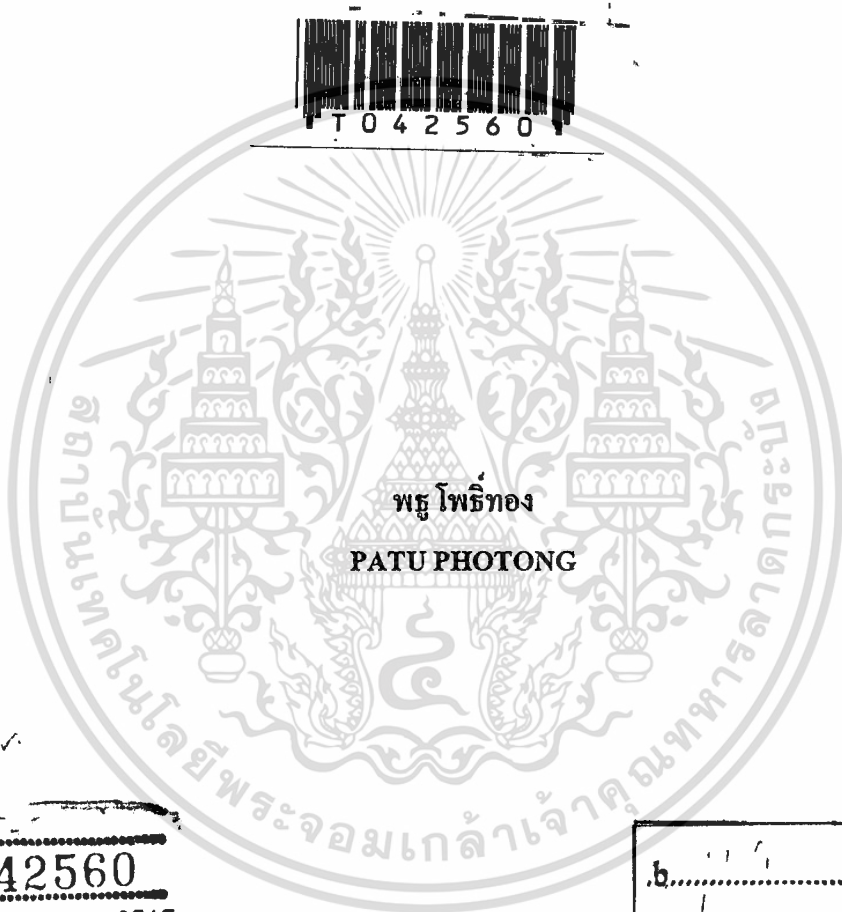
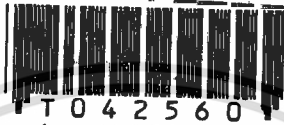


การออกแบบตัวควบคุม PI
สำหรับกระบวนการ SISO ด้วย CDM

PI CONTROLLER DESIGN FOR SISO PROCESS BY CDM



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 42560
วัน, เดือน, ปี 3 1 พ.ศ. 2545

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2545

ISBN 974-648-598-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PI CONTROLLER DESIGN FOR SISO PROCESS BY CDM



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2002

ISBN 974-648-598-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบตัวควบคุม PI สำหรับกระบวนการ SISO ด้วย CDM
นักศึกษา	นางสาวพฐุ โพธิ์ทอง
รหัสประจำตัว	41061148
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.จงกล งามวิวิทย์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับกระบวนการอินพุต-เดิควเอาต์พุตเดิควด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ วิธีการนี้ผู้ออกแบบสามารถกำหนดโพลีโนเมียลคุณลักษณะของระบบวงรอบปิดให้มีความเร็วในการตอบสนอง มีเสถียรภาพ และมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการได้โดยใช้ค่าคงตัวเวลาสมมูล และค่าครรชนีเสถียรภาพมาตรฐาน นอกจากนี้ยังสามารถออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ทำให้ระบบควบคุมมีผลการตอบสนองที่เร็วขึ้นโดยง่ายด้วยการปรับค่าครรชนีเสถียรภาพ

ผลการทดลองแสดงได้ด้วยการนำตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบโดยวิธี CDM ไปประยุกต์ใช้ควบคุมระดับน้ำของกระบวนการระดับน้ำในห้องปฏิบัติการ พบว่าผลตอบสนองของระบบควบคุมจะมีค่าพุ่งเกินน้อย และไม่เปลี่ยนแปลงนักเมื่อพารามิเตอร์ของกระบวนการเปลี่ยน นอกจากนี้ระบบควบคุมยังสามารถลดผลกระทบของตัวรบกวนได้

Thesis Title	PI Controller Design for SISO Process by CDM
Student	Ms. Patu Photong
Student ID.	41061148
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2002
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Dr. Jongkol Ngamwiwit

ABSTRACT

This thesis presents a PI Controller design method for SISO process by Coefficient Diagram Method (CDM). The designer can design the characteristic polynomial of the closed-loop system which has response as desired, stability and robustness by using the equivalent time constant and the standard stability index. This design method can also easily be designed for obtaining the faster response by adjusting the stability index. The PI controller designed by CDM is applied to control the level process in laboratory. The experimental results show that the controlled system has less overshoot without steady-state error and is robust when the parameter of the process has changed. Furthermore, the controlled system can reject the effect of the output disturbance.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับความเมตตาจาก รองศาสตราจารย์ ดร.จงกล งามวิวิทย์ ที่ได้ให้ความกรุณาแนะนำแก่ผู้วิจัยตลอดมา รวมถึงให้ความสนใจใส่ดูแลสอบถามถึงความก้าวหน้าอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ผู้วิจัยมีแรงบันดาลใจในการทำงานอย่างมีระบบและบริหารการใช้เวลาอย่างมีประสิทธิภาพ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ชุนจิ มานาเบะ (Prof. Shunji Manabe) และรองศาสตราจารย์ โนริยุกิ โคมิเนะ (Assoc. Prof. Noriyuki Komine) จากมหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น ที่ได้ให้คำแนะนำและปรึกษาปัญหาต่าง ๆ แก่ผู้วิจัยเสมอมา

ขอขอบคุณ อาจารย์ถาวร เบญจนาสุทธี และอาจารย์ทุก ๆ ท่าน ที่ได้ให้การช่วยเหลือและให้คำปรึกษาต่าง ๆ แก่ผู้วิจัยเสมอมา

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม ที่เอื้อเพื่ออุปกรณ์และเครื่องมือทั้งหมดตลอดจนสถานที่ รวมทั้งอำนวยความสะดวก จนผู้วิจัยสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสิ้น

ขอขอบคุณ โครงการสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ (ReCCIT) และ Japan International Cooperation Agency (JICA) ที่ได้ให้การสนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ อาจารย์เสถียร ธัญญะศรีรัตน์ และภาควิชาการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ที่เอื้อเพื่ออุปกรณ์ และเครื่องมือทั้งหมดตลอดจนสถานที่ในการทดลองเพื่อเก็บผลวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัทแพคริมโซลูชั่นส์ จำกัด ที่ได้เปิดโอกาสและให้เวลาในการศึกษาแก่ข้าพเจ้าตั้งแต่เริ่มต้น จนสำเร็จการศึกษา

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ และน้อง ๆ ทุกคน ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และเป็นกำลังใจให้ด้วยดีเสมอมา จนสามารถนำสิ่งต่าง ๆ ที่ได้รับมานั้นทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสิ้นสมบูรณ์ได้

และสุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่เคารพและรักยิ่ง ที่ให้โอกาสแก่ผู้วิจัยได้เล่าเรียนจนถึงวันนี้ ตลอดจนให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจเสมอมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีพึงได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

พญ โพร้ทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
คำย่อและสัญลักษณ์.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 กล่าวนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM.....	4
2.1 กล่าวนำ.....	4
2.2 โครงสร้าง CDM มาตรฐาน.....	4
2.3 นิยามและความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์.....	5
2.4 ค่ามาตรฐานสำหรับการออกแบบด้วยวิธี CDM.....	6
2.5 เงื่อนไขเสถียรภาพของ CDM.....	7
2.6 เงื่อนไขของการเลือกค่าครรชนีเสถียรภาพ.....	8
2.7 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์.....	8
บทที่ 3 การออกแบบตัวควบคุม PI ด้วยวิธี CDM.....	11
3.1 กล่าวนำ.....	11
3.2 การออกแบบตัวควบคุม PI ด้วยวิธี CDM.....	11
3.3 วิธีการกำหนดค่าครรชนีเสถียรภาพ.....	12
3.4 การกำหนดค่าพีลเดอร์.....	12
3.5 ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุม PI ด้วยวิธี CDM.....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การสร้างตัวควบคุม PI.....	14
4.1 กล่าวนำ.....	14
4.2 ฮาร์ดแวร์.....	14
4.2.1 การ์คเอนกประสงค์ (SKY-TR1) แปลงสัญญาณ A/D และ D/A.....	14
4.2.2 วงจรแรงดันเป็นกระแส.....	16
4.2.3 วงจรกระแสเป็นแรงดัน.....	18
4.3 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมในงานวิจัย.....	21
4.3.1 สมการอินทิกรัล.....	21
4.3.2 สมการเดรีเวทิฟ.....	22
4.3.3 ขั้นตอนการพัฒนาและการใช้งานของ โปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	23
บทที่ 5 การทดลอง.....	26
5.1 กล่าวนำ.....	26
5.2 การหาผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิดของกระบวนการ.....	27
5.2.1 โครงสร้างของกระบวนการควบคุมระดับน้ำ.....	27
5.2.2 ระบบวงรอบเปิดของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีสองถัง.....	28
5.3 การจำลองระบบควบคุมทั้งหมดด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	31
5.3.1 ผลการจำลองของระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM.....	32
5.3.2 ผลการจำลองของระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์.....	34
5.3.3 สมรรถนะเชิงตัวเลขของผลการจำลองของระบบควบคุม PI ที่ออกแบบ ด้วยวิธี CDM และวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์.....	35
5.3.4 ผลการจำลองของผลกระทบของสัญญาณรบกวนที่มีต่อระบบควบคุม PI.....	36
5.3.5 ผลการจำลองของผลตอบสนองของระบบควบคุม PI เมื่อลดค่า γ_1 และ γ_2 ลง.....	37
5.4 การควบคุมกระบวนการจริง.....	39
5.4.1 ผลการทดลองของระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM.....	40
5.4.2 ผลการทดลองของระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์.....	42
5.4.3 สมรรถนะเชิงตัวเลขของผลการทดลองของระบบควบคุม PI ที่ออกแบบ ด้วยวิธี CDM และซีเกลอร์-นิโคลส์.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.4.4 ผลกระทบของสัญญาครบวงที่มีต่อระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM และวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์.....	44
5.4.5 ผลการทดลองของผลตอบสนองของระบบควบคุม PI เมื่อลดค่า \mathcal{K}_1 และ \mathcal{K}_2 ลง.....	45
5.5 สรุปผลการทดลอง.....	46
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	48
บรรณานุกรม.....	49
ภาคผนวก.....	50
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ และ ได้รับการตีพิมพ์.....	51
ภาคผนวก ข โปรแกรมที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย.....	64
ประวัติผู้เขียน.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1	หมายเลขพอร์ต์ A/D และ D/A.....15
5.1	สมรรถนะของผลจำลองของระบบควบคุม PI.....36
5.2	สมรรถนะของผลจำลองของระบบควบคุม PI เมื่อลดค่า γ_1 และ γ_2 ลง สำหรับ กระบวนการที่ระบุ38
5.3	สมรรถนะของระบบควบคุม PI44
5.4	สมรรถนะของระบบควบคุม PI เมื่อลดค่า γ_1 และ γ_2 ลง สำหรับกระบวนการที่ระบุ....46



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้าง CDM มาตรฐานสำหรับระบบ SISO.....	4
2.2	ค่าตรวจนี้เสถียรภาพ และการเปลี่ยนแปลงของค่าตรวจนี้เสถียรภาพที่สอดคล้องกับเสถียรภาพและผลตอบสนอง.....	9
2.3	แผนผังค่าสัมประสิทธิ์.....	10
3.1	โครงสร้างของระบบควบคุม SISO	11
4.1	การวัดแอมป์กระแสแปลงสัญญาณ A/D และ D/A.....	15
4.2	วงจรแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขนาด 0-5 V. เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 4-20 mA.	16
4.3	วงจรแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขนาด 0-5 V. เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 4-20 mA. ที่ใช้งาน.....	18
4.4	วงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 4-20 mA. เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขนาด 0-5 V.	18
4.5	วงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 4-20 mA. เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขนาด 0-5 V. ที่ใช้งาน.....	20
4.6	บอร์ดของวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส และกระแสเป็นแรงดัน.....	20
4.7	สัญญาณควบคุมตามสมการอินทิกรัล.....	21
4.8	สัญญาณควบคุมตามสมการเดริเวทีฟ.....	22
4.9	แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	24
4.10	โครงสร้างของการติดตั้งระบบควบคุม.....	25
5.1	การควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล.....	27
5.2	โครงสร้างของกระบวนการควบคุมระดับน้ำ.....	28
5.3	ผลการตอบสนองของระบบวอร์อบเปิดของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีสองถัง.....	29
5.4	ผลจำลองของผลตอบสนองของการควบคุมกระบวนการระดับน้ำที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 30 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM.....	32
5.5	ผลจำลองของผลตอบสนองของการควบคุมกระบวนการระดับน้ำที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 35 เซนติเมตรด้วยตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM.....	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.6	ผลจำลองของผลตอบสนองของการควบคุมกระบวนการระดับน้ำที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 40 เซนติเมตรด้วยตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM.....33
5.7	ผลจำลองของผลตอบสนองของการควบคุมกระบวนการระดับน้ำที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 30 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์.....34
5.8	ผลจำลองของผลตอบสนองของการควบคุมกระบวนการระดับน้ำที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 35 เซนติเมตรด้วยตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์.....34
5.9	ผลจำลองของผลตอบสนองของการควบคุมกระบวนการระดับน้ำที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 40 เซนติเมตรด้วยตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์.....35
5.10	ผลจำลองของผลตอบสนองของการกระบวนการควบคุมระดับน้ำด้วยตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM เมื่อมีสัญญาณรบกวน.....36
5.11	ผลจำลองของผลตอบสนองของการกระบวนการควบคุมระดับน้ำด้วยตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ เมื่อมีสัญญาณรบกวน.....37
5.12	ผลจำลองของผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อลดค่า γ_1 และ γ_2 ลง.....38
5.13	แผนผังค่าสัมประสิทธิ์เมื่อลดค่า γ_1 และ γ_2 ลง.....39
5.14	ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 30 เซนติเมตรด้วยตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM.....40
5.15	ผลตอบสนองของการควบคุมกระบวนการระดับน้ำที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 35 เซนติเมตรด้วยตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM.....40
5.16	ผลตอบสนองของการควบคุมกระบวนการระดับน้ำที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 40 เซนติเมตรด้วยตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM.....41
5.17	ผลตอบสนองของการควบคุมกระบวนการระดับน้ำที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 30 เซนติเมตรด้วยตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์.....42
5.18	ผลตอบสนองของการควบคุมกระบวนการระดับน้ำที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 35 เซนติเมตรด้วยตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์.....42
5.19	ผลตอบสนองของการควบคุมกระบวนการระดับน้ำที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 40 เซนติเมตรด้วยตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์.....43
5.20	ผลตอบสนองของการควบคุมกระบวนการระดับน้ำของตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM เมื่อมีสัญญาณรบกวน.....44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.21	ผลตอบสนองของการควบคุมกระบวนการระดับน้ำของตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ เมื่อมีสัญญาณรบกวน.....	45
5.22	ผลตอบสนองของการควบคุมกระบวนการระดับน้ำเมื่อลดค่า γ_1 และ γ_2 ลง.....	46



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อและสัญลักษณ์

$U(s)$	หมายถึง ตัวแปรเอาต์พุตของตัวควบคุม
$C(s)$	หมายถึง ตัวแปรที่ถูกรบกวน
K_c	หมายถึง ค่าอัตราขยายของตัวควบคุม
K_I	หมายถึง ค่าอัตราขยายอินทิกรัลของตัวควบคุม
$D(s)$	หมายถึง ตัวแปรสัญญาณรบกวนภายนอก
$G_c(s)$	หมายถึง ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม
$B_d(s)$	หมายถึง พรีฟิลเตอร์ของระบบควบคุม
$G_p(s)$	หมายถึง ฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการ
τ	หมายถึง ค่าคงตัวเวลาสมมูล
γ_i	หมายถึง ค่าครรชนีเสถียรภาพ
γ_i^*	หมายถึง ค่าจำกัดเสถียรภาพ
e_{ss}	หมายถึง ค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว (<i>steady-state error</i>)
$G_{max}(s)$	หมายถึง ขอบเขตสูงสุดของกระบวนการ
$G_{min}(s)$	หมายถึง ขอบเขตต่ำสุดของกระบวนการ
$G_{nom}(s)$	หมายถึง กระบวนการระบุ (<i>nominal plant</i>)
os	หมายถึง ค่าพุ่งเกิน (<i>overshoot</i>)
t_r	หมายถึง ช่วงเวลาขึ้น (<i>rise time</i>)
t_s	หมายถึง ช่วงเวลาเข้าที่ (<i>settling time</i>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

ในการออกแบบตัวควบคุมนั้นเป้าหมายสูงสุดคือการสร้างตัวควบคุมที่สามารถควบคุมระบบให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสม และสามารถทำงานได้ในสภาวะแวดล้อมจริง เพราะว่าสิ่งแวดล้อมที่อยู่รอบตัวเรานั้นมีองค์ประกอบหลายอย่างที่เป็นสาเหตุให้ระบบมีการเปลี่ยนแปลง เช่น อายุการใช้งานของอุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ ซึ่งเมื่อใช้ไปนาน ๆ แล้ว ประสิทธิภาพในการทำงานจะลดน้อยลง อุณหภูมิ สภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป มีการรบกวนจากภายนอก (disturbance) ซึ่งเป็นสาเหตุให้การทำงานของระบบมีประสิทธิภาพลดลง คุณสมบัติของตัวควบคุมที่ดีนั้นจะต้องสามารถควบคุมให้ระบบควบคุมมีผลตอบสนองตามที่ได้ออกแบบไว้ มีเสถียรภาพ และสามารถควบคุมระบบที่มีพารามิเตอร์ของกระบวนการ (process) เปลี่ยนแปลงภายใต้ขอบเขตที่กำหนดไว้ล่วงหน้าได้อย่างเหมาะสม คุณสมบัตินี้เรียกว่า คุณสมบัติความคงทน (robustness) ของระบบควบคุม

สำหรับวิธีการที่จะใช้ในการออกแบบตัวควบคุมที่ดีนั้น นอกจากจะต้องเป็นวิธีที่สามารถทำให้ระบบควบคุมมีสมรรถนะที่ดีคือ สามารถควบคุมให้ระบบควบคุมมีผลตอบสนองตามที่ได้ออกแบบไว้ มีเสถียรภาพ และมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการแล้ว วิธีการที่ดีที่จะนำมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมจะต้องเป็นวิธีการที่สามารถออกแบบได้ง่าย เช่น วิธีของซีเกลอร์-นิโคลส์ (Zeigler-Nichols : Z-N) [1] ก็เป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจเนื่องจากสามารถออกแบบได้ง่าย และเป็นที่ยอมรับ

ในวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุม PI สำหรับกระบวนการที่มีอินพุตเดียว เอาต์พุตเดียว (single-input single-output : SISO) โดยใช้วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient Diagram Method : CDM) ซึ่งนำเสนอโดยศาสตราจารย์ซุนจิ มานาเบะ (Shunji Manabe) [2], [3] โครงสร้างของตัวควบคุมที่จะออกแบบนี้ขึ้นอยู่กับเสถียรภาพและความเร็วของระบบควบคุม โดยเสถียรภาพและความเร็วจะถูกออกแบบจากค่าดัชนีเสถียรภาพ (stability index : γ_i) และค่าคงตัวเวลาสมมูล (equivalent time constant : τ) ค่าดัชนีเสถียรภาพ และค่าคงตัวเวลาสมมูลจะเป็นตัวกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของโพลีโนเมียลคุณลักษณะ (characteristic polynomial) ค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้จะสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ของตัวควบคุมอย่างเป็นเชิงเส้น ทำให้สามารถออกแบบตัวควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ทำให้ระบบควบคุมมีสมรรถนะที่ดีทั้งสถานะชั่วคราว (transient state) และสถานะอยู่ตัว (steady state) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ผู้วิจัยและคณะ [4] ได้เคยนำเสนอไว้แล้ว

1.2 วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์

จากการศึกษาค้นคว้าและวิจัยพบว่า การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์นั้น ต้องใช้เวลาในการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมอยู่หลายครั้ง ดังนั้น จึงได้กำหนดวัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์ไว้ดังนี้

1. เพื่อนำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุม PI ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่าย และสามารถออกแบบได้อย่างรวดเร็ว แทนที่วิธีการเดิมที่มีอยู่
2. ระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีการนี้จะต้องมีเสถียรภาพ มีสมรรถนะดี และสามารถควบคุมระบบที่มีพารามิเตอร์ของกระบวนการเปลี่ยนแปลงภายใต้ขอบเขตที่กำหนดไว้ล่วงหน้าได้อย่างเหมาะสม
3. ตัวควบคุมที่ออกแบบนี้สามารถควบคุมระบบที่มีการรบกวนจากภายนอกได้

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาการออกแบบตัวควบคุม PI ด้วยวิธี CDM สำหรับระบบอินพุตเดียวเอาต์พุตเดียว
2. ออกแบบโปรแกรมเพื่อคำนวณหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยโปรแกรม MATLAB
3. พัฒนาโปรแกรมควบคุมที่ใช้ในการทำงานจริง และจำลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
4. ศึกษาโครงสร้างของกระบวนการที่มีพารามิเตอร์ทุกตัวเปลี่ยนแปลงเนื่องจากเปลี่ยนแปลงระดับของการควบคุม และระบบควบคุมที่มีการรบกวนจากภายนอก
5. ทดลองควบคุมกระบวนการจริงในห้องปฏิบัติการด้วยตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM และวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ และทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุม PI ที่ได้ ออกแบบด้วยวิธี CDM และวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์

1.4 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์ขอบเขตของการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้แบ่งออกเป็น 5 บท โดยมีรายละเอียดของแต่ละบทดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นการกล่าวถึงวัตถุประสงค์และหลักการใหม่ในการทำวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งรายละเอียดของวิทยานิพนธ์แต่ละบท

บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM ซึ่งประกอบด้วย โครงสร้างของ CDM มาตรฐาน นิยามและความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ รูปแบบมาตรฐานของ CDM เงื่อนไขเสถียรภาพ และแผนผังคำสั่งปฏิบัติ

บทที่ 3 เป็นการกล่าวถึงวิธีการออกแบบตัวควบคุม PI ด้วยวิธี CDM ซึ่งประกอบด้วยวิธีการออกแบบ การกำหนดค่าตรรกะเสถียรภาพ และค่าพรีฟิลเตอร์ (pre-filter)

บทที่ 4 เป็นการกล่าวถึงการสร้างตัวควบคุม PI ด้วยวิธี CDM ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนของฮาร์ดแวร์ (hardware) ซึ่งเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เชื่อมอุปกรณ์ภายนอกกับเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล และส่วนของซอฟต์แวร์ (software) ซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการทดลองเพื่อควบคุมระบบ ในส่วนของฮาร์ดแวร์นั้นประกอบด้วยการ์ดแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล วงจรแปลงสัญญาณแรงดันเป็นกระแส และวงจรแปลงสัญญาณกระแสเป็นแรงดัน และส่วนของซอฟต์แวร์นั้นประกอบด้วย โปรแกรมจำลองการทำงานของระบบ เพื่อใช้ทดสอบการทำงานของระบบก่อนนำไปใช้งานจริง และโปรแกรมที่ใช้ควบคุมกระบวนการในห้องปฏิบัติการ

บทที่ 5 เป็นการนำตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM ซึ่งได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 ไปควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการสองถัง และทดลองเชิงเปรียบเทียบกับตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์

บทที่ 6 เป็นการสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะในการพัฒนาการออกแบบตัวควบคุม PI ด้วยวิธี CDM ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

ในส่วนท้ายสุดของวิทยานิพนธ์นี้ จะเป็นภาคผนวกซึ่งแสดงผลการวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ และประวัติผู้เขียน

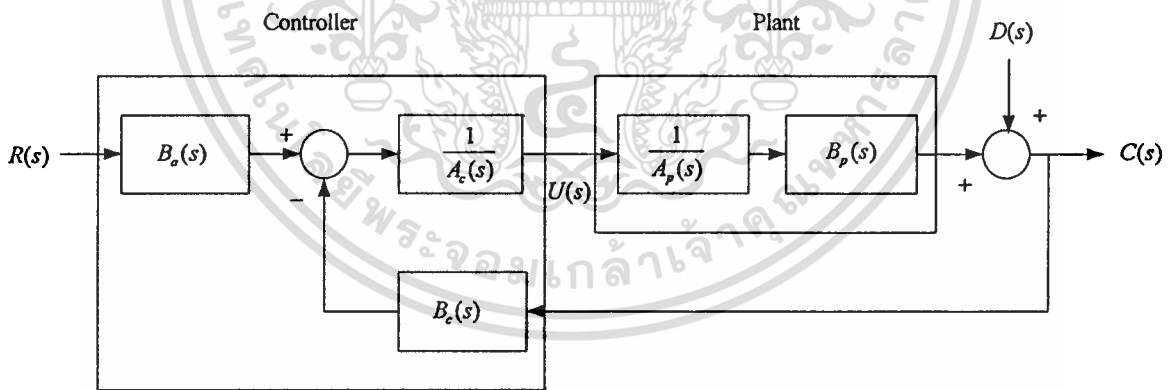
บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM

2.1 กล่าวนำ

การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ หรือ CDM เป็นวิธีการออกแบบตัวควบคุมที่นำเสนอโดยศาสตราจารย์ชุนจิ มานาเบะ (Shunji Manabe) ด้วยการใช้แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (coefficient diagram) เป็นเครื่องมือเพื่อแสดงถึงประสิทธิภาพและสมรรถนะของระบบควบคุม สมการคุณลักษณะและตัวควบคุมจะถูกออกแบบขึ้นพร้อม ๆ กับการพิจารณาถึงข้อกำหนดของสมรรถนะ (performance specification) การออกแบบด้วยวิธี CDM จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของโพลีโนเมียลคุณลักษณะโดยตรง ซึ่งแสดงอยู่ในรูปวงรอบปิดของพารามิเตอร์ของตัวควบคุมและกระบวนการทั้งตัวตั้งและตัวหารของตัวควบคุมและกระบวนการจะถูกแยกออกจากกันให้อยู่ในรูปของโพลีโนเมียลของ s แทนที่จะแสดงอยู่ในรูปของฟังก์ชันการถ่ายโอน สำหรับทฤษฎีพื้นฐานของ CDM นั้นมาจากเงื่อนไขเสถียรภาพของ Lipatov [2],[3]

2.2 โครงสร้าง CDM มาตรฐาน



รูปที่ 2.1 โครงสร้าง CDM มาตรฐานสำหรับระบบ SISO

โครงสร้างมาตรฐานของการออกแบบด้วยวิธี CDM สำหรับระบบ SISO แสดงได้ดังรูปที่ 2.1 ฟังก์ชันถ่ายโอนในรูปของโพลีโนเมียลของกระบวนการแสดงได้ดังสมการที่ (2.1a) และ (2.1b) ดังนี้

$$A_p(s) = p_k s^k + p_{k-1} s^{k-1} + \dots + p_0 \quad (2.1a)$$

$$B_p(s) = q_m s^m + q_{m-1} s^{m-1} + \dots + q_0 \quad (2.1b)$$

และโพลิโนเมียลของตัวควบคุมแสดงได้ดังสมการที่ (2.2a) , (2.2b) และ (2.2c) ตามลำดับดังนี้

$$A_c(s) = l_\lambda s^\lambda + l_{\lambda-1} s^{\lambda-1} + \dots + l_0 \quad (2.2a)$$

$$B_c(s) = k_\lambda s^\lambda + k_{\lambda-1} s^{\lambda-1} + \dots + k_0 \quad (2.2b)$$

$$B_a(s) = p_\lambda s^\lambda + p_{\lambda-1} s^{\lambda-1} + \dots + p_0 \quad (2.2c)$$

โดยที่ $\lambda < k$ และ $m < k$, $B_a(s)$ เป็นพรีฟิลเตอร์ของระบบควบคุม ซึ่งจะทำหน้าที่ให้ผลตอบสนองของระบบไม่มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว (steady-state error) เนื่องจากระบบควบคุมนี้มีฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม 2 ตัว ดังนั้น จึงถูกเรียกว่าระบบ two-degree-of-freedom (2DOF)

2.3 นิยามและความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์

โพลิโนเมียลคุณลักษณะของระบบควบคุมวงปิดซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ (2.1) แสดงได้ดังสมการที่ (2.3)

$$\begin{aligned} P(s) &= A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s) \\ &= a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 \\ &= \sum_{i=0}^n a_i s^i \end{aligned} \quad (2.3)$$

โดยที่ a_0, a_1, \dots, a_n เป็นสัมประสิทธิ์ของโพลิโนเมียลคุณลักษณะ

วิธีของ CDM นั้น ค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_p ค่าคงตัวเวลาสมมูล \mathcal{T} และค่าจำกัดเสถียรภาพ γ_i^* นั้นมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เพราะเป็นตัวกำหนดความเร็วในการตอบสนอง เสถียรภาพ และความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบควบคุม และแสดงได้ดังสมการที่ (2.4) , (2.5) และ (2.6) ตามลำดับดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\gamma_i = \frac{a_i^2}{a_{i+1}a_{i-1}} \quad (2.4)$$

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} \quad (2.5)$$

$$\gamma_i^* = \frac{1}{\gamma_{i+1}} + \frac{1}{\gamma_{i-1}} \quad ; \quad \gamma_0, \gamma_n = \infty \quad (2.6)$$

โดยที่ $i=1, \dots, n-1$ จากสมการที่ (2.4) ถึง (2.6) ค่าสัมประสิทธิ์ a_i ของโพลิโนเมียลคุณลักษณะ $P(s)$ สามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} a_i &= a_0 \tau^i \frac{1}{\gamma_{i-1} \dots \gamma_2^{i-2} \gamma_1^{i-1}} \\ &= a_0 \tau^i \prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{(\gamma_{i-j})^j} \end{aligned} \quad (2.7)$$

ดังนั้น จึงสามารถเขียนโพลิโนเมียลคุณลักษณะ $P(s)$ เพื่อที่จะใช้สำหรับออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM ได้ดังนี้

$$P(s) = a_0 \left[\sum_{i=2}^n \left(\prod_{j=1}^{i-1} 1/\gamma_{i-j}^j \right) (\tau s)^i \right] + \tau s + 1 \quad (2.8)$$

2.4 ค่ามาตรฐานสำหรับการออกแบบด้วยวิธี CDM

เพื่อให้ระบบควบคุมมีสมรรถนะตามที่ต้องการ จึงได้กำหนดให้ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ และค่าครรชนีเสถียรภาพมาตรฐาน γ_i ดังสมการที่ (2.9) และ (2.10)

$$t_s = 2.5 \sim 3\tau \quad (2.9)$$

$$\gamma_{n-1} = \dots = \gamma_3 = \gamma_2 = 2, \gamma_1 = 2.5 \quad (2.10)$$

2.5 เงื่อนไขเสถียรภาพของ CDM

เงื่อนไขความมีเสถียรภาพของ CDM ที่ได้มาจาก Lipatov นั้นเป็นดังต่อไปนี้
จากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ของ Routh-Hurwitz criterion เงื่อนไขเสถียรภาพสำหรับระบบ
อันดับ 3 และ 4 คือ

$$\gamma_i > \gamma_i^*, \quad i=1 \sim n-1 \quad (2.11)$$

สำหรับระบบที่มีอันดับสูงกว่านั้น หรือรวมทั้งอันดับที่ 5 เงื่อนไขที่พอเพียงสำหรับเสถียรภาพ และ
ไม่เสถียรภาพที่ได้มาจาก Lipatov แสดงในสมการที่ (2.12) และ (2.13) ตามลำดับดังนี้

$$\begin{aligned} \gamma_i > 1.12 \gamma_i^* & \quad \text{สำหรับบางค่าของ } i=1 \sim n-1 \\ (\gamma_{i+1} \gamma_i)^{0.5} > 1.47 & \quad \text{สำหรับบางค่าของ } i=1 \sim n-2 \end{aligned} \quad (2.12)$$

และ

$$(\gamma_{i+1} \gamma_i)^{0.5} < 1 \quad \text{สำหรับบางค่าของ } i=1 \sim n-2 \quad (2.13)$$

ในบางครั้งจะแสดงเงื่อนไขความมีเสถียรภาพและความไม่มีเสถียรภาพในเทอมของสัมประสิทธิ์
ของโพลิโนเมียลคุณลักษณะได้ดังนี้

เงื่อนไขความมีเสถียรภาพสำหรับระบบอันดับ 3

$$a_2 a_1 > a_3 a_0 \quad (2.14)$$

เงื่อนไขความมีเสถียรภาพสำหรับระบบอันดับ 4

$$\begin{aligned} a_2^2 / (a_4 a_0) = \gamma_2 = \gamma_3 \gamma_2^2 \gamma_1 & > 4 [0.5 + 0.25(\mu + 1) / \mu] \\ \mu = (a_3 / a_1)^2 / (a_4 / a_0) = \gamma_3 / \gamma_1 \end{aligned} \quad (2.15)$$

เงื่อนไขพอเพียงสำหรับเสถียรภาพสำหรับระบบอันดับ 5 หรือสูงกว่า

$$\begin{aligned} a_i^2 / (a_{i+2} a_{i-2}) = \gamma_{i2} = \gamma_{i+1} \gamma_i^2 \gamma_{i-1} & > 5 [0.5 + 0.25(\mu + 1) / \mu] \\ \mu = (a_{i+1} / a_{i-1})^2 / (a_{i+2} / a_{i-2}) = \gamma_{i+1} / \gamma_{i-1} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{สำหรับค่าใด ๆ ของ } i = 2 \sim n-2 \quad (2.16)$$

เงื่อนไขพอเพียงสำหรับความไม่มีเสถียรภาพ

$$a_{i+1}a_i < a_{i+2}a_{i-1} \quad \text{สำหรับบางค่าของ } i = 1 \sim n-2 \quad (2.17)$$

2.6 เงื่อนไขของการเลือกค่าครรชนีเสถียรภาพ

โดยทั่ว ๆ ไปแล้ว ค่าครรชนีเสถียรภาพ $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = 2$ จะเป็นเงื่อนไขเบื้องต้นที่ต้องกำหนดก่อนเพื่อให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพและผลตอบสนองตามที่ต้องการ แต่อย่างไรก็ตามก็ไม่จำเป็นที่จะต้องกำหนดให้ $t_s = 2.5 \tau$ และ $\gamma_4 \sim \gamma_{n-1} = 2$ แต่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ภายใต้เงื่อนไขของสมการที่ (2.18)

$$\gamma_i > 1.5\gamma_i' \quad (2.18)$$

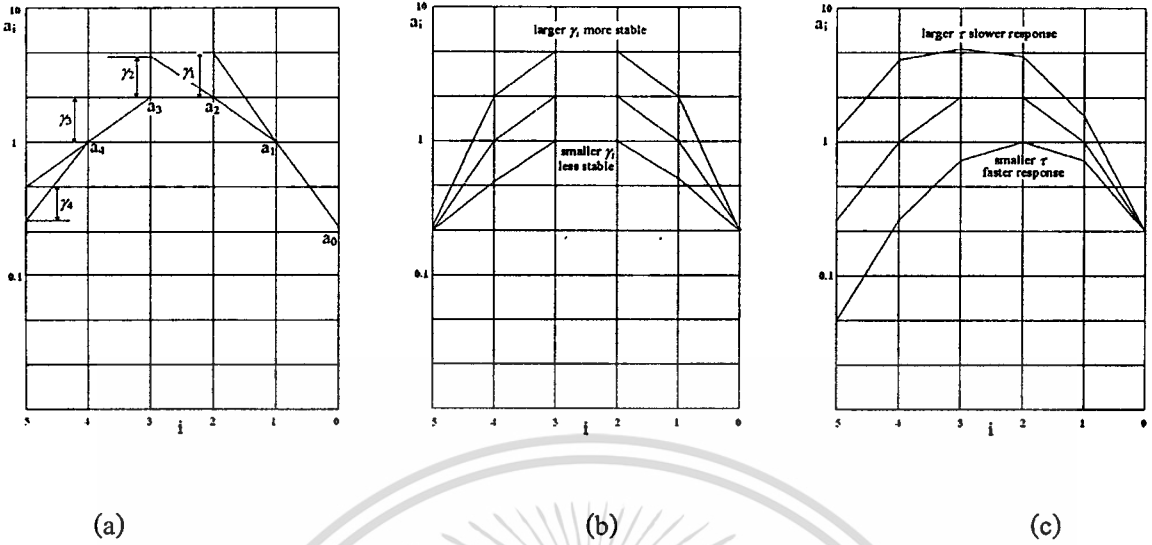
สำหรับค่ามาตรฐานในสมการที่ (2.10) สามารถใช้ในการออกแบบตัวควบคุมได้ ถ้าเงื่อนไขสำหรับการออกแบบตัวควบคุมเป็นไปตามสมการที่ (2.19)

$$p_k/p_{k-1} > \tau(\gamma_{n-1}\gamma_{n-2}\dots\gamma_1) \quad (2.19)$$

ซึ่ง p_k และ p_{k-1} เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของกระบวนการอันดับที่ k และ $k-1$ ตามลำดับ ถ้าไม่เป็นไปตามเงื่อนไขในสมการที่ (2.18) ก็สามารถเปลี่ยนแปลงค่า γ_{n-1} จนกระทั่งสอดคล้องกับเงื่อนไขในสมการที่ (2.19)

2.7 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์

การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM นั้น เครื่องมือที่แสดงให้เห็นถึงเสถียรภาพและความเร็วของผลตอบสนองเมื่อการเปลี่ยนแปลงของค่าครรชนีเสถียรภาพแสดงได้ด้วยแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.2



$$P(s) = \sum_{i=0}^n a_i s^i$$

รูปที่ 2.2 ค่าธรรมเนียมเสถียรภาพ และการเปลี่ยนแปลงของค่าธรรมเนียมเสถียรภาพที่สอดคล้องกับเสถียรภาพ และผลตอบสนอง

จากรูปที่ 2.2a แสดงให้เห็นถึงค่าธรรมเนียมเสถียรภาพในเชิงของรูปภาพ ส่วนรูปที่ 2.2b แสดงให้เห็นว่าเมื่อเส้นโค้ง a_i มีความโค้งสูงขึ้น ระบบควบคุมจะมีเสถียรภาพมากขึ้น สอดคล้องกับ γ_j ที่มีค่ามากขึ้น และรูปที่ 2.2c แสดงให้เห็นว่าเมื่อปลายเส้นโค้ง a_i เบี่ยงไปทางซ้ายมากขึ้น ค่าคงตัวเวลาสมมูล \mathcal{T} จะมีค่าน้อยลงและผลตอบสนองจะเร็วขึ้น

ดังนั้นถ้ากำหนดให้โพลีโนเมียลคุณลักษณะของระบบควบคุมวงปิดคือ

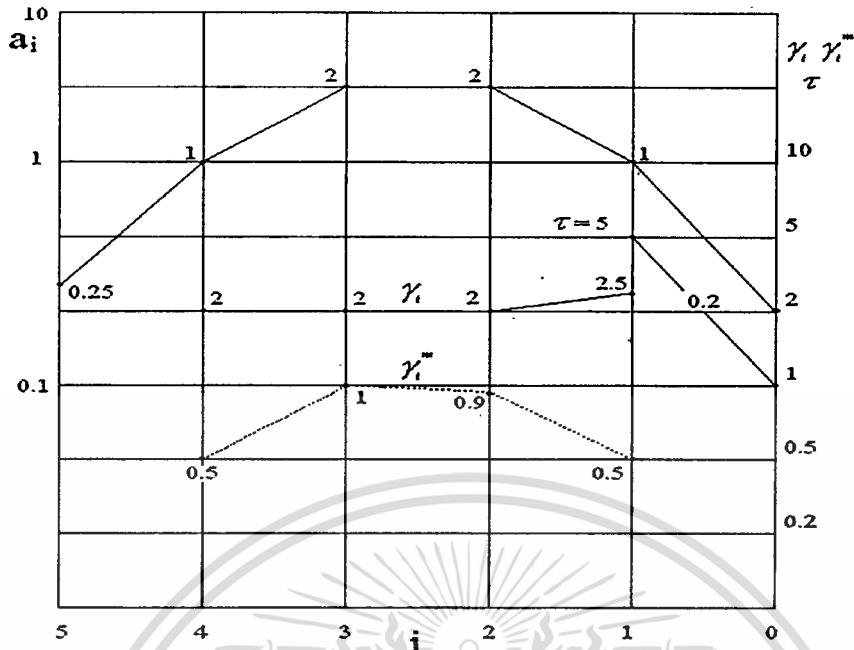
$$P(s) = 0.25s^5 + s^4 + 2s^3 + 2s^2 + s + 0.2 \quad (2.20)$$

จะสามารถเขียนเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ a_i ของโพลีโนเมียลคุณลักษณะ $P(s)$ ได้ดังนี้

$$a_i = [0.25 \ 1 \ 2 \ 2 \ 1 \ 0.2] \quad (2.21)$$

ดังนั้น แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งประกอบด้วยค่าสัมประสิทธิ์ a_i ค่าธรรมเนียมเสถียรภาพ γ_j ค่าคงตัวเวลาสมมูล \mathcal{T} และค่าจำกัดเสถียรภาพ γ_j^* สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์

ในบทต่อไปจะกล่าวถึงการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI ด้วยวิธี CDM ตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทนี้

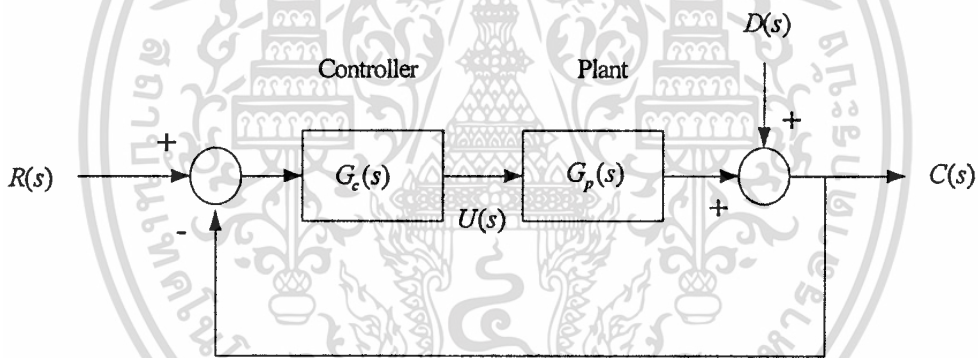
บทที่ 3

การออกแบบตัวควบคุม PI ด้วยวิธี CDM

3.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะนำวิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 มาออกแบบตัวควบคุม PI ด้วยวิธี CDM โดยจะแยกพิจารณาออกเป็นส่วน ๆ คือ ส่วนแรกเป็นการแสดงการออกแบบตัวควบคุม PI สำหรับกระบวนการ SISO ด้วยวิธี CDM ส่วนถัดไปเป็นการกำหนดค่าพารามิเตอร์ซึ่งจะนำมาใช้ในขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุม PI ด้วยวิธี CDM จากนั้นเป็นส่วนที่กำหนดค่าพรีฟิลเตอร์ของระบบควบคุม และส่วนสุดท้ายจะอธิบายถึงขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุม PI ด้วยวิธี CDM

3.2 การออกแบบตัวควบคุม PI ด้วยวิธี CDM



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของระบบควบคุม SISO

จากโครงสร้างของระบบควบคุมดังรูปที่ 3.1 ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม PI ดังเดิมคือ

$$\begin{aligned} G_c(s) &= K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \\ &= K_c + \frac{K_i}{s} \\ &= \frac{K_c s + K_i}{s} \end{aligned} \quad (3.1)$$

โดยที่ K_c คือ ค่าอัตราขยายของตัวควบคุม T_i คือ ค่าเวลาอินทิกรัล และ $K_i = \frac{K_c}{T_i}$ คือ ค่า

อัตราขยายอินทิกรัลของตัวควบคุม PI

เมื่อจัด $G_c(s)$ ให้อยู่ในรูปโครงสร้างของ CDM มาตรฐานสำหรับระบบควบคุม SISO ดังรูปที่ 2.1 ดังนั้น ตัวควบคุม $G_c(s)$ ซึ่งมีโพลีโนเมียลของตัวควบคุม PI ที่สอดคล้องกับสมการที่ (2.2a) และ (2.2b) คือ

$$\frac{B_c(s)}{A_c(s)} = \frac{k_1 s + k_0}{s} \quad (3.2)$$

โดยที่ $l_1 = 1$ และ $l_0 = 0$

เมื่อเปรียบเทียบสมการที่ (3.1) กับสมการที่ (3.2) แล้ว จะเห็นว่า ค่าพารามิเตอร์ K_c และ K_i ของตัวควบคุม PI จะเท่ากับ k_1 และ k_0 ตามลำดับ ดังนั้น เมื่อหาค่าของ k_1 และ k_0 ด้วยวิธี CDM ได้แล้ว ก็หมายความว่า สามารถหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI ซึ่งก็คือ K_c และ K_i ด้วยวิธี CDM ได้

3.3 การกำหนดค่าדרชนีเสถียรภาพ

ในส่วนนี้เป็นการหาค่าครชนีเสถียรภาพที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM โดยเริ่มต้นจากการกำหนดค่าครชนีเสถียรภาพจากค่าครชนีเสถียรภาพมาตรฐาน γ_i ในสมการที่ (2.10) ซึ่งจะได้ค่าครชนีเสถียรภาพดังสมการที่ (3.3)

$$\gamma_2 = 2, \gamma_1 = 2.5 \quad (3.3)$$

3.4 การกำหนดค่าพรีฟิลเตอร์

สำหรับค่าพรีฟิลเตอร์ $B_a(s)$ ของระบบควบคุมที่จะกำหนดในส่วนนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมไม่มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว สำหรับในที่นี้เพื่อที่จะทำให้ระบบควบคุมมีค่าพุ่งเกินน้อย (overshoot) จึงกำหนดให้ค่าพรีฟิลเตอร์ของระบบควบคุมคือ

$$B_a(s) = k_0 \quad (3.4)$$

3.5 ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุม PI ด้วย วิธี CDM

จากหัวข้อ 3.2 ถึง 3.4 สามารถเขียนขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุม PI ด้วยวิธี CDM ได้ดังต่อไปนี้

- 1) กำหนดค่าครชนีเสถียรภาพ γ_i ที่เหมาะสม ตามสมการที่ (3.3) และหาค่าคงตัวเวลา
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมูล \mathcal{T}

- 2) หาค่าพารามิเตอร์ k , และ k_0 ของตัวควบคุม PI โดยนำสมการที่ (2.3) ซึ่งเป็นโพลิโนเมียลคุณลักษณะที่มีตัวควบคุม PI ดังแสดงได้ในสมการที่ (3.2) และโพลิโนเมียลของกระบวนการ $G_p(s)$ ที่ได้จากการเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการ $G_p(s)$ ให้อยู่ในรูปของสมการที่ (2.1a) และ (2.1b) ไปเปรียบเทียบกับโพลิโนเมียลคุณลักษณะของสมการที่ (2.8)
- 3) กำหนดค่าพรีฟิลเตอร์ $B_d(s)$ ตามสมการที่ (3.4)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การสร้างตัวควบคุม PI

4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้เป็นการสร้างตัวควบคุม PI เพื่อที่จะนำมาใช้ในการจำลองการทำงานของระบบควบคุมและทดลองควบคุมกระบวนการในห้องปฏิบัติการ การสร้างตัวควบคุม PI นี้แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ ส่วนของฮาร์ดแวร์เป็นวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ที่ใช้เชื่อมโยงอุปกรณ์ภายนอกเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) และเป็นตัวส่งสัญญาณควบคุมให้กับระบบควบคุม ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (A/D converter) ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้า 1-5 โวลท์ ที่วัดได้จากอุปกรณ์เซนเซอร์ให้เป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อนำไปใช้ป้อนกลับให้กับระบบ วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อก (D/A converter) ทำหน้าที่ส่งสัญญาณควบคุม PI วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส (V/I converter) วงจรแปลงกระแสเป็นแรงดัน (I/V converter) เนื่องจากอุปกรณ์ควบคุมในกระบวนการต้องการอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 4-20 มิลลิแอมป์ ในส่วนของซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม PI แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของโปรแกรม Matlab ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบในงานวิศวกรรมหลายแขนง ใช้สำหรับจำลองการทำงานของระบบควบคุมวงรอบปิดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และอีกส่วนคือ โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการควบคุม ซึ่งพัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรมภาษาซีบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล เพื่อทำหน้าที่ควบคุมกระบวนการในห้องปฏิบัติการจริง จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ออกไปแสดงผลการควบคุมด้วยโปรแกรม Matlab

4.2 ฮาร์ดแวร์

4.2.1 การ์ดเอนกประสงค์ (SKY-TR1) แปลงสัญญาณ A/D และ D/A

การ์ดแปลงสัญญาณ A/D และ D/A ที่ใช้ในงานวิจัย มีคุณสมบัติที่สำคัญดังนี้

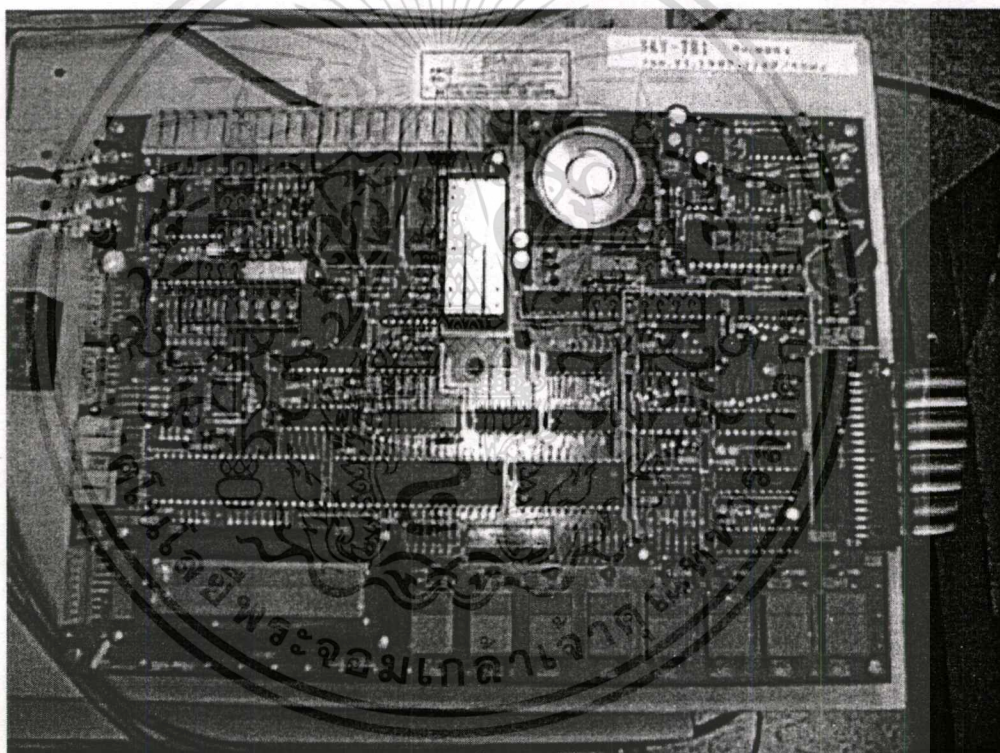
- วงจรในส่วนของการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 12 บิต มีขนาดแรงดันที่ต้องการ 0-10V และ 0-12V และรับสัญญาณอินเตอร์เฟสได้ 4 ช่องสัญญาณ โดยใช้ IC#AD1764JN
- วงจรในส่วนของการแปลงสัญญาณสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกขนาด 12 บิต มีขนาดของแรงดันที่จ่าย 0-5V และ 0-10V และส่งสัญญาณเอาต์พุตได้ 2 สัญญาณ โดยใช้ IC#AD7237JN

ซึ่งหมายเลขพอร์ต A/D และ D/A แสดงได้ดังตารางต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 หมายเลขพอร์ต A/D และ D/A

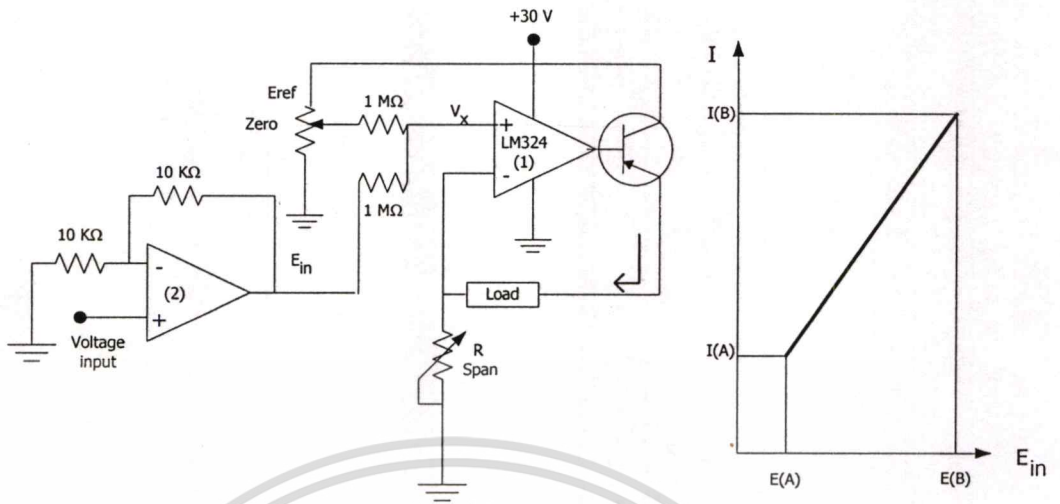
188 H	A/D	8 bits start A/D 0ch~3ch
189H	A/D	4 bits & busy
18AH	A/D	A/D address
18BH	D/A	start D/A ch A,B
18CH	D/A	D/A ch A 8 bits
18DH	D/A	D/A ch A 4 bits
18EH	D/A	D/A ch B 8 bits
18FH	D/A	D/A ch B 4 bits



รูปที่ 4.1 การ์ดเอนกประสงค์แปลงสัญญาณ A/D และ D/A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส



รูปที่ 4.2 วงจรแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขนาด 0-5 V. เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 4-20 mA.

จากรูปที่ 4.2 เป็นวงจรที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากการ์ด D/A ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0-5 Volt ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง 4-20 mA. เพื่อนำกระแสไฟฟ้างี้ไปควบคุมการทำงานของ Diaphragm Value ภายในวงจรจะมีวงจรปรับ Span และ ปรับ Zero เพื่อให้ได้กระแสไฟฟ้าในย่านที่ต้องการใช้งาน ในการปรับกระแสไฟฟ้าให้ได้ตามที่ต้องการนั้นจะต้องหา R และ E_{ref} ซึ่งได้จากการกำหนดช่วงแรงดันที่ต้องการก่อน ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้ จากวงจรเราสามารถหาความสัมพันธ์ของค่าแรงดันอินพุต E_{in} ได้จาก

$$E_{in} = I_{in}(1M\Omega) - I_{in}(1M\Omega) - E_{ref} = 0 \quad (4.1)$$

โดยสามารถคำนวณหากระแสอินพุตได้จาก

$$I_{in} = \frac{E_{in} - E_{ref}}{2M\Omega} \quad (4.2)$$

ในรูปของแรงดันอินพุต E_{in} ให้เป็นศูนย์จะได้

$$V_x = E_{in} - \frac{E_{in} - E_{ref}}{2M\Omega} (1M\Omega)$$

$$= \frac{E_{in} + E_{ref}}{2}$$
(4.3)

ดังนั้นจะหากระแสไหลผ่านโหลด I_L ได้จาก

$$I_L = \frac{E_{in} + E_{ref}}{2R}$$
(4.4)

จากสมการของ I_L สามารถหากระแสในรูปที่จุด A และ B ได้ดังนี้คือที่จุด A จะได้

$$I(A) = \frac{E(A) - E_{ref}}{2R}$$
(4.5)

และที่จุด B จะได้

$$I(B) = \frac{E(B) - E_{ref}}{2R}$$
(4.6)

จากสมการที่ (4.5) และ (4.6) จัดรูปสมการใหม่ได้ดังสมการที่ (4.7) และ (4.8) ดังนี้

$$2RI(A) = E(A) + E_{ref}$$
(4.7)

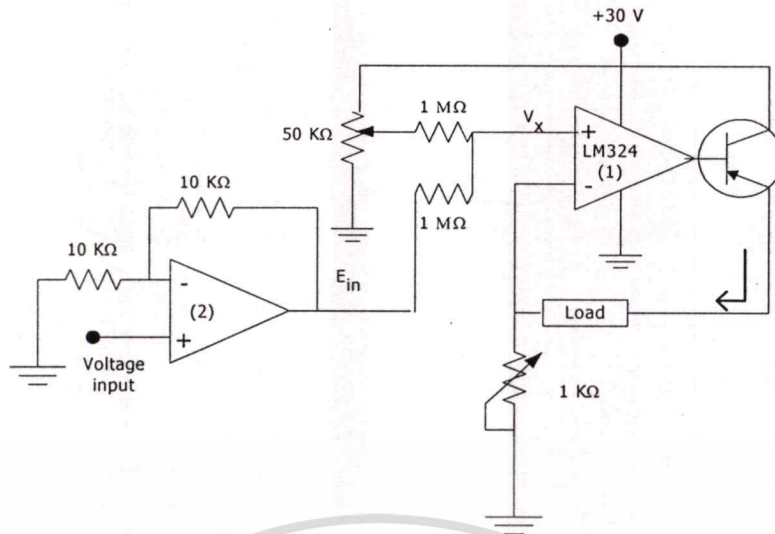
$$2RI(B) = E(B) + E_{ref}$$
(4.8)

จากสมการที่ (4.7) และ (4.8) สามารถแก้สมการหาค่า R และ E_{ref} ของวงจรได้ดังสมการที่ (4.9) และ (4.10) ดังนี้

$$R = \frac{E(B) - E(A)}{2[I(B) - I(A)]}$$
(4.9)

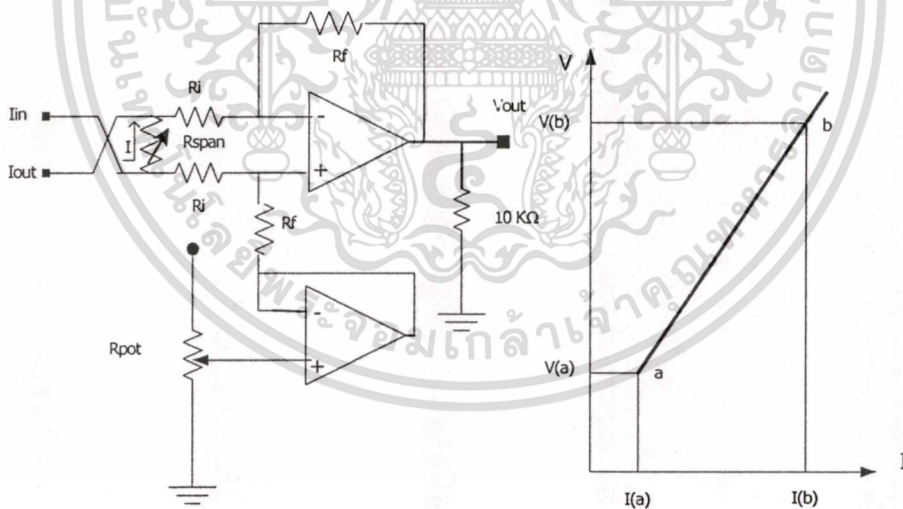
$$E_{ref} = 2RI(B) - E(B)$$
(4.10)

จากสมการที่ (4.9) และ (4.10) เมื่อคำนวณหาค่า R และ E_{ref} แล้วจะได้วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสที่ใช้งานแสดงได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 วงจรแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขนาด 0-5 V. เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 4-20 mA. ที่ใช้งาน

4.2.3 วงจรแปลงกระแสเป็นแรงดัน



รูปที่ 4.4 วงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 4-20 mA. เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขนาด 0-5 V.

จากรูปที่ 4.4 เป็นวงจรที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง 4-20 mA เป็นแรงดันไฟฟ้าซึ่งมีค่าเท่ากับ 0-5 Volt ในการนำวงจรนี้ไปใช้งานนั้น จะต้องกำหนดช่วงแรงดันเอาท์พุท และแรงดันเริ่มต้นด้านต่ำ จากนั้นก็กำหนดช่วงของกระแส และจุดเริ่มต้นของกระแส เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านต่ำ แล้วนำไปหาค่าความต้านทานที่ต้องการปรับสเปน R_{span} และแรงดันที่จุดศูนย์ มีวิธีการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

แรงดันเอาต์พุต V_{out} หาได้จาก

$$V_{out} = \frac{R_f}{R_i} IR_{span} + V_z \quad (4.11)$$

กำหนดจุดแรงดันเริ่มต้นด้านต่ำหรือ $V(a)$ ได้จากสมการที่ (4.12)

$$V(a) = \frac{R_f}{R_i} I(a)R_{span} + V_z \quad (4.12)$$

และกำหนดจุดแรงดันปลายหรือ $V(b)$ ได้จากสมการที่ (4.13)

$$V(b) = \frac{R_f}{R_i} I(b)R_{span} + V_z \quad (4.13)$$

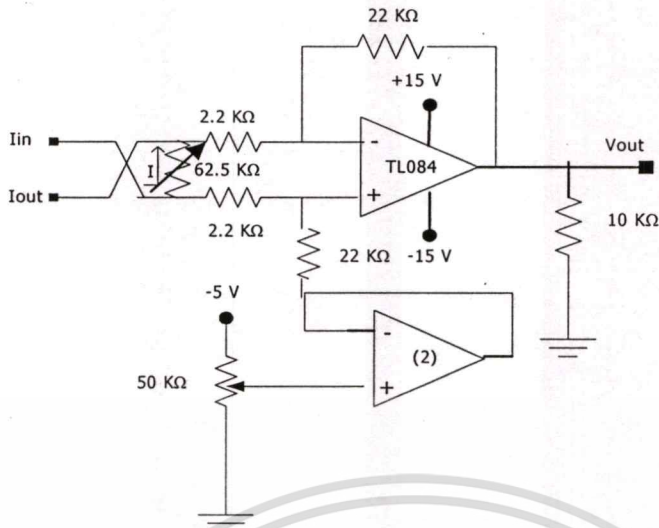
การกำหนดแรงดัน $V(a)$ และ $V(b)$ และกระแส $I(a)$ และ $I(b)$ เป็นการกำหนดว่าต้องการใช้งานที่แรงดันเท่าใด และสามารถคำนวณหาค่า R_{span} ได้ดังนี้

$$R_{span} = \frac{V(a) - V(b)}{\frac{R_f}{R_i} [I(b) - I(a)]} \quad (4.14)$$

เมื่อได้กำหนดช่วงแรงดัน กระแส และ R_{span} เรียบร้อยแล้ว จะสามารถหาแรงดันที่จุดศูนย์ V_z ได้จาก

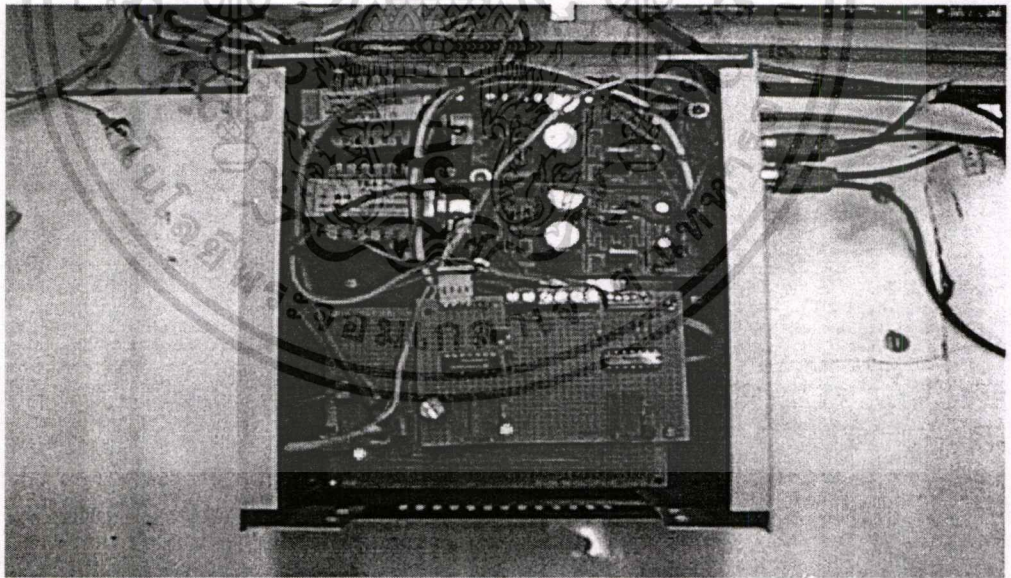
$$V_z = V(a) - \frac{R_f}{R_i} I(a)R_{span} \quad (4.15)$$

เมื่อคำนวณหาค่าของ R_{span} และ V_z ได้จากสมการที่ (4.14) และ (4.15) แล้ว จะได้อุปกรณ์แปลงกระแสเป็นแรงดันที่ใช้งานแสดงได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 วงจรแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 4-20 mA. เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขนาด 0-5 V. ที่ใช้งาน

จากวงจรการแปลงแรงดันเป็นกระแส และวงจรแปลงกระแสเป็นแรงดันที่ใช้งาน ดังรูปที่ 4.3 และ 4.5 มีแผ่นวงจรพิมพ์ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 บอร์ดของวงจรแปลงสัญญาณแรงดันเป็นกระแส และกระแสเป็นแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

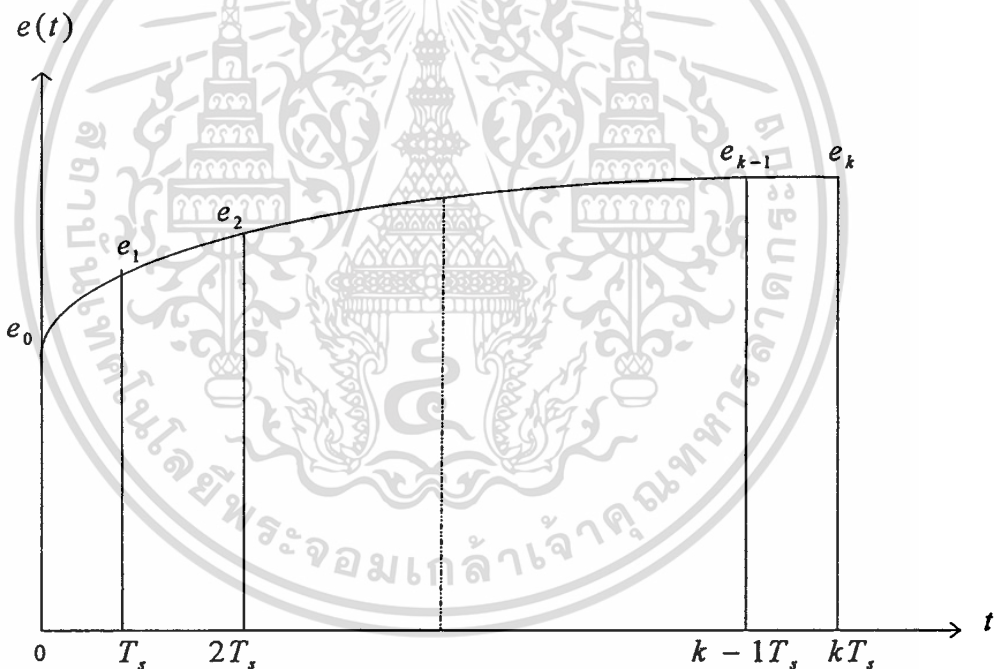
4.3 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมในงานวิจัย

ในส่วนนี้จะเป็นส่วนของการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาด้วยภาษาซีเพื่อควบคุมกระบวนการด้วยคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล การควบคุมกระบวนการด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นตัวควบคุมจะทำงานในระบบดิจิทัล ซึ่งในระบบดิจิทัลนั้นจะต้องมีการสุ่มตัวอย่างค่าตัวแปร (sample) ของระบบมาทำการคำนวณ โดยมีช่วงเวลาการสุ่ม (sampling time) คงที่ ดังนั้น การคำนวณตามสมการ PID ในระบบดิจิทัลจะทำในทุกช่วงเวลาทำการสุ่มเท่านั้น ไม่ได้ทำแบบต่อเนื่อง ซึ่งจะแยกการพิจารณาได้ดังนี้

4.3.1 สมการอินทิกรัล (I)

$$c(t) = \int_0^t e(t) dt \quad (4.16)$$

โดยที่ $c(t)$ คือสัญญาณควบคุมที่เวลา t และ $e(t)$ คือ ค่าผิดพลาดที่เวลา t



รูปที่ 4.7 สัญญาณควบคุมตามสมการอินทิกรัล

จากรูปที่ 4.7 พบว่าค่า $c(t)$ คือพื้นที่ใต้กราฟนั่นเอง ถ้าแบ่งช่วงเวลาออกเป็นช่วงเล็ก ๆ ให้เท่ากัน ช่วงละ T_s จะสามารถประมาณพื้นที่ดังกล่าวได้ด้วยผลรวมของผลคูณระหว่างค่าผิดพลาดที่เวลา T_s ใด ๆ กับค่าคงที่ T_s หรืออธิบายได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 e(t) &= T_s e_0 + T_s e_1 + T_s e_2 + \dots + T_s e_k \quad ; k = t/T_s \\
 &= T_s \sum_{i=0}^k e_i
 \end{aligned}
 \tag{4.17}$$

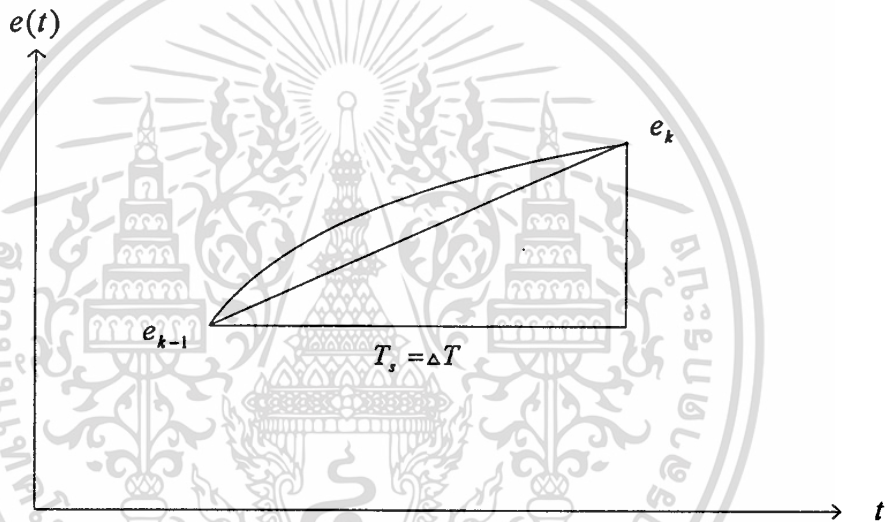
โดยที่ T_s คือ ค่าเวลาสุ่ม

e_i คือ ค่าผิดพลาดที่เวลาสุ่มลำดับที่ i

4.3.2 สมการเดริเวทีฟ (D)

$$c(t) = \frac{de(t)}{dt} \tag{4.18}$$

โดยที่ $c(t)$ คือ สัญญาณควบคุมที่เวลา t และ $e(t)$ คือ ค่าผิดพลาดที่เวลา t



รูปที่ 4.8 สัญญาณควบคุมตามสมการเดริเวทีฟ

จากรูปที่ 4.8 พบว่าค่า $c(t)$ คือ ผลต่างระหว่างค่าผิดพลาดในช่วงเวลาเล็ก ๆ (dt) ค่าหนึ่งหารด้วยค่าของเวลาช่วงนั้น ซึ่งสามารถแทนค่าของช่วงเวลาเล็ก ๆ นี้ได้ด้วยค่าของ T_s ดังนั้นจะได้ว่า

$$\frac{de(t)}{dt} = [e(k) - e(k-1)]/T_s \tag{4.19}$$

พิจารณาสมการ PID

$$u(t) = K_c \left\{ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \left[\frac{de(t)}{dt} \right] \right\} \tag{4.20}$$

ซึ่งเป็นสมการที่แสดงถึงสัญญาณควบคุมของ $u(t)$ ตัวควบคุม K_c คือค่าอัตราขยายของตัวควบคุม T_i คือค่าเวลาอินทิกรัล และ T_d คือค่าเวลาเดริเวทีฟ เมื่อแทนค่าจากสมการที่ (4.17) และ (4.19) ลงในสมการที่ (4.20) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u(k) = K_c \left\{ e(k) + \frac{1}{T_i} \left[T_s \sum_{i=0}^k e_i \right] + \frac{T_d}{T_s} [e(k) - e(k-1)] \right\} \quad (4.21)$$

$$u(k-1) = K_c \left\{ e(k-1) + \frac{1}{T_i} \left[T_s \sum_{i=0}^{k-1} e_i \right] + \frac{T_d}{T_s} [e(k-1) - e(k-2)] \right\} \quad (4.22)$$

$$\begin{aligned} u(k) - u(k-1) &= K_c \left\{ \begin{aligned} &e(k) + \frac{T_s}{T_i} e(k) + \frac{T_d}{T_s} e(k) - \frac{T_d}{T_s} e(k-1) \\ &-e(k-1) - \frac{T_d}{T_s} e(k-1) + \frac{T_d}{T_s} e(k-2) \end{aligned} \right\} \\ &= K_c \left\{ \begin{aligned} &\left[1 + \frac{T_s}{T_i} + \frac{T_d}{T_s} \right] e(k) - \left[1 + 2 \frac{T_d}{T_s} \right] e(k-1) \\ &+ \frac{T_d}{T_s} e(k-2) \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (4.23)$$

ดังนั้น จะได้สมการของสัญญาณควบคุมคือ

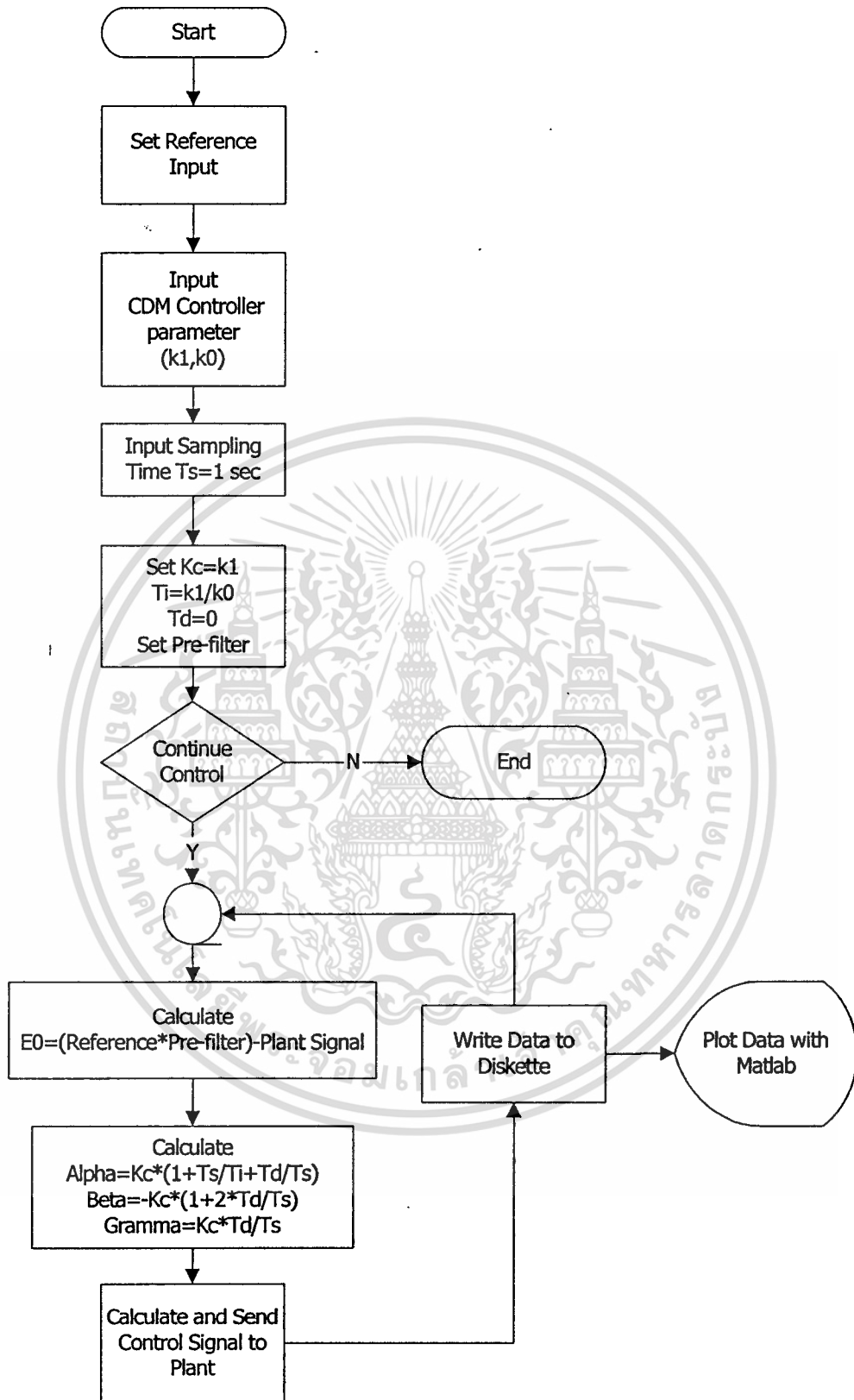
$$u(k) = u(k-1) + \alpha e(k) + \beta e(k-1) + \gamma e(k-2) \quad (4.24)$$

โดยที่ $\alpha = K_c \left[1 + \frac{T_s}{T_i} + \frac{T_d}{T_s} \right]$ $\beta = -K_c \left[1 + 2 \frac{T_d}{T_s} \right]$ และ $\gamma = K_c \frac{T_d}{T_s}$

4.3.3 ขั้นตอนการพัฒนาและการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

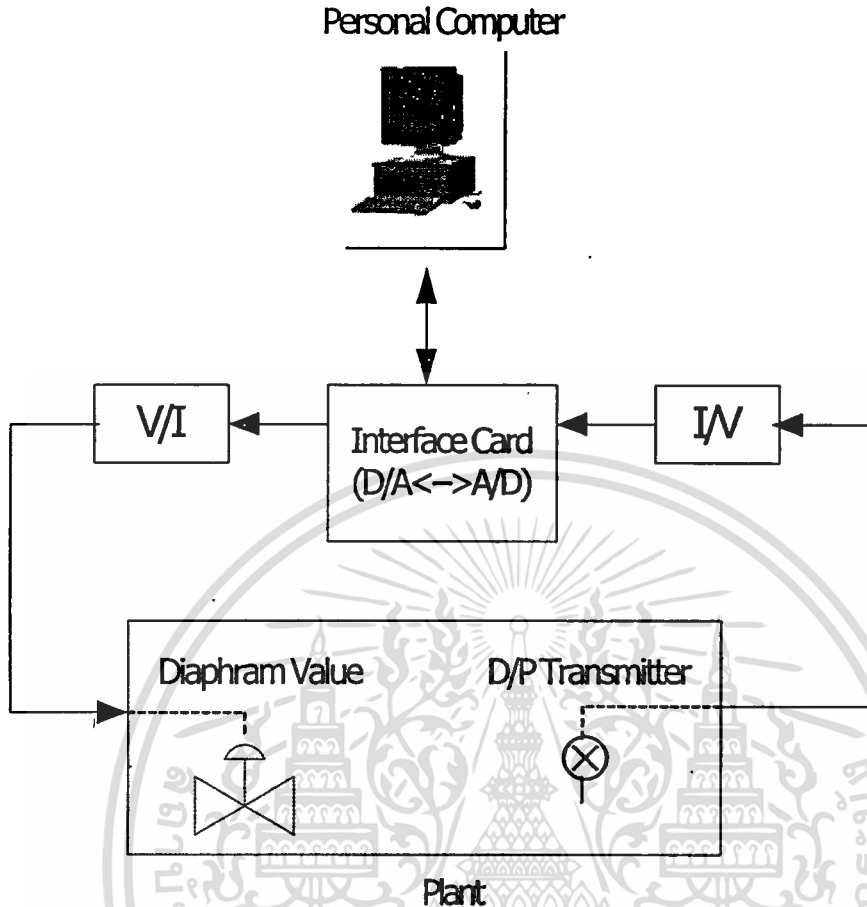
จากสมการของสัญญาณควบคุมที่ได้ตามสมการที่ (4.24) จะนำสมการนี้ไปทำการพัฒนาเป็น โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมระดับของระดับน้ำในถัง โดยมีแผนภูมิของโปรแกรมซึ่งพัฒนาด้วยภาษาซีเป็น โปรแกรมควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 4.9 และมีขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเป็นดังนี้

1. ป้อนค่าสัญญาณอ้างอิง ในที่นี้ต้องการควบคุมกระบวนการที่ระดับ 30 เซนติเมตร 35 เซนติเมตร และ 40 เซนติเมตร ดังนั้น ค่าสัญญาณอ้างอิงที่ป้อนให้กับระบบควบคุมคือ 30 35 และ 40 ตามลำดับ
2. ป้อนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI ด้วย CDM ซึ่งก็คือค่า k_1 และ k_0 ตามที่ได้ออกแบบไว้แล้ว
3. ป้อนค่า $T_d = 0$ (เนื่องจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้เป็นตัวควบคุม PID ดังนั้น ถ้าต้องการให้เป็นตัวควบคุม PI สามารถทำได้โดยการกำหนดให้ $T_d = 0$)
4. เก็บข้อมูลลงแผ่นดิสเก็ต (diskette)
5. นำข้อมูลที่ได้ไปแสดงผลด้วยโปรแกรม Matlab



รูปที่ 4.9 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 โครงร่างของการติดตั้งระบบควบคุม

หลังจากที่ได้พัฒนา โปรแกรมควบคุมระดับน้ำเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ต่อไปจะได้นำ อุปกรณ์และโปรแกรมทั้งหมดนี้ไปทำการติดตั้งดังรูปที่ 4.10 เพื่อทำการเก็บข้อมูลตามเงื่อนไข ที่ต้องการดังบทต่อไป

บทที่ 5

การทดลอง

5.1 กล่าวนำ

ในการทดลองเพื่อหาพารามิเตอร์ของกระบวนการควบคุมระดับน้ำซึ่งเป็นกระบวนการ SISO และทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุม PI ที่ได้ออกแบบด้วยวิธี CDM นั้น ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการหาผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิดของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีสองถัง ส่วนที่สองเป็นการจำลองระบบควบคุมทั้งหมดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (MATLAB) และส่วนสุดท้ายเป็นการประยุกต์ใช้ตัวควบคุม PI ที่ได้ ออกแบบมาควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการกรณีสองถัง

การทดลองที่ 1 เป็นการหาผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิดของการควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการกรณีสองถัง โดยที่กำหนดให้อินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับน้ำ 30 เซนติเมตร 35 เซนติเมตร และ 40 เซนติเมตร ตามลำดับ เพื่อที่จะนำเอาผลการตอบสนองของการควบคุมระดับน้ำแบบวงรอบเปิดทั้งสามระดับนี้มาหาฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการ จากนั้นนำเอาฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการที่ระบุ (nominal plant) ที่ระดับ 35 เซนติเมตร ไปออกแบบตัวควบคุม PI ด้วยวิธี CDM

การทดลองที่ 2 เป็นการจำลองการควบคุมกระบวนการระดับน้ำด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ผู้วิจัยได้สร้างขึ้น เพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการทำงานของตัวควบคุม PI ที่ถูกออกแบบด้วยวิธี CDM ก่อนที่จะนำตัวควบคุมนี้ไปใช้ในการควบคุมกระบวนการจริง และนำผลการจำลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง การจำลองการควบคุมกระบวนการระดับน้ำนั้นเริ่มต้นโดยการใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบสำหรับควบคุมระดับที่ 35 เซนติเมตร ไปใช้ควบคุมระดับน้ำที่ 35 เซนติเมตรก่อนเพื่อทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุม หลังจากนั้นใช้ตัวควบคุมเดิมไปควบคุมกระบวนการที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงจากกระบวนการที่ระบุในขอบเขตที่กำหนดคือที่ระดับ 30 เซนติเมตรและ 40 เซนติเมตร เพื่อทดสอบความคงทนของระบบควบคุม จากนั้นได้ทำการทดสอบผลกระทบที่เกิดจากการรบกวนจากภายนอกโดยป้อนสัญญาณรบกวนเข้าไปที่เอาต์พุตของระบบควบคุมเป็นเวลา 1700 วินาที ผลการจำลองในส่วนนี้จะแสดงผลการตอบสนองเชิงตัวเลขเปรียบเทียบกับผลการทดลองควบคุมระบบด้วยตัวควบคุม PI ที่ถูกออกแบบด้วยวิธี ซีเกลอร์-นิโคลส์ ซึ่งได้ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม K_c และ K_i ไว้ดีแล้วคือผลตอบสนองเอาต์พุตของระบบวงรอบปิดมีค่าพุ่งเกินไม่เกิน 25 %

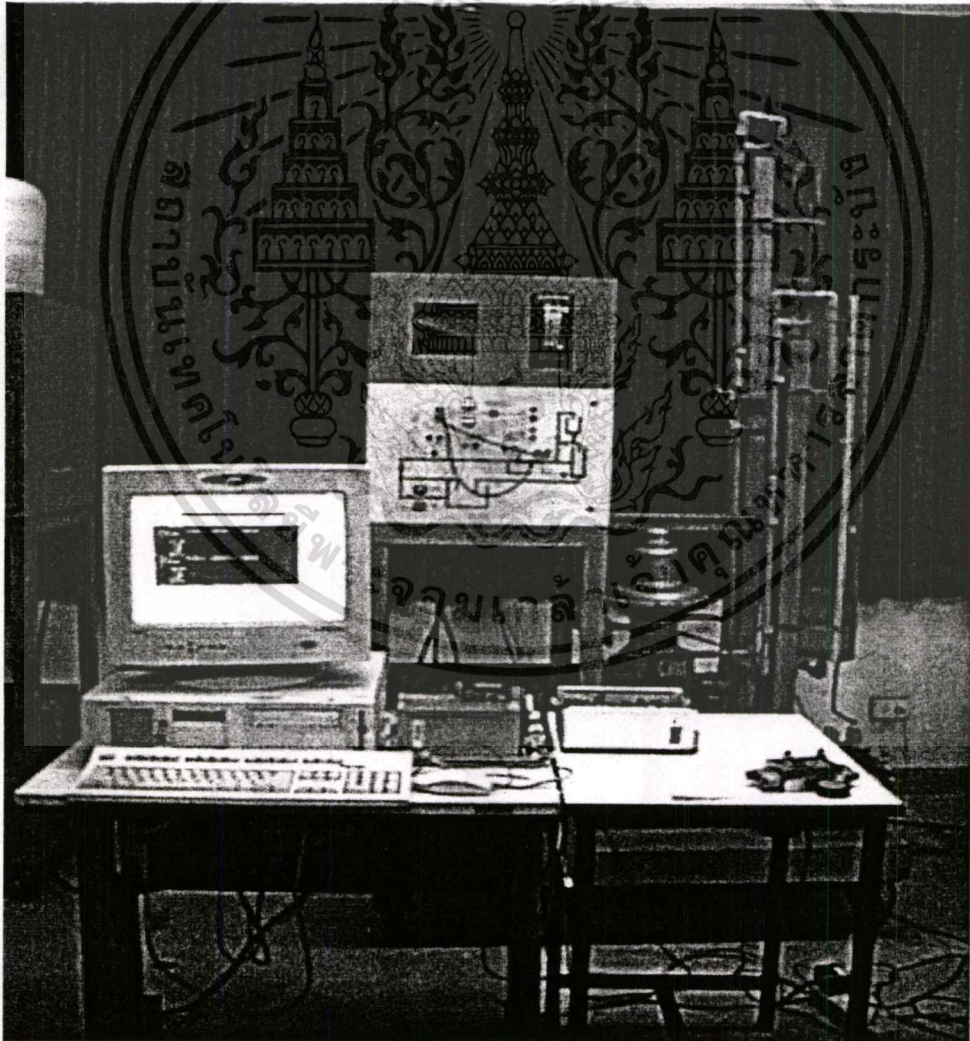
การทดลองที่ 3 เป็นการประยุกต์ใช้ตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM และวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ ที่สร้างขึ้นไปทดลองควบคุมระดับน้ำกรณีสองถังในกระบวนการจริง การทดลองกระทำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่นเดียวกับในการทดลองที่ 2 คือ นำตัวควบคุมที่ออกแบบสำหรับควบคุมระดับน้ำที่ 35 เซนติเมตร ไปใช้ควบคุมระดับน้ำที่ 30 เซนติเมตร 35 เซนติเมตร และ 40 เซนติเมตร ตามลำดับ และได้ทดลองผลกระทบของสัญญาณรบกวนที่เวลา 1700 วินาทีเช่นเดียวกัน เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมระหว่างผลการจำลอง และผลการทดลองจริง

5.2 การหาผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิดของกระบวนการ

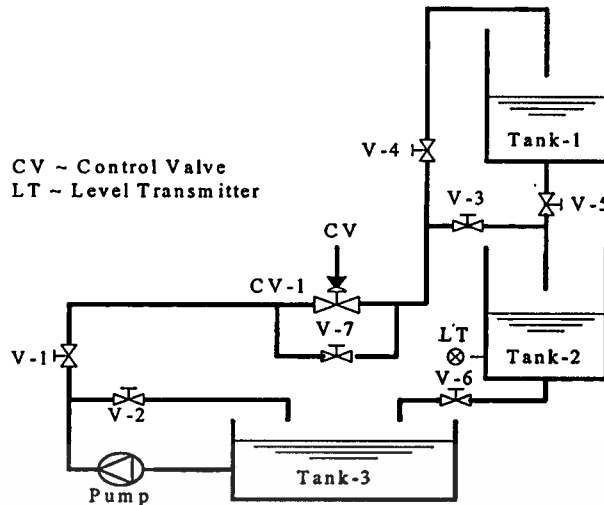
5.2.1 โครงสร้างของกระบวนการควบคุมระดับน้ำ

การทดลองเพื่อหาผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิดของกระบวนการควบคุมระดับน้ำนั้นเริ่มต้นจากการติดตั้งอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับควบคุมลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลดังรูปที่ 5.1 ซึ่งสามารถแสดงเป็นโครงสร้างของกระบวนการควบคุมระดับน้ำดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.1 การควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 โครงสร้างของกระบวนการควบคุมระดับน้ำ

ในการทำงานของกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการนั้น เครื่องสูบน้ำ (pump) จะทำหน้าที่สูบน้ำจาก TANK-3 ขึ้นไปตามท่อตลอดระยะเวลาในการควบคุม: น้ำที่ถูกสูบจะผ่านวาล์ว V-1 มายังวาล์วควบคุม (control valve) CV-1 ซึ่งต่อขนานกับวาล์ว V-7 (วาล์ว V-7 ใช้ในการควบคุมแบบ manual ในการทดลองนี้จะปิดตลอดเวลา) และมีวาล์ว V-2 ทำหน้าที่เป็นวาล์วบายพาสส์เพื่อให้น้ำไหลย้อนกลับมาที่ TANK-3 ในการทดลองจะปิดวาล์ว V-2 ให้แรงดันด้านหน้าของวาล์วควบคุม CV-1 ขณะที่ปิดวาล์วควบคุมมีค่าเท่ากับ 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเมตร เมื่อต้องการใช้ถังกระบวนการกรณีสองถัง ทำได้โดยการปิดวาล์ว V-3 และเปิดวาล์ว V-4

5.2.2 ระบบวงรอบเปิดของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีสองถัง

จากรูปที่ 5.2 สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมระดับน้ำในถังใบที่ 2 ของกระบวนการกรณีสองถังได้ดังสมการที่ (5.1)

$$\frac{H_2(s)}{Q_1(s)} = \frac{R_2}{R_1 C_1 R_2 C_2 s^2 + (R_1 C_1 + R_2 C_2) s + 1} \quad (5.1)$$

โดยที่ $Q_1(s)$ คือ อัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้าใน TANK-1

$H_2(s)$ คือ ความสูงของระดับน้ำใน TANK-2

R_1 คือ ความต้านทานการไหลใน TANK-1

C_1 คือ พื้นที่หน้าตัดของ TANK-1

R_2 คือ ความต้านทานการไหลใน TANK-2

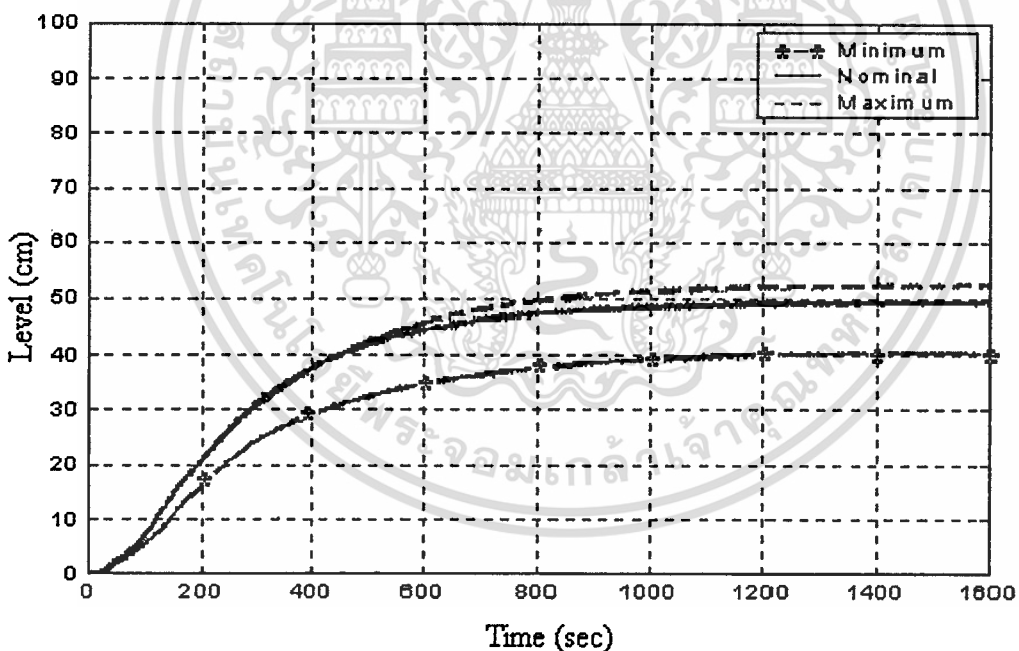
C_2 คือ พื้นที่หน้าตัดของ TANK-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการไหลเข้า $Q_1(s)$ ของน้ำใน TANK-1 จะมีค่าต่างกัน เมื่อกำหนดให้อินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับต่างกัน อัตราการไหลเข้าที่ต่างกันเช่นนี้มีผลให้ระดับความสูงของน้ำ $H_2(s)$ ใน TANK-2 มีความสูงต่างกันด้วย เมื่อพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของ $H_2(s)/Q_1(s)$ จะเห็นว่าค่าคงตัวของเวลาขึ้นอยู่กับค่า R_1 , C_1 , R_2 และ C_2 โดยที่ C_1 และ C_2 เป็นค่าคงที่ที่ได้จากพื้นที่หน้าตัดของ TANK-1 และ TANK-2 ตามลำดับ ค่าความต้านทานการไหล R_1 และ R_2 เป็นพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงที่ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำและความสูงของระดับน้ำ ส่วนค่าอัตราขยายของกระบวนการนั้นขึ้นอยู่กับค่า R_1 และ R_2 ในทางปฏิบัติแล้วอัตราขยายของกระบวนการยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ อีก เช่น อัตราขยายของวาล์วควบคุม เป็นต้น

ในการทดลองนั้นได้ กำหนดให้ขอบเขตต่ำสุดของกระบวนการ (minimum) เป็นผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิดที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 30 เซนติเมตร ขอบเขตที่ระบุของกระบวนการ (nominal) เป็นผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิดที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 35 เซนติเมตร และขอบเขตสูงสุดของกระบวนการ (maximum) เป็นผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิดที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 40 เซนติเมตร ซึ่งมีผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิดของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีสองถึง

ผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิดดังรูปที่ 5.3 เป็นผลการตอบสนองของกระบวนการอันดับสอง ดังนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการจะมีค่าคงตัวเวลา 2 ตัว คือ τ_1 และ τ_2 ซึ่งค่าคงตัวทางเวลาทั้งสองนี้สามารถหาได้จากวิธีการ percent-incomplete method [5] และหาค่าอัตราขยายของกระบวนการ K_p ได้จากการหารเอาท์พุทค่าสุดท้ายด้วยอินพุตอ้างอิง แล้วเขียนฟังก์ชันเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ่ายโอนได้จากสมการ $G_p(s) = \frac{K_p}{\tau_1\tau_2s^2 + (\tau_1 + \tau_2)s + 1}$ โดยที่ $\tau_1 = R_1C_1$ และ $\tau_2 = R_2C_2$ และเนื่องจากระบบวงรอบเปิดของกระบวนการควบคุมระดับน้ำกรณีสองถังนี้มีค่าเวลาไร้ผลสนอง (dead time) ดังนั้น จึงเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนได้ใหม่คือ

$$G_p(s) = \frac{K_p e^{-Ts}}{\tau_1\tau_2s^2 + (\tau_1 + \tau_2)s + 1}$$

โดยที่ T คือเวลาไร้ผลสนอง

สุดท้ายจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงรอบเปิดที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 30 เซนติเมตร 35 เซนติเมตร และระดับ 40 เซนติเมตรซึ่งก็คือที่ขอบเขตต่ำสุดของกระบวนการ กระบวนการที่ระบุ และขอบเขตสูงสุดของกระบวนการได้ดังนี้

$$\text{ขอบเขตต่ำสุดของกระบวนการ} \quad G_{\min}(s) = \frac{1.35e^{-30s}}{13000s^2 + 320s + 1} \quad (5.2)$$

$$\text{กระบวนการที่ระบุ} \quad G_{\text{nom}}(s) = \frac{1.4143e^{-30s}}{18000s^2 + 290s + 1} \quad (5.3)$$

$$\text{ขอบเขตสูงสุดของกระบวนการ} \quad G_{\max}(s) = \frac{1.3125e^{-30s}}{15813s^2 + 314s + 1} \quad (5.4)$$

ในการออกแบบตัวควบคุม PI ด้วยวิธี CDM นั้นจะต้องประมาณเทอมของ e^{-30s} [6] ดังนั้นจึงได้ใช้วิธี Series expansion [7] ประมาณ e^{-30s} เป็นอันดับสอง นั่นคือ

$$e^{-30s} \approx \frac{1 - \frac{30s}{2} + \frac{(30s)^2}{8}}{1 + \frac{30s}{2} + \frac{(30s)^2}{8}} \quad (5.5)$$

ต่อไปจะเป็นการออกแบบตัวควบคุม PI เพื่อควบคุมกระบวนการที่ระบุหรือระบบวงรอบเปิดที่กำหนดอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 35 เซนติเมตรจากขั้นตอนการออกแบบในบทที่ 3 ดังนั้นจะได้ค่าคงตัวเวลาสมมูล $\tau = 387.443$ วินาที ค่าพารามิเตอร์ $k_f = 0.6732$ และ $k_o = 0.0034$ และพรีฟิลเตอร์ $B_d(s) = 0.0034$ ดังนั้น ตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_c(s) = 0.6732 + \frac{0.0034}{s}$$

โดยที่พารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี CDM คือ $K_c = 0.6732$ และ $T_i = 198.00$ วินาที ตามลำดับ

ตัวควบคุม PI นี้จะถูกนำไปควบคุมกระบวนการที่ระดับ 30 และ 40 เซนติเมตรโดยไม่ปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุม สมรรถนะที่ได้จากระบบทั้ง 3 คือระบบควบคุมขอบเขตต่ำสุดของกระบวนการ กระบวนการที่ระบุ และขอบเขตสูงสุดของกระบวนการซึ่งออกแบบด้วยวิธี CDM จะถูกเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้ตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ ที่ระดับ 35 เซนติเมตร (หลังจากที่ปรับแต่งให้เหมาะสมแล้วได้ $K_c = 2.4$ และ $T_i = 480$ วินาที) ซึ่งตัวควบคุม PI ที่ได้คือ

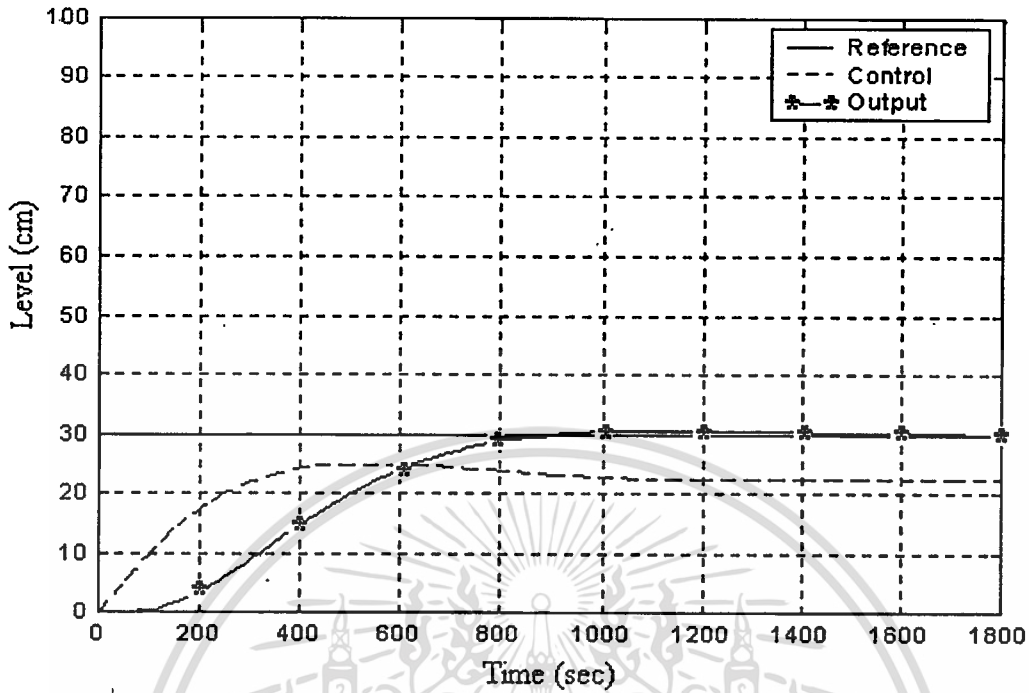
$$G_c(s) = 2.40 + \frac{0.005}{s}$$

5.3 การจำลองระบบควบคุมทั้งหมดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

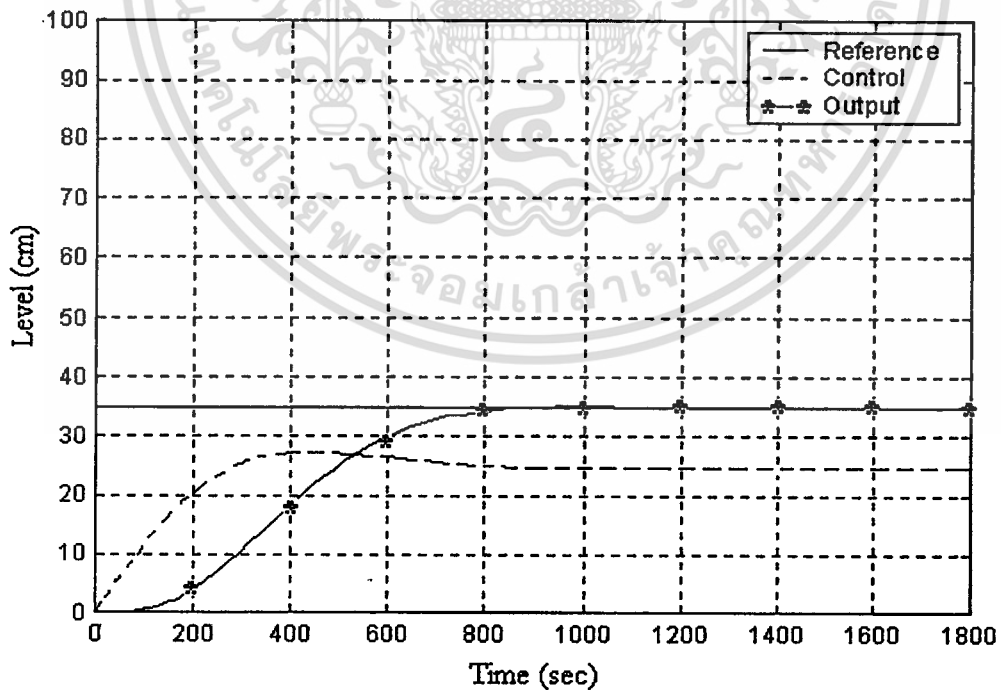
การจำลองระบบควบคุมทั้งหมดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (MATLAB) จะเริ่มต้นด้วยการนำเอาตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM และวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ มาควบคุมกระบวนการที่ระบุก่อน ต่อจากนั้นนำตัวควบคุม PI เดิมไปควบคุมกระบวนการที่ขอบเขตต่ำสุด $G_{min}(s)$ และกระบวนการที่ขอบเขตสูงสุด $G_{max}(s)$ ตามลำดับ ผลการจำลองที่แสดงมีดังนี้คือ

1. ผลการจำลองของระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM
2. ผลการจำลองของระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์
3. สมรรถนะเชิงตัวเลขของผลการจำลองของระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM และวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์
4. ผลการจำลองของผลกระทบของสัญญาณรบกวนที่มีต่อระบบควบคุม PI ซึ่งได้ออกแบบด้วยวิธี CDM และวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์
5. ผลการจำลองของผลตอบสนองของระบบควบคุม PI เมื่อลดค่า \mathcal{N}_1 และ \mathcal{N}_2 ลง

5.3.1 ผลการจำลองของระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM

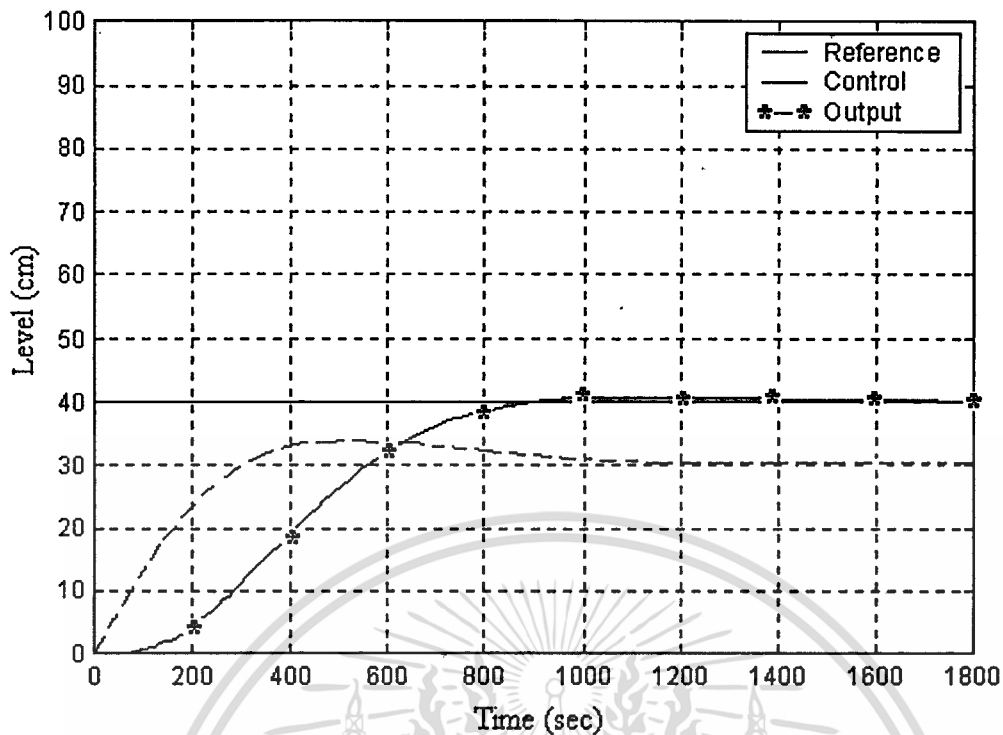


รูปที่ 5.4 ผลจำลองของผลตอบสนองของการควบคุมกระบวนการระดับน้ำที่มีอินพุตอ้างอิง อยู่ที่ระดับ 30 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM



รูปที่ 5.5 ผลจำลองของผลตอบสนองของการควบคุมกระบวนการระดับน้ำที่มีอินพุตอ้างอิง อยู่ที่ระดับ 35 เซนติเมตรด้วยตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM

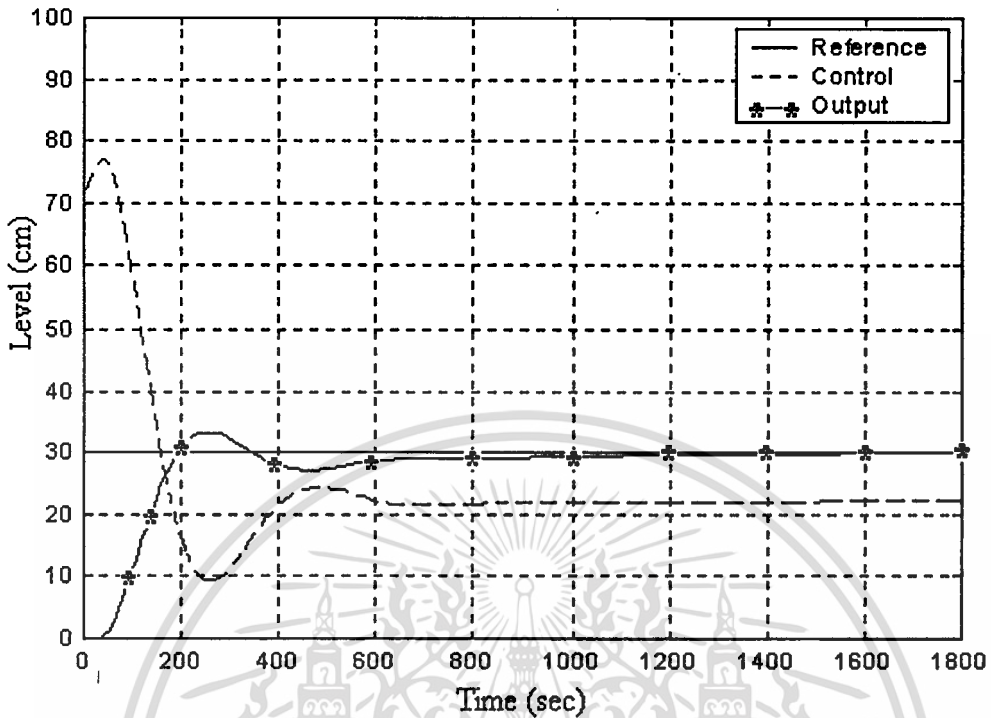
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



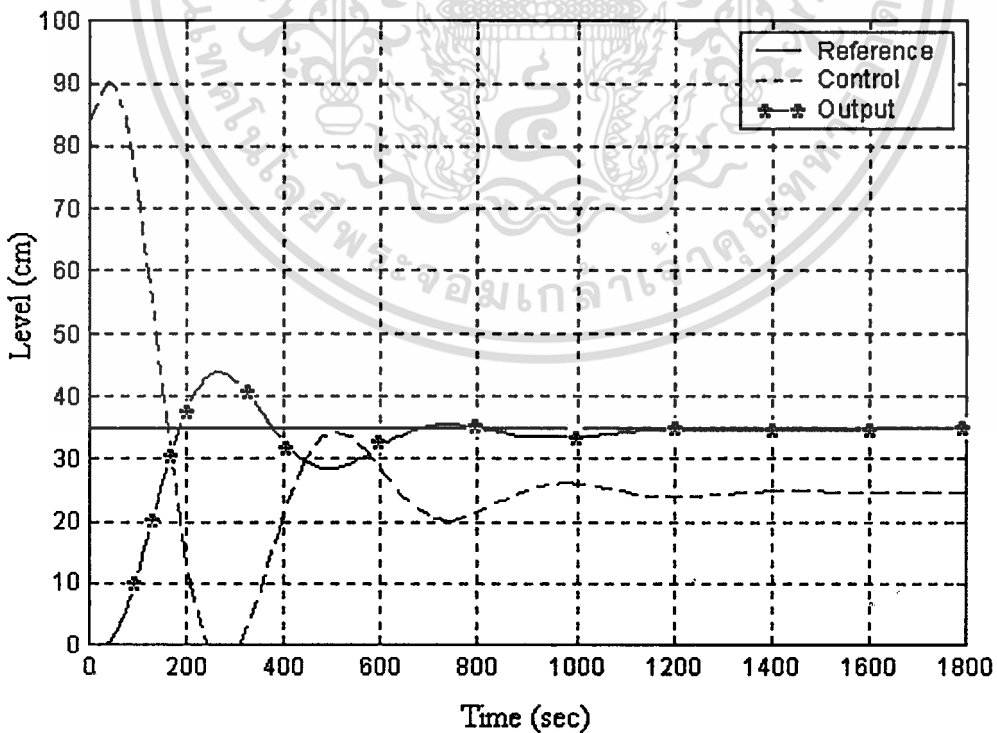
รูปที่ 5.6 ผลจำลองของผลตอบสนองของการควบคุมกระบวนการระดับน้ำที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 40 เซนติเมตรด้วยตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM

จากรูปที่ 5.5 จะเห็นว่าผลตอบสนองของระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM ที่ระดับ 35 เซนติเมตรมีผลตอบสนองที่ดี คือสามารถเข้าสู่สถานะอยู่ตัวด้วยค่าพุงเกินเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และไม่มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว และเมื่อพารามิเตอร์ของกระบวนการเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากเปลี่ยนแปลงระดับของการควบคุมจากที่ระดับ 35 เซนติเมตรเป็นที่ระดับ 30 เซนติเมตร และ 40 เซนติเมตร พบว่าสามารถควบคุมให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมสามารถเข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้ดังรูปที่ 5.4 และ 5.6

5.3.2 ผลการจำลองของระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์



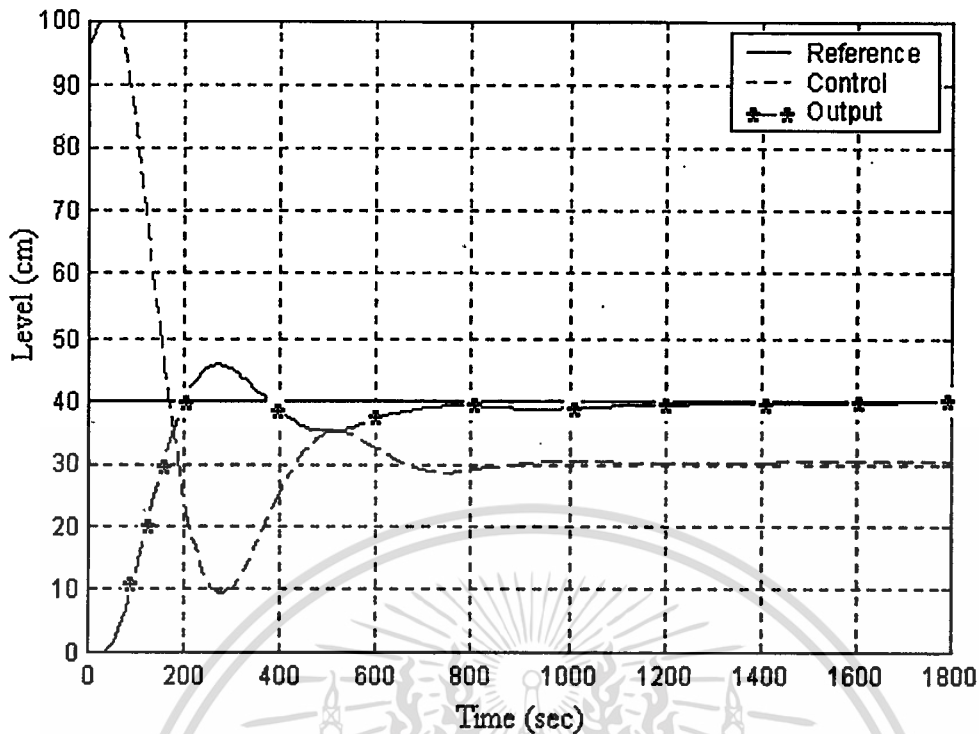
รูปที่ 5.7 ผลจำลองของผลตอบสนองของการควบคุมกระบวนการระดับน้ำที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 30 เซนติเมตรด้วยตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์



รูปที่ 5.8 ผลจำลองของผลตอบสนองของการควบคุมกระบวนการระดับน้ำที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 35 เซนติเมตรด้วยตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น เมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขและข้อยกเว้นด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 ผลจำลองของผลตอบสนองของการควบคุมกระบวนการระดับน้ำที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 40 เซนติเมตรด้วยตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์

จากผลการจำลองที่แสดงในรูปที่ 5.8 นั้นพบว่าผลตอบสนองของระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์นิโคลส์ ที่ระดับ 35 เซนติเมตร สามารถเข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้เร็ว แต่จะมีค่าพุ่งเกิน และไม่มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวเช่นเดียวกับผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี CDM และเมื่อพารามิเตอร์ของกระบวนการเปลี่ยนแปลงไป พบว่า ตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์นิโคลส์สามารถควบคุมให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมเข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้ แสดงดังรูปที่ 5.7 และ 5.9

5.3.3 สมรรถนะเชิงตัวเลขของผลการจำลองของระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM และวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์

จากผลการจำลองของระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี CDM และวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ ดังรูปที่ 5.4 ถึงรูปที่ 5.9 พบว่าผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ควบคุมด้วยตัวควบคุม PI ซึ่งออกแบบด้วยวิธี CDM มีสมรรถนะที่ดีคือสามารถเข้าสู่สถานะอยู่ตัวด้วยค่าพุ่งเกินเพียงเล็กน้อย และสามารถควบคุมระบบที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงได้ แต่ความเร็วของผลตอบสนองจะช้ากว่าระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ ผลการจำลองเปรียบเทียบเชิงตัวเลขแสดงได้ดังตารางที่ 5.1

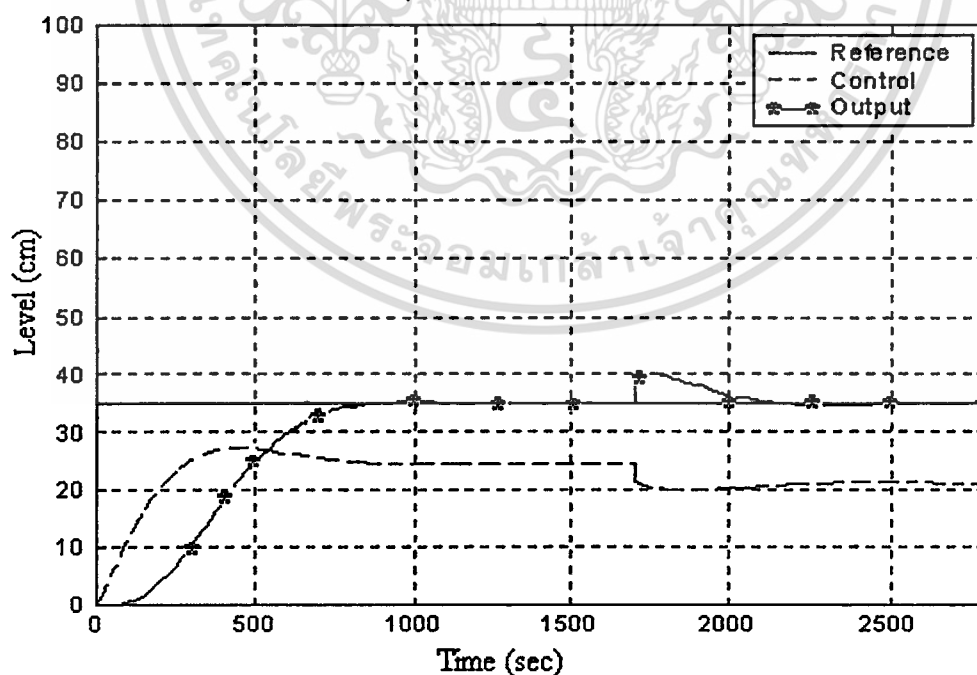
ตารางที่ 5.1 สมรรถนะของผลจำลองของระบบควบคุม PI

Process	PI Controller	t_r (sec)	t_s (sec)	os (%)	e_{ss} (%)
$G_{\min}(s) = \frac{1.35e^{-30s}}{13000s^2 + 320s + 1}$	CDM	509.76	1208.62	10.34	0.00
	Z-N	112.94	1059.45	2.09	0.00
$G_{nom}(s) = \frac{1.4143e^{-30s}}{18000s^2 + 290s + 1}$	CDM	458.30	796.57	0.20	0.00
	Z-N	110.20	1104.25	24.66	0.00
$G_{\max}(s) = \frac{1.3125e^{-30s}}{15813s^2 + 314s + 1}$	CDM	511.31	845.07	1.70	0.00
	Z-N	119.79	1113.34	14.13	0.00

ต่อไปจะเป็นการทดสอบการลดทอนผลกระทบของสัญญาณรบกวนที่เอาท์พุทของระบบควบคุม PI ที่ระดับ 35 เซนติเมตรของระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีทั้งสอง โดยที่ระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM ถูกออกแบบด้วยค่า $\gamma_1 = 2.5$ และ $\gamma_2 = 2$

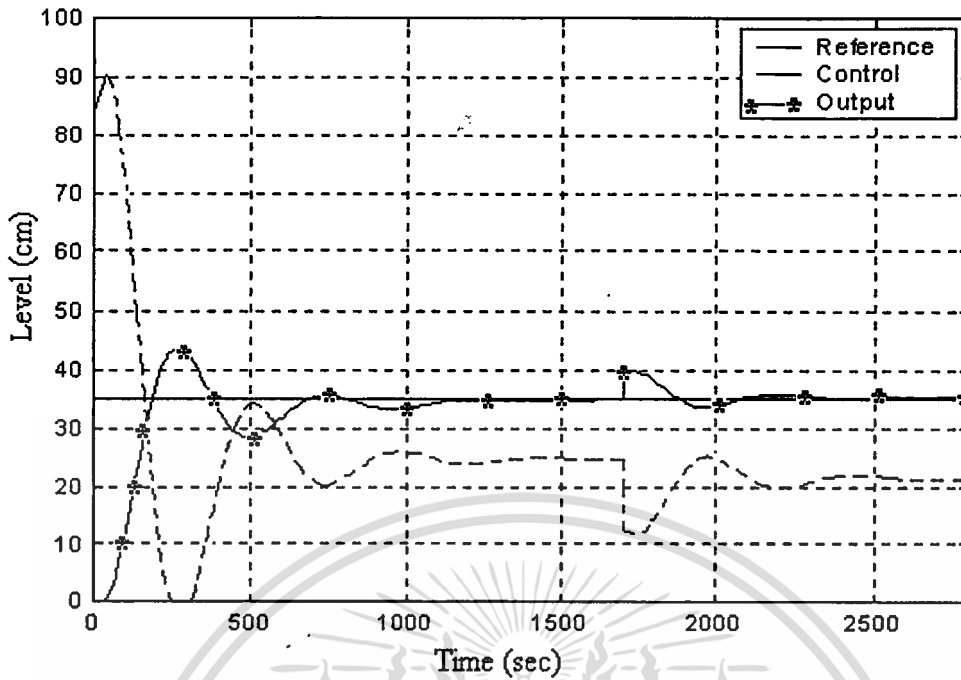
5.3.4 ผลการจำลองของผลกระทบของสัญญาณรบกวนที่มีต่อระบบควบคุม PI

เมื่อป้อนสัญญาณรบกวนคงที่ขนาด 5 เซนติเมตรเข้าที่เอาท์พุทของระบบควบคุมที่เวลา 1700 วินาทีได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.10 และ 5.11



รูปที่ 5.10 ผลจำลองของผลตอบสนองของการกระบวนกรควบคุมระดับน้ำด้วยตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM เมื่อมีสัญญาณรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

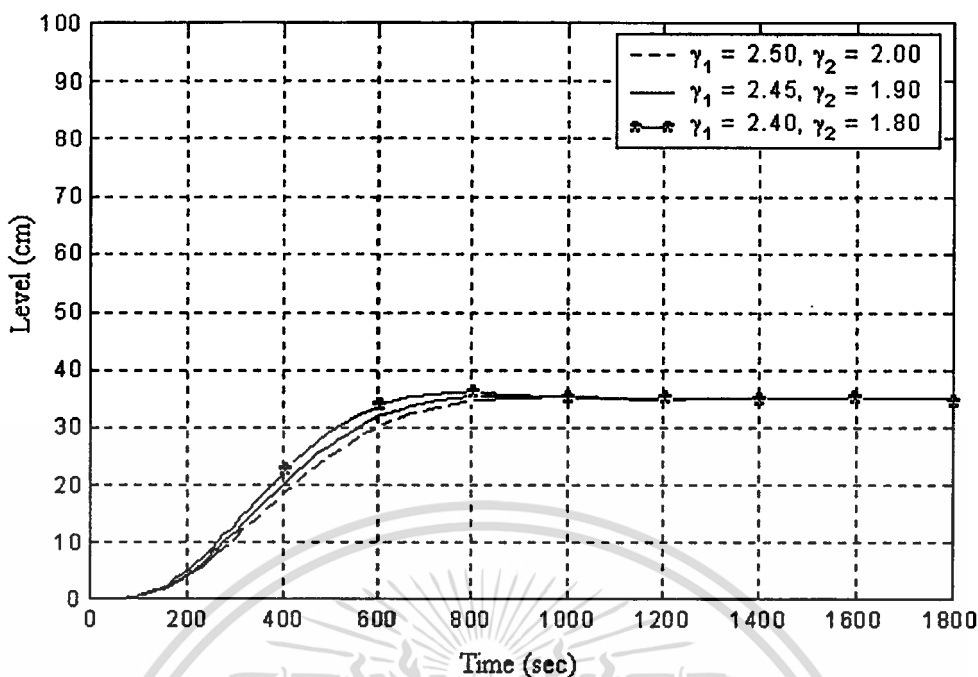


รูปที่ 5.11 ผลจำลองของผลตอบสนองของการกระบวนการควบคุมระดับน้ำด้วยตัวควบคุม PI ที่ ออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ เมื่อมีสัญญาณรบกวน

จากรูปที่ 5.10 และ 5.11 พบว่าผลตอบสนองของระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM สามารถลดผลกระทบของสัญญาณรบกวนได้ดี คือผลตอบสนองของระบบสามารถเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้เร็วกว่าระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์

5.3.5 ผลการจำลองของผลตอบสนองของระบบควบคุม PI เมื่อลดค่า γ_1 และ γ_2 ลง

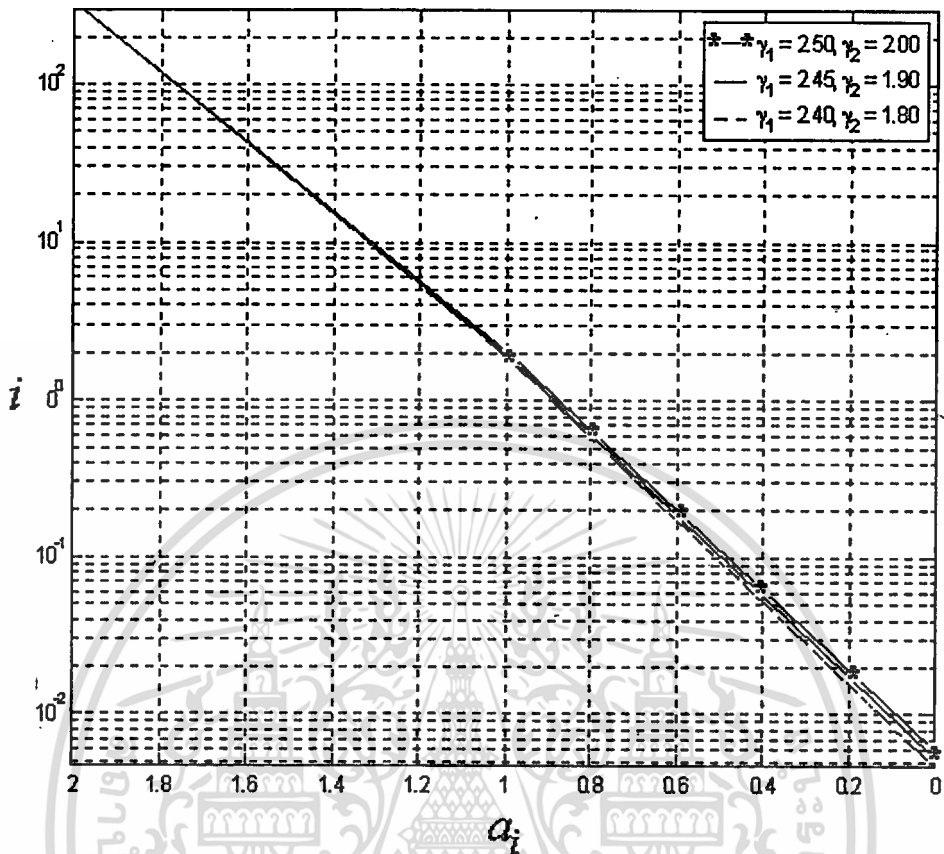
จากตารางที่ 5.1 พบว่าความเร็วของผลตอบสนองของระบบควบคุม PI ที่ระดับ 35 เซนติเมตร ซึ่งถูกออกแบบด้วยวิธี CDM ขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากค่าของ γ_1 และ γ_2 มีขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงลดค่าของ γ ที่ใช้ในการออกแบบลง เพื่อเพิ่มความเร็วของผลตอบสนอง นั่นคือลดค่า γ_1 จาก 2.5 เป็น 2.45 และ 2.4 และลดค่า γ_2 จาก 2 เป็น 1.9 และ 1.8 ตามลำดับ ผลตอบสนองของระบบควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 5.12 และสมรรถนะของระบบควบคุมเชิงตัวเลขแสดงได้ดังตารางที่ 5.2 สำหรับแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ที่แสดงพฤติกรรมของผลตอบสนองแสดงได้ดังรูปที่ 5.13 ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 2.2 คือ เมื่อค่าดรชนีเสถียรภาพ γ มีค่าลดลง ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ จะน้อยลงด้วย ทำให้เส้นโค้งของสัมประสิทธิ์เบนไปทางซ้ายมากขึ้นเป็นผลให้ระบบควบคุมมีผลตอบสนองเร็วขึ้น



รูปที่ 5.12 ผลจำลองของผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อลดค่า γ_1 และ γ_2 ลง

ตารางที่ 5.2 สมรรถนะของผลจำลองของระบบควบคุม PI เมื่อลดค่า γ_1 และ γ_2 ลง สำหรับ กระบวนการที่ระบุ

γ_1	γ_2	τ (secs)	t_r (secs)	t_s (secs)	os (%)	e_{ss} (%)	K_c (secs)	T_i (secs)
2.50	2.00	387.443	435.17	1451.00	2.70	0.00	0.673	198.000
2.45	1.90	362.456	385.21	1515.00	3.96	0.00	0.736	193.730
2.40	1.80	338.161	348.37	1584.00	6.19	0.00	0.805	187.302

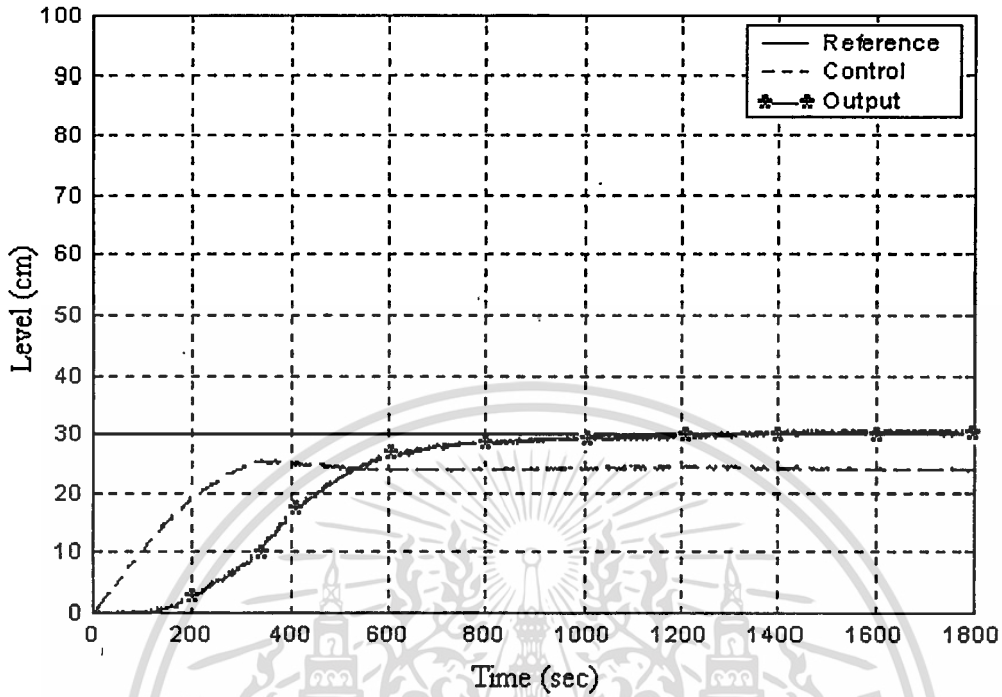


รูปที่ 5.13 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์เมื่อลดค่า γ_1 และ γ_2 ลง

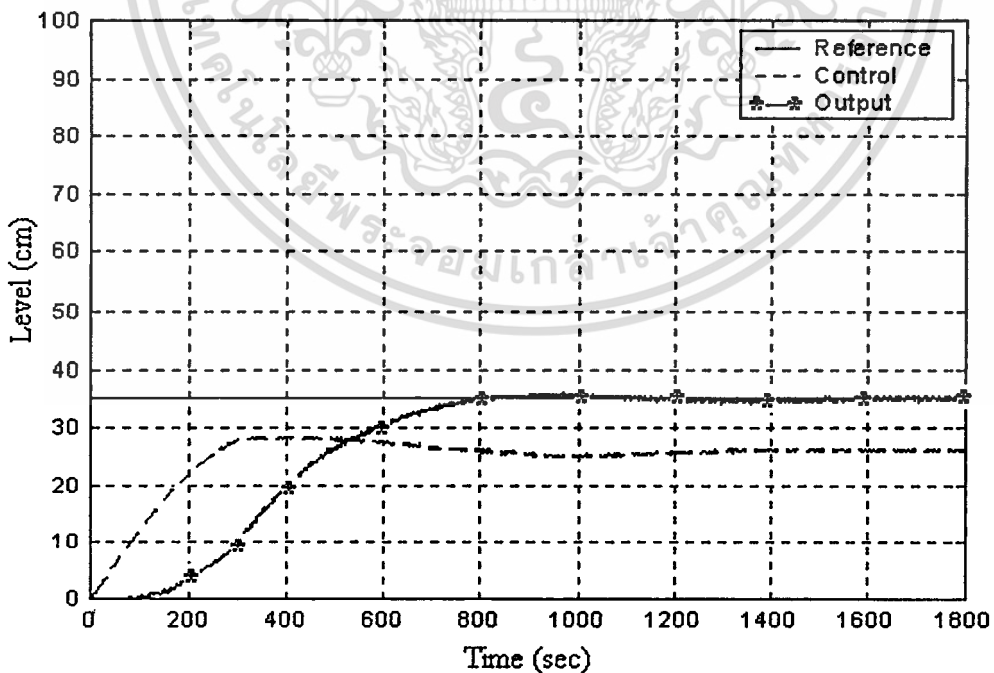
5.4 การควบคุมกระบวนการจริง

หลังจากได้จำลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จนเป็นที่แน่ใจแล้ว จึงได้ทำการทดลองควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการในห้องปฏิบัติการ ซึ่งการทดสอบความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ ทำได้โดยการเปลี่ยนอินพุตอ้างอิงจากระดับ 35 เซนติเมตร เป็นระดับ 30 เซนติเมตร และ 40 เซนติเมตรตามลำดับ ส่วนการทดสอบประสิทธิภาพในการลดผลกระทบทที่เกิดขึ้นจากระบบภายนอก ทำได้โดยการเติมน้ำลงในถังที่ 2 ที่เวลา $t = 1700$ วินาที ผลการทดลองจะแสดงตามลำดับได้ดังต่อไปนี้

5.4.1 ผลการทดลองของระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM



รูปที่ 5.14 ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 30 เซนติเมตรด้วยตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM

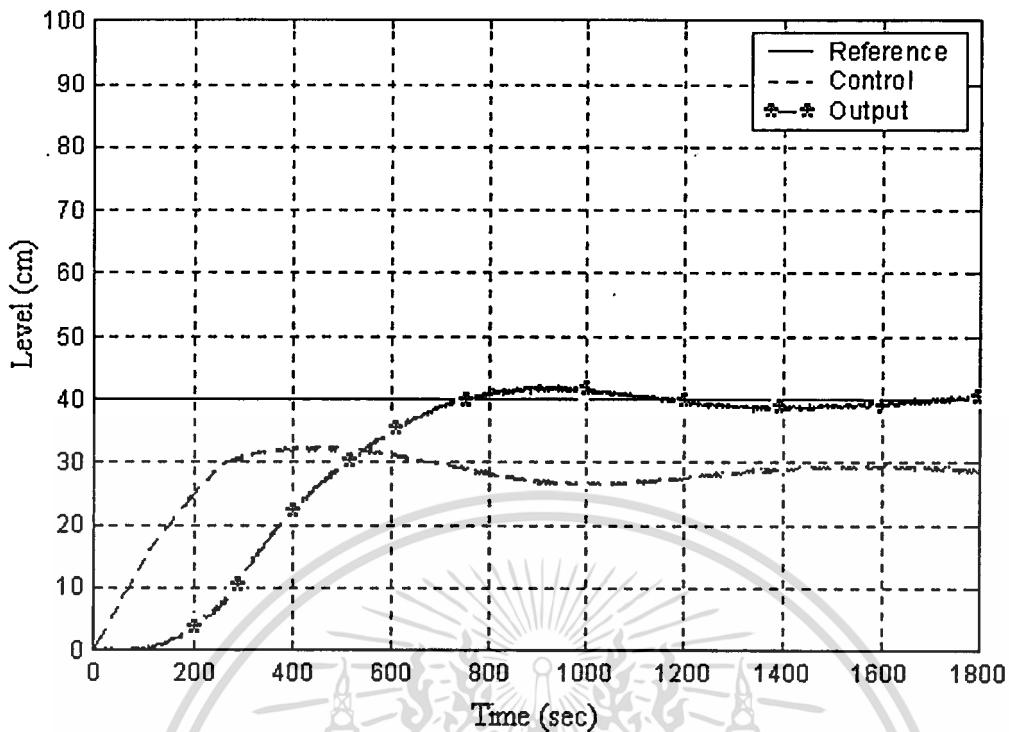


รูปที่ 5.15 ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 35

เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

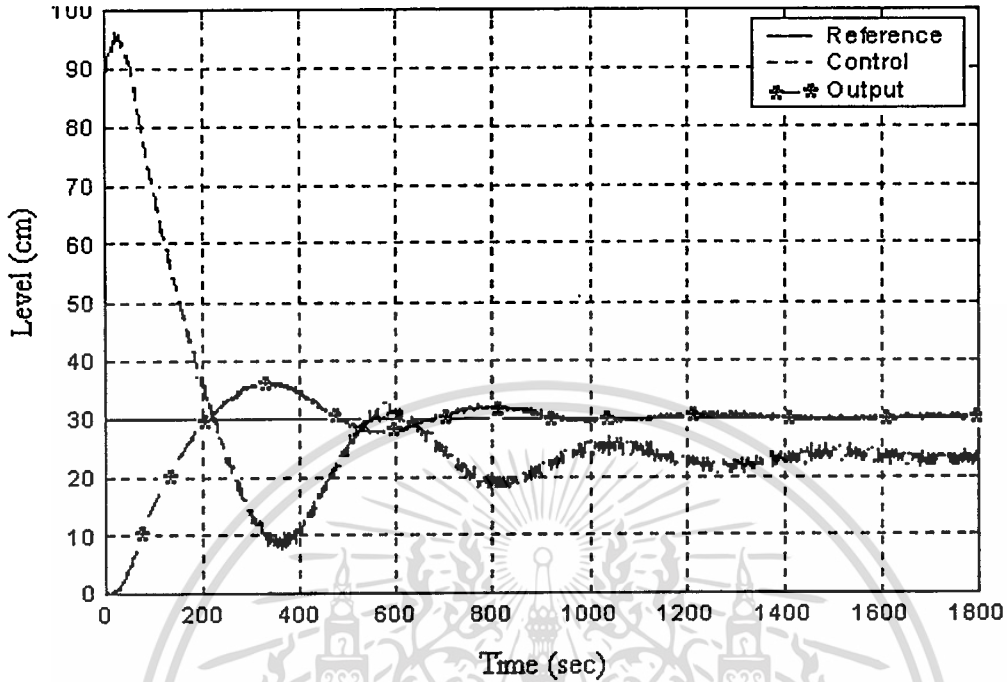


รูปที่ 5.16 ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 40 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุมควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM

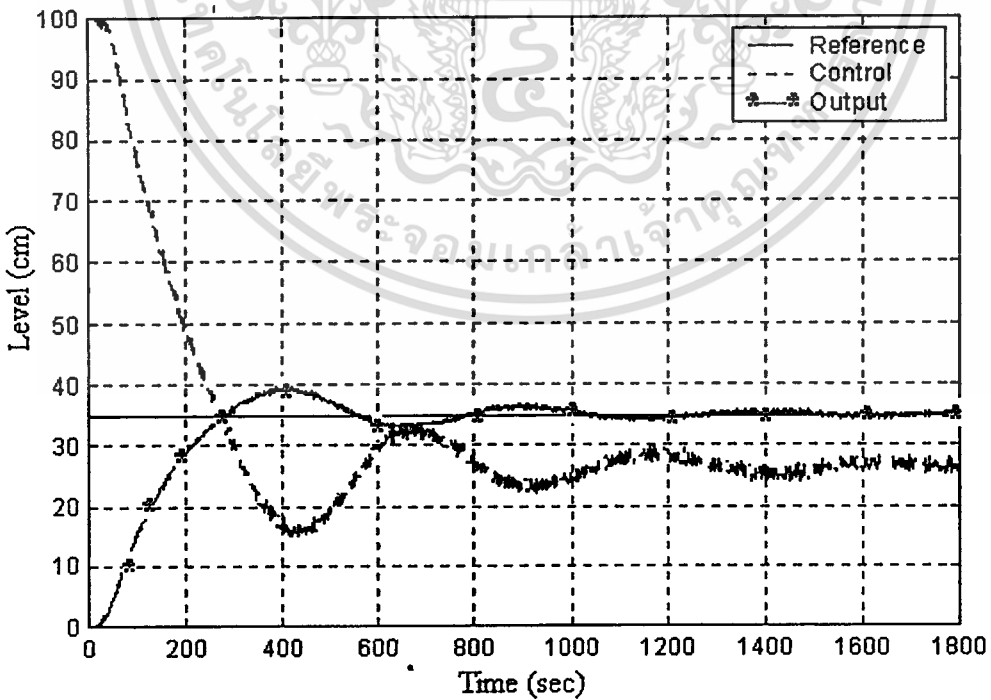
จากรูปที่ 5.15 พบว่าผลตอบสนองของระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM ที่ระดับ 35 เซนติเมตรมีผลตอบสนองที่ดีเช่นเดียวกับผลจำลองคือ สามารถเข้าสู่สถานะอยู่ตัวด้วยค่าพุงเกินเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และไม่มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว และเมื่อพารามิเตอร์ของกระบวนการเปลี่ยนแปลงไป พบว่าสามารถควบคุมให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมสามารถเข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้ดังรูปที่ 5.14 และ 5.16

ต่อไปจะแสดงผลการทดลองของระบบควบคุม PI ที่ระดับ 30, 35 และ 40 เซนติเมตร ซึ่งถูกออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์

5.4.2 ผลการทดลองของระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์



รูปที่ 5.17 ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 30 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุมควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์

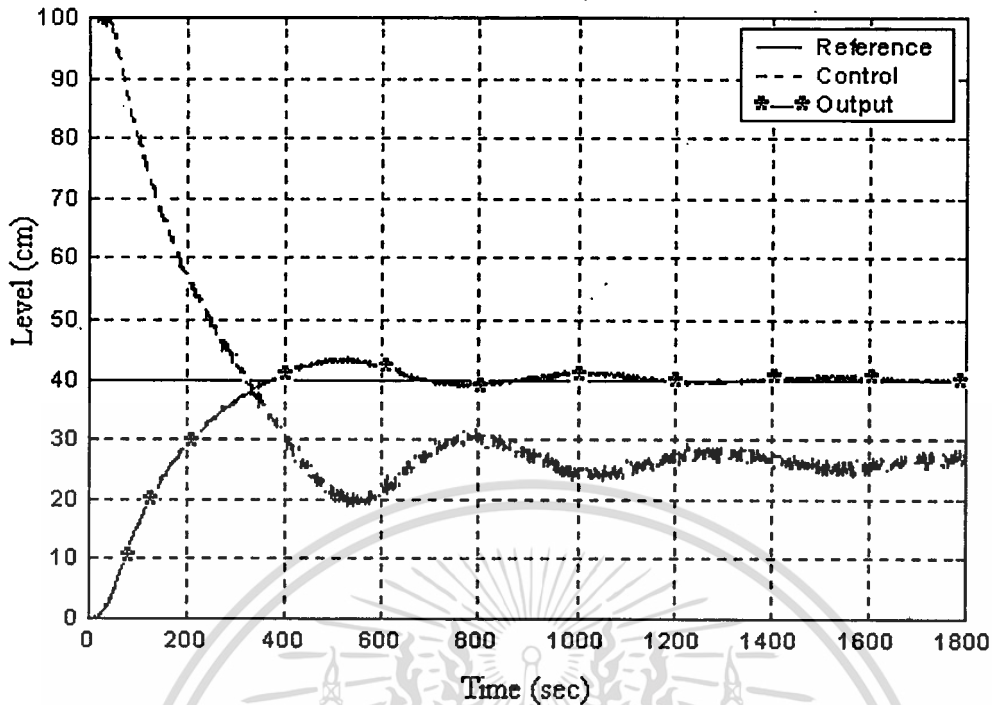


รูปที่ 5.18 ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 35

เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุมควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.19 ผลตอบสนองของการควบคุมกระบวนการระดับน้ำที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับ 40 เซนติเมตร ด้วยตัวควบคุมควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์

จากรูปที่ 5.18 จะเห็นว่าผลตอบสนองของระบบควบคุม PI ที่ถูกออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ ที่ระดับ 35 เซนติเมตรมีผลการทดลองเช่นเดียวกับผลจำลองคือ สามารถเข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้เร็ว แต่จะมีค่าพุ่งเกิน และไม่มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว และเมื่อพารามิเตอร์ของกระบวนการเปลี่ยนแปลงไป พบว่า ผลตอบสนองของระบบควบคุมสามารถเข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้ ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 5.17 และ 5.19

5.4.3 สมรรถนะเชิงตัวเลขของผลการทดลองของระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM และ ซีเกลอร์-นิโคลส์

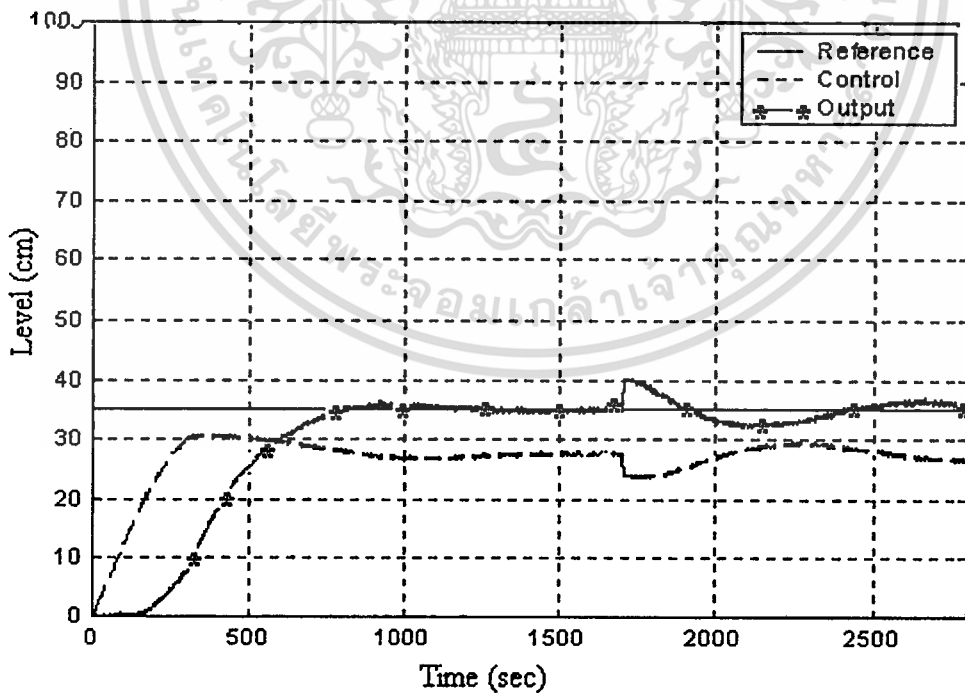
จากรูปที่ 5.14 ถึงรูปที่ 5.19 จะเห็นได้ว่าผลของสมรรถนะของระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี CDM เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ เมื่อทดลองจริงมีสมรรถนะที่ดีเช่นเดียวกับผลการจำลองคือสามารถเข้าสู่สถานะอยู่ตัวด้วยค่าพุ่งเกินน้อย และคงทนต่อระบบควบคุมที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลง ผลการทดลองเชิงตัวเลขแสดงได้ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 สมรรถนะของระบบควบคุม PI

Process	PI Controller	t_r (sec)	t_s (sec)	os (%)	e_{ss} (%)
$G_{\min}(s) = \frac{1.35e^{-30s}}{13000s^2 + 320s + 1}$	CDM	428.98	1623.00	21.77	0.00
	Z-N	140.93	1533.00	2.32	0.00
$G_{nom}(s) = \frac{1.4143e^{-30s}}{18000s^2 + 290s + 1}$	CDM	433.17	1455.00	2.70	0.00
	Z-N	184.19	1472.00	13.45	0.00
$G_{\max}(s) = \frac{1.3125e^{-30s}}{15813s^2 + 314s + 1}$	CDM	901.03	1648.00	5.56	0.00
	Z-N	528.16	1228.00	9.04	0.00

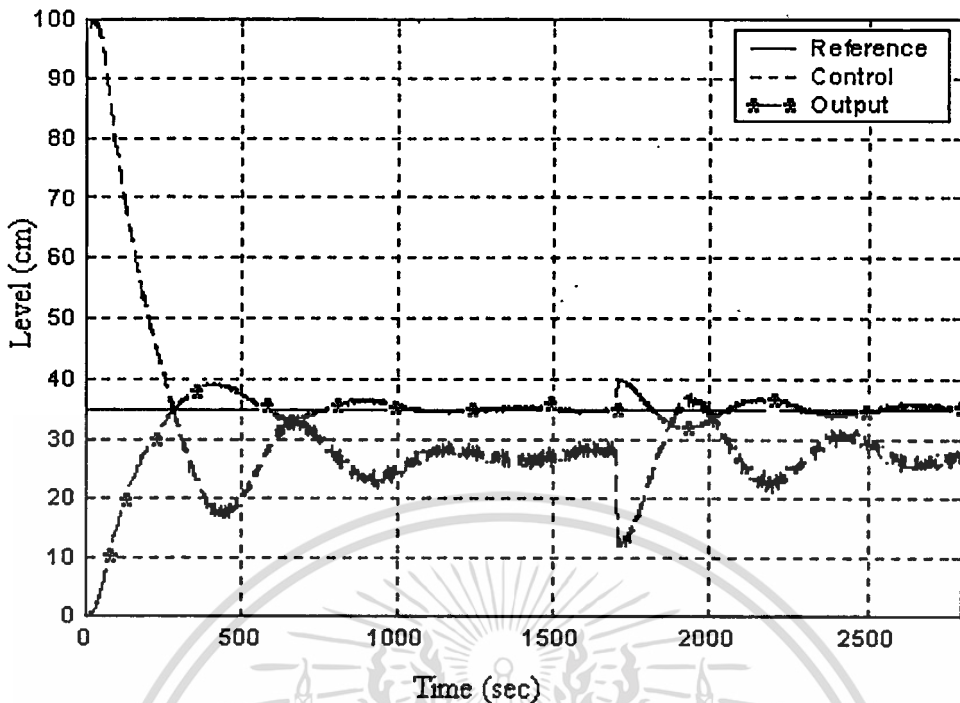
ต่อไปจะเป็นการทดสอบการลทอนของผลกระทบของสัญญาณรบกวนที่เข้าสู่ระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM และ ซีเกลอร์-นิโคลส์ เมื่อทดลองจริงในห้องปฏิบัติการ

5.4.4 ผลกระทบของสัญญาณรบกวนที่มีต่อระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM และวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์



รูปที่ 5.20 ผลตอบสนองของการควบคุมกระบวนการระดับน้ำของตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM เมื่อมีสัญญาณรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

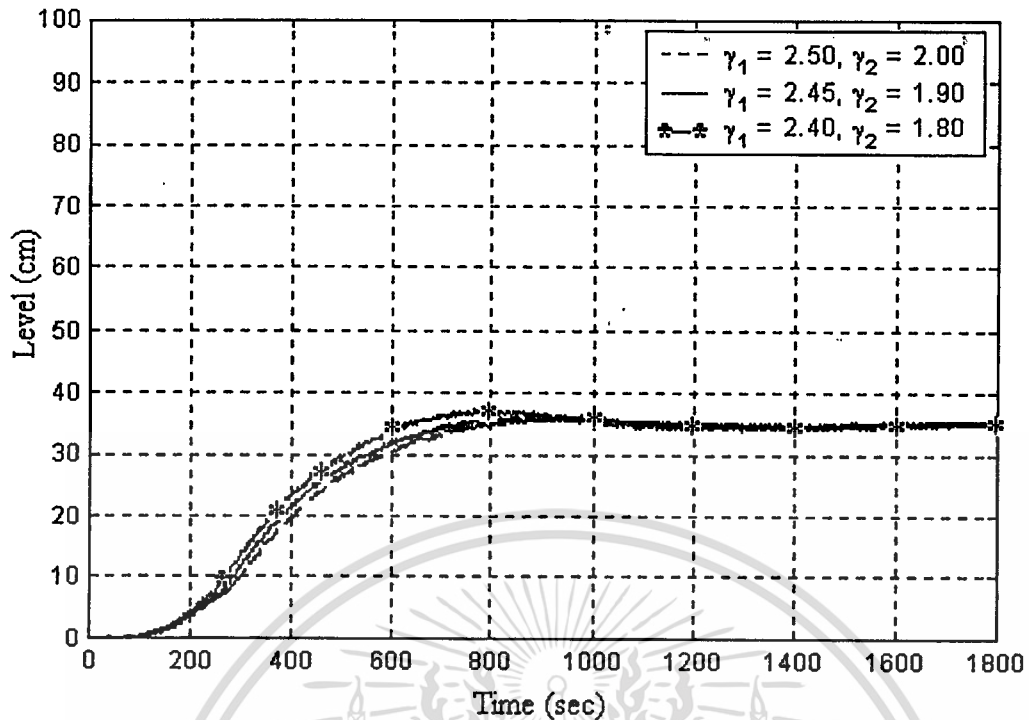


รูปที่ 5.21 ผลตอบสนองของการควบคุมกระบวนการระดับน้ำของตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ เมื่อมีสัญญาณรบกวน

เมื่อทำการทดสอบผลของสัญญาณรบกวน โดยเติมน้ำประมาณ 0.5 ลิตรลงในถังใบที่ 2 ที่เวลา 1700 วินาที ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.20 และ 5.21 คือ ระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM และวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ สามารถลดผลกระทบของสัญญาณรบกวนได้เช่นเดียวกันคือสามารถเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้

5.4.5 ผลการทดลองของผลตอบสนองของระบบควบคุม PI เมื่อลดค่า γ_1 และ γ_2 ลง

ในหัวข้อนี้เป็นผลการทดลองของระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM เมื่อ γ_1 และ γ_2 มีค่าลดลง ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อค่าของ γ ลดลง ผลตอบสนองของระบบควบคุม PI จะเร็วขึ้น ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 5.22 และผลการทดลองเชิงตัวเลขแสดงได้ดังตารางที่ 5.4 ซึ่งเป็นไปตามผลการจำลองในรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.22 ผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับน้ำเมื่อลดค่า γ_1 และ γ_2 ลง

ตารางที่ 5.4 สมรรถนะของระบบควบคุม PI เมื่อค่าลดค่า γ_1 และ γ_2 ลง สำหรับกระบวนการที่ระบุ

γ_1	γ_2	τ (sec)	t_r (sec)	t_s (sec)	os (%)	e_{ss} (%)	K_c (sec)	T_i (sec)
2.50	2.00	387.443	435.17	1451.00	2.70	0.00	0.673	198.000
2.45	1.90	362.456	385.21	1515.00	3.96	0.00	0.736	193.730
2.40	1.80	338.161	348.37	1584.00	6.19	0.00	0.805	187.302

5.5 สรุปผลการทดลอง

จากผลการจำลองระบบควบคุม PI ด้วยโปรแกรม MATLAB และผลการทดลองจริงในห้องปฏิบัติการพบว่า มีผลตอบสนองที่ใกล้เคียงกันคือ ผลตอบสนองของระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM สำหรับควบคุมระดับที่ 35 เซนติเมตร เข้าสู่สถานะอยู่ตัวด้วยค่าพุงเกินเพียงเล็กน้อย และเมื่อเปรียบเทียบกับผลตอบสนองของตัวควบคุม PI ที่ถูกออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ ระบบควบคุม PI ทั้งสองไม่มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว และเมื่อใช้ตัวควบคุม PI เดิมที่ได้ออกแบบไว้แล้วทั้งสองวิธีไปควบคุมระดับที่ 30 เซนติเมตร และ 40 เซนติเมตร โดยใช้ตัวควบคุมเดิมตามที่ได้ออกแบบไว้แล้วทั้งสองวิธี พบว่าสามารถควบคุมระบบที่มีค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมเปลี่ยนแปลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อต้องการให้ความเร็วของผลตอบสนองของระบบควบคุม PI ซึ่งออกแบบด้วยวิธี CDM สำหรับที่ระดับ 35 เซนติเมตรมีความเร็วเพิ่มขึ้น ก็สามารถลดค่าเริ่มต้นของ γ_1 และ γ_2 ที่ใช้ในการออกแบบลง สามารถแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของผลตอบสนองเป็นแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ดังรูปที่ 5.13 คือเมื่อค่าคงตัวเวลาสมมูล τ มีค่าลดลง เส้นโค้งจะเบี่ยงไปทางซ้ายมากขึ้น ซึ่งหมายความว่าผลตอบสนองของระบบควบคุม PI มีความเร็วเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่า เมื่อมีสัญญาณรบกวนเข้าสู่ระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุม PI ที่ถูกออกแบบด้วยวิธี CDM ระบบควบคุมสามารถลดผลกระทบอันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนได้ โดยลู่เข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้เช่นเดียวกับระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์



บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุม PI ด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ หรือ CDM สำหรับกระบวนการ SISO พารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI สามารถออกแบบได้ง่ายและรวดเร็ว โดยหาจากโพลีโนเมียลคุณลักษณะของระบบควบคุมวงปิดซึ่งเกิดจากโพลีโนเมียลของตัวควบคุม PI และกระบวนการ

การทดลองที่ได้นำเสนอแนะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM ส่วนที่ 2 เป็นการทดสอบความคงทนของระบบควบคุม PI เมื่อพารามิเตอร์ของกระบวนการเปลี่ยนแปลงทุกตัว เนื่องจากเปลี่ยนแปลงระดับของการควบคุมของระบบควบคุมจากระดับที่ 35 เซนติเมตรเป็น 30 เซนติเมตร และ 40 เซนติเมตร และส่วนสุดท้ายเป็นการทดสอบผลกระทบจากตัวรบกวนภายนอกที่มีต่อระบบควบคุม PI การทดสอบนั้นได้ทำการเปรียบเทียบผลของการทดลองของระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM กับวิธีของซีเกลอร์-นิโคลส์

จากผลการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB และผลการทดลองจริงในห้องปฏิบัติการพบว่า ผลตอบสนองของระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีการ CDM มีค่าพุงเกินเพียงเล็กน้อย และเมื่อพารามิเตอร์ของกระบวนการเปลี่ยนไป ผลตอบสนองของระบบควบคุม PI ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก นอกจากนี้ยังพบว่า ระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีการนี้ สามารถลดผลกระทบที่เกิดจากสัญญาณรบกวนที่เอาต์พุตได้ดี และไม่มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว การออกแบบตัวควบคุม PI ด้วยวิธี CDM นี้ความเร็วของผลตอบสนองของระบบควบคุม PI ไม่สามารถออกแบบได้โดยตรงจากค่าช่วงเวลาเข้าที่ t_r ดังนั้น การเพิ่มความเร็วของผลตอบสนองของระบบควบคุมทำได้ด้วยการลดค่าธรรมชาติเสถียรภาพ γ_1 และ γ_2

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

จากผลการทดลองที่ได้นำเสนอไปแล้วนั้นพบว่า ระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM มีสมรรถนะตามที่ได้ออกแบบไว้ แต่ความเร็วของผลตอบสนองของระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีการ CDM นี้ช้า ดังนั้น การศึกษาถึงวิธีการปรับปรุงระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีการนี้เพื่อให้มีผลตอบสนองที่เร็วขึ้น จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจที่ควรศึกษาและพัฒนาต่อไป

บรรณานุกรม

- [1] J.G.Ziegler and N.B.Nichols. 1942. "Optimum Settings for Automatic Controller" 759-768. in Trans. ASME.
- [2] S. Manabe. 1998. "Analytical Weight Selection for LQ Design" in the 8th Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics. Sagamihara, ISAS.
- [3] S. Manabe. 1998. "Coefficient Diagram Method" in the 14th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace. Seoul.
- [4] พงษ์ โพธิ์ทอง, จงกล งามวิวิท, N. Komine และ S. Manabe. 2541. "การออกแบบตัวควบคุม PI สำหรับกระบวนการ SISO ด้วย CDM" 481-484. ใน การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 : ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [5] กิตติ ศิริเศรษฐ. 2535. **อุปกรณ์วัดและควบคุมในขบวนการ**. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] P.Photong, D.Kampanya, N. Komine and J.Ngamwiwit. 2000. "Application of CDM to PIDA Control" in the 3rd ASCC, Shanghai.
- [7] Katsuhiko Ogata. 1990. **Modern Control Engineering**. Second Edition. New Jersey. Prentice-Hall Inc.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการ

ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21

21st Electrical Engineering Conference
(EECON-21)

วันที่ 12-13 พฤศจิกายน 2541

ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

จ.สุขสวัสดิ์ 43 เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร



ดำเนินการจัดการประชุมโดย

ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับกระบวนการ SISO ด้วย CDM

PI Controller Design for SISO Process by CDM

พญ โปธิ์ทอง

จงกล งานวิวิทย์

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Noriyuki Komine

Shunji Manabe

Department of Control Engineering, School of Engineering, Tokai University

บทคัดย่อ

บทความนี้จะนำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับกระบวนการอินพุตเดียวเอาต์พุตเดียว ด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ โดย การกำหนดจากค่าครรรณีเสถียรภาพมาตรฐาน จากผลการจำลองระบบ ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ เมื่อเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุม ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอที่ออกแบบด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์กับตัว ควบคุมที่ออกแบบโดยวิธีการซีเกอร์-นิโคลส์ได้พบว่า ผลตอบ สนองจะมีค่าพุ่งเกินน้อย และไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อพารามิเตอร์ของ พลานต์เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้การออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีนี้ยังสามารถทำให้มีผลตอบสนองมีสมรรถนะที่ดีขึ้นโดยง่ายด้วยการปรับค่า ครรรณีเสถียรภาพ

Abstract

This paper presents a PI controller design method for SISO process by coefficient diagram method. The simulation results comparing to the PI controller designed by Zeigler-Nichols method show that the performance of the control system has less overshoot and the robustness of the control system when the parameter of the plant has changed, are also shown. Furthermore, this design method can easily be designed for obtaining the required performance by adjusting the stability index.

1. บทนำ

ในการออกแบบระบบควบคุมนั้นเป้าหมายสูงสุดคือการสร้าง ตัวควบคุมที่สามารถควบคุมระบบให้ทำงานได้อย่างเหมาะสม คือมีผล ตอบสนองที่ดี เสถียรภาพ และสามารถควบคุมระบบที่เมื่อพารามิเตอร์ ของพลานต์ (plant) เปลี่ยนแปลงภายใต้ขอบเขตที่กำหนดไว้ล่วงหน้าได้ อย่างเหมาะสม คุณสมบัตินี้เรียกว่า คุณสมบัติความคงทน (robustness) ของระบบควบคุม

บทความนี้จะนำเสนอการออกแบบตัวควบคุม PI ด้วยวิธีแผน

ผังค่าสัมประสิทธิ์ (coefficient diagram method : CDM) [1,2] สำหรับ ควบคุมกระบวนการอินพุตเดียวเอาต์พุตเดียว (single-input single-output process : SISO) วิธีการออกแบบนี้เป็นวิธีที่ผู้ออกแบบสามารถใช้ในการ ออกแบบตัวควบคุมให้กับระบบควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งใน ด้านความมีเสถียรภาพ ผลตอบสนอง และความคงทนของระบบควบคุม โดยที่ การทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมเปรียบเทียบกับ สมรรถนะของระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุม PI ด้วยวิธีการ Zeigler-Nichols พบว่าตัวควบคุมที่นำเสนอในที่นี้ สามารถควบคุมให้ระบบเข้าสู่ สภาวะอยู่ตัว (steady state) ได้เร็ว ผลตอบสนองของระบบควบคุมมีค่าพุ่ง เกิน (overshoot) น้อยมาก นอกจากนี้ยังสามารถออกแบบตัวควบคุมให้ ระบบควบคุม มี ผลตอบสนองเร็วขึ้น ด้วยการปรับแต่งค่า ครรรณี เสถียรภาพ (stability index : γ_i) เพื่อให้ค่าคงตัวเวลาสมมูลมีค่าลดลง (equivalent time constant : T) อีกด้วย

2. การออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์

การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ [1,2] เป็น การออกแบบจากตัวควบคุมจากสมการคุณลักษณะ (characteristic equation) โดยพิจารณาจากค่าเวลาเข้าที่ และอันดับของตัวควบคุมควรจะน้อยกว่าอันดับ ของพลานต์ ซึ่งจะทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด (open-loop transfer function) $G_c(s)G_p(s)$ มีโพลมากกว่าซีโร (strictly proper) ในการออกแบบตัวควบคุม ด้วยวิธี CDM นั้น จะต้องแปลงโครงสร้างของระบบควบคุมในรูปที่ 1 ให้ อยู่ในรูปโครงสร้าง CDM มาตรฐานตามรูปที่ 2 โดยจะแยกตัวตั้งและตัวหารของ ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม และพลานต์ออกจากกันดังสมการที่ (1) และ (2) ดังนี้

$$G_c(s) = \frac{B_c(s)}{A_c(s)} = \frac{k_{\lambda} s^{\lambda} + k_{\lambda-1} s^{\lambda-1} + \dots + k_0}{l_{\lambda} s^{\lambda} + l_{\lambda-1} s^{\lambda-1} + \dots + l_0} \quad (1)$$

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 พ.ศ. 2541

$$G_p(s) = \frac{B_p(s)}{A_p(s)} = \frac{q_m s^m + q_{m-1} s^{m-1} + \dots + q_0}{p_1 s^k + p_{1-1} s^{k-1} + \dots + p_0} \quad (2)$$

โดยที่ $\lambda < k$ และ $m < k$ ดังนั้นจะเขียนสมการคุณลักษณะจากโครงสร้างของ CDM มาตรฐานได้ดังนี้

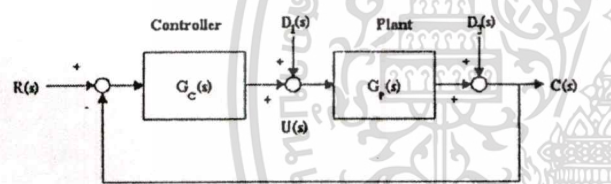
$$P(s) = A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s) = 0$$

$$= a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0$$

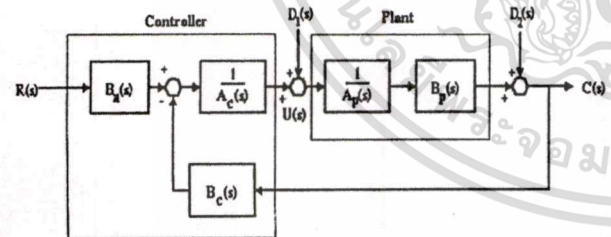
$$= \sum_{i=0}^n a_i s^i \quad (3)$$

โดยที่ a_0, a_1, \dots, a_n เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะและเป็นค่าที่นำมาใช้สำหรับออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM

สำหรับ $B_p(s)$ นั้นเป็นพรีฟิลเตอร์ (prefilter) ของระบบควบคุม ซึ่งทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมไม่มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว (steady-state error)



รูปที่ 1 โครงสร้างของระบบควบคุมทั่วไป



รูปที่ 2 โครงสร้าง CDM มาตรฐาน

การออกแบบตัวควบคุมสำหรับควบคุมระบบโดยทั่วไปนั้น นอกจากจะให้มีความถี่ที่ถี่ทั้งในด้านผลการตอบสนองชั่วคราว และผลตอบสนองสถานะอยู่ตัวแล้ว ยังต้องคำนึงถึงเสถียรภาพของระบบและความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของพลานต์ด้วย โดยความเร็วในการตอบสนองแสดงด้วยค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ดังสมการที่ (4)

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} \quad (4)$$

สำหรับเสถียรภาพของระบบและความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของพลานต์แสดงด้วยแสดงได้ด้วย ค่าครรชนเสถียรภาพ (stability index) γ_i และค่าจำกัดเสถียรภาพ (stability limit) γ_i^* ดังสมการที่ (5) และ (6)

$$\gamma_i = \frac{a_i^2}{a_{i+1} a_{i-1}} \quad (5)$$

$$\gamma_i^* = \frac{1}{\gamma_{i+1}} + \frac{1}{\gamma_{i-1}} \quad \gamma_0, \gamma_n = \infty \quad (6)$$

เมื่อ $i = 1, \dots, n-1$ โดยทั่ว ๆ ไปแล้วค่าเวลาเข้าที่จะสัมพันธ์กับค่าคงตัวเวลาสมมูลดังสมการที่ (7)

$$\tau_i = 2.5\tau \quad (7)$$

สำหรับค่าครรชนเสถียรภาพมาตรฐานของ CDM [1,2] ที่ใช้ในการออกแบบคือ

$$\gamma_{n-1} = \dots = \gamma_2 = \gamma_1 = 2, \gamma_0 = 2.5 \quad (8)$$

จากสมการที่ (4), (5) และ (6) จะให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ a_i ของสมการคุณลักษณะ กับค่าครรชนเสถียรภาพ γ_i และค่าคงที่เวลาสมมูล τ ดังสมการที่ (9)

$$a_i = a_0 \tau^i \frac{1}{\gamma_{i-1} \dots \gamma_2 \gamma_1^{i-1}}$$

$$= a_0 \tau^i \prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{\gamma_{i-j}} \quad (9)$$

ดังนั้นสามารถเขียนสมการคุณลักษณะให้อยู่ในเทอมของ a_0, τ และ γ_i ได้ดังนี้

$$P(s) = a_0 \left[\sum_{i=2}^n \left(\prod_{j=1}^{i-1} 1/\gamma_{i-j} \right) (\tau s)^i \right] + \tau s + 1 \quad (10)$$

ซึ่งสมการที่ (10) นี้จะนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุม PI ด้วยวิธี CDM ต่อไป

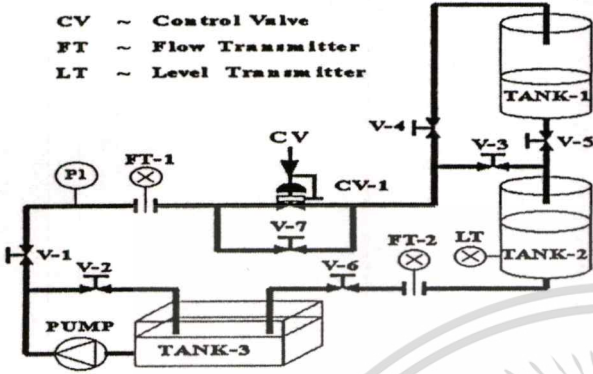
3. การทดลอง

ในหัวข้อนี้จะแสดงการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM กับตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีการ Zeigler-Nichols โดยการจำลองระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมพลานต์ในห้องปฏิบัติการจริง [3] ด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 พ.ศ. 2541

มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับน้ำ 35 เซนติเมตร และ 50 เซนติเมตร มีโครงสร้างดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 โครงสร้างของกระบวนการควบคุมระดับน้ำ

กำหนดให้ Minimum เป็นผลตอบสนองของระบบวงรอบเปิดที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับน้ำ 35 เซนติเมตร Nominal เป็นผลตอบสนองของระบบวงรอบเปิดที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับน้ำ 40 เซนติเมตร และ Maximum เป็นผลตอบสนองของระบบวงรอบเปิดที่มีอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ 45 เซนติเมตร แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4 หักชั้นถ่ายโอนของระบบวงรอบเปิดที่มีอินพุตทั้งสามระดับเป็นดังนี้

ขอบเขตค่าต่ำสุดของพลานต์

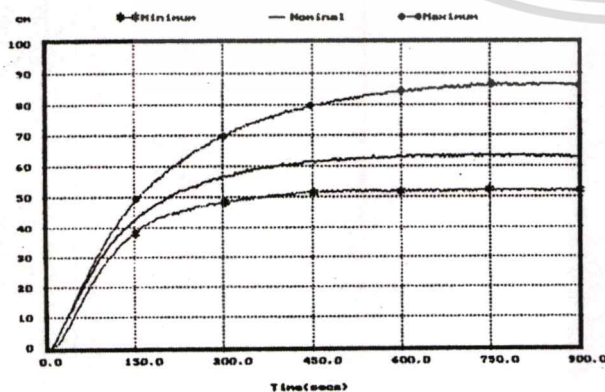
$$G_{min}(s) = \frac{1.48}{1500s^2 + 115s + 1}$$

พลานต์ที่ระบุ

$$G_{nom}(s) = \frac{1.58}{3300s^2 + 140s + 1}$$

ขอบเขตค่าสูงสุดของพลานต์

$$G_{max}(s) = \frac{1.9}{3900s^2 + 160s + 1}$$



รูปที่ 4 ผลการตอบสนองของระบบวงรอบเปิดของกระบวนการซึ่งเกิดอินพุตซึ่งเกิดเอท์พุด

3.1 ออกแบบตัวควบคุม PI ด้วย CDM และเปรียบเทียบผล

ขั้นตอนการออกแบบเป็นดังนี้

1. กำหนดตัวควบคุมที่เหมาะสมสำหรับพลานต์ที่ระบุหรือระบบวงรอบเปิดที่กำหนดอินพุตอ้างอิงอยู่ที่ระดับน้ำ 40 เซนติเมตร จากรูปที่ 4 เนื่องจากในที่นี้พลานต์เป็นอันดับ 2 อันดับของตัวควบคุมควรเป็นอันดับ 1 ดังนั้นตัวควบคุมที่ได้คือ

$$G_c(s) = \frac{k_1s + k_0}{I_1s + I_0}$$

นำตัวควบคุมที่ได้นี้มาทำให้เป็นตัวควบคุม PI โดย

กำหนดให้ $I_1=1$ และ $I_0=0$

$$G_c(s) = \frac{k_1s + k_0}{s}$$

2. ค่าพารามิเตอร์ k_1 และ k_0 ของตัวควบคุม PI โดยสร้างสมการคุณลักษณะจากสมการที่ (3) โดยใช้ตัวควบคุมจากข้อ (1) แล้วนำสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะที่ได้มาหาความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะในสมการที่ (10) ที่ได้จากค่าครวชนิเสถียรภาพมาตรฐานสมการที่ (8) คือ

$$\gamma_1 = 2.5, \quad \gamma_2 = 2.0$$

3. หาค่าพรีฟิลเตอร์ $B_f(s)$ ที่เหมาะสมของระบบ สำหรับในที่นี้ค่าที่เหมาะสมคือ $B_f(s) = k_0 = 0.016$ ดังนั้นตัวควบคุมที่ได้คือ

$$G_c(s) = \frac{1232s + 0.016}{s} = 1232 + \frac{0.016}{s}$$

นำตัวควบคุมที่ได้ไปแสดงผลทดลองเชิงเปรียบเทียบกับตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีการ Zeigler-Nichols ต่อไป

สำหรับตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีการ Zeigler-Nichols ที่จะแสดงผลทดลองเปรียบเทียบนี้ ได้จากนำเอาผลการตอบสนองของพลานต์ที่ระบุเช่นเดียวกับตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM มาคำนวณหาค่า K_p และ K_i จะได้ $K_p = 0.9T/L = 0.9 \times 185/25 = 0.66$

$$T_i = L/0.3 = 25/0.3 = 83.33$$

$$G_c(s) = K_p(1 + 1/T_i s) = K_p + K_i/s$$

ตัวควบคุม PI คือ

$$G_c(s) = 6.66 + 0.08/s$$

ใช้ตัวควบคุมนี้ซึ่งมีค่า $K_p = 6.66$ และ $K_i = 0.08$ ควบคุมพลานต์ที่ระบุ $G_{nom}(s)$ แล้วปรับค่า $K_p = 7.11$ และ $K_i = 0.045$ เพื่อให้ผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกินไม่เกิน 25 % แล้วนำไปควบคุมพลานต์ที่ระบุ $G_{nom}(s)$ พลานต์ที่

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 พ.ศ. 2541

ขอบเขตค่าสุด $G_{min}(s)$ และพลาเน็ตที่ขอบเขตสูงสุด $G_{max}(s)$ ตามลำดับ ซึ่งการทดลองเปรียบเทียบเชิงตัวเลขแสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมรรถนะของระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีการ Zeigler-Nichols กับระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีการ CDM

กระบวนการ	ชนิดตัวควบคุม	Tr (secs)	Ts (secs)	Ess (%)	Os (%)
$G_p(s) = \frac{148}{1500s^2 + 1115s + 1}$	CDM	183.33	330.64	0.00	0.00
	Z-N	25.92	184.10	0.00	10.58
$G_p(s) = \frac{158}{3300s^2 + 140s + 1}$	CDM	143.44	238.50	0.00	0.46
	Z-N	31.38	183.70	0.00	24.10
$G_p(s) = \frac{190}{3900s^2 + 160s + 1}$	CDM	135.40	220.72	0.00	1.83
	Z-N	30.30	22.10	0.00	27.79

หมายเหตุ Z-N คือการออกแบบด้วยวิธี Zeigler-Nichols

จากผลการทดลองการควบคุมกระบวนการ SISO ในตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองของตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธีการ CDM มีค่าพุงเกินไม่มากนัก ไม่มีผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว และสามารถควบคุมระบบที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงได้ดี แต่จะมีช่วงเวลาขึ้นและช่วงเวลาที่ช้ากว่าตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี Zeigler-Nichols

3.2 ผลตอบสนองของระบบควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM เมื่อปรับค่าครชนิเสถียรภาพมาตรฐาน

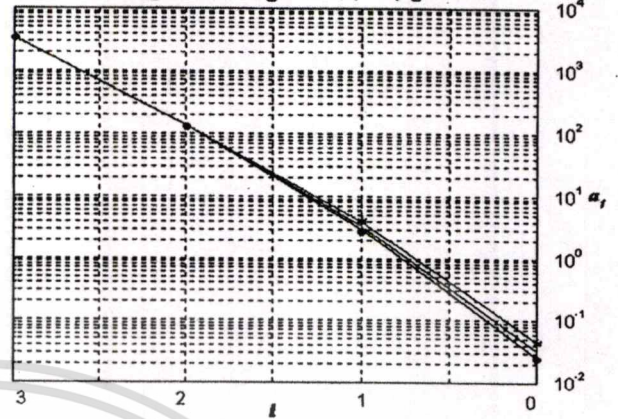
จากผลการทดลองในตารางที่ 2 เมื่อปรับค่าครชนิเสถียรภาพมาตรฐานจาก $\gamma_1=2$ เป็น $\gamma_1=1.75$ และ $\gamma_1=1.5$ จะเห็นว่าระบบมีสมรรถนะที่ดีขึ้น คือมีช่วงเวลาขึ้นและช่วงเวลาที่เร็วขึ้น มีค่าพุงเกินเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย และไม่มีผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว

ตารางที่ 2 ผลการทดลองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าครชนิเสถียรภาพมาตรฐาน สำหรับพลาเน็ตที่ระบุ

γ_1	γ_2	τ (secs)	Tr (secs)	Ts (secs)	Os (%)	Ess (%)
2.5	2.0	117.50	143.44	238.50	0.46	0.0
2.5	1.75	103.12	116.87	191.42	1.66	0.0
2.5	1.5	88.125	102.18	168.10	1.51	0.0

นำค่าสัมประสิทธิ์ α ของสมการคุณลักษณะที่เกิดจากตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM สำหรับพลาเน็ตที่ระบุไปสร้างแผนผังซีมี-ทีลิกจะแสดงได้ดังรูปที่ 5 พบว่าเมื่อค่าครชนิเสถียรภาพ γ_1 มีค่าน้อยลง ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ จะน้อยลงด้วย ทำให้เส้นโค้งเบนไปทาง

ซ้ายมากขึ้นเป็นผลให้ระบบควบคุมมีค่าเวลาเข้าที่เร็วขึ้น
($\bullet \rightarrow$) $\gamma_2=2$, ($—$) $\gamma_2=1.75$, ($\ast \rightarrow$) $\gamma_2=1.5$



รูปที่ 5 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์

4. บทสรุป

จากการทดลองพบว่าตัวควบคุม PI ที่ออกแบบด้วย CDM สามารถควบคุมให้ระบบควบคุมมีสมรรถนะตามที่กำหนดและมีค่าพุงเกินน้อยมากโดยไม่ต้องปรับแต่งอีก ในขณะที่ตัวควบคุม PI ที่ออกแบบโดย Zeigler-Nichols จะต้องปรับแต่งค่า K_p และ K_i หลายครั้งเพื่อให้มีสมรรถนะตามที่ต้องการ เมื่อพารามิเตอร์ของกระบวนการเปลี่ยนไปผลตอบสนองของระบบควบคุมไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก นอกจากนี้พบว่าสามารถออกแบบตัวควบคุม PI ให้มีผลตอบสนองเร็วขึ้นด้วยการปรับค่าครชนิเสถียรภาพ γ_1 ให้มีค่าน้อยลงซึ่งเป็นผลให้ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ให้มีค่าน้อยลงด้วย แต่จะทำให้ค่าพุงเกินและค่าของเกน K มากขึ้น ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมจะต้องคำนึงถึงค่าของเกน K ที่เป็นจริงด้วย

เนื่องจากการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM นี้ ตัวควบคุมของระบบจะถูกออกแบบจากสัมประสิทธิ์ของโพลีโนเมียลคุณลักษณะ (characteristic polynomial) ซึ่งถูกกำหนดจากครชนิเสถียรภาพและค่าคงตัวเวลาสมมูล ดังนั้น จึงสามารถออกแบบตัวควบคุมเพื่อควบคุมกระบวนการที่มีหรือไม่มีเวลาให้ผลตอบสนองได้

5. เอกสาร อ้างอิง

- [1] Manabe, Analytical weight selection for LQ design, 8th Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics, Sagamiara, ISAS, July 23-24,1998, to be published.
- [2] S.Manabe, Coefficient Diagram Method, to be presented in the 14th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace, Aug. 24-28 1998, Seoul.
- [3] สุเมธ เชาวนไวย "การออกแบบตัวควบคุมโรบัสต์. H ∞ " ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

July 27 - 30, 2006, Singapore, China

Abstract Index

of Proceedings

of the 3rd Asian Control Conference



ASCC
Asian Control Conference

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงพิมพ์ในนามของสมาคมนักวิจัยระบบควบคุมอัตโนมัติแห่งประเทศไทย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตีพิมพ์หรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสมาคมนักวิจัยระบบควบคุมอัตโนมัติแห่งประเทศไทย

Application of CDM to PIDA Control

Patu Photong*, Danupon Kampanya*, Noriyuki Komine **
Hiroshi Hirata**, Jongkol Ngamwiwit *

*Faculty of Engineering and Research Center for Communications and Information Technology
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
(E-mail: knjongko@kmitl.ac.th)

**School of Engineering, Tokai University, Hiratsuka Shi, Kanagawa Ken 259-1292, Japan
(E-mail: komine@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp)

Abstract

This paper describes the design of PIDA controller to be used to control the first-order lag plus dead-time plant by Coefficient Diagram Method (CDM). The factor of the dead time of the plant is first approximated to be a second-order by the Pade Approximation. Hence the first-order lag plus dead time plant becomes a third-order plant that suits for the structure of the original PIDA controller to be designed so that the transient and the steady state performances of the PIDA control system can be obtained. The responses of the system for the dead time varied from 0.1 second to 1 second with time constant of the plant equal to 1 second, are also investigated.

1. Introduction

Most of the plants or processes in the industry are type 0 with three to five first-order lags or one first-order lag plus dead time. Type 1 plants with one or two first-order lags are also found in the industry [1]. Most of the plants are designed and to be controlled for obtaining the desired performances by using the PI (Proportional-Integral) controller and PID (Proportional-Integral-Derivative) controller with well tuned parameter [2]. In the case of PID controller, it has also been traditionally applied to the typical second-order plant. But for the third or higher order plant, it is quite difficult to get the desired performances because the order of the plant is greater than the number of zeros provided by the PID controller. S. Jung and R.C. Dorf have proposed a structure of PIDA (Proportional-Integral-Derivative-Acceleration) controller for the third-order plant without dead time by locating two dominant roots and one root on the real axis just below the dominant roots with one negligible root located far from the origin of the real axis to meet the desired transient response. The desired characteristic equation is obtained and equated to the characteristic equation of the closed-loop transfer function of the controlled system. Then the values of the parameters of the PIDA controller can be obtained. But the step response does not satisfy the desired transient specification due to the effect of the zeros of the designed PIDA controller. However, the controller gain can be adjusted to obtain the desired specifications [3].

The study of controlling the first-order lag plus dead time plant has also been reported. When the plant is first-order lag plus dead-time model and once the PI controller parameters are obtained, W. K. Ho, C. C. Hang and J. H.

Zhou[4] have proposed the formulas that can be used to give a good approximation for the gain and phase margins of the system designed without having to solve for the equations using numerical method. Hence, their study gives the graphs for gain and phase margins varied by the ratio of dead time to time constant when the formulas have been substituted by the well-known PI tuning formulas.

This paper describes the design of PIDA controller to be used to control the first-order lag plus dead-time plant by Coefficient Diagram Method (CDM), which is proposed by Shunji Manabe [5], [6]. According to the design methodology of the CDM, the factor of the dead time of the plant is first approximated by Pade Approximation. Since the PIDA controller design technique has been proposed for the third-order plant, a second-order approximation of the Pade Approximation is required in this paper. Hence the first-order lag plus dead time plant becomes a third-order plant that suits for the structure of the original PIDA controller to be designed. Then the PIDA controller parameters can be designed based on the stability and the speed of the controlled system. Stability and speed are designed from the standard stability index and the equivalent time constant respectively. However, the equivalent time constant of the controlled system using PIDA controller can directly be obtained from the CDM design without assigning the settling time. Thus the speed of the controlled system has been automatically selected. The stability index and the equivalent time constant specify the coefficients of the characteristic polynomial. These coefficients are related to the controller parameters algebraically in an explicit form. Therefore, the transient and the steady state performances of the controlled system can be obtained.

It is known that the dead time of the controlled system is an important factor for system stability. This paper has also investigated the performance of the controlled system using the designed PIDA controller designed by CDM for the dead time varied from 0.1 second to 1.0 second when the time constant of the plant is 1 second. It is found that the PIDA control system is stable and

- (1) the transient responses for the dead time of 0.1, 0.4, 0.8 and 1 second have small percent overshoot and small dead time gives rise time of the system shorter than large dead time
- (2) the steady state responses reach to reference signal without steady-state error

- (3) the rejection of the effect due to the process disturbance for small dead time is faster than the large dead time
- (4) the settling time of the PIDA control system for each dead time gives approximately 2.5 times of the equivalent time constant which corresponds to the condition given in [5],[6]
- (5) the curves of the coefficient diagram with the variation of dead time are left-end curves which have the similar nature as the variation nature of the equivalent time constant stated in [5],[6]
- (6) the phase margin varies from 43 to 65 degree for the dead time varies from 0.1 to 1 second while the gain margin does not greatly change which means that the controlled system is robust can also be concluded.

2. CDM

The CDM is used to design the controller so that the step response of the controlled system satisfies stability, fast response and robustness requirements. Generally, the order of the controller designed by CDM is less than the order of the plant.

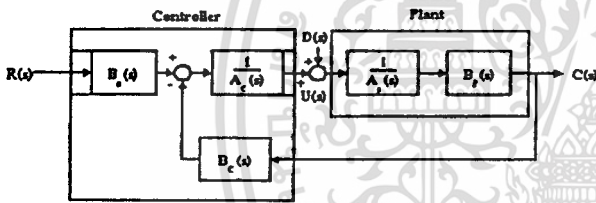


Fig. 1 CDM standard block diagram for the SISO system

The standard block diagram of the CDM design for the SISO (Single-Input Single-Output) system is shown in Fig. 1, where $D(s)$ is the process disturbance. The transfer function of the plant in the polynomial form in each block is

$$A_p(s) = p_k s^k + p_{k-1} s^{k-1} + \dots + p_0 \tag{1a}$$

$$B_p(s) = q_m s^m + q_{m-1} s^{m-1} + \dots + q_0 \tag{1b}$$

and the controller polynomials are

$$A_c(s) = l_\lambda s^\lambda + l_{\lambda-1} s^{\lambda-1} + \dots + l_0 \tag{2a}$$

$$B_c(s) = k_\lambda s^\lambda + k_{\lambda-1} s^{\lambda-1} + \dots + k_0 \tag{2b}$$

$$B_a(s) = k_0 \tag{2c}$$

where $\lambda < k$ and $m < k$. $B_a(s)$ is a pre-filter and has to be set to k_0 so that the step response has zero steady-state

error. Since the transfer function of the controller has two numerators, then it is called as a two-degree-of-freedom (2DOF) system.

The characteristic polynomial of the controlled system shown in Fig. 1 is given in the following forms

$$P(s) = A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s) \\ = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 \tag{3} \\ = \sum_{i=0}^n a_i s^i$$

where a_0, a_1, \dots, a_n are the coefficients of the characteristic polynomial. The stability index γ_i , the equivalent time constant τ and stability limit γ_i^* are defined as follows

$$\gamma_i = \frac{a_i^*}{a_{i+1} a_{i-1}} \tag{4}$$

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} \tag{5}$$

$$\gamma_i^* = \frac{1}{\gamma_{i+1}} + \frac{1}{\gamma_{i-1}} ; \gamma_0, \gamma_n = \infty \tag{6}$$

where $i = 1, \dots, n-1$. To meet the specifications, the equivalent time constant τ and the standard values of the stability index γ_i are chosen as follows

$$t_s = 2.5-3 \tau \tag{7}$$

$$\gamma_{n-1} = \dots = \gamma_3 = \gamma_2 = 2, \gamma_1 = 2.5 \tag{8}$$

In general, settling time $t_s = 2.5 \tau$ and stability index $\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = 2$ are strongly recommended due to stability and the step response requirement. However, it is not necessary to make $t_s = 2.5 \tau$ and $\gamma_4 \sim \gamma_{n-1} = 2$. The condition for the stability index can be relaxed to

$$\gamma_i > 1.5 \gamma_i^* \tag{9}$$

The standard values stated in (8) can be used to design the controller if the following condition is satisfied

$$p_k / p_{k-1} > \tau / (\gamma_{n-1} \gamma_{n-2} \dots \gamma_1) \tag{10}$$

where p_k and p_{k-1} are the coefficients of the the plant at k th and $(k-1)$ th. If the above condition is not satisfied, we can first increase γ_{n-1} then γ_{n-2} and so on, until (10) is satisfied. From (4)-(6), the coefficient a_i can be written as

$$a_i = a_0 \tau^i \frac{1}{\gamma_{i-1} \dots \gamma_2^{i-2} \gamma_1^{i-1}} \\ = a_0 \tau^i \prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{(\gamma_{i-j})^j} \tag{11}$$

Then the characteristic polynomial to be used to design the parameters of the PIDA controller for a first-order lag plus dead-time plant is expressed as

$$P(s) = a_0 \left[\left\{ \sum_{i=2}^n \prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{T_{i-j}} \right\} (\tau)^i \right] + \tau + 1 \quad (12)$$

3. PIDA Control System

In this section, the structure of the first-order lag plus dead-time plant, the structure of the PIDA controller and PIDA controller designed by CDM are described respectively.

3.1 The Structure of a First-Order Lag Plus Dead- Time Plant

The transfer function of the first-order lag plus dead time plant is given by

$$G_l(s) = \frac{1}{Ts+1} e^{-sL} \quad (13)$$

where T and L are the time constant and the dead time of the plant respectively. According to the design methodology of the CDM, the factor of the dead time of the plant must be approximated by Pade Approximation. Since the PTDA controller design technique has been proposed for the third-order plant [3], a second-order approximation of the Pade Approximation is required in the paper. Hence the first-order lag plus dead time plant becomes a third-order plant as shown below

$$G_p(s) = \frac{8 - 4Ls + L^2 s^2}{(Ts+1)(8 + 4Ls + L^2 s^2)} \quad (14)$$

and this structure suits for the original structure of the PIDA controller.

3.2 The PIDA Controller Structure

The structure of the standard transfer function of the PIDA controller for a third-order plant proposed by Jung and Dorf [3] is given by

$$\begin{aligned} G_c(s) &= K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d}{(s+d)} s + \frac{K_a}{(s+d)(s+e)} s^2 \\ &= K \frac{(s+a)(s+b)(s+z)}{s(s+d)(s+e)} \end{aligned} \quad (15)$$

Since $d, e \gg a, b, z$, then the poles d and e can be neglected. Hence

$$G_c(s) = \frac{k_3 s^3 + k_2 s^2 + k_1 s + k_0}{s} \quad (16)$$

where $k_3 = K_a = K$, $k_2 = K_d = K(a+b+z)$, $k_1 = K_p = K[(a+b)z + ab]$ and $k_0 = K_i = K(abz)$. The polynomial forms for controller (16) are $A_c(s) = s$ and $B_c(s) = k_3 s^3 + k_2 s^2 + k_1 s + k_0$. By comparing with (2a) and (2b), the coefficients of $A_c(s)$ in the controller (16) are $l_3 = l_2 = l_0 = 0$ and $l_1 = 1$ or $A_c(s) = s$, while the coefficients of $B_c(s)$ remain the same. Since $A_c(s)$ is specified as s , this restriction virtually makes the plant to be a third-order plant. Thus a second-order controller, one order less than the plant, is sufficient.

3.3 The PIDA Controller Design by CDM

The design steps for PIDA controller by CDM are summarized as follows.

- 1) Determine the proper values of the stability index γ_1 from the standard stability index stated in (8).
- 2) Find the characteristic polynomial (3) with the PIDA controller (16) and equate to the characteristic polynomial obtained from (12) with τ and γ_1 found from 1) and 2). Then all the parameters of the polynomial $B_c(s)$, that is k_3, k_2, k_1 and k_0 which respectively correspond to K_a, K_d, K_p and K_i are obtained.
- 3) Set $B_c(s) = k_0$.
- 4) Find the equivalent time constant τ from 2).

4. Simulation Results

The simulation results of the controlled system with a PIDA controller designed by CDM for the first-order lag plus dead-time plant are shown in this section. The time constant T of the plant is assumed to be 1 second while the dead time is varied as 0.1, 0.4, 0.8 and 1 second, respectively.

4.1 Design of PIDA Controller

The PIDA controller for the first-order lag plus dead-time plant is first designed for dead time $L = 1$ second or $L/T = 1$ is first designed. When $L = 1$ second, the second-order Pade Approximation is

$$e^{-s} \approx \frac{0.125s^2 - 0.5s + 1}{0.125s^2 + 0.5s + 1}$$

and the first-order lag plus dead-time plant becomes a third-order plant as

$$G_p(s) = \frac{1}{(s+1)} \frac{0.125s^2 - 0.5s + 1}{0.125s^2 + 0.5s + 1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Since the equivalent time constant τ has been automatically defined by the structure of the of PIDA controller and the plant with the standard stability index given as

$$\gamma_4 = \gamma_3 = \gamma_2 = 2, \gamma_1 = 2.5,$$

then the parameters k_3, k_2, k_1 and k_0 of the PIDA controller shown in (14) are obtained by equating the following characteristic polynomial

$$\begin{aligned} P(s) &= A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s) \\ &= 0.125k_3s^5 + (0.125 - 0.5k_3 + 0.125k_2)s^4 \\ &\quad + (0.625 + k_3 - 0.5k_2 + 0.125k_1)s^3 + \\ &\quad (1.5 + k_2 - 0.5k_1 + 0.125k_0)s^2 + \\ &\quad (1 - k_1 - 0.5k_0)s + k_0 \end{aligned}$$

to the standard form of the characteristic polynomial

$$\begin{aligned} P(s) &= 0.014s^5 + 0.1331s^4 + 0.6335s^3 \\ &\quad + 1.50763s^2 + 1.7946s + 0.8543 \end{aligned}$$

derived from (12). Therefore, the controller polynomials for PIDA control system are

$$A_c(s) = 0.112s^3 + 0.512s^2 + 1.222s + 0.854$$

$$B_c(s) = s$$

and the pre-filter is

$$B_p(s) = 0.854.$$

When L changes from 0.8, 0.4 to 0.1 second, or $L/T = 0.8, 0.4$ and 0.1, the parameters of the PIDA controller with the same design procedure stated in sub-section 3.3 can be obtained and summarized in Table 1.

Table 1 Parameters of the PIDA Controller and τ

L/T	K_d	K_p	K_i	τ
0.1	0.013	0.535	11.766	42.949
0.4	0.048	0.518	2.930	3.482
0.8	0.091	0.511	1.497	1.171
1.0	0.112	0.512	1.222	0.854

4.2 Step responses of the PIDA controller system

Step responses of the PIDA control system when the unit step reference signal and the constant process

disturbance with the magnitude of 0.5 are applied to the system, can be shown in Fig. 2. It is found from the Fig. 2 that the fast response and small effect of constant disturbance can be obtained when L/T is small while the control signal u at the transient state is large as shown in Fig. 3. When the value of L/T is large, the speed of the step response is slow and the effect of the constant process disturbance is large.

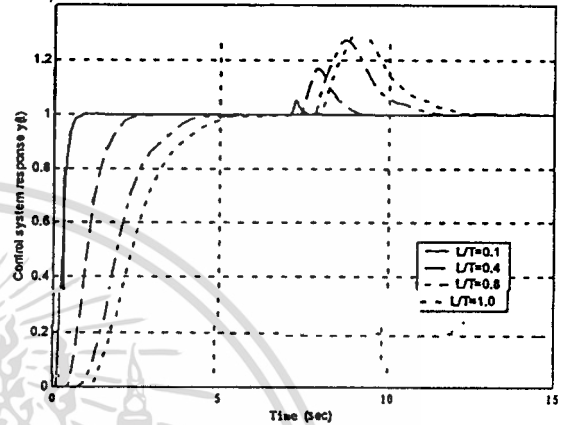


Fig.2 Step responses of the PIDA control system

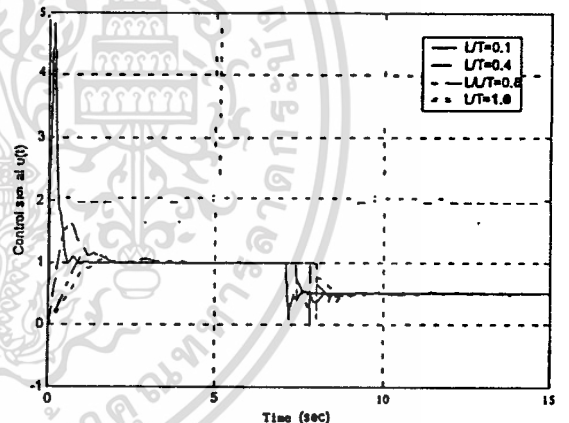


Fig. 3 Control signal u

Table 2 is the performance of the PIDA control system for each value of L/T . It is found that the rise time t_r and the settling time t_s of the system for small value of L/T is shorter than the system for large value of L/T . The PIDA control system has small percent overshoot (O_s) with zero steady-state error (E_{ss}).

It can be seen from Table land 2 that the value of the equivalent time constant τ for each value of L/T is nearly 2.5 times of the settling time t_s . This means that the speed of the PIDA control system has been automatically assigned.

Fig. 4 is the coefficient diagram for L/T varies from 0.1 to 1 for the standard stability index given as $\gamma_1 = 2.5$ and $\gamma_4 = \gamma_3 = \gamma_2 = 2$. The curves of the coefficient diagram with variation of L/T are left-end down curves. The small value of L/T gives larger end-down curve than the large value of L/T . This means that step response of the PIDA

control system is fast when the value of L/T is small (see Fig. 2) and the equivalent time constant τ is small (see Table 1 and 2).

Table 2 PIDA Control System Performances

L/T	t_r (sec)	t_s (sec)	E_{ss} (%)	O_s (%)
0.1	0.311	0.644	0.00	0.222
0.4	1.081	2.197	0.00	0.055
0.8	2.063	4.125	0.00	0.001
1.0	2.400	5.018	0.00	0.018

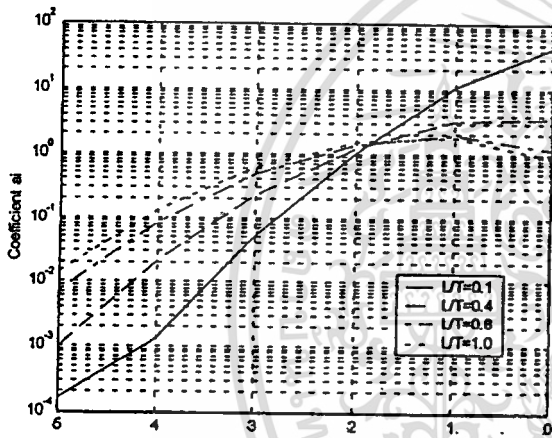


Fig. 4 Coefficient diagram for $L/T=0.1, 0.4, 0.8$ and 1

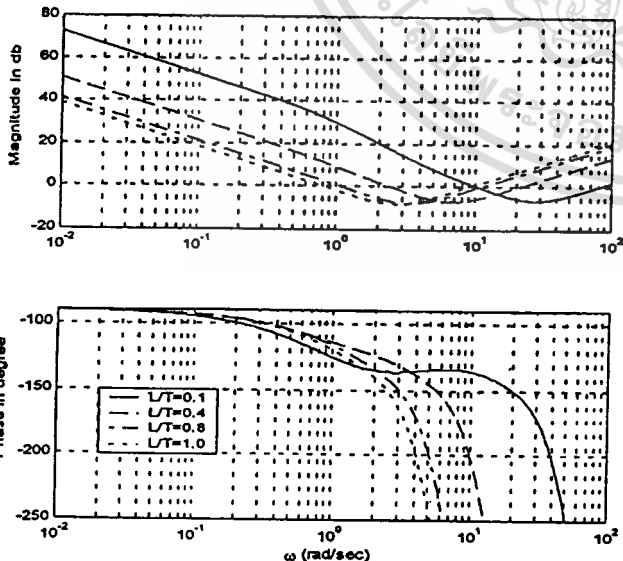


Fig. 5 Open-loop frequency response of the PIDA control system

The paper also has investigated the effects of dead time in the frequency domain. Fig. 5 and Fig. 6 show the open-loop frequency responses and the gain margin and phase margin of the PIDA control system for $L/T=0.1, 0.4, 0.8$ and 1 , respectively. It can be observed that the phase margin varies from 43 to 65 degree for L/T varies from 0.1 to 1 while the gain margin does not greatly change. This means that the PIDA control system is robust.

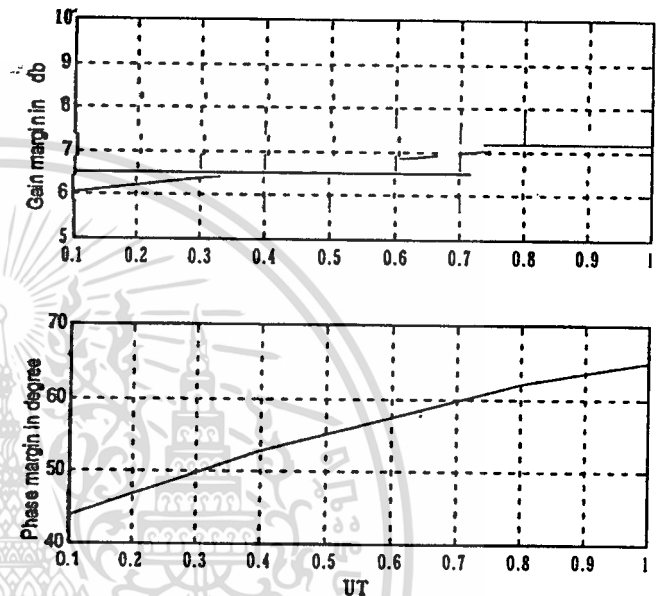


Fig. 6 Gain margin and phase margin of the PIDA control system

5. Conclusions

The PIDA controller designed by CDM technique for a first-order lag plus dead-time plant has been proposed in this paper. It has been shown that the parameters K_p, K_i, K_d and K_o of the PIDA controller can be designed according to the variation of the dead time of the plant by CDM technique. Speed of the PIDA control system has also been automatically assigned by the CDM technique without setting the settling time. Small percent overshoot and zero steady state error of the system responses can be obtained for dead time varied from 0.1 to 1 second. The PIDA control system can also reject the effect of the constant process disturbance entering to the system.

Acknowledgments

The authors would like to thank Faculty of Engineering, Research Center for Communications and Information Technology (ReCCIT), KMITL and Japan International Cooperation Agency (JICA) for their kind supports.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

References

- [1] D.W. Pessen. A New Look at PID Controller Tuning. *Trans. of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1996,116:553-557
- [2] J.G.Ziegler, N.B.Nichols. Optimum Settings for Automatic Controller. *ASME Trans.*, 1942,64:759-768
- [3] S. Jung, R.C. Dorf. Analytic PIDA Controller Design Technique for A Third Order Plant. *Proceeding of the 35th Conference on Decision and Control, Kobe*, 1996:2513-2518
- [4] W.K.Ho, C.C.Hang, J.H.Zhou. Performance and Gain and Phase Margins of Well-Known PI Tuning Formulas. *IEEE Transactions on Control systems Technology*, 1995,3(2):245-248
- [5] S. Manabe. Analytical weight selection for LQ design, *8th Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics, Sagamiara, ISAS*, 1998
- [6] S. Manabe. Coefficient Diagram Method. *14th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace, Seoul*, 1998: 199-2 10





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Program OPEN_VALVE.CPP

```

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <dos.h>
#include <conio.h>

#define IO_BASE          0x0100
#define ADC              IO_BASE+0x88
#define ADC_CH          ADC+0
#define ADC_LOW         ADC+0
#define ADC_HIGH        ADC+1
#define ADC_START       ADC+2

int  adc_in(int);
void main(void)
{
    while(!kbhit()){
        outportb(0x18C,0x666&0xff);
        outportb(0x18C+1,(0x666>>8)&0xff);
        outportb(0x18B,0);
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Program OPEN_LOOP_DATA.CPP

```

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <conio.h>
#include <dos.h>
#include <time.h>

#define      IO_BASE      0x0100
#define      ADC          IO_BASE+0x88
#define      ADC_CH      ADC+0
#define      ADC_LOW     ADC+0
#define      ADC_HIGH    ADC+1
#define      ADC_START   ADC+2

/***** DEFIND DATA PART*****/

int adc_in(int);
void main(void)
{
    FILE *openloop;
    int i,dift;
    float n;
    openloop = fopen("openloop.dat", "w");
    printf("\nStart process.....\n");
    getch();
    time_t t,t1;
    t = time('\0');

    while (!kbhit())
    {
        t1 = time('\0');

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

delay(250);
dift = t1-t;
    n = adc_in(0)/409.5;
    printf("%d%10.2fn",dift,n);
    fprintf(openloop,"%d%10.2fn",dift,n);
}
printf("\nFinished process.....");
fclose(openloop);
}

int  adc_in(int ch)
{
    int  result;
        outportb(ADC_CH,ch);
        outportb(ADC_START,0);
        while(inportb(ADC_HIGH)&0x80);
        result=256*(inportb(ADC_HIGH)&0x0f)+inportb(ADC_LOW);
    return(result);
}

```

Program PI_CDM_CONT.CPP

```

#include <stdio.h>

#include <stdlib.h>

#include <conio.h>

#include <dos.h>

#include <time.h>

#define      IO_BASE      0x0100
#define      ADC          IO_BASE+0x88
#define      ADC_CH       ADC+0
#define      ADC_LOW      ADC+0
#define      ADC_HIGH     ADC+1
#define      ADC_START    ADC+2

/***** DEFIND DATA PART*****/
int adc_in(int),v_out;
float e0=0,e1=0,e2=0,m0=0,m1=0,b0=0,c0=0,d0=0,d1=0;
float kc,ti,td,k1,k0;

main(void)
{
    int i,ts,tn,to=0;
    int adc_in(int),v_out;
    float a=0,b=0,g=0,set_point=0,set=0;
    float n,n1,nn;
    FILE *pi_cdm;

    //set reference input
    printf("ENTER SETPOINT :\n");
    scanf("%f",&set_point);

```

```

set= (set_point*4095)/100;
printf("%10.2fn",set);

// input K1
printf("ENTER K1 :\n");
scanf("%f",&k1);
printf("%10.2fn",k1);
kc=k1;
printf("%10.2fn",kc);
// input K0 ,get ti
printf("ENTER K0 :\n");
scanf("%f",&k0);
//getch();
printf("%10.2fn",k0);
    ti=k1/k0;
printf("%10.2fn",ti);
//set Td=0
Td=0;
printf("%10.2fn",td);
// Open file for collecting data
pi_cdm = fopen("pi_cdm.dat", "w");
printf("\nStart process.....");
getch();
time_t t,t1;
t = time('\0');

    while (!kbhit())
        { delay(1000);
          t1 = time('\0');
          tn = t1-t;
          // set sampling time ts
          ts=1;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

n = adc_in(0);

if( n > 4095 )
    n=4095;
if( n<0 )
    n=0;
printf("ts :%d m0:%10.2f\n",ts,n/10);

```

```

b0=(k0*ts)/(k1+(k0*ts));
printf("b0:%10.2f\n",b0);

```

```

c0=k1/(k1+(k0*ts));
printf("c0:%10.2f\n",c0);

```

```

d0=(b0*set)+(c0*d1);
printf("d0:%10.2f\n",d0);

```

```

nn=d0;
d1=d0;
printf("ts:%d set:%10.2f n:%10.2f nn:%10.2f\n",ts,set,n,nn);

```

```

e0=nn-n;
printf("e0 :%10.2f\n",e0);

```

```

a=kc*(1+(ts/ti)+(td/ts));
printf("a :%10.2f\n",a);
b=-kc*(1+(2*(td/ts)));
printf("b :%10.2f\n",b);
g=kc*td/ts;
printf("g:%10.2f\n",g);
m0=m1+(a*e0)+(b*e1)+(g*e2);

```

```

printf("m0 :%10.2f\n",m0);

```

```

if (m0 > 4095 )
    m0=4095;
if (m0<0 )
    m0=0;

e2=e1;
e1=e0;
m1=m0;
v_out=m0;
// show to screen
printf("t :%d y :%10.2f u :%10.2f r :%10.2fn",tn,n/10,m0,set);
// collect to file
fprintf(pi_cdm,"%d%10.2f%10.2f%10.2fn",tn,n/10,m0,set);
printf("v out 0x:%x\n",v_out);
outportb(0x18C,v_out&0xff);

outportb(0x18C+1,(v_out>>8)&0xff);
outportb(0x18B,0);
    }
printf("\nFinished process.....");
    f close(pi_cdm);
}

int  adc_in(int ch)
{
    int  result;

    outportb(ADC_CH,ch);
    outportb(ADC_START,0);
    while(inportb(ADC_HIGH)&0x80);
    result=256*(inportb(ADC_HIGH)&0x0f)+inportb(ADC_LOW);

    return(result);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นางสาวพฐุ โพธิ์ทอง เกิดเมื่อวันที่ 9 เมษายน 2514 ที่จังหวัดนครปฐม สำเร็จการศึกษาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาคณิตศาสตร์ จากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ปีการศึกษา 2536 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2541 มีผลงานทางวิชาการที่ได้ตีพิมพ์เผยแพร่ทั้งในประเทศ และนอกประเทศหลายฉบับ ประสบการณ์ทำงาน ในปี พ.ศ. 2536-ปัจจุบัน เป็นโปรแกรมเมอร์ ปัจจุบันทำงานที่บริษัท แพคริมโซลูชั่นส์ จำกัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้