

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบตัวควบคุมกระบวนการแบบปรับค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติ
THE DESIGN OF AUTO - TUNING PROCESS CONTROLLER



นายนิกร ชันปาน
นายสุรัชย์ เอี่ยมเจริญศักดิ์
นายสุรียา เพชรทองบุญ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **62092**
วัน,เดือน,ปี **3 1 ก.ค. 2549**

b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE DESIGN OF AUTO - TUNING PROCESS CONTROLLER



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL PULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERRING IN INSTRUMENTATION ENGINEERRING
DEPARTMENT OF INSTRUMENTATION ENGINEERRING
FACULTY OF ENGINEERRING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ การออกแบบตัวควบคุมกระบวนการแบบปรับค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติ
THE DESIGN OF AUTO-TUNING PROCESS CONTROLLER

นักศึกษาผู้จัดทำ นายนิกร ชันปาน รหัสประจำตัว 45015603



นายสุรัชย์ เอี่ยมเจริญศักดิ์ รหัสประจำตัว 45015624

นายสุรียา เพชรทองบุญ รหัสประจำตัว 45015625

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม

ปีการศึกษา 2547

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ. อาจินต์ น่วมตำราญ	
ผศ.ดร. ธนิตย์ ศรีสุวรรณเว็ฒน์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 24 มีนาคม พ.ศ.2548

สถานที่สอบ ณ ห้องสอบปริญญาานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม

ภาควิชารับรองแล้ว



(รศ. ประสิทธิ์ จุลเสวีวงศ์)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การออกแบบตัวควบคุมกระบวนการแบบปรับค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติ		
	THE DESIGN OF AUTO TUNING PROCESS CONTROLLER		
นักศึกษาผู้จัดทำ	นายนิกร	ชันปาน	รหัสประจำตัว 45015603
	นายสุรชัย	เอี่ยมเจริญศักดิ์	รหัสประจำตัว 45015624
	นายสุรียา	เพชรทองบุญ	รหัสประจำตัว 45015625
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.อาจินต์	น่วมสำราญ	
	ผศ.ดร.ธนิตย์	ตรีสุวรรณวัฒน์	
ปีการศึกษา	2547		

บทคัดย่อ

ตัวควบคุมแบบ PID ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในวงการอุตสาหกรรมร่วมกับวิธีการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ PID ของ Ziegler - Nichols และอื่น ๆ อย่างไรก็ตามวิธีการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ PID โดยทั่วไปจะเป็นการประมาณค่าที่ให้ผลดีในระดับหนึ่งและอาจเกิดค่าผิดพลาดได้เนื่องจากการวัด ดังนั้น ในทางปฏิบัติการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ยังคงต้องใช้วิธีการลองผิดลองถูกทำให้ใช้เวลานานและต้องอาศัยประสบการณ์ของผู้ควบคุมในการปรับแต่งเพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุดและได้มีการนำเอาการทำงานที่สามารถปรับแต่งตัวเองได้อัตโนมัติ เข้าไว้ในตัวควบคุม PID เพื่อหลีกเลี่ยงความยุ่งยากและการเสียเวลา ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้พัฒนาออกแบบโปรแกรมหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID อัตโนมัติ ขึ้น เพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการต่างๆ ในอุตสาหกรรม ซึ่งโปรแกรมสามารถช่วยลดเวลาในการหาค่าพารามิเตอร์ลงได้มาก รวมถึงช่วยแก้ปัญหาผู้ควบคุมขาดความรู้และประสบการณ์ในการหาค่าพารามิเตอร์ให้การควบคุมเป็นไปตามต้องการ

Thesis Title	The Design of Auto-Tuning Process Controller
Authors	Mr. Nikron Kanpan Mr. Surachai Aimjareonsak Mr. Suriya Phetthongboon
Thesis Advisor	Asst.Prof. Arjin Numsomran Asst.Prof.Dr.Thanit Trisuwannawat
Year	2004

ABSTRACT

The PID (Proportional-Integral-Derivative) controller is widely used in industries with the well known Ziegler-Nichols tuning method and others. According to these methods yield a good estimation for any parameter of the PID controller. However, errors possible occur on systems from a measurement process. Almost PID controller losing used in the real practice still require trial and error adjustment for each process. After the tuning method has been done, which is a process time consumed. Moreover, the conventional method also needs the expert to obtain the best controller parameters. Recently the auto-tuning control function was added to the general-purpose controller including to the PID function in order to reduce the complication of tuning parameters. This thesis proposes to design a computer program to reduce time for tuning the controller parameters. The experiment result not only indicated the reducing time but also helped operators without experiences to tune the controller parameters.

กิตติกรรมกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเพราะได้รับความเมตตาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อาจินต์ น่วมสำราญ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนิตย์ ศรีสุวรรณวัฒน์ ที่ได้ให้คำแนะนำและให้ คำปรึกษาแก่ผู้จัดทำปริญญาานิพนธ์ตลอดมา ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้ง และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม ที่ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

ที่สำคัญ ขอกราบขอบพระคุณ พ่อ แม่ อันเป็นที่รักยิ่ง ที่สนับสนุนและเป็นกำลังใจเสมอมาในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณเพื่อนทุกคน ที่เอื้อเฟื้อหนังสือ และข้อมูลต่าง ที่เป็นประโยชน์ในการทำปริญญาานิพนธ์

ท้ายที่สุดนี้คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้จัดทำขอบพระคุณแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์.....	1
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์.....	1
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	3
2.1 ระบบควบคุม.....	3
2.1.1 ระบบควบคุมแบบวงเปิด.....	3
2.1.2 ระบบควบคุมแบบวงปิด.....	3
2.2 ตัวควบคุมกระบวนการแบบ PID.....	5
2.2.1 รูปแบบของตัวควบคุมแบบ PID.....	6
2.3 ทฤษฎีและหลักการการควบคุมแบบป้อนกลับ.....	7
2.3.1 กริยาการควบคุมแบบ ON-OFF.....	8
2.3.2 กริยาการควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional).....	9
2.3.3 กริยาการควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral).....	10
2.3.4 กริยาการควบคุมแบบเดริเวทีฟ (Derivative).....	11
2.3.5 กริยาการควบคุมแบบ Proportional-Integral (PI).....	13
2.3.6 กริยาการควบคุมแบบ Proportional-Derivative (PD).....	14
2.3.7 กริยาการควบคุมแบบ Proportional-Integral- Derivative (PID).....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

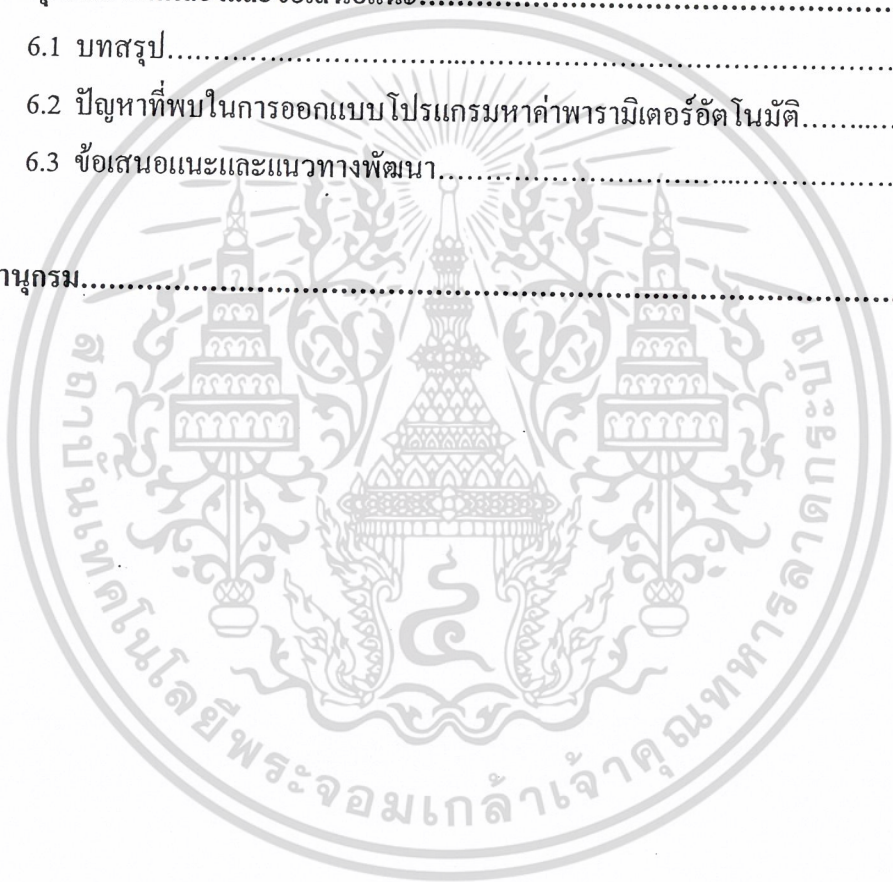
สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ผลตอบสนองของระบบควบคุม.....	16
3.1 ระบบเกี่ยวกับระดับของของเหลว.....	16
2.3.1 ค่าความต้านทาน.....	16
2.3.2 ค่าความจุ.....	18
3.2 ผลตอบสนองของระบบต่อสัญญาณอินพุทชนิดต่างๆ.....	20
3.2.1 ระบบอันดับหนึ่ง (Response of First-Order-System).....	20
3.2.2 ระบบอันดับสอง (Second Order Systems).....	23
3.3 ข้อกำหนด (Specification) ของระบบ.....	28
3.3.1 การคำนวณหาค่าของข้อกำหนดต่างๆ ของผลตอบสนองชั่วคราวของระบบอันดับสอง.....	30
บทที่ 4 การออกแบบการหาค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติ.....	35
4.1 บทนำ.....	36
4.2 วิธีการของ Auto-Tuning methods.....	36
4.2.1 Transient response method.....	36
4.2.2 Closed loop method by Relay.....	37
4.3 วิธีการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID จากผลตอบสนองของ กระบวนการ.....	40
4.3.1 การคำนวณจากวิธี Process Reaction Curve.....	41
4.3.2 การคำนวณจากวิธี Ultimate Method.....	43
4.4 Digital Controller.....	45
4.4.1 การควบคุมลำดับขั้นการทำงาน.....	46
4.5 การเชื่อมต่อสัญญาณ(signal connection).....	47
4.5.1 การเชื่อมต่ออินพุต / เอาท์พุท(I/O Connector).....	47
4.5.2 การเชื่อมต่อสัญญาณอินพุท(analog Input connections).....	48
4.5.3 การเชื่อมต่อสัญญาณอนาล็อกของเอาท์พุท.....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 ผลการทดลอง.....	52
5.1 กล่าวนำ.....	52
5.2 ผลการทดลองกับกระบวนการควบคุมระดับของเหลว.....	53
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	60
6.1 บทสรุป.....	60
6.2 ปัญหาที่พบในการออกแบบโปรแกรมหาค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติ.....	60
6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	61
บรรณานุกรม.....	62



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงสมการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ตามวิธีของ Ziegler-Nichols step response tuning.....	36
4.2 แสดงสูตรสำหรับหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ตามวิธี Ziegler-Nichols Closed-Loop method.....	39
4.3 แสดงสูตรสำหรับหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ตามวิธี Process Reaction Curve.....	43
4.4 แสดงสูตรสำหรับหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ตามวิธี Ultimate Method.....	44
5.1 สรุปผลการทดลองเมื่อตัวควบคุมเป็นแบบ PI.....	57
5.2 สรุปผลการทดลองเมื่อตัวควบคุมเป็นแบบ PID.....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบวงเปิด.....	3
2.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยทั่วไป.....	5
2.3 แสดงรูปแบบของตัวควบคุมแบบ PID.....	6
2.4 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแบบ ON-OFF.....	8
2.5 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแบบ Proportional.....	9
2.6 แสดงผลตอบสนองของการควบคุมแบบสัดส่วน.....	10
2.7 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแบบ Integral.....	11
2.8 แสดงผลตอบสนองของการควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral) จากสัญญาณขั้นบันได.....	11
2.9 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแบบ Derivative.....	12
2.10 แสดงผลตอบสนองของการควบคุมแบบเดริเวทีฟ (Derivative) จากสัญญาณขั้นบันได.....	13
2.11 แสดงผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ PI.....	14
2.12 แสดงผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ PD.....	15
2.13 แสดงผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ PID.....	15
3.1 แสดงระบบเกี่ยวกับของเหลว.....	16
3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสูงกับอัตราการไหล.....	17
3.3 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบอันดับหนึ่ง.....	20
3.4 แสดงฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมแบบลูปปิด.....	20
3.5 แสดงผลตอบสนองต่ออินพุตที่เป็น Unit Impulse.....	21
3.6 แสดงผลตอบสนองต่ออินพุตที่เป็น Unit Step.....	23
3.7 แสดงบล็อกไดอะแกรมระบบอันดับสอง.....	23
3.8 แสดงการกำหนดจุดไว้บนระนาบ s.....	26
3.9 แสดงคุณลักษณะกระบวนการอันดับสอง.....	29
3.10 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง Percent Maximum Overshoot.....	32
3.11 แสดงการนำเอาค่าของ $\omega_n t_d$ ต่อค่าต่างๆของ ξ มา Plot.....	32
3.12 แสดงการนำเอาค่าของ $\omega_n t_r$ ต่อค่าต่างๆของ ξ มา Plot.....	33
4.1 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการแบบ first order.....	36
4.2 แสดงบล็อกการทำงานของ Auto-Tuning โดยวิธี Relay.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 แสดงสัญญาณ Relay ที่ใช้ป้อนเข้าไปรบกวนระบบเพื่อให้เกิดการแกว่ง.....	37
4.4 แสดงลักษณะบล็อก Relay.....	38
4.5 แสดงอินพุตและเอาต์พุตของระบบที่ใช้ Relay.....	39
4.6 แสดงบล็อกไดอะแกรมของ Relay Auto-tuner.....	40
4.7 แสดงโครงสร้างของระบบควบคุมที่ควบคุมด้วยตัวควบคุม PID.....	41
4.8 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการเมื่อปรับพารามิเตอร์ด้วยวิธี Ziegler-Nichols.....	41
4.9 แสดงผลตอบสนองรูปตัว S เมื่อใช้วิธี Process Reaction Curve.....	42
4.10 แสดงผลตอบสนองเวลาเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง เมื่อปรับ โดยวิธี Ultimate Method.....	44
4.11 แสดงโครงสร้างของ Digital Controller.....	45
4.12 แสดงระบบควบคุม Close Loop กับ Digital Controller.....	45
4.13 แสดงรูปร่างภายนอกของ Digital Control Loop.....	46
4.14 แสดง flowchart การทำงานของ Digital Controller.....	47
4.15 แสดง I/O connector pin assignments for 1711.....	48
4.16 แสดง Single – ended input channel connection.....	49
4.17 แสดง Differential input channel connection – ground reference signal source.....	49
4.18 แสดง Differential input channel connection – floating signal source.....	50
4.19 แสดงวงจรในส่วนการคำนวณ.....	50
4.20 แสดง Analog output connection.....	51
5.1 แสดงกระบวนการควบคุมระดับที่ใช้ในการทดลอง.....	52
5.2 แสดงลักษณะของกระบวนการ.....	53
5.3 แสดงหน้าต่างของ โปรแกรมAuto-Tuning.....	54
5.4 แสดง Flow chart แสดงการทำงานของ โปรแกรม.....	55
5.5 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 25 % เมื่อตัวควบคุมเป็นแบบPI.....	56
5.6 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 50 % เมื่อตัวควบคุมเป็นแบบPI.....	56
5.7 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 75 % เมื่อตัวควบคุมเป็นแบบPI.....	57
5.8 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 25 % เมื่อตัวควบคุมเป็นแบบ PID.....	57
5.9 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 50 % เมื่อตัวควบคุมเป็นแบบ PID.....	58
5.10 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 75 % เมื่อตัวควบคุมเป็นแบบ PID.....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.11 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการ ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมทางทฤษฎีที่ค่าเป้าหมายเท่ากับ 25%.....	59
5.12 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการ ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมทางทฤษฎีที่ค่าเป้าหมายเท่ากับ 50%.....	59



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์

ปัจจุบันความเจริญก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีทำให้เกิดหลักการและทฤษฎีการควบคุมแบบใหม่ ๆ ที่สามารถใช้ในการควบคุมที่มีความซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพแต่การควบคุมกระบวนการแบบ PID ก็ยังมีคงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ทั้งนี้ก็เพราะตัวควบคุมแบบ PID มีโครงสร้างการทำงานที่ไม่ซับซ้อน และการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทำได้โดยง่าย แต่ในการปรับค่าต่าง ๆ ให้เหมาะสม เพื่อให้ผลตอบสนองของกระบวนการดีที่สุดต้องใช้เวลาอันและอาจเกิดความผิดพลาดขึ้นได้ หากผู้ใช้ขาดความชำนาญและไม่มีประสบการณ์เพียงพอ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการแก้ไข ปัญหาเหล่านี้โดยการใช้ตัวควบคุมแบบ PID ที่สามารถวิเคราะห์และปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและดีที่สุดกับกระบวนการโดยอัตโนมัติโดยใช้หลักการของ Ziegler-Nichols ซึ่งเป็นวิธีที่นำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในวงการอุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

เพื่อเป็นการศึกษาและออกแบบโปรแกรมเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID แบบอัตโนมัติเพื่อที่ลดเวลาและความยุ่งยากในการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมรวมถึงช่วยลดค่าใช้จ่ายในการที่จะซื้อตัวควบคุมที่มีราคาแพง โดยผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องมีความรู้ทางคณิตศาสตร์ที่จะใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการและไม่จำเป็นต้องมีประสบการณ์หรือความชำนาญในการปรับแต่งเพื่อที่จะได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

ปริญญานิพนธ์จะกล่าวถึงขั้นตอนและวิธีการออกแบบโปรแกรมเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID อัตโนมัติซึ่งขั้นตอนที่สำคัญของโปรแกรมหาค่าพารามิเตอร์อัตโนมัตินี้คือการหาค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการซึ่งเป็นการควบคุมระดับของเหลวในถัง ซึ่งจะใช้วิธี Ultimate ของ Ziegler-Nichols ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์และจะใช้วิธี Relay Feedback ในการบังคับสัญญาณให้เกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

การทำปริญญานิพนธ์มีขั้นตอนการศึกษาโดยเริ่มจากการศึกษาการทำงานของตัวควบคุมแบบ PID และวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่จะใช้ในกระบวนการ เช่น วิธีของ Ziegler Nichols , Root Locus จากนั้นเป็นการศึกษาถึงคุณลักษณะของกระบวนการต่างๆ (Process Characteristic) และวิธีการหาค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติเมื่อได้วิธีการที่จะใช้หาค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติแล้ว ต่อไปก็คือการออกแบบตัวควบคุมแบบ PID แบบหาค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติ โดยใช้โปรแกรม Delphi ในการออกแบบสุดท้ายนำไปทดลองหาค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการจำลองควบคุมระดับของเหลว เพื่อหาข้อบกพร่องและแนวทางการแก้ไขรวมถึงแนวทางการพัฒนาต่อไป



บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ระบบควบคุม

ในระบบควบคุมที่มีอยู่เราสามารถที่จะแบ่งระบบควบคุมนั้น ๆ ออกตามลักษณะของการทำงานซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วเราจะสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท คือ ระบบควบคุมแบบวงเปิด (open-loop control system) และระบบควบคุมแบบวงปิดหรือป้อนกลับ (closed – loop system or feedback control system)

2.1.1 ระบบควบคุมแบบวงเปิด

ระบบควบคุมแบบวงเปิดเป็นระบบควบคุมที่เอาที่พู่ทของระบบที่จะไม่มีผลต่อการควบคุมเลย นั่น คือ ในกรณีของการควบคุมแบบนี้ นั้น เอาที่พู่ทของระบบจะไม่ถูกวัดหรือถูกป้อนกลับเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับอินพุต รูปที่ 2.1 เป็นบล็อกไดอะแกรมแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาที่พู่ทของระบบควบคุมแบบวงเปิด



รูปที่ 2.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบวงเปิด

2.1.2 ระบบควบคุมแบบวงปิด

โดยทั่วไปเป้าหมายของระบบควบคุมกระบวนการต่าง ๆ ในอุตสาหกรรม คือ การรักษาปริมาณทางฟิสิกส์ อันได้แก่อุณหภูมิ (Temperature) แรงดัน (Pressure) อัตราการไหล (Flow rate) ค่าความเป็นกรดด่าง (PH) และอื่น ๆ ให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ต้องการมากที่สุดแม้ว่าสถานะการทำงานและสภาพแวดล้อมอาจเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ซึ่งการควบคุมที่ดีย่อมเริ่มจากการเลือกแบบการควบคุมที่เหมาะสม บางโรงงานอาจจะเลือกใช้การควบคุมแบบง่าย ๆ ด้วยมือ ซึ่งอาศัยพนักงานคอยทำหน้าที่เกี่ยวกับการตรวจวัดและปรับแต่งการควบคุมให้ผลตอบสนองเป็นไปตามต้องการ จะเห็นได้ว่าการควบคุมแบบนี้จำเป็นต้องอาศัยประสบการณ์และความชำนาญของพนักงาน ดังนั้น การควบคุมที่ดีหรือไม่อย่างไรจะขึ้นอยู่กับพนักงานผู้ควบคุมเป็นหลัก แต่ในความเป็นจริงแล้วมนุษย์หรือพนักงานควบคุมไม่สามารถทำงานให้ดีได้เท่ากันตลอดเวลา จึงทำให้

ประสิทธิภาพของการควบคุมลดลงปัจจุบัน โรงงานที่ต้องการการควบคุมที่แม่นยำและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพสูงจำเป็นต้องนำเครื่องควบคุมอัตโนมัติมาใช้งาน โดยเครื่องควบคุมอัตโนมัติจะทำหน้าที่หลักในการคำนวณหาสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมตามกฎเกณฑ์การควบคุมที่พนักงานได้กำหนดไว้ล่วงหน้า ซึ่งระบบควบคุมแบบอัตโนมัติที่เราพบเห็นกันอยู่บ่อยๆ ในโรงงานอุตสาหกรรม ก็คือ ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ หลักการของการควบคุมป้อนกลับนั้น เกิดมานานกว่า 2,000 ปีแล้วแต่ไม่ได้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรม จนกระทั่งเมื่อประมาณ 200 ปีที่แล้ว James Watt ได้นำหลักการดังกล่าวมาทำการสร้างเครื่องควบคุมความเร็วให้กังหันเครื่องจักรไอน้ำ จากนั้นอุตสาหกรรมมากมายได้หันมาให้ความสนใจและนิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายจนถึงปัจจุบัน ระบบควบคุมแบบป้อนกลับนี้อาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ระบบควบคุมแบบปิด หรือ ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ ก็ได้ ซึ่งโดยทั่วไป ระบบควบคุมป้อนกลับแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งระบบควบคุมทางอุตสาหกรรมแบบป้อนกลับโดยทั่วไปประกอบด้วยอุปกรณ์ 4 ส่วน คือ

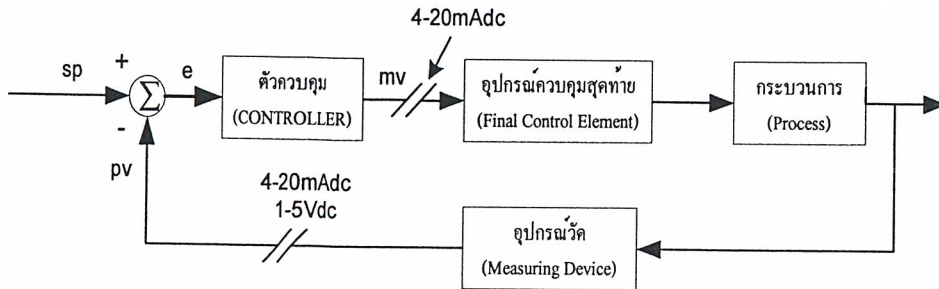
1. **ตัวควบคุม (Controller)** เป็นเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุมเพื่อทำหน้าที่ควบคุมให้ระบบหรือกระบวนการที่ต้องการควบคุมมีเอาต์พุตหรือผลตอบสนองเป็นไปตามต้องการ ตัวควบคุมจะมีหลายแบบ เช่น ตัวควบคุมแบบ On-Off (ตัวควบคุมแบบสองตำแหน่ง) ตัวควบคุมแบบ Proportional (P) ตัวควบคุมแบบ Integral (I) ตัวควบคุมแบบ Derivative (D) หรือการใช้ตัวควบคุม ๆ แบบร่วมกัน เช่น ตัวควบคุมแบบ PI ตัวควบคุมแบบ PD และตัวควบคุมแบบ PID เป็นต้น ซึ่งสัญญาณที่ออกจากตัวควบคุมคือตัวแปรปรับกระบวนการ (Manipulated Variable : mv)

2. **อุปกรณ์ควบคุมตัวสุดท้าย (Final Control Element)** คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ปรับสถานะของกระบวนการ ด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรปรับกระบวนการ ตามคำสั่งหรือสัญญาณควบคุมที่ได้รับจากตัวควบคุม อุปกรณ์ควบคุมตัวสุดท้ายนั้นมีอยู่หลายอย่างด้วยกัน เช่น วาล์วควบคุม (Control Valve) อินเวอร์เตอร์ (Inverter) และตัวกระทำ (Actuator) เป็นต้น แต่ที่มักพบเห็นกันมากในกระบวนการทางอุตสาหกรรมได้แก่ วาล์วควบคุม

3. **กระบวนการ (Plant or Process)** หมายถึง ระบบหรือกระบวนการทางฟิสิกส์ที่ต้องการควบคุมให้มีสถานะเป็นไปตามต้องการ เช่น กระบวนการเกี่ยวกับการควบคุมระดับของเหลวกระบวนการเกี่ยวกับการควบคุมอุณหภูมิ เป็นต้น ซึ่งสามารถแสดงสถานะกระบวนการด้วยตัวแปรกระบวนการ (Process Variable : pv)

4. **อุปกรณ์วัด (Measuring Instruments)** หมายถึงอุปกรณ์ ซึ่งอาจจะได้แก่ เซนเซอร์ (sensor) ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) หรืออุปกรณ์แปลง (Transmitter) หรือเครื่องวัดอื่นๆ ในกระบวนการเพื่อนำสัญญาณที่ได้ไปใช้เป็นตัวแปรในการควบคุม โดยสัญญาณขาออกของอุปกรณ์วัดทั่วไปจะเป็นสัญญาณมาตรฐานทางอุตสาหกรรม เช่น สัญญาณกระแสไฟฟ้า 1-5 โวลต์ (1-5Vdc) หรือสัญญาณลมขนาด 3-5 ปอนด์/ตารางนิ้ว (3-15 psi หรือ 0.2-1.0 kg/cm²) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยทั่วไป

จาก รูปที่ 2.2 อุปกรณ์หรือเครื่องวัดจะวัดค่าตัวแปรกระบวนการ (pv) เช่น ความดัน อัตราการไหลและระดับของเหลว เป็นต้น เพื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงหรือค่าเป้าหมาย (Set Point : sp) จากนั้นตัวควบคุมจะนำค่าความคลาดเคลื่อน (Error : e) ในการควบคุมมาใช้ในการคำนวณ เพื่อหาสัญญาณที่เหมาะสมที่จะไปควบคุมกระบวนการมากที่สุดก็คือ ตัวควบคุมแบบ PID ซึ่งจะใช้เฉพาะ P, PI, PD, หรือ PID นั้นขึ้นอยู่กับชนิดและคุณลักษณะของกระบวนการ ซึ่งอาจจะวิเคราะห์ได้จากการเปลี่ยนแปลงของ pv ด้วย

2.2 ตัวควบคุมกระบวนการแบบ PID

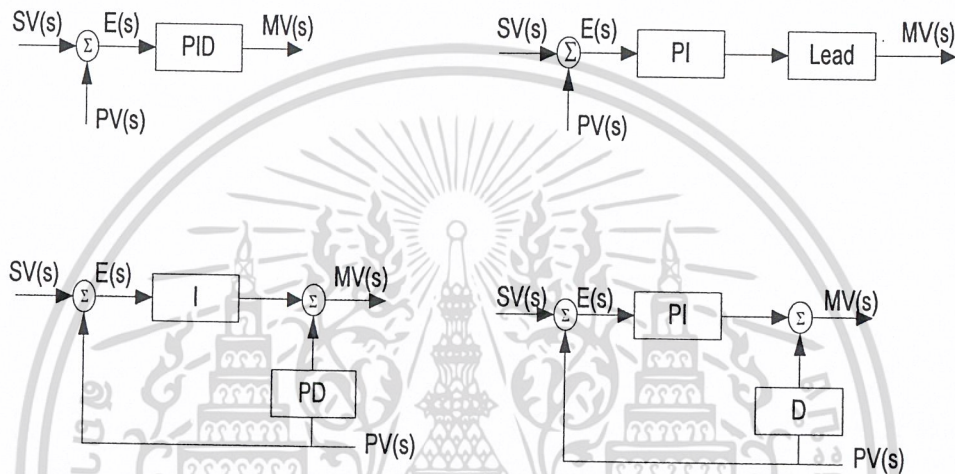
ระบบควบคุมอัตโนมัติแบบ PID ได้ถูกนำมาควบคุมกระบวนการในการผลิตเป็นเวลานานกว่า 50 ปี มาแล้ว อุตสาหกรรมการผลิตแบบอัตโนมัติทั่วไปในปัจจุบันก็ยังนิยมใช้ตัวควบคุมแบบ PID อยู่ทั้งนี้อาจเป็นเพราะรูปแบบของตัวควบคุมเป็นรูปแบบที่สามารถควบคุมกระบวนการต่างๆ ได้อย่างกว้างขวางไม่ว่ากระบวนการนั้นจะมีผลตอบสนองความถี่ต่ำ ความถี่กลาง หรือความถี่สูง ตัวควบคุมแบบ PID ก็สามารถควบคุมกระบวนการได้เป็นอย่างดี ถ้ามีการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมอย่างเหมาะสม

อุตสาหกรรมในประเทศไทยนั้นได้รับการนำระบบควบคุมแบบ PID มาใช้ แต่ในการใช้งานนั้น มักจะใช้เพียงแค่การควบคุมแบบ P หรือการควบคุมแบบ PD เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากการหาค่าพารามิเตอร์แบบ PID ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญ หรือผู้ที่มีความชำนาญกับกระบวนการเป็นอย่างมาก ค่าของพารามิเตอร์ที่ได้ถึงจะเป็นค่าที่กระบวนการได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในกระบวนการผลิตที่ทำงานโดยอัตโนมัติทั่วไป จำเป็นต้องมีตัวควบคุมกระบวนการซึ่งการควบคุมกระบวนการต่างๆก็มีมากมายหลายแบบ ตั้งแต่การควบคุมกระบวนการอย่างง่าย ๆ (Single-Loop-Control) จนถึงการควบคุมกระบวนการแบบซับซ้อน แต่ถ้าลองมองลงไปในส่วนย่อยของตัวควบคุมกระบวนการแล้ว

มักพบว่าประกอบไปด้วยตัวควบคุมกระบวนการแบบ PID แทบทั้งสิ้น น้อยครั้งจะพบตัวควบคุมกระบวนการแบบอื่นๆ

2.2.1 รูปแบบของตัวควบคุมแบบ PID

ตัวควบคุมแบบ PID จะแบ่งรูปแบบของตัวควบคุมตามกฎเกณฑ์ของการควบคุมออกได้เป็น 4 แบบตามรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ก, ข, ค และ ง แสดงรูปแบบของตัวควบคุมแบบ PID

- SV(s) จุดปรับตั้ง (Set Point หรือ Set Valve)
 PV(s) สัญญาณตัวแปรกระบวนการ (Process Variable)
 E(s) ผลต่างระหว่างจุดปรับตั้งและสัญญาณป้อนกลับมีค่าเท่ากับ SV(s)- PV(s)
 M(s) สัญญาณตัวแปรกระบวนการ

ตามรูปที่ 2.3 (ก) เป็นรูปแบบที่ใช้กันมากในการอธิบายเพื่อความเข้าใจตามหนังสือต่างๆ แต่เป็นรูปแบบที่ไม่ค่อยได้ใช้ในกระบวนการผลิตจริงๆ พารามิเตอร์แต่ละตัวจะไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ดังนั้นการปรับค่าพารามิเตอร์ตัวใด จะไม่มีผลกับค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นๆ ไปเกี่ยวข้องด้วย สมการการควบคุมใน แสดงได้ด้วยสมการที่ 2.1

$$MV(s) = \left[\frac{100}{PB} \right] * \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] * E(s) \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามรูปที่ 2.3 (ข) เป็นรูปของตัวควบคุมแบบ PID ที่ใช้กันทั่วไปในตัวควบคุมแบบ PID แบบเชิงอุปมา (Analog) ที่ง่ายในการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ แต่ในปัจจุบันไม่ค่อยได้พบเห็นมากนัก เนื่องจากการปรับค่า PB , T_i , T_d นั้นจะมีผลกระทบต่อกัน (Mutual Interference) สมการการควบคุมใน s-Domain แสดงได้ด้วยสมการที่ 2.2

$$MV(s) = \left[\frac{100}{PB} \right] * \left[1 + \frac{1}{T_i s} \right] * (1 + T_d s) * \frac{E(s)}{1 + \frac{T_d s}{N}} \quad (2.2)$$

สำหรับการควบคุมแบบ PID ตามรูปที่ 2.3 (ค) และรูปที่ 2.3 (ง) นั้น เป็นรูปแบบที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในเครื่องควบคุมชนิดเชิงเลข (Digital PID Controller) ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน สำหรับตามรูปที่ 2.3 (ค) เป็นรูปแบบที่เหมาะสมกับการควบคุมกระบวนการที่มีการรบกวนจากภายนอก (Load Disturbance) แต่กระบวนการจะปรับตัวได้ไม่ค่อยดีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของค่าจุดปรับตั้ง ทั้งนี้เนื่องจาก ค่า Proportional Band มีผลต่อสัญญาณตัวแปรกระบวนการตามรูปที่ 2.3 (ง) นั้นมีรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมที่มีการเปลี่ยนค่าจุดปรับตั้ง แต่กระบวนการจะปรับตัวได้ไม่ค่อยดีถ้ามีสัญญาณรบกวนจากภายนอก ทั้งนี้เนื่องจาก Proportional Band นั้นมีผลต่างระหว่างค่าจุดปรับตั้งกับตัวแปรกระบวนการ

$$MV(s) = \left[\frac{100}{PB} \right] * \left[PV(s) + \frac{E(s)}{T_i s} + \frac{T_d s * PV(s)}{\left(1 + \frac{T_d s}{N} \right)} \right] \quad (2.3)$$

$$MV(s) = \left[\frac{100}{PB} \right] * \left[E(s) + \frac{E(s)}{T_i s} + \frac{T_d s * PV(s)}{\left(1 + \frac{T_d s}{N} \right)} \right] \quad (2.4)$$

2.3 ทฤษฎีและหลักการการควบคุมแบบป้อนกลับ

การออกแบบระบบควบคุมนั้นต้องพิจารณาถึงคุณลักษณะของกระบวนการที่ต้องการควบคุมเสียก่อน ซึ่งบางครั้งอาจพิจารณาในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่รู้จักกันดี คือ ฟังก์ชันถ่ายโอน ทั้งนี้ก็เนื่องจากจะได้เลือกชนิดของการควบคุมให้เหมาะสมกับระบบ เพื่อให้การควบคุมมีเสถียรภาพ และมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมจะเป็นไปตามลักษณะของการสร้างสัญญาณที่เรียกว่า กริยาการควบคุม (Control Action) กริยาการควบคุมสามารถแบ่งออกเป็น 4 แบบใหญ่ๆ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กรียาการควบคุมแบบ ON-OFF
2. กรียาการควบคุมแบบ Proportional
3. กรียาการควบคุมแบบ Integral
4. กรียาการควบคุมแบบ Derivative

กรียาการควบคุมที่ได้กล่าวมามีข้อดีข้อเสียและคุณสมบัติที่ต่างต่างกัน ดังนั้น ในทางปฏิบัติจึงต้องนำเอากรียาการควบคุมแบบต่าง ๆ มาประยุกต์เข้าด้วยกันเพื่อให้ได้สัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งการรวมกรียาการควบคุมที่มักพบเห็นเป็นประจำที่มักพบเห็นเป็นประจำ คือ

5. กรียาการควบคุมแบบ Proportional+ Integral
6. กรียาการควบคุมแบบ Proportional+ Derivative
7. กรียาการควบคุมแบบ Proportional+ Integral + Derivative

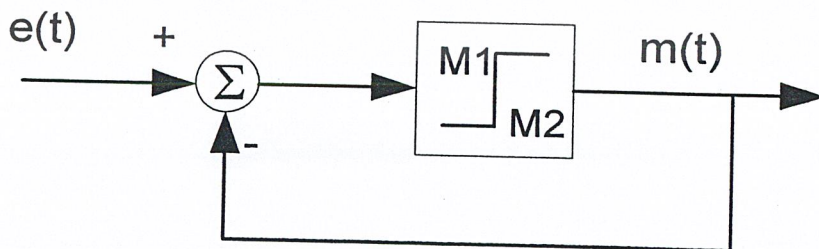
2.3.1 กรียาการควบคุมแบบ ON-OFF

การควบคุมแบบ ON-OFF การควบคุมจะทำงานในตำแหน่งที่คงที่เพียง 2 ตำแหน่งเท่านั้น ในบางครั้งจึงมีชื่อเรียกว่า การควบคุมแบบเปิด-ปิด การควบคุมแบบ 2 ตำแหน่งนั้นจะเป็นการควบคุมแบบง่าย ๆ และราคาไม่แพง ดังนั้นจึงนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในงานควบคุมอุตสาหกรรมและในกรณีที่เกิดจากการแกว่งนั้นเป็นที่ยอมรับได้

กำหนดให้สัญญาณเอาต์พุทของตัวควบคุมเป็น $m(t)$ และสัญญาณความคลาดเคลื่อนเป็น $e(t)$ ฉะนั้นในการควบคุมแบบ ON-OFF สัญญาณจะมีค่าอยู่เพียงค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดเท่านั้น โดยจะขึ้นอยู่กับว่าสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน มีค่าเป็นบวกหรือลบ นั่นคือ

$$m(t) = M1 \text{ สำหรับ } e(t) > 0 \quad \text{โดย } M1 \text{ และ } M2 \text{ เป็นค่าคงที่}$$

$$m(t) = M2 \text{ สำหรับ } e(t) < 0$$

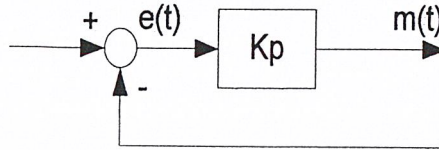


รูปที่ 2.4 แสดงบล็อกไดอะแกรม ของการควบคุมแบบ ON-OFF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional)

เป็นวิธีการควบคุมซึ่งก่อนข้างจะสมำเสมอและเป็นเชิงเส้น ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของอินพุตและเอาต์พุต สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ในรูปของบล็อกไดอะแกรม ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแบบ Proportional

ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณควบคุม (หรือเอาต์พุตของตัวควบคุม) กับสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อนคือ

$$m_p(t) = K_p e(t) \quad (2.5)$$

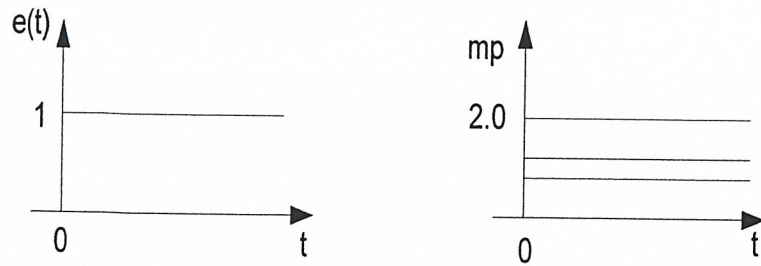
เมื่อ $m_p(t)$ = ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ Proportional
 K_p = อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ Proportional
 e = ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมเมื่อความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์

ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer Function) ของตัวแปรควบคุมแบบสัดส่วนคือ

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p$$

$$PB = \left[\frac{1}{K_p} \right] * 100\% \quad (2.6)$$

Proportional Band (PB) เป็นการเปลี่ยนแปลงของอินพุตที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ เอาต์พุตมากที่สุดในการควบคุมแบบสัดส่วน ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงผลตอบสนองของการควบคุมแบบสัดส่วน

การเกิด Off Set เป็นลักษณะของระบบควบคุมแบบสัดส่วน ทั้งนี้เนื่องจากระบบทำงานของระบบควบคุมนั้นไม่สามารถควบคุมระบบที่มีโหลดเปลี่ยนแปลงได้ดีเท่าที่ควรและในกรณีที่โหลดคงที่แต่เปลี่ยนค่าของระดับค่าเป้าหมาย (Set Point) ที่ควบคุมไปจะเกิด Off Set ขึ้นเช่นเดียวกัน โดยที่ค่า Off Set ความแตกต่างของอินพุตและเอาต์พุตที่สถานะคงที่เมื่อเป้าหมาย (Set Point) คงที่นั่นเอง และเราสามารถลดค่า Off Set ได้โดย

1. เพิ่มอัตราขยายแบบสัดส่วน
2. เพิ่มค่าสัญญาณจัดการที่สถานะเริ่มต้น (m_0) โดย $m_T = (K_p e) + m_0$
3. เปลี่ยนค่าเป้าหมาย

2.3.3 กริยาการควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral)

เป็นการควบคุมซึ่งค่าเอาต์พุตเป็นแบบสัดส่วนโดยตรงกับค่าอินทิกรัลเชิงเวลาของอินพุต โดยจะมีความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตของตัวควบคุม $M(t)$ และค่าความคลาดเคลื่อน $e(t)$ ดังนี้

$$m_i(t) = K_i \int_0^t e(t) dt + \overline{m}_i(0)$$

$$\text{หรือ} \quad \frac{dm(t)}{dt} = K_i d(t) \quad (2.7)$$

โดยที่ $m_i(t)$ = ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ I

K_i = ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบ I

$\int_0^t e(t) dt$ = พื้นที่ทั้งหมดของความคลาดเคลื่อน

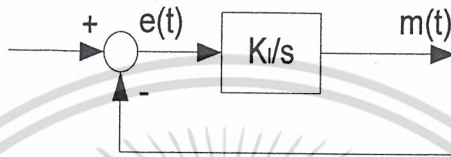
$\overline{m}_i(0)$ = เอาต์พุตของตัวควบคุมที่เวลา t มีค่าเป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer Function) ของตัวแปรควบคุมแบบอินทิกรัลคือ

$$\frac{M(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \tag{2.8}$$

โดยสามารถแสดงได้ในรูปของบล็อกไดอะแกรม ได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแบบ Integral

ในการควบคุมแบบอินทิกรัลนั้นค่าเอาต์พุทของตัวควบคุม $m(t)$ จะเปลี่ยนแปลงตามค่าผิดพลาด $e(t)$ ดังนั้น ถ้าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ทำให้ระบบได้ค่าที่ผิดไปจากค่าที่ต้องการแล้ว อุปกรณ์ควบคุมจะจัดการกับค่าความผิดพลาดโดยเร็ว โดยลดค่าความผิดพลาดนี้ให้หมดไปเมื่อตัวแปรควบคุมอยู่ที่ค่าเป้าหมายแล้วอุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายจะยังไม่ทำงานซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบอยู่ในสถานะที่คงที่แล้วนั่นเอง ดังนั้นการควบคุมแบบอินทิกรัลจะไม่ทำให้เกิดค่า Off Set ขึ้นมา ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงผลตอบสนองของการควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral) จากสัญญาณขั้นบันได

2.3.4 กริยาการควบคุมแบบเดริเวทีฟ (Derivative)

กริยาการควบคุมแบบ สัญญาณเอาต์พุทของตัวควบคุมจะขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความคลาดเคลื่อนต่อเวลา (Time Rate of Change of Error) จะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีโอกาสเป็นศูนย์ได้ และค่าเอาต์พุตก็สามารถเปลี่ยนแปลงให้มีค่าสูงขึ้น เมื่อความคลาดเคลื่อนเปลี่ยนแปลง ซึ่งเรียกการกระทำ ดังกล่าวว่า อัตราการกระทำ (Rate Action)

$$m_d(t) = K_d \frac{[e(t) - e(t_0)]}{(t - t_0)}$$

หรือ

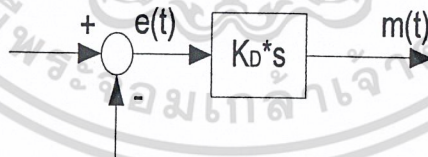
$$m_d(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.9)$$

ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer Function) ของตัวแปรควบคุมแบบเดริเวทีฟ คือ

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_d s \quad (2.10)$$

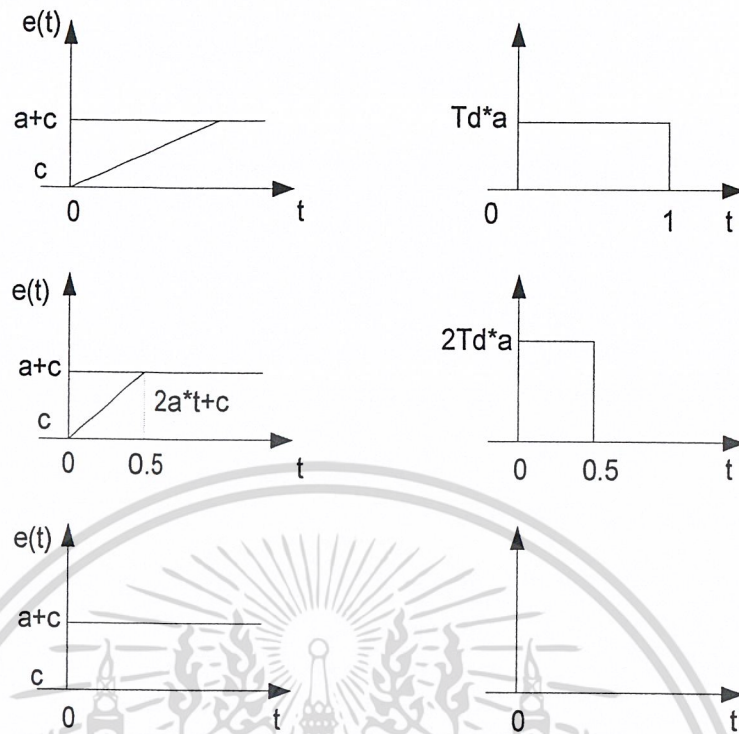
โดยที่ $m_d(t)$ = ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ D ที่เวลา t
 K_d = ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบ D
 $e(t)$ = ค่าความคลาดเคลื่อนที่เวลา t
 $e(t_0)$ = ค่าความคลาดเคลื่อนที่เวลา t_0

โดยสามารถแสดงได้ในรูปของบล็อกไดอะแกรม ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแบบ Derivative

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แสดงผลตอบสนองของการควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative) จากสัญญาณขั้นบันได

การควบคุมแบบนี้ เหมาะสำหรับกระบวนการที่มีเวลาหน่วง (Time Lag) มากเพราะสามารถ แก่ค่าความคลาดเคลื่อนโดยการกระทำล่วงหน้าก่อนที่จะมีการกระทำเกิดขึ้น จึงช่วยให้ผลตอบสนองของกระบวนการเร็วขึ้นแต่มีข้อเสียคือ การควบคุมมีความไวต่อสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อนมาก โดยเฉพาะกรณีที่หือมีค่ามาก ซึ่งจะทำให้เกิดค่าพุ่งเกินสูงได้ ดังนั้น จึงไม่เหมาะสมกับกระบวนการที่มีค่าเวลาหน่วงน้อยๆ และกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย เช่น ระบบควบคุมการไหล หรือระบบควบคุมความดัน เป็นต้น การควบคุมแบบนี้ไม่สามารถนำไปใช้งานแบบเดี่ยวได้ เพราะค่าความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์ จะทำให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นศูนย์

2.3.5 การควบคุมแบบ Proportional-Integral (PI)

ตามที่กล่าวมาแล้วว่าการควบคุมแบบ P นั้น จะมีออฟเซ็ทเกิดขึ้น ซึ่งการกำจัดค่าออฟเซ็ทนี้ ทำได้โดยการเพิ่มการควบคุมแบบ I เข้าไป ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบนี้ จะเป็นไป ตามสมการ

$$m_{pi}(t) = \bar{m} + K_p e(t) + K_p K_i \int_0^t e(t) dt$$

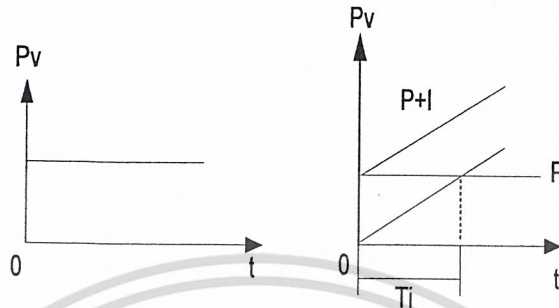
หรือ

$$m_{pi}(t) = \bar{m} + K_c e(t) + \frac{K_c}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $K_c = K_p$ และ $K_i = \frac{1}{T_i}$

T_i = เวลาในการอินทิเกรตหรือรีเซ็ต (Integral or Reset Time)



รูปที่ 2.11 แสดงผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ PI

นอกจากกริยาการควบคุมแบบ PI จะทำให้ค่าออฟเซ็ทที่สภาวะคงที่เป็นศูนย์แล้ว ยังช่วยลดค่าพุ่งเกินและการแกว่ง (Oscillation) ของระบบลงได้ แต่จะทำให้ Rise Time และ Setting มีค่ามากขึ้น

2.3.6 กริยาการควบคุมแบบ Proportional-Derivative (PD)

การประยุกต์ใช้กริยาการควบคุมแบบ D ร่วมกับกริยาการควบคุมแบบ P ก็เพื่อให้ผลตอบสนองของระบบรวดเร็วขึ้น แต่จะไม่มีผลโดยตรงต่อผลตอบสนองที่สภาวะคงที่ ซึ่งสมการเอาท์พุทของกริยาการควบคุมแบบ PD แสดงดังสมการ

$$m_{pd}(t) = \bar{m} + K_p e(t) + K_p K_d \frac{de(t)}{dt}$$

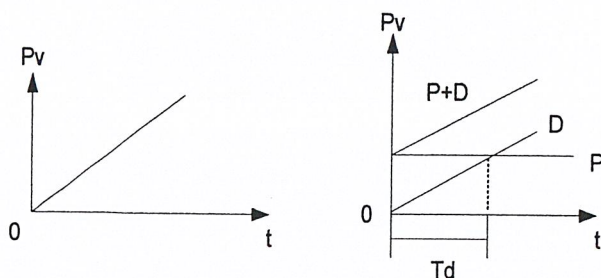
หรือ
$$m_{pd}(t) = \bar{m} + K_c e(t) + K_c T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.12)$$

เมื่อ $K_d = T_d$

T_d = ค่าของ Derivative or Rate Time

ข้อเสียของกริยาการควบคุมแบบนี้คือ ไม่สามารถทำให้ออฟเซ็ทของระบบลดลงหรือหมดไปได้และอาจทำให้ค่าพุ่งเกินของระบบมีค่าสูงขึ้น ผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ PD แสดงดังรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แสดงผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ PD

2.3.7 กริยาการควบคุมแบบ Proportional-Integral- Derivative (PID)

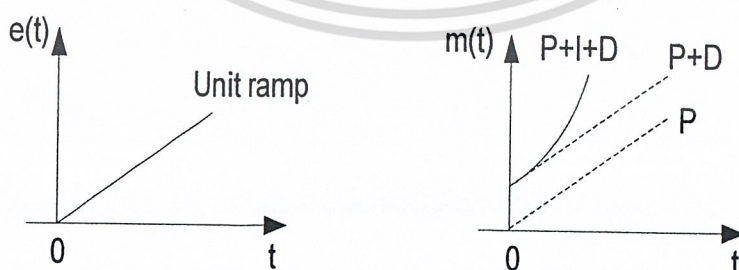
จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า กริยาการควบคุมแบบ PD ทำให้ระบบมีเสถียรภาพสัมพัทธ์ดีขึ้น (ผลตอบสนองเร็วขึ้น) แต่ไม่สามารถทำให้ค่าคลาดเคลื่อนหรือออฟเซตที่มีสภาวะคงที่มีค่าเป็นศูนย์ได้ ส่วนกริยาควบคุมแบบ PI ทำให้ค่าคลาดเคลื่อนหรือที่มีสภาวะคงที่ลดลงหรือหมดไปแต่ทำให้เสถียรภาพสัมพัทธ์ลดลง (Rise Time และ Setting Time มีค่ามากขึ้น) ดังนั้น บางครั้งเพื่อให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมมีสมรรถนะเป็นไปตามต้องการจึงต้องใช้กริยาการควบคุมทั้งสองแบบร่วมกัน ซึ่งจะทำให้กริยาการควบคุมแบบ PID ที่มีสมการสัญญาณเอาท์พุทดังสมการ

$$m_{pid}(t) = \bar{m} + K_p e(t) + K_p K_i \int_0^t e(t) dt + K_p K_d \frac{de(t)}{dt}$$

หรือ

$$m_{pid}(t) = \bar{m} + K_c e(t) + \frac{K_c}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_c T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.13)$$

ผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ PID แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ PID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ผลตอบสนองของระบบควบคุม

3.1 ระบบเกี่ยวกับระดับของของเหลว

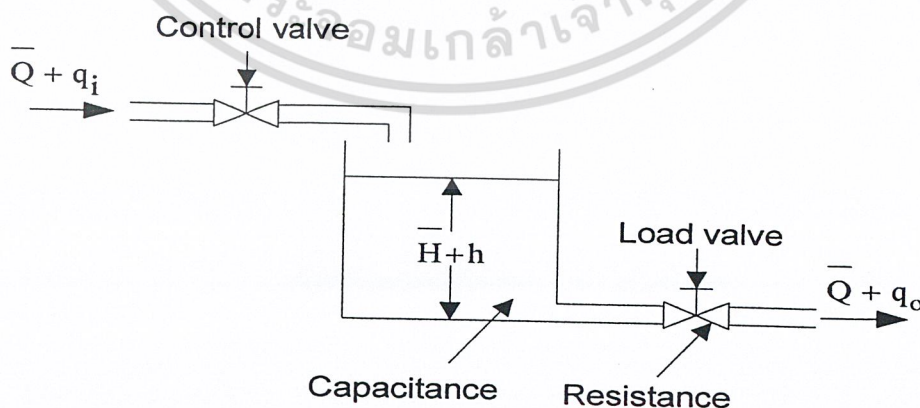
ในที่นี้จะพิจารณาถึงความต้านทาน (Resistance) และค่าความจุ (Capacitance) เพื่อที่จะอธิบายถึงคุณลักษณะทางพลศาสตร์ ของระบบเกี่ยวกับระดับของของเหลว

3.1.1 ค่าความต้านทาน

พิจารณาจากการไหลผ่านท่อสั้นๆ ที่ติดอยู่ระหว่างภาชนะบรรจุก (Tank) สองใบ ค่าความต้านทานการไหลของของเหลวในท่อหรือสิ่งกีดขวาง R จะกำหนดได้ว่าเป็นค่าความเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างของ ระดับของของเหลวของภาชนะบรรจุกทั้งสอง และทำให้อัตราการไหลเกิดการเปลี่ยนแปลงไปหนึ่งระดับ นั่นคือ

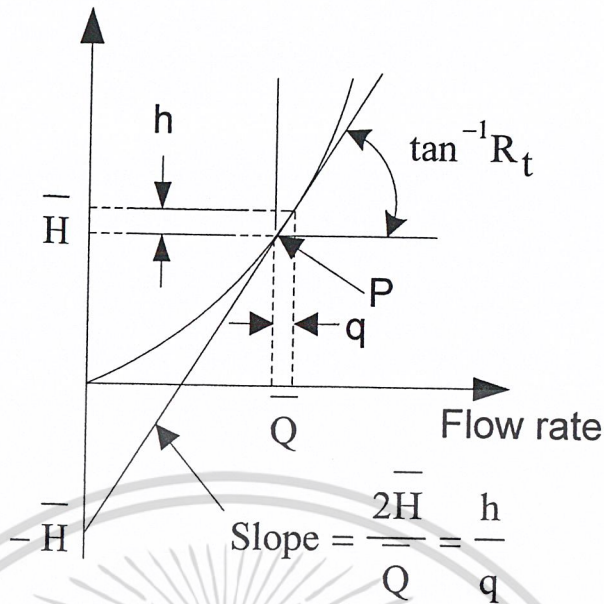
$$R = \frac{\text{change in level difference, m}}{\text{change in flow rate, m}^3/\text{sec}}$$

เนื่องจากว่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและความแตกต่างของระดับของของเหลว ในกรณีของการไหลแบบราบเรียบหรือสม่ำเสมอ (Laminar) กับ การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent) จะไม่เหมือนกัน ในที่นี้จะแยกการพิจารณาออกเป็นสองกรณี



รูปที่ 3.1 แสดงระบบเกี่ยวกับของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสูงกับอัตราการไหล

จากรูปที่ 3.2 ของเหลวจะไหลผ่าน Load Valve ออกจากภาชนะบรรจุ ถ้าการไหลผ่านสิ่งกีดขวางนี้เป็นการไหลแบบราบเรียบ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับระดับความสูงของเหลวในถังบรรจุที่ภาวะคงที่คือ

$$Q = KH \tag{3.1}$$

โดยที่ Q อัตราการไหลของของเหลวภาวะคงที่
 K ค่าสัมประสิทธิ์ m^2/sec
 H ระดับความสูงที่ภาวะคงที่ m

จะเห็นว่ากฎเกี่ยวกับการไหลแบบราบเรียบจะคล้ายคลึงกับกฎของ Coulomb ซึ่งกระแจะจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความต่างศักย์ ค่าความต้านทาน R_t คือ

$$R_t = \frac{dH}{dQ} = \frac{H}{Q} \tag{3.2}$$

ซึ่งถือว่ามีค่าคงที่ และเทียบได้กับค่าความต้านทานไฟฟ้าและสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน อัตราการไหลที่สภาวะคงที่ คือ

$$Q = K\sqrt{H} \quad (3.3)$$

ค่าความต้านทาน $R(t)$ คือ

$$R_t = \frac{dH}{dQ} \quad (3.4)$$

จากสมการของอัตราการไหล เขียนใหม่ได้ว่า

$$\begin{aligned} dQ &= \frac{K}{2\sqrt{H}} dH \\ \frac{dH}{dQ} &= \frac{2\sqrt{H}}{K} = \frac{2\sqrt{H}\sqrt{H}}{Q} = \frac{2H}{Q} \end{aligned} \quad (3.5)$$

ดังนั้น

$$R_t = \frac{2H}{Q} \quad (3.6)$$

ค่าความต้านทานของการไหลแบบปั่นป่วนขึ้นอยู่กับอัตราการไหลและระดับความสูง อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลและระดับความสูงมีค่าน้อย ค่าความต้านทานนี้อาจถือว่ามีความคงที่

ในทางปฏิบัติ จะไม่ทราบค่าของ K ดังนั้น ค่าความต้านทานจะหาได้จากเส้นโค้งที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสูงกับอัตราการไหล เส้นโค้งนี้จะได้มาจากการทดลอง โดยการหาความชัน (Slope) ของเส้นโค้งในช่วงการทำงานของระบบ ในกรณีของรูปข้างต้น จุด P จะเป็นจุดการทำงานที่สภาวะคงที่ ดังนั้นค่าความชันซึ่งก็คือค่าของความต้านทาน จะหาได้ดังนี้

$$P = \frac{h}{q} = \frac{2H}{Q} = R_t \quad (3.7)$$

นอกจากนี้แล้ว ค่าความต้านทานยังอาจจะหาจาก Process Reaction Curve ของระบบได้อีกวิธีหนึ่งด้วย

3.1.2 ค่าความจุ

ค่าความจุของภาชนะบรรจุ คือค่าที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณของของเหลวที่บรรจุในภาชนะ ต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับความสูงของภาชนะนั้น ซึ่งแสดงได้จากสมการ

$$C = \frac{\text{change in liquid stored, m}^3}{\text{change in head, m}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวได้ง่ายกว่าค่าความจุของภาชนะบรรจุ คือค่าของพื้นที่หน้าตัดของภาชนะบรรจุนั่นเอง แต่ไม่ใช่ของความจุในรูปปริมาตรของภาชนะบรรจุ นั้นและถ้าพื้นที่หน้าตัดของภาชนะบรรจุมีค่าคงที่ ค่าความจุก็จะมีค่าคงที่ไม่ว่าระดับความสูงจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรก็ตามฟังก์ชันถ่ายโอนจากรูปที่ 3.1 จะได้ว่า

$$Cdh = (q_i - q_0)dt \quad (3.8)$$

อัตราการไหลออกมีค่าเท่ากับ

$$q_0 = \frac{h}{R} \quad (3.9)$$

สมการ Differential คือ

$$RC \frac{dh}{dt} + h = Rq_i \quad (3.10)$$

โดยที่ R เป็นค่าความต้านทานของวาล์ว และถือว่ามีค่าคงที่
C เป็นค่าความจุของภาชนะบรรจุ และมีค่าคงที่
RC เป็นค่าเวลาคงที่ (Time Constant) ของระบบ
ทำการแปลงลาปลาซ จะได้

$$(RCs+1)H(s) = RQ_i(s) \quad (3.11)$$

ถ้าอัตราการไหลเข้า $Q_i(s)$ เป็นอินพุต และระดับความสูง $H(s)$ เป็นเอาต์พุต ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบคือ

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{R}{RCs+1} \quad (3.12)$$

ทำนองเดียวกัน ถ้าให้อัตราการไหลออก $Q_0(s)$ เป็นเอาต์พุต โดยที่อินพุตคงเดิม ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบคือ

$$\frac{Q_0(s)}{Q_i(s)} = \frac{1}{RCs+1} \quad (3.13)$$

โดยที่

$$Q_0(s) = \frac{1}{R} H(s) \quad (3.14)$$

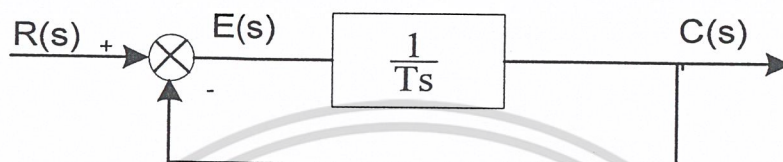
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ผลตอบสนองของระบบต่อสัญญาณอินพุทชนิดต่างๆ

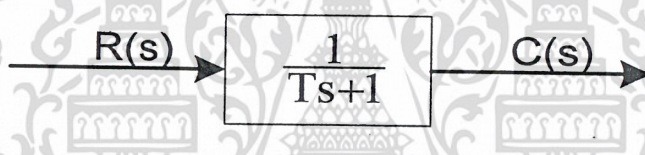
ในที่นี้จะพิจารณาผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่งและอันดับสอง ดังนี้

3.2.1 ระบบอันดับหนึ่ง (Response of First-Order-System)

พิจารณาระบบอันดับหนึ่งในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบอันดับหนึ่ง



รูปที่ 3.4 แสดงฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมแบบลูปปิด

จากรูปที่ 3.4 ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมแบบลูปปิด คือ

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ts+1} \quad (3.15)$$

สมการคุณลักษณะ คือ

$$\Delta(s) = Ts + 1 = 0$$

$$\text{หรือ } s = -1/T \quad (3.16)$$

ซึ่งแสดงว่า รากของสมการคุณลักษณะ หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Pole ของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบลูปปิด (Close Loop Pole) จะอยู่ที่ด้านซ้ายมือของแกน Real ในระนาบ s (s-plane)

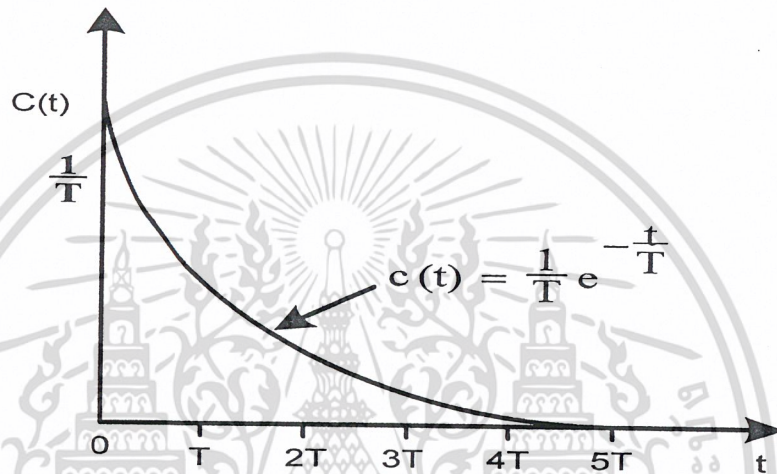
(Close Loop Pole $s = -1/T$ Open Loop Pole $s = 0$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการศึกษาลักษณะของผลตอบสนอง หรือเอาต์พุตของระบบ เมื่ออินพุต (หรือสัญญาณรบกวน) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอินพุตอ้างอิงประเภทต่างๆที่กล่าวมาข้างต้น ผลตอบสนองต่ออินพุตที่เป็น Unit Impulse (Unit Impulse Response) กรณีนี้ $R(s)$ มีค่าเท่ากับหนึ่ง ดังนั้น

$$c(t) = \frac{1}{T} e^{-t/T} \quad (t \geq 0) \quad (3.17)$$

ผลตอบสนองต่ออินพุตที่เป็น Unit Impulse แสดงได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงผลตอบสนองต่ออินพุตที่เป็น Unit Impulse

3.2.1.1 ผลตอบสนองอินพุตที่เป็น Unit Step (Unit Step Response)

กรณีนี้ $R(s)$ มีค่าเท่ากับ $1/s$ ดังนั้น

$$C(s) = \frac{1}{Ts+1} \cdot \frac{1}{s} \quad (3.18)$$

หรือโดยทำการ Partial Fraction Expansion

$$c(t) = 1 - e^{-t/T} = 0.632 \quad (t \geq 0) \quad (3.19)$$

คุณลักษณะที่สำคัญของผลตอบสนองต่อเวลาที่เป็นเส้นโค้งในรูปของ Exponential Curve คือ เมื่อ $t = T$ ต่อของผลตอบสนองต่อเวลาจะมีค่าเท่ากับ 63.2% ของค่าสุดท้ายที่สภาวะคงที่

$$c(t) = 1 - e^{-1} \quad (3.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ จะเห็นว่าเมื่อระบบอยู่ในสภาวะแรกเริ่มค่าของ $c(t)$ จะเท่ากับศูนย์ และเมื่อเข้าสู่สภาวะคงที่ ค่าของ $c(t)$ จะเท่ากับหนึ่ง หรือหมายถึงว่าระบบอันดับหนึ่งเฉพาะกรณี ตัวอย่างในรูปที่ 3.5 ข้างต้นนั้น มีค่าความคลาดเคลื่อนที่ภาวะคงที่เท่ากับศูนย์ หรือระบบมีความเที่ยงตรงสูง ค่าของเอาต์พุตสามารถเปลี่ยนแปลงไปตามค่าของอินพุตที่ต้องการได้และค่าความคลาดเคลื่อน คือ

$$e(t) = r(t) - c(t) \quad (3.21)$$

โดยที่ $e(t)$ ค่าความคลาดเคลื่อน
ค่าความคลาดเคลื่อนที่ภาวะคงที่ $e_{ss}(t)$ จะหาได้จาก

$$e_{ss}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) \quad (3.22)$$

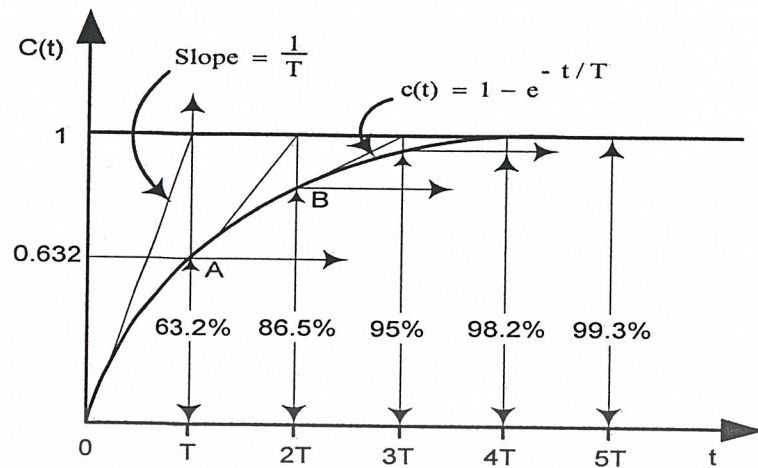
$$\frac{dc}{dt} = \frac{1}{T} e^{-t/T} \Big|_{t=0} = \frac{1}{T} \quad (3.23)$$

สิ่งที่พึงสังเกตอีกประการหนึ่งคือ ถ้าค่าของ T ซึ่งเป็นค่าเวลาคงที่ของระบบ มีค่าน้อย ผลตอบสนองจะเร็ว และความชันที่สภาวะเริ่มแรกของผลตอบสนองจะหาได้จากสมการที่ (3.23) ซึ่งหมายความว่า ถ้าผลตอบสนองต่อเวลาสามารถรักษาความเร็วของการเปลี่ยนแปลงให้เท่ากับความเร็วที่สภาวะเริ่มแรกดังสมการข้างต้นได้ ผลตอบสนองต่อเวลา $c(t)$ จะมีค่าเท่ากับค่าที่ต้องการได้ เมื่อเวลาผ่าน $t = T$ ไปแต่อย่างไรก็ตาม จะเห็นว่าความชันของผลตอบสนองจะลดลงเรื่อยๆ จากค่า $1/T$ ที่เวลาไปเป็น ที่เวลา $t=0$ ไปเป็น 0 ที่เวลา $t = \infty$

ผลตอบสนองต่ออินพุตที่เป็น Unit Step แสดงได้ดังรูปที่ 3.6

ที่	$t = T$	$c(t) = 63.2\%$	ของค่าสุดท้ายที่ภาวะคงที่
	$t = 2T$	$c(t) = 86.5\%$	ของค่าสุดท้ายที่ภาวะคงที่
	$t = 3T$	$c(t) = 95\%$	ของค่าสุดท้ายที่ภาวะคงที่
	$t = 4T$	$c(t) = 98.2\%$	ของค่าสุดท้ายที่ภาวะคงที่
	$t = 5T$	$c(t) = 99.3\%$	ของค่าสุดท้ายที่ภาวะคงที่

แสดงว่าเมื่อ $t \geq 4T$ ผลตอบสนองต่อเวลาจะมีค่าอยู่ในช่วง 2% ของค่าสุดท้าย และโดยทั่วไปแล้วจะถือว่า เมื่อผลตอบสนองต่อเวลา มีค่าเข้าสู่ช่วง 2% ของค่าสุดท้าย จะเป็นการเข้าสู่สภาวะคงที่ จะเป็นการเข้าสู่สภาวะคงที่ หรือเป็นการเปลี่ยนสภาวะจากผลตอบสนองชั่วคราวไปเป็นผลตอบสนองที่สภาวะคงที่



รูปที่ 3.6 แสดงผลตอบสนองต่ออินพุทที่เป็น Unit Step

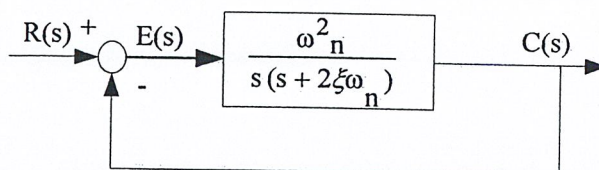
สรุปพฤติกรรมของระบบอันดับหนึ่ง

1. รากของสมการคุณลักษณะ (หรือ Pole ของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบรูปปิด) จะอยู่บนแกน Real ทางครึ่งซ้าย ในระนาบ s (ถ้าอยู่ทางครึ่งขวา ระบบจะไม่มีเสถียรภาพ)
2. พฤติกรรมทางพลศาสตร์ของผลตอบสนองต่อเวลา(เอาต์พุท)จะอยู่ในรูปของ Exponential Curve
3. ความเร็วของผลตอบสนองต่อเวลาในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของอินพุท จะขึ้นอยู่กับค่าเวลาคงที่ (Time Constant) ของระบบ ถ้า T มีค่าน้อยเอาต์พุทจะเปลี่ยนแปลงตามอินพุทได้รวดเร็ว
4. ผลตอบสนองต่อเวลาจะเข้าสู่สภาวะคงที่ เมื่อเวลาผ่านไป 4 เท่าของ Time Constant

3.2.2 ระบบอันดับสอง (Second Order Systems)

พิจารณาอันดับสองในรูปที่ 3.7 โดยที่การป้อนกลับจะเป็นแบบ Unity Feedback

$$H(s)=1$$



รูปที่ 3.7 แสดงบล็อกไดอะแกรมระบบอันดับสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันถ่ายโอนของลูปิดคือ

$$G(s) = \frac{C(s)}{E(s)} = \frac{\omega_n^2}{s(s + 2\xi\omega_n)} \quad (3.24)$$

โดยที่ ξ และ ω_n เป็นค่าจริง และมีค่าคงที่และฟังก์ชันถ่ายโอนของลูปิด คือ

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.25)$$

สมการคุณลักษณะของลูปิด คือ

$$\Delta(s) = s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 \quad (3.26)$$

โดยที่ ξ Damping Ratio
 ω_n Undamped Natural Frequency

พฤติกรรมทางพลศาสตร์ของระบบอันดับสองสามารถอธิบายได้ในเทอมของพารามิเตอร์สองตัวคือ ξ และ ω_n โดยที่พิจารณาได้เป็น 5 กรณีคือ

1. กรณี Undamped ($\xi = 0$)

กรณีนี้ รากของสมการคุณลักษณะ หรือ Pole ของลูปิด จะอยู่บนแกน Imaginary ในระนาบ s ซึ่งเอาที่พหุของระบบจะเกิดการแกว่ง (Oscillate) อย่างต่อเนื่องกันไป

2. กรณี Underdamped ($0 < \xi < 1$)

กรณีนี้ รากของสมการคุณลักษณะ จะเป็นสมการเชิงซ้อน (Complex Conjugate) และอยู่ในครึ่งซีกในระนาบ s และระบบจะเป็นแบบ Underdamped ซึ่งผลตอบสนองชั่วครู่ของระบบจะเกิดการแกว่งภายใต้การหน่วง

3. กรณี Critical Damped ($\xi = 1$)

กรณีนี้ รากของสมการคุณลักษณะจะมีค่าเท่ากันและอยู่บนแกน Real ทาง ครึ่งซ้ายในระนาบ s ซึ่งผลตอบสนองต่อเวลาของระบบจะเหมือนหรือคล้ายกับผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่ง และไม่มีแกว่ง

4. กรณี Overdamped ($\xi > 1$)

กรณีนี้ รากของสมการคุณลักษณะจะมีค่าไม่เท่ากันและอยู่บนแกน Real ทาง ครึ่งซ้ายในระนาบ s ทั้งหมด ผลตอบสนองต่อเวลาของระบบจะเหมือนหรือคล้ายกับผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่ง และไม่มีแกว่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. กรณี Negative Damped ($\xi < 1$)

กรณีนี้ รากของสมการคุณลักษณะจะอยู่บนแกน Real ทาง ครึ่งขวาในระนาบ s และระบบ ไม่มีเสถียรภาพ ต่อไป จะพิจารณาผลตอบสนองต่อเวลาของระบบอันดับสองต่ออินพุทแบบต่างๆ

3.2.2.1 ผลตอบสนองต่ออินพุทที่เป็น Unit Step (Unit Step Response)

กรณี Undamped ($\xi = 0$)

จากสมการทั่วไปของฟังก์ชันถ่ายโอนของลูปปิด คือ

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.27)$$

เมื่อ $\xi = 0$ จะได้ว่า

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + \omega_n^2} \quad (3.28)$$

สมการคุณลักษณะของลูปปิด คือ

$$\Delta(s) = s^2 + \omega_n^2 = 0 \quad (3.29)$$

รากของสมการคุณลักษณะ คือ

$$s_1, s_2 = \pm j\omega_n \quad (3.30)$$

นั่นคือ รากของสมการคุณลักษณะจะอยู่บนแกน Imaginary ในระนาบ s โดยมีค่าเท่ากับ ω_n และเมื่ออินพุทเป็น Unit Step $R(s)$ มีค่าเท่ากับ $1/s$ จะได้ว่า

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s^2 + \omega_n^2)} \quad (3.31)$$

ทำการแปลงลาปลาซ จะได้

$$c(t) = 1 - \cos\omega_n t \quad (t \geq 0) \quad (3.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นคือเมื่อ $\xi = 0$ เอาท์พุทของระบบจะเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่องกันไป โดยที่ความถี่ของการแกว่งคือ ω_n

กรณี Underdamped ($0 < \xi < 1$)

สมการคุณลักษณะของรูปปิด คือ

$$\Delta(s) = s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (3.33)$$

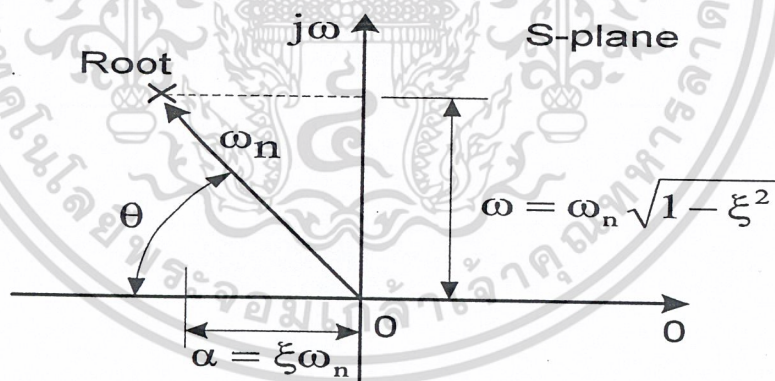
รากของสมการคุณลักษณะ คือ

$$\begin{aligned} s_1, s_2 &= -j\omega_n \pm j\omega_n \sqrt{1-\xi^2} \\ &= -\alpha \pm j\omega \end{aligned} \quad (3.34)$$

โดยที่ α Damping Factor หรือ Damping Constant

ω Damped Natural Frequency

ดังนั้น เมื่อนำไปกำหนดจุดไว้บนระนาบ s จะแสดงได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงการกำหนดจุดไว้บนระนาบ s

โดยจะได้ความสัมพันธ์ที่สำคัญคือ

$$\xi = \text{Damping Ratio} = \frac{\alpha}{\omega_n}$$

$$\omega = \omega_n \sqrt{1-\xi^2}$$

$$\xi = \cos \theta$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่ออินพุทเป็น Unit Step $R(s)$ มีค่าเท่ากับ $1/s$ จะได้ว่า

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (3.35)$$

ทำการแปลงลาปลาซ จะได้

$$c(t) = 1 - \frac{e^{-\xi\omega_n t}}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin(\omega_n \sqrt{1-\xi^2} t + \cos^{-1}\xi) \quad (t \geq 0) \quad (3.36)$$

จะเห็นว่าผลตอบสนองของระบบจะเกิดการแกว่งอย่างชั่วคราวด้วยความถี่ ω และแปรค่าไปตามอัตราการหน่วง ξ ค่าความคลาดเคลื่อนจะหาได้จาก

$$\begin{aligned} e(t) &= r(t) - c(t) \\ &= \frac{e^{-\xi\omega_n t}}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin(\omega_n \sqrt{1-\xi^2} t + \cos^{-1}\xi) \quad (t \geq 0) \end{aligned} \quad (3.37)$$

นั่นคือ ค่าความคลาดเคลื่อนของระบบจะเกิดการแกว่งที่มีการหน่วงและเมื่อเข้าสู่สภาวะคงที่ ค่าความคลาดเคลื่อนจะมีค่าเท่ากับศูนย์หนึ่ง ค่าของ ω จะต้องน้อยกว่า ω_n เสมอ กรณี Critical Damped ($\xi = 1$) กรณีนี้รากของสมการคุณลักษณะจะมีค่าเท่ากัน นั่นคือ

$$s_1, s_2 = -\omega_n \quad (3.38)$$

เมื่ออินพุทเป็น Unit Step จะได้ว่า

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{(s + \omega_n)^2 s} \quad (3.39)$$

ทำการแปลงลาปลาซ จะได้

$$c(t) = 1 - e^{-\omega_n t} (1 + \omega_n t) \quad (t \geq 0) \quad (3.40)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าผลตอบสนองของระบบอันดับสองนี้ไม่มีการแกว่ง

กรณี Overdamped ($\xi > 1$)

กรณีนี้รากของสมการคุณลักษณะจะมีค่าไม่เท่ากัน แต่จะเป็นค่าจริงที่เป็นลบทั้งสองค่า นั่นคือ

$$\begin{aligned} s_1 &= -(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1})\omega_n \\ s_2 &= -(\xi - \sqrt{\xi^2 - 1})\omega_n \end{aligned} \quad (3.41)$$

และเมื่ออินพุทเป็น Unit Step จะได้ว่า

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{(s + \xi\omega_n + \omega_n\sqrt{\xi^2 - 1})(s + \xi\omega_n - \omega_n\sqrt{\xi^2 - 1})s} \quad (3.42)$$

ทำการแปลงลาปลาซ จะได้

$$c(t) = 1 + \frac{\omega_n}{2\sqrt{\xi^2 - 1}} \left(\frac{e^{-s_1 t}}{s_1} - \frac{e^{-s_2 t}}{s_2} \right) \quad (t \geq 0) \quad (3.43)$$

จะเห็นว่าผลตอบสนองของระบบอันดับสองนี้จะคล้ายกับผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่ง และประกอบไปด้วยเทอมของ Exponential ที่มีกำลังลบสองเทอม ซึ่งการลดลงของ Exponential อันหนึ่งจะเร็วกว่าอีกอันหนึ่งดังนั้นในเทอมของ Exponential ที่ลดลงเร็ว หมายถึง Time Constant ที่มีค่าน้อย อาจจะตัดทิ้งได้เพราะมีผลต่อผลตอบสนองที่น้อย

3.3 ข้อกำหนด (Specification) ของระบบ

ข้อกำหนด (Specification) คือพารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องทราบในการออกแบบตัวควบคุม ค่าเหล่านี้แสดงให้ทราบถึงการตอบสนองในสถานะชั่วคราวของระบบควบคุมอินพุทที่เป็น Unit Step ข้อกำหนดที่สำคัญประกอบด้วย

1. Overshoot (m_p) ค่าความแตกต่างระหว่างเอาต์พุทที่มีค่าสูงสุดและเอาต์พุทที่สถานะอยู่ตัวของระบบ ในบางครั้งอาจแสดงอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินสูงสุด ($\%m_p$)

โดย C_{max} ค่าสูงสุดของเอาต์พุท

c_{ss} คือค่าของเอาต์พุทที่สถานะอยู่ตัว

2. Delay Time (t_d) คือช่วงเวลาที่ผลตอบสนองในสถานะชั่วคราวของระบบมีค่าเข้าสู่ 50% ของค่าที่สถานะอยู่ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

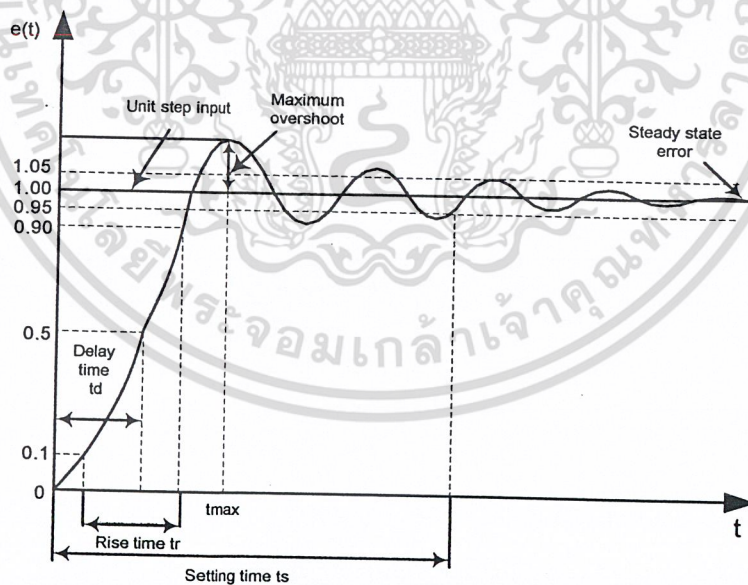
3. Rise Time (t_r) เป็นช่วงเวลาที่ผลตอบสนองในสภาวะชั่วคราวของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 10% เป็น 90% ของค่าสถานะอยู่ตัว ในบางกรณีค่าช่วงเวลาขาขึ้นหมายถึงช่วงเวลาที่ผลตอบสนองมีค่าจาก 5% ถึง 95% หรือ 0% ถึง 100% ของค่าสถานะอยู่ตัวก็ได้ ถ้าค่าช่วงเวลาขาขึ้นมีค่าน้อย หมายถึงระบบนั้นมีการตอบสนองเร็ว นอกจากนี้นี้อาจหมายถึงค่าเวลาที่ใช้ไปสำหรับให้ผลตอบสนองมีค่าเท่ากับค่าสุดท้ายของการตอบสนองในสถานะอยู่ตัวเป็นครั้งแรก

4. Setting Time (t_s) คือช่วงเวลาที่มิผลการตอบสนองของระบบมีค่าเข้าสู่ช่วงหรือของค่าที่สถานะอยู่ตัวและมีค่าอยู่ในช่วงนี้ตลอดไป หรือหมายถึงค่าของเวลาที่ผลตอบสนองในสภาวะชั่วคราวเปลี่ยนแปลงไปเป็นการตอบสนองในสถานะอยู่ตัว

5. Peak Time (t_p) ของเวลาที่ผลตอบสนองในสภาวะชั่วคราวของระบบเกิดค่าพุ่งเกินสูงสุด

6. Steady-State Error (e_{ss}) เป็นค่าความแตกต่างของเอาต์พุตของระบบกับค่าปรับตั้งในขณะที่ระบบอยู่ในสถานะอยู่ตัวน้อยที่สุด ระบบที่มีการหน่วงแบบวิกฤต(Critical damp) และ Overdamped เป็นระบบที่ไม่มีค่า t_p และ m_p

ข้อกำหนดต่างๆ เหล่านี้ใช้สำหรับวัดคุณลักษณะของผลตอบสนองในสภาวะชั่วคราวต่ออินพุตแบบ Unit Step ของระบบที่มีเสถียรภาพเท่านั้น เนื่องจากในระบบที่ไม่มีเสถียรภาพผลของการตอบสนองของระบบจะมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ และควบคุมไม่ได้



รูปที่ 3.9 แสดงคุณลักษณะการตอบสนอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 การคำนวณหาค่าของข้อกำหนดต่างๆของผลตอบสนองชั่วครู่ของระบบอันดับสอง ในหัวข้อนี้จะแสดงถึงวิธีการหา Peak Time , Maximum Overshoot , Delay Time , Rise Time , Setting Time ตามลำดับ

พิจารณาเอาท์พุทของระบบอันดับสองที่มีอินพุทแบบ Unit Step

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (3.44)$$

และผลตอบสนองต่อเวลาคือ

$$c(t) = 1 - \frac{e^{-\xi\omega_n t}}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin(\omega_n \sqrt{1-\xi^2} t + \cos^{-1}\xi) \quad (t \geq 0) \quad (3.45)$$

โดยที่ค่าต่างๆเหล่านี้จะอยู่ในเทอมของ ξ และ ω_n และในที่นี้จะกำหนดให้ระบบอันดับสองนี้เป็น Underdamped

1. Peak Time t_p จากสมการข้างต้น ทำการหาค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งเทียบกับเวลาและให้ค่าอนุพันธ์ที่หาได้มีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$\frac{dc(t)}{dt} = \frac{\omega_n e^{-\xi\omega_n t}}{\sqrt{1-\xi^2}} \left[\xi \sin(\omega t + \theta) - \sqrt{1-\xi^2} \cos(\omega t + \theta) \right] \quad (t \geq 0)$$

จัดรูปใหม่ได้คือ

$$\frac{dc(t)}{dt} = \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_n t} \sin \omega_n \sqrt{1-\xi^2} t \quad (t \geq 0) \quad (3.46)$$

กำหนดให้ $\frac{dc(t)}{dt}$ มีค่าเท่ากับ 0 จะได้ว่า

$$\sin \omega_n \sqrt{1-\xi^2} t = 0$$

หรือ

$$\omega_n \sqrt{1-\xi^2} t = n\pi \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นคือ

$$t = \frac{n\pi}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}} \quad n = 0, 1, 2 \quad (3.47)$$

ค่าสูงสุดครั้งแรกของผลตอบสนองชั่วคราวของระบบจะเกิดขึ้นเมื่อ $n = 1$ ดังนั้น t_p (t_{\max}) จะหาได้จาก

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}} \quad (3.48)$$

โดยทั่วไป สำหรับค่าต่างๆ ของ n ที่เป็นเลขคี่ ($n = 1, 3, 5, \dots$) สมการข้างต้นจะแสดงถึงเวลาต่างๆที่เกิด Overshoot ขึ้น และ n ที่เป็นเลขคู่ ($n = 2, 4, 6, \dots$) นั้น จะเป็นเวลาที่เกิด Undershoot

2. Maximum Overshoot (M_p) จะเกิดขึ้นที่เวลา Peak Time t_p ดังนั้นแทนค่า $t = t_p$ ลงในสมการของผลตอบสนองต่อเวลา จะได้ว่า

$$c(t) \Big|_{\max \text{ or } \min} = 1 - \frac{e^{-n\pi\xi/\sqrt{1-\xi^2}}}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin(n\pi + \theta) \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

หรือ

$$c(t) \Big|_{\max \text{ or } \min} = 1 + (-1)^{n-1} e^{-n\pi\xi/\sqrt{1-\xi^2}} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.49)$$

Maximum Overshoot จะเกิดขึ้นที่ $n = 1$ นั่นคือ

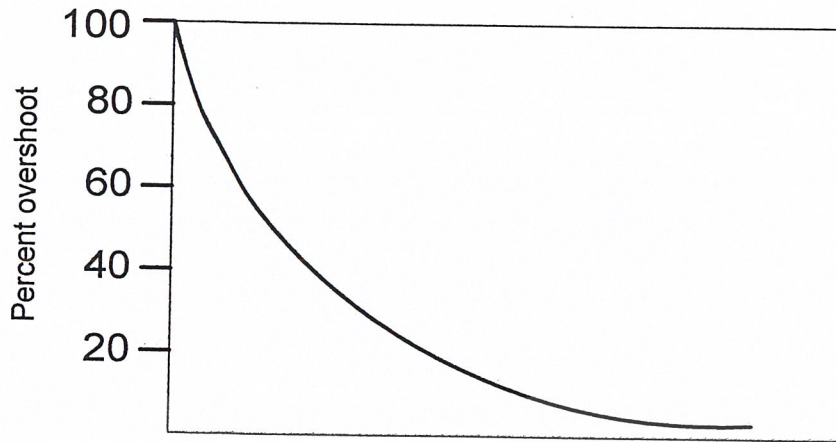
$$c_{\max} - 1 = e^{-\pi/\sqrt{1-\xi^2}}$$

และ

$$\text{Percent Maximum Overshoot} = 100e^{-\pi/\sqrt{1-\xi^2}} \quad (3.50)$$

จะเห็นว่า Maximum Overshoot ของระบบอันดับสองขึ้นอยู่กับอัตราการหน่วง ξ เท่านั้น รูปที่ 3.10 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง Percent Maximum Overshoot ต่ออัตราการหน่วง ξ จะเห็นว่าถ้า ξ อยู่ในช่วงระหว่าง 0.4-0.8 แล้ว Percent Maximum Overshoot ของผลตอบสนองของระบบ จะมีค่าอยู่ระหว่าง 25% - 2.5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



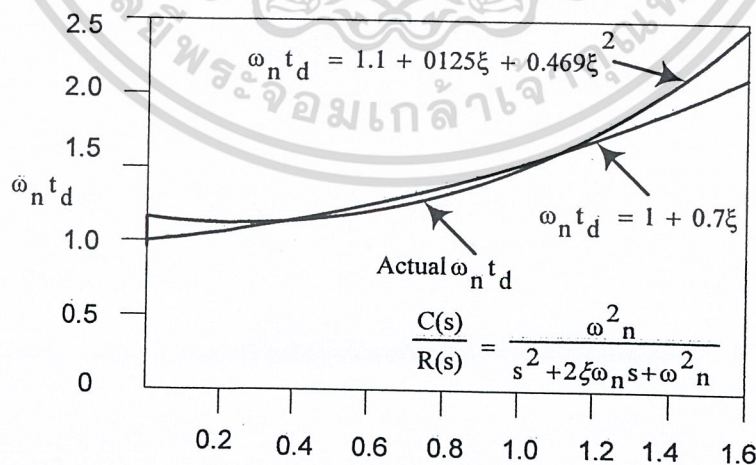
รูปที่ 3.10 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง Percent Maximum Overshoot

3. Delay Time t_d การหาค่าที่แน่นอนของ Delay Time นั้นทำได้โดยการแทนค่าของผลตอบสนองเวลา $c(t)$ ให้เท่ากับ 0.5 แล้วหาค่าของ t_d ซึ่งเป็นวิธีที่ค่อนข้างจะยาก วิธีที่ง่ายกว่าก็คือการนำเอาค่าของ $\omega_n t_d$ ต่อค่าต่างๆของ ξ มา Plot ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ซึ่งจะเห็นว่า ตลอดย่านของ $0 < \xi < 1$ เส้นโค้งนี้สามารถจะประมาณได้ด้วยเส้นตรง นั่นคือ

$$t_d \cong \frac{1 + 0.7\xi}{\omega_n} \quad 0 < \xi < 1.0 \tag{3.51}$$

หรือทำการประมาณค่าของ t_d ด้วยสมการอันดับสองจะได้

$$t_d \cong \frac{1.1 + 0.125\xi + 0.469\xi^2}{\omega_n} \tag{3.52}$$



รูปที่ 3.11 แสดงการนำเอาค่าของ $\omega_n t_d$ ต่อค่าต่างๆของ ξ มา Plot

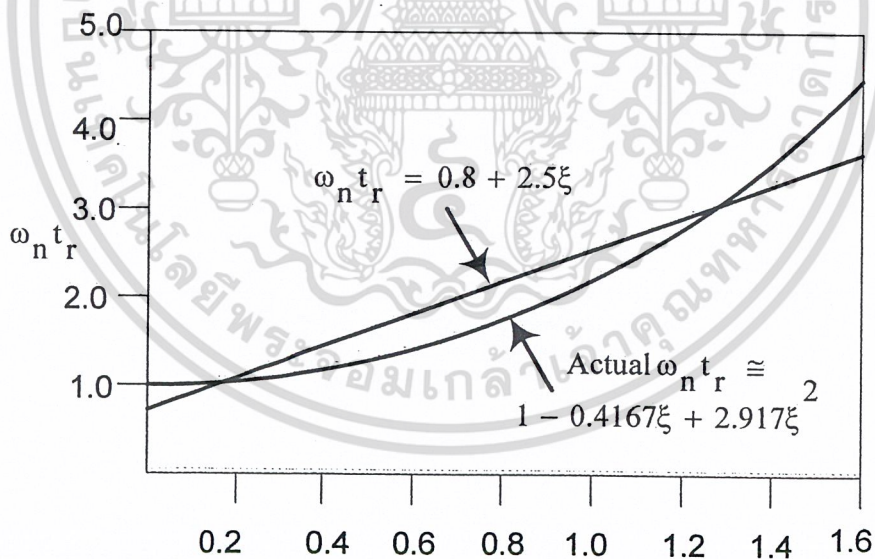
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Rise Time t_r การหาค่าของ Rise Time ในทางคณิตศาสตร์นั้น การใช้กรณีของการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองต่อเวลา $c(t)$ ที่เปลี่ยนแปลงจาก 0%- 100% ของค่าที่สภาวะคงที่ และกำหนดให้ผลตอบสนองต่อเวลา $c(t)$ ที่ค่าเท่ากับ 1 จากนั้นหาค่าของ t_r ออกมา ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในทางคณิตศาสตร์ แต่วิธีที่ง่ายกว่าก็คือการนำเอาค่าของ $\omega_n t_r$ ต่อค่าต่างๆของ ξ มา Plot เช่นเดียวกันกับกรณีของ Delay Time ดังรูปที่ 3.12 โดยที่ในกรณีนี้ จะให้ $c(t)$ มีค่าเปลี่ยนแปลงจาก 10% - 90% ของค่าที่สภาวะคงที่ ซึ่งจะเห็นว่า ตลอดย่านของ $0 < \xi < 1$ เส้นโค้งนี้สามารถจะประมาณได้ด้วยเส้นตรง นั่นคือ

$$t_r \cong \frac{0.8 + 2.5\xi}{\omega_n} \quad 0 < \xi < 1 \quad (3.53)$$

หรือทำการประมาณค่าของด้วยสมการอันดับสอง จะได้

$$t_r \cong \frac{1 - 0.4167\xi + 2.917\xi^2}{\omega_n} \quad 0 < \xi < 1 \quad (3.54)$$



รูปที่ 3.12 แสดงการนำเอาค่าของ $\omega_n t_r$ ต่อค่าต่างๆของ ξ มา Plot

5. Setting Time t_s ของระบบอันดับสองต่ออินพุทแบบ Unit Step จะสามารถวัดออกมาได้ เมื่อ Maximum Overshoot มีค่ามากกว่า 5% ซึ่งจะสอดคล้องกับอัตราการหน่วงที่อยู่ในช่วง $0 < \xi < 0.69$ การหาค่าของ Setting Time ที่แน่นอนก็ค่อนข้างจะทำได้ยากเช่นกัน แต่ในกรณีของ $0 < \xi < 0.69$ นั้นสามารถใช้วิธีการประมาณได้โดยใช้กรอบ (Envelope) ของผลตอบสนองต่อเวลามา คำนวณโดยที่กำหนดให้

$$1 + \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_n t_s} = 1.05$$

นั่นคือ

$$\omega_n t_s = -\frac{1}{\xi} \ln(0.05\sqrt{1-\xi^2})$$

จะได้

$$t_s \approx \frac{3.2}{\xi\omega_n}$$

$$0 < \xi < 0.69$$

(3.55)

หรือในกรณีทั่วไป

$$t_s = \frac{4}{\xi\omega_n}$$

(2% criterion)

$$t_s = \frac{3}{\xi\omega_n}$$

(5% criterion)

เทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Maximum Overshoot , Delay Time , Rise Time , และ Setting Time แล้วจะพบว่า สำหรับ ξ ที่มีค่าน้อยๆแล้ว Delay Time และ Rise Time จะมีค่าน้อย แต่ Maximum Overshoot และ Setting Time จะมีค่ามาก ดังนั้น ถ้าต้องการทำให้ผลตอบสนองเข้าสู่สถานะคงที่ได้เร็ว และมีค่าของ Maximum Overshoot ไม่มากแล้วค่าของ ξ จะต้องไม่น้อยเกินไป

บทที่ 4

การออกแบบการหาค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติ

4.1 บทนำ

วิธีของ Auto-tuning เป็นวิธีการที่จะหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบอัตโนมัติ ตามความต้องการของผู้ใช้งาน ซึ่งสามารถช่วยแก้ปัญหาการขาดผู้ชำนาญและลดเวลาในการหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมลงได้ในระดับหนึ่ง โดยผู้ใช้เพียงแต่กดปุ่ม และป้อนค่าเป้าหมายไปยังตัวควบคุม เพื่อให้ระบบ Auto-Tuning ทำงาน และในอุตสาหกรรมตัวควบคุมที่ได้รับความนิยมและมีใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตก็คือตัวควบคุมแบบ PID

ขั้นตอนการทำงานของ Auto-Tuning มี 5 ขั้นตอนด้วยกัน คือ

1. เป็นขั้นตอนการกระตุ้นให้อยู่ในโหมด Auto-tuning
2. สร้างอินพุตแบบ Relay ให้กับกระบวนการ
3. เป็นการประมาณค่าผลตอบสนองของกระบวนการหลังจากป้อนสัญญาณ Relay
4. คำนวณค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม
5. ปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

สมการของตัวควบคุมแบบ PID คือ

$$\begin{aligned} e(t) &= u_c(t) - y(t) \\ u(t) &= Ke(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt + T_d \frac{de}{dt} \end{aligned} \quad (4.1)$$

ถ้าเกิดระบบไม่เป็นเชิงเส้นสามารถอธิบายการทำงานของ ด้วยฟังก์ชัน f ดังนั้นตัว PID สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$\begin{aligned} u(t) &= f(v(t)) \\ V(t) &= P(t) + I(t) + D(t) \\ P(t) &= K(bu_c(t) - y(t)) \\ \frac{dI}{dt} &= \frac{K}{T_i}(u_c(t) - y(t)) + \frac{1}{T_t}(v(t) - u(t)) \\ \frac{T_d}{N} \frac{dD}{dt} &= -D - KT_d \frac{dy}{dt} \end{aligned}$$

โดยค่าพารามิเตอร์คือ K, T_i, T_d

และมีค่าพารามิเตอร์ภายในคือ $b, T_t \cong T_i/N, N \cong 10$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 Auto Tuning methods

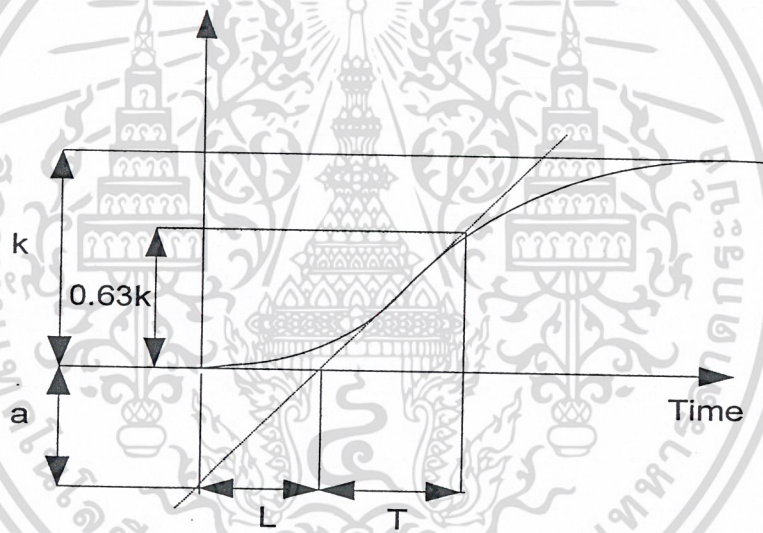
แบ่งออกเป็น 2 ช่วงการทำงานด้วยกัน

1. Transient response method
2. Closed loop method

4.2.1 Transient response method

Step response ฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการจะประมาณได้ด้วยระบบอันดับหนึ่งแบบมีการหน่วงเวลา คือ

$$G(s) = \frac{ke^{-sL}}{1 + Ts} \quad (4.2)$$



รูปที่ 4.1 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการแบบ first order

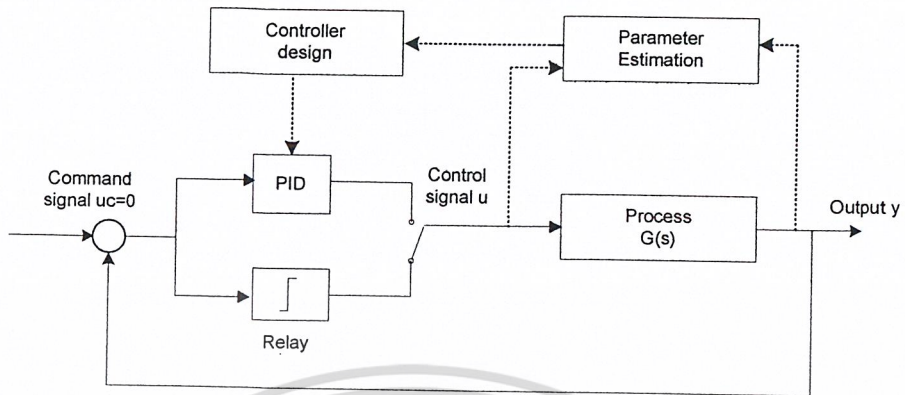
ตารางที่ 4.1 แสดงสมการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ตามวิธีของ Ziegler-Nichols step response tuning

Controller	Kc	Ti	Td
P	1/a	0	0
PI	0.9/a	3L	0
PID	1.2/a	2L	L/2

ซึ่งสมการนี้เหมาะสมกับช่วง $0.1 \leq \frac{L}{T} \leq 0.6$

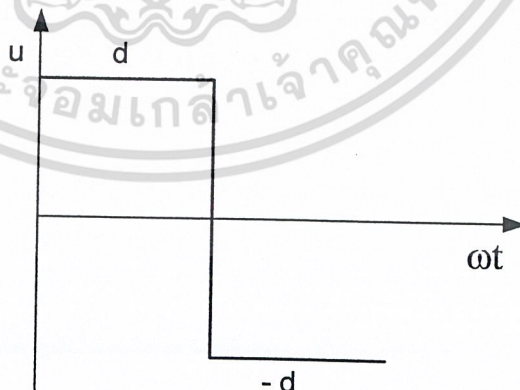
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 Closed loop method by Relay



รูปที่ 4.2 แสดงบล็อกการทำงานของ Auto-Tuning โดยวิธี Relay

หลายกระบวนการจะบอกค่าขีดจำกัดของค่าสูงสุดของการเกิดการแกว่งแกว่งภายใต้ relay คุณสมบัติของกระบวนการที่สำคัญ เช่น Gain ที่ทำให้เกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง และระยะเวลาของการเกิดการแกว่ง สามารถหาได้จากค่าจำกัดค่าของสัญญาณของการแกว่งและให้ระยะเวลาที่จำกัดการแกว่งเท่ากับหนึ่งลูกคลื่นสัญญาณเท่ากับ T_u และมีมุมเฟสเท่ากับ $\omega_u = 2\pi/T_u$ และถ้าระบบมีฮาโมนิคส์สูงโดยมีความถี่เท่ากับ สามารถที่จะไม่สนใจเนื่องจากมีค่าความถี่ธรรมชาติ $G(s)$ ที่ต่ำและเมื่อมาพิจารณาสมการฟูเรียร์ จะพบว่าสัญญาณฮาโมนิคส์แรกของสัญญาณ Relay ซึ่งมีขนาดเท่ากับ u จะเป็นดังนี้



รูปที่ 4.3 แสดงสัญญาณ Relay ที่ใช้ป้อนเข้าไปรบกวนระบบเพื่อให้เกิดการแกว่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

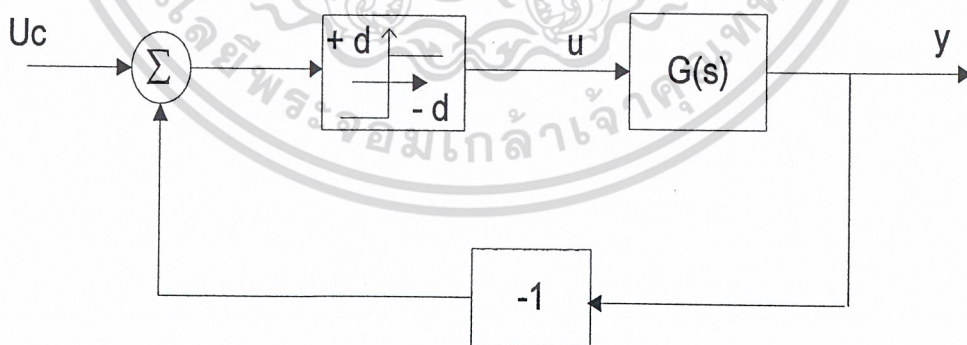
$$\begin{aligned}
 a_1^u &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(t) \sin(\omega t) d(\omega t) \\
 a_1^u &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (+d) \sin(\omega t) d(\omega t) + \frac{1}{\pi} \int_{\pi}^{2\pi} (-d) \sin(\omega t) d(\omega t) \\
 a_1^u &= \frac{1}{\pi} \left[\int_0^{\pi} \sin(\omega t) d(\omega t) - \int_{\pi}^{2\pi} \sin(\omega t) d(\omega t) \right] \\
 a_1^u &= \frac{4d}{\pi}
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

กำหนดให้ขนาดของสัญญาณเอาต์พุต sinusoidal ที่ได้จากการป้อนสัญญาณอินพุต Relay คือ a แล้วค่าสมมูลของ Relay Gain $N(a)$ ให้มีค่าเท่ากับ

$$N(a) = \frac{a_1^u}{a} = \frac{4d}{\pi a} \tag{4.4}$$

ดังนั้นค่าของ Gain ของการเกิด Osillation จะมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 K_u |G(j\omega_u)| = 1 &\rightarrow |G(j\omega_u)| = \frac{1}{K_u} = \frac{\pi a}{4d} \rightarrow K_u = \frac{4d}{\pi a} \\
 \arg |G(j\omega_u)| &= -\pi
 \end{aligned} \tag{4.5}$$



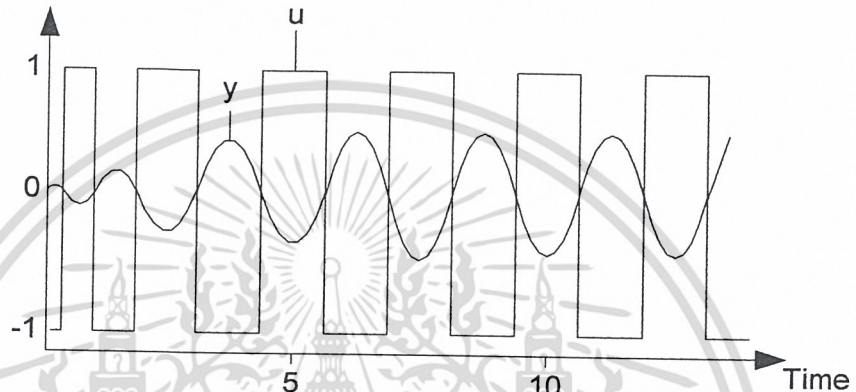
รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะบล็อก Relay

ค่า K_u จะเรียกว่า ultimate gain เป็นค่าที่มีอัตราขยายสัดส่วนที่ทำให้ผลตอบสนองของเวลาเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่องเนื่องจากการควบคุมแบบปิดจะมีค่าจำกัดที่จะทำให้ระบบเกิดการเสถียร ขนาดของ a จะมีค่าเท่ากับขนาดของเอาต์พุต เพราะเราสมมติให้ $u_c = 0$
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาวะดังกล่าวสมมติให้ $G(s)$ และค่าขนาดของ d ซึ่งเป็นขนาดของ Relay ซึ่งเป็นการจำกัดความถี่และขนาด โดย relay feedback มีค่าเท่ากับ

$$\arg|G(j\omega_u)| = -\pi \rightarrow \omega_u$$

$$|G(j\omega_u)| = \frac{\pi a}{4d} \rightarrow a \quad (4.6)$$



รูปที่ 4.5 แสดงอินพุตและเอาต์พุตของระบบที่ใช้ Relay

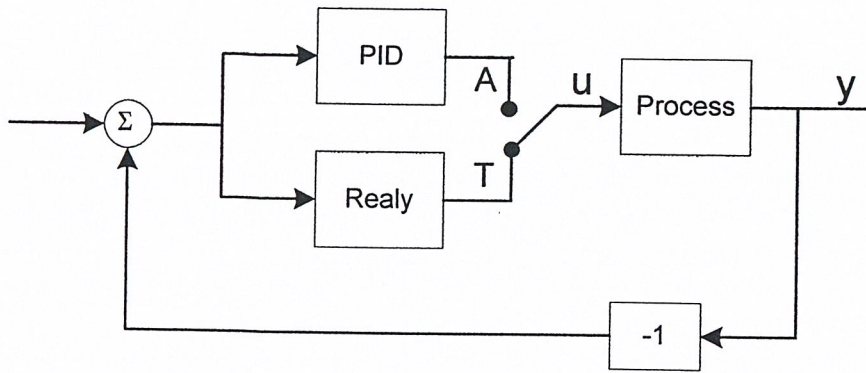
ผลจากระยะเวลาของการแกว่ง T_u สามารถเรียกว่า Ultimate period และในการทดลองด้วย relay เป็นวิธีที่สะดวกในการหาค่าของ Ultimate Gain และ Ultimate Period

ตารางที่ 4.2 แสดงสูตรสำหรับหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ตามวิธี Ziegler-Nichols Closed-Loop method

Controller	K_p	T_i	T_d
P	$0.5 K_u$	0	0
PI	$0.4 K_u$	$0.8 T_u$	0
PID	$0.6 K_u$	$0.5 T_u$	$0.12 T_u$

ซึ่งสมการของ Closed loop tuning นี้สามารถใช้ได้ถ้า $2 \leq K_u \leq 20$ เมื่อ k เป็นค่า Gain คงที่ของกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงบล็อกไดอะแกรมของ Relay Auto-tuner

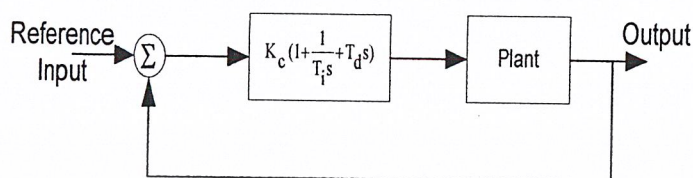
ปกติกระบวนการจะทำงานอยู่ในโหมดการควบคุมแบบ PID แต่เมื่อกระบวนการเปลี่ยนไปก็ต้องการค่าพารามิเตอร์ใหม่กระบวนการเลยเปลี่ยนมาทำงานในโหมด Relay เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ใหม่ เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ใหม่แล้วกระบวนการก็จะกลับไปทำงานในโหมดการควบคุมแบบ PID เหมือนเดิม

4.3 วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมของ PID จากผลตอบสนองของกระบวนการ

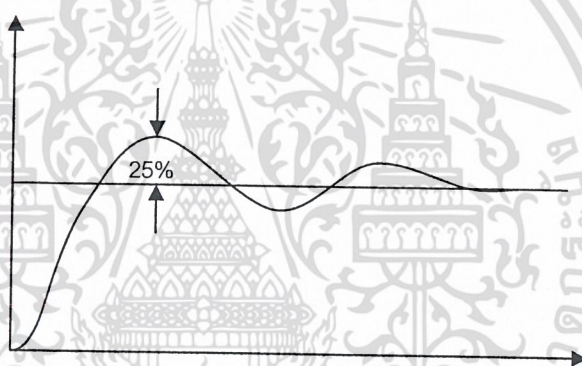
การนำตัวควบคุม PID ในการควบคุมกระบวนการต่างๆ จำเป็นต้องหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่เหมาะสมที่จะใช้ปรับให้กับตัวควบคุม PID เพื่อให้ได้การควบคุมที่ดีที่สุด ซึ่งการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID สามารถทำได้หลายวิธี บางวิธีจะพิจารณาจากผลตอบสนองของระบบที่ได้จากการทดสอบกระบวนการ เช่น วิธีของ Ziegler-Nichols วิธีของ Cohen และวิธีของ Harriott เป็นต้น อีกวิธีหนึ่งคือ วิธีอาศัยความรู้ทางคณิตศาสตร์ เช่น วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยวิธีทางเดินราก (Root Locus Method) และโดยส่วนใหญ่จะพิจารณาจากเงื่อนไขในโดเมนเวลามากกว่าโดเมนความถี่ วิธีที่กล่าวมานั้นวิธีของ Ziegler-Nichols เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดทางปฏิบัติ อย่างไรก็ตามวิธีของ Ziegler-Nichols หลายกรณีที่ต้องการการปรับละเอียดอีกครั้งหนึ่งโดยวิธีการลองผิดลองถูกในอันที่จะได้ผลตอบสนองของระบบที่ต้องการอย่างแท้จริง ในส่วนนี้จะกล่าวถึงเพียงวิธีการปรับหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ของ J.G. Ziegler และ N.B. Nichols

วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ K_c, T_i, T_d ของตัวควบคุม PID ตามวิธี Ziegler-Nichols จะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของผลตอบสนองชั่วครู่ของระบบที่ถูกควบคุมที่ได้จากผลตอบสนองแบบรูปเปิดและผลตอบสนองแบบรูปปิด ซึ่งมี 2 วิธีคือวิธี “Process Reaction Curve” และวิธี

“Ultimate Method” โดยแต่ละวิธีมีจุดมุ่งหมายที่จะทำให้ผลตอบสนองของเวลาต่อระบบต่ออินพุทแบบ Unit Step มีค่าพุ่งเกินสูงสุดไม่เกิน 25% ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงโครงสร้างของระบบควบคุมที่ควบคุมด้วยตัวควบคุม PID



รูปที่ 4.8 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการเมื่อปรับพารามิเตอร์ด้วยวิธี Ziegler-Nichols

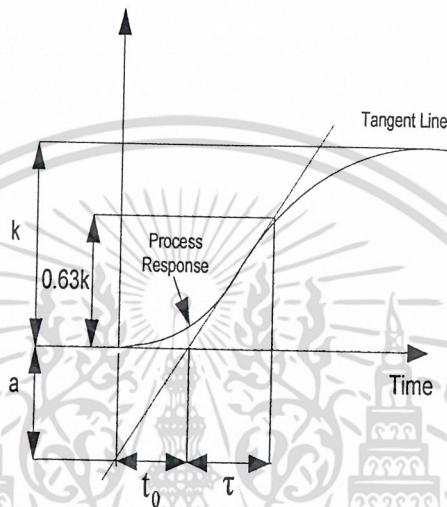
4.3.1 การคำนวณจากวิธี Process Reaction Curve

วิธีนี้จะหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID จากผลตอบสนองเวลาของระบบหรือกระบวนการที่ถูกควบคุมแบบลูปปิดต่ออินพุทแบบ Step โดยที่ระบบหรือกระบวนการในกรณีนี้ จะไม่มีโพล (Pole) ที่จุดกำเนิด (Origin) หรือไม่มี Dominant Complex Conjugate Poles และไม่มีตัวควบคุมต่อรวมอยู่ ดังนั้น ผลตอบสนองของเวลาจะเป็นรูปตัว S (ถ้าผลตอบสนองเวลาไม่เป็นรูปตัว S วิธีนี้จะใช้ไม่ได้) ผลตอบสนองรูปตัว S นี้จะถูกนำมาอธิบายคุณลักษณะของกระบวนการ (Process Characteristic) ด้วยพารามิเตอร์ 3 ค่า คือ อัตราขยายของกระบวนการ ค่าเวลาหน่วงของกระบวนการ และค่าเวลาคงที่ของกระบวนการ โดยค่าเวลาหน่วงของกระบวนการและค่าเวลาคงที่ของกระบวนการ จะถูกประมาณโดยการลากเส้นสัมผัสกับจุดที่มีอัตราการเบี่ยงเบนสูงสุด (Maximum Slope) ดังรูปที่ ส่วนค่าอัตราการขยายของกระบวนการ ทราบได้เมื่อผลตอบสนองของกระบวนการเข้าสู่สภาวะคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการจะประมาณด้วยระบบอันดับหนึ่งแบบมีการหน่วงเวลา (FOPDT) คือ

$$G(s) = \frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-t_0s}}{\tau s + 1} \quad (4.7)$$



รูปที่ 4.9 แสดงผลตอบสนองรูปตัว S เมื่อใช้วิธี Process Reaction Curve

Ziegler-Nichols ได้กำหนดค่าของ K_c , T_i , T_d สำหรับตัวควบคุมแบบต่างๆ ที่ใช้การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ตามวิธี Process Reaction Curve ไว้ในตารางที่ 4.3

วิธี Process Reaction Curve จะพบเห็นกันบ่อยมากในทางปฏิบัติ ซึ่งผลตอบสนองของกระบวนการที่จะนำมาประมาณค่านั้น ได้มาจากการบันทึกค่าโดยเครื่องบันทึก (Recorder) ดังนั้นจะเกิดค่าผิดพลาดได้ง่าย จากการกำหนดจุดที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุด และการลากเส้นสัมผัส ณ จุดนี้ โดยเฉพาะกับผลตอบสนองที่บันทึกด้วยความเร็วการบันทึกต่ำๆ (Chart Speed)

ข้อดีของการใช้ วิธี Process Reaction Curve

1. ทำการทดสอบเพียงครั้งเดียวเท่านั้น
2. ไม่จำเป็นต้องใช้การลองผิดลองถูก
3. การคำนวณค่าพารามิเตอร์สามารถทำได้ง่าย

ข้อเสียของการใช้ วิธี Process Reaction Curve

1. การทดสอบจะกระทำภายใต้เฉพาะวงจรเปิด ดังนั้น โหลดมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการ

ทดสอบ ผลของการทดสอบที่ได้จะเกิดการผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ในการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ได้จากการทดสอบมีขนาดเล็กลง การหาค่าความถี่ที่ถูกต้องทำได้ยาก
3. วิธีการนี้มีแนวโน้มที่ไวต่อความผิดพลาดจากการสอบเทียบของตัวควบคุม
4. การใช้ค่าพารามิเตอร์ในตารางมีแนวโน้มที่จะทำให้ผลตอบสนองเกิดการแกว่ง
5. วิธีการนี้ไม่เหมาะสมกับกระบวนการที่มีการตอบสนองแบบแกว่งในระบบวงเปิด เนื่องจากค่าที่ได้จากการทดสอบจะเกิดการผิดพลาด

ตารางที่ 4.3 แสดงสูตรสำหรับหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ตามวิธี Process Reaction Curve

Controller Type	Proportional Gain K_c	Integral Time T_i	Derivative Time T_d
Proportional	$\frac{1}{K} \left(\frac{\tau}{t_0} \right)$	0	0
Proportional-Integral	$\frac{0.9}{K} \left(\frac{\tau}{t_0} \right)$	$3.33 t_0$	0
Proportional-Integral-Derivative	$\frac{1.2}{K} \left(\frac{\tau}{t_0} \right)$	$2.0 t_0$	$0.5 t_0$

4.3.2 การคำนวณจากวิธี Ultimate Method

วิธีนี้จะทำให้การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจากผลตอบสนองของระบบหรือกระบวนการที่ถูกควบคุมต่อการปรับค่าของอัตราขยายของตัวควบคุมชนิด P เมื่อมีการป้อนสัญญาณเข้าเป็นแบบ Unit Step ดังนั้นวิธีนี้ต้องมีตัวควบคุมแบบ P ต่ออยู่เพื่อให้สามารถปรับอัตราขยายได้

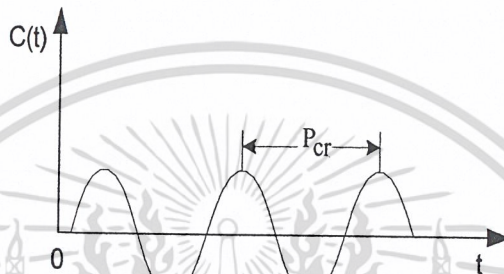
คุณสมบัติของ Ultimate Gain และ Ultimate Period ของระบบถูกนำมาหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ซึ่งเป็นวิธีที่กระทำกับระบบโดยตรงและไม่จำเป็นต้องทราบค่าฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการ โดยการปรับค่าอัตราขยาย K_p ของตัวควบคุมแบบ P ให้มีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ จนผลตอบสนองของระบบเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่องและมีขนาดการแกว่งคงที่เรียกอัตราขยายที่ทำให้เกิดการแกว่งนี้ว่า Ultimate Gain (K_u) และเรียกค่าคาบของการแกว่งนี้ว่า Ultimate Period

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Tu) ดังรูปที่ 4.10 จากนั้นให้นำค่าเหล่านี้ไปเปรียบเทียบกับตารางที่เพื่อกำหนดพารามิเตอร์ของตัวควบคุมตามเงื่อนไขที่ให้ค่าพุงเกินไม่เกิน 25 % แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดคือต้องใช้กับระบบที่มีผลต่อความตอบสนองต่อเวลาที่มีการแกว่งเท่านั้นหรือใช้กับกระบวนการที่มีรากของสมการคุณลักษณะเป็นจำนวนเชิงซ้อนสังยุคเมื่อมีการปรับค่าอัตราขยายของกระบวนการ

K_{cr} (Critical Gain) = อัตราการขยายที่ทำให้ผลตอบสนองเวลาเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง

P_{cr} (Oscillation Period) = คาบเวลาการแกว่งอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 4.10 แสดงผลตอบสนองเวลาเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง เมื่อปรับ โดยวิธี Ultimate Method

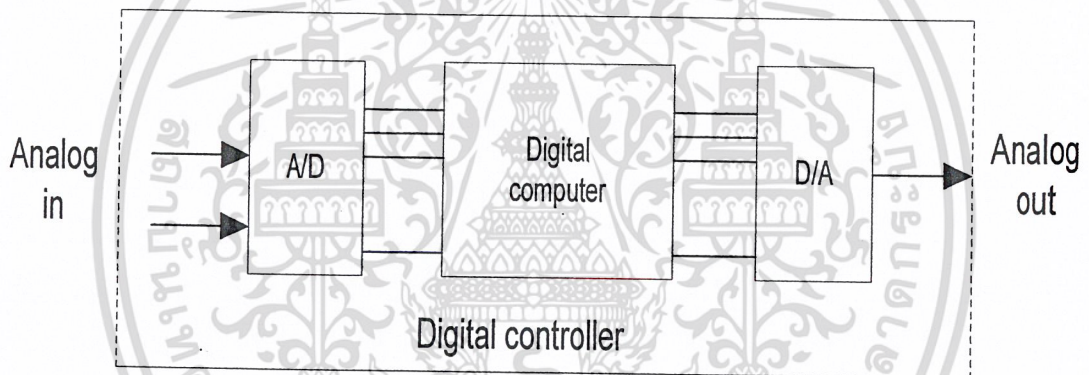
ตารางที่ 4.4 แสดงสูตรสำหรับหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ตามวิธี Ultimate Method

Controller Type	Proportional Gain K_c	Integral Time T_i	Derivative Time T_d
Proportional	$0.5 K_{cr}$	0	0
Proportional –Integral	$0.45 K_{cr}$	$P_{cr} / 1.2$	0
Proportional-Integral-Derivative	$0.6 K_{cr}$	$0.5 P_{cr}$	$0.125 P_{cr}$

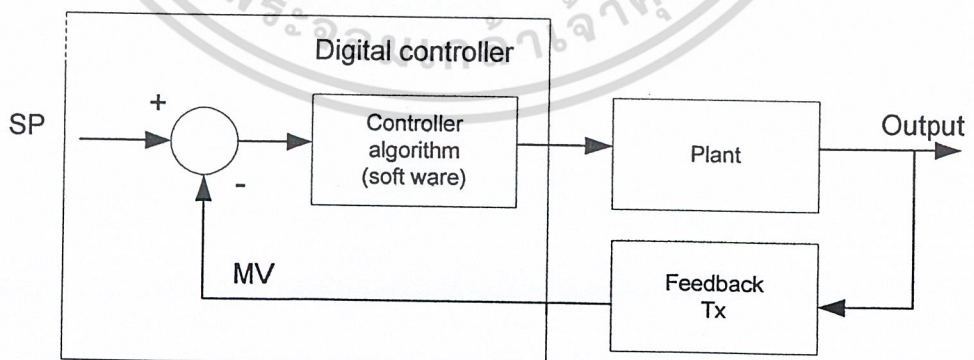
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 Digital Controller

ฟังก์ชันหลักของ Digital Control เหมือนกับ ตัวควบคุมแบบ Analog ที่เป็นการควบคุม (Close -Loop) การตอบรับของระบบ ตัวควบคุมแบบ Digital แตกต่างจาก Analog แต่โดยส่วนใหญ่จะคล้ายกันมาก แต่ในความเป็นจริง ตัวควบคุมแบบ Digital เป็นปัจจัยหลักของ Computer เพราะว่า Digital Computer ไม่สามารถตอบรับสัญญาณ Analog ได้ และมันไม่สามารถ Interface โดยตรงกับ Feedback Transducers หรือ Set Point (SP) ของ Potentiometers Digital Computer และไม่สามารถกำเนิด a real - world สัญญาณ Analog ที่ 3-15 psi ของความดันอากาศ 0-10 vdc ของสัญญาณ Digital หรือ 4-20 mA ของสัญญาณไฟฟ้า ดังนั้นมันไม่สามารถ ติดต่อสื่อสารโดยตรงกับอุปกรณ์ควบคุมตัวสุดท้าย ตัวแปลงสัญญาณจาก Digital เป็น Analog (D/A) จึงมีความจำเป็นของการใช้แปลงสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณ Analog และ Digital to Analog สำหรับ ติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์ตัวสุดท้าย ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 โครงสร้างของ Digital Controller



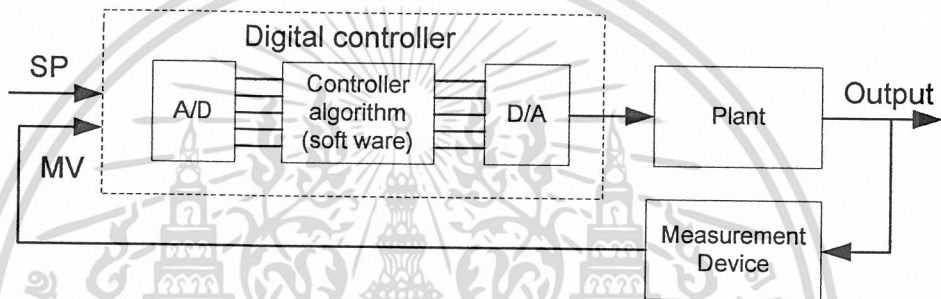
รูปที่ 4.12 แสดงระบบควบคุม Close Loop กับ Digital Controller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยส่วนใหญ่ ตัวควบคุมแบบ Analog มีหน้าที่ร่วมกับ Software ของ Computer ในการดำเนินการควบคุมลำดับขั้นตอนการทำงาน จุดประสงค์คือการรวม Block ซึ่งเป็นการเกิดสัญญาณ Error ที่อ้างอิงค่าจากค่า Set Point (SP) กับ (PV) ซึ่งมันเป็นเรื่องยากที่จะไม่เกิดความผิดพลาด กับ Digital Computer ซึ่งสามารถยอมรับค่า Set Point (SP) กับ (PV) ตลอดจนผ่านตัวแปลงสัญญาณ Analog เป็น Digital และภายในส่วนนี้จะได้ค่า Error ออกมา

ดังนั้นในการปฏิบัติการรวมบล็อกเป็นการทำหน้าที่แทน โดยการใช้คำสั่งของ Code ตัวเลข ข้อมูลของ Set Point และลบออกกับค่าที่ได้จากการวัด (PV) ที่ได้จากข้อมูล แสดงดังรูปที่ 4.13

แสดงการ Update องค์ประกอบ Digital Controller ในแบบ Close Loop



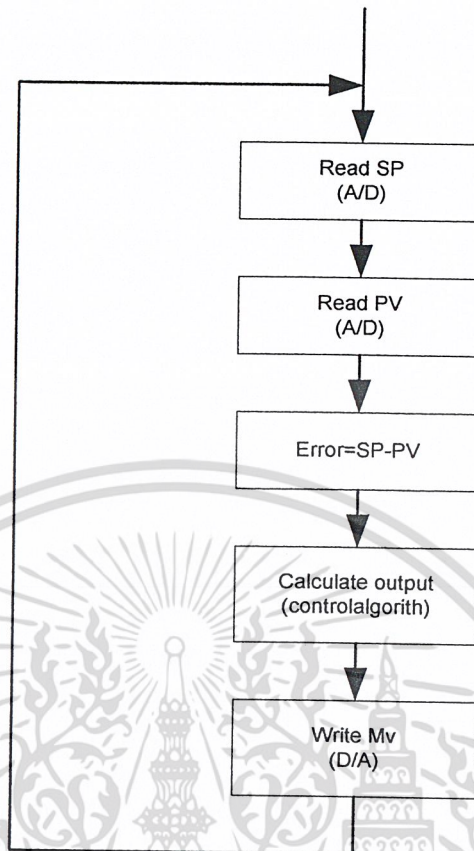
รูปที่ 4.13 แสดงรูปร่างภายนอกของ Digital Control Loop

Digital Controller ยอมรับค่า Set Point (SP) และ (PV) โดยการแปลงสัญญาณ Analog เป็น Digital ข้อมูลกระบวนการ จะสอดคล้องกับ Program Software ภายใน และทำให้เกิดความเหมาะสมกับ Output โดยการแปลงสัญญาณจาก Digital เป็น Analog โดย Software เป็น Code ในการปฏิบัติการควบคุมลำดับขั้นตอนให้เหมาะสม กับระบบ Close Loop ภายใต้การควบคุม Flow Chart แสดงในรูป 4.14

4.4.1 การควบคุมลำดับขั้นตอนการทำงาน

แสดง flowchart ในรูปที่ 4.14 ตัวควบคุมแบบ Digital จะอ่านค่าจาก Output จากช่องของ ตัวแปลงสัญญาณจาก Analog เป็น Digital ไปใช้ติดต่อกับ Set point ที่ได้จาก Input และอ่านค่าจาก ช่องของตัวแปลงสัญญาณ Analog เป็น Digital ที่ต่อกับตัวแปรของ Process จากการวัดทั้ง สองค่าที่ปรากฏอยู่จะกำหนดค่าความผิดพลาด ตัวควบคุม นี้ ค่า Output จะป้อนให้กับตัวแปลงสัญญาณ จาก Digital เป็น Analog และให้สัญญาณ Analog กับ Output ตัว Controller นี้จะสมบูรณ์เมื่อไม่ ความผิดพลาด ถ้าเกิดความผิดพลาดจะกัวนวน ไปยัง Control Loop อีกครั้งหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แสดง flowchart การทำงานของ Digital Controller

4.5 การเชื่อมต่อสัญญาณ (signal connection)

ในการเชื่อมต่อสัญญาณต่างๆ จะต้องมีปัจจัยหลายอย่างเกี่ยวกับการเชื่อมต่อ เพื่อให้การส่งข้อมูลและการได้รับข้อมูลเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายแก่ PC และ อุปกรณ์ทางด้านฮาร์ดแวร์ที่ใช้ติดต่อเชื่อมโยงข้อมูลทางอินพุตและเอาต์พุต ซึ่งในการทดลองการเชื่อมต่อสัญญาณจะใช้การ์ด PCI-1711 Series ในการแปลงสัญญาณ Analog to Digital และ Digital to Analog

4.5.1 การเชื่อมต่ออินพุต / เอาต์พุต (I/O Connector)

การเชื่อมต่ออินพุตและ เอาต์พุตด้วย PCI-1711 จะมี 68 ขา ในการเชื่อมต่อสามารถใช้ PCL-10168 เป็นตัวป้องกันสายเคเบิล หน้าที่ของขาสัญญาณ (Pin Assignment) ดังรูปที่ 4.15 จะบอกหน้าที่ของขาสัญญาณต่าง ๆ ของแต่ละขาที่มีด้วยกัน 68 ขา (Pin)

AI0	68	34	AI1
AI2	67	33	AI3
AI4	66	32	AI5
AI6	65	31	AI7
AI8	64	30	AI9
AI10	63	29	AI11
AI12	62	28	AI13
AI14	61	27	AI15
AIGND	60	26	AIGND
AO0_REF	59	25	AO1_REF*
AO0_OUT*	58	24	AO1_OUT*
AOGND*	57	23	AOGND*
DI0	56	22	DI1
DI2	55	21	DI3
DI4	54	20	DI5
DI6	53	19	DI7
DI8	52	18	DI9
DI10	51	17	DI11
DI12	50	16	DI13
DI14	49	15	DI15
DGND	48	14	DGND
DO0	47	13	DO1
DO2	46	12	DO3
DO4	45	11	DO5
DO6	44	10	DO7
DO8	43	9	DO9
DO10	42	8	DO11
DO12	41	7	DO13
DO14	40	6	DO15
DGND	39	5	DGND
CNT0_CLK	38	4	PACER_OUT
CNT0_OUT	37	3	TRG_GATE
CNT0_GATE	36	2	EXT_TRG
+12	35	1	+5

รูปที่ 4.15 แสดง I/O ที่ใช้ในการเชื่อมต่อแต่ละ Pin ของการ์ด PCI-1711 series

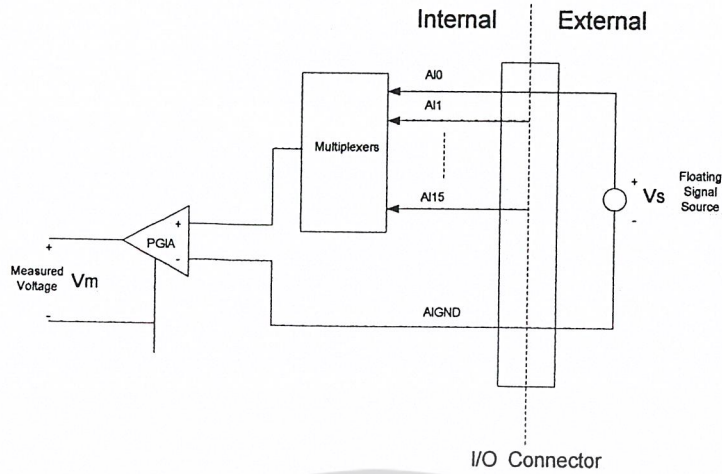
4.5.2 การเชื่อมต่อสัญญาณอินพุท (analog Input connections)

PCI-1711 มีการสำรองของช่องสัญญาณ 16 ช่อง single-Ended หรือความแตกต่างของ A/D ที่มี 8 อินพุท อย่างไรก็ตาม PCI-1711 / 1711L มีการสำรองไว้ 16 Single-Ended ของอินพุทแต่ละอินพุทจะมีให้เลือกการใช้งานต่างๆ ขึ้นอยู่กับโปรแกรมต่างๆ

4.5.2.1 Single-ended Channel Connection

องค์ประกอบของ single - ended จะมีหนึ่งสัญญาณที่ต่อใช้งานและช่องสัญญาณและวัดสัญญาณค่าของ (V_m) ของสัญญาณที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับกราวด์นอกจากนี้สัญญาณที่กราวด์ที่ลอยไว้ แต่ในความเป็นจริงของการเชื่อมต่อแบบ single - ended ที่ต่อแบบแหล่งจ่ายลอยไว้จะเห็นได้ว่าวิธีของ PCI-1711 โดยทำการอ้างอิงกราวด์จากภายนอกที่ลอยไว้ของสัญญาณแหล่งจ่ายระหว่างสัญญาณที่ลอยไว้จากแหล่งจ่ายและอินพุทของช่องสัญญาณ PCI-1711

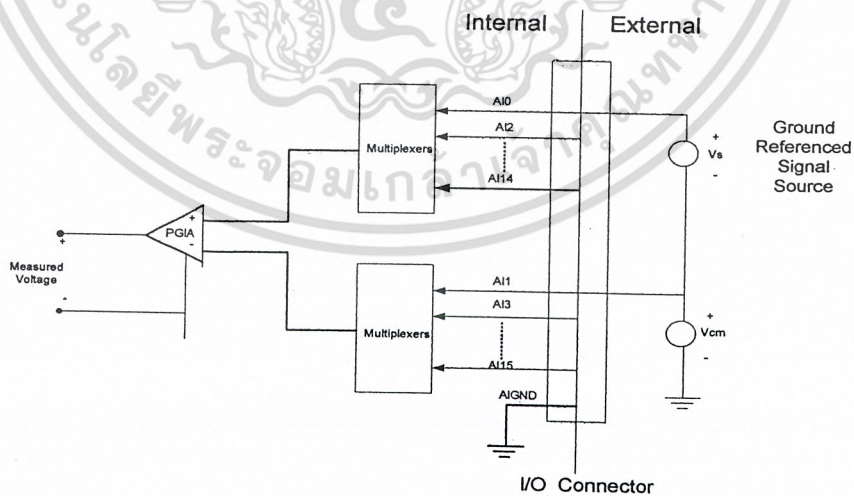
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แสดง Single – ended input channel connection

4.5.2.2 Differential Channel Connections

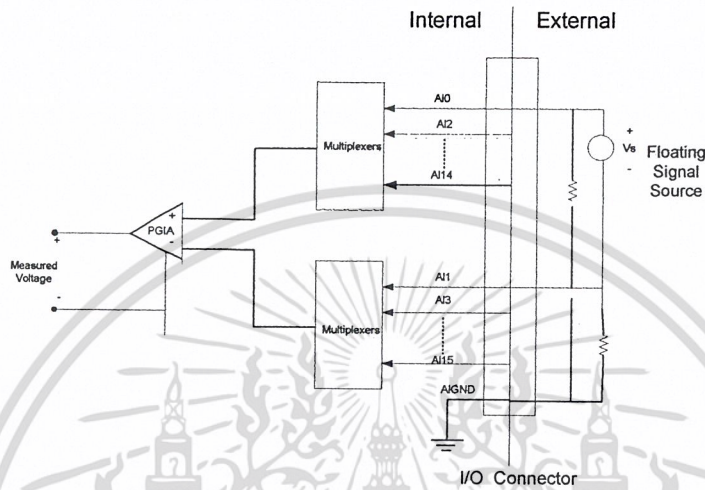
สัญญาณความแตกต่างของอินพุตในทางปฏิบัติจะมีสองสัญญาณ โดยช่องสัญญาณของความแตกต่าง ของ โวลต์ระหว่างสายสัญญาณการวัดทั้งคู่ของ PCI-1711 แต่เมื่อไรที่รวมของแต่ละสัญญาณ และองค์ประกอบของความแตกต่าง อินพุตตั้งแต่ 8 ช่องสัญญาณก็สามารถใช้ได้ แต่ถ้ามีหนึ่งสัญญาณที่ต้องกราวด์ของสัญญาณแหล่งจ่ายที่อ้างอิงกราวด์ของสัญญาณกราวด์ และกราวด์ของการ์ดที่มีแรงดัน ความแตกต่างระหว่างกราวด์แรงดันจากการรวมแหล่งจ่าย (V_{cm}) ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 แสดง Differential input channel connection –ground reference signal source

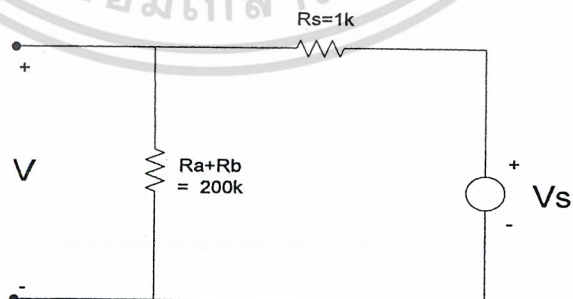
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าสัญญาณการเชื่อมต่อของอินพุตแต่ละช่องสัญญาณ โดยสัญญาณแหล่งจ่าย อาจมากกว่า จุติรวมของ range ของ PGIA และถ้า PGIA มีจำนวนมากต้องมีตัว AIGND ดังรูปที่ 4.18 แสดงการเชื่อมต่อของความแตกต่างที่มีค่าความต้านทานของ AIGND การเชื่อมต่อได้โดยไม่ต้องรวมจุดต่างๆ ของแรงดันระหว่างสัญญาณแหล่งจ่าย PCI-1711 กับกราวด์



รูปที่ 4.18 แสดง Differential input channel connection – floating signal source

อย่างไรก็ตามการเชื่อมต่อยังมีข้อเปรียบเทียบกับภาระของแหล่งจ่าย ส่วนการต่อค่า R จำนวนสองตัวที่ต่ออนุกรมกันคือ R_a และ R_b สำหรับตัวอย่างมีค่าความต้านทานของ R_s เท่ากับ $1\text{ k}\Omega$ และแต่ละค่าความต้านทานเท่ากับ $100\text{ k}\Omega$ ดังนั้น ค่าความต้านทานของแหล่งจ่าย จะมีค่า $20\text{ k}\Omega$ ($100\text{ k}\Omega + 100\text{ k}\Omega$) และค่าความผิดพลาด -0.5% แต่ในความเป็นจริงต้องมีความยืดหยุ่นในวงจรส่วนการคำนวณดังแสดงดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 แสดงวงจรในส่วนการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

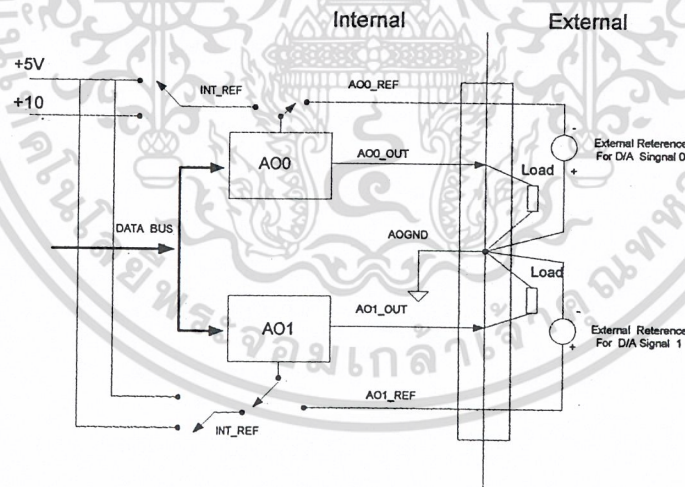
V_s :	ideal signal source
r_s :	output impedance signal source
r_a, r_b :	series - woundresisitors

$$V_s = \frac{r_a + r_b}{r_s + r_a + r_b}, V_s = \frac{200}{1 + 200}, V_s = \frac{200}{201}$$

$$\text{Gain error} = \frac{V_a + V_s}{V_s} = -\frac{1}{201} = -0.5\% \quad (4.8)$$

4.5.3 การเชื่อมต่อสัญญาณอนาล็อกของเอาต์พุต

การ์ด PCI-1711 ของ D/A ของช่องสัญญาณเอาต์พุตของการ์ด PCI-1711 ไม่สามารถ ออกแบบ AO0_OUT และ AO1_OUT อาจจะใช้ PCI-1711 ส่วนค่าแรงดัน -5 (10 V) อ้างอิง 0 ถึง +5 (+10) ของ D/A ของสัญญาณเอาต์พุต สามารถใช้ D/A จากภายนอกอ้างอิงก็ได้ AO0_REF และ AO1_REF อ้างอิงค่าจากอินพุตภายนอกของ range +/- 10 V จากรูปการ เชื่อมต่อจากภายนอกของการอ้างอิง -7V ของทั่วไป 0 ~ +7 D/A ของเอาต์พุต



รูปที่ 4.20 แสดง Analog output connection

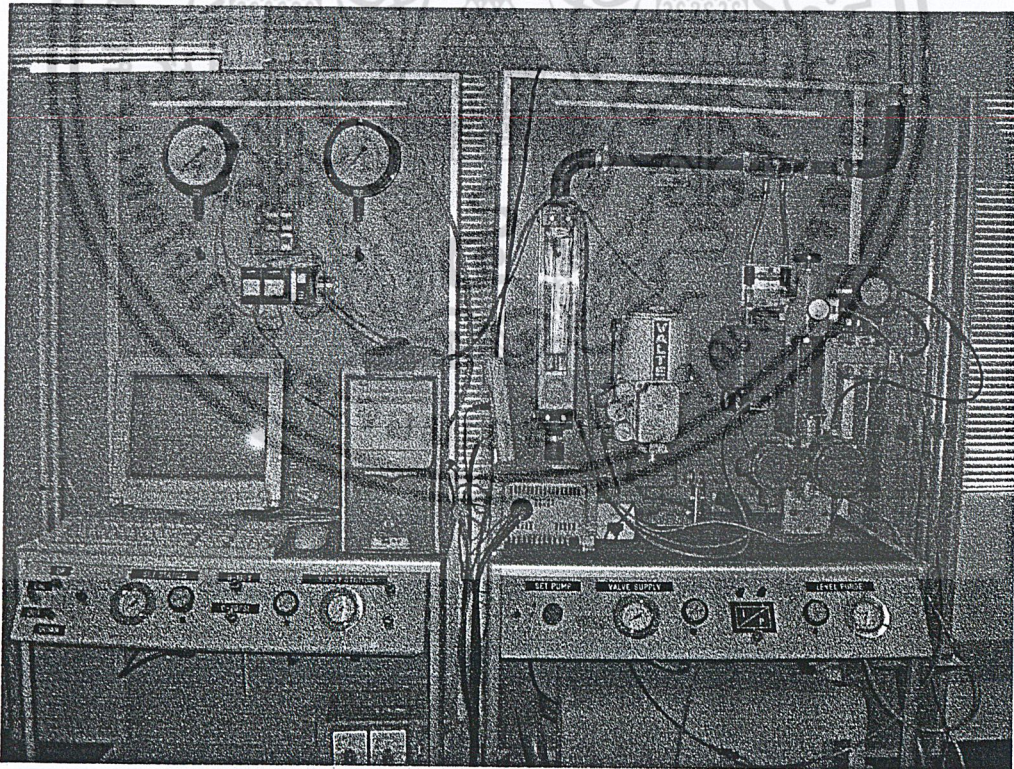
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลอง

5.1 กล่าวนำ

บทนี้จะเป็นการนำเอาโปรแกรมที่ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID แบบอัตโนมัติไปใช้ทดลองกับกระบวนการจำลอง เป็นการควบคุมระดับของเหลว โดยจะแสดงให้เห็นผลตอบสนองของกระบวนการที่ค่าเป้าหมายต่างๆ ที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ได้จากโปรแกรมการหาค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติ ซึ่งเราจะนำค่าพารามิเตอร์ ของกระบวนการที่หาได้ไปคำนวณตามวิธี Ultimate Method ของ Ziegler-Nichols นอกจากนี้ในการทดลองยังได้ทำการหา Transfer Function ของกระบวนการเพื่อที่จะนำไปออกแบบตัวควบคุม PID เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ในทางทฤษฎี เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นผลตอบสนองของกระบวนการจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากโปรแกรมหาค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติกับผลตอบสนองของกระบวนการที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีว่าใกล้เคียงกันหรือแตกต่างกันอย่างไร

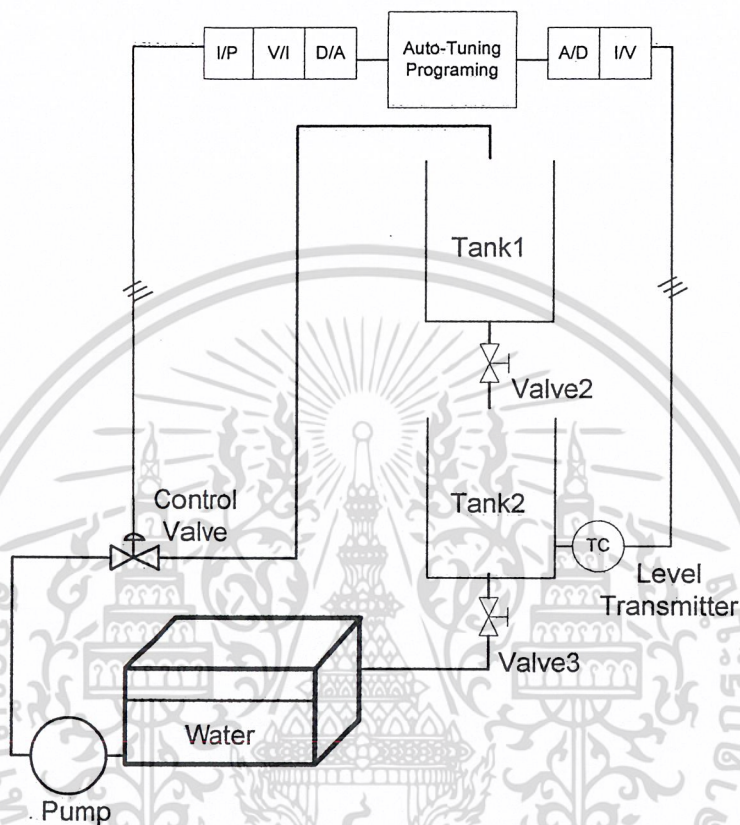


รูปที่ 5.1 แสดงกระบวนการควบคุมระดับที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ผลการทดลองกับกระบวนการควบคุมระดับของเหลว

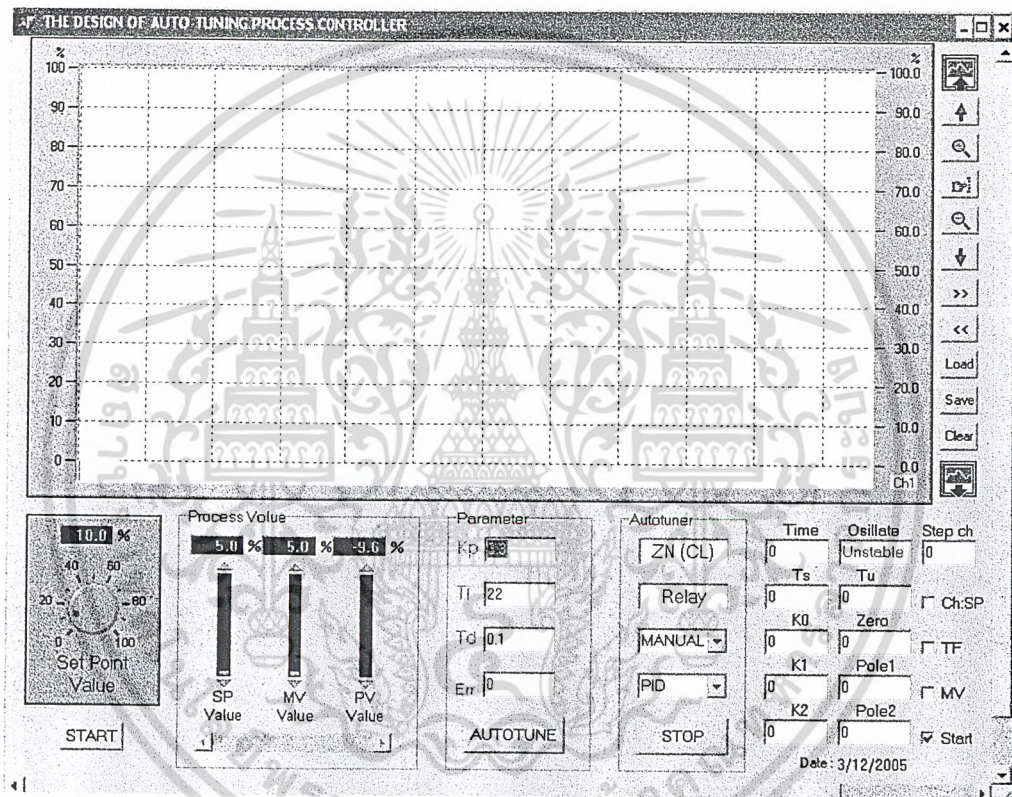
การทดลองนี้เป็นการประยุกต์ใช้โปรแกรมหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID แบบอัตโนมัติ ในการหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุม PID ของกระบวนการควบคุมระดับของเหลวดังรูป



รูปที่ 5.2 แสดงลักษณะของกระบวนการ

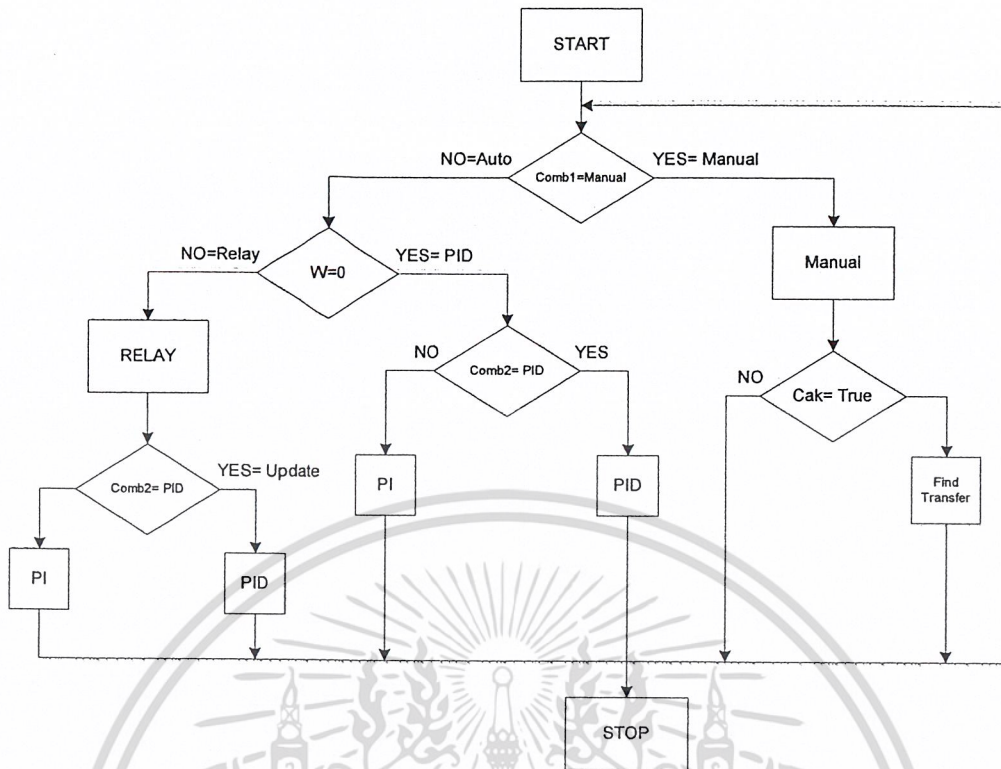
การทำงานของ การทดลอง เริ่มจากปั้มน้ำจะทำหน้าที่สูบน้ำจากถังเก็บน้ำขึ้นไปตามท่อ ตลอดเวลาในการทดลอง ซึ่งน้ำที่ถูกสูบจะส่งไปยังถังกระบวนการ โดยผ่านวาล์วควบคุม ซึ่งน้ำจะไหลผ่านกระบวนการแล้วกลับมาที่ถังเก็บน้ำ ด้านล่าง โดยวาล์วจะเป็นชนิด air-to-open ซึ่งเริ่มแรก วาล์วควบคุมจะปิดสนิทและการทำงานของโปรแกรมจะเริ่มจาก การเลือกควบคุมในโหมด PID หรือ PI ถ้าเลือกการควบคุมเป็นแบบ PID โปรแกรมก็จะใช้ค่าพารามิเตอร์ค่า Base ที่กำหนดไว้ ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับบางเป้าหมายเท่านั้น เพราะฉะนั้นถ้าค่าเป้าหมายเราเปลี่ยนไปเราก็ จำเป็นที่จะต้องหาค่าพารามิเตอร์ใหม่ทุกครั้ง ดังนั้นถ้าเราป้อนสัญญาณ step ขนาด 25 % เข้าไป ค่าพารามิเตอร์ที่มีอยู่ก็จะไม่ใช่ค่าที่เหมาะสม ดังนั้นจึงต้องหาค่าพารามิเตอร์ใหม่ ทำได้โดยการกด ปุ่ม TUNING บนหน้าตาของโปรแกรม โปรแกรมก็จะทำการหาค่าพารามิเตอร์ใหม่ที่เหมาะสมกับ ค่า Set point นั้น แล้วทำการ Update ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ก็จะได้ค่าพารามิเตอร์ที่ เหมาะสมกับกระบวนการนั้น และ การควบคุมแบบ PI ก็จะทำลักษณะเดียวกันนี้ โดยเมื่อป้อน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณ Step ขนาด 25% เข้าไปสัญญาณจะส่งออกจากการ์ด PCI เป็นสัญญาณแรงดัน 0-10 Vdc และจะถูกจ่ายให้กับตัวแปลงสัญญาณจากแรงดันเป็นกระแส 4 - 20 mAdc แล้วสัญญาณกระแสก็จะส่งไปยัง Positioner เพื่อแปลงสัญญาณกระแสเป็นสัญญาณลม 0.2-1.0 Kg/cm² เพื่อไปควบคุมวาล์วเพื่อให้ Level เท่ากับ 25 % และจะมี Level Transmitter คอยวัดระดับอยู่ตลอดเวลา และสัญญาณที่ส่งออกจาก Level Transmitter จะส่งกลับเป็นสัญญาณ 4 - 20 mAdc และก็จะแปลงด้วยตัวแปลงสัญญาณจาก กระแส 4 - 20 mAdc มาเป็นแรงดัน 1 - 10 Vdc ส่งไปยังการ์ด PCI เพื่อแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล เพื่อให้โปรแกรมประมวลผลต่อไป



รูปที่ 5.3 แสดงหน้าต่างของโปรแกรมAuto-Tuning

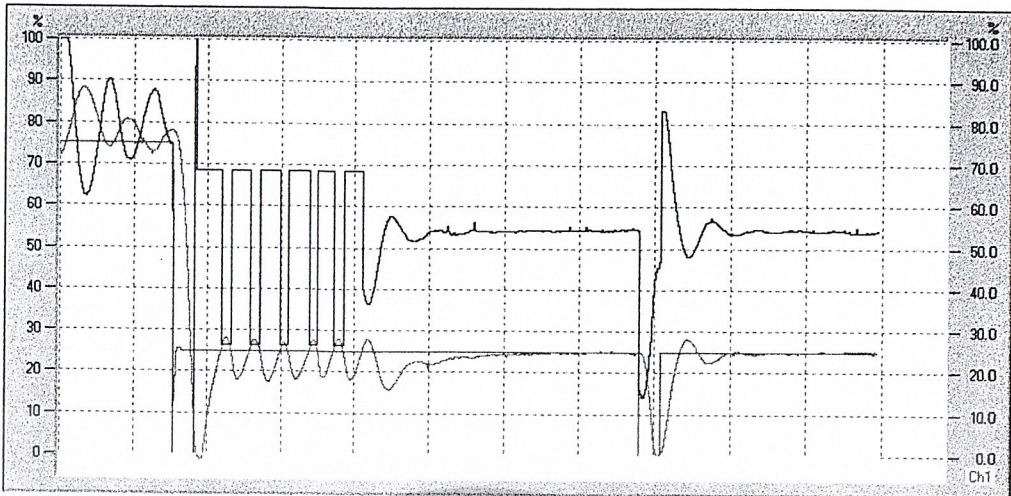
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



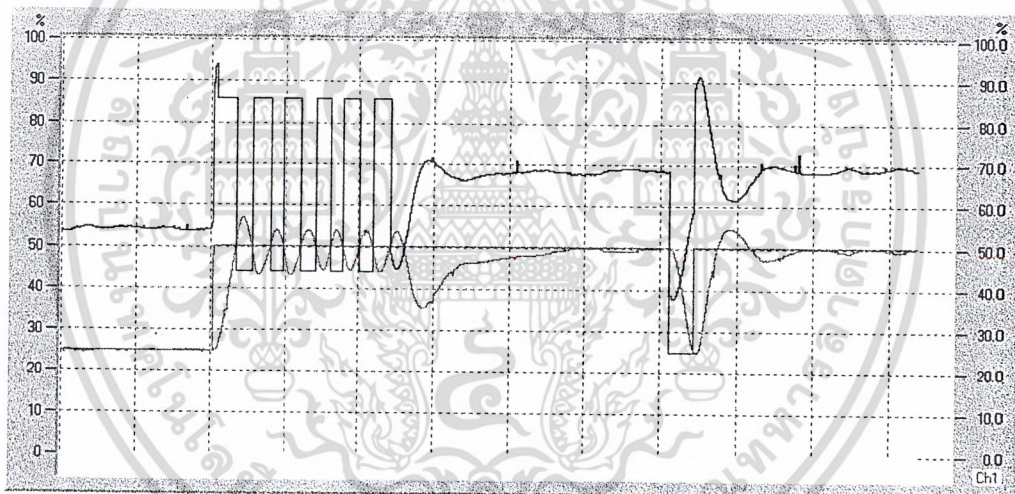
รูปที่ 5.4 แสดง Flow chart แสดงการทำงานของโปรแกรม

การทำงานของโปรแกรม เมื่อเปิดโปรแกรมมาสามารถรันโปรแกรมโดยการกด F9 แล้วกดปุ่ม Start ซึ่งปกติโปรแกรมจะอยู่โหมด Manual เราสามารถหา Transfer function ของกระบวนการได้โดยการคลิกที่ TF โปรแกรมก็จะทำการหา Transfer function ให้โดยอัตโนมัติ และถ้าเลือกโหมด Auto โปรแกรมก็จะทำงานอยู่ในโหมดการควบคุมแบบ PID หรือสามารถเปลี่ยนเป็นการควบคุมแบบ PI ได้ ซึ่งถ้ากระบวนการเปลี่ยนไปหรือมีการเปลี่ยนค่าเป้าหมาย ก็จำเป็นที่จะต้องหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมใหม่เพื่อที่จะให้ได้การควบคุมที่เหมาะสมกับกระบวนการ ซึ่งสามารถทำได้โดยการกดปุ่ม AUTOTUNE โปรแกรมก็จะหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับกระบวนการแล้วทำการปรับค่าพารามิเตอร์ใหม่อัตโนมัติแล้วกลับไปอยู่ในโหมดการควบคุมแบบ PID หรือ PI และถ้ามีการเปลี่ยนค่าเป้าหมายไปจะต้องหาค่าพารามิเตอร์ใหม่ทุกครั้งเพื่อที่จะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุด

ผลตอบสนองของกระบวนการจากการควบคุมแบบ PI แสดงให้ดังรูปที่ 5.5 – 5.7 โดยได้แสดงผลตอบสนองที่เป้าหมาย 25 % , 50 % และ 75% เพื่อให้เห็นผลตอบสนองของแต่ละเป้าหมาย ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้งาน

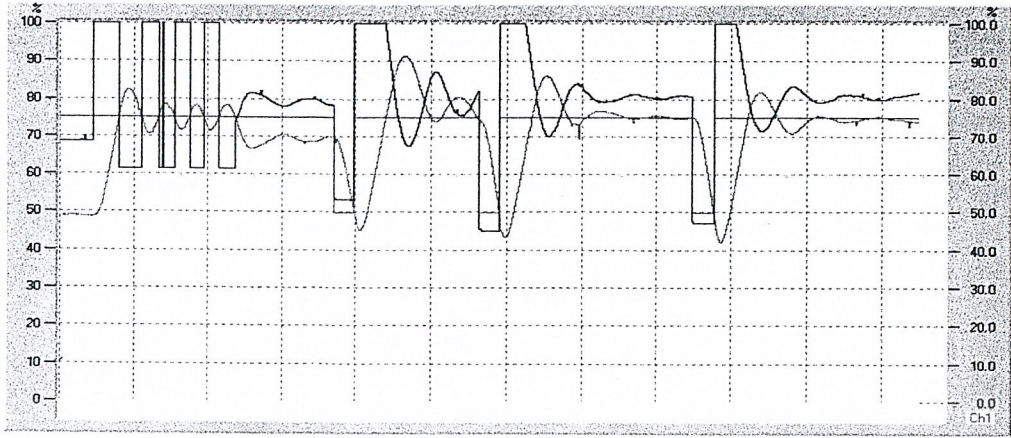


รูปที่ 5.5 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 25 % เมื่อตัวควบคุมเป็นแบบ PI และค่าพารามิเตอร์ที่ได้จาก Auto-Tuning $K_p = 2.16$, $T_i = 20$ sec , $T_s = 72$ sec



รูปที่ 5.6 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 50 % เมื่อตัวควบคุมเป็นแบบ PI และค่าพารามิเตอร์ที่ได้จาก Auto-Tuning $K_p = 1.65$, $T_i = 20.8$ sec , $T_s = 72$ sec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

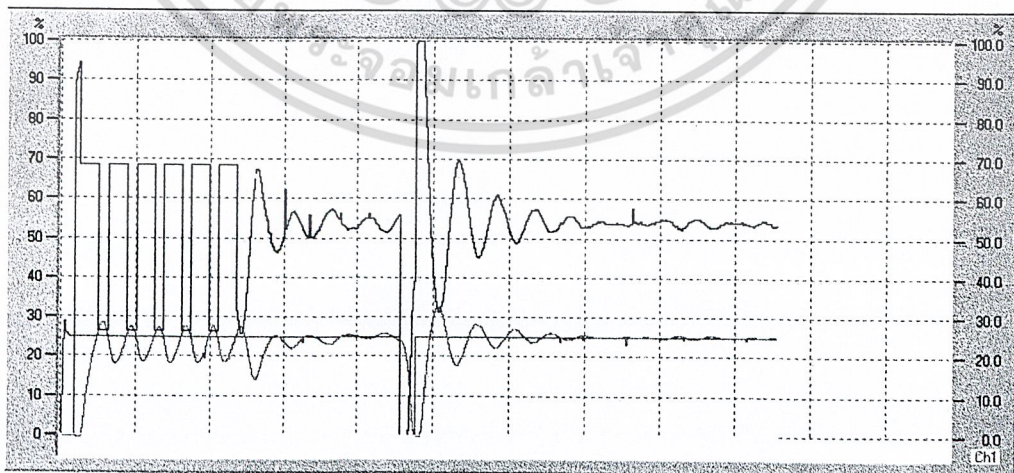


รูปที่ 5.7 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 75 % เมื่อตัวควบคุมเป็นแบบ PI และค่าพารามิเตอร์ที่ได้จาก Auto-Tuning $K_p = 1.4$, $T_i = 22.49$ sec , $T_s = 103$ sec

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการทดลองเมื่อตัวควบคุมเป็นแบบ PI

Sp (%)	K_p	T_i (%)	T_s (%)	M_p (%)	e_{SS} (%)
25	2.16	20	72	13.79	0.4
50	1.65	20.8	72	10.71	0.8
75	1.4	22.49	103	10.71	1.8

ผลตอบสนองของกระบวนการจากการควบคุมแบบ PID แสดงให้ดังรูปที่ 6.6-6.8 โดยได้แสดงผลตอบสนองที่เป้าหมาย 25% , 50 % และ 75% เพื่อให้เห็นผลตอบสนองของแต่ละเป้าหมาย ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้งาน



รูปที่ 5.8 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 25 % เมื่อตัวควบคุมเป็นแบบ PID

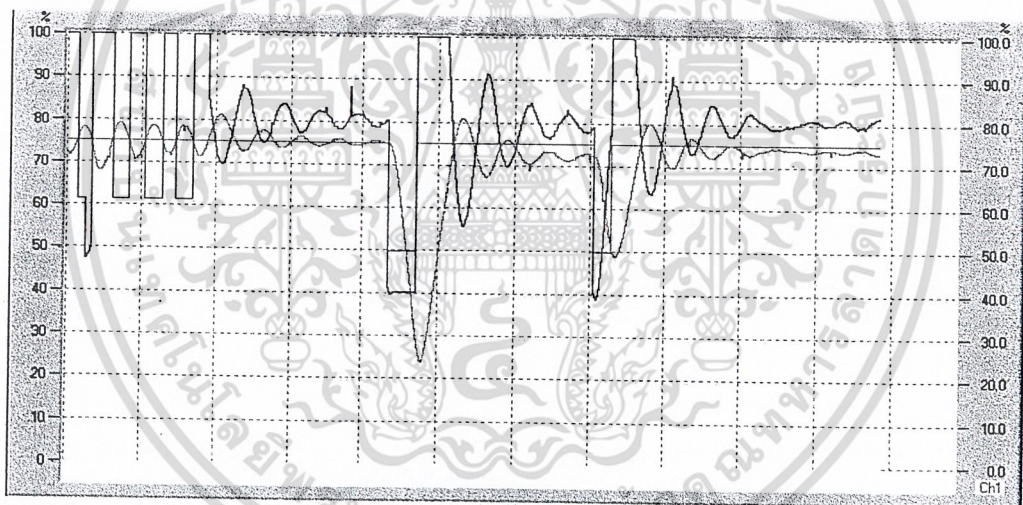
และค่าพารามิเตอร์ที่ได้จาก Auto-Tuning $K_p = 3.3$, $T_i = 12$ sec , $T_d = 0.11$ sec , $T_s = 96$ sec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 50 % เมื่อตัวควบคุมเป็นแบบ PID และค่าพารามิเตอร์ที่ได้จาก Auto-Tuning $K_p = 2.33, T_i = 12.5 \text{ sec}, T_d = 0.12 \text{ sec}, T_s = 84 \text{ sec}$

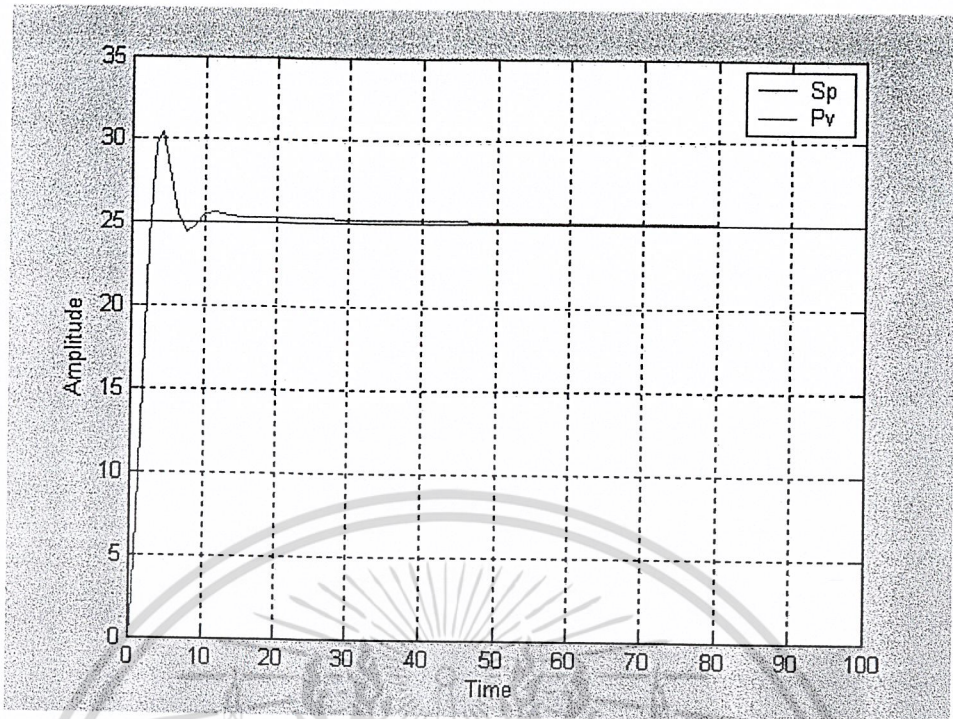


รูปที่ 5.10 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการที่ค่าเป้าหมาย 75 % เมื่อตัวควบคุมเป็นแบบ PID และค่าพารามิเตอร์ที่ได้จาก Auto-Tuning $K_p = 2.13, T_i = 12.15 \text{ sec}, T_d = 0.58 \text{ sec}, T_s = 110 \text{ sec}$

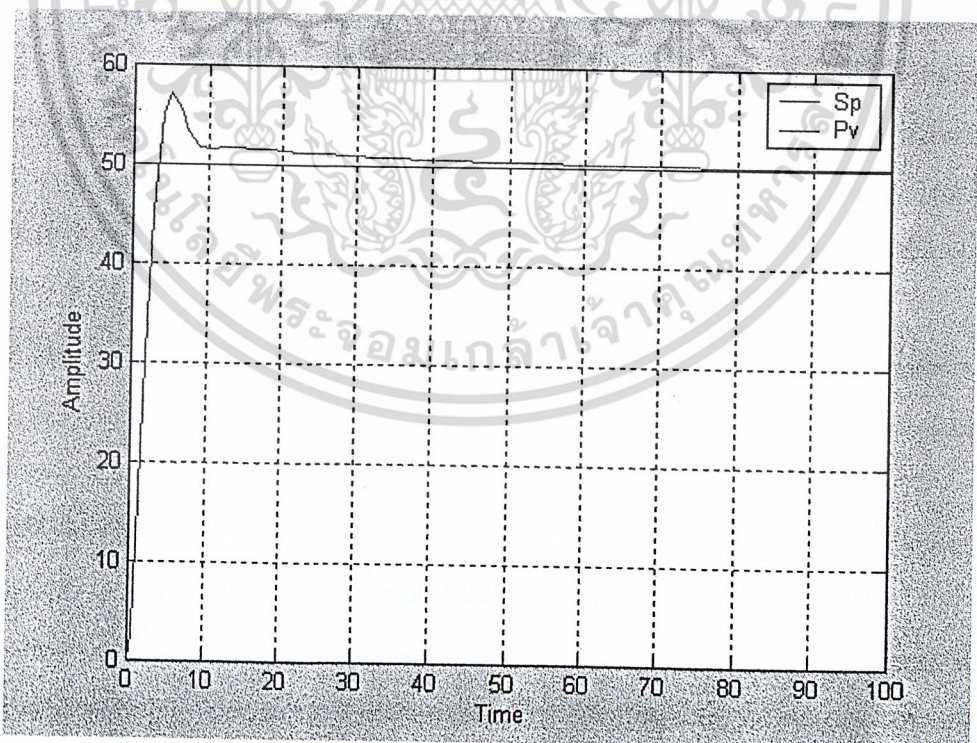
ตารางที่ 5.2 สรุปผลการทดลองเมื่อตัวควบคุมเป็นแบบ PID

Sp (%)	K_p	T_i (Sec)	T_d (Sec)	T_s (Sec)	M_p (%)	e_{ss}
25	3.3	12	0.11	96	24.2	0.2
50	2.33	12.5	0.12	84	19.35	0.1
75	2.13	12.15	0.58	110	8.53	1.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมทางทฤษฎีที่ค่าเป้าหมายเท่ากับ 25%



รูปที่ 5.12 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมทางทฤษฎีที่ค่าเป้าหมายเท่ากับ 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

ปฏิยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาและออกแบบโปรแกรมหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID แบบอัตโนมัติ สำหรับใช้เป็นเครื่องมือเสริมในการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ใช้ในอุตสาหกรรมเพื่อให้บุคลากรที่ขาดประสบการณ์หรือความชำนาญในการปรับแต่งหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID เนื่องจากการปรับแต่งหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจะต้องได้ค่าที่เหมาะสมและเพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ดี จะต้องใช้เวลานานสำหรับผู้ที่มีประสบการณ์น้อย ซึ่งโปรแกรมหาค่าพารามิเตอร์อัตโนมัตินี้สามารถช่วยลดเวลาและความยุ่งยากในการปรับแต่งหาค่าพารามิเตอร์เพื่อให้ได้ผลตอบสนองตามต้องการ

จากการทดลองใช้โปรแกรมหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID แบบอัตโนมัติไปใช้หาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในการควบคุมระดับของเหลว ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้จากโปรแกรมหาค่าอัตโนมัติสามารถนำไปใช้ควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากโปรแกรมหาค่าอัตโนมัติเป็นค่าที่ใช้ควบคุมกระบวนการให้มีประสิทธิภาพระดับหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นในการนำไปใช้งานจริงจึงต้องทำการปรับละเอียดอีกครั้งเพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ดีอย่างแท้จริงแต่ค่าที่ได้ก็เป็นค่าที่ใกล้เคียงแล้วฉะนั้นในการปรับละเอียดสามารถปรับเพียงเล็กน้อยก็ได้ค่าที่เหมาะสมกับกระบวนการแล้วนับว่าสามารถลดเวลาลงได้มากทีเดียวและประโยชน์อีกประการหนึ่งของโปรแกรมหาค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติคือ ช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการที่จะต้องซื้อตัวควบคุมที่สามารถปรับตัวเองได้แบบอัตโนมัติซึ่งมีราคาแพงมาใช้

6.2 ปัญหาที่พบในการออกแบบโปรแกรมหาค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติ

1. ต้องรู้และเข้าใจการทำงานของกระบวนการและทฤษฎีหลักการทำงานของ Auto-Tuner เสียก่อนรวมถึงโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบ
2. เนื่องจากวาล์วควบคุมจะเปิดมากในช่วง 50 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไปทำให้ที่ค่าเป้าหมายสูงๆจะควบคุมได้ยาก
3. เนื่องจากคอมพิวเตอร์ที่ใช้มีหน่วยความจำน้อยและมีการรบกวนของสัญญาณทำให้เมื่อรันไปแล้วเกิดการกระตุกบางครั้งค่าพารามิเตอร์ที่ได้อาจเพี้ยนไปจึงต้องทำการหาค่าพารามิเตอร์ใหม่

4. เนื่องจากกระบวนการ Non Linear ทำให้เมื่อป้อนสัญญาณ Relay เข้าไปแล้วค่าเอาต์พุตที่เกิดขึ้นจะไม่ค่อย Linear เมื่อนำไปคำนวณแล้วค่าพารามิเตอร์ที่ได้จึงไม่ดีเท่าที่ควรแต่ก็เป็นค่าที่ใกล้เคียง

6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางพัฒนา

โปรแกรมหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID แบบอัตโนมัตินี้เป็นโปรแกรมที่ช่วยในการหาค่าพารามิเตอร์ PID ที่ต้องใช้ปรับให้กับตัวควบคุม PID เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ดี ซึ่งสามารถช่วยแก้ปัญหาการขาดผู้ชำนาญและลดระยะเวลาในการหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมลงได้ในระดับหนึ่ง แต่ในอุตสาหกรรมยังมีสิ่งรบกวนหลายอย่างที่ทำให้ผลตอบสนองของกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งสิ่งรบกวนนั้นอาจทำให้ระบบทำงานผิดพลาด และอาจก่อให้เกิดผลเสียต่อกระบวนการผลิต ซึ่งโปรแกรมหาค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติสามารถพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้กับกระบวนการอื่นๆ ได้ ซึ่งหลักการของ Auto-Tuner โดยวิธี Relay นี้ใช้ได้กับทุกกระบวนการที่สามารถบังคับให้เกิดการแกว่งรอบค่าเป้าหมาย

บรรณานุกรม

- 1 Astrom , K. J. and Wittenmark B .(1934). Adaptive Control – Second Edition . Lund Institute of Technology.
2. Katsuhiko Ogata Modern Control Engineering Fourth Edition. University of Minnesota.
3. รศ.กิตติ ตีรเศรษฐ,รศ.วิทยา ทิพย์สุวรรณพรวิศวกรระบบควบคุม Control system.engineering และระบบควบคุมป้อนกลับ Feedback control system, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
4. อนุชิต จารุนารัตน์,“การออกแบบตัวควบคุมPID x(n-2) stage” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ,2543
5. ฉัตรแก้ว จิรไพโรจน์ และ ศิริวรรณ วิทยากร โกวิท , “ ตัวควบคุมพีไอดัชนีคหาค่าอัตโนมัติ ” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ,2542

