลดลงดังรูปที่ 5.53 แสดงว่าการกำหนดค่า K_I ให้มีค่าเท่ากับ 0.0001 และ 0.00001 มีค่ามากเกินไป ดังนั้นจึงทดลองปรับลดค่า K_I ลงให้มีค่าเท่ากับ 0.000005 พบว่าผลตอบสนองที่ได้มีค่าพุ่งเกินและเกิดการแกว่งของสัญญาณลดลงแต่มีคาบแกว่งกว้างขึ้น จากนั้นจึงทดลองปรับลดค่า K_I ลงให้มีค่าเท่ากับ 0.000004 ก็ยังคงมีผลตอบสนองเช่นเดิม แต่ผลตอบสนองที่ได้มีค่าพุ่งเกินและเกิดการแกว่งน้อยลงแต่มีคาบแกว่งมากขึ้นดังรูปที่ 5.55 ซึ่งจากผลการทดลองข้างต้นพบว่าการลดค่า K_I ทำให้ผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกินและการแกว่งน้อยลง ดังนั้นจึงทดลองลดค่า K_I ลงให้มีค่าเท่ากับ 0.0000025 , 0.000002 และ 0.000001 พบว่าผลตอบสนองที่ค่า $K_I = 0.0000025$, $K_P = 0.00000001$, 0.000000005 และ $K_I = 0.000002$, $K_P = 0.00000001$ เกิดค่าพุ่งเกินเพียงเล็กน้อยและสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้โดยมีค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวที่สามารถยอมรับได้ ดังรูปที่ 5.56 แต่ที่ K_I เท่ากับ 0.000001 ไม่สามารถทำให้ความเร็วรอบกังหันก๊าซสามารถเข้าสู่ความเร็วอ้างอิงได้ดังรูปที่ 5.57

จากผลการทดลองควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบไอ-พีพบว่าการกำหนดให้ K_I มีค่ามากเกินไปและกำหนดให้ K_P มีค่าน้อยกว่ามากทำให้ผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกินเกิดการแกว่งของสัญญาณมาก และไม่สามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ เนื่องจาก K_I เป็นค่าเกนของตัวอินทิเกรเตอร์ซึ่งมีหน้าที่สะสมสัญญาณควบคุม กล่าวคือเมื่อค่าความผิดพลาดเริ่มต้นมีค่ามากการสะสมสัญญาณควบคุมเริ่มต้นของตัวอินทิเกรเตอร์ก็จะมีค่ามากตามไปด้วยจึงทำให้การสั่งเปิด-ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงมีการเปลี่ยนแปลงครั้งละมากเช่นกัน ในทางตรงข้ามถ้ากำหนดให้ K_P มีค่ามากกว่าค่า K_I ทำให้ระบบมีการเปลี่ยนแปลงช้าเนื่องจากต้องอาศัยเวลานานเพื่อที่จะทำให้สัญญาณควบคุมสามารถเอาชนะแรงเสียดทานสถิตย์ของวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงได้เพราะค่า K_P ในตัวควบคุมแบบไอ-พีมีหน้าที่เป็นอัตราขยายให้กับค่าป้อนกลับและนำไปลบกับค่าสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมแบบไอ ดังนั้นถ้ากำหนดให้ K_P มีค่ามากเกินไปจะทำให้สัญญาณควบคุมมีค่าลบเป็นเวลานาน การสั่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงของตัวควบคุม และการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบกังหันก๊าซจึงต้องใช้เวลานานเช่นกัน โดยจากการทดลองปรับค่า K_I และ K_P ทั้งหมดพบว่ามีค่าเกนเพียง 3 ค่าเกนคือ $K_I = 0.0000025$, $K_P = 0.00000001$, 0.000000001 และ $K_I = 0.000002$, $K_P = 0.00000001$ ที่สามารถทำให้ความเร็วรอบกังหันก๊าซสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้โดยมีค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวที่สามารถยอมรับได้ และมีค่าพุ่งเกิน เกิดการแกว่งของสัญญาณเพียงเล็กน้อย จึงนำค่าเกนทั้ง 3 คู่มาเปรียบเทียบกันเพื่อหาค่าเกนที่ให้ผลตอบสนองที่ดีที่สุดดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 การเปรียบเทียบสมรรถนะของผลตอบสนองสำหรับการควบคุมความเร็วรอบ
กังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบไอ-พี

ค่าเกณฑ์ / สมรรถนะ	ค่าพุ่งเกินสูงสุด (เปอร์เซ็นต์)	ช่วงเวลายืด (0-95%) วินาที	ช่วงเวลาที่เข้าที่ (±2%) วินาที
$K_I = 0.0000025$ $K_P = 0.00000001$	-	83.92	390.16
$K_I = 0.0000025$ $K_P = 0.000000005$	1.33	82.2	302.88
$K_I = 0.000002$ $K_P = 0.00000001$	-	235.96	377.68

จากตารางที่ 5.6 พบว่าค่าเกณฑ์ $K_I = 0.0000025$ และ $K_P = 0.000000005$ ผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกินมากกว่าค่าเกณฑ์ทั้งสอง แต่มีช่วงเวลายืด ช่วงเวลาที่เข้าที่ และค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวต่ำที่สุดถึงแม้ว่าจะมีค่าพุ่งเกิน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการทดลองปรับค่าเกณฑ์ของการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบไอ-พีค่าเกณฑ์ที่ให้ผลตอบสนองดีที่สุดคือ $K_I = 0.0000025$ และ $K_P = 0.000000005$

5.3.5 ผลการทดลองตัวควบคุมแบบไอ-พีดี

จากการทดลองควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพี ไอ และพีดีตามลำดับซึ่งมีตัวควบคุมแบบพีหรือตัวควบคุมแบบสัดส่วนประกอบอยู่ด้วย พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบอ้างอิงจาก 15000 ไปยัง 300000 รอบต่อนาทีทำให้ค่าความผิดพลาดมีค่ามากขึ้นอย่างทันทีทันใดส่งผลให้สัญญาณควบคุมมีการเพิ่มขึ้นอย่างกะทันหัน ดังนั้นถ้าหากต้องการหลีกเลี่ยงพฤติกรรมดังกล่าวและให้ผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกินและเกิดการแกว่งของสัญญาณน้อยลงเมื่อเทียบกับผลตอบสนองจากตัวควบคุมแบบไอ-พี ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงเป็นการทดลองควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบไอ-พีดีโดยการทดลองเป็นการปรับค่า K_I , K_P และ K_D ด้วยวิธีลองผิดลองถูก ซึ่งในการทดลองได้นำค่า $K_I = 0.0000025$, $K_P = 0.000000005$ ของตัวควบคุมแบบไอ-พีที่ให้ค่าสมรรถนะดีที่สุดมาเป็นค่าเริ่มต้นในการปรับค่าเกณฑ์ โดยในการทดลองได้นำ K_I , K_P และ K_D ดังตารางที่ 5.7 มาใช้ในการทดลอง แต่ในการแสดงผลการทดลองได้แสดงเพียงบางค่าเกณฑ์เท่านั้น เพื่อให้การแสดงผลการทดลองมีความชัดเจนดังรูปที่ 5.58 ถึง 5.61

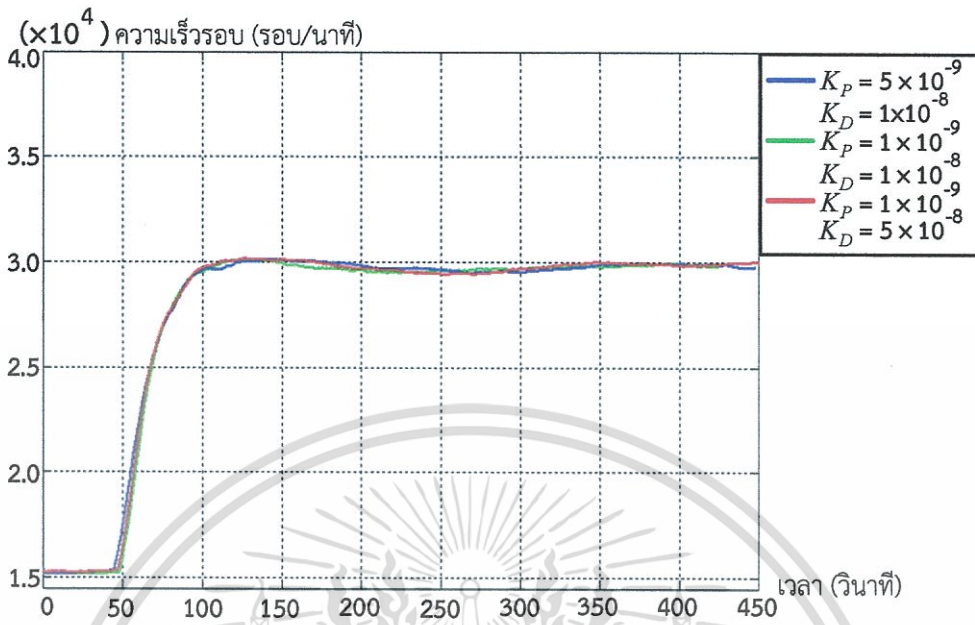
จากการทดลองควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบไอ-พีดีโดยใช้วิธีลองผิดลองถูกดังรูปที่ 5.58 ถึง 5.60 พบว่าการกำหนดค่าเกณฑ์ให้ $K_I = 0.0000025$, $K_P = 0.000000005$ และ $K_D = 0.000000001$ ทำให้ผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกินและเกิดการแกว่งของสัญญาณ แต่สามารถทำให้ผลตอบสนองสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้โดยมีค่าความผิดพลาดที่สามารถยอมรับได้ อย่างไรก็ตามเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อขจัดหรือลดค่าพุ่งเกินและการแกว่งของสัญญาณจึงทดลองปรับลดค่า K_P ให้มีค่าเท่ากับ 0.000000001 และกำหนดให้ K_I และ K_D มีค่าเท่าเดิมพบว่าผลตอบสนองสามารถเข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงได้เร็วขึ้น แต่ยังคงมีค่าพุ่งเกินและการแกว่งของสัญญาณเช่นเดิม จึงทดลองปรับเพิ่มค่า K_D แทนซึ่งพบว่าผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกินและเกิดการแกว่งของสัญญาณมากขึ้น โดยมีเพียงที่ $K_D = 0.0000001$ เท่านั้นสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เร็วขึ้น และมีค่าความผิดพลาดที่สามารถยอมรับได้ดังรูปที่ 5.58 และ 5.59 จากผลการทดลองข้างต้นพบว่าตัวควบคุมแบบไอ-พีดียังคงใช้เวลาในการควบคุมความเร็วรอบกึ่งกันก๊าซไปยังความเร็วรอบอ้างอิงมากกว่าตัวควบคุมแบบพีไอ และตัวควบคุมแบบพีไอดี ดังนั้นจึงทดลองเพิ่มค่า K_I ให้มีค่าเท่ากับ 0.000005 และกำหนดให้ $K_P = 0.000000001$ แล้วทดลองปรับเพิ่มค่า K_D พบว่าผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกินและเกิดการแกว่งของสัญญาณมากขึ้น และไม่สามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ดังรูปที่ 5.60

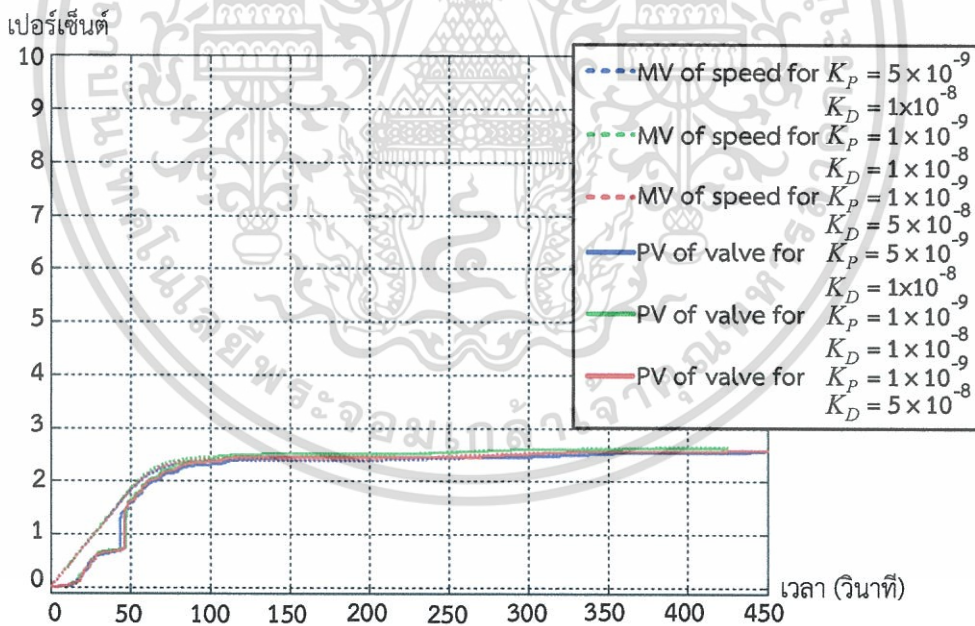
ตารางที่ 5.7 ค่า K_I , K_P และ K_D ของตัวควบคุมแบบไอ-พีดีที่นำมาใช้ทดลองควบคุมความเร็วรอบกึ่งกันก๊าซ

K_I	K_P	K_D
0.0000025	0.000000001	0.000000005
		0.00000001
		0.0005
		0.0005
		0.0005
		0.00005
		0.000005
		0.0000005
		0.0000001
		0.00000005
0.000005	0.000000001	0.000000005
		0.0000005
		0.0000005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ผลตอบสนองของความเร็วรอบกังหันก๊าซ

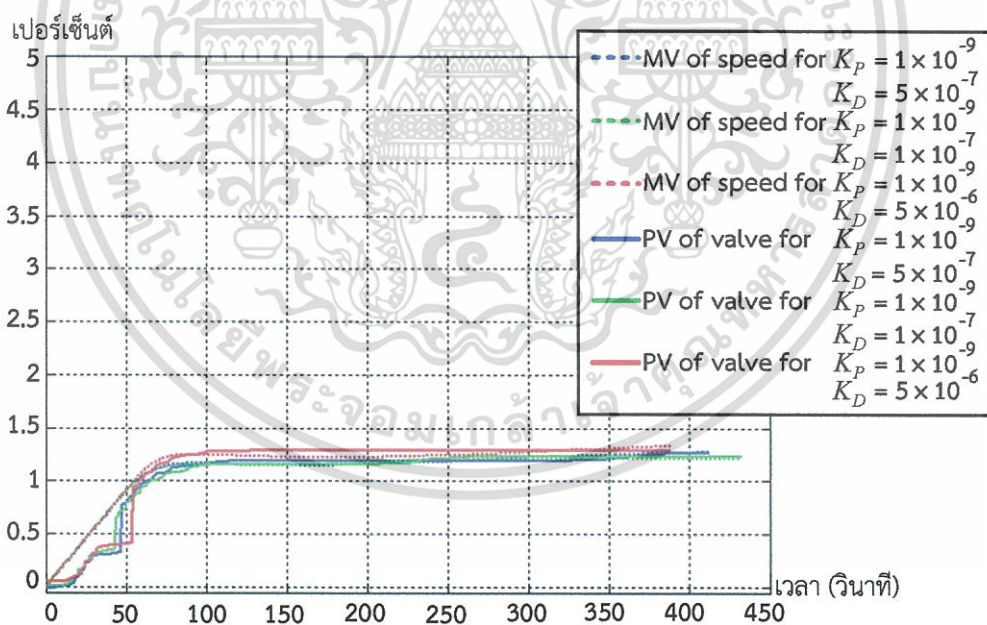
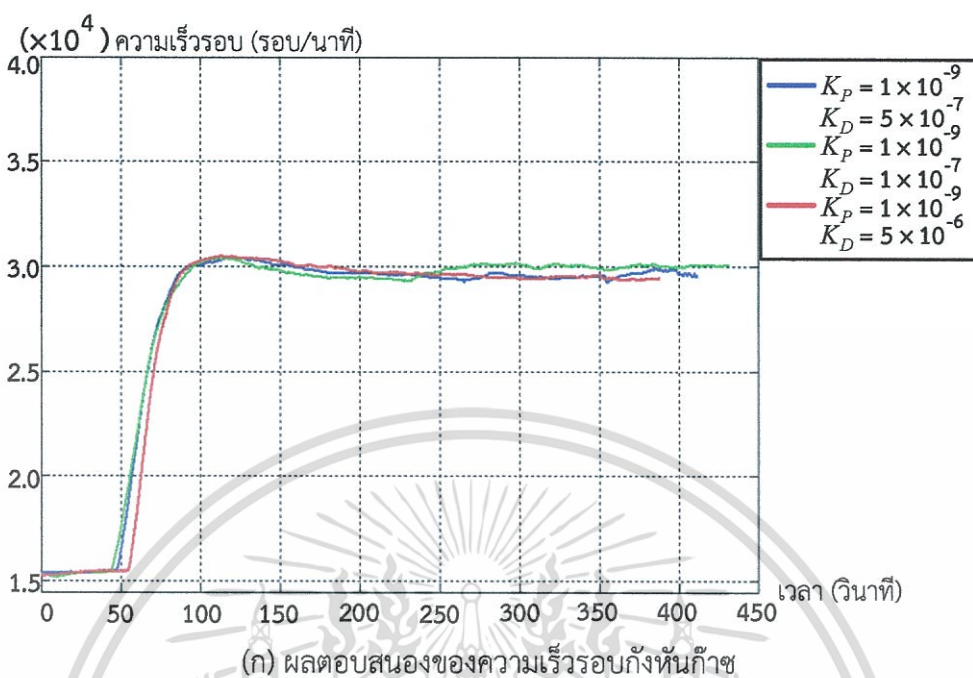


(ข) สัญญาณควบคุมของความเร็วรอบกังหันก๊าซ และผลตอบสนองของตำแหน่งวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

รูปที่ 5.58 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบไอ-พีดี

$$K_I = 0.0000025$$

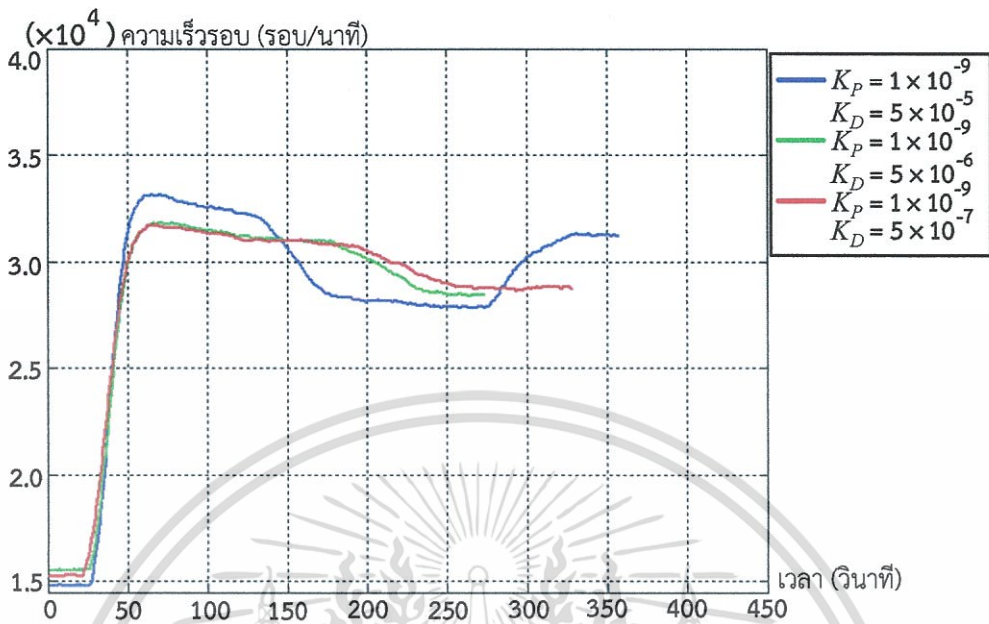
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



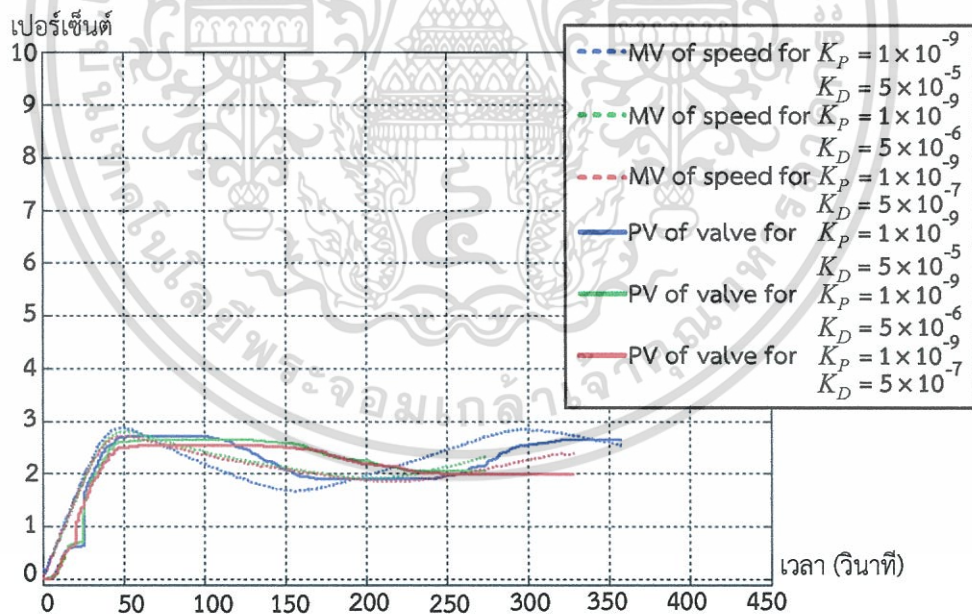
รูปที่ 5.59 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบไอ-พีดี

$$K_I = 0.0000025$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ผลตอบสนองของความเร็วรอบกังหันก๊าซ

(ข) สัญญาณควบคุมของความเร็วรอบกังหันก๊าซ และผลตอบสนองของตำแหน่งวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง
รูปที่ 5.60 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบไอ-พีดี

$$K_I = 0.000005$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองปรับหาค่า K_I , K_P และ K_D ของตัวควบคุมแบบไอ-พีดีพบว่าค่าเกณฑ์สามารถทำให้ความเร็รรอบกึ่งหันก๊าซสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้โดยมีค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวที่สามารถยอมรับได้ จึงนำค่าเกณฑ์ให้ผลตอบสนองลักษณะดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับเพื่อหาค่าเกณฑ์ให้ผลตอบสนองที่ดีที่สุดดังตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 การเปรียบเทียบสมรรถนะของผลตอบสนองสำหรับการควบคุมความเร็รรอบกึ่งหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบไอ-พีดี

ค่าเกณฑ์	สมรรถนะ	ค่าพุ่งเกินสูงสุด (เปอร์เซ็นต์)	ช่วงเวลายืน (0-95%) วินาที	ช่วงเวลาที่เข้าที่ ($\pm 2\%$) วินาที
$K_I = 0.0000025$ $K_P = 0.000000005$ $K_D = 0.00000001$		0.667	92.48	324.28
$K_I = 0.0000025$ $K_P = 0.000000001$ $K_D = 0.00000001$		0.667	92.48	302.6
$K_I = 0.0000025$ $K_P = 0.000000001$ $K_D = 0.00000002$		1.33	91.28	345.88
$K_I = 0.0000025$ $K_P = 0.000000001$ $K_D = 0.00000005$		1	93.1	301.92
$K_I = 0.0000025$ $K_P = 0.000000001$ $K_D = 0.0000001$		2.33	87.08	241.88

การเปรียบเทียบค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมแบบไอ-พีดีดังตารางที่ 5.7 พบว่าค่าพุ่งเกินสูงสุด ช่วงเวลาที่เข้าที่ และค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวของทุกค่าเกณฑ์มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ที่ค่าเกณฑ์ $K_I = 0.0000025$, $K_P = 0.000000001$ และ $K_D = 0.0000001$ มีช่วงเวลาที่เข้าที่น้อยกว่าค่าเกณฑ์อื่น ๆ หรือใช้เวลาควบคุมความเร็รรอบกึ่งหันก๊าซจาก 15000 ไปยัง 30000 รอบต่ออนาทีน้อยที่สุด ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมแบบไอ-พีดีที่ให้ผลตอบสนองที่ดีที่สุดคือ $K_I = 0.0000025$, $K_P = 0.000000001$ และ $K_D = 0.0000001$

5.3.6 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพี ไอ พีดี ไอ-พี และ ไอ-พีดี แล้วทดลองปรับค่าเกนของตัวควบคุมแต่ละชนิดด้วยวิธีการลองผิดลองถูกเพื่อหาค่าเกนที่ให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับในตัวควบคุมชนิดเดียวกัน พบว่าตัวควบคุมที่สามารถควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซให้สามารถเข้าสู่ภาวะคงตัวโดยมีค่าความผิดพลาดที่สามารถยอมรับได้แก่ ตัวควบคุมแบบพีไอมีค่าเกนที่ให้ผลตอบสนองดีที่สุดคือ $K_P = 0.0001$ และ $K_I = 0.0000075$ ตัวควบคุมแบบพีไอดีมีค่าเกนที่ให้ผลตอบสนองดีที่สุดคือ $K_P = 0.001$, $K_I = 0.00005$ และ $K_D = 0.0001$ ตัวควบคุมแบบไอ-พีมีค่าเกนที่ให้ผลตอบสนองดีที่สุดคือ $K_I = 0.0000025$ และ $K_P = 0.000000005$ และตัวควบคุมแบบไอ-พีดีมีค่าเกนที่ให้ผลตอบสนองดีที่สุดคือ $K_I = 0.0000025$, $K_P = 0.000000001$ และ $K_D = 0.0000001$ ซึ่งตัวควบคุมที่เหมาะสมนำไปใช้ในระบบควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซที่ต้องการผลตอบสนองเข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงโดยใช้เวลาน้อยที่สุดและไม่คำนึงถึงค่าพุ่งเกินตัวควบคุมที่เหมาะสมคือตัวควบคุมแบบพีไอดี ในทางกลับกันหากต้องการควบคุมค่าพุ่งเกินของความเร็วรอบกังหันก๊าซโดยไม่คำนึงถึงเวลาที่ระบบใช้ในการเข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิง ตัวควบคุมที่เหมาะสมคือตัวควบคุมแบบพีไอ

5.4 การทดลองสตาร์ทเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กแบบอัตโนมัติและรักษา

ความเร็วรอบกังหันก๊าซ

จากขั้นตอนการสตาร์ทเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กแบบอัตโนมัติตั้งที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.17 ในงานวิจัยนี้จึงได้อาศัยแนวคิดดังกล่าวพัฒนาระบบการสตาร์ทเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กให้เป็นแบบอัตโนมัติ แต่อย่างไรก็ตามการสตาร์ทเครื่องยนต์ยังไม่สามารถเป็นแบบอัตโนมัติได้ทั้งระบบเนื่องจากวาล์วทางเข้าอากาศที่มาจากเครื่องดูดอากาศเป็นวาล์วที่ทำงานด้วยมือ ดังนั้นต้องอาศัยผู้ควบคุมในการปิดวาล์วทางเข้าอากาศ โดยการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซในขณะและหลังการสตาร์ทเครื่องยนต์ได้อาศัยการควบคุมที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการลองผิดลองถูกในหัวข้อที่ 5.3 โดยตัวควบคุมที่มีความเหมาะสมนำมาใช้ในการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซ ได้แก่ ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีค่าเกนเท่ากับ $K_P = 0.001$, $K_I = 0.00005$ และ $K_D = 0.0001$ และตัวควบคุมพีไอที่มีค่าเกนเท่ากับ $K_P = 0.0001$ และ $K_I = 0.0000075$ อย่างไรก็ตามการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซในช่วงเริ่มต้นการสตาร์ทเครื่องยนต์ไม่สามารถควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซไปยัง 30000 รอบต่อนาทีได้ในทันทีเนื่องจากการเปิดเครื่องดูดอากาศทำให้บริเวณทางเข้าของอากาศมีความแตกต่างระหว่างความดันอากาศจากเครื่องดูดอากาศและเครื่องอัดอากาศ โดยที่อากาศที่มาจากเครื่องอัดอากาศมีความดันมากกว่าอากาศที่มาจากเครื่องดูดอากาศจึงทำให้ปริมาณอากาศที่มาจากเครื่องดูดอากาศไม่สามารถไหลเข้าไปยังห้องเผาไหม้ได้ซึ่งทำให้ปริมาณอากาศที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะให้เกิดการเผาไหม้จนทำให้ความเร็วรอบกังหันก๊าซมีความเร็วรอบเท่ากับ 30000 รอบ

ต่อมาที่ โดยจากการทดลองพบว่าความเร็วรอบที่ทำได้อยู่ที่ประมาณ 25000 รอบต่อนาที ดังนั้นเมื่อเริ่มขั้นตอนการสตาร์ทเครื่องยนต์จนเกิดเปลวไฟขึ้นภายในห้องเผาไหม้แล้วจะดำเนินการดังต่อไปนี้

1. เปิดเครื่องดูดอากาศและเข้าสู่ระบบควบคุมความเร็วรอบกักกันก๊าซโดยกำหนดความเร็วรอบอ้างอิงเท่ากับ 25000 รอบต่อนาทีในขณะที่ในกรณีที่ตัวควบคุมความเร็วรอบกักกันก๊าซเป็นตัวควบคุมแบบพีไอดี แต่ถ้าในกรณีที่ตัวควบคุมความเร็วรอบกักกันก๊าซเป็นตัวควบคุมแบบพีไอจะเข้าสู่ระบบควบคุมความเร็วรอบกักกันก๊าซก่อนเป็นเวลา 5 วินาที แล้วจึงเปิดเครื่องดูดอากาศเนื่องจากในช่วงเริ่มต้นการควบคุมของตัวควบคุมแบบพีไอจะเริ่มเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงอย่างช้า ๆ เพราะค่าเกนของตัวควบคุมแบบพีไอที่นำมาใช้ในการทดลองมีค่าน้อย ดังนั้นถ้าเปิดเครื่องดูดอากาศในทันทีจะทำให้ห้องเผาไหม้มีปริมาณมากกว่าเชื้อเพลิงมากเกินไปซึ่งส่งผลให้เปลวไฟภายในห้องเผาไหม้ดับ

2. ส่วนประมวลผลจะส่งสัญญาณเตือนผ่านทางหลอดไฟแบบมีออด (buzzer) เพื่อให้ผู้ควบคุมปิดวาล์วทางเข้าอากาศ และปิดเครื่องดูดอากาศ เมื่อกักกันก๊าซมีความเร็วรอบมากกว่า 24000 รอบต่อนาทีต่อเนื่องเป็นเวลาประมาณ 2.30 นาที หรือมีความเร็วรอบอยู่ระหว่าง 23000 ถึง 24000 รอบต่อนาทีต่อเนื่องเป็นเวลาประมาณ 3.30 นาที หลังจากนั้นความเร็วรอบกักกันก๊าซจะมีความเร็วรอบสูงขึ้นระบบควบคุมจะควบคุมให้ความเร็วรอบกักกันก๊าซให้กลับมามีความเร็วรอบเท่ากับความเร็วรอบอ้างอิงเช่นเดิม

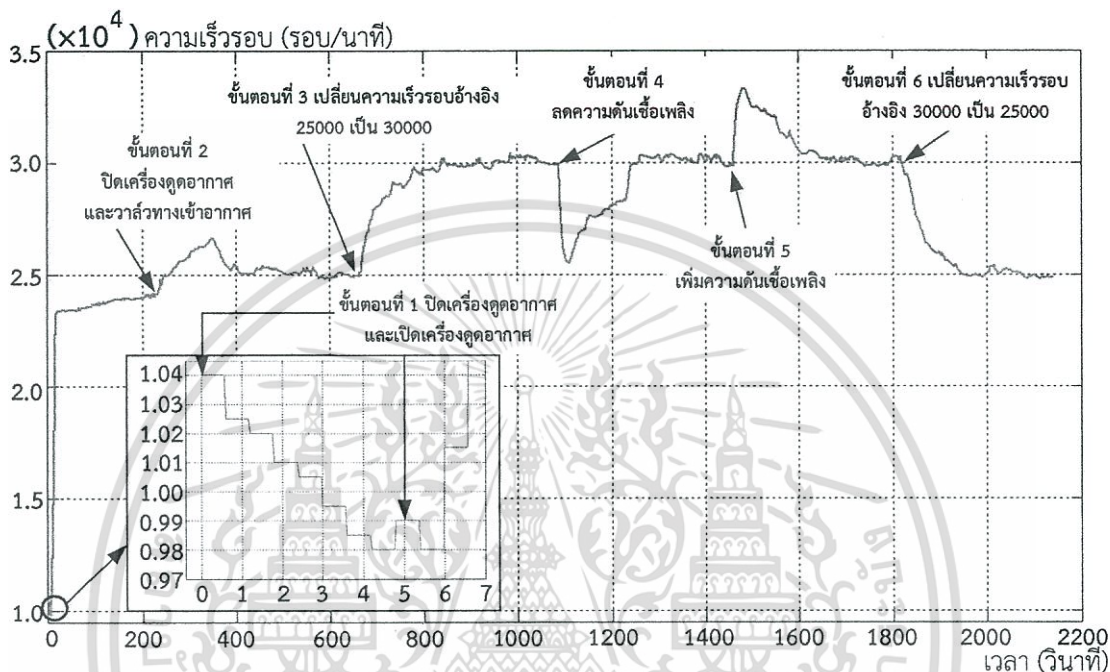
เมื่อผู้ควบคุมปิดวาล์วทางเข้าอากาศ และปิดเครื่องดูดอากาศเครื่องยนต์ยังสามารถทำงานต่อได้โดยมีความเร็วรอบกักกันก๊าซตรงตามความเร็วรอบอ้างอิงก็ถือว่าสิ้นสุดการสตาร์ทเครื่องยนต์ อย่างไรก็ตามการทดลองจะดำเนินการทดลองต่อดังนี้

1. ทดลองปรับเพิ่มความเร็วรอบอ้างอิงจาก 25000 เป็น 30000 รอบต่อนาที
2. เมื่อความเร็วรอบกักกันก๊าซเข้าสู่ 30000 รอบต่อนาทีแล้ว จะทดลองสร้างสัญญาณรบกวนโดยลดความดันของเชื้อเพลิงที่ป้อนให้กับเครื่องยนต์
3. เมื่อกักกันก๊าซกลับมามีความเร็วรอบประมาณ 30000 รอบต่อนาทีจะทดลองสร้างสัญญาณรบกวนอีกครั้งโดยเพิ่มความดันของเชื้อเพลิงที่ป้อนให้กับเครื่องยนต์
4. เมื่อกักกันก๊าซกลับมามีความเร็วรอบประมาณ 30000 รอบต่อนาทีจะทดลองปรับลดความเร็วรอบอ้างอิงจาก 30000 เป็น 25000 รอบต่อนาที

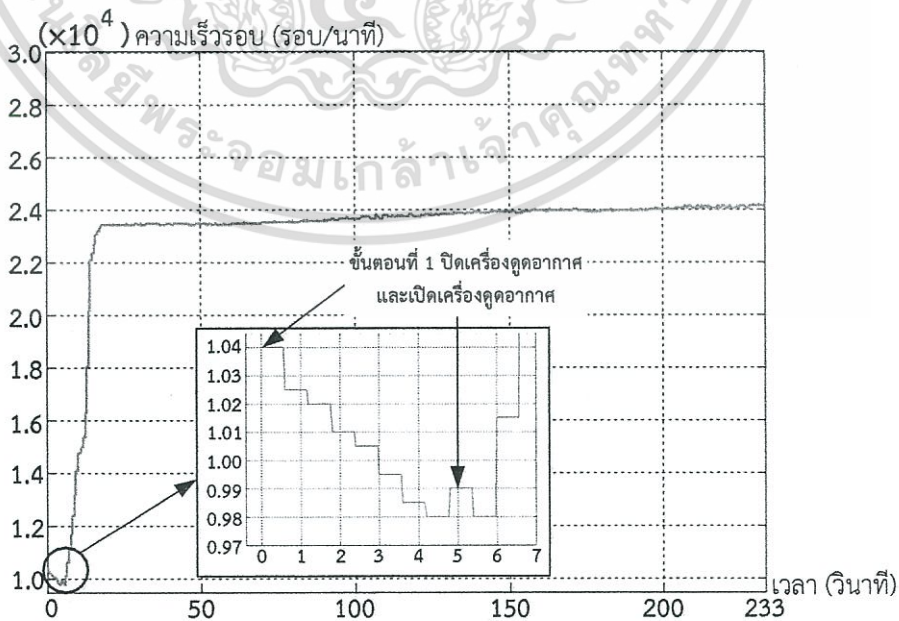
การทดลองการสตาร์ทเครื่องยนต์กักกันก๊าซขนาดเล็กแบบอัตโนมัติและการทดลองหลังจากการสตาร์ทเครื่องยนต์แบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีแรกเป็นการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอในการควบคุมความเร็วรอบกักกันก๊าซ และกรณีสองเป็นการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีในการควบคุมความเร็วรอบกักกันก๊าซ โดยการวิเคราะห์สมรรถนะผลการทดลองของทั้งสองตัวควบคุมจะวิเคราะห์เช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่ 5.3

5.4.1 ผลการทดลองตัวควบคุมแบบพีไอ

ในหัวข้อนี้เป็นการนำตัวควบคุมแบบพีไอมาทดลองควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซ โดยมีการทดลองทั้งหมด 6 ขั้นตอนซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการสตาร์ทเครื่องยนต์หลังจากเกิดเพลิงไหม้ขึ้นภายในห้องเผาไหม้ 2 ขั้นตอน และขั้นตอนการทดลองหลังสิ้นสุดขั้นตอนการสตาร์ทเครื่องยนต์อีก 4 ขั้นตอนดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นโดยแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 5.61 ถึง 5.67



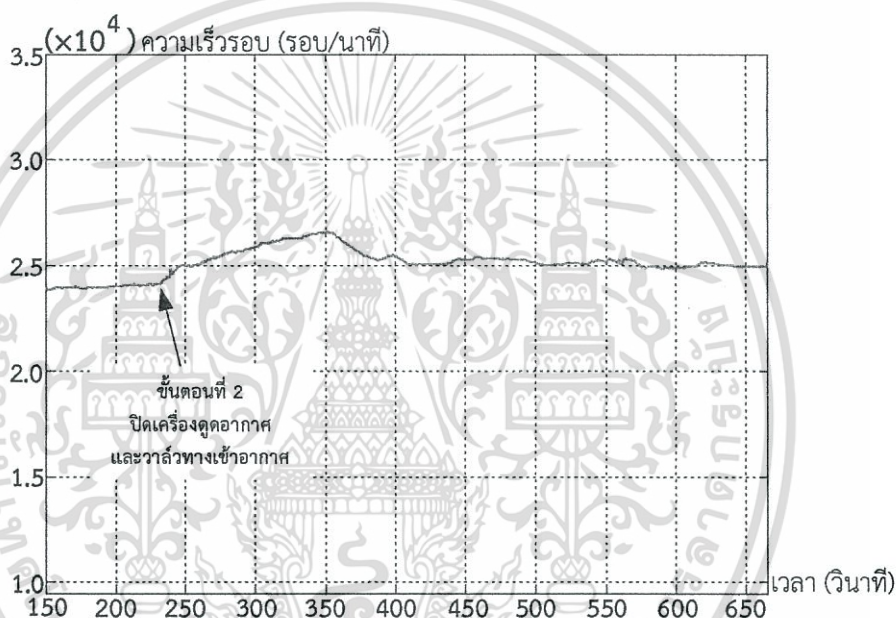
รูปที่ 5.61 ผลการทดลองการสตาร์ทเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กแบบอัตโนมัติ ร่วมกับการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซโดยอาศัยตัวควบคุมแบบพีไอ



รูปที่ 5.62 ผลตอบสนองความเร็วรอบกังหันก๊าซในช่วงขั้นตอนที่ 1 ของรูปที่ 5.61

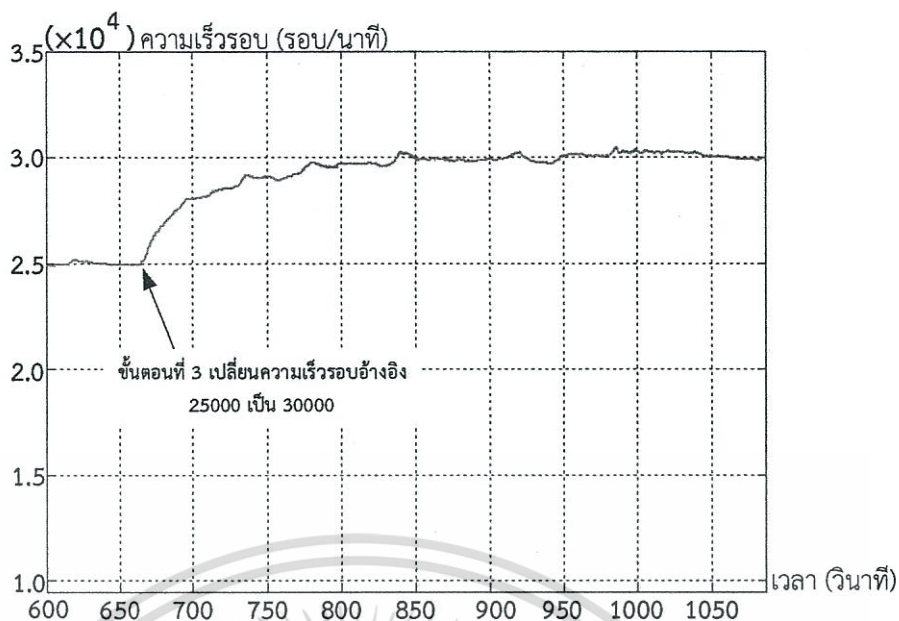
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองขั้นตอนที่ 1 การควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอที่ความเร็วรอบอ้างอิงเท่ากับ 25000 รอบต่อนาทีเมื่อมีการเปิดเครื่องดูดอากาศหลังจากเกิดเพลิงไหม้ 5 วินาทีดังรูปที่ 5.62 พบว่าในช่วงก่อนเปิดเครื่องดูดอากาศความเร็วรอบกังหันก๊าซค่อย ๆ ลดต่ำลงเนื่องจากความเร็วรอบกังหันก๊าซไม่เพียงพอที่จะหมุนเครื่องอัดอากาศให้ดูดอากาศเข้ามายังห้องเผาไหม้ได้เพียงพอ ถึงแม้ตัวควบคุมสั่งให้วาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเปิดมากขึ้นแล้วก็ตาม ซึ่งเมื่อมีการเปิดเครื่องดูดอากาศจึงทำให้ความเร็วรอบกังหันก๊าซสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ผลตอบสนองยังคงมีค่าความผิดพลาดประมาณ 1000 รอบต่อนาทีซึ่งต้องใช้เวลามากกว่านี้เพื่อให้ตัวควบคุมแบบพีไอควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซเข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงได้เนื่องจากเครื่องยนต์ต้องการอัตราการไหลเชื้อเพลิงที่มากกว่านี้ในการทำให้กังหันก๊าซมีความเร็วรอบสูงขึ้น



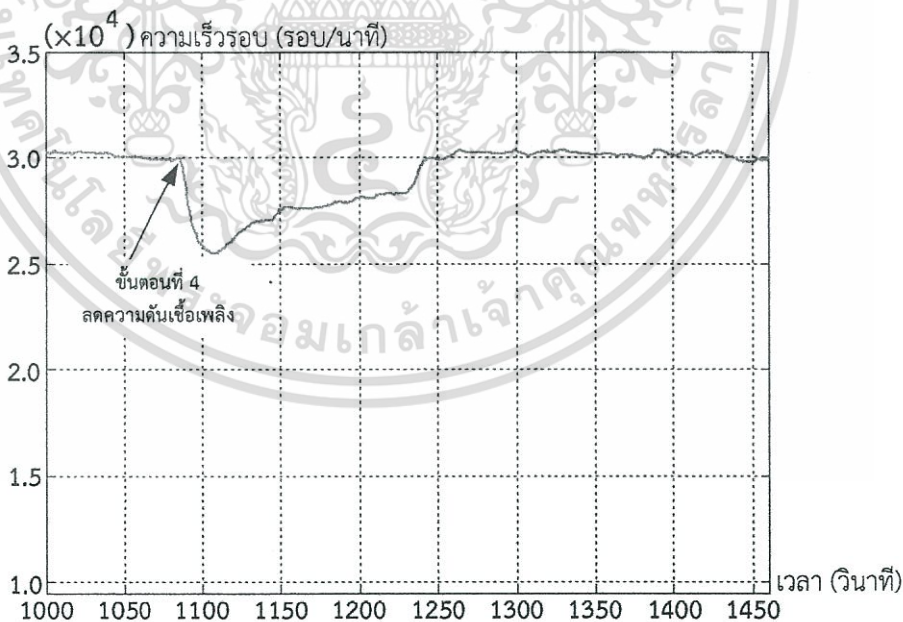
รูปที่ 5.63 ผลตอบสนองความเร็วรอบกังหันก๊าซในช่วงขั้นตอนที่ 2 ของรูปที่ 5.61

จากการทดลองขั้นตอนที่ 2 การควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอที่ความเร็วรอบอ้างอิงเท่ากับ 25000 รอบต่อนาทีเมื่อมีการเปิดเครื่องดูดอากาศและวาล์วทางเข้าอากาศดังรูปที่ 5.63 พบว่าเมื่อเปิดเครื่องดูดอากาศและวาล์วทางเข้าอากาศแล้วทำให้ความเร็วรอบกังหันก๊าซสูงขึ้นทันทีจนความเร็วรอบกังหันก๊าซมีการเบี่ยงเบนจากความเร็วรอบอ้างอิงสูงสุด 1600 รอบต่อนาที ซึ่งตัวควบคุมแบบพีไอสามารถควบคุมให้ความเร็วรอบกังหันก๊าซกลับจากค่าเบี่ยงเบนสูงสุดเข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงได้โดยไม่มีค่าพุงเกิน มีการแกว่งของสัญญาณอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ และใช้เวลาประมาณ 48 วินาที



รูปที่ 5.64 ผลตอบสนองความเร็วรอบกังหันก๊าซในช่วงขั้นตอนที่ 3 ของรูปที่ 5.61

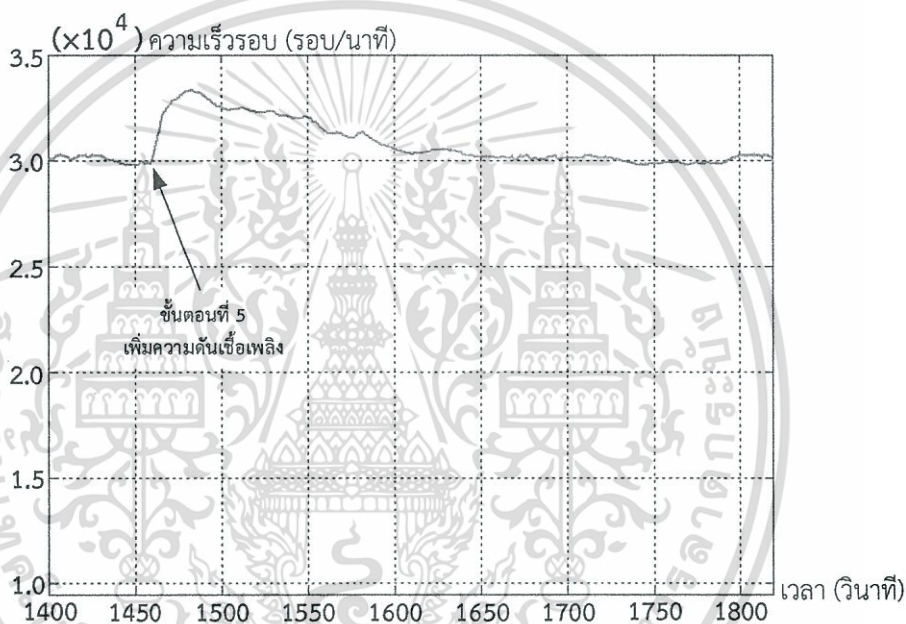
จากการทดลองขั้นตอนที่ 3 การควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอเมื่อมีการปรับเพิ่มความเร็วรอบอ้างอิงจาก 25000 เป็น 30000 รอบต่อนาทีดังรูปที่ 5.64 พบว่าตัวควบคุมแบบพีไอสามารถควบคุมให้ความเร็วรอบกังหันก๊าซเข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงได้โดยไม่มีค่าพุ่งเกิน มีการแกว่งของสัญญาณในช่วงที่สามารถยอมรับได้ และมีช่วงเวลาเข้าที่ 131.56 วินาที



รูปที่ 5.65 ผลตอบสนองความเร็วรอบกังหันก๊าซในช่วงขั้นตอนที่ 4 ของรูปที่ 5.61

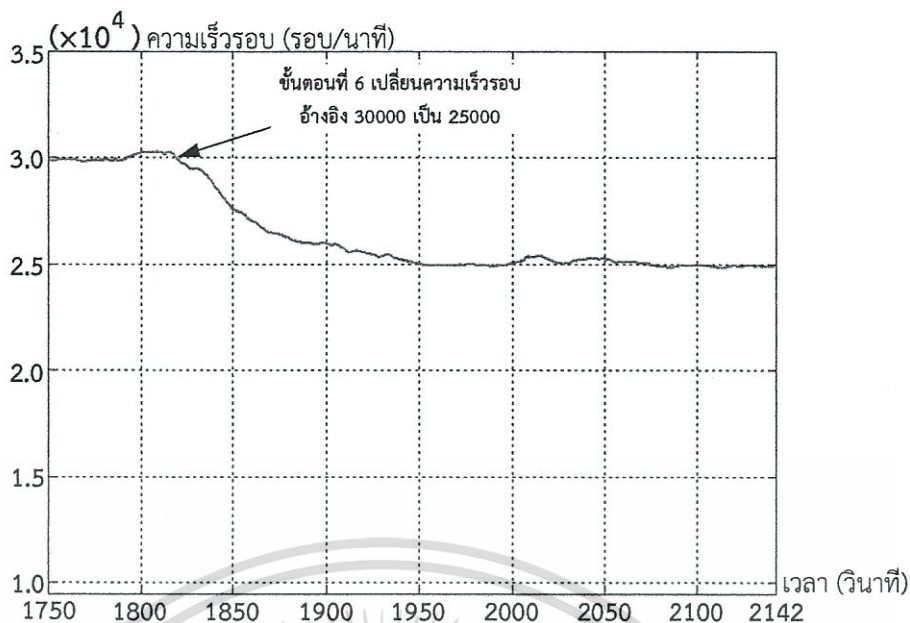
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองขั้นตอนที่ 4 การควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอที่ความเร็วรอบอ้างอิงเท่ากับ 30000 รอบต่อนาทีเมื่อมีการปรับลดความดันเชื้อเพลิงดังรูปที่ 5.65 พบว่าความเร็วรอบกังหันก๊าซลดต่ำลงทันทีโดยมีการเบี่ยงเบนจากความเร็วรอบอ้างอิงสูงสุด 4500 รอบต่อนาที เนื่องจากเมื่อปรับลดความดันเชื้อเพลิงลงจะส่งผลให้อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงลดลงตามไปด้วย ซึ่งอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงมีผลโดยตรงต่อการเผาไหม้ ถึงแม้ว่าอัตราไหลเชิงปริมาณยังคงที่อยู่ก็ตาม ดังนั้นเพื่อให้ความเร็วรอบกังหันก๊าซกลับจากค่าเบี่ยงเบนสูงสุดเข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงตัวควบคุมแบบพีไอจึงสั่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเพื่อเพิ่มอัตราการไหลเชื้อเพลิง ซึ่งตัวควบคุมแบบพีไอสามารถควบคุมให้ความเร็วกังหันก๊าซกลับเข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงได้โดยไม่มีค่าพุ่งเกิน มีการแกว่งของสัญญาณอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ และใช้เวลาประมาณ 129.71 วินาที



รูปที่ 5.66 ผลตอบสนองความเร็วรอบกังหันก๊าซในช่วงขั้นตอนที่ 5 ของรูปที่ 5.61

จากการทดลองขั้นตอนที่ 5 การควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอที่ความเร็วรอบอ้างอิงเท่ากับ 30000 รอบต่อนาทีเมื่อมีการปรับเพิ่มความดันเชื้อเพลิงดังรูปที่ 5.66 พบว่าความเร็วรอบกังหันก๊าซเพิ่มสูงขึ้นทันทีโดยมีการเบี่ยงเบนจากความเร็วรอบอ้างอิงสูงสุด 3300 รอบต่อนาที เนื่องจากเมื่อปรับเพิ่มความดันเชื้อเพลิงขึ้นจะส่งผลให้อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงมีผลโดยตรงต่อการเผาไหม้ ถึงแม้ว่าอัตราไหลเชิงปริมาณยังคงที่อยู่ก็ตาม ดังนั้นตัวควบคุมแบบพีไอจึงสั่งปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเพื่อลดอัตราการไหลเชื้อเพลิง โดยตัวควบคุมแบบพีไอสามารถควบคุมให้ความเร็วกังหันก๊าซกลับจากค่าเบี่ยงเบนสูงสุดเข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงได้โดยไม่มีค่าพุ่งเกิน มีการแกว่งของสัญญาณอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ และใช้เวลาประมาณ 155.6 วินาที



รูปที่ 5.67 ผลตอบสนองความเร็วรอบกังหันก๊าซในช่วงขั้นตอนที่ 6 ของรูปที่ 5.61

จากการทดลองขั้นตอนที่ 6 การควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอเมื่อมีการปรับเพิ่มความเร็วรอบอ้างอิงจาก 30000 เป็น 25000 รอบต่อนาทีดังรูปที่ 5.67 พบว่าตัวควบคุมแบบพีไอสามารถควบคุมให้ความเร็วรอบกังหันก๊าซเข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงได้โดยไม่มีค่าพุ่งเกิน มีการแกว่งของสัญญาณในช่วงที่สามารถยอมรับได้ และมีช่วงเวลาเข้าที่ 116.52 วินาที

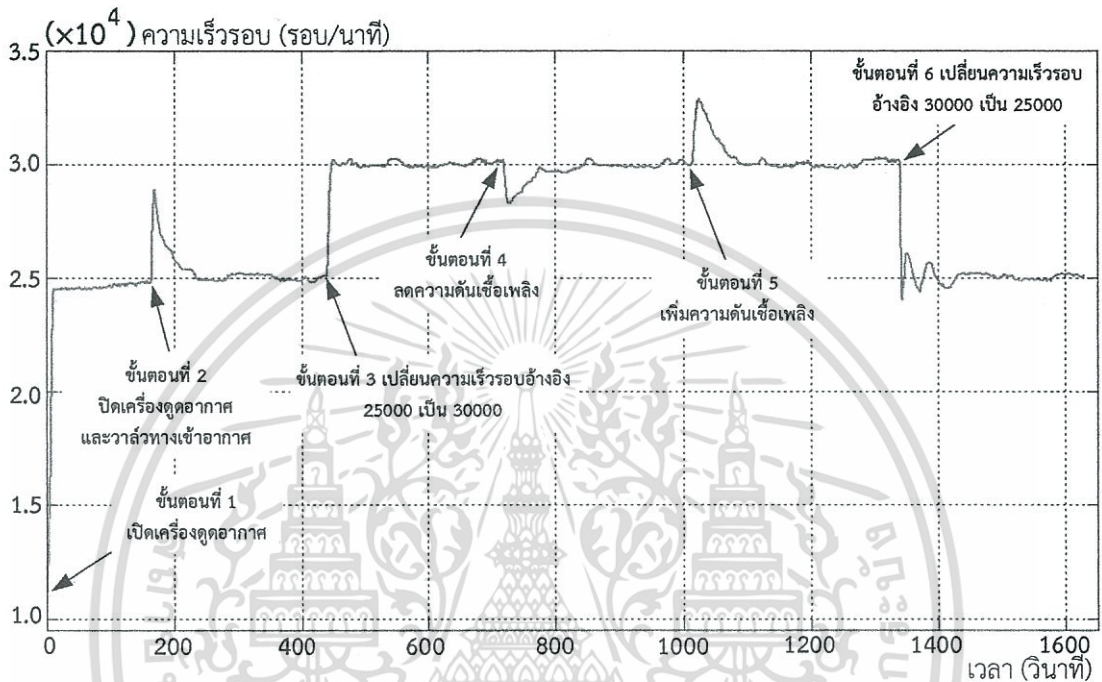
5.4.2 ผลการทดลองตัวควบคุมแบบพีไอดี

ในหัวข้อนี้เป็นการนำตัวควบคุมแบบพีไอดีมาทดลองควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซ โดยมีการทดลองทั้งหมด 6 ขั้นตอนซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการสตาร์ทเครื่องยนต์หลังจากเกิดเปลวไฟขึ้นภายในห้องเผาไหม้ 2 ขั้นตอน และขั้นตอนการทดลองหลังสิ้นสุดขั้นตอนการสตาร์ทเครื่องยนต์อีก 4 ขั้นตอนดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 5.68 ถึง 5.74

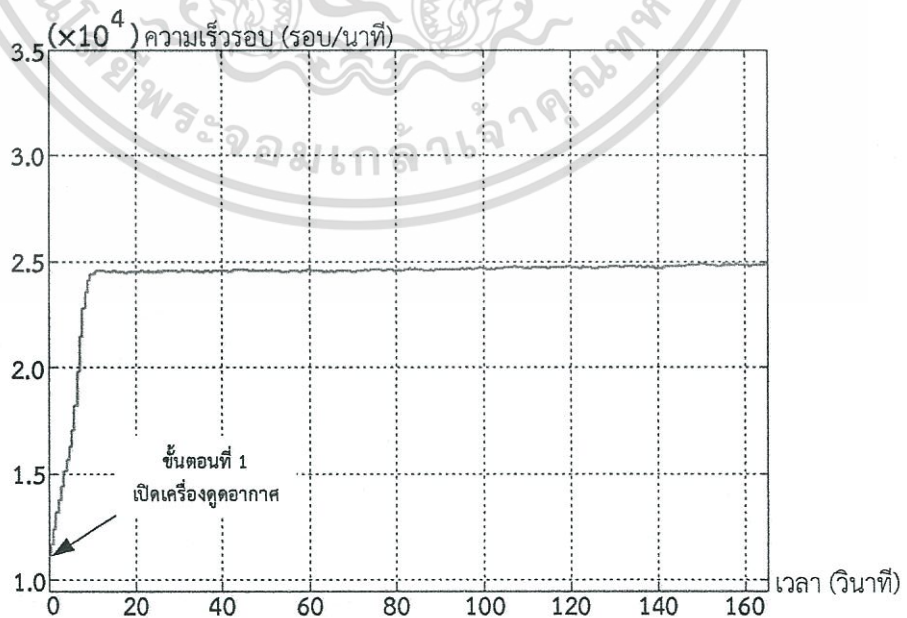
จากการทดลองขั้นตอนที่ 1 การควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ความเร็วรอบอ้างอิงเท่ากับ 25000 รอบต่อนาทีเมื่อมีการเปิดเครื่องดูดอากาศหลังจากเกิดเปลวไฟในทันทีดังรูปที่ 5.69 พบว่าในขณะที่เปิดเครื่องดูดอากาศตัวควบคุมแบบพีไอดีสามารถควบคุมให้ความเร็วรอบกังหันก๊าซเข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงได้โดยไม่มีค่าพุ่งเกิน มีค่าความผิดพลาดที่สามารถยอมรับได้ และมีช่วงเวลาเข้าที่ 104.48 วินาที

จากการทดลองขั้นตอนที่ 2 การควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ความเร็วรอบอ้างอิงเท่ากับ 25000 รอบต่อนาทีเมื่อมีการปิดเครื่องดูดอากาศและวาล์วทางเข้าอากาศดังรูปที่ 5.70 พบว่าเมื่อปิดเครื่องดูดอากาศและวาล์วทางเข้าอากาศทำให้ความเร็วรอบกังหันก๊าซสูงขึ้นทันทีจนความเร็วรอบกังหันก๊าซมีการเบี่ยงเบนจากความเร็วรอบอ้างอิงสูงสุดเท่ากับ 3900 รอบต่อนาทีซึ่งมีค่าเบี่ยงเบนสูงสุดมากกว่าตัวควบคุมแบบพีไอเนื่องจากการที่ตัวควบคุมแบบพีไอดีการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมความเร็วรอบกึ่งหนักก๊าซให้เข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงได้ในขั้นตอนที่ 1 ต้องอาศัยอัตราการไหลของเชื้อเพลิงที่สูงมากกว่าในขณะที่ปิดเครื่องดูดอากาศและวาล์วทางเข้าอากาศ อย่างไรก็ตามตัวควบคุมแบบพีไอดีก็สามารถควบคุมให้ความเร็วรอบกึ่งหนักก๊าซกลับจากค่าเบี่ยงเบนสูงสุดเข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงได้โดยไม่มีค่าพุ่งเกิน มีการแกว่งของสัญญาณอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ และใช้เวลา 58.88 วินาที

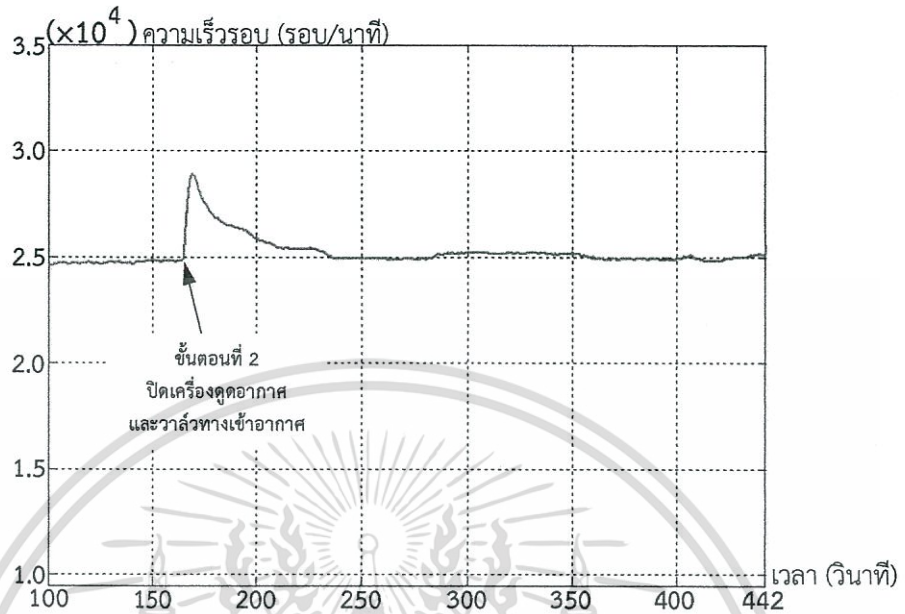


รูปที่ 5.68 ผลการทดลองการสตาร์ทเครื่องยนต์กึ่งหนักก๊าซขนาดเล็กแบบอัตโนมัติ ร่วมกับการควบคุมความเร็วรอบกึ่งหนักก๊าซโดยอาศัยตัวควบคุมแบบพีไอดี

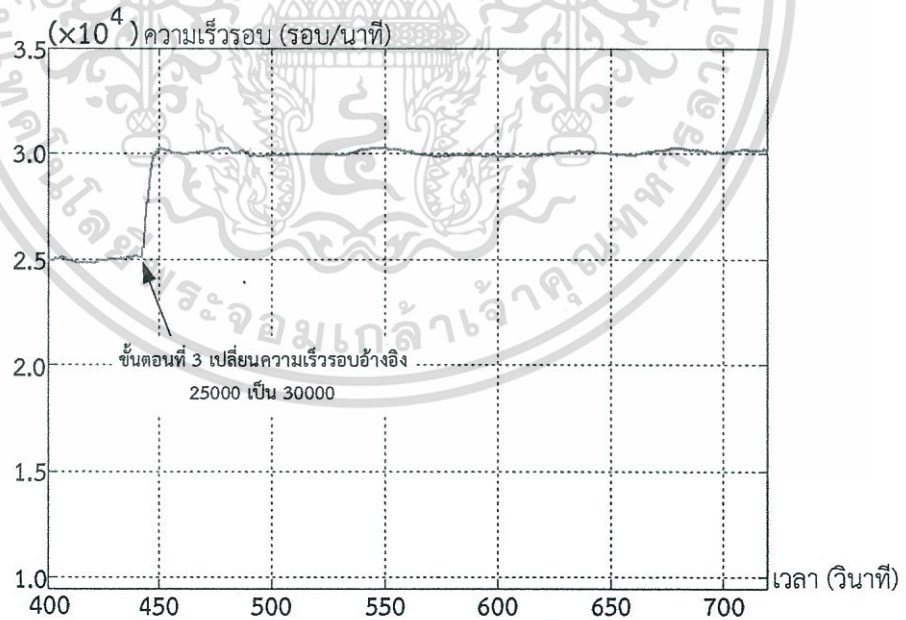


รูปที่ 5.69 ผลตอบสนองความเร็วรอบกึ่งหนักก๊าซในช่วงขั้นตอนที่ 1 ของรูปที่ 5.68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



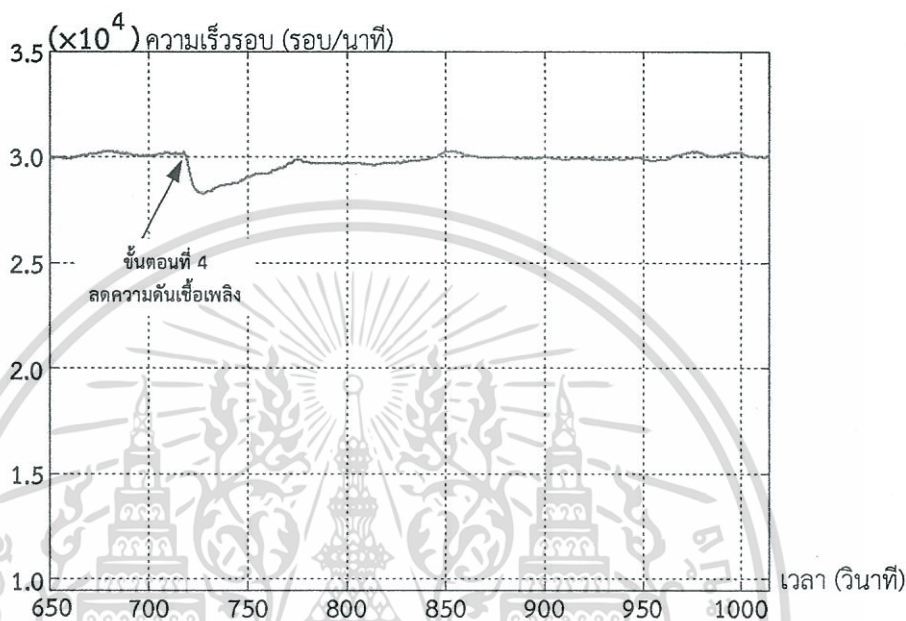
รูปที่ 5.70 ผลตอบสนองความเร็วรอบกัมมันท์ก๊าซในช่วงชั้นตอนที่ 2 ของรูปที่ 5.68



รูปที่ 5.71 ผลตอบสนองความเร็วรอบกัมมันท์ก๊าซในช่วงชั้นตอนที่ 3 ของรูปที่ 5.68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองขั้นตอนที่ 3 การควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีเมื่อมีการปรับเพิ่มความเร็วรอบอ้างอิงจาก 25000 เป็น 30000 รอบต่อนาทีดังรูปที่ 5.71 พบว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีสามารถควบคุมให้ความเร็วรอบกังหันก๊าซเข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงได้โดยมีค่าพุ่งเกินสูงสุดเพียง 200 รอบต่อนาที มีการแกว่งของสัญญาณในช่วงที่สามารถยอมรับได้ และมีช่วงเวลาเข้าที่เท่ากับ 5.41 วินาที



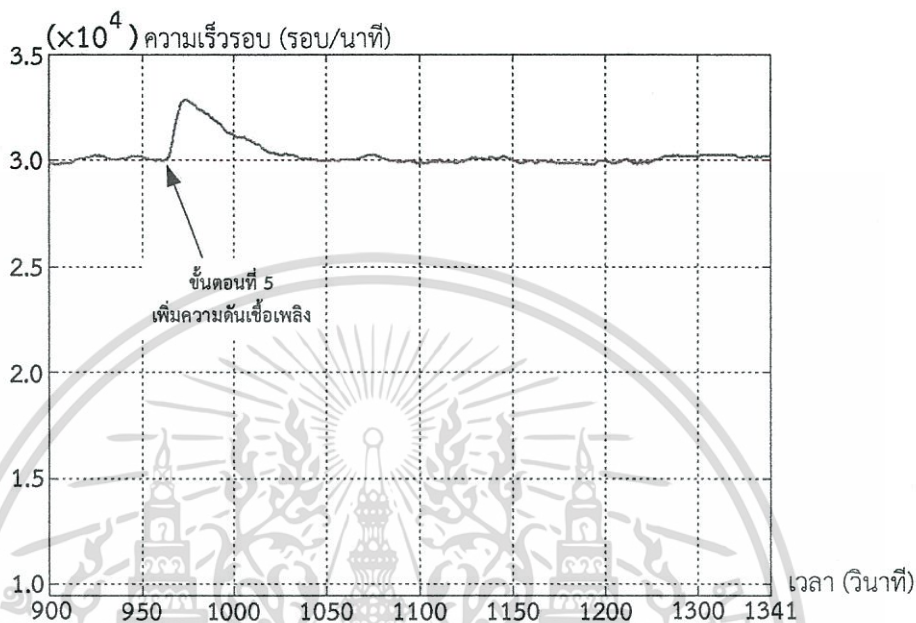
รูปที่ 5.72 ผลตอบสนองความเร็วรอบกังหันก๊าซในช่วงขั้นตอนที่ 4 ของรูปที่ 5.68

จากการทดลองขั้นตอนที่ 4 การควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ความเร็วรอบอ้างอิงเท่ากับ 30000 รอบต่อนาทีเมื่อมีการปรับลดความดันเชื้อเพลิงดังรูปที่ 5.72 พบว่าความเร็วรอบกังหันก๊าซลดต่ำลงทันทีโดยมีการเบี่ยงเบนจากความเร็วรอบอ้างอิงสูงสุด 1750 รอบต่อนาที เนื่องจากเมื่อปรับลดความดันเชื้อเพลิงลงจะส่งผลให้อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงลดลงตามไปด้วย ซึ่งอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงมีผลโดยตรงต่อการเผาไหม้ ถึงแม้ว่าอัตราไหลเชิงปริมาตรยังคงที่อยู่ก็ตาม ดังนั้นเพื่อให้ความเร็วรอบกังหันก๊าซกลับเข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงตัวควบคุมแบบพีไอดีจึงสั่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเพื่อเพิ่มอัตราการไหลเชื้อเพลิง ซึ่งตัวควบคุมแบบพีไอดีสามารถควบคุมให้ความเร็วรอบกังหันก๊าซกลับจากค่าเบี่ยงเบนสูงสุดเข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงได้โดยไม่มีค่าพุ่งเกิน และมีการแกว่งของสัญญาณอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ และใช้เวลา 92.48 วินาที

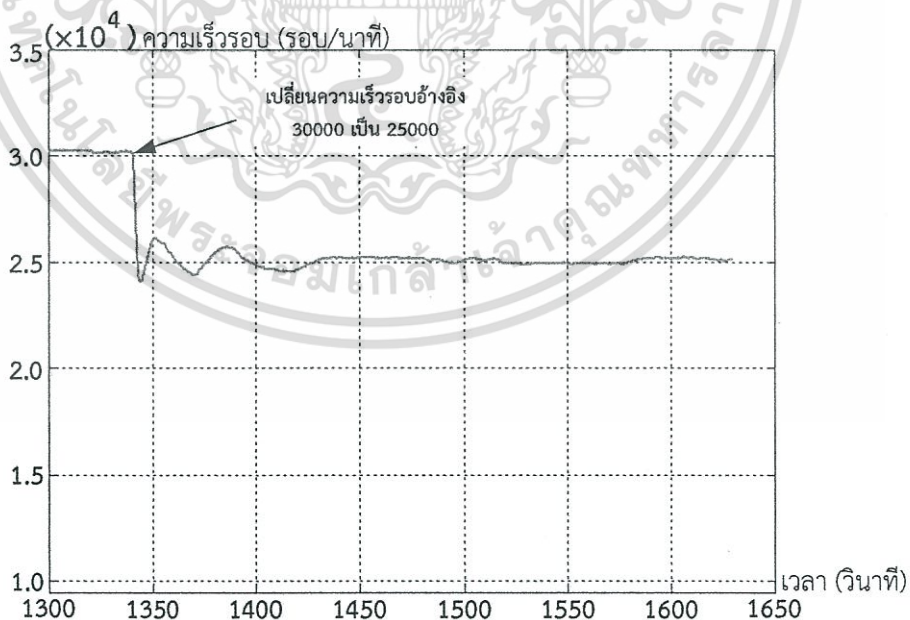
จากการทดลองขั้นตอนที่ 5 การควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ความเร็วรอบอ้างอิงเท่ากับ 30000 รอบต่อนาทีเมื่อมีการปรับเพิ่มความดันเชื้อเพลิงดังรูปที่ 5.73 พบว่าความเร็วรอบกังหันก๊าซเพิ่มสูงขึ้นทันทีโดยมีการเบี่ยงเบนจากความเร็วรอบอ้างอิงสูงสุด 2850 รอบต่อนาที เนื่องจากเมื่อปรับเพิ่มความดันเชื้อเพลิงขึ้นจะส่งผลให้อัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงมีผลโดยตรงต่อการเผาไหม้ ถึงแม้ว่าอัตรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหลเชิงปริมาณยังคงที่อยู่ก็ตาม ดังนั้นตัวควบคุมแบบพีไอจึงสั่งปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเพื่อลดอัตราการไหลเชื้อเพลิง โดยตัวควบคุมแบบพีไอสามารถควบคุมให้ความเร็วกังหันก๊าซกลับจากค่าเบี่ยงเบนสูงสุดเข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงได้โดยไม่มีค่าพุ่งเกิน มีการแกว่งของสัญญาณอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ และใช้เวลา 48.08 วินาที



รูปที่ 5.73 ผลตอบสนองความเร็วรอบกังหันก๊าซในช่วงขั้นตอนที่ 5 ของรูปที่ 5.68



รูปที่ 5.74 ผลตอบสนองความเร็วรอบกังหันก๊าซในช่วงขั้นตอนที่ 6 ของรูปที่ 5.68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองขั้นตอนที่ 6 การควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีเมื่อมีการปรับเพิ่มความเร็วรอบอ้างอิงจาก 30000 เป็น 25000 รอบต่อนาทีดังรูปที่ 5.74 พบว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีสามารถควบคุมให้ความเร็วรอบกังหันก๊าซเข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงได้โดยมีค่าฟุงเกินและเกิดการแกว่งของสัญญาณ แต่มีค่าความผิดพลาดที่สามารถยอมรับได้และมีช่วงเวลาเข้าที่ 82 วินาที

5.4.3 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซทั้ง 6 ขั้นตอนของตัวควบคุมแบบพีไอและพีไอดี พบว่าในส่วนการทดลองปรับเปลี่ยนความเร็วอ้างอิงในขั้นตอนที่ 1, 3 และ 6 ตัวควบคุมแบบพีไอดีสามารถควบคุมให้ความเร็วรอบกังหันก๊าซเข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงได้ทั้ง 3 ขั้นตอนซึ่งต่างกับตัวควบคุมแบบพีไอที่สามารถควบคุมให้ความเร็วรอบกังหันก๊าซเข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงได้ในช่วงเวลาที่ทดลองในขั้นตอนที่ 3 และ 6 เท่านั้น โดยตัวควบคุมแบบพีไอดีสามารถควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซที่มีการปรับเพิ่มความเร็วรอบอ้างอิงขึ้นได้ดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอเนื่องจากสามารถควบคุมให้ความเร็วรอบกังหันก๊าซเข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงได้เร็วกว่า โดยไม่มีค่าฟุงเกินเช่นกันกับตัวควบคุมแบบพีไอ แต่อย่างไรก็ตามตัวควบคุมแบบพีไอสามารถควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซที่มีการปรับลดความเร็วรอบอ้างอิงลงได้ดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอถึงแม้ว่าจะใช้เวลาในการควบคุมนานกว่าตามเนื่องจากผลตอบสนองที่ได้จากตัวควบคุมแบบพีไอดีเกิดการแกว่งของสัญญาณก่อนเข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงโดยที่ผลตอบสนองที่ได้จากตัวควบคุมแบบพีไอไม่เกิดการแกว่งของสัญญาณก่อนเข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิง และในส่วนการทดลองสร้างสัญญาณรบกวนให้ระบบในขั้นตอนที่ 2, 4 และ 5 ตัวควบคุมแบบพีไอดีและตัวควบคุมแบบพีไอสามารถควบคุมให้ความเร็วรอบกังหันก๊าซกลับเข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงได้ แต่ไม่สามารถนำเวลาที่ใช้ในการควบคุมของตัวควบคุมทั้งสองมาเปรียบเทียบกันได้ เนื่องจากการปรับเพิ่มและปรับลดความดันก๊าซเชื้อเพลิง และการปิดวาล์วทางเข้าอากาศได้อาศัยอุปกรณ์ที่ทำงานด้วยมือซึ่งการทำงานด้วยมือมีข้อเสียหลายประการ เช่น ไม่สามารถควบคุมความสม่ำเสมอในการปรับและเวลาในการปรับให้เท่ากันในทุกครั้งที่ทดลองได้ เป็นต้น

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบการสตาร์ทเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กแบบอัตโนมัติ และการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซ โดยในการสตาร์ทเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กแบบอัตโนมัติจะอาศัยการควบคุมแบบลำดับโดยเขียนโปรแกรมเลียนแบบการสตาร์ทเครื่องยนต์ของผู้ควบคุม ในด้านการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซประกอบด้วยระบบควบคุมแบบป้อนกลับแบบสลับ 2 รูป ได้แก่ การควบคุมรูปในทำหน้าที่ควบคุมตำแหน่งการเปิด-ปิดของวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเพื่อควบคุมอัตราการไหลเชื้อเพลิง และการควบคุมรูปนอกทำหน้าที่ควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซ โดยการออกแบบตัวควบคุมของรูปในได้อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์กระแสตรงแทนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง จากนั้นนำตัวควบคุมที่ผ่านการออกแบบมาจำลองในโปรแกรมแมตแล็บเพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการออกแบบ และตรวจสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมก่อนนำไปทดลองควบคุมตำแหน่งเปิด-ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงในระบบจริง และในส่วนของ การออกแบบระบบควบคุมรูปนอกจำเป็นต้องอาศัยการทดลองในระบบจริงโดยใช้วิธีลองผิดลองถูก เนื่องจากไม่สามารถออกแบบตัวควบคุมและทำการจำลองก่อนได้เพราะว่าไม่ทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก โดยตัวควบคุมที่นำมาใช้ในการควบคุมทั้ง 2 รูปเป็นตัวควบคุมในกลุ่มพีไอดี

จากผลการจำลองและผลการทดลองในการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง พบว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีการปรับแต่งค่าเกณฑ์ร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัพโดยมีค่าเกณฑ์ได้จากการปรับแต่งคือ $K_p = 24.091$ และ $K_I = 0.4$ สามารถควบคุมให้ตำแหน่งเปิด-ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเข้าสู่ตำแหน่งอ้างอิงได้โดยผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกินและมีค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ และจากผลการทดลองควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซ พบว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีค่าเกณฑ์ $K_p = 0.001$, $K_I = 0.00005$ และ $K_D = 0.0001$ สามารถควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซให้เข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงได้โดยผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกิน 12.57 เปอร์เซ็นต์แต่มีช่วงเวลาเข้าที่เพียง 19.2 วินาที และตัวควบคุมแบบพีไอดีที่มีค่าเกณฑ์ $K_p = 0.0001$ และ $K_I = 0.0000075$ สามารถควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซให้เข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงได้โดยไม่มีค่าพุ่งเกิน แต่มีช่วงเวลาเข้าที่มากถึง 49.44 วินาทีซึ่งมากกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี

จากการทดลองการสตาร์ทเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กแบบอัตโนมัติ และการควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซ พบว่าระบบควบคุมการสตาร์ทที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นสามารถทำงานแทนผู้ควบคุมได้ โดยผู้ควบคุมมีหน้าที่เพียงปิดวาล์วทางเข้าอากาศเมื่อมีการส่งสัญญาณเตือนจากส่วนประมวลผล และในส่วนของระบบควบคุมความเร็วรอบกังหันก๊าซสามารถควบคุมความเร็วรอบกังหัน

ก๊าซให้เข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงได้ โดยเมื่อมีการปรับเปลี่ยนความดันเชื้อเพลิงเพื่อเป็นการควบคุมระบบควบคุมก็ยังคงสามารถควบคุมความเร็วรอบกักกันก๊าซให้กลับเข้าสู่ความเร็วรอบอ้างอิงได้

6.2 ปัญหาที่พบในงานวิจัยและแนวทางการแก้ไขปัญหา

ปัญหาอันเนื่องมาจากชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำขึ้นเองจึงมีข้อเสียหลายประการซึ่งมีผลต่อการควบคุมความเร็วรอบกักกันก๊าซดังนี้

1. คัปปลิงที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างมอเตอร์และนิตเต็ลวาล์วที่ทำขึ้นเองมีลักษณะเป็นสองชิ้นประกบกัน โดยมีชิ้นที่ประกบกับนิตเต็ลวาล์วจะมีการเคลื่อนที่ขึ้น-ลงในชิ้นที่ประกบกับมอเตอร์พบว่าทั้งสองชิ้นมีการขัดกันอยู่เล็กน้อยอันเนื่องมาจากชิ้นที่ประกบกับมอเตอร์มีช่องภายในด้านบนพอดีกับชิ้นที่ติดกับนิตเต็ลวาล์วเกินไป และการเจาะรูยึดกับมอเตอร์ไม่ได้ศูนย์กลางจึงทำให้ชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงมีแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นอีก

2. นิตเต็ลวาล์วที่นำมาใช้ในชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงมีความละเอียดในการเปิด-ปิดต่ำหรือมีจำนวนรอบในการเปิด-ปิดสปีดน้อย โดยเมื่อหมุนเปิดหรือปิดวาล์วเพียงเล็กน้อยก็ทำให้อัตราการไหลเชื้อเพลิงเปลี่ยนแปลงมากซึ่งทำให้ยากต่อการควบคุมความเร็วรอบกักกันก๊าซ

3. เมื่อนำมอเตอร์ นิตเต็ลวาล์ว และคัปปลิงมาประกอบเข้าด้วยกันทำให้เกิดแรงเสียดมากขึ้นทำให้ขนาดแรงที่ใช้เปลี่ยนแปลงตำแหน่งวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงมากตามไปด้วย ซึ่งเมื่อสังเกตจากผลการทดลองของการควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงพบว่าถ้าตัวควบคุมจ่ายสัญญาณควบคุมต่ำกว่า 15 เปอร์เซ็นต์จะไม่สามารถทำให้เปลี่ยนแปลงตำแหน่งเปิด-ปิดของวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงได้ ดังนั้นในกรณีที่ตัวควบคุมความเร็วรอบกักกันก๊าซจ่ายสัญญาณควบคุม หรือกำหนดตำแหน่งใหม่ให้กับตัวควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงแล้วมีความแตกต่างกับตำแหน่งเดิมไม่มากทำให้จะขนาดของสัญญาณควบคุมที่ตัวควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงจ่ายให้กับชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงไม่เพียงพอที่จะเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงได้ ซึ่งมีผลกับการทดลองเป็นอย่างมากเนื่องจากความเร็วรอบกักกันก๊าซที่เป็นความเร็วรอบอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 30000 รอบต่อนาทีที่ต้องการเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงเพียงประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น

จากปัญหาที่เกิดขึ้นกับชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงมีแนวทางในการแก้ปัญหาเหล่านี้ คือทำคัปปลิงขึ้นมาใหม่ให้คัปปลิงทั้งสองมีความพอดีกัน เจาะรูคัปปลิงขึ้นที่ยึดติดกับมอเตอร์ให้ได้ศูนย์กลางเปลี่ยนวาล์วที่มีจำนวนรอบในการเปิด-ปิดสปีดมากกว่าขึ้น และมีช่องการไหลขนาดเล็กกว่าเดิม เปลี่ยนใช้มอเตอร์ที่ชุดเกียร์มีการทดรอบมากขึ้นเพื่อเพิ่มแรงบิด และลดความเร็วรอบลงซึ่งจะช่วยให้มอเตอร์สามารถเปิด-ปิดตำแหน่งวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงได้โดยตัวควบคุมจ่ายสัญญาณควบคุมต่ำลง

ปัญหาอันเนื่องมาจากการวัดความเร็วรอบกักกันเกิดจากจำนวนพัลส์ต่อหนึ่งรอบการวัดมีจำนวนน้อยทำให้ความละเอียดในการวัดต่ำ โดยในงานวิจัยนี้มีจำนวน 2 พัลส์ต่อรอบ และความละเอียดในการวัดเท่ากับ 50 รอบต่อนาทีถือว่ายังมีความละเอียดไม่มาก ซึ่งยังส่งต่อการประมวลผล

ของตัวควบคุมด้วยกล่าวคือ ถ้าการประมวลผลของตัวควบคุมมีช่วงเวลาการประมวลผลต่อหนึ่งรอบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(sampling time) น้อยลงจากเดิม (600 มิลลิวินาที) จะทำให้ความละเอียดในการวัดต่ำลงจากเดิมอีก เช่น ถ้าวัดช่วงเวลาการประมวลผลต่อหนึ่งรอบให้เท่ากับ 300 มิลลิวินาที จะทำให้ความละเอียดในการวัดมีค่าเท่ากับ 100 รอบต่อนาทีโดยมีแนวทางในการแก้ปัญหาที่คือเพิ่มจำนวนพัลส์ในการวัดรอบกึ่งหันก๊าซให้มีจำนวนมากขึ้น

6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมของระบบควบคุมความเร็วรอบกึ่งหันก๊าซของเครื่องกังหันก๊าซขนาดเล็กโดยใช้วิธีลองผิดลองถูกในการปรับค่าเกนของตัวควบคุมซึ่งอาจทำให้เครื่องยนต์เกิดความเสียหายได้ ถ้ากำหนดค่าเกนของตัวควบคุมที่ไม่เหมาะสมแล้วทำให้ผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกินสูงเป็นเวลานานจนทำให้อุณหภูมิในห้องเผาไหม้สูงจะทำให้กังหันก๊าซเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมของเครื่องยนต์กังหันก๊าซที่หาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงเป็นอีกแนวทางที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถออกแบบตัวควบคุมแล้วไปจำลองผลตอบสนองในโปรแกรมเมตแล็บก่อนนำไปทดลองควบคุมความเร็วรอบกึ่งหันก๊าซระบบจริงได้ซึ่งทำให้ลดโอกาสเกิดความเสียหายต่อเครื่องยนต์ได้ และสามารถนำตัวควบคุมที่มีความซับซ้อนมากกว่าตัวควบคุมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้มาทดลองควบคุมความเร็วรอบกึ่งหันก๊าซได้

บรรณานุกรม

- [1] เดชดนัย บุญช่วย. 2554. “การจำลองรูปทรงใบพัดต่อสมรรถนะของคอมเพรสเซอร์แรงเหวี่ยงสำหรับเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาด 200 kW.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [2] Jurado, F. et.al. 2001. “Neuro-fuzzy controller for gas turbine in biomass-based electric power plant.” *Electric Power System Research*. 2002(60) : 123-135.
- [3] Kim, Dong Hwa. 2004. “Neuro-fuzzy Tuning of PID Controller for Control of Actual Gas Turbine Power.” *Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications*. 2004 : 192-197.
- [4] Rangaswamy, T.R. 2006. “Fuzzy Controller for a Gas Turbine Plant.” *IEEE CONFERENCE PUBLICATIONS*. 2006 : 1252-1257.
- [5] Jurado, F. and Carpio, J. 2006. “Improving distribution system stability by predictive control of gas turbine.” *Energy Conversion and Management*. 2006(47) : 2961-2973.
- [6] Wang, Z. and Li, S. 2009. “Simulation Study on Fuzzy PID Control of Gas Turbine Generating Sets Speed.” *IEEE CONFERENCE PUBLICATIONS*. 2009 : 725-728.
- [7] Xu, A. et.al. 2009. “Research on the Application of Model Free Adaptive (MFA) Control in Gas Turbine.” *Electronic Measurement and Instruments*. 2009(9) : 3-902 - 3-908.
- [8] Najimi, E. and Ramezani, M.H. 2012. “Robust control of speed and temperature in a power plant gas turbine.” *ISA Transactions*. 2012(51) : 304-308.
- [9] Yu, Y. et.al. 2004. “Matlab/Simulink-base simulation for digital-control system of marin three-shaft gas-turbine.” *Applied Energy*. 2005(80) : 1-10.
- [10] Microchip Technology Incorporated. 2007. *dsPIC30F4011/4012 Data Sheet High Performance, 16-Bit Digital Signal Controllers*. [Online]. Available : ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/70135c.pdf
- [11] Measurement Computing Corporation. 2010. *USB-TC USB-based 8 channel Thermocouple Input User’s Guide*. [Online]. Available : <http://www.mccdaq.com/>

- [12] Freescale Semiconductor, Inc. 2004. **Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated.** [Online]. Available : www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MPXV5004G.pdf
- [13] Freescale Semiconductor, Inc. 2004. **Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated.** [Online]. Available : www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MPX5050.pdf
- [14] MELSEC FX3G series Programmable Controllers User's Manual. 2009. **MITSUBISHI ELECTRIC INDUSTRIAL AUTOMATION.** [Online]. Available : www.plcsystems.ru/catalog/Mitsubishi/doc/FX3G_Hardware_Edition.pdf
- [15] ANYCONTROL CO.,LTD. 2009. **H-BRIDGE QUAD POWER MOSFETS FOR DC MOTOR DRIVE.** [Online]. Available : www.es.co.th/detail.asp?Prod=36600078
- [16] Micro projects CO.,LTD. 2008. **User's manual Micro USB-Data Acquisition.** [Online]. Available : <http://www.micro-projects.com>
- [17] KATSUHIKO OGATA. 2002. **"MODERN CONTROL ENGINEERING."** Fourth Edition. New Jersey : Prentice-Hall



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองและการทดลอง

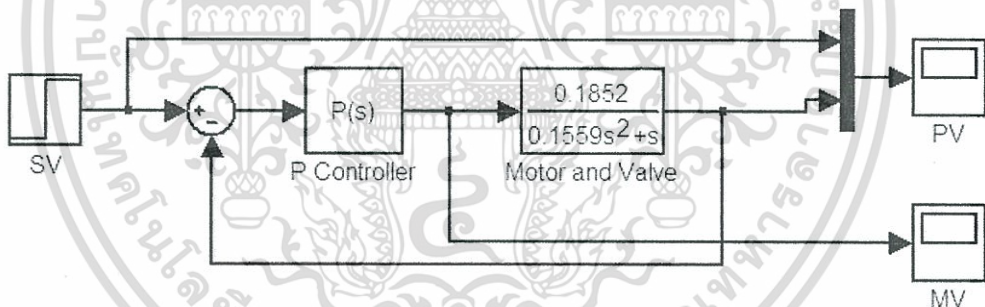
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1 บล็อกไดอะแกรมสำหรับการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิด-ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

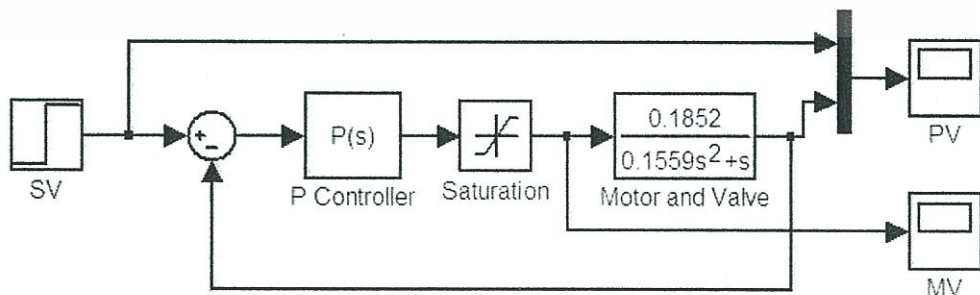
ก่อนที่จะนำระบบควบคุมชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงไปทดลองในระบบจริงได้มีการจำลองการควบคุมด้วยโปรแกรมแมตแล็บ โดยแบ่งการจำลองออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่หนึ่งเป็นการจำลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการออกแบบตัวควบคุมโดยไม่คำนึงและคำนึงถึงการอิ่มตัวของสัญญาณควบคุม กรณีที่สองเป็นการจำลองระบบควบคุมโดยคำนึงถึงการอิ่มตัวของสัญญาณควบคุมและคำนึงถึงแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง ซึ่งตัวควบคุมที่ถูกนำมาใช้ในการจำลอง ได้แก่ ตัวควบคุมแบบพี พีไอ พีไอร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัฟ พีไอดี และพีไอดีร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวน์อัฟ

ก. 1.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพี

การจำลองระบบควบคุมตำแหน่งเปิด-ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีแบ่งบล็อกไดอะแกรมออกเป็น 3 กรณี กรณีที่หนึ่งเป็นการจำลองระบบควบคุมโดยไม่คำนึงการอิ่มตัวของสัญญาณ กรณีที่สองเป็นการจำลองระบบควบคุมโดยคำนึงการอิ่มตัวของสัญญาณ และกรณีที่สามเป็นการจำลองระบบควบคุมโดยคำนึงถึงการอิ่มตัวของสัญญาณควบคุมและคำนึงถึงแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง แสดงดังรูปที่ ก.1, ก.2 และ ก.3 ตามลำดับ

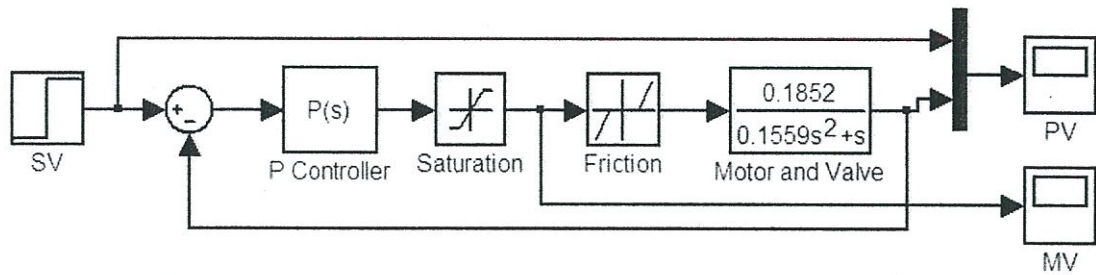


รูปที่ ก.1 บล็อกไดอะแกรมการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีโดยไม่คำนึงการอิ่มตัวของสัญญาณ



รูปที่ ก.2 บล็อกไดอะแกรมการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีโดยคำนึงการอิ่มตัวของสัญญาณ

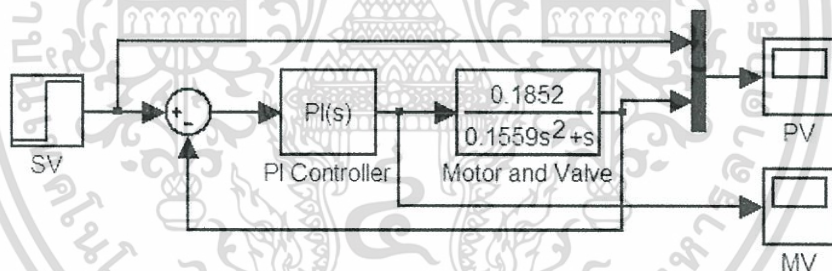
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



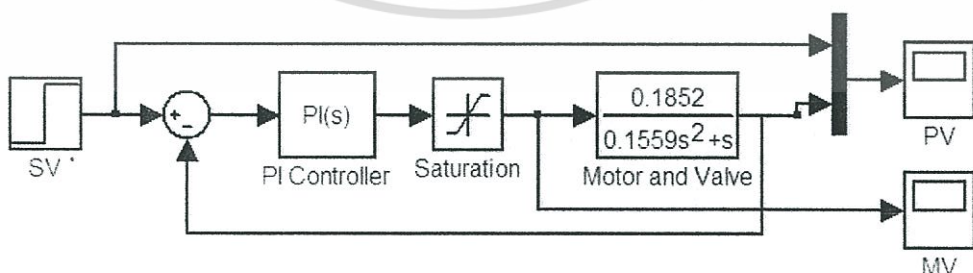
รูปที่ ก.3 บล็อกไดอะแกรมการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง
ด้วยตัวควบคุมแบบพีโดยคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุม
และคำนึงถึงแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

ก. 1.2 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีไอ

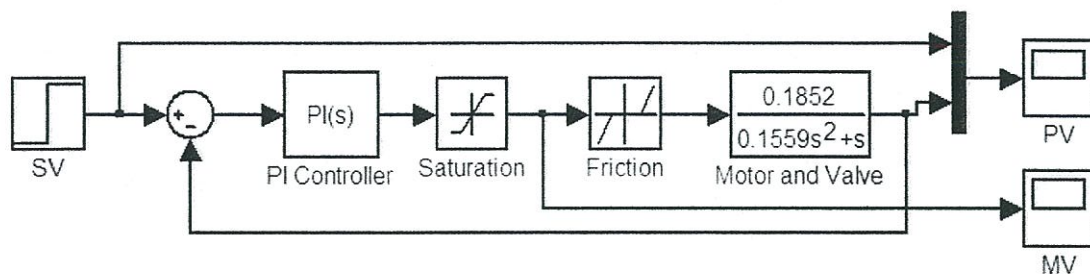
การจำลองระบบควบคุมตำแหน่งเปิด-ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอแบ่งบล็อกไดอะแกรมออกเป็น 3 กรณี กรณีที่หนึ่งเป็นการจำลองระบบควบคุมโดยไม่คำนึงการอิมิตัวของสัญญาณ กรณีที่สองเป็นการจำลองระบบควบคุมโดยคำนึงการอิมิตัวของสัญญาณ และกรณีที่สามเป็นการจำลองระบบควบคุมโดยคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมและคำนึงถึงแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง แสดงดังรูปที่ ก.4, ก.5 และ ก.6 ตามลำดับ



รูปที่ ก.4 บล็อกไดอะแกรมการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง
ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอโดยไม่คำนึงการอิมิตัวของสัญญาณ



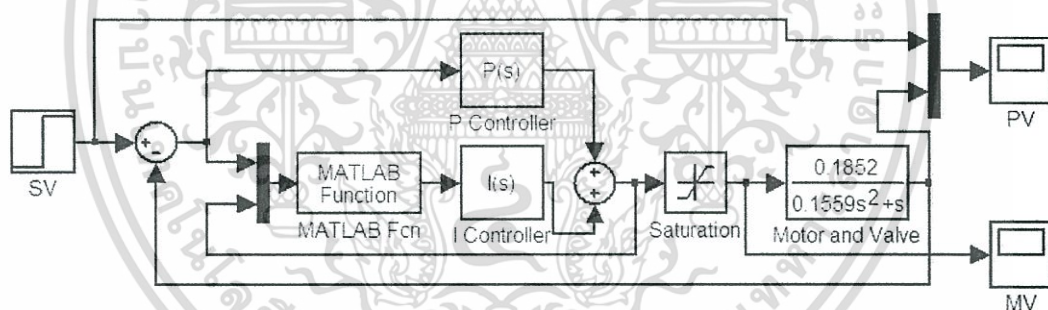
รูปที่ ก.5 บล็อกไดอะแกรมการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง
ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอโดยคำนึงการอิมิตัวของสัญญาณ



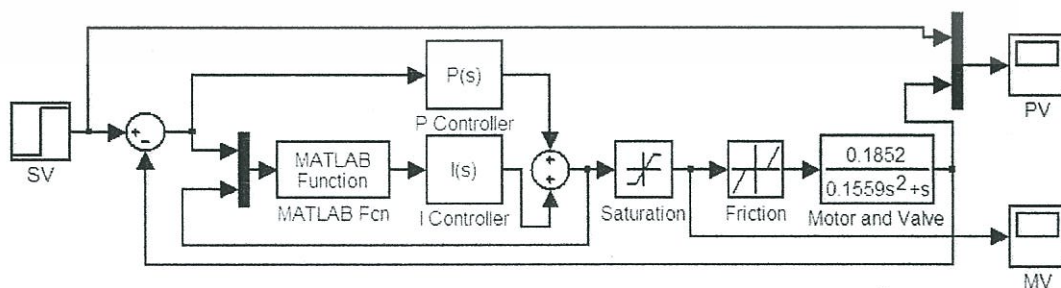
รูปที่ ก.6 บล็อกไดอะแกรมการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง
ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอโดยคำนึงถึงการอิมตัวของสัญญาณควบคุม
และคำนึงถึงแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

ก. 1.3 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีไอร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวบ์

การจำลองระบบควบคุมตำแหน่งเปิด-ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวบ์แบ่งบล็อกไดอะแกรมออกเป็น 2 กรณี กรณีที่หนึ่งเป็นการจำลองระบบควบคุมโดยคำนึงการอิมตัวของสัญญาณ และกรณีที่สองเป็นการจำลองระบบควบคุมโดยคำนึงถึงการอิมตัวของสัญญาณควบคุมและคำนึงถึงแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง แสดงดังรูปที่ ก.7 และ ก.8 ตามลำดับ



รูปที่ ก.7 บล็อกไดอะแกรมการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง
ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวบ์โดยคำนึงการอิมตัวของสัญญาณ

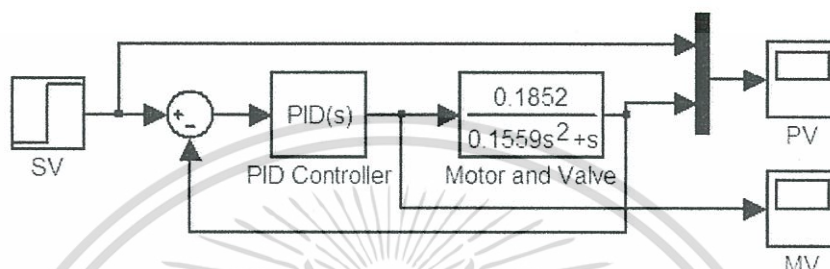


รูปที่ ก.8 บล็อกไดอะแกรมการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง
ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไวบ์โดยคำนึงถึงการอิมตัว
ของสัญญาณควบคุมและคำนึงถึงแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

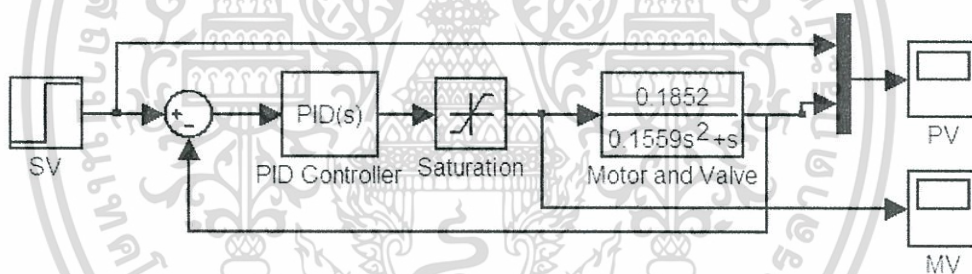
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. 1.4 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีไอดี

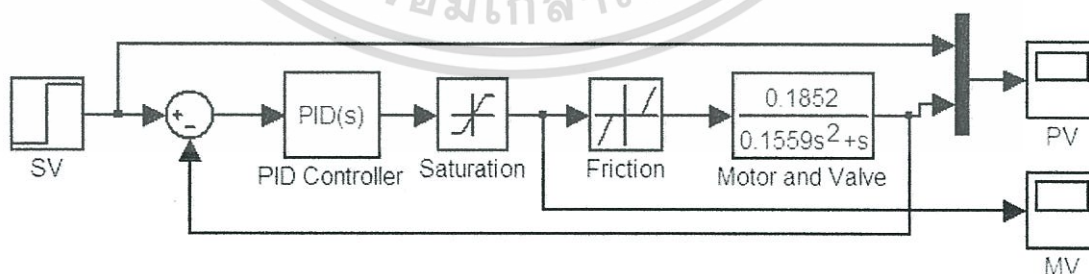
การจำลองระบบควบคุมตำแหน่งเปิด-ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีแบ่งบล็อกไดอะแกรมออกเป็น 3 กรณี กรณีที่หนึ่งเป็นการจำลองระบบควบคุมโดยไม่คำนึงการอิมิตัวของสัญญาณ กรณีที่สองเป็นการจำลองระบบควบคุมโดยคำนึงการอิมิตัวของสัญญาณ และกรณีที่สามเป็นการจำลองระบบควบคุมโดยคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมและคำนึงถึงแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง แสดงดังรูปที่ ก.9, ก.10 และ ก.11 ตามลำดับ



รูปที่ ก.9 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบพีไอดีของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง โดยไม่คำนึงการอิมิตัวของสัญญาณ

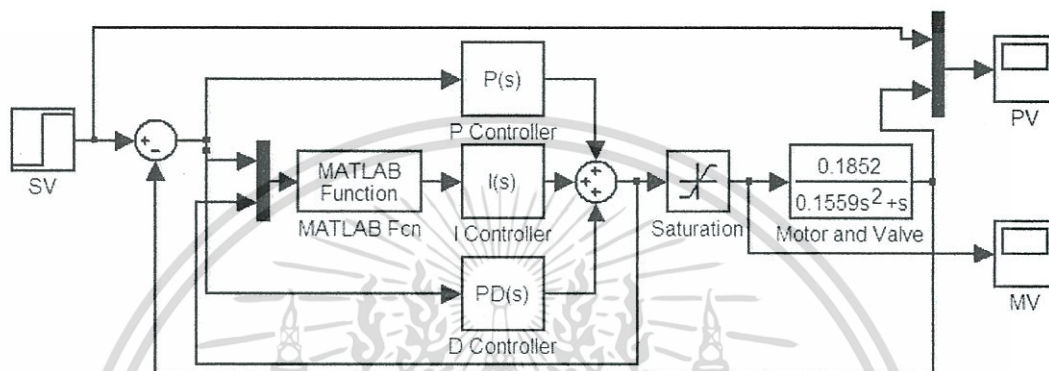


รูปที่ ก.10 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบพีไอดีของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง โดยคำนึงการอิมิตัวของสัญญาณ

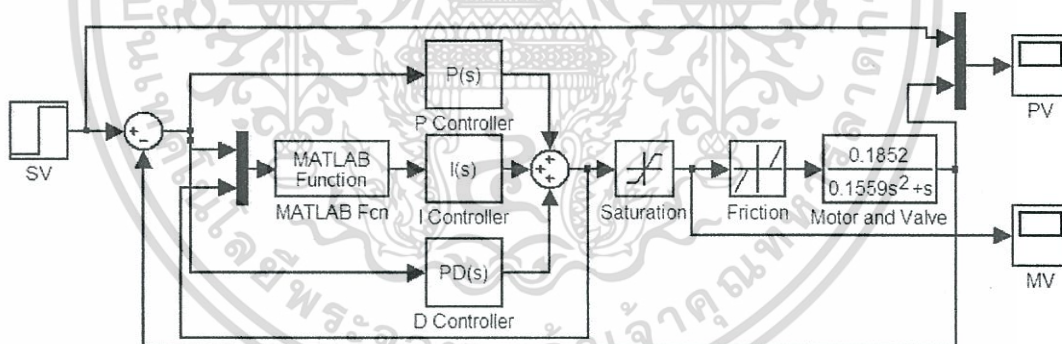


รูปที่ ก.11 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบพีไอดีของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงโดยคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมและคำนึงถึงแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

ก. 1.5 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีไอดีร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไววอร์น็อพ การจำลองระบบควบคุมตำแหน่งเปิด-ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไววอร์น็อพแบ่งบล็อกไดอะแกรมออกเป็น 2 กรณี กรณีที่หนึ่งเป็นการจำลองระบบควบคุมโดยคำนึงการอิมิตัวของสัญญาณ และกรณีที่สองเป็นการจำลองระบบควบคุมโดยคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมและคำนึงถึงแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง แสดงดังรูปที่ ก.12 และ ก.13 ตามลำดับ



รูปที่ ก.12 บล็อกไดอะแกรมการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไววอร์น็อพโดยคำนึงการอิมิตัวของสัญญาณ



รูปที่ ก.13 บล็อกไดอะแกรมการจำลองควบคุมตำแหน่งเปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไววอร์น็อพโดยคำนึงถึงการอิมิตัวของสัญญาณควบคุมและคำนึงถึงแรงเสียดทานสถิตย์ของชุดควบคุมวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง

จากบล็อกไดอะแกรมของพีไอดีร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไววอร์น็อพ และพีไอดีร่วมกับอินทิเกรเตอร์แอนไทไววอร์น็อพดังรูปที่ ก. 7, 8, 12 และ 13 ได้อาศัยฟังก์ชันที่โปรแกรมขึ้นเองในบล็อก MATLAB Function เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวอินทิเกรเตอร์แอนไทไววอร์น็อพโดยมีโปรแกรมดังนี้

```

function y=myf(e,u,b)
y=e;
if (u>=b)&(e>0)
    y=0;
elseif (u<=-b)&(e<0)
    y=0;
end;

```

ก.2 โปรแกรมควบคุมการสตาร์ทเครื่องยนต์กักหน้ก๊าซขนาดเล็ก และควบคุมความเร็วรอบกักหน้ก๊าซ(โปรแกรมภาษาซี)

```

#include<p30f4011.h>
#include<stdio.h>
#include<uart.h>
#include<incap.h>
#include<pwm.h>
#include<timer.h>
#include<ports.h>
#define PERIOD 0x3E7F // Define period (frequency 1 kHz @ osc 4M * 16)
#define Ts 0.6 // Define Sampling Time Constant for using in Numerical
// Method for finding the Integral and Differential
#define Kp1 0.0001 // Define Proportional Gain for control Speed
#define Ki1 0.0000075 // Define Integral Gain for control Speed
#define Kd1 0.0001 // Define Derivative Gain for control Speed
#define Kp2 24.091438 // Define Proportional Gain for control Valve
#define Ki2 0.40019 // Define Integral Gain for control Valve
#define sw1 PORTEbits.RE0 // Define Switch1 start Engine
#define sw2 PORTEbits.RE3 // Define Switch2 check flame
#define sw3 PORTEbits.RE4 // Define Switch3 off Buzzer
#define sw4 PORTEbits.RE5 // Define Switch4 stop Engine
//-----Configuration bits -----//
_FOSC(CSW_FSCM_OFF & XT_PLL16);
_FWDT(WDT_OFF);

```

```

_FBORPOR(PBOR_OFF & BORV_20 & PWRT_64 & MCLR_EN);
_FGS(CODE_PROT_OFF);
//-----//
int M2=0,M1=1,S0=1,S1=0,S2=0,S3=0,S4=0,S5=0,S6=0;
int n1,b,i1,i2,AM1=2,AM2=2,MM1=2,MM2=2,imm=0,e1=0,e2=0,jj=0;
int buzzer=1,ww=0,w=0,run=0,cs=0;
float distance2,error2, MV1,MV2,AV1,AV1r,errorRPM,error1,RPM,RPM1,RPM2;
float pulse2,pulse3,valve,errorM,Eol2,errorI2,Eo2,rpmsend;
float P1,P2,I1,I2,MV2r,MV1x,MV2x,D1,D2,SPM,SPM1,n,AV1x,speed,speedOld;
char a[30],c[12],i=0,j=0,SW=0,dat[12],SW5=0,jM=0,iM=0,SWM=0;
void init_incap()
{
//-----Config InputCapture 1-----//
    ConfigIntCapture1(IC_INT_PRIOR_2 & IC_INT_ON); // Enable IC1 interrupt
    OpenCapture1(IC_IDLE_STOP & // Capture disable in idle mode
    IC_TIMER3_SRC & // Timer 3 count for IC1
    IC_INT_1CAPTURE & // Capture per 1 count for interrupt
    IC_EVERY_RISE_EDGE);
//-----Config InputCapture 2-----//
    ConfigIntCapture2(IC_INT_PRIOR_2 & IC_INT_ON); // Enable IC2 interrupt
    OpenCapture2(IC_IDLE_STOP & // Capture disable in idle mode
    IC_TIMER3_SRC & // Timer 3 count for IC2
    IC_INT_1CAPTURE & // Capture per 1 count for interrupt
    IC_EVERY_FALL_EDGE);
}
//-----Interrupt service routine Capture -----//
void _ISR_IC1Interrupt(void)
{
    IFS0bits.IC1IF = 0; // Clear IC1 interrupt flag
    if(PORTDbits.RD0 == 1 && PORTEbits.RE8 == 1) // Count pulse of Valve
        pulse_va--;
    else if(PORTDbits.RD0 == 1 && PORTEbits.RE8 == 0)
        pulse_va++;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

else if(PORTDbits.RD0 == 0 && PORTEbits.RE8 == 1)
    pulse_va++;
else if(PORTDbits.RD0 == 0 && PORTEbits.RE8 == 0)
    pulse_va--;
}
void _ISR_IC2Interrupt(void)
{
    IFS0bits.IC2IF = 0;    // Clear IC2 interrupt f
    if(PORTEbits.RE2)      // Count pulse of Turbine
        pulse_1--;
    else
        pulse_1++;
}
//----- Interrupt service routine for timer1 -----//
void _ISR_T1Interrupt(void)
{
    IFS0bits.T1IF = 0;    // Clear Timer interrupt flag
    w=1;
    //----- On and off buzzer -----//
    if(buzzer==1)
    {
        if(Eo1<=1000&&Eo1>-1000)
        {
            if(cs>=1500)
            {
                LATBbits.LATB6=1; //on lamp of buzzer
            }
        }
    }
    if(!sw3)
    {
        LATBbits.LATB6=0; //off lamp of buzzer
        LATBbits.LATB1 = 1;    //stop blower

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Delay_MS(500);
LATBbits.LATB1 = 0; //stop blower
buzzer=0;
}
//-----//
i1=i1+1; // Counter for sampling time of Control Valve and Control RPM
LATBbits.LATB7 =~LATBbits.LATB7; / /Check Sampling time of timer1
//-----Calculation and Controller for Speed Tuebine-----//
if(i1>=30)
{
pulse1 = pulse_1; // Convert the integer to float
speed=pulse1*50; //Convert pulse to RPM for 2 pluse with 600 ms
rpmsend=RPM/10000;
if(run==1)
{
errorRPM = RPM-speed; //Calculation of Error for RPM
//-----PID-Controller-----//
P1= Kp1*errorRPM;
I1 = I1 + (0.5*Ki1*Ts*(errorRPM+Eo1));
D1 = (Kd1/Ts)*(errorRPM-Eo1);
MV1 = P1+I1+D1;
//-----I-PD Controller-----//
P1= Kp1*speed;
I1 = I1 + (0.5*Ki1*Ts*(errorRPM+Eo1));
D1 = (Kd1/Ts)*(speed-speedOld);
MV1 = I1-(P1+D1);
//-----Conditions for Speed Turbine Control Signal-----//
if(MV1>0)
{
MV1x = MV1;
if(MV1x>30)
{
MV1x = 30;
}
}
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    }
}
else if(MV1<0)
{
    MV1x = 0;
}
if(MV1==0)
{
    MV1x = 0;
}
Eo1 = errorRPM;
speedOld = speed;
}
pulse_1=0;
i1=0; //reset for Counter of Control RPM
}
//-----stop engine-----//
if(sw4==1||sw2==0)//switch stop engine
{
    MV1x=0;
    LATFbits.LATF4 = 0; //Close Solinoid valve
    LATDbits.LATD3 = 0; //off Lmap of status Flame occur
    LATBbits.LATB5 = 0; //off Lmap of status Auto control speed
    if(ww==0)
    {
        LATBbits.LATB0 = 1; //start blower
        Delay_MS(500);
        LATBbits.LATB0 = 0; //start blower
        ww=1;
    }
}
}
//-----//

```

```
if(run==1)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{
//-----Calculation and Controller for Valve-----//
pulse_valve = pulse_va; // Convert the integer to float
distance2 = pulse_valve/357.55; //Convert the pulse to distance of valve
error2 = MV1x-distance2;
errorl2 = error2;

//-----antiwindup-----//
if(MV2>=100&&errorl2>0)
{
errorl2=0;
}
else if(MV2<=-100&&errorl2<0)
{
errorl2=0;
}
I2 = I2 + (0.5*Ki2*Ts2*(errorl2+Eol2));
//-----//
P2 = Kp2*error2;
MV2 = P2+I2;
//-----Conditions for Valve Control Signal-----//
if(MV2>100)
{
MV2 = 100;
}
else if(MV2<-100)
{
MV2 = -100;
}
if(MV2>0)
{
MV2x = MV2;
if(MV2x>100)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        MV2x = 100;
    }
    MV2r = MV2x;
    forward1(MV2r);
}
else if(MV2<0)
{
    MV2x = MV2;
    if(MV2x<-100)
    {
        MV2x = -100;
    }
    MV2r = MV2x*(-1);
    backward1(MV2r);
}
else if(MV2==0)
{
    MV2x = 5;
    MV2r = MV2x;
    stop1(MV2r);
}
Eo2 = error2;
Eol2= errorl2 ;
}

printf(a,"a%.2f\tb%.2f\tc%.2f\td%.2f\te%.1f\t ",speed,MV1x,distance2,MV2x,rpmSend);
uart1_puts(a);
}

//----- Function for Timer1 Configuration -----//
void timer1_init(void)
{
    unsigned long match_value;
    ConfigIntTimer1(T1_INT_PRIOR_1 & // Timer1 interrupt priority 2
    T1_INT_ON); // Enable interrupt for timer1
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

WriteTimer1(0);      // Clear count value at TMR1 register
match_value = 1250;  // 1250 for 20 ms and 935 Load value Interval 15 ms
                    // @PLL16x (629 SAMPLING TIME)
OpenTimer1(T1_ON &   // Start timer1
T1_GATE_OFF &      // Disable gate pin for timer1
T1_IDLE_STOP &     // Stop timer in idle mode
T1_PS_1_256 &      // Prescaler 1:1
T1_SYNC_EXT_OFF &  // Disable sync external source
T1_SOURCE_INT, match_value); // Wait till the timer matches with the period
}
//----- Function Configuration for UART1-----//
void uart1_init()
{
    unsigned int baudvalue1;
    unsigned int U1MODEvalue;
    unsigned int U1STAvalue;
    CloseUART1();
    ConfigIntUART1(UART_RX_INT_EN &
UART_RX_INT_PR3 &
UART_TX_INT_DIS);
    baudvalue1 = 25;    // Baudrate 38400 @PLL4
    U1MODEvalue = UART_EN &
UART_IDLE_CON &
UART_ALTRX_ALTTX &
UART_DIS_WAKE &
UART_DIS_LOOPBACK &
UART_DIS_ABAUD &
UART_NO_PAR_8BIT &
UART_1STOPBIT ;
    U1STAvalue = UART_INT_TX_BUF_EMPTY &
UART_TX_PIN_NORMAL &
UART_TX_ENABLE &
UART_INT_RX_3_4_FUL &

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

UART_ADR_DETECT_DIS &
UART_RX_OVERRUN_CLEAR ;
OpenUART1(U1MODEvalue, U1STAValue, baudvalue1);
}
//-----Function Send UART-----//
void uart1_puts(char string[])
{
    putsUART1 ((unsigned int *)string);
    while (BusyUART1());
}
//-----Interrupt Service Routine for UART1-----//
void _ISR_U1RXInterrupt(void)
{
    IFS0bits.U1RXIF = 0;
    SW = 0;
    ConfigIntTimer1(T1_INT_PRIOR_1 & // Disable Timer1 interrupt
    T1_INT_OFF);
}
void pwm_init()
{
    unsigned int sptime; // Holds the value to be loaded into special event
    unsigned int config1; // Holds PWM configuration value
    unsigned int config2; // Holds the value be loaded into PWMCON1 register
    unsigned int config3; // Holds the value to configure the special event
                        //trigger postscale and dutycycle
//----- Configuration for bit control DC motor direction
    TRISBbits.TRISB2 = 0;
    sptime = 0x0;
    (PWM_EN & // Enable PWM module
    PWM_OP_SCALE1 & // Output post scaler select 1:1
    PWM_IPCLK_SCALE1 & // Input prescaler select 1:1
    PWM_MOD_FREE); // PWM free running mode
    config2 = (PWM_MOD1_IND & // Independent mode in PWM module 1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

PWM_MOD2_IND &          // Independent mode in PWM module 2
PWM_MOD3_IND &          // Independent mode in PWM module 3
PWM_PEN1H &             // H of channel 1 works as PWM
PWM_PDIS2H &           // H of channel 2 works as PWM
PWM_PDIS3H &           // H of channel 3 works as PWM
PWM_PDIS1L &           // L of channel 1 works as I/O
PWM_PDiS2L &           // L of channel 2 works as I/O
PWM_PDIS3L);           // L of channel 3 works as I/O
config3 = (PWM_SEVOPS1 & // Special event post scaler 1:1
PWM_OSYNC_PWM &        // Override synchronized with PWM clock
PWM_UEN);              // Update of PDCs and PTPER enabled
OpenMCPWM(PERIOD,sptime,config1,config2,config3); // Setup PWM module
}
//-----Function drive DC motor forward-----//
void forward1(float pow) // Motor1 forward
{
float dutycycle,updatedisable;
dutycycle = pow*(PERIOD/50); // or 100-(pow*(PERIOD/100))
updatedisable = 0; //Disable update
LATBbits.LATB2 = 1;
SetDCMCPWM(1,dutycycle,updatedisable);
}
//-----Function drive DC motor backward-----//
void backward1(float pow) // Motor1 backward
{
float dutycycle,updatedisable;
dutycycle = pow*(PERIOD/50); // or 100-(pow*(PERIOD/100))
updatedisable = 0; //Disable update
LATBbits.LATB2 = 0;
SetDCMCPWM(1,dutycycle,updatedisable);
}
void stop1(float pow) // Motor2 stop

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

float dutycycle,updatedisable;
dutycycle = (pow*(PERIOD/50))/10000;
updatedisable = 0;          //Disable update
LATBbits.LATB2 = 0;
SetDCMCPWM(1,dutycycle,updatedisable);
}
void Delay_MS(unsigned int ms)
{
    unsigned int i;
    for (; ms>0; ms--)
    for (i=0; i<2654; i++)
        Nop();          // delay 1 mch cycle
}
main()
{
    uart1_init();      //Config Uart1
    pwm_init();        //Config PWM
    TRISEbits.TRISE0 = 1; //Switch1 start Enige
    TRISEbits.TRISE3 = 1; //Switch2 chechk Flame
    TRISEbits.TRISE4 = 1; //Switch3 off lamp of buzzer
    TRISEbits.TRISE5 = 1; //Switch4 stop engine
    TRISBbits.TRISB0 = 0; //start blower
    TRISBbits.TRISB1 = 0; //stop blower
    TRISBbits.TRISB3 = 0; //Lmap of status start
    TRISBbits.TRISB4 = 0; //Igniter
    TRISBbits.TRISB5 = 0; //Lmap of status Auto control speed
    TRISBbits.TRISB6 = 0; //lamp of buzzer
    TRISBbits.TRISB7 = 0; //Chek Slamping time
    TRISDbits.TRISD0 = 1; //Input port of Incap1 (Motor Valve)
    TRISEbits.TRISE8 = 1; //Pulse of Valve
    TRISEbits.TRISE2 = 1; //Pulse of Turbine
    TRISDbits.TRISD1 = 1; //Input port of Incap2 (Turbine)
    TRISDbits.TRISD3 = 0; //Lmap of status Flame occur

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

TRISFbits.TRISF4 = 0; //Open Solinoid valve
//-----Start Mode-----//
while(S0)
{
    while(M1)
    {
        if(!sw1)          //wait switch start
        {
            if(sw4==0)    //Switch4 stop engine
            {
                S1=1;
                M1=0;
                M2=0;
            }
        }
    }
    while(M2)
    {
        LATBbits.LATB1 = 1; //stop blower
        Delay_MS(500);
        LATBbits.LATB1 = 0; //stop blower
        LATBbits.LATB3 = 0; //off Lmap of status start
        LATFbits.LATF4 = 0; //close Solinoid valve
        LATBbits.LATB4 = 0; //Off igniter
        LATDbits.LATD3 = 0; //off Lmap of status Flame occur
        LATBbits.LATB5 = 0; //off Lmap of status Auto control speed
        M1=1;
        M2=0;
    }
    while(S1)
    {
        LATBbits.LATB3 = 1; //On Lmap of status start
        LATBbits.LATB0 = 1; //start blower

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Delay_MS(500);
LATBbits.LATB0 = 0; //start blower
Delay_MS(5000);
LATBbits.LATB1 = 1; //stop blower
Delay_MS(500);
LATBbits.LATB1 = 0; //stop blower
S1=0;
S2=1;
if(sw4==1) //Switch4 stop engine
{
    S1=0;
    S2=0;
    S3=0;
    S4=0;
    S5=0;
    M1=0;
    M2=1;
}
}
while(S2)
{
    LATBbits.LATB4 = 1; //On igniter
    Delay_MS(2000);
    LATFbits.LATF4 = 1; //Open Solinoid valve
    Delay_MS(5000);
    LATBbits.LATB4 = 0; //Off igniter
    Delay_MS(5000);
    S2=0;
    S3=1;
    S4=1;
    if(sw2==1) //Flame occurs
    {
        LATDbits.LATD3 = 1; //on Lmap of status Flame occur

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

LATBbits.LATB3 = 0; //off Lmap of status start
LATBbits.LATB5 = 1; //on Lmap of status Auto control speed
LATBbits.LATB0 = 1; //start blower
elay_MS(500);
LATBbits.LATB0 = 0; //start blower
S1=0;
S2=0;
S3=0;
S4=0;
S5=0;
M1=0;
M2=0;
S5=1;
}
if(sw4==1) //Switch4 stop engine
{
S1=0;
S2=0;
S3=0;
S4=0;
S5=0;
M1=0;
M2=1;
}
}

while(S4)
{
LATFbits.LATF4 = 0; //close Solinoid valve
LATBbits.LATB0 = 1; //start blower
Delay_MS(500);
LATBbits.LATB0 = 0; //start blower
Delay_MS(5000);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

LATBbits.LATB1 = 1;    //stop blower
Delay_MS(500);
LATBbits.LATB1 = 0;    //stop blower
Delay_MS(5000);
S4=0;
S2=1;
if(sw4==1)              //Switch4 stop engine
{
    S1=0;
    S2=0;
    S3=0;
    S4=0;
    S5=0;
    M1=0;
    M2=1;
}
while(S5)
{
    Delay_MS(3000);
    init_incap();    //Config Incap
    RPM=30000;
    run=1;
    S6=1;
    S0=0;
    S1=0;
    S2=0;
    S3=0;
    S5=0;
    M1=0;
    M2=0;
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

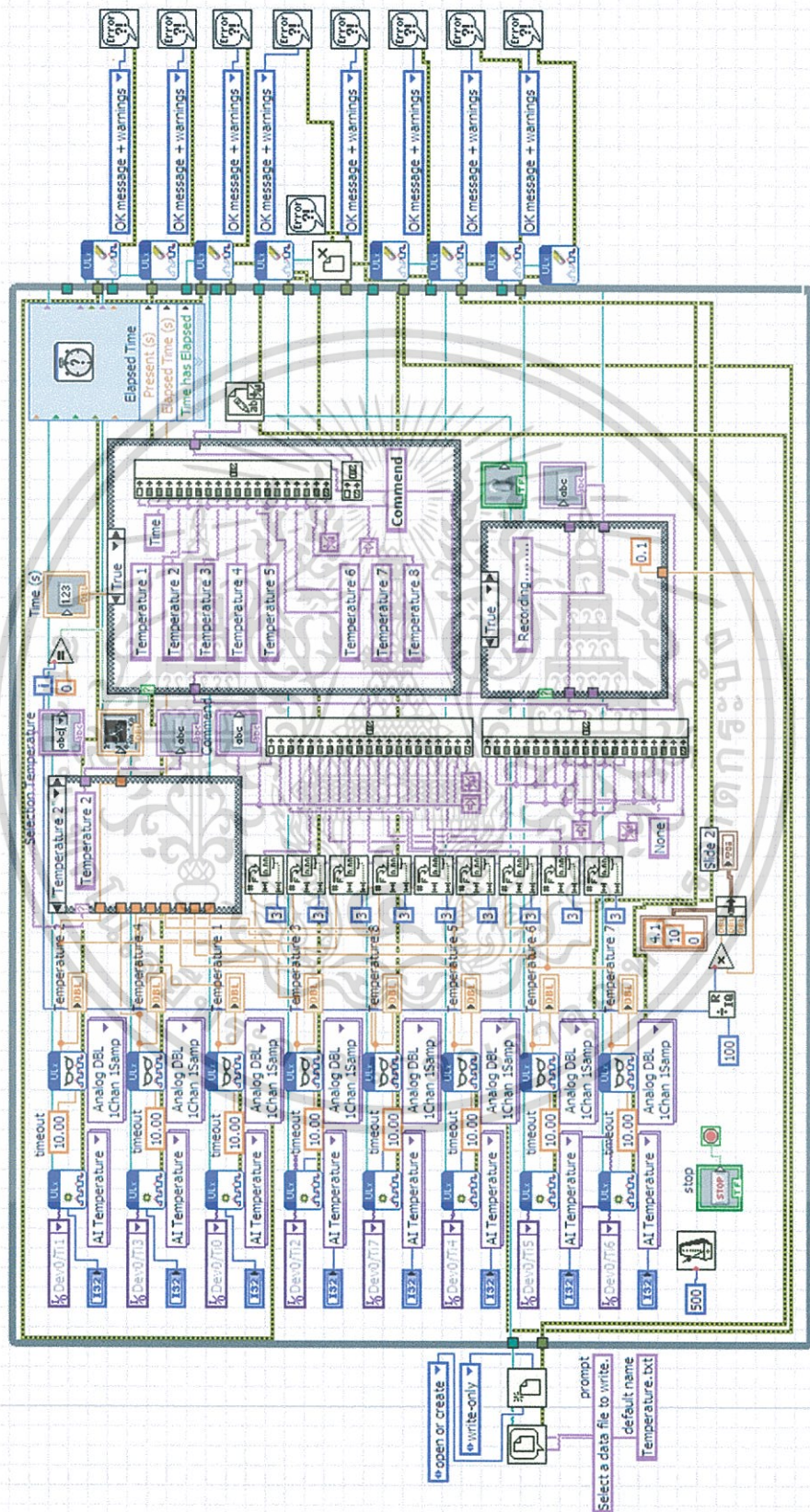
```

//-----Control Gasturbine By Auto Mode-----//
while(S6)
{
    RPM=25000; run=1;
    if(w==1)
    {
        while(i<=2)        // Waiting for the setpoint ( 3 character )
        {
            if(DataRdyUART1())
            {
                dat[i] = ReadUART1();
                j=1; i++;
            }
        }
        if(j==1)
        {
            j=0; i=0;
            RPM = (dat[0]-48)*100 + (dat[1]-48)*10+ (dat[2]-48
            RPM = RPM*100;
        }
        SW=1;        // Switch on for Starting Motor
        timer1_init(); // Start the Sampling Time of Operation when it has
        while(SW)    // We will change the setpoint from UART1 Interrupt
        {
            if(DataRdyUART1())
                ReadUART1;
        }
    }
}
}

```

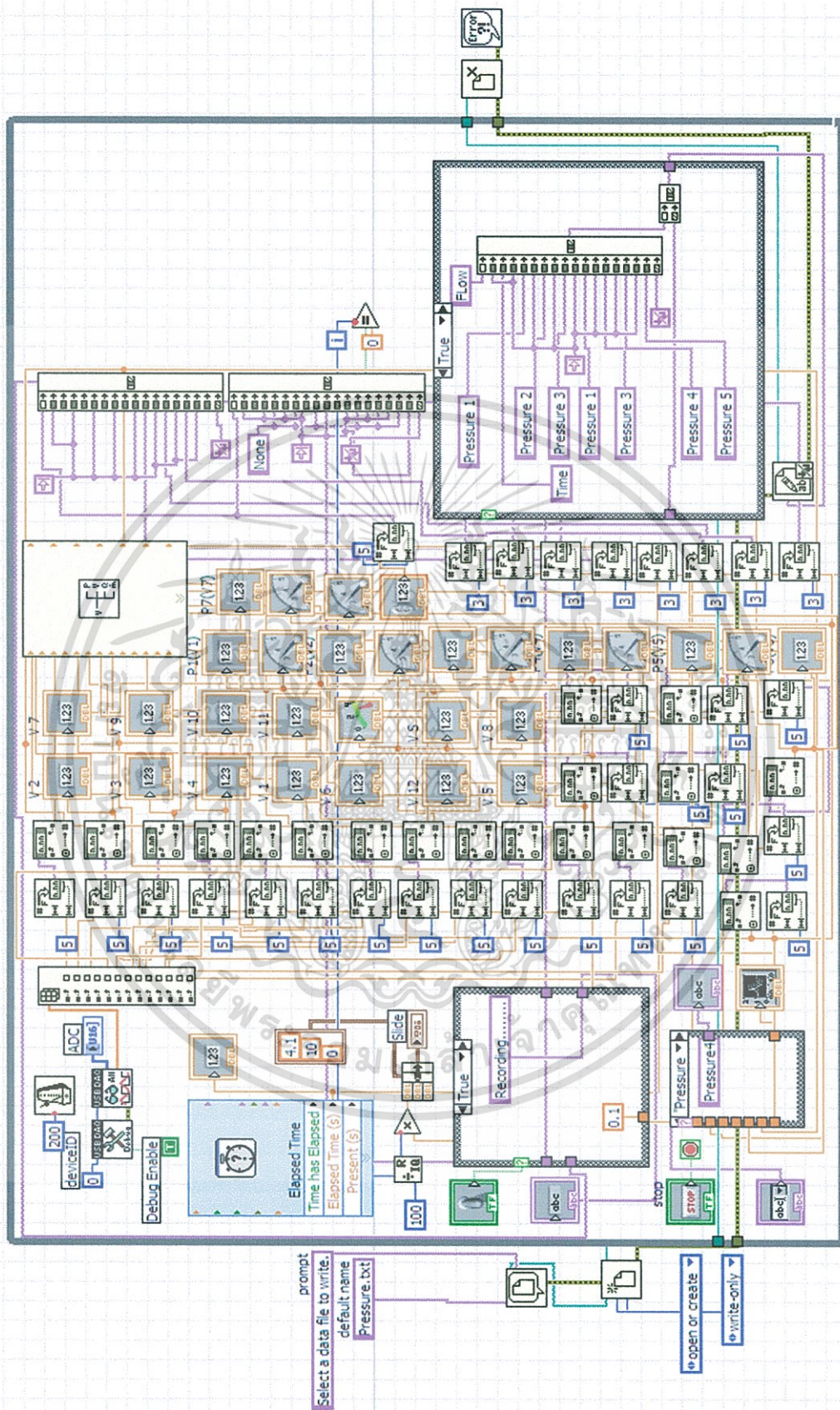
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.3 บล็อกไดอะแกรมของโปรแกรม Labview



รูปที่ ก.14 บล็อกไดอะแกรมของโปรแกรม Labview สำหรับหน้าต่างแสดงและบันทึกอุณหภูมิ

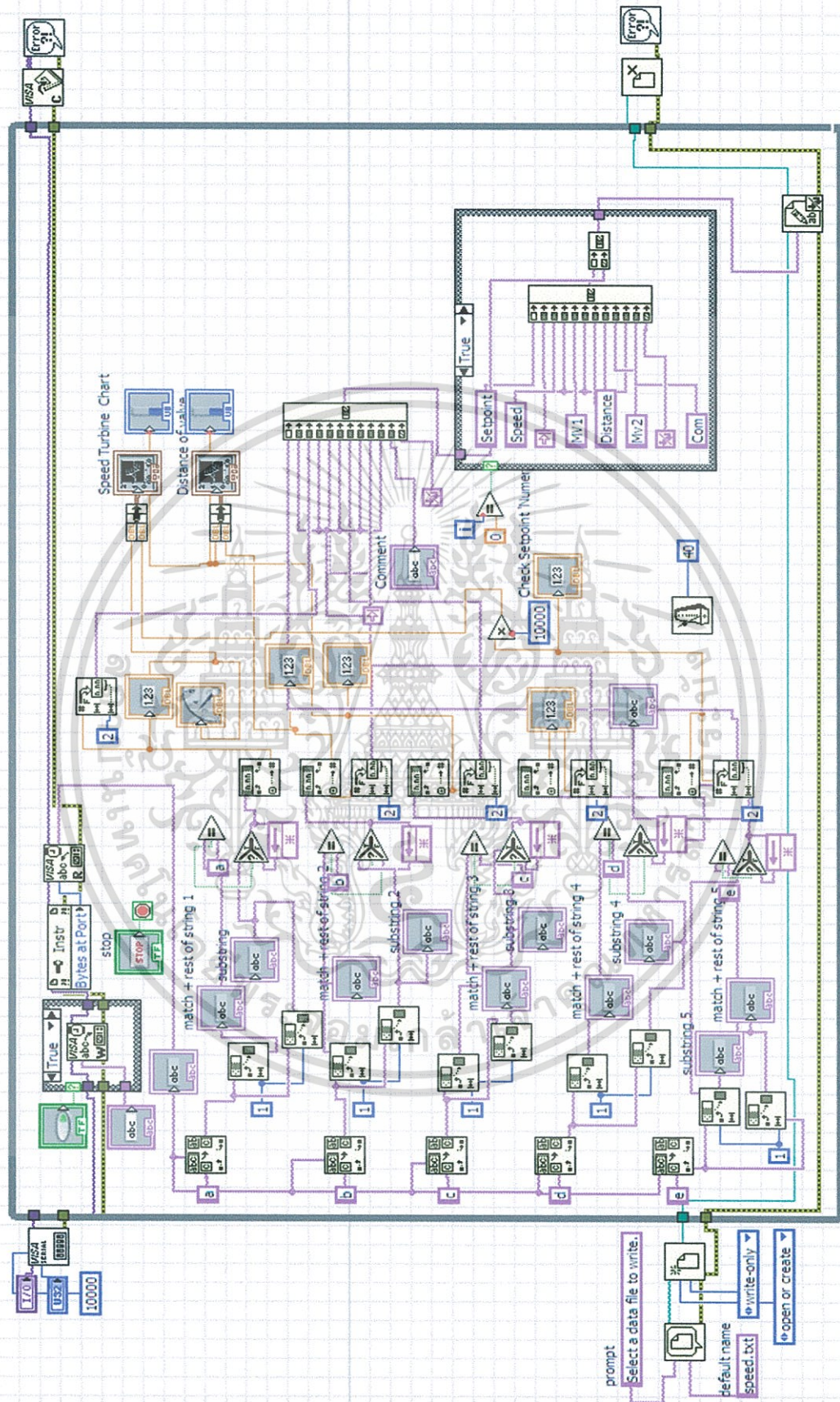
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.15 บล็อกไดอะแกรมของโปรแกรม Labview สำหรับหน้าต่างแสดงและบันทึกความดัน

อัตราการไหล และอัตราการไหลเชิงมวล

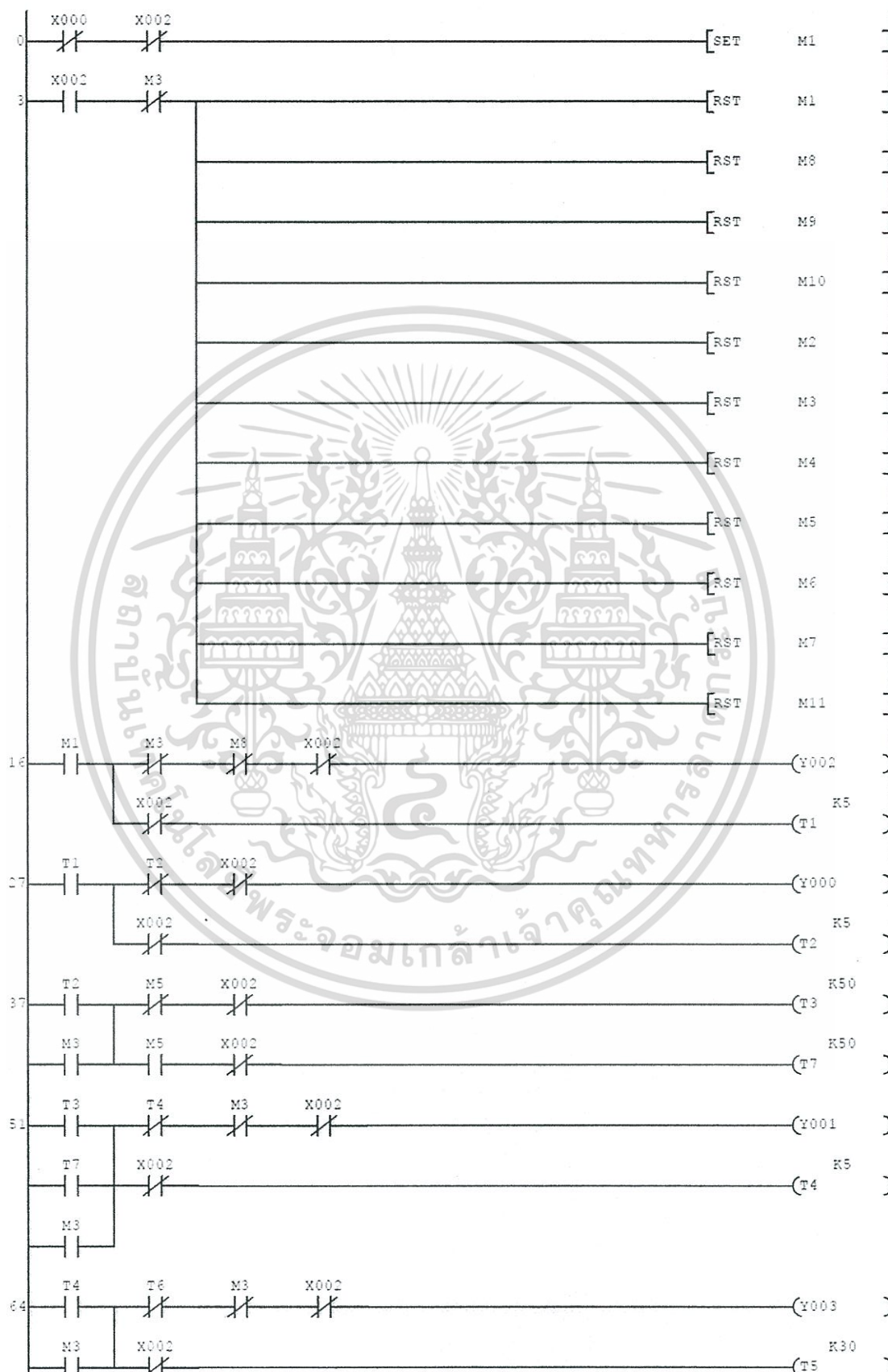
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



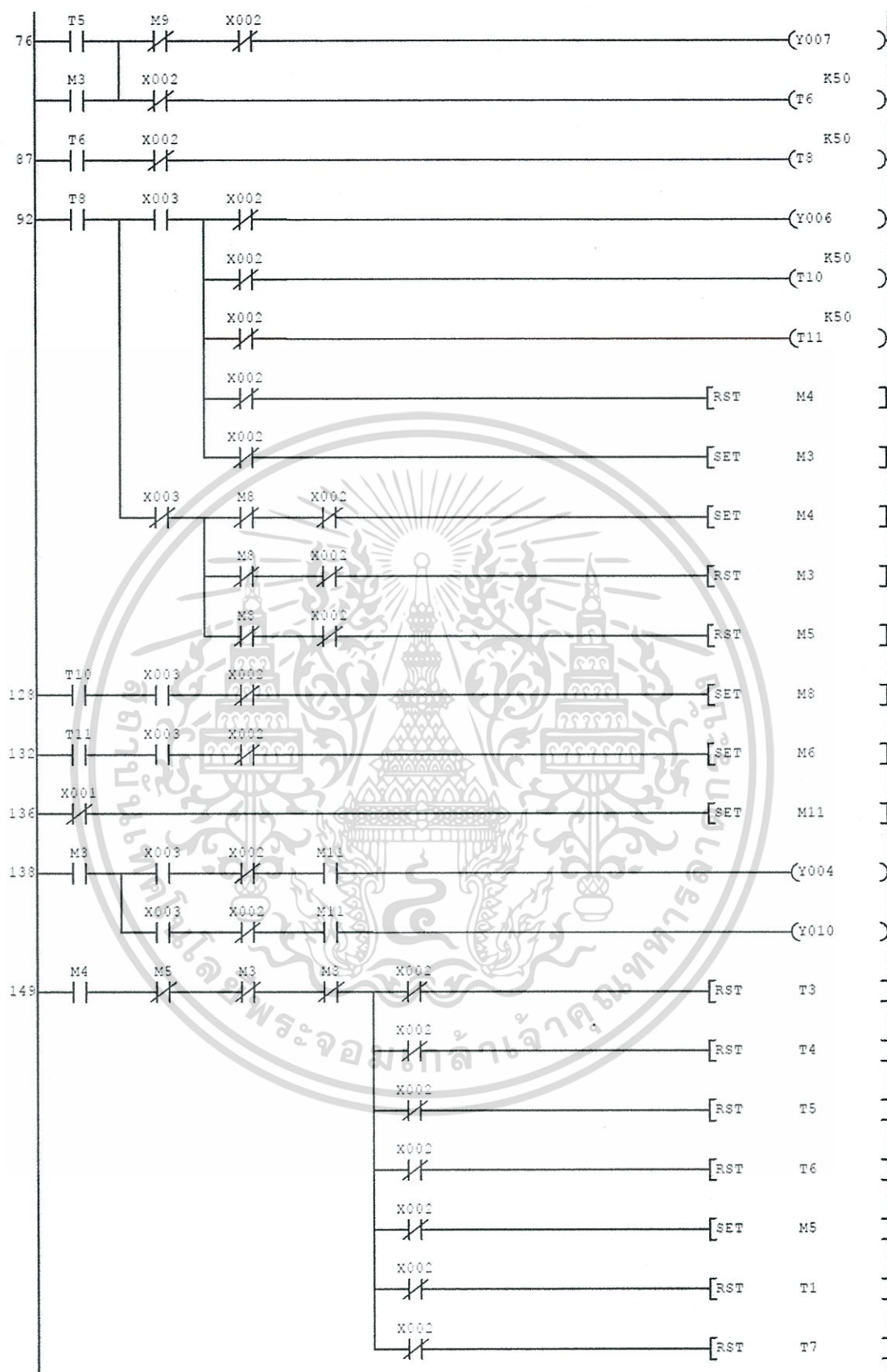
รูปที่ ก.16 บล็อกโตอะแกรมของโปรแกรม Labview สำหรับหน้าต่างรับค่าอ้างอิง แสดงผลและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารบันทึกผล ความสำเร็จรอบกั้นกันก๊าซและตำแหน่งเปิด-ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิง โยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรรมใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.4 แลตเตอร์ไดอะแกรมพีแอลซีสำหรับการสตาร์ทเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8
The 8th Conference on Energy Network of Thailand; E-NETT 8



ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พลังงานและนวัตกรรมสีเขียวเพื่ออนาคตอาเซียน
Green Energy and Innovations for ASEAN's Future



วันที่ 2-4 พฤษภาคม 2555 โรงแรมตักสิลา จังหวัดมหาสารคาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การออกแบบระบบควบคุมแบบป้อนกลับของเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก Feedback Control System Design of Micro Gas Turbine Engine

ไพศาล ปานดำ¹, จารุวัตร เจริญสุข^{1*} และ ถาวร เบญจนาสาธุศรี²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

² สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

* ติดต่อ: โทรศัพท์: 023 264 197, โทรสาร: 023 264 198 E-mail: kciaruw@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างระบบควบคุมความเร็วรอบกังหันของเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กเพื่อรักษาความเร็วรอบกังหันให้คงที่ โดยอาศัยการควบคุม 2 ลูป ได้แก่ การควบคุมลูปใน และลูปนอก ซึ่งการควบคุมลูปในมีหน้าที่ควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วจ่ายเชื้อเพลิงโดยใช้ดีซีมอเตอร์และเอ็นโคเดอร์เป็นอุปกรณ์ขับเคลื่อน วัดตำแหน่งตามลำดับ และการควบคุมลูปนอกมีหน้าที่ควบคุมความเร็วรอบกังหันโดยใช้โฟโตเซนเซอร์เป็นอุปกรณ์วัดความเร็วรอบ นอกจากนี้ยังติดตั้งอุปกรณ์วัดความดัน อุณหภูมิ และอัตราการไหล เพื่อแสดงผลอีกด้วย ซึ่งการควบคุมทั้งหมดถูกพัฒนาในไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC ร่วมกับโปรแกรม LabView ซึ่งเป็นส่วนเชื่อมต่อกับผู้ใช้งาน ด้านทฤษฎีระบบควบคุม อาศัยตัวควบคุมตระกูล PID โดยทดลองปรับเปลี่ยนอัตราขยายเพื่อศึกษาพฤติกรรมตอบสนอง จากผลการทดลองพบว่าระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมความเร็วรอบกังหันได้ โดยอาศัยตัวควบคุมแบบ PI มีค่า $K_p = 0.005$ และ $K_I = 0.00001$ โดยสามารถรักษาความเร็วรอบกังหันที่ 9000 รอบ/นาที และสามารถตอบสนองต่อสิ่งรบกวนของระบบได้

คำหลัก: เครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก, ระบบควบคุมป้อนกลับ, ตัวควบคุมแบบ PID

Abstract

In this paper, the design and implementation of turbine speed control system for micro gas turbine engine to regulate the turbine speed are presented. The control scheme employs two feedback control loops which are inner control loop and outer control loop. The inner control loop is to control the fuel valve by using DC motor and encoder as actuator and valve position sensor respectively. The outer control loop controls the turbine speed which is measured by a photo sensor. Besides, pressure, temperature and flow rate sensors are installed for monitoring purpose. The control system is developed in dsPIC microcontroller with LabView for the user interface. PID-type controllers are chosen for both loops and their parameters are adjusted to investigate the responses. From the experimental results, the developed control system works properly and the turbine speed can be regulated over system disturbances at specified speed of 9000 rpm using PI controller with $K_p = 0.005$ and $K_I = 0.00001$

Keywords: Micro gas turbine engine, Feedback control system, PID controller



1. บทนำ

ในปัจจุบันเครื่องยนต์กึ่งทันก๊าซถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายโดยเฉพาะในงานด้านอากาศยาน และการประยุกต์ใช้งานเป็นต้นกำลังสำหรับขับอุปกรณ์อื่น จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมความเร็วรอบกึ่งทันเพื่อให้ได้กำลังที่ต้องการ ดังที่มีผู้วิจัยให้ความสนใจในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบ และใช้เพื่อการออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบกึ่งทัน ซึ่งเป็นแนวทางให้สามารถปรับใช้กับเครื่องยนต์กึ่งทันก๊าซจริง อาทิ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิเคราะห์หาสมการที่อธิบายพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของส่วนต่าง ๆ ในเครื่องยนต์กึ่งทันก๊าซ และสร้างแบบจำลองโดย MATLAB/Simulink [1] หรือการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการใช้ NARMAX (Nonlinear Auto Regressive Moving Average With Exogenous Input) และโครงข่ายประสาทเทียม (Neural network) จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง [2] และแบบจำลองที่ได้ ถูกนำมาใช้ในการจำลองเพื่อศึกษาทฤษฎีการควบคุมต่าง ๆ เพื่อควบคุมความเร็วรอบกึ่งทัน อาทิ การเปรียบเทียบการทำงานของตัวควบคุมแบบ PID (Proportional Integral Derivative Controller), AMPC (Approximate Model Predictive Control) และ NMPC (Nonlinear Model Predictive Control) ซึ่งพบว่าตัวควบคุมแบบ PID มีย่านการทำงานที่แคบ เนื่องจากต้องปรับเปลี่ยนอัตราขยายทุกครั้งเมื่อมีการเปลี่ยนย่านการทำงาน ในขณะที่ตัวควบคุม AMPC เหมาะสมต่อระบบมากที่สุดเพราะสามารถติดตามสัญญาณที่เข้าต่าง ๆ ได้ และมีความเป็นเชิงเส้นทำให้สามารถลดรอบการทำงานซ้ำเมื่อเทียบกับ NMPC [2] ในปี 2006 F. Jurado และ J. Carpio ได้ประยุกต์ใช้การควบคุมแบบ MPC (Model Predictive Control) ซึ่งนิยมใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากรองรับความไม่เชิงเส้น เหมาะสมกับระบบจริง [3] ในปี 2011 E. Najimi และ M.H. Ramezani ประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบคงทน (Robust Controller) กับเครื่องยนต์กึ่งทัน

ก๊าซและให้ผลตอบสนองที่ต่ำกว่าแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นอีกทั้งยังช่วยลดขนาดความฟุ้งเกินเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุม MPC และตัวควบคุมแบบ PID [4] นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic Controller) ร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งพบว่าเหมาะสมต่อระบบควบคุมความเร็วรอบกึ่งทัน และทำให้มีย่านการทำงานกว้างเมื่อเทียบกับตัวควบคุมแบบ PID [5]

จากการศึกษาข้างต้นพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่เป็นเพียงการจำลองระบบ ซึ่งจะได้ผลถูกต้องแม่นยำนั้นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และพารามิเตอร์ของเครื่องยนต์ที่ถูกต้อง แต่การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการหาค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องของเครื่องยนต์กึ่งทันก๊าซที่ประกอบด้วยเครื่องอัดอากาศ (Compressor) ห้องเผาไหม้ (Combustor) และกังหันก๊าซ (Turbine) ตลอดจนปฏิบัติการการเผาไหม้และการทำงานในส่วนต่าง ๆ ของเครื่องยนต์มีความสัมพันธ์ที่ซับซ้อน จึงอาจไม่สามารถหาได้ในจำนวนงบประมาณและเวลาอันจำกัด [6] อีกทั้งวิธีการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ต้องอาศัยการติดตั้งอุปกรณ์วัด และการสร้างตัวควบคุมที่เหมาะสม ดังนั้นเครื่องยนต์กึ่งทันก๊าซขนาดเล็กโดยทั่วไปจึงยังอาศัยผู้ควบคุม ซึ่งต้องมีความชำนาญและทราบถึงพฤติกรรมของเครื่องยนต์กึ่งทันก๊าซขนาดเล็กที่ควบคุม

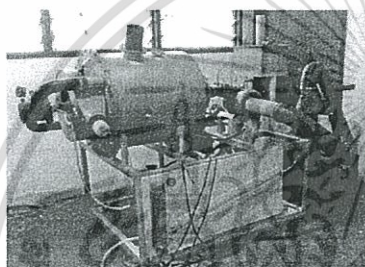
ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบควบคุมความเร็วรอบกึ่งทันอัตโนมัติ โดยติดตั้งอุปกรณ์วัดและอุปกรณ์ขับเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการควบคุม ตลอดจนพัฒนาโปรแกรมควบคุมในไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC ร่วมกับโปรแกรม LabView ซึ่งเป็นส่วนเชื่อมต่อกับผู้ใช้งาน แต่ไม่มีการเปลี่ยนโครงสร้างทางกายภาพของเครื่องยนต์ ซึ่งจากการศึกษาของงานวิจัยที่ผ่านมา จึงเลือกใช้ตัวควบคุมแบบ PID ซึ่งพบว่าเพียงพอในการควบคุมความเร็วรอบกึ่งทันในเบื้องต้น โดยทดลองกับเครื่องยนต์จริง เพื่อยืนยันความสามารถของระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้น



และศึกษาพฤติกรรมของระบบเมื่อแปรค่าอัตราขยายของตัวควบคุม

2. โครงสร้างเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กขึ้นในห้องปฏิบัติการดังรูปที่ 1 โดยมีลักษณะเป็นวัฏจักรเบรยตัน (Brayton Cycle) ซึ่งเครื่องยนต์กังหันก๊าซมีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน ได้แก่ เครื่องอัดอากาศ ห้องเผาไหม้ และกังหันก๊าซ

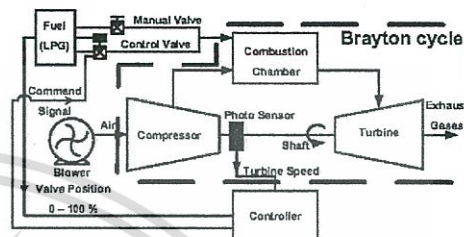


รูปที่ 1 เครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก

เมื่อพัฒนาโครงสร้างเครื่องยนต์พื้นฐานจนสามารถควบคุมความเร็วรอบกังหันโดยอาศัยผู้ควบคุมเปิด-ปิดวาล์วแล้ว ขั้นตอนต่อมาในงานวิจัยนี้จึงได้ติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม เพื่อให้ระบบสามารถควบคุมความเร็วรอบกังหันแบบอัตโนมัติ ได้แก่ ติดตั้งชุดวาล์วควบคุม (Control Valve) เพื่อควบคุมอัตราการไหลก๊าซแอลพีจี โดยชุดวาล์วนี้ประกอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและเอ็นโค้ดเดอร์ พร้อมวงจรขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำเร็จรูปแบบ H-bridge quad power MOSFET และติดตั้งโฟโต้เซ็นเซอร์ (Photo Sensor) เพื่อตรวจวัดความเร็วรอบกังหัน ส่วนตัวควบคุมเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC 30F4011 ดังโครงสร้างในรูปที่ 2

ส่วนเชื่อมต่อกับผู้ใช้งาน อาศัยโปรแกรม LabView ซึ่งทำงานบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล โดยสามารถรับค่าความเร็วเป้าหมายจากผู้ใช้งาน แสดงผล ตลอดจนบันทึกผลการทดลอง โดยรับส่ง

ข้อมูลจากไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านพอร์ตอนุกรม (RS-232) มายังคอมพิวเตอร์



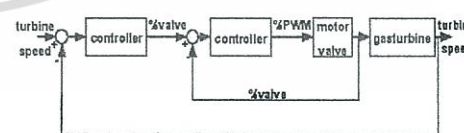
รูปที่ 2 วัฏจักรเครื่องยนต์ที่ประกอบเข้ากับอุปกรณ์ควบคุม

นอกจากนั้นได้ติดตั้งอุปกรณ์เพื่อการวัดค่าอื่น ๆ ในระบบ ได้แก่ การวัดอุณหภูมิด้วย เทอร์โมคัปเปิล ร่วมกับไอซี AD595 และการวัดความดันและอัตราการไหลด้วย ไอซี MPX5500 ซึ่งจะส่งค่ามายังโปรแกรม LabView ผ่าน Micro USB-Data Acquisition ทำให้ผู้ใช้สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งาน

3. ระบบควบคุม

3.1 ระบบควบคุมของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

ในงานวิจัยนี้นำเสนอระบบควบคุมของเครื่องยนต์กังหันก๊าซดังรูปที่ 3 ซึ่งประกอบด้วยระบบควบคุมแบบป้อนกลับแบบลบ 2 ลูป ลูปในเป็นลูปควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วเพื่อควบคุมอัตราการไหลก๊าซ ซึ่งอัตราการไหลของก๊าซมีผลต่อความเร็วรอบกังหัน ส่วนลูปนอกเป็นลูปของการควบคุมความเร็วรอบกังหัน

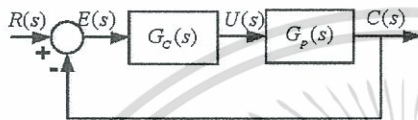


รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ



3.2 ทฤษฎีตัวควบคุม

ระบบควบคุมป้อนกลับแบบลบพื้นฐานแสดงได้ดังบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4 ประกอบด้วยกระบวนการ $G_p(s)$ และตัวควบคุม $G_c(s)$ โดยตัวควบคุมที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมคือตัวควบคุมในตระกูล PID



รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

3.2.1 ตัวควบคุมแบบ P

สัญญาณควบคุม $U(s)$ ของตัวควบคุมแบบ P แปรผันตรงหรือเป็นสัดส่วนกับค่าความผิดพลาด $E(s)$ โดยมีทรานเฟอร์ฟังก์ชัน $G_c(s)$ ดังสมการที่ (1)

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (1)$$

เมื่อ K_p คือ อัตราขยายเชิงส่วน

3.2.2 ตัวควบคุมแบบ PI

สัญญาณควบคุม $U(s)$ ของตัวควบคุมแบบ PI แปรผันตรงหรือเป็นสัดส่วนกับค่าความผิดพลาด $E(s)$ และอินทิเกรตของค่าความผิดพลาด โดยมีทรานเฟอร์ฟังก์ชัน $G_c(s)$ ดังสมการที่ (2)

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_I}{s} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) \quad (2)$$

เมื่อ K_I คือ อัตราขยายเชิงอินทิกรัล

T_I คือ ค่าเวลาคงที่การอินทิกรัล

3.2.3 ตัวควบคุมแบบ PID

สัญญาณควบคุม $U(s)$ ของตัวควบคุมแบบ PID แปรผันตรงหรือเป็นสัดส่วนกับค่าความผิดพลาด $E(s)$ รวมทั้งผลการอินทิเกรตและอนุพันธ์ของค่าความผิดพลาด โดยมีทรานเฟอร์ฟังก์ชัน $G_c(s)$ ดังสมการที่ (3)

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s$$

$$= K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (3)$$

เมื่อ K_D คือ อัตราขยายเชิงอนุพันธ์

T_D คือ ค่าเวลาคงที่อนุพันธ์

3.2.4 ตัวควบคุมแบบ PID เวลาดีสครีต

ในปัจจุบันการใช้งานระบบควบคุมเวลาดีสครีตได้รับความนิยมมากขึ้น เนื่องจากความสะดวกในการใช้งานของอุปกรณ์ดิจิทัล

จากสมการที่ (1), (2) และ (3) เมื่ออาศัยระบบควบคุมเวลาดีสครีตที่มีคาบการสุ่ม (Sampling Period) T_s วินาที สัญญาณควบคุมแบบเวลาดีสครีตของตัวควบคุมแบบ PID สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$U(z) = U_p(z) + U_I(z) + U_D(z) \quad (4)$$

เมื่อ

$$U_p(z) = K_p E(z) \quad (5)$$

$$U_D(z) = K_D \frac{(1-z^{-1})}{T_s} E(z) \quad (6)$$

$$U_I(z) = K_I \frac{T_s (1+z^{-1})}{2(1-z^{-1})} E(z) \quad (7)$$

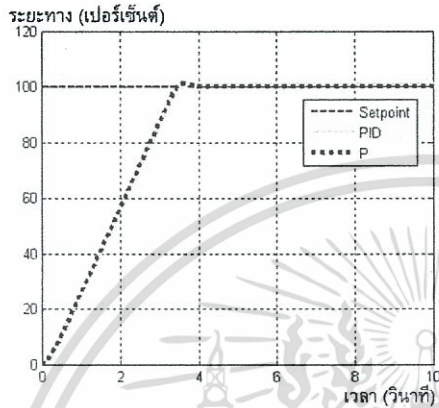
3.3 การออกแบบตัวควบคุม

การออกแบบควบคุมแบบป้อนกลับหรือควบคุมชดวาล์วมีการออกแบบตัวควบคุมเนื่องจากสามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์กระแสตรงแทนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของชดวาล์วได้ ดังนั้นจึงมีการจำลองผลการทดลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB เมื่อนำผลการจำลองของตัวควบคุมแบบ P ที่ $K_p = 20$ และ PID ที่ $K_p = 20$, $K_I = 0.1$, และ $K_D = 2$ พบว่าตัวควบคุมแบบ P สามารถควบคุมชดวาล์วได้ดีกว่าตัวควบคุมแบบ PID ดังรูปที่ 5 ดังนั้นจึงนำตัวควบคุมแบบ P ที่ $K_p = 20$ มาใช้ในระบบจริง

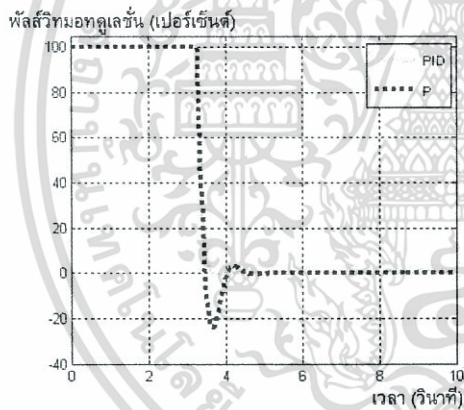
ในส่วนการออกแบบตัวควบคุมแบบนอก หรือควบคุมความเร็วรอบกังหัน เป็นการออกแบบโดยใช้วิธีลองผิดลองถูกเพื่อปรับหาค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบ P และ PI ที่สามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงได้ แต่ถ้าเราทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



ของเครื่องยนต์ เราสามารถออกแบบตัวควบคุมโดยอาศัยวิธีการออกแบบเชิงวิเคราะห์ได้



(ก) ผลตอบสนอง



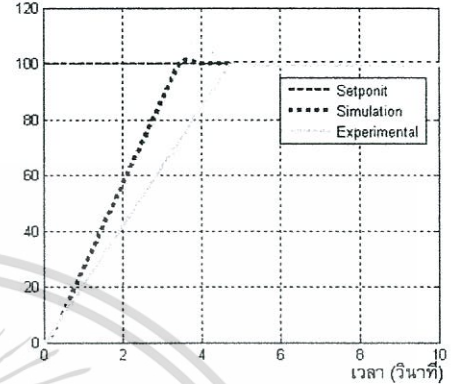
(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 5 ผลการจำลองของชุดวาล์วโดยตัวควบคุมแบบ P และ PID

4. ผลการทดลอง

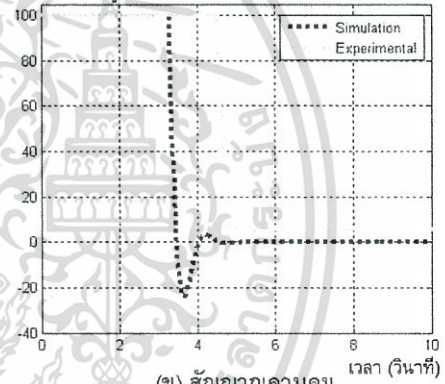
ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 การควบคุม คือ 1) การควบคุมลูปในเป็นการควบคุมของชุดวาล์ว 2) การควบคุมลูปนอกเป็นการควบคุมของความเร็วรอบกังหัน หรือระบบของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)



(ก) ผลตอบสนอง

ผลลัพธ์มอเตอร์ (เปอร์เซ็นต์)



(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 6 ผลการจำลองเปรียบเทียบผลการทดลองของชุดวาล์วโดยตัวควบคุมแบบ P

4.1 ผลการทดลองควบคุมชุดวาล์ว

จากการนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์กระแสตรงที่สร้างขึ้นมีความใกล้เคียงกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของชุดวาล์ว จากรูปที่ 6 พบว่าที่ค่า $K_p = 20$ ผลตอบสนองของการจำลองมีการพุ่งเกินและแกว่งก่อนเข้าสู่ค่าเป้าหมาย ส่วนผลการทดลองไม่เกิดการแกว่งและค่าพุ่งเกิน แต่ไม่สามารถเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ยังคงมีค่าผิดพลาดอยู่เล็กน้อยซึ่งสามารถยอมรับได้ เนื่องจากระบบจริงมี



แรงเสียดทานและมอเตอร์ประกอบอยู่กับวาล์ว ถ้าดูจากค่าสัญญาณควบคุมตัวควบคุมของผลการทดลองก็ยังคงจ่ายสัญญาณให้กับระบบ แต่เนื่องจากการจ่ายสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมไม่สามารถทำให้มอเตอร์เอาชนะแรงเสียดทานได้ จึงเป็นสาเหตุให้เกิดความแตกต่างระหว่างผลการจำลองและการทดลอง

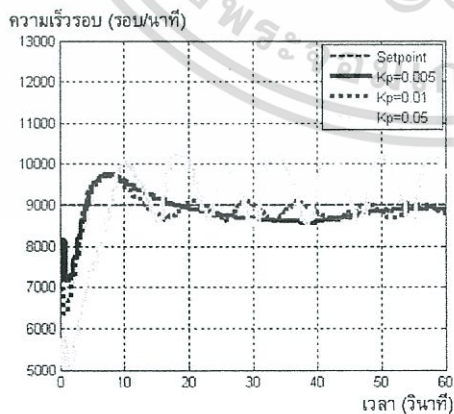
4.2 ผลการทดลองควบคุมเครื่องยนต์กึ่งหุ่นก๊าซ

เนื่องจากไม่ทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์จึงไม่สามารถออกแบบตัวควบคุมโดยการจำลองก่อนนำไปใช้กับระบบจริงได้ การทดลองในบทความนี้จึงเป็นการทดลองแบบลองผิดลองถูกโดยปรับหาค่า K_p สำหรับตัวควบคุมแบบ P และปรับหาค่า K_p และ K_I สำหรับตัวควบคุมแบบ PI

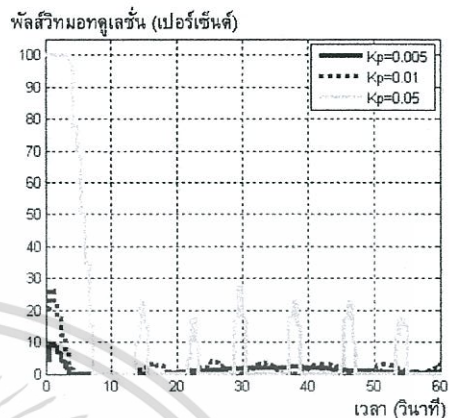
4.2.1 ผลการทดลองตัวควบคุมแบบ P

การทดลองของตัวควบคุมแบบ P เริ่มต้นด้วยค่า K_p ที่มีค่าน้อยๆ เนื่องจากความเร็วรอบของกังหันมีค่าอยู่ในหลักพันจนถึงหลักหมื่น แต่เปอร์เซ็นต์เปิดปิดของชุดวาล์วอยู่ในหลักร้อยจึงใช้ค่า $K_p = 0.25, 0.1, 0.05, 0.025, 0.01$ และ 0.005

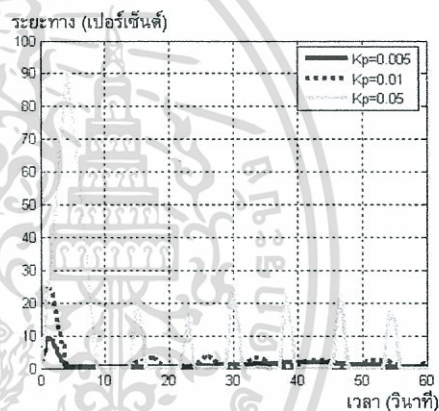
จากรูปที่ 7 การใช้ตัวควบคุมแบบ P กับระบบของเครื่องยนต์นั้น ควรใช้ค่า K_p ที่มีค่าน้อยเพื่อให้ระบบเกิดค่าพุ่งเกิน การแกว่งของสัญญาณน้อยหรือไม่เกิดขึ้นเลย และทำให้ระบบสามารถเข้าสู่ค่าอ้างอิงได้ โดยยังคงเกิดค่าความคลาดเคลื่อนที่สถิตย์ อันมาเนื่องจากระบบเครื่องยนต์เป็นระบบอันดับศูนย์



(ก) ผลตอบสนองของความเร็วรอบกังหัน

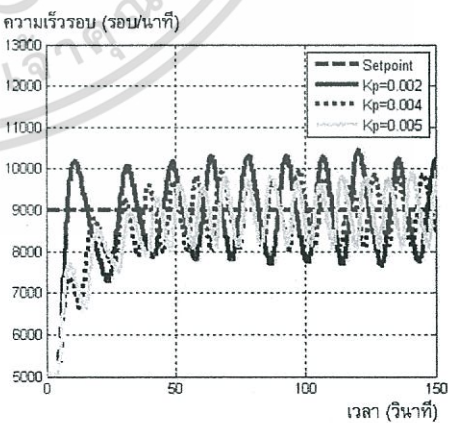


(ข) สัญญาณควบคุมของความเร็วรอบกังหัน

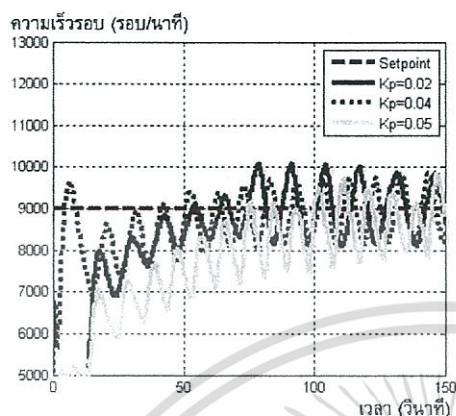


(ค) ผลตอบสนองของชุดวาล์ว

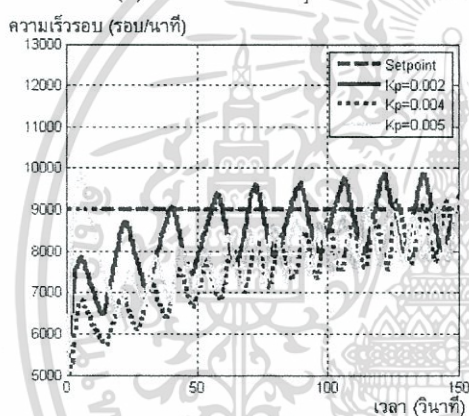
รูปที่ 7 ผลการทดลองการควบคุมเครื่องยนต์ด้วยตัวควบคุมแบบ P



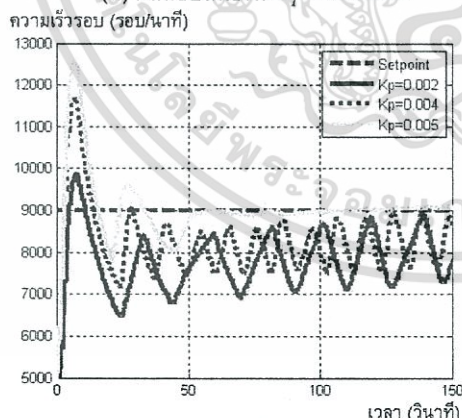
(ก) ผลตอบสนองที่ $K_p = 0.0003$



(ข) ผลตอบสนองที่ $K_I = 0.0001$



(ค) ผลตอบสนองที่ $K_I = 0.00005$



(ง) ผลตอบสนองที่ $K_I = 0.00001$

รูปที่ 8 ผลการทดลองการควบคุมเครื่องยนต์ด้วย
ตัวควบคุมแบบ PI

4.2.2 ผลการทดลองตัวควบคุมแบบ PI

การทดลองของตัวควบคุมแบบ PI เป็นการปรับค่า K_p และ K_I เพื่อหาค่าที่เหมาะสมโดยการทดลองจะใช้ค่า $K_I = 0.0003, 0.0001, 0.00005$ และ 0.00001 ที่ค่า $K_p = 0.001, 0.002, 0.003, 0.004, 0.005$ และ 0.0005

จากรูปที่ 8 พบว่าการใช้ตัวควบคุมแบบ PI กับระบบเครื่องยนต์นั้น ถ้ากำหนดให้ค่า K_I หรือ K_p ที่มีค่ามากเกินไปทำให้ผลตอบสนองเกิดการแกว่ง และพุ่งเกินของสัญญาณได้ ส่วนค่าพุ่งเกินที่มีค่ามาก ๆ สำหรับบางผลการทดลองเกิดจากความดันก๊าซแอลพีจีที่อยู่บริเวณหน้าวาล์ว เมื่อเปิดวาล์วในช่วงเริ่มต้นจะมีอัตราการไหลของก๊าซมากกว่าปกติ และจากรูปที่ 8 (ง) พบว่าที่ $K_p = 0.005$ และ $K_I = 0.00001$ สามารถทำให้ระบบสามารถเข้าสู่ค่าอ้างอิงได้โดยเกิดค่าพุ่งเกิน การแกว่งของสัญญาณอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ และเกิดค่าความผิดพลาดน้อยกว่าตัวควบคุมแบบ P ที่ $K_p = 0.005$

5. สรุป

จากผลการทดลองพบว่าระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมความเร็วรอบกังหันที่ 9000 รอบ/นาทีได้ด้วยควบคุมแบบ PI ที่ $K_p = 0.005$ และ $K_I = 0.00001$ โดยเมื่อทดลองเป็นระยะเวลาหนึ่งอุณหภูมิถึงก๊าซแอลพีจีจะลดต่ำลงซึ่งมีผลให้ความดันลดลง อัตราการไหลของก๊าซแอลพีจีต่ำลง ทำให้อัตราการไหลเชิงมวลของแอลพีจีที่มีผลต่อการเผาไหม้ และความเร็วรอบกังหัน นอกจากนี้ การเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งซึ่งส่งผลให้ความเร็วรอบกังหันลดลงอีกด้วย ซึ่งในเครื่องยนต์กังหันก๊าซที่ไม่มีระบบควบคุมจะไม่สามารถรักษาความเร็วรอบไว้ได้ ถ้าหากปราศจากผู้ควบคุม โดยการปรับระดับการเปิด-ปิดวาล์ว แต่ระบบควบคุมที่ถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถรักษา



ความเร็วรอบกึ่งหันให้ได้ค่าความเร็วรอบที่ต้องการ และสามารถตอบสนองต่อสิ่งรบกวนของระบบได้ ซึ่งเหมาะที่จะนำไปใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าในอนาคตต่อไป

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Yu, Y. Chen, L. Sun, F. and Wu, C. (2005). Matlab/Simulink-based simulation for digital-control system of marine three-shaft gas turbine. *Applied Energy*, vol. 80, Issue 1, January 2005, pp. 1-10.
- [2] Mu, J. Rees, D. and Liu, G.P. (2005). Advanced controller design for aircraft gas turbine engines. *Control Engineering Practice*, vol. 13, Issue 8, August 2005, pp. 1001-1015.
- [3] Jurado, F. and Carpio, J. (2006). Improving distribution system stability by predictive control of gas turbines. *Energy Conversion and Management*, vol. 47, Issue 18-19, November 2006, pp. 2961-2973.
- [4] Najimi, E. and Ramezani, M.H. (2011). Robust control of speed and temperature in a power plant gas turbine. *ISA Transactions*, In Press, Correct Proof.
- [5] Jurado, F. Ortega, M. Cano, A. and Carpio J. (2002). Neuro-fuzzy controller for gas turbine in biomass-based electric power plant. *Electric Power Systems Research*, vol. 60, Issue 3, January 2002, pp.123-135.
- [6] Wei, W. Wang, J. Li, D.H. Zhu, M. and Xue, Y.L. (2010). Feedback control of combustion oscillations in combustion chambers. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 15, Issue 11, November 2010, pp. 3274-3283.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายไพศาล ปานดำ
วัน เดือน ปีเกิด	17 กุมภาพันธ์ 2530 ที่จังหวัดสมุทรสาคร
ที่อยู่	214/7 ก. ซอยณรงค์มิตร ถนนเดิบบาง ตำบลมหาชัย อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสาคร 74000
ประวัติการศึกษา	2553 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้