

การออกแบบตัวควบคุมไอพีสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง

I-P CONTROLLER DESIGN FOR QUADRUPLE-TANK SYSTEM

เทียนชัย สุขศรี

TIANCHAI SUKSRI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2547

ISBN 974-18-1191-4

การออกแบบตัวควบคุมไอพีสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง

I-P CONTROLLER DESIGN FOR QUADRUPLE-TANK SYSTEM



เทียนชัย สุขศรี

TIANCHAI SUKSRI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2547

ISBN 974-15-1191-4

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 56673

วัน,เดือน,ปี 14 ก.ค. 2548

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

I-P CONTROLLER DESIGN FOR QUADRUPLE-TANK SYSTEM

TIANCHAI SUKSRI

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

2004

ISBN 974-15-1191-4

COPYRIGHT 2004

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKARBANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบตัวควบคุมไอพีสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง
I-P CONTROLLER DESIGN FOR QUADRUPLE – TANK SYSTEM

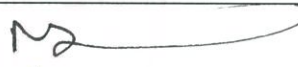




ชื่อนักศึกษา นายเทียนชัย สุขศรี

รหัสประจำตัว 44611400

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.วิริยะ กองรัตน์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.กิตติ ตีรเศรษฐ		
ผศ.ดร.ชนิดย์ ตริสุวรรณวัฒน์		
รศ.ประสิทธิ์ จุลเสวีวงศ์		
รศ.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร		
รศ.วิริยะ กองรัตน์		

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 20 กันยายน 2547 เวลา 14.15-16.15 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-404)



วันที่.....4.....เดือน.....๓๐๑๐๖.....พ.ศ.....๒๕๔๗.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบตัวควบคุมไอพีสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง
นักศึกษา	นาย เทียนชัย สุขศรี
รหัสนักศึกษา	44611400
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2547
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.วิริยะ กองรัตน์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้กล่าวเกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมไอพี (อินทิกรัล-สัดส่วน) โดยใช้วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์สำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง โดยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์นั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการ SISO หรือกระบวนการ SIMO ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่การออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการ MIMO ด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์นั้นยังไม่มีวิธีการสำหรับการออกแบบตัวควบคุมที่แน่นอน ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ตัวควบคุมไอพีที่ออกแบบด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ สำหรับกระบวนการสองอินพุตสองเอาต์พุต โดยกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงสามารถปรับเปลี่ยนโหมดการทำงานของกระบวนการระหว่างเฟสต่ำสุดและเฟสไม่ต่ำสุดโดยการปรับค่าตำแหน่งวาล์ว ผลการทดลองพิสูจน์โดยแสดงให้เห็นได้จากการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB เปรียบเทียบกับการทดลองควบคุมกระบวนการจริง พบว่าการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ สามารถควบคุมระดับน้ำของกระบวนการให้มีผลตอบสนองได้ตามที่ต้องการและไม่มีค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัว

Thesis Title	I-P Controller Design for Quadruple Tank System
Student	Mr. Tianchai Suksri
Student ID.	44611400
Degree	Master of Engineering
Programme	Instrumentation Engineering
Year	2004
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Viriya Kongratana

ABSTRACT

This thesis presents a design technique based on the coefficient diagram method (CDM) for a Quadruple-Tank process using I-P (Integral-Proportional) controller. Although CDM is proven effective in SISO or SIMO control design, the concrete procedure for MIMO design is not established yet, which I-P Controller design by CDM is made for this Two-Input Two-Output (TITO) problem. The Quadruple-Tank Process is adjusting operating mode by value of valve between minimum phase and non-minimum phase case. The results obtained in this thesis verification are demonstrated by MATLAB simulation and real experiment, which that the CDM can be designed to meet both transient and steady-state response.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เพราะได้รับความปรึกษาและความอนุเคราะห์จาก รศ.วิริยะ กองรัตน์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ได้ให้การสนับสนุนและคำปรึกษาในงานวิจัยจนสำเร็จตามวัตถุประสงค์

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ธนิตย์ ศรีสุวรรณวัฒน์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและคำปรึกษา ปัญหาต่างๆ ตลอดจนช่วยความเหลือในการตรวจสอบแก้ไขข้อผิดพลาด ให้แก่ผู้เขียนเสมอมา

ขอขอบพระคุณ รศ.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร และ รศ.สุพรรณ กุลพานิชย์ ที่ได้กรุณาให้ คำปรึกษาและแนะนำวิธีการแก้ปัญหาต่างๆ ให้แก่ผู้เขียนเสมอมา

ขอขอบพระคุณ ผศ. ทวีพล ชี้อัสตย์ ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้แก่ ผู้เขียนเสมอมา

และท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณ อ.อาจันต์ น่วมสำราญ เป็นอย่างสูง ที่ได้กรุณาให้ คำปรึกษา แนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นทั้งทางด้านทฤษฎีและทางด้านปฏิบัติ ความคิด ริเริ่มในการทำวิจัย ตลอดจนการฝึกฝนให้ผู้เขียนมีความสามารถในการทำวิจัย รวมถึงความเอาใจ ใส่ดูแลสอบถามถึงความก้าวหน้าของวิทยานิพนธ์อย่างสม่ำเสมอ

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบให้กับบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน

เทียนชัย สุขศรี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	X
คำย่อและสัญลักษณ์.....	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.2 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 กระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง.....	4
2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	5
2.2 คุณลักษณะของกระบวนการ.....	7
2.2.1 ซีโรของกระบวนการ MIMO.....	7
2.2.1.1 การหาตำแหน่งซีโร.....	8
2.2.1.2 ผลกระทบจากตำแหน่งซีโรต่อระบบควบคุม.....	9
2.2.1.3 ทิศทางของซีโร.....	10
2.2.1.4 ผลกระทบจากทิศทางของซีโรต่อระบบควบคุม.....	11
2.2.2 การวัดการอินเตอร์แอคชั่น.....	11
2.2.2.1 RGA (Relative Gain Array).....	11
2.2.2.2 การเลือกจับคู่อินพุต-เอาต์พุตด้วยวิธี RGA.....	12
2.2.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง RGA และซีโรที่อยู่ทางขวาของระนาบ s.....	13
2.2.3 ความไวของกระบวนการ.....	14
2.2.3.1 อัตราขยายของกระบวนการ.....	14
2.2.3.2 Condition Number.....	15
2.3 สรุป.....	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์.....	17
3.1 การออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธี CDM.....	18
3.1.1 คุณลักษณะพื้นฐานของวิธี CDM.....	19
3.1.2 โครงสร้างของระบบควบคุม.....	19
3.1.3 กระบวนการในการออกแบบตัวควบคุม.....	21
3.1.3.1 การวางโพล.....	22
3.1.3.2 การวางซีโร.....	22
3.1.4 การออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะด้วยวิธี CDM.....	23
3.1.5 เงื่อนไขเสถียรภาพของวิธี CDM.....	24
3.1.6 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์.....	26
3.2 ทฤษฎีของ Kessler's Multiloop Structure (MLS).....	28
3.2.1 วงรอบตัวควบคุมแบบ I วงที่ 1.....	29
3.2.2 วงรอบตัวควบคุมแบบ I วงที่ 2.....	30
3.2.3 วงรอบตัวควบคุมแบบ I วงที่ n.....	30
3.3 ความคล้ายคลึงกันของวิธี CDM กับวิธี MLS.....	32
3.3.1 คุณลักษณะผลตอบสนองทางความถี่ของวิธี CDM และวิธี MLS.....	34
3.4 การเลือกพารามิเตอร์ของวิธี CDM.....	35
3.5 สรุป.....	37
บทที่ 4 การออกแบบตัวควบคุม I-P ด้วยวิธี CDM.....	38
4.1 โครงสร้างระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบแยกอิสระ.....	38
4.2 โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง.....	39
4.2.1 โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง กรณีเฟสต่ำสุด.....	40
4.2.2 โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง กรณีเฟสไม่ต่ำสุด.....	43
4.3 การออกแบบตัวควบคุม I-P ด้วยวิธี CDM สำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง.....	45
4.3.1 การออกแบบตัวควบคุม I-P ด้วยวิธี CDM สำหรับ กระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง กรณีเฟสต่ำสุด.....	45

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.2 การออกแบบตัวควบคุม I-P ด้วยวิธี CDM สำหรับ กระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง กรณีเฟสไม่ต่ำสุด	48
4.4 สรุป.....	51
บทที่ 5 การจำลองและการทดลองระบบควบคุม.....	52
5.1 โครงสร้างระบบควบคุมของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง.....	52
5.2 พารามิเตอร์และจุดการทำงานของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง.....	53
5.3 กระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง กรณีเฟสต่ำสุด.....	57
5.3.1 การวิเคราะห์กระบวนการ.....	57
5.3.1.1 ตำแหน่งของโพลและซีโรของกระบวนการ.....	57
5.3.1.2 การวัดการอินเตอร์แอคชัน.....	58
5.3.1.3 ความไวของกระบวนการ.....	59
5.3.2 การออกแบบตัวควบคุม.....	59
5.3.3 การจำลองระบบควบคุม.....	60
5.3.3.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได.....	60
5.3.3.2 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าดรรรชนีเสถียรภาพ γ_1	63
5.3.3.3 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าคงตัวเวลาสมมูล τ	68
5.3.4 การทดลองกับกระบวนการจริง.....	73
5.3.4.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได.....	74
5.3.4.2 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าดรรรชนีเสถียรภาพ γ_1	77
5.3.4.3 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าคงตัวเวลาสมมูล τ	80
5.4 กระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง กรณีเฟสไม่ต่ำสุด.....	84
5.4.1 การวิเคราะห์กระบวนการ.....	84
5.4.1.1 ตำแหน่งของโพลและซีโรของกระบวนการ.....	84
5.4.1.2 การวัดการอินเตอร์แอคชัน.....	85
5.4.1.3 ความไวของกระบวนการ.....	86
5.4.2 การออกแบบตัวควบคุม.....	86
5.4.3 การจำลองระบบควบคุม.....	87

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.4.3.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได.....	87
5.4.3.2 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าดรชนี้เสถียรภาพ γ_1	90
5.4.4 การทดลองกับกระบวนการจริง.....	95
5.4.4.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได.....	95
5.4.4.2 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าดรชนี้เสถียรภาพ γ_1	98
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	102
6.1 บทสรุป.....	102
6.2 ปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางในการแก้ปัญหา.....	104
6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	105
เอกสารอ้างอิง.....	106
ภาคผนวก.....	109
ภาคผนวก ก. รายละเอียดของวงจรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	110
ภาคผนวก ข. โปรแกรมที่ใช้ในการหาแบบจำลองของกระบวนการ, วิเคราะห์กระบวนการและออกแบบตัวควบคุม.....	128
ภาคผนวก ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	138
ประวัติผู้เขียน.....	154

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 พารามิเตอร์ของกระบวนการ.....	53
5.2 จุดการทำงานของกระบวนการในกรณีเฟสต่ำสุด (P_-) และเฟสไม่ต่ำสุด (P_+)	54
5.3 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมในกรณีเฟสต่ำสุด.....	60
5.4 สมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองในกรณีเฟสต่ำสุด.....	60
5.5 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลอง เมื่อ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด.....	63
5.6 เปรียบเทียบขนาดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่มากที่สุดจากการจำลอง เมื่อ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด.....	66
5.7 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเมื่อ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด.....	66
5.8 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลอง เมื่อ r เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด.....	68
5.9 เปรียบเทียบขนาดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่มากที่สุดจากการจำลอง เมื่อ r เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด.....	71
5.10 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเมื่อ r เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด.....	71
5.11 สมรรถนะของระบบควบคุมจากการทดลองในกรณีเฟสต่ำสุด.....	74
5.12 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการทดลอง เมื่อ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด.....	77
5.13 เปรียบเทียบขนาดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่มากที่สุดจากการทดลอง เมื่อ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด.....	80
5.14 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการทดลอง เมื่อ r เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด.....	83
5.15 เปรียบเทียบขนาดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่มากที่สุดจากการทดลอง เมื่อ r เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด.....	83
5.16 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด.....	87
5.17 สมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด.....	87
5.18 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลอง เมื่อ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด.....	90
5.19 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเมื่อ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด.....	93

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.20	สมรรถนะของระบบควบคุมจากการทดลองในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด.....95
5.21	เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการทดลอง เมื่อ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด.....98
5.22	เปรียบเทียบขนาดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่มากที่สุดจากการทดลอง เมื่อ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด.....101

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แบบจำลองกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง.....	4
3.1 โครงสร้างทั่วไปของระบบควบคุม.....	19
3.2 โครงสร้างมาตรฐานของระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี CDM.....	20
3.3 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์.....	27
3.4 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์เสถียรภาพและค่าคงตัวเวลาสมมูล สอดคล้องกับเสถียรภาพและผลตอบสนองของระบบควบคุม.....	28
3.5 โครงสร้างระบบควบคุมของวิธี Kessler's MLS.....	28
3.6 ผลตอบสนองต่อขนาดของระบบอันดับ 3 สำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดตามวิธีของ MLS...31	
3.7 ผลตอบสนองต่อขนาดของระบบอันดับ 3 สำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดตามวิธีของ MLS...32	
4.1 โครงสร้างระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบแยกอิสระ.....	39
4.2 โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงกรณีเฟสต่ำสุด.....	41
4.3 โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงกรณีเฟสต่ำสุด ในรูปแบบมาตรฐานของวิธี CDM.....	41
4.4 โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงกรณีเฟสไม่ต่ำสุด.....	43
4.5 โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงกรณีเฟสไม่ต่ำสุด ในรูปแบบมาตรฐานของวิธี CDM.....	44
4.6 โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับวงรอบเอาต์พุต 1 กรณีเฟสต่ำสุด.....	45
4.7 โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับวงรอบเอาต์พุต 2 กรณีเฟสต่ำสุด.....	46
4.8 โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับวงรอบเอาต์พุต 1 กรณีเฟสไม่ต่ำสุด.....	48
4.9 โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับวงรอบเอาต์พุต 2 กรณีเฟสไม่ต่ำสุด.....	49
5.1 โครงสร้างระบบควบคุมของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง.....	52
5.2 เปรียบเทียบผลตอบสนองวงเปิดของกระบวนการกับแบบจำลองในกรณีเฟสต่ำสุด.....	55
5.3 เปรียบเทียบผลตอบสนองวงเปิดของกระบวนการกับแบบจำลองในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด.....	56
5.4 RGA ของกระบวนการในกรณีเฟสต่ำสุด.....	58
5.5 ความไวของกระบวนการในกรณีเฟสต่ำสุด.....	59
5.6 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได ในกรณีเฟสต่ำสุด.....	61

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.7 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันไดในกรณีเฟสต่ำสุด.....	62
5.8 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด.....	64
5.9 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด.....	65
5.10 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ของระบบควบคุมที่ออกแบบเมื่อค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด.....	67
5.11 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อค่าคงตัวเวลาสมมูล τ เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด.....	69
5.12 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อค่าคงตัวเวลาสมมูล τ เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด.....	70
5.13 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ของระบบควบคุมที่ออกแบบเมื่อค่าคงตัวเวลาสมมูล τ เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด.....	72
5.14 กระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง.....	73
5.15 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได ในกรณีเฟสต่ำสุด.....	75
5.16 สัญญาณควบคุมจากการทดลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันไดในกรณีเฟสต่ำสุด.....	76
5.17 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด.....	78
5.18 สัญญาณควบคุมจากการทดลองเมื่อค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด.....	79
5.19 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อค่าคงตัวเวลาสมมูล τ เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด.....	81
5.20 สัญญาณควบคุมจากการทดลองเมื่อค่าคงตัวเวลาสมมูล τ เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด.....	82
5.21 RGA ของกระบวนการในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด.....	85
5.22 ความไวของกระบวนการในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด.....	86

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.23 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได ในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด.....	88
5.24 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันไดในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด.....	89
5.25 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด.....	91
5.26 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด.....	92
5.27 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ของระบบควบคุมที่ออกแบบเมื่อค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด.....	94
5.28 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได ในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด.....	96
5.29 สัญญาณควบคุมจากการทดลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันไดในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด.....	97
5.30 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด.....	99
5.31 สัญญาณควบคุมจากการทดลองเมื่อค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด.....	100
ก.1 กระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง.....	112
ก.2 ถังน้ำที่ใช้ในการทดลอง.....	112
ก.3 อุปกรณ์ติดตั้งรูปตัว Y.....	113
ก.4 วาล์วที่ใช้ในการปรับสัดส่วนการไหล.....	113
ก.5 วาล์วปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำด้านออกสำหรับถึงไปที่ 1 และถึงไปที่ 2.....	114
ก.6 วาล์วปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำด้านออกสำหรับถึงไปที่ 3.....	115
ก.7 วาล์วปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำด้านออกสำหรับถึงไปที่ 4.....	115
ก.8 เซ็นเซอร์ที่ใช้ในการวัดระดับน้ำ.....	116
ก.9 วงจรปรับแต่งสัญญาณของตัวเซ็นเซอร์วัดระดับน้ำ.....	117
ก.10 อุปกรณ์ปรับแต่งสัญญาณของตัวเซ็นเซอร์วัดระดับน้ำ.....	119
ก.11 วงจรกรองความถี่.....	120
ก.12 อุปกรณ์กรองความถี่.....	121

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.13 วงจรขับกระแส.....	121
ก.14 อุปกรณ์ขับกระแสของปั้มน้ำ.....	122
ก.15 ปั้มน้ำที่ใช้ในการทดลอง.....	123
ก.16 การ์ดแปลงสัญญาณ A/D และ D/A.....	124
ก.17 วงจรแหล่งจ่ายไฟขนาด ± 15 V, 1 A.....	125
ก.18 อุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟขนาด ± 15 V, 1 A.....	126
ก.19 วงจรแหล่งแหล่งจ่ายไฟขนาด ± 30 V, 3 A.....	126
ก.20 อุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟขนาด ± 30 V, 3 A.....	127

คำย่อและสัญลักษณ์

- a_i หมายถึง สัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะ
- a_{oi} หมายถึง พื้นที่หน้าตัดของรูน้ำด้านนอกของถัง i
- A_i หมายถึง พื้นที่หน้าตัดของถังน้ำ
- $A_p(s)$ หมายถึง ตัวส่วนพหุนามของกระบวนการ
- $A_c(s)$ หมายถึง ตัวส่วนพหุนามของตัวควบคุมป้อนกลับ
- $A_{c1}(s)$ หมายถึง ตัวส่วนพหุนามของตัวควบคุมตัวที่ 1
- $A_{c2}(s)$ หมายถึง ตัวส่วนพหุนามของตัวควบคุมตัวที่ 2
- $A_d(s)$ หมายถึง ตัวส่วนพหุนามของตัวควบคุมป้อนไปหน้า
- $Am_c(s)$ หมายถึง เมทริกตัวส่วนพหุนามของตัวควบคุมป้อนกลับแบบ CDM
- $Am_p(s)$ หมายถึง ตัวร่วมส่วนพหุนามของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง
- $B_d(s)$ หมายถึง ตัวเศษพหุนามของตัวควบคุมป้อนไปหน้า
- $B_{d1}(s)$ หมายถึง ตัวเศษพหุนามของตัวควบคุมป้อนไปหน้าตัวที่ 1
- $B_{d2}(s)$ หมายถึง ตัวเศษพหุนามของตัวควบคุมป้อนไปหน้าตัวที่ 2
- $B_c(s)$ หมายถึง ตัวเศษพหุนามของตัวควบคุมป้อนกลับ
- $B_{c1}(s)$ หมายถึง ตัวเศษพหุนามของตัวควบคุมตัวที่ 1
- $B_{c2}(s)$ หมายถึง ตัวเศษพหุนามของตัวควบคุมตัวที่ 2
- $B_{pb1}(s)$ หมายถึง ตัวเศษพหุนามของตัวควบคุมป้อนกลับตัวที่ 1
- $B_{pb2}(s)$ หมายถึง ตัวเศษพหุนามของตัวควบคุมป้อนกลับตัวที่ 2
- $Bm_a(s)$ หมายถึง เมทริกตัวเศษพหุนามของตัวควบคุมป้อนไปหน้าแบบ CDM
- $Bm_c(s)$ หมายถึง เมทริกตัวส่วนพหุนามของตัวควบคุมป้อนกลับแบบ CDM
- Bm_{pb} หมายถึง เมทริกตัวเศษพหุนามของตัวควบคุมป้อนกลับ
- $Bm_p(s)$ หมายถึง เมทริกตัวเศษพหุนามของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง
- $B_p(s)$ หมายถึง ตัวเศษพหุนามของกระบวนการ
- $C(s)$ หมายถึง เมทริกฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม
- $D(s)$ หมายถึง สัญญาณรบกวนที่เข้าสู่ระบบควบคุม
- $D_c(s)$ หมายถึง สมการคุณลักษณะของระบบควบคุม
- $E(s)$ หมายถึง ค่าผิดพลาดของระบบควบคุม
- $E_1(s)$ หมายถึง ค่าผิดพลาดของระดับน้ำในถังที่ 1
- $E_2(s)$ หมายถึง ค่าผิดพลาดของระดับน้ำในถังที่ 2

คำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

g	หมายถึง แรงโน้มถ่วงของโลก
$G_c(s)$	หมายถึง เมทริกซ์ของตัวควบคุมแบบ I
$G_{cl}(s)$	หมายถึง ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบควบคุม
$G_{pb}(s)$	หมายถึง เมทริกซ์ของตัวควบคุมแบบ P
$G_p(s)$	หมายถึง เมทริกซ์ฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง
$G_{p-}(s)$	หมายถึง เมทริกซ์ฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง ในกรณีเฟสต่ำสุด
$G_{p+}(s)$	หมายถึง เมทริกซ์ฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง ในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด
$h_i(t)$	หมายถึง ระดับน้ำในถังที่เวลาใดๆ
h_i^0	หมายถึง ระดับน้ำในถังที่สภาวะคงตัว
k_i	หมายถึง ค่าอัตราขยายของปั้มน้ำ
K_i	หมายถึง เมทริกซ์อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ I
K_{i1}	หมายถึง อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ I ตัวที่ 1
K_{i2}	หมายถึง อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ I ตัวที่ 2
K_p	หมายถึง เมทริกซ์อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ P
K_{p1}	หมายถึง อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ P ตัวที่ 1
K_{p2}	หมายถึง อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ P ตัวที่ 2
$N_{cl}(s)$	หมายถึง ตัวเศษของระบบควบคุม
$P(s)$	หมายถึง สมการพหุนามคุณลักษณะ
$R(s)$	หมายถึง สัญญาณอินพุตอ้างอิงของระบบควบคุม
$R_1(s)$	หมายถึง สัญญาณอินพุตอ้างอิงสำหรับระดับน้ำในถังที่ 1
$R_2(s)$	หมายถึง สัญญาณอินพุตอ้างอิงสำหรับระดับน้ำในถังที่ 2
t_s	หมายถึง ค่าเวลาเข้าที่
T_i	หมายถึง ค่าคงตัวเวลา
$u_i(t)$	หมายถึง แรงดันที่จ่ายให้กับปั้มน้ำที่เวลาใดๆ
u_i^0	หมายถึง แรงดันที่จ่ายให้กับปั้มน้ำที่สภาวะคงตัว
u_z	หมายถึง ทิศทางของซีโรอินพุต
$U(s)$	หมายถึง สัญญาณควบคุมของตัวควบคุม
$U_1(s)$	หมายถึง สัญญาณควบคุมของตัวควบคุม I-P ตัวที่ 1
$U_2(s)$	หมายถึง สัญญาณควบคุมของตัวควบคุม I-P ตัวที่ 2

คำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

y_z	หมายถึง ทิศทางของซีโรเอาต์พุต
$Y(s)$	หมายถึง สัญญาณเอาต์พุตของระบบควบคุม
$Y_1(s)$	หมายถึง ระดับน้ำในถังที่ 1
$Y_2(s)$	หมายถึง ระดับน้ำในถังที่ 2
α_i	หมายถึง ค่าตำแหน่งวาล์วที่ต่ออยู่กับปั้มน้ำ
β_i	หมายถึง ค่าตำแหน่งวาล์วที่ต่อด้านออกจากถังน้ำ
$\Lambda(s)$	หมายถึง เมทริกค่า RGA
λ_{ij}	หมายถึง ค่า RGA
$\bar{\sigma}(G)$	หมายถึง ค่าซิงกูลาร์ที่มากที่สุด
$\underline{\sigma}(G)$	หมายถึง ค่าซิงกูลาร์ที่น้อยที่สุด
$\varepsilon(s)$	หมายถึง ค่า Condition Number
γ_i	หมายถึง ค่าดรรชนีเสถียรภาพ
γ_i^*	หมายถึง ค่าจำกัดเสถียรภาพ
τ	หมายถึง ค่าคงตัวเวลาสมมูล

บทที่ 1

บทนำ

กระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงเป็นกระบวนการในการศึกษาและการทดลองแบบใหม่ซึ่งถูกแนะนำโดย K.H.Johansson [1] ซึ่งกระบวนการนี้ได้ถูกออกแบบมาเพื่อทำการอธิบายถึงขีดจำกัดสมรรถนะของระบบควบคุมแบบหลายอินพุต-หลายเอาต์พุต (MIMO) อันเนื่องมาจากตำแหน่งซีโรของกระบวนการ ซึ่งตำแหน่งซีโรของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงนี้สามารถเลื่อนไปได้ทั้งด้านซ้ายและด้านขวาของระนาบ s โดยการปรับเปลี่ยนพหุนาม จึงทำให้สามารถเลือกโหมดการทำงานของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงให้เป็นแบบเฟสต่ำสุดหรือเฟสไม่ต่ำสุดก็ได้ ซึ่งตำแหน่งของซีโรนี้เป็นสิ่งที่มีความสำคัญมากในการออกแบบระบบควบคุม โดย Zames และ Francis [2, 3] นั้นได้แสดงให้เห็นว่ากระบวนการใดก็ตามที่มีซีโรอยู่ทางด้านขวาของระนาบ s จะทำให้มีผลกระทบต่อฟังก์ชันความไว (sensitivity function) ของระบบควบคุม กล่าวคือถ้าทำการออกแบบให้ฟังก์ชันความไวมีค่าผลตอบสนองต่อขนาดที่น้อยในช่วงความถี่หนึ่ง ผลกระทบจากการออกแบบนั้นจะทำให้ฟังก์ชันความไวมีค่าผลตอบสนองต่อขนาดที่มากในช่วงความถี่อื่นแทน ซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวนี้อาจจะทำให้สมรรถนะของระบบควบคุมโดยรวมแย่ลง นอกจากนั้น Zames และ Francis ยังแสดงให้เห็นอีกว่า ถ้ากระบวนการใดก็ตามไม่มีซีโรที่อยู่ทางด้านขวาของระนาบ s เมื่อนั้นทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุมแบบใดก็สามารถที่จะออกแบบให้ระบบควบคุมมีสมรรถนะตามที่ต้องการได้เสมอ ดังนั้นกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงนั้นจึงเป็นกระบวนการหนึ่งที่น่าสนใจในแง่มุมมองของการวิเคราะห์และการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบควบคุมแบบหลายอินพุต-หลายเอาต์พุต (MIMO) ทั้งในกรณีเฟสต่ำสุดและเฟสไม่ต่ำสุด

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงที่ผ่านมา นั้น ได้มีการนำเสนอที่หลากหลายทั้งในแง่ของการศึกษาและการออกแบบตัวควบคุม โดยในแง่ของการศึกษาที่ผ่านมา นั้น ได้มีการนำเอากระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงไปใช้เป็นเครื่องมือในการสอนถึงเทคนิคการควบคุมขั้นสูงของระบบควบคุมแบบหลายอินพุต-หลายเอาต์พุต [4, 5, 6] และในแง่ของการออกแบบตัวควบคุมก็ได้มีการนำเสนอมติการออกแบบตัวควบคุมหลากหลายรูปแบบแตกต่างกันไป ทั้งวิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบดั้งเดิม [7, 8], วิธีการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบอัตโนมัติด้วยวิธีรีเลย์ [1, 9], และวิธีการออกแบบตัวควบคุมขั้นสูง [10, 11] โดยวิธีในการออกแบบตัวควบคุมแบบดั้งเดิมนั้นเป็นวิธีที่ง่าย สามารถนำไปใช้ได้เป็นอย่างดีกับกับกระบวนการในกรณีเฟสต่ำสุด แต่สำหรับในกรณีเฟสไม่ต่ำสุดนั้นการออกแบบตัวควบคุมโดยใช้วิธีแบบดั้งเดิมเพื่อให้ได้สมรรถนะของระบบควบคุมตามที่ต้องการนั้นเป็นเรื่องที่ยากมาก ส่วนวิธีการปรับค่าพารามิเตอร์

ของตัวควบคุมแบบอัตโนมัติด้วยวิธีนี้แล้วแม้ว่าจะเป็นวิธีที่สะดวก, ง่ายและไม่ซับซ้อนยุ่งยาก แต่พารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้มาจากการปรับค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติก็ไม่สามารถนำไปใช้ได้ในพื้นที่ต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์อีกครั้งหนึ่งก่อนที่จะนำไปใช้งานได้ และวิธีการออกแบบตัวควบคุมขั้นสูงนั้นเป็นวิธีที่สามารถนำไปใช้กับกระบวนการ ในกรณีที่เป็นแบบเฟสต่ำสุดและเฟสไม่ต่ำสุดได้เป็นอย่างดีแต่วิธีการในการออกแบบตัวควบคุมก็ค่อนข้างที่จะซับซ้อนและยุ่งยาก

วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient Diagram Method : CDM) [12] เป็นวิธีการออกแบบตัวควบคุมวิธีหนึ่งซึ่งถูกแนะนำโดยศาสตราจารย์ Shunji Manabe ซึ่งวิธี CDM นั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม สำหรับกระบวนการหนึ่งอินพุต-หนึ่งเอาต์พุต (SISO) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยวิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM ได้แสดงให้เห็นผ่านงานวิจัยต่าง ๆ มาแล้วว่าผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ออกแบบนั้น สามารถได้ตามที่ต้องการทั้งในด้านผลตอบสนองที่สภาวะชั่วคราวและที่สภาวะคงตัว [13, 14], มีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการ [15, 16] นอกจากนั้นยังสามารถนำไปใช้ออกแบบกับกระบวนการที่มีคุณลักษณะเวลาไร้ผลตอบสนองได้อย่างมีประสิทธิภาพ [17, 18] แต่สำหรับกระบวนการแบบ MIMO นั้นยังไม่มีวิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM ที่แน่นอน ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวกับวิธีการออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการ MIMO ด้วยวิธี CDM นั้นก็ได้มีผู้คิดค้นและนำเสนอที่หลากหลายรูปแบบ [19, 20, 21] ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุม I-P สำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถังด้วยวิธี CDM [22] ทั้งในกรณีเฟสต่ำสุดและเฟสไม่ต่ำสุด โดยโครงสร้างของตัวควบคุมจะเป็นแบบแยกอิสระ (Decentralized) และใช้วิธี RGA (Relative Gain Array) [23] เป็นเครื่องมือในการเลือกจับคู่อินพุต-เอาต์พุตที่จะทำการควบคุม

1.1 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาถึงโครงสร้างและคุณลักษณะของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง
2. เพื่อศึกษาถึงโครงสร้างของระบบควบคุมที่ใช้กับกระบวนการ MIMO
3. เพื่อศึกษาถึงวิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM

1.2 ขอบเขตของการศึกษา

1. ออกแบบและสร้างกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง
2. ออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดระดับน้ำของถังน้ำ
3. ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ขับเคลื่อนของปั้มน้ำ
4. ออกแบบและสร้างอุปกรณ์กรองความถี่

5. ศึกษาโครงสร้างของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง และหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ

6. ออกแบบตัวควบคุมแบบ I-P ด้วยวิธี CDM เพื่อควบคุมกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง ในกรณีเฟสต่ำสุดและเฟสไม่ต่ำสุด

7. นำตัวควบคุม I-P ที่ได้ออกแบบมาจำลองการทำงานของระบบควบคุมด้วยโปรแกรม MATLAB จากนั้นนำตัวควบคุมไปทดลองกับกระบวนการจริง

1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์ขอบเขตของการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์นี้จะแบ่งออกเป็น 6 โดยมีรายละเอียดของแต่ละบทดังนี้

บทที่ 1 วัตถุประสงค์และหลักการใหม่ในการทำวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งรายละเอียดของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบท

บทที่ 2 อธิบายถึงคุณลักษณะของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง, การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง และคุณลักษณะของกระบวนการ โดยคุณลักษณะของกระบวนการจะอธิบายถึงซีโรของกระบวนการ MIMO, การวัดการอินเตอร์แอคชันและความไวของกระบวนการ

บทที่ 3 อธิบายถึงทฤษฎีพื้นฐานของวิธี CDM, ทฤษฎีของ Kessler's Multiloop Structure (MLS), ความคล้ายคลึงกันของวิธี CDM กับวิธี MLS และการเลือกพารามิเตอร์ของวิธี CDM

บทที่ 4 อธิบายถึงโครงสร้างระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบแยกอิสระ, โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงในกรณีเฟสต่ำสุดและเฟสไม่ต่ำสุด และการออกแบบตัวควบคุม I-P ด้วยวิธี CDM สำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงในกรณีเฟสต่ำสุดและเฟสไม่ต่ำสุด

บทที่ 5 นำตัวควบคุม I-P ที่ได้ออกแบบด้วยวิธี CDM ตามขั้นตอนในบทที่ 4 มาจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB จากนั้นจึงนำตัวควบคุมไปทดลองกับกระบวนการจริง

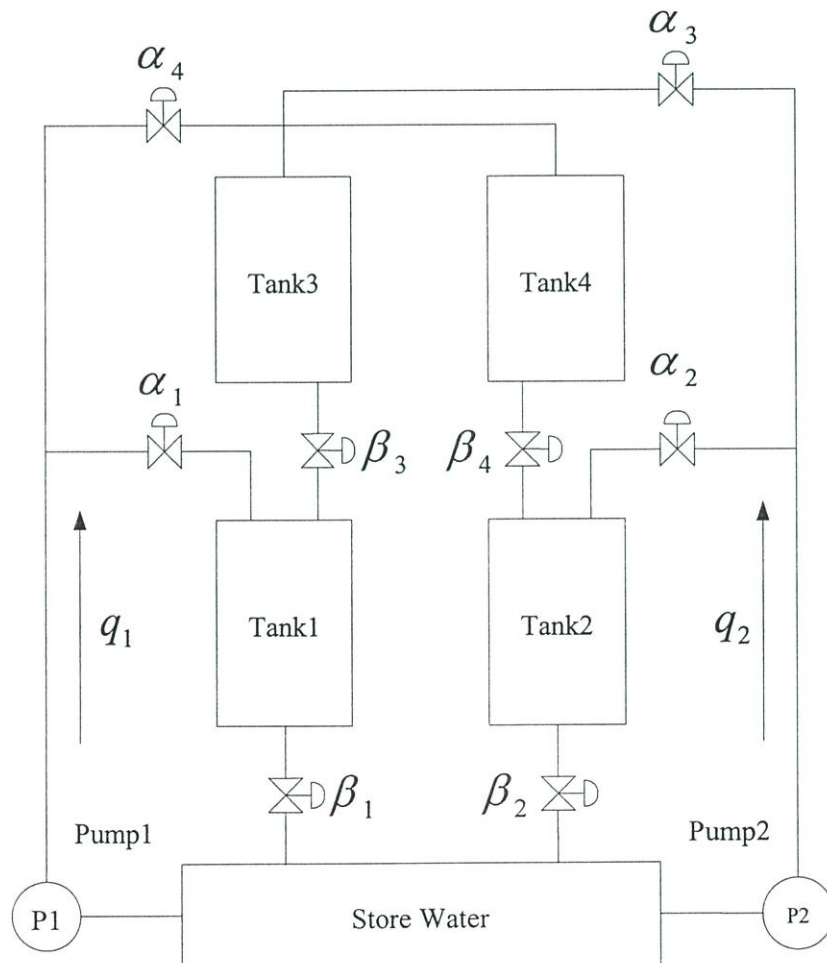
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะในการพัฒนาวิธีการออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง ด้วยวิธี CDM เพื่อให้การควบคุมมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

และในส่วนสุดท้ายของวิทยานิพนธ์นี้เป็นภาคผนวกแสดงถึง รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ได้ทำขึ้นมาใช้ในการทดลอง, โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง, ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์และประวัติผู้เขียน

บทที่ 2

กระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง

กระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง เป็นกระบวนการในการศึกษาและการทดลองแบบใหม่ซึ่งถูกแนะนำโดย K.H.Johansson [1] ซึ่งกระบวนการนี้ได้ถูกออกแบบมาเพื่อทำการอธิบายถึงขีดจำกัดสมรรถนะของระบบควบคุมแบบ MIMO อันเนื่องมาจากตำแหน่งของซีโรของกระบวนการ โดยกระบวนการนั้นจะประกอบด้วยถังน้ำ 4 ใบและปั้มน้ำ 2 ตัว ซึ่งอินพุตที่เข้าสู่กระบวนการคือค่าแรงดันที่จ่ายให้กับปั้มน้ำทั้ง 2 ตัวและเอาต์พุตของกระบวนการคือ ระดับน้ำของถังน้ำด้านล่างทั้ง 2 ใบ เมื่อทำการวิเคราะห์แบบจำลองเชิงเส้นของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง จะพบว่าตำแหน่งซีโรของกระบวนการนั้นสามารถปรับตำแหน่งให้อยู่ได้ทั้งด้านซ้ายและด้านขวาของระนาบ s โดยการปรับเปลี่ยนค่าตำแหน่งขั้ว ซึ่งก็คือกระบวนการนี้สามารถเลือกโหมดการทำงานให้เป็นแบบเฟสต่ำสุดหรือเฟสไม่ต่ำสุดก็ได้นั่นเอง



รูปที่ 2.1 แบบจำลองกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง

2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สมการทางคณิตศาสตร์สำหรับแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถังนี้ จะมีรายละเอียดที่คล้ายคลึงกันกับ [1] ซึ่งในแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษานี้จะเพิ่มวาล์ว β_i เข้าไปที่ด้านออกของแต่ละถัง ซึ่งจะทำให้สามารถปรับพื้นที่หน้าตัดของรูน้ำด้านออกให้มีขนาดเท่าเดิมหรือเล็กลงจากเดิมได้ รูปแบบที่แสดงแทนกระบวนการแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 โดย α_i คือวาล์วที่ใช้ในการปรับสัดส่วนการไหลของน้ำที่เข้าสู่แต่ละถัง ซึ่งในกรณีศึกษานี้จะกำหนดให้ α_3 และ α_4 มีค่าเท่ากับ $(1-\alpha_2)$ และ $(1-\alpha_1)$ จากสมการสมดุลมวลและกฎของเบอร์นูลลี (Bernoulli's) จะได้สมการความแตกต่างดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{dh_1(t)}{dt} &= -\frac{\beta_1 a_{o1}}{A_1} \sqrt{2gh_1(t)} + \frac{\beta_3 a_{o3}}{A_1} \sqrt{2gh_3(t)} + \frac{\alpha_1 k_1}{A_1} u_1(t) \\ \frac{dh_2(t)}{dt} &= -\frac{\beta_2 a_{o2}}{A_2} \sqrt{2gh_2(t)} + \frac{\beta_4 a_{o4}}{A_2} \sqrt{2gh_4(t)} + \frac{\alpha_2 k_2}{A_2} u_2(t) \\ \frac{dh_3(t)}{dt} &= -\frac{\beta_3 a_{o3}}{A_3} \sqrt{2gh_3(t)} + \frac{(1-\alpha_2)k_2}{A_2} u_2(t) \\ \frac{dh_4(t)}{dt} &= -\frac{\beta_4 a_{o4}}{A_4} \sqrt{2gh_4(t)} + \frac{(1-\alpha_1)k_1}{A_4} u_1(t) \end{aligned} \quad (2.1)$$

โดย

$h_i(t)$	คือ ระดับน้ำในถัง i	$i = 1 \sim 4$; cm
a_{oi}	คือ พื้นที่หน้าตัดของรูน้ำด้านออกของถัง i	$i = 1 \sim 4$; cm ²
A_i	คือ พื้นที่หน้าตัดของถัง i	$i = 1 \sim 4$; cm ²
β_i	คือ ค่าตำแหน่งวาล์วที่ต่อด้านออกจากถัง i	$i = 1 \sim 4$	
α_i	คือ ค่าตำแหน่งวาล์วที่ต่ออยู่กับบ่มี i	$i = 1, 2$	
k_i	คือ ค่าอัตราขยายของบ่มี i	$i = 1, 2$; cm ³ /V · s
g	คือ แรงโน้มถ่วงของโลก		981 cm/s ²
u_i	คือ แรงดันที่จ่ายให้กับบ่มี i	$i = 1, 2$; V

อัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้าถังที่ 1 จะเป็นสัดส่วนกับ $\alpha_1 k_1 u_1$ และอัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้าถังที่ 4 จะเป็นสัดส่วนกับ $(1-\alpha_1)k_1 u_1$ และในทำนองเดียวกันสำหรับถังที่ 2 และถังที่ 3 สัญญาณอินพุตหรือสัญญาณควบคุมที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการคือ u_1 และ u_2 (ค่าสัญญาณแรงดันที่จ่ายให้กับบ่มีน้ำ) และสัญญาณเอาต์พุตที่วัดจากกระบวนการคือ y_1 และ y_2 (ค่าสัญญาณแรงดัน

จากอุปกรณ์วัด) จะถูกปรับให้เป็นสัดส่วนเดียวกันกับความสูงของระดับน้ำที่วัดได้ คือ $y_1 = k_{m1}h_1$ และ $y_2 = k_{m2}h_2$ โดย $k_{m1} = k_{m2} = 1$

จากสมการ (2.1) สามารถทำให้เป็นแบบจำลองเชิงเส้นในรูปแบบของสมการสเตท-สเปซ ได้โดยกำหนดให้ $x_i = h_i - h_i^0$ และ $u_i = u_i - u_i^0$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \\ \dot{x}_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\beta_1}{T_1} & 0 & \frac{\beta_3 A_3}{A_1 T_3} & 0 \\ 0 & -\frac{\beta_2}{T_2} & 0 & \frac{\beta_4 A_4}{A_2 T_4} \\ 0 & 0 & -\frac{\beta_3}{T_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\beta_4}{T_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\alpha_1 k_1}{A_1} & 0 \\ 0 & \frac{\alpha_2 k_2}{A_2} \\ 0 & \frac{(1-\alpha_2)k_2}{A_3} \\ \frac{(1-\alpha_1)k_1}{A_4} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$\begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix}$$

โดยค่าคงตัวเวลาสำหรับแบบจำลองเชิงเส้นของกระบวนการนี้คือ

$$T_i = \frac{A_i}{\beta_i a_i} \sqrt{\frac{2h_i^0}{g}} \quad (2.3)$$

และเมทริกฟังก์ชันถ่ายโอนของแบบจำลองเชิงเส้นนี้คือ

$$G_p(s) = \begin{bmatrix} \frac{\alpha_1 k_1 c_1}{(T_1 s + 1)} & \frac{(1-\alpha_2)k_2 c_1}{(T_1 s + 1)(T_3 s + 1)} \\ \frac{(1-\alpha_1)k_1 c_2}{(T_2 s + 1)(T_4 s + 1)} & \frac{\alpha_2 k_2 c_2}{(T_2 s + 1)} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

โดย $c_1 = \frac{T_1}{A_1}$ และ $c_2 = \frac{T_2}{A_2}$ และสมการที่ (2.4) จะสมมูลกับเมทริกฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$G_p(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

โดย $G_{ij}(s)$ คือฟังก์ชันถ่ายโอนย่อยของกระบวนการสำหรับอินพุต j และเอาต์พุต i

จากสมการ (2.4) จะสังเกตเห็นได้ว่า ฟังก์ชันถ่ายโอนแต่ละคู่อินพุต-เอาต์พุตนั้นไม่มีซีโร ซึ่งการพิจารณาแบบนี้เป็นการพิจารณาเพียงส่วนย่อยของระบบเท่านั้น โดยสำหรับกระบวนการแบบ MIMO นั้นการพิจารณาโพลและซีโรของกระบวนการทั้งหมด จะแตกต่างจากระบบ SISO ซึ่งวิธีในการหาจะอธิบายในส่วนของคุณลักษณะของกระบวนการ

2.2 คุณลักษณะของกระบวนการ

ในการพิจารณาถึงคุณลักษณะหรือคุณสมบัติพื้นฐานของกระบวนการแบบ MIMO นั้น โดยส่วนใหญ่แล้วจะทำการพิจารณาถึงซีโรของกระบวนการ, การวัดการอินเตอร์แอคชันและความไวของกระบวนการ โดยคุณลักษณะของสิ่งเหล่านี้สามารถอธิบายคร่าวๆได้ดังนี้

- ซีโรของกระบวนการจะประกอบด้วยตำแหน่งและทิศทางโดยตำแหน่งและทิศทางของซีโรนั้น จะเป็นสิ่งที่อธิบายเกี่ยวกับขีดจำกัดทางด้านผลตอบสนองของระบบควบคุม และผลกระทบต่อเอาต์พุตของระบบควบคุมตามลำดับ
- การวัดการอินเตอร์แอคชันหรือการวัดผลกระทบ ที่เกิดขึ้นระหว่างวงรอบควบคุมหรือวงรอบเอาต์พุตจะเป็นสิ่งที่บอกถึงความยากหรือง่ายในการควบคุมกระบวนการ และการจับคู่อินพุต-เอาต์พุตของระบบควบคุมที่เหมาะสมในการควบคุม
- ความไวของกระบวนการ จะเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงความยากหรือง่ายในการควบคุมกระบวนการซึ่งขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการ

จากที่อธิบายมาคร่าวๆจะเห็นได้ว่า คุณสมบัติเหล่านี้จะบอกถึงข้อจำกัด และความยากหรือง่ายในการควบคุมกระบวนการ ดังนั้นในส่วนนี้จะอธิบายถึงวิธีการในการหาตำแหน่งของซีโร, ผลกระทบจากตำแหน่งซีโรต่อระบบควบคุม, ทิศทางของซีโร, ผลกระทบจากทิศทางของซีโรต่อระบบควบคุม, การวัดอินเตอร์แอคชันและความไวของกระบวนการ สำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง ตามลำดับ

2.2.1 ซีโรของกระบวนการ MIMO

การหาตำแหน่งและทิศทางซีโรสำหรับกระบวนการแบบหลายอินพุต-เอาต์พุต MIMO นั้น เป็นสิ่งที่สำคัญมาก เนื่องจากซีโรของกระบวนการนั้นสามารถเกิดขึ้นได้แม้ว่าฟังก์ชันถ่ายโอนย่อยของกระบวนการแต่ละคู่อินพุต-เอาต์พุตไม่มีซีโรอยู่เลยก็ตาม กระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงก็เป็นกระบวนการหนึ่งที่ฟังก์ชันถ่ายโอนย่อยในแต่ละคู่อินพุต-เอาต์พุตไม่มีซีโร แต่เมื่อวิเคราะห์ทั้งระบบแล้วนั้นจะพบว่ากระบวนการนี้มีซีโรซ่อนอยู่ ซึ่งซีโรของกระบวนการสามารถอยู่ได้ทั้งด้านซ้ายหรือด้านขวาของระนาบ s ก็ได้โดยการปรับค่าตำแหน่งพอล α_1 และ α_2 นอกจากนี้แล้วผลจากการ

ปรับค่าตำแหน่งวาล์ว α_1 และ α_2 ยังมีผลทำให้ทิศทางของซีโรเปลี่ยนไป ซึ่งทิศทางของซีโรนี้จะเป็นตัวที่กำหนดถึงเอาต์พุตที่จะได้รับผลกระทบจากซีโรตัวนั้น

ในตอนนี้จะอธิบายถึงวิธีการหาตำแหน่ง, ทิศทางของซีโรของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงซึ่งสามารถอธิบายได้ในรูปแบบของค่าตำแหน่งวาล์ว α_1 และ α_2 และอธิบายถึงผลกระทบจากตำแหน่งและทิศทางของซีโรต่อกระบวนการ

2.2.1.1 การหาตำแหน่งซีโร

ซีโรของเมทริกฟังก์ชันถ่ายโอนในสมการ (2.4) นั่นก็คือเทอมเศษ (Numerator) ของสมการพหุนามซึ่งหาได้จากการทำดีเทอร์มิแนนท์เมทริกฟังก์ชันถ่ายโอน (2.4) นั่นเอง

$$\det G_p(s) = \frac{\alpha_1 \alpha_2 k_1 k_2 c_1 c_2}{\prod_{i=1}^4 (T_i s + 1)} \left[(T_3 s + 1)(T_4 s + 1) - \frac{(1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2)}{\alpha_1 \alpha_2} \right] \quad (2.6)$$

ดังนั้นเมทริกฟังก์ชันถ่ายโอน $G_p(s)$ จะมีซีโรอยู่ 2 ตัว โดยซีโรตัวหนึ่งจะอยู่ทางด้านซ้ายของระนาบ s เสมอ ในขณะที่ซีโรอีกตัวหนึ่งนั้นสามารถอยู่ได้ทั้งด้านซ้ายหรือด้านขวาของระนาบ s กำหนดให้ $\eta \in (0, \infty)$

$$\eta = \frac{(1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2)}{\alpha_1 \alpha_2} \quad (2.7)$$

ถ้า η มีค่าน้อย ($\eta \rightarrow 0$) ซีโรทั้ง 2 ตัวจะเข้าใกล้ตำแหน่ง $-1/T_3$ และ $-1/T_4$ ในขณะที่ η มีค่ามาก ($\eta \rightarrow \infty$) ซีโรตัวหนึ่งจะเข้าใกล้ $-\infty$ และซีโรอีกตัวหนึ่งจะเข้าใกล้ $+\infty$ ถ้า $\eta = 1$ จะมีซีโรตัวหนึ่งอยู่ที่จุดศูนย์กลางของระนาบ s ซึ่งสอดคล้องกับ $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ จากสมการ (2.6) เห็นได้ว่าระบบจะเป็นแบบเฟสไม่ต่ำสุดสำหรับในกรณีที่ $0 < \alpha_1 + \alpha_2 < 1$ และเป็นแบบเฟสต่ำสุดสำหรับในกรณีที่ $1 < \alpha_1 + \alpha_2 < 2$

การที่ซีโรของกระบวนการนี้ตัวหนึ่งอยู่ได้ทั้งด้านซ้ายและด้านขวาของระนาบ s สามารถอธิบายโดยคุณสมบัติทางกายภาพของกระบวนการคือ กำหนดให้ q_i คืออัตราการไหลจากบ่มี i และสมมติให้อัตราการไหล $q_1 = q_2$ เมื่อนั้นผลรวมของปริมาณน้ำทั้งหมดที่ไหลเข้าสู่ถึงด้านบนคือ $[2 - (\alpha_1 + \alpha_2)]q_1$ และผลรวมของปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่ถึงด้านล่างคือ $(\alpha_1 + \alpha_2)q_1$ ดังนั้นปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่ถึงด้านล่างจะมากกว่าถึงด้านบนก็ต่อเมื่อ $(\alpha_1 + \alpha_2) > 1$ ซึ่งสอดคล้องกับการที่กระบวนการมีคุณลักษณะเป็นแบบเฟสต่ำสุด และถ้าปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่ถึงด้านบนมากกว่าถึงด้านล่างกระบวนการก็จะมีคุณลักษณะเป็นแบบเฟสไม่ต่ำสุด จากที่ได้ทำการอธิบายมาสามารถ

สังเกตเห็นได้ว่า ถ้าปริมาณน้ำไหลเข้าสู่ถึงด้านล่างมากกว่าถึงด้านบน y_1 และ y_2 ควรที่จะถูกควบคุมด้วย u_1 และ u_2 ในทางกลับกันถ้าปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่ถึงด้านบนมากกว่าถึงด้านล่าง y_1 และ y_2 ก็ควรที่จะถูกควบคุมด้วย u_2 และ u_1

2.2.1.2 ผลกระทบจากตำแหน่งซีโรต่อระบบควบคุม

ดังได้อธิบายในส่วนตัวแล้วว่า กระบวนการนี้สามารถเลือกรูปแบบการทำงานให้เป็นแบบเฟสต่ำสุดหรือเฟสไม่ต่ำสุดได้ โดยผลกระทบจากตำแหน่งซีโรต่อระบบควบคุมในกรณีเฟสต่ำสุดและเฟสไม่ต่ำสุดจะแตกต่างกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

กรณีเฟสต่ำสุด

ในกรณีนี้ซีโรของกระบวนการทั้ง 2 ตัว จะอยู่ด้านซ้ายของระนาบ s โดยเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า ตำแหน่งซีโรสำหรับกระบวนการ SISO นั้นจะมีผลกระทบต่อผลตอบสนองของระบบควบคุมในรูปของค่าพุงเกินและขีดจำกัดของอินพุต อันเนื่องมาจากค่าอัตราขยายที่สภาวะคงตัวน้อยซึ่งสอดคล้องกับการที่ซีโรอยู่ใกล้จุดศูนย์กลางของระนาบ s มาก แต่สำหรับกระบวนการ MIMO เช่นกระบวนการ 2 อินพุต – 2 เอาต์พุต ผลกระทบจากตำแหน่งซีโรต่อระบบควบคุมก็จะคล้ายกับกระบวนการ SISO แตกต่างกันตรงที่ตำแหน่งของซีโรนั้นสามารถมีผลกระทบกับเอาต์พุตใดเอาต์พุตหนึ่ง หรืออาจจะมีผลกระทบต่อทั้งสองเอาต์พุตก็ได้ขึ้นอยู่กับทิศทางของซีโร

กรณีเฟสไม่ต่ำสุด

ในกรณีนี้ซีโรของกระบวนการตัวหนึ่งจะมีตำแหน่งอยู่ด้านซ้ายของระนาบ s และซีโรอีกตัวหนึ่งจะมีตำแหน่งอยู่ทางด้านขวาของระนาบ s โดยผลกระทบจากการที่ซีโรมีตำแหน่งอยู่ทางด้านซ้ายของระนาบ s ก็จะเป็นเช่นเดียวกับที่ได้อธิบายในกรณีเฟสต่ำสุด แต่สำหรับซีโรที่มีตำแหน่งอยู่ด้านขวาของระนาบ s จะมีผลกระทบที่แตกต่างกันไป คือซีโรที่มีตำแหน่งอยู่ด้านขวาของระนาบ s จะเป็นตัวจำกัดแบนด์วิดท์ของระบบควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุมนั่นเอง [24] โดยแบนด์วิดท์ของระบบควบคุมในกรณีที่มีซีโรอยู่ทางด้านขวาของระนาบ s คือ

$$\omega_b < \frac{z}{2} \quad (2.8)$$

จากสมการ (2.8) สังเกตได้ว่า ถ้าซีโรอยู่ใกล้จุดศูนย์กลางของระนาบ s แบนด์วิดท์ของระบบควบคุมจะแคบ ในทางกลับกันถ้าซีโรอยู่น่าจากจุดศูนย์กลางของระนาบ s แบนด์วิดท์ของระบบควบคุมก็จะกว้าง

2.2.1.3 ทิศทางของซีโร่

ความแตกต่างที่สำคัญระหว่างกระบวนการ SISO กับกระบวนการ MIMO ไม่ใช่แค่เพียงแต่ตำแหน่งของซีโร่เท่านั้น แต่ยังมีอีกสิ่งหนึ่งที่สำคัญก็คือทิศทางของซีโร่ [24] โดยทิศทางของซีโร่จะมี 2 แบบด้วยกันคือ ทิศทางของซีโร่อินพุตและทิศทางของซีโร่เอาต์พุต ซึ่งทิศทางของซีโร่หาได้จากสมการดังนี้

$$G_p(z)u_z = 0, \quad y_z^H G_p(z) = 0 \quad (2.9)$$

โดย u_z คือทิศทางของซีโร่อินพุตและ y_z คือทิศทางของซีโร่เอาต์พุต ทิศทางของซีโร่นั้นจะอยู่ในรูปแบบของเวกเตอร์ มีขนาดความยาวคือ $\|u_z\|_2 = 1$ และ $\|y_z\|_2 = 1$ ทิศทางของซีโร่อินพุตสำหรับกระบวนการนี้คือ

$$\begin{bmatrix} \frac{\alpha_1 k_1 c_1}{(T_1 z + 1)} & \frac{(1 - \alpha_2) k_2 c_1}{(T_1 z + 1)(T_3 z + 1)} \\ \frac{(1 - \alpha_1) k_1 c_2}{(T_2 z + 1)(T_4 z + 1)} & \frac{\alpha_2 k_2 c_2}{(T_2 z + 1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

และทิศทางของซีโร่เอาต์พุตสำหรับกระบวนการนี้คือ

$$\begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \frac{\alpha_1 k_1 c_1}{(T_1 z + 1)} & \frac{(1 - \alpha_2) k_2 c_1}{(T_1 z + 1)(T_3 z + 1)} \\ \frac{(1 - \alpha_1) k_1 c_2}{(T_2 z + 1)(T_4 z + 1)} & \frac{\alpha_2 k_2 c_2}{(T_2 z + 1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T \quad (2.11)$$

ในทางปฏิบัติทิศทางของซีโร่เอาต์พุต y_z จะได้รับความสนใจมากกว่าทิศทางของซีโร่อินพุต u_z เนื่องจากทิศทางของซีโร่เอาต์พุต y_z จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับเอาต์พุตที่ได้รับผลกระทบจากตำแหน่งซีโร่และเอาต์พุตที่ควบคุมได้ยาก

โดยทั่วไปแล้วการหาทิศทางของซีโร่ทำได้อีกวิธีหนึ่งก็คือ การแยกส่วนประกอบค่าซิงกูลาร์ (Singular Value Decomposit : SVD) ของ $G_p(z)$ การใช้วิธีหา SVD ของ $G_p(z)$ นี้จะแยก $G_p(z)$ ออกมาได้เป็น $G_p(z) = U \sum V^H$ ซึ่งทิศทางของซีโร่อินพุตก็คือหลักสุดท้ายในเมทริก V^H และทิศทางของซีโร่เอาต์พุตคือหลักสุดท้ายของเมทริก U วิธีการหาทิศทางของซีโร่โดยวิธีนี้จะเป็นที่นิยมมากกว่าวิธีที่ได้อธิบายมาข้างต้น

2.2.1.4 ผลกระทบจากทิศทางของซีโรต่อระบบควบคุม

สำหรับการพิจารณาถึงผลกระทบจากทิศทางของซีโรที่มีต่อระบบควบคุมนั้น จะทำการพิจารณาที่ทิศทางของซีโรเอาต์พุตเท่านั้น อันเนื่องจากทิศทางของซีโรเอาต์พุตจะเป็นสิ่งที่บอกถึงเอาต์พุตที่ได้รับผลกระทบจากซีโรตัวนั้นๆ ซึ่งในการพิจารณานั้นจะทำการพิจารณาขนาดทิศทางของซีโรเอาต์พุตโดยไม่คิดเครื่องหมาย โดยผลกระทบจากทิศทางของซีโรที่มีต่อระบบควบคุมในกรณีเฟสต่ำสุดและเฟสไม่ต่ำสุดนั้นจะมีลักษณะที่เหมือนกัน คือทิศทางของซีโรเอาต์พุตเป็นแต่เพียงตัวที่ชี้ให้เห็นว่าซีโร ณ ตำแหน่งที่พิจารณานั้นอาจจะส่งผลกระทบต่อผลตอบสนองของระบบควบคุมในเรื่องของค่าพุงเกิน, ความรวดเร็วของผลตอบสนองหรือเรื่องขีดจำกัดของอินพุตที่จะมีผลต่อเอาต์พุตได้มากน้อยเพียงใด

2.2.2 การวัดอินเตอร์แอคชัน

การอินเตอร์แอคชัน (Interaction) หรือผลกระทบระหว่างวงรอบควบคุมในกระบวนการที่เกิดขึ้นกับเอาต์พุตหนึ่งอันเนื่องมาจากอินพุตอื่นเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นเสมอกับกระบวนการ MIMO ซึ่งการอินเตอร์แอคชันที่มากหรือน้อยนั้น เป็นสิ่งที่บอกถึงความยากง่ายในการควบคุมกระบวนการ โดยวิธีที่ใช้ในการวัดอินเตอร์แอคชันก็มีหลายวิธีแตกต่างกันไป แต่สำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ดังนั้นจะใช้วิธีการวัดอินเตอร์แอคชันที่เรียกว่า RGA (Relative Gain Array) [23] เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและมีประสิทธิภาพมากสำหรับกระบวนการแบบ 2 อินพุต-2 เอาต์พุต นอกจากนั้นวิธี RGA ยังบ่งบอกถึงการเลือกจับคู่อินพุต-เอาต์พุต ที่เหมาะสมสำหรับระบบควบคุมที่ใช้โครงสร้างตัวควบคุมแบบแยกอิสระ [24] และความสัมพันธ์ระหว่าง RGA กับซีโรที่อยู่ด้านขวาของระนาบ s [24]

2.2.2.1 RGA (Relative Gain Array)

RGA เป็นวิธีการวัดอินเตอร์แอคชันสำหรับกระบวนการ MIMO วิธีหนึ่งซึ่งถูกเสนอโดย Bristol [23] โดย RGA นี้ถูกใช้เป็นเครื่องมือหลักสำหรับกระบวนการทางอุตสาหกรรมในการตัดสินใจเลือกจับคู่อินพุต-เอาต์พุต สำหรับระบบควบคุมที่ใช้โครงสร้างตัวควบคุมแบบแยกอิสระ [25] ซึ่งวิธีที่ใช้ในการหา RGA สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$RGA = \Lambda(s) = G_p(s) \times G_p(s)^{-T} \quad (2.12)$$

โดย \times คือการคูณแบบตำแหน่งต่อตำแหน่ง, $-T$ คือ อินเวอร์สทรานโพส และผลรวมสำหรับทุกแถวหรือทุกหลักในเมทริก RGA จะมีค่าเท่ากับ 1 เสมอ สำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ดังซึ่งเป็นกระบวนการแบบ 2 อินพุต- 2 เอาต์พุตนั้น RGA ของกระบวนการคือ

$$\Lambda(s) = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & 1 - \lambda_{11} \\ 1 - \lambda_{11} & \lambda_{11} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

โดย

$$\lambda_{11}(s) = \frac{G_{11}(s)G_{22}(s)}{G_{11}(s)G_{22}(s) - G_{12}(s)G_{21}(s)} \quad (2.14)$$

ดังนั้นจากสมการ (2.4) และ (2.14) จะได้ $\lambda_{11}(s)$ สำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ดังคือ

$$\lambda_{11}(s) = \frac{(T_3s+1)(T_4s+1)}{(T_3s+1)(T_4s+1) - \frac{(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)}{\alpha_1\alpha_2}} \quad (2.15)$$

สมการ (2.15) นี้สามารถใช้เพื่อตรวจสอบว่ากระบวนการเป็นแบบเฟสต่ำสุดหรือเฟสไม่ต่ำสุดได้ แต่สำหรับการจับคู่อินพุต-เอาต์พุตที่เหมาะสมในการควบคุมนั้น จะพิจารณา RGA ที่สภาวะคงตัว คือ $s=0$ ดังนั้นจากสมการ (2.15) จะได้ λ_{11} คือ

$$\lambda_{11} = \frac{\alpha_1\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2 - 1} \quad (2.16)$$

จากสมการ (2.16) จะสังเกตเห็นได้ว่าค่า RGA นี้ขึ้นกับค่าตำแหน่งของวาล์ว α_1 และ α_2 เท่านั้น ไม่ขึ้นกับพารามิเตอร์อื่น ๆ ของกระบวนการ และถ้า $\lambda_{11} < 0$ ซึ่งสอดคล้องกับ $\alpha_1 + \alpha_2 < 1$ กระบวนการจะเป็นแบบเฟสไม่ต่ำสุด และในทางกลับกันถ้า $\lambda_{11} > 0$ ซึ่งสอดคล้องกับ $\alpha_1 + \alpha_2 > 1$ กระบวนการก็จะเป็นแบบเฟสต่ำสุด

2.2.2.2 การเลือกจับคู่อินพุต-เอาต์พุตด้วยวิธี RGA

การเลือกจับคู่อินพุต-เอาต์พุตที่จะทำการควบคุมสำหรับกระบวนการ MIMO นั้นเป็นปัญหาหนึ่งที่สำคัญ เนื่องจากถ้ามีจำนวนอินพุต-เอาต์พุตที่มากก็จะทำให้รูปแบบในการจับคู่มากขึ้นด้วยเช่น กระบวนการแบบ 2 อินพุต-2 เอาต์พุต จะมีวิธีในการจับคู่ 2! หรือ 2 แบบนั่นเอง ถ้ากระบวนการเป็นแบบ 3 อินพุต-3 เอาต์พุต วิธีการในการจับคู่จะเท่ากับ 3! หรือ 6 แบบนั่นเอง จะเห็นได้ว่ายิ่งจำนวนอินพุต-เอาต์พุตมากขึ้นเท่าไร วิธีการในการจับคู่ก็จะยิ่งมากขึ้นเท่านั้น ดังนั้นวิธีการในการเลือกจับคู่อินพุต-เอาต์พุตที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับกระบวนการ MIMO

RGA เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถใช้พิจารณาเลือกจับคู่อินพุต-เอาต์พุตที่เหมาะสมได้ [25] โดยในการใช้ RGA นั้น จะทำการพิจารณาค่า RGA ที่สภาวะคงตัวซึ่งมีกฎดังต่อไปนี้

กฎการจับคู่อินพุต-เอาต์พุตด้วยวิธี RGA : เพื่อความมีเสถียรภาพของระบบควบคุม ห้ามจับคู่อินพุต-เอาต์พุตที่มีค่า RGA เป็นลบ ควรจับคู่อินพุต-เอาต์พุตที่มีค่า RGA เป็นบวกและเข้าใกล้ 1 มากที่สุด

ถ้าทำการจับคู่อินพุต-เอาต์พุตที่มีค่า RGA เป็นลบ เมื่อนั้นผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบป้อนกลับจะมีคุณลักษณะต่อไปนี้อย่างน้อย 1 คุณลักษณะ

1. ผลตอบสนองของระบบควบคุมป้อนกลับทั้งหมดไม่มีเสถียรภาพ
2. วงรอบควบคุมที่มีค่า RGA เป็นลบนั้นไม่มี เสถียรภาพในตัวของมันเอง
3. ผลตอบสนองของระบบควบคุมป้อนกลับไม่มีเสถียรภาพ ถ้าวงรอบควบคุมที่มีค่า RGA เป็นลบนั้นเปิด

จากการวิเคราะห์สมการที่ (2.16) จะเห็นได้ว่าในกรณีที่กระบวนการเป็นแบบเฟสต่ำสุด ($1 < \alpha_1 + \alpha_2 < 2$) ค่า $\lambda_{11} = \lambda_{22}$ จะมีค่าเป็นบวกและ $\lambda_{12} = \lambda_{21}$ มีค่าเป็นลบ ดังนั้นในการจับคู่อินพุต-เอาต์พุตที่เหมาะสมก็คือ $y_1 - u_1$ และ $y_2 - u_2$ และถ้ากรณีเป็นแบบเฟสไม่ต่ำสุด ($0 < \alpha_1 + \alpha_2 < 1$) ค่า $\lambda_{11} = \lambda_{22}$ จะมีค่าเป็นลบและ $\lambda_{12} = \lambda_{21}$ มีค่าเป็นบวก ดังนั้นในการจับคู่อินพุต-เอาต์พุตที่เหมาะสมก็คือ $y_1 - u_2$ และ $y_2 - u_1$ ซึ่งการเลือกจับคู่อินพุต-เอาต์พุตนี้จะสอดคล้องกับการเลือกจับคู่อินพุต-เอาต์พุตโดยการพิจารณาปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่ถังบนและถังล่าง ดังได้อธิบายมาแล้วในส่วนตำแหน่งของซีโร

2.2.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง RGA และซีโรที่อยู่ด้านขวาของระนาบ s

ในการพิจารณาว่ากระบวนการมีซีโรที่อยู่ด้านขวาของระนาบ s หรือไม่นั้น นอกจากจะใช้วิธีทำการพิจารณาหาตำแหน่งซีโรของกระบวนการแล้ว ยังมีอีกวิธีหนึ่งคือการใช้ RGA โดยหลักการการใช้ RGA นี้จะใช้ได้กับเมทริกฟังก์ชันถ่ายโอนที่ฟังก์ชันถ่ายโอนย่อยนั้นมีเสถียรภาพและไม่มีโพลหรือซีโรที่ $s=0$ โดยถ้า $\lambda_{ij}(j\omega \rightarrow 0)$ และ $\lambda_{ij}(j\omega \rightarrow \infty)$ นั้นมีเครื่องหมายที่ต่างกัน เมื่อนั้นกระบวนการจะมีคุณลักษณะต่อไปนี้อย่างน้อย 1 คุณลักษณะ

1. ฟังก์ชันถ่ายโอนย่อย $G_{ij}(s)$ มีซีโรที่อยู่ด้านขวาของระนาบ s
2. กระบวนการทั้งหมด $G_p(s)$ มีซีโรที่อยู่ด้านขวาของระนาบ s
3. ฟังก์ชันถ่ายโอนย่อย $G_{ij}(s)$ ที่ถูกกำจัดออกไปมีซีโรที่อยู่ทางด้านขวาของระนาบ s

จากการวิเคราะห์ในสมการที่ (2.15) จะเห็นได้ว่าในกรณีที่กระบวนการเป็นแบบเฟสต่ำสุดนั้น ($1 < \alpha_1 + \alpha_2 < 2$) ค่า $\lambda_{11}(j\omega \rightarrow 0)$ และ $\lambda_{11}(j\omega \rightarrow \infty)$ จะมีเครื่องหมายที่เป็นบวกเหมือนกัน

เนื่องจากในเทอมส่วนของ λ_1 นั้นค่า $1 - ((1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2) / \alpha_1 \alpha_2)$ มีค่าที่เป็นบวกเสมอ แต่สำหรับกรณีเฟสไม่ต่ำสุด ($0 < \alpha_1 + \alpha_2 < 1$) ค่า $\lambda_1(j\omega \rightarrow \infty)$ จะมีค่าที่เป็นบวก และ $\lambda_1(j\omega \rightarrow 0)$ จะมีค่าที่เป็นลบ อันเนื่องมาจากในเทอมส่วนของ λ_1 นั้นค่า $1 - ((1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2) / \alpha_1 \alpha_2)$ มีค่าที่เป็นลบเสมอ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าวิธี RGA นั้นสามารถใช้พิจารณาว่ากระบวนการมีซีโรที่อยู่ทางด้านขวาของระนาบ s หรือไม่ แต่ไม่สามารถพิจารณาถึงตำแหน่งของซีโร เช่น วิธีการหาตำแหน่งของซีโร และกระบวนการที่มีซีโรที่อยู่ด้านขวาของระนาบ s ซึ่งสอดคล้องกับคุณลักษณะที่ 2 ดังได้อธิบายมาแล้ว

2.2.3 ความไวของกระบวนการ

ความไวของกระบวนการอันเนื่องมาจาก คุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์, คุณลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้น ฯลฯ นั้นเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นเสมอและไม่อาจหลีกเลี่ยงได้เนื่องจากในกระบวนการจริงจะมีปัจจัยต่างๆมากมาย ที่ซึ่งอาจจะมีผลทำให้พารามิเตอร์ของกระบวนการหรืออุปกรณ์เปลี่ยนแปลงไป และแบบจำลองเชิงเส้นที่ได้จากการประมาณความเป็นเชิงเส้น ณ จุดการทำงานหนึ่งๆก็ไม่สามารถแสดงแทนกระบวนการจริงได้ตลอดเวลา ดังนั้นในการวัดค่าความไวของกระบวนการจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น อันเนื่องมาจากค่าความไวของกระบวนการจะเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงว่ากระบวนการนั้น สามารถควบคุมได้ยากหรือง่ายซึ่งขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ และความไม่เป็นเชิงเส้นของกระบวนการ โดยในการหาค่าความไวของกระบวนการนั้นจะต้องทำการหาค่าอัตราขยายของกระบวนการที่สภาวะคงตัว จากนั้นจึงทำการหาค่า Condition Number ซึ่งเป็นตัวชี้ถึงความไวของกระบวนการ [24]

ในส่วนนี้จะอธิบายถึงวิธีในการหาค่าอัตราขยายและค่า Conditional Number ของกระบวนการ

2.2.3.1 อัตราขยายของกระบวนการ

ในการพิจารณาถึงคุณลักษณะของกระบวนการนั้น สิ่งหนึ่งที่เป็นสิ่งสำคัญและไม่อาจที่จะละเลยได้ก็คือค่าอัตราขยายของกระบวนการ เนื่องจากค่าอัตราขยายของกระบวนการนี้จะเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงค่าความไวของกระบวนการ สำหรับกระบวนการแบบ MIMO นั้นค่าอัตราขยายของกระบวนการสามารถทำการหาได้จากการพิจารณากระบวนการที่สภาวะคงตัว ($s=0$) เหมือนกับกระบวนการ SISO แต่สิ่งที่แตกต่างกันคือกระบวนการ MIMO นั้นจะมีเรื่องของทิศทางอินพุต และทิศทางเอาต์พุตเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย และค่าอัตราขยายของกระบวนการ MIMO ก็ไม่ได้มีเพียงค่าเดียวเหมือนกับกระบวนการ SISO แต่จะมีจำนวนเท่ากับจำนวนอินพุตหรือเอาต์พุตที่มากที่สุดของกระบวนการ การหาค่าอัตราขยายของกระบวนการ MIMO นั้นสามารถที่จะหาได้โดยการแยกค่าส่วนประกอบซิงกูลาร์ (Singular Value Decomposit : SVD) ของ $G_p(0)$ การใช้วิธีหา SVD ของ

$G_p(0)$ นี้เราจะแยก $G_p(0)$ ออกได้เป็น $G_p(0) = U \sum V^H$ ซึ่งทิศทางของอินพุตแรกจนถึงอินพุตสุดท้ายนั้นจะสอดคล้องกับหลักแรกจนถึงหลักสุดท้ายของเมทริก V^H , ส่วนทิศทางของเอาต์พุตแรกจนถึงเอาต์พุตสุดท้ายก็จะสอดคล้องกับหลักแรกจนถึงหลักสุดท้ายของเมทริก U และค่าอัตราขยายของกระบวนการที่มากที่สุดจนถึงค่าที่น้อยที่สุด จะอยู่บนแนวทแยงมุมของเมทริก \sum ไล่เรียงกันไป โดยค่าอัตราขยายของกระบวนการสามารถเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่าค่าซิงกูลาร์ของกระบวนการ [24] สำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ดังนี้ เมื่อทำการพิจารณาเมทริกฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการในสมการ (2.4) ที่สภาวะคงตัว จะได้เมทริกฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$G_p(0) = \begin{bmatrix} \alpha_1 k_1 c_1 & (1 - \alpha_2) k_2 c_1 \\ (1 - \alpha_1) k_1 c_2 & \alpha_2 k_2 c_2 \end{bmatrix}$$

หรือ

$$G_p(0) = \begin{bmatrix} \frac{\alpha_1 k_1 T_1}{A_1} & \frac{(1 - \alpha_2) k_2 T_1}{A_1} \\ \frac{(1 - \alpha_1) k_1 T_2}{A_2} & \frac{\alpha_2 k_2 T_2}{A_2} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

จากสมการ (2.17) จะสังเกตเห็นได้ว่าพารามิเตอร์ $\alpha_1, \alpha_2, k_1, k_2$ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้และ T_1, T_2 ซึ่งเป็นค่าคงตัวเวลาซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามจุดการทำงาน จะเป็นตัวที่กำหนดถึงค่าอัตราขยายของกระบวนการสำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนย่อยและค่าอัตราขยายของกระบวนการทั้งหมดสำหรับเมทริกฟังก์ชันถ่ายโอนโดยตรง ดังนั้นค่าความไวของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงจึงขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ $\alpha_1, \alpha_2, k_1, k_2$ และค่าคงตัวเวลา T_1, T_2 ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามจุดการทำงานของกระบวนการ

2.2.3.2 Condition Number

ดังได้อธิบายมาแล้วว่าค่า Conditon Number เป็นตัวชี้ความไวของกระบวนการว่ามีมากหรือน้อยเพียงใด [24] ซึ่งจะสอดคล้องกับความยากหรือง่ายในการควบคุมของกระบวนการ ในการหาค่า Conditon Number นั้นสามารถทำได้โดยหาอัตราส่วนระหว่างค่าอัตราขยายของกระบวนการที่มากที่สุดกับค่าอัตราขยายของกระบวนการที่น้อยที่สุดหรืออัตราส่วนระหว่างค่าซิงกูลาร์ที่มากที่สุดกับค่าซิงกูลาร์ที่น้อยที่สุดนั่นเองสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\varepsilon(0) = \frac{\bar{\sigma}(G_p(0))}{\underline{\sigma}(G_p(0))} \quad (2.18)$$

โดย $\varepsilon(0)$ คือค่า Conditon Number ซึ่งถ้าค่า Conditon Number มีค่าเข้าใกล้ 1 เมื่อนั้น กระบวนการสามารถที่จะทำการควบคุมได้ง่าย แต่ถ้าค่า Conditon Number มีค่าที่มากกว่า 10 ซึ่งอาจเกิดจากค่าซิงกูลาร์ที่มากที่สุด $\bar{\sigma}$ มีค่ามากหรือค่าซิงกูลาร์ที่น้อยที่สุด $\underline{\sigma}$ มีค่าน้อย เมื่อนั้น กระบวนการจะมีความไวของกระบวนการสูง และสามารถเรียกกระบวนการที่มีค่า Conditon Number ที่มากกว่า 10 ได้ว่าเป็นกระบวนการแบบ ill-Condition ซึ่งจะเป็กระบวนการที่สามารถทำการควบคุมได้ยากมาก

2.3 สรุป

จากที่ทำการอธิบายมาแสดงให้เห็นได้ว่ากระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงนั้นเป็นกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาถึงพฤติกรรม และการอธิบายถึงขีดจำกัดทางด้านสมรรถนะในการออกแบบตัวควบคุมของระบบควบคุมแบบหลายอินพุต-หลายเอาต์พุต (MIMO) อันเนื่องมาจาก ตำแหน่งซีโรที่อยู่ทางด้านขวาของระนาบ s ซึ่งจากแบบจำลองเชิงเส้นของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงพบว่า ตำแหน่งซีโรของกระบวนการนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าตำแหน่งของพอลี $\alpha_1, \alpha_2 \in (0,1)$ โดย ถ้า $\alpha_1 + \alpha_2 < 1$ กระบวนการจะเป็นแบบเฟสไม่ต่ำสุดและถ้า $\alpha_1 + \alpha_2 > 1$ กระบวนการจะเป็นแบบเฟสต่ำสุด ทำให้สามารถเลือกคุณลักษณะในการทำงานของกระบวนการได้

ในบทต่อไปจะกล่าวถึงวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient Diagram Method : CDM) และจะแสดงให้เห็นถึงความคล้ายคลึงกันระหว่างการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM และ วิธี Kellsler's Multiloop Structure (MLS)

บทที่ 3

วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์

ในการออกแบบระบบควบคุมนั้น ปัญหาหนึ่งที่สำคัญก็คือการเลือกตัวควบคุมที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลตอบสนองของระบบตามที่ต้องการ ซึ่งทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมนั้นมีอยู่ด้วยกัน 3 ทฤษฎีคือทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุมแบบดั้งเดิม (Classical Control Theory), ทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุมแบบใหม่ (Modern Control Theory) และทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุมแบบพีชคณิต (Algebraic Approach)

โดยทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุมแบบดั้งเดิม (Classical Control Theory) นั้นจะทำการออกแบบตัวควบคุมแบบวงเปิด (Open Loop) โดยจะใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนแทนระบบควบคุมที่ทำการออกแบบ ซึ่งในขั้นแรกนั้นจะสมมุติตัวควบคุมตามเงื่อนไขที่กำหนดขึ้นมาก่อนจากนั้นจึงหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบกับตัวควบคุม และนำฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดที่ได้มาตรวจสอบว่าได้คุณสมบัติตามที่ต้องการหรือไม่ หากคุณสมบัติที่ได้ไม่เป็นที่น่าพอใจต้องเปลี่ยนตัวควบคุมและทำการออกแบบใหม่จนกว่าจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ โดยวิธีที่ใช้ออกแบบตัวควบคุมสำหรับวิธีนี้ก็มักมีอาทิเช่น การออกแบบตัวควบคุมโดยตรวจสอบผลตอบสนองทางความถี่ (Frequency Response), การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางเดินราก (Root Locus Method) และเนื่องจากการออกแบบตัวควบคุมด้วยทฤษฎีนี้จะใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนในการออกแบบ ซึ่งในบางครั้งนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้ในการออกแบบอาจจะไม่เที่ยงตรง อันเนื่องมาจากมีโพลและซีโรอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกันทำให้ระบบนั้นไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable) และไม่สามารถสังเกตได้ (Unobservable)

ทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุมแบบใหม่ (Modern Control Theory) จะทำการออกแบบตัวควบคุมแบบวงปิด (Closed Loop) โดยขั้นแรกนั้นจะนำเงื่อนไขที่กำหนดต่าง ๆ มาคำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดก่อนและหาตัวควบคุมจากฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด จากนั้นทำการตรวจสอบระบบควบคุมว่าทำงานภายใต้เงื่อนไขตามที่ต้องการหรือไม่ ถ้าไม่เป็นไปตามที่ต้องการต้องกลับไปแก้ไขฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดและหาตัวควบคุมใหม่จนกว่าจะได้ตัวควบคุมที่พอใจ วิธีที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับวิธีนี้ก็มักมีอาทิเช่น การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการวางโพล (Pole Placement Method), การออกแบบตัวควบคุมแบบดีที่สุด (Optimal Control) และในการออกแบบตัวควบคุมด้วยทฤษฎีนี้จะใช้สมการในรูปแบบของสเตท-สเปซ (State-Space) แทนระบบควบคุมซึ่งการแทนระบบควบคุมให้อยู่ในรูปแบบสมการสเตท-สเปซ (State-Space) นั้นจะมีความเที่ยงตรงและเหมาะสมในการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์

ทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุมแบบพีชคณิต (Algebraic Approach) วิธีนี้จะกำหนดค่าพารามิเตอร์บางตัวในฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดและตัวควบคุมก่อน จากนั้นค่าพารามิเตอร์อื่นๆของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดและตัวควบคุมสามารถหาได้จากการออกแบบ ซึ่งการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient Diagram Method: CDM) นั้นถือได้ว่าเป็นทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุมแบบพีชคณิต

โดยพื้นฐานแล้ววิธี CDM นั้นเป็นวิธีที่ได้มาจากการปรับปรุงวิธีของ Kellsler's Multiloop Structure (MLS) ให้ดีขึ้น ซึ่งวิธี CDM ได้นำแนวคิดของวิธี MLS มาใช้ โดยทำการแปลงค่าคงตัวเวลาให้อยู่ในรูปผลรวมของค่าคงตัวเวลาทั้งหมด τ (Equivalent Time Constant) และดรรรชนีเสถียรภาพ γ_i (Stability Index) โดยพารามิเตอร์ τ และ γ_i นั้นเป็นพารามิเตอร์ของวิธี CDM ที่ใช้ในการออกแบบระบบควบคุม

ในบทนี้จะอธิบายถึงแนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธี CDM ซึ่งจะอธิบายเกี่ยวกับหลักการและการออกแบบด้วยวิธี CDM, วิธีของ MLS ซึ่งเป็นที่มาของวิธี CDM, ความคล้ายคลึงกันระหว่างวิธี MLS และวิธี CDM และทำที่สุดการเลือกพารามิเตอร์ค่าดรรรชนีเสถียรภาพ γ_i และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ในการออกแบบระบบควบคุมที่เหมาะสม

3.1 การออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธี CDM

CDM เป็นวิธีการออกแบบแบบพีชคณิต ซึ่งการออกแบบนั้นอยู่บนพื้นฐานขนาดที่สัมพันธ์กันของค่าสัมประสิทธิ์สมการพหุนามคุณลักษณะ (Characteristic Polynomial) วัตถุประสงค์ในการออกแบบก็คือต้องการสมการคุณลักษณะ (Characteristic Equation) ที่เหมาะสม ดังนั้นวิธีนี้จึงดูเหมือนกับเป็นวิธีการวางโพลโดยอ้อม (Indirect Pole Placement Method) โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบด้วยวิธี CDM จะประกอบไปด้วยค่าดรรรชนีเสถียรภาพ γ_i และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ซึ่งพารามิเตอร์ของวิธี CDM นี้จะใช้สำหรับทำการออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะที่ต้องการ

วิธี CDM จะใช้สมการพหุนามแสดงแทนระบบ โดยส่วนเศษ (Numerator) และส่วนส่วน (Denominator) ของฟังก์ชันถ่ายโอนจะพิจารณาแยกกัน ในการออกแบบตัวควบคุมนั้นทำได้โดยทำการกำหนดสมการคุณลักษณะหรือสมการพหุนามคุณลักษณะที่ต้องการของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด โดยพิจารณาข้อกำหนดด้านสมรรถนะ (Performance Specification) ของระบบควบคุม และค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี CDM นั้นจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะที่ได้จากตัวควบคุมและกระบวนการเพื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมต่อไป

ในส่วนนี้จะทำการอธิบายเกี่ยวกับคุณลักษณะพื้นฐานของวิธี CDM, โครงสร้างของระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี CDM, กระบวนการในการออกแบบตัวควบคุมซึ่งประกอบไปด้วยการวางโพลและการวางซีโร่, การออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะด้วยวิธี CDM, เงื่อนไขเสถียรภาพของวิธี CDM และแผนผังค่าสัมประสิทธิ์

3.1.1 คุณลักษณะพื้นฐานของวิธี CDM

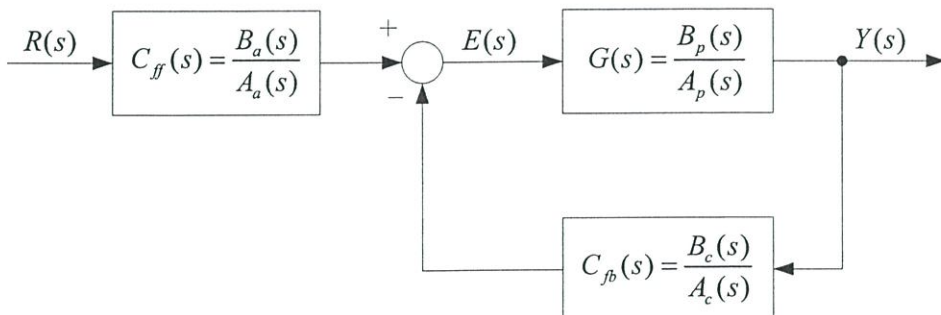
คุณลักษณะพื้นฐานของวิธี CDM มีอยู่ด้วยกัน 5 ข้อ คือ

1. ใช้สมการพหุนามแสดงแทนระบบ
2. สมการพหุนามคุณลักษณะและตัวควบคุมสามารถออกแบบได้ทันที
3. แผนผังค่าสัมประสิทธิ์สามารถใช้ตรวจสอบระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ
4. ทฤษฎีเงื่อนไขที่เพียงพอสำหรับเสถียรภาพ โดย Lipatov ถูกรวมเข้าไปไว้เป็นทฤษฎีพื้นฐานของวิธี CDM
5. รูปแบบมาตรฐานสำหรับพารามิเตอร์ของ MLS ถูกปรับปรุงและใช้เป็นรูปแบบมาตรฐานสำหรับพารามิเตอร์ของวิธี CDM

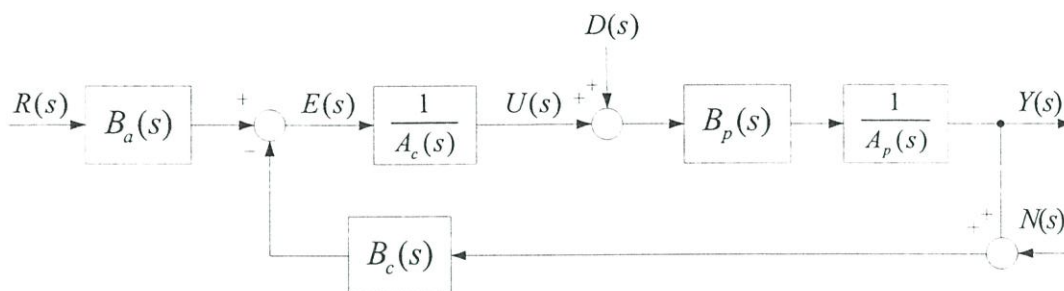
การออกแบบระบบควบคุมหรือตัวควบคุมด้วยวิธี CDM นั้นจะอยู่บนพื้นฐานของการเลือกดรชนีเสถียรภาพ γ_i และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ โดยค่า τ จะเป็นตัวกำหนดความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุม ส่วนค่า γ_i นั้นจะเป็นตัวกำหนดเสถียรภาพและรูปทรงผลตอบสนองของระบบควบคุม การเปลี่ยนแปลงของค่าดรชนีเสถียรภาพ γ_i จะคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบควบคุมซึ่งเป็นตัวกำหนดความคงทนของระบบควบคุม

3.1.2 โครงสร้างของระบบควบคุม

โครงสร้างทั่วไปของระบบควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 จากรูปจะเห็นได้ว่าระบบควบคุมประกอบด้วยกระบวนการ $G(s) = B_p(s)/A_p(s)$ ตัวควบคุมป้อนกลับ $C_b(s) = B_c(s)/A_c(s)$ ในลูปป้อนกลับ และตัวควบคุมป้อนไปหน้า $C_f(s) = B_a(s)/A_a(s)$



รูปที่ 3.1 โครงสร้างทั่วไปของระบบควบคุม



รูปที่ 3.2 โครงสร้างมาตรฐานของระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี CDM

เพื่อความสะดวกในการนำไปประยุกต์ใช้งาน โครงสร้างระบบควบคุมสามารถทำให้อยู่ในรูปแบบอย่างง่ายได้โดยให้ $A_a(s) = A_c(s)$ แสดงได้ดังรูปที่ 3.2 โครงสร้างของระบบควบคุมแบบนี้เรียกว่าโครงสร้างระบบควบคุมแบบ 2 ชั้นอิสระ (Two Degree of Freedom : 2DOF) และเป็นโครงสร้างมาตรฐานของระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี CDM สำหรับกระบวนการหนึ่งอินพุต-หนึ่งเอาต์พุต (Single Input- Single Output : SISO) โดย $B_p(s)$ และ $A_p(s)$ คือสมการพหุนามของกระบวนการ, $B_c(s)$, $A_c(s)$ และ $B_a(s)$ คือสมการพหุนามของตัวควบคุม โดยฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของสมการพหุนามได้ดังนี้

$$A_p(s) = p_k s^k + p_{k-1} s^{k-1} + \dots + p_1 + p_0 \quad (3.1)$$

$$B_p(s) = q_m s^m + q_{m-1} s^{m-1} + \dots + q_1 + q_0 \quad (3.2)$$

และสมการพหุนามของตัวควบคุมคือ

$$A_c(s) = l_\psi s^\psi + l_{\psi-1} s^{\psi-1} + \dots + l_1 + l_0 \quad (3.3)$$

$$B_c(s) = j_\psi s^\psi + j_{\psi-1} s^{\psi-1} + \dots + j_1 + j_0 \quad (3.4)$$

$$B_a(s) = p_\psi s^\psi + p_{\psi-1} s^{\psi-1} + \dots + p_1 + p_0 \quad (3.5)$$

โดย $\psi < k$ และ $m < k$

และเอาต์พุตของระบบควบคุมดังรูปที่ 3.2 สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Y(s) = \frac{B_p(s) [B_a(s)R(s) - B_c(s)N(s) + A_c(s)D(s)]}{A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s)} \quad (3.6)$$

โดย $R(s)$ คือสัญญาณอินพุตอ้างอิง, $Y(s)$ คือสัญญาณเอาต์พุตของระบบควบคุม, $D(s)$ คือสัญญาณรบกวนที่เข้าสู่ระบบควบคุม และ $N(s)$ คือสัญญาณรบกวนที่เข้าสู่อุปกรณ์วัด เมื่อไม่คิดถึงผลกระทบจากสัญญาณ $D(s)$ และ $N(s)$ ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมทั้งหมดจะกลายเป็น

$$G_{cl}(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{B_a(s)B_p(s)}{A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s)} \quad (3.7)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนในสมการ(3.7) แสดงให้เห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบป้อนกลับ $B_c(s), A_c(s)$ นั้นใช้เพื่อวางโพลและตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้า $B_a(s)$ ใช้เพื่อวางซีโร ในการออกแบบและจำลองการทำงานของระบบควบคุมต้องคำนึงถึงขนาดของสัญญาณควบคุมด้วย ซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอนของสัญญาณควบคุมสำหรับการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธี CDM คือ

$$\begin{aligned} \frac{U(s)}{R(s)} &= \frac{Y(s)}{R(s)} \cdot \frac{U(s)}{Y(s)} = \frac{G_{cl}(s)}{G(s)} \\ &= \frac{B_a(s)A_p(s)}{A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s)} \end{aligned} \quad (3.8)$$

3.1.3 กระบวนการในการออกแบบตัวควบคุม

สำหรับโครงสร้างระบบควบคุมแบบ 2 ชั้นอิสระ (2-DOF) ตัวควบคุมแบบป้อนกลับจะถูกใช้เพื่อวางโพลของระบบควบคุมหรือกำหนดโหมดในการทำงานของระบบควบคุม ซึ่งเป็นสิ่งที่ใช้พิจารณาถึงผลตอบสนองชั่วคราวและรูปทรงผลตอบสนองของระบบควบคุม สำหรับตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้าจะถูกใช้เพื่อวางซีโรของระบบควบคุม ซึ่งเป็นตัวกำหนดถึงผลตอบสนองที่สภาวะชั่วคราวและที่สภาวะคงตัวของระบบควบคุม ดังนั้นปัญหาในการออกแบบตัวควบคุมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ข้อหลักๆคือ

1. เพื่อให้ผลตอบสนองที่สภาวะชั่วคราว และรูปทรงผลตอบสนองของระบบควบคุมเป็นไปตามที่ต้องการ ซึ่งก็คือการวางโพลของระบบควบคุมที่เหมาะสมโดยใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับ
2. เพื่อให้ผลตอบสนองที่สภาวะชั่วคราว และผลตอบสนองที่สภาวะคงตัวหรือคุณสมบัติในการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงเป็นไปตามที่ต้องการ ซึ่งก็คือการวางซีโรของระบบควบคุมที่เหมาะสม โดยใช้ตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้า

3.1.3.1 การวางโพล

การวางโพลเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดของการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธี CDM เพราะว่าโพลของระบบควบคุมนั้นมีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวเนื่องกันกับสมการคุณลักษณะ ดังนั้นถ้าพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมทั้งหมด $G_{cl}(s) = N_{cl}(s) / D_{cl}(s)$ จะเห็นได้ว่าสมการพหุนามในเทอมส่วน $D_{cl}(s)$ นั้นก็คือสมการคุณลักษณะของระบบควบคุมนั่นเอง จากโครงสร้างของระบบควบคุมในรูปที่ 3.2 สมการคุณลักษณะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$D_{cl}(s) = A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s) \quad (3.9)$$

โดย $D_{cl}(s)$ จะเป็นผลรวมของค่าสัมประสิทธิ์ที่คงที่ของกระบวนการ ($B_p(s), A_p(s)$) กับค่าสัมประสิทธิ์ที่ยังไม่ทราบค่าของตัวควบคุมแบบป้อนกลับ ($B_c(s), A_c(s)$) เพราะว่าสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะ $D_{cl}(s)$ นั้นถูกเลือกโดยวิธี CDM ดังนั้นปัญหาในการหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบป้อนกลับสามารถทำได้โดยการแก้สมการเชิงเส้น ซึ่งจะทำได้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมป้อนกลับ ($B_c(s), A_c(s)$) ในทันทีทันใด

3.1.3.2 การวางซีโร

ในการวางซีโรเพื่อใช้ในการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงนั้น สามารถแบ่งชนิดของการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงได้เป็น 2 ชนิดคือ การติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบอุดมคติ และการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบไม่อุดมคติ โดยการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบอุดมคตินั้นสามารถติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงใดๆได้ในทันทีทันใด ซึ่งการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบนี้สามารถใช้ได้ในทางทฤษฎีเท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติแล้วนั้นไม่สามารถทำได้ เพราะถูกจำกัดด้วยขนาดของสัญญาณควบคุม ในขณะที่การติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบไม่อุดมคตินั้นจะไม่สามารถติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงได้ในทันทีทันใด แต่จะค่อยๆลู่เข้าสู่สัญญาณอินพุตอ้างอิง ซึ่งการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงชนิดนี้สามารถใช้ได้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นในที่นี้จะอธิบายแต่เพียงการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบไม่อุดมคติเท่านั้น

โดยทั่วไปแล้วนั้น การติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบไม่อุดมคติสำหรับระบบควบคุมนั้นสามารถแบ่งชนิดของสัญญาณอินพุตอ้างอิงได้เป็น 3 แบบด้วยกันคือ สัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบขั้นบันได (Step), สัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบความเร็ว (Velocity) และสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบอัตราเร่ง (Accelerator) ซึ่งการวางซีโรเพื่อใช้ในการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงทั้ง 3 ชนิดนี้ทำได้โดยกฎของพีชคณิตง่ายๆ และกฎที่ใช้ในการวางซีโรจะอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีค่าสุดท้าย (Final Value Theorem) ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

การวางซีโรเพื่อใช้ในการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิง เพื่อความเหมาะสมและความมีเสถียรภาพฟังก์ชันถ่ายโอน $G_{cl}(s)$ ต้องอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{aligned} G_{cl}(s) &= \frac{N_{cl}(s)}{D_{cl}(s)} \\ &= \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \end{aligned} \quad (3.10)$$

โดย $n \geq m$ และ $a, b > 0$

เอาต์พุตของระบบควบคุมจะติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบแอสซิมโทติกเมื่อ

1. สัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบขั้นบันได $r(t) = a$, $R(s) = \frac{a}{s}$ ถ้า $a_0 = b_0$

โดย $m, n \geq 0$

2. สัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบความเร็ว $r(t) = at$, $R(s) = \frac{a}{s^2}$ ถ้า $a_0 = b_0$

และ $a_1 = b_1$ โดย $m, n \geq 1$

3. สัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบอัตราเร่ง $r(t) = at^2$, $R(s) = \frac{a}{s^3}$ ถ้า $a_0 = b_0$,

$a_1 = b_1$ และ $a_2 = b_2$ โดย $m, n \geq 2$

โดยไม่คำนึงถึงค่าสัมประสิทธิ์อื่นๆ

3.1.4 การออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะด้วยวิธี CDM

ในตอนนี้จะอธิบายถึงการออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะด้วยวิธี CDM โดยสมการพหุนามคุณลักษณะของระบบควบคุมป้อนกลับนั้น จะเป็นสมการเดียวกันกับสมการคุณลักษณะในสมการ (3.9) ซึ่งสามารถเขียนในรูปแบบของสมการพหุนามคุณลักษณะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} P(s) &= A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s) \\ &= a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 \\ &= \sum_{i=0}^n a_i s^i \end{aligned} \quad (3.11)$$

โดย $a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0$ คือสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะ

ค่าตรรกษณีสถิติภาพ γ_i , ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ที่ใช้ในการออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะ และค่าจำกัดสถิติภาพ γ_i^* ที่ใช้ตรวจสอบความคงทนของระบบควบคุมสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\gamma_i = \frac{a_i^2}{a_{i-1}a_{i+1}} \quad (3.12)$$

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} \quad (3.13)$$

$$\gamma_i^* = \frac{1}{\gamma_{i+1}} + \frac{1}{\gamma_{i-1}} \quad ; \quad \gamma_0, \gamma_n = \infty \quad (3.14)$$

โดย $i = 1, \dots, n-1$ จากสมการ (3.12) และสมการ (3.13) สัมประสิทธิ์ a_i สามารถเขียนได้ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{aligned} a_i &= \frac{a_0 \tau}{\gamma_{i-1} \cdots \gamma_2 \gamma_1^{i-1}} \\ &= a_0 \tau^i \prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{(\gamma_{i-j})^j} \end{aligned} \quad (3.15)$$

เมื่อแทนสัมประสิทธิ์ a_i แต่ละอันดับในสมการ (3.11) จะได้สมการพหุนามคุณลักษณะในเทอมของ a_0, τ และ γ_i ดังนี้

$$P(s) = a_0 \left[\sum_{i=2}^n \left(\prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{(\gamma_{i-j})^j} \right) (\tau s)^i \right] + \tau s + 1 \quad (3.16)$$

3.1.5 เงื่อนไขเสถียรภาพของวิธี CDM

ในการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธี CDM นั้นการพิจารณาถึงเรื่องของเสถียรภาพจะใช้เงื่อนไขความพอเพียงสำหรับเสถียรภาพของ Lipatov โดย Lipatov ได้กล่าวไว้ว่าวิธีที่ใช้ในการประเมินเสถียรภาพของระบบควบคุมเช่น ทฤษฎีของ Hurwitz นั้นค่อนข้างยุ่งยากและไม่เพียงพอต่อการประยุกต์ใช้งานในการออกแบบระบบควบคุมที่มีอันดับสูงๆ โดยเงื่อนไขเสถียรภาพที่เหมาะสมกับการใช้งานนั้นควรตรวจสอบได้ง่ายและใช้วิธีการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน

Lipatov ได้เสนอว่าสำหรับระบบอันดับ n ที่มีจำนวนพารามิเตอร์ n ตัว ขอบเขตเสถียรภาพที่แท้จริงนั้นสามารถอนุมานให้อยู่ในรูปเชิงซ้อนที่มีมิติ n มิติ (n -Dimensional Space) โดยขอบเขตเสถียรภาพที่พอเพียง (Sufficient Stability Region) จะเป็นส่วนย่อยของขอบเขต

เสถียรภาพ แม้ว่าเงื่อนไขเสถียรภาพที่พอเพียงจะไม่น่าพอใจก็ตาม ด้วยเหตุนี้จึงกล่าวได้ว่าเงื่อนไขเสถียรภาพของ Lipatov เป็นเงื่อนไขที่ขึ้นอยู่กับความพอเพียง

จากทฤษฎีตรวจสอบเสถียรภาพของ Routh Hurwitz (Routh –Hurwitz Stability Criterion) ระบบอันดับ 3 จะมีเสถียรภาพต่อเมื่อ

$$a_2 a_1 > a_3 a_0 \quad (3.17)$$

ซึ่งสามารถเขียนเขียนในเทอมของดรรชนีเสถียรภาพได้ คือ

$$\gamma_2 \gamma_1 > 1 \quad (3.18)$$

สำหรับระบบอันดับ 4 จะมีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อเงื่อนไขต่อไปนี้เป็นจริง

$$a_2 > (a_1 / a_3) a_4 + (a_3 / a_1) a_0 \quad (3.19)$$

$$\gamma_2 \gamma_3 > 1 \quad (3.20)$$

จากสมการ (3.14), (3.18) และ (3.20) สามารถสรุปได้ว่า ระบบอันดับ 3 และระบบอันดับ 4 จะมีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อ

$$\gamma_i > \gamma_i^* \quad \text{สำหรับทุกค่าของ } i = 2 \sim n - 2 \quad (3.21)$$

สำหรับระบบอันดับ 5 และอันดับสูงๆขึ้นไป Lipatov ได้เสนอเงื่อนไขที่พอเพียงสำหรับความมีเสถียรภาพของระบบควบคุมไว้หลายรูปแบบ โดยทฤษฎีที่เหมาะสมกับการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธี CDM กล่าวไว้ว่า

“ระบบควบคุมจะมีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อสมการพหุนามย่อยอันดับ 4 ทุกชุดของระบบมีเสถียรภาพด้วยตัวคูณขนาด 1.12 และระบบควบคุมจะไม่มีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อสมการพหุนามย่อยอันดับ 3 บางชุดของระบบควบคุมไม่มีเสถียรภาพ”

ดังนั้นเงื่อนไขเสถียรภาพที่พอเพียงสำหรับการตรวจสอบความมีเสถียรภาพคือ

$$a_i > 1.12 \cdot \left[\frac{a_{i-1}}{a_{i+1}} a_{i+2} + \frac{a_{i+1}}{a_{i-1}} a_{i-2} \right] \quad (3.22)$$

$$\gamma_i > 1.12 \cdot \gamma_i^* \quad \text{สำหรับทุกค่าของ } i = 2 \sim n-2 \quad (3.23)$$

และเงื่อนไขที่พอเพียงสำหรับการตรวจสอบความไม่มีเสถียรภาพคือ

$$a_{i+1}a_i \leq a_{i+2}a_{i-1} \quad (3.24)$$

$$\gamma_{i+1}\gamma_i \leq 1 \quad \text{สำหรับบางค่าของ } i = 1 \sim n-2 \quad (3.25)$$

3.1.6 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์

แผนผังค่าสัมประสิทธิ์เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์มาก สำหรับการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธี CDM ซึ่งแผนผังค่าสัมประสิทธิ์นั้นจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับความมีเสถียรภาพ, ผลตอบสนองต่อเวลาและความคงทนของระบบควบคุมภายในแผนผังเดียว โดยแกนตั้งของแผนผังจะแสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์ที่อยู่ในรูปของลอการิทึมประกอบไปด้วย สมการพหุนามคุณลักษณะ a_i , ค่าตรรกยะเสถียรภาพ γ_i , ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ และค่าจำกัดเสถียรภาพ γ_i^* ในขณะที่แกนนอนของแผนผังจะแสดงถึงอันดับ i ที่สอดคล้องกับอันดับค่าสัมประสิทธิ์แต่ละตัว การสร้างแผนผังค่าสัมประสิทธิ์สามารถแสดงได้ดังนี้

ถ้ากำหนดให้สมการพหุนามคุณลักษณะ $P(s)$ ของระบบควบคุมคือ

$$P(s) = 0.25s^5 + s^4 + 2s^3 + 2s^2 + 2 + 0.2 \quad (3.26)$$

จากสมการ (3.26) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ a_i และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี CDM ดังนี้

$$a_i = [0.25 \quad 1 \quad 2 \quad 2 \quad 1 \quad 0.2] \quad (3.26 \text{ ก})$$

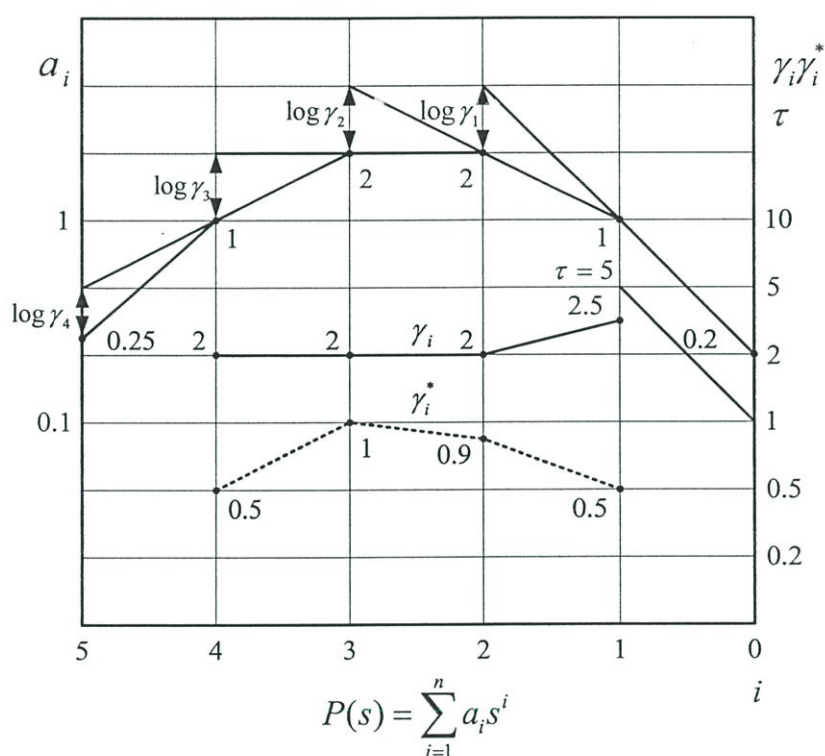
$$\gamma_i = [2 \quad 2 \quad 2 \quad 2.5] \quad (3.26 \text{ ข})$$

$$\gamma_i^* = [0.5 \quad 1 \quad 0.9 \quad 0.5] \quad (3.26 \text{ ค})$$

$$\tau = 5 \quad (3.26 \text{ ง})$$

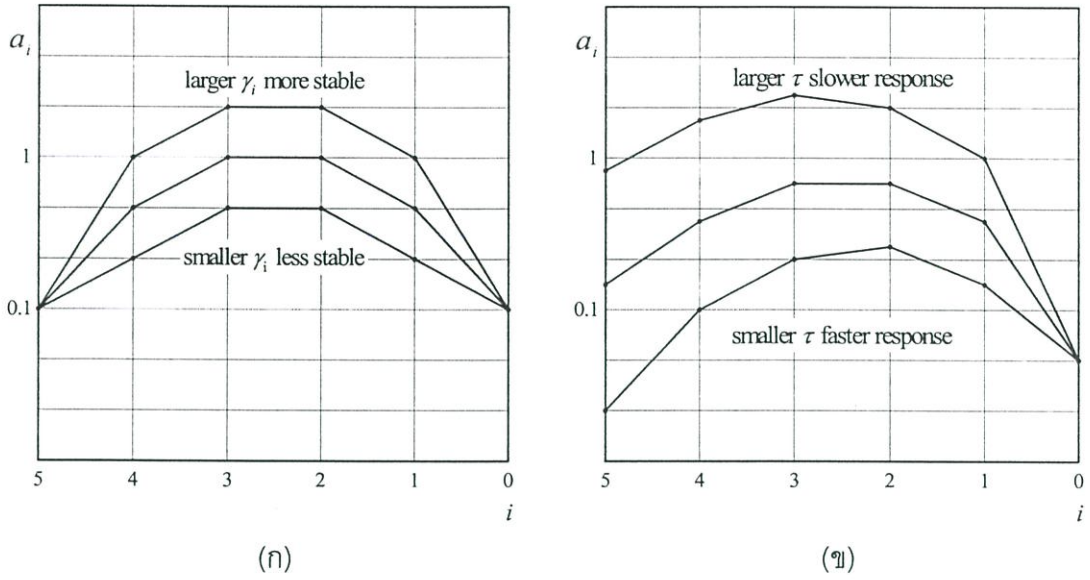
โดยค่าสัมประสิทธิ์ a_i , ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ , ค่าตรรกยะเสถียรภาพ γ_i และค่าจำกัดเสถียรภาพ γ_i^* จะแสดงในแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ในรูปที่ 3.3 จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อนำเอาค่าจำกัดตรรกยะเสถียรภาพ γ_i และค่าจำกัดเสถียรภาพ γ_i^* มาเปรียบเทียบกัน จะทำให้ทราบถึงความคงทน (Robustness) ต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบควบคุม เนื่องจากค่าตรรกยะเสถียรภาพเป็นฟังก์ชันของสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะ ดังนั้นระยะห่างระหว่างค่า

ดรชนีเสถียรภาพ γ_i และค่าจำกัดดรชนีเสถียรภาพ γ_i^* จึงเป็นตัวที่แสดงให้เห็นถึงระดับความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะ ซึ่งจะสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการ แสดงให้เห็นได้ว่าถ้าระยะห่างระหว่าง γ_i และ γ_i^* นั้นห่างมากขึ้นหรือมีค่ามากขึ้น ระบบควบคุมจะมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถตรวจสอบความคงทนของระบบควบคุมได้อีกวิธีหนึ่งคือการต่อเส้นเชื่อมเป็นเส้นตรงจากค่าสัมประสิทธิ์อันดับต่ำไปสู่ค่าสัมประสิทธิ์อันดับที่สูงกว่าเท่ากับสอง ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งเป็นการหาค่าดรชนีเสถียรภาพอีกวิธีหนึ่ง โดยระบบที่มีความคงทนมากจะมีเส้นกราฟของค่าสัมประสิทธิ์ที่มีความโค้งมาก สอดคล้องกับค่า γ_i ที่มาก



รูปที่ 3.3 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์

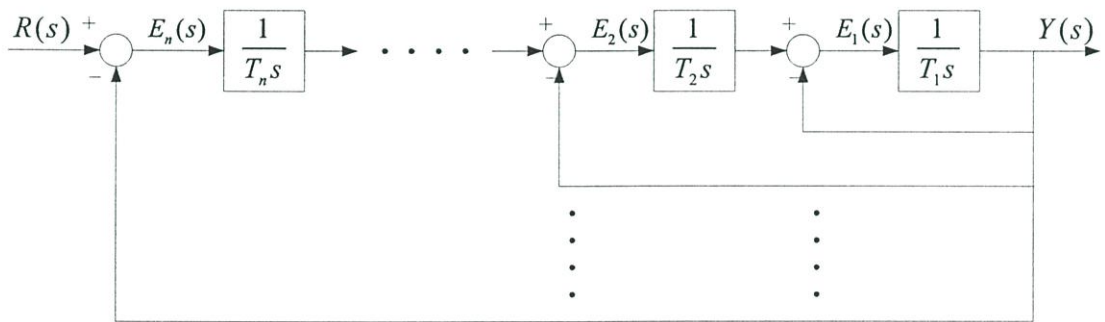
จากแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ สามารถสรุปได้ว่าระบบควบคุมจะมีเสถียรภาพมากขึ้น ถ้าเส้นกราฟค่าสัมประสิทธิ์มีความโค้งมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่า γ_i ที่มากขึ้น และจะมีเสถียรภาพลดลงเมื่อความโค้งของเส้นกราฟลดลง แสดงได้ดังรูป 3.4 (ก) และถ้าเส้นกราฟมีความลาดเอียงทางซ้ายมากขึ้น ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ จะมีค่าลดลงซึ่งผลตอบสนองของระบบจะเร็วขึ้น ในทางกลับกันถ้าเส้นกราฟมีความลาดเอียงน้อย จะทำให้ค่า τ เพิ่มขึ้นและความเร็วของผลตอบสนองจะลดลง แสดงได้ดังรูป 3.4 (ข) ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาประสิทธิภาพและสมรรถนะของระบบควบคุมได้จากแผนผังค่าสัมประสิทธิ์เพียงแผนผังเดียว



รูปที่ 3.4 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าดรรชนีเสถียรภาพและค่าคงตัวเวลาสมมูลสอดคล้องกับเสถียรภาพและผลตอบสนองของระบบควบคุม

3.2 ทฤษฎีของ Kessler's Multiloop Structure (MLS)

การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM เป็นวิธีที่พัฒนามาจากวิธีของ MLS ซึ่งวิธีของ MLS จะกำหนดโครงสร้างของระบบควบคุมเป็นตัวควบคุมแบบ I และเป็นวงรอบอันดับ n แสดงได้ดังรูปที่ 3.5 และฟังก์ชันถ่ายโอนทั้งหมดสำหรับโครงสร้างของตัวควบคุมแบบ I จำนวน n ตัวคือ



รูปที่ 3.5 โครงสร้างระบบควบคุมของวิธี Kessler's MLS

$$G_{cl}(s) = \frac{1}{(T_n T_{n-1} \dots T_1) s^n + \dots + (T_n T_{n-1}) s^2 + T_n s + 1} \tag{3.27}$$

โดย T_i คือค่าคงตัวเวลาของตัวควบคุมแบบ I จากฟังก์ชันถ่ายโอนในสมการ (3.27) แสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะสามารถที่จะเลือกได้ตามที่

ต้องการโดยทำการปรับค่า T_i ดังนั้นจึงเป็นการวางโพลตามที่ต้องการทางอ้อมด้วย เมื่อทำการวิเคราะห์จะสังเกตเห็นได้ว่า วิธีของ MLS นั้นจะอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวเวลา T_i ของตัวควบคุมแบบ I กับจุดความถี่หักมุมของผลตอบสนองต่อขนาด ซึ่งการเลือกจุดความถี่หักมุมที่เหมาะสมนั้นเป็นวัตถุประสงค์ในการออกแบบด้วยวิธี MLS

ในส่วนตัวต่อไป จะศึกษาถึงผลตอบสนองทางความถี่ของวิธี MLS ซึ่งมีความสัมพันธ์กันกับวิธีของ CDM โดยการศึกษาจะเริ่มด้วยการวิเคราะห์วงรอบของตัวควบคุมแบบ I วงในสุดก่อน จากนั้นจึงทำการศึกษาต่อไปจนกระทั่งโครงสร้างของตัวควบคุมแบบ I มีจำนวน n ตัวสำหรับในการศึกษานี้จะสมมุติให้ $T_{i+1} > T_i$

3.2.1 วงรอบตัวควบคุมแบบ I วงที่ 1

สำหรับวงรอบตัวควบคุมแบบ I วงในสุด $G_{o1}(s) = \frac{1}{T_1 s}$ ประกอบด้วยโพลที่จุดศูนย์กลางกับอัตราขยายขนาด $1/T_1$ ซึ่งสอดคล้องกับขนาดและมุมเฟสดังนี้

$$\begin{aligned} |G_1(s)| &= 20 \log \frac{1}{T_1} + 20 \log \left| \frac{1}{j\omega} \right| \\ &= -20 \log T_1 - 20 \log \omega \end{aligned} \quad (3.28)$$

$$\angle G_1(s) = \angle \frac{1}{j\omega} = -90^\circ \quad (3.29)$$

ความถี่เกณฑ์ครอสโอเวอร์ ω_c จะสอดคล้องกับการคำนวณต่อไปนี้

$$\begin{aligned} -20 \text{dB/dec} &= \frac{20 \log \frac{1}{T_1} - 0}{\log 1 - \log \omega_c} \\ &= \frac{20 \log \frac{1}{T_1}}{-\log \omega_c} \\ \log \omega_c &= \log \frac{1}{T_1} \\ \omega_c &= \frac{1}{T_1} \end{aligned} \quad (3.30)$$

เมื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนคือ

$$G_{cl1}(s) = \frac{1}{T_1 s + 1} \quad (3.31)$$

ผลตอบสนองต่อขนาดที่สอดคล้องกับความถี่หักมุม $\omega_1 = 1/T_1$ จะมีขนาดเท่ากับ $-3dB$ และผลตอบสนองต่อขนาดสามารถประมาณเป็นเส้นตรงได้โดยเริ่มวาดจากขนาด $0dB$ ไปจนถึงความถี่ ω_1 และผลตอบสนองต่อขนาดจะลดลง $20dB/dec$ สำหรับความถี่ที่สูงกว่า ω_1

3.2.2 วงรอบตัวควบคุมแบบ I วงที่ 2

เมื่อทำการต่อตัวควบคุมแบบ I ตัวที่ 2 เข้ากับตัวควบคุมแบบ I ตัวที่ 1 ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของกระบวนการสามารถแสดงได้ดังนี้

$$G_{ol2}(s) = \frac{1}{T_2 s(T_1 s + 1)} \quad (3.32)$$

และฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดคือ

$$G_{cl2}(s) = \frac{1}{T_2(T_1 s + 1) + 1} \quad (3.33)$$

การประมาณความเป็นเส้นตรงของผลตอบสนองต่อขนาด สำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงเปิดของ $G_{ol2}(s)$ ประกอบด้วยเส้นตรง 2 เส้นด้วยกัน โดยเส้นแรกมีขนาด $-20dB/dec$ ที่ความถี่ครอสโอเวอร์ $\omega_2 = 1/T_2$ และเส้นที่สองมีขนาด $-40dB/dec$ ที่ความถี่สูงมากกว่า $\omega_1 = 1/T_1$ และเมื่อทำการวิเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงปิด ผลตอบสนองต่อขนาดจะมีค่าเท่ากับ $0dB$ ไปจนถึงความถี่ $\omega_2 = 1/T_2$ และที่ความถี่ $\omega_2 = 1/T_2$ ผลตอบสนองต่อขนาดจะลดลง $20dB/dec$ ไปจนถึงความถี่ $\omega_1 = 1/T_1$ และสำหรับความถี่ที่สูงกว่า $\omega_1 = 1/T_1$ ผลตอบสนองต่อขนาดจะมีค่าที่ลดลง $40dB/dec$

3.2.3 วงรอบตัวควบคุมแบบ I วงที่ n

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดสำหรับวงรอบตัวควบคุมแบบ I วงที่ n สามารถแสดงได้ดังนี้

$$G_{on}(s) = \frac{1}{(T_n \dots T_1)s^n + \dots + T_n T_{n-1} s^2 + T_n s} \quad (3.34)$$

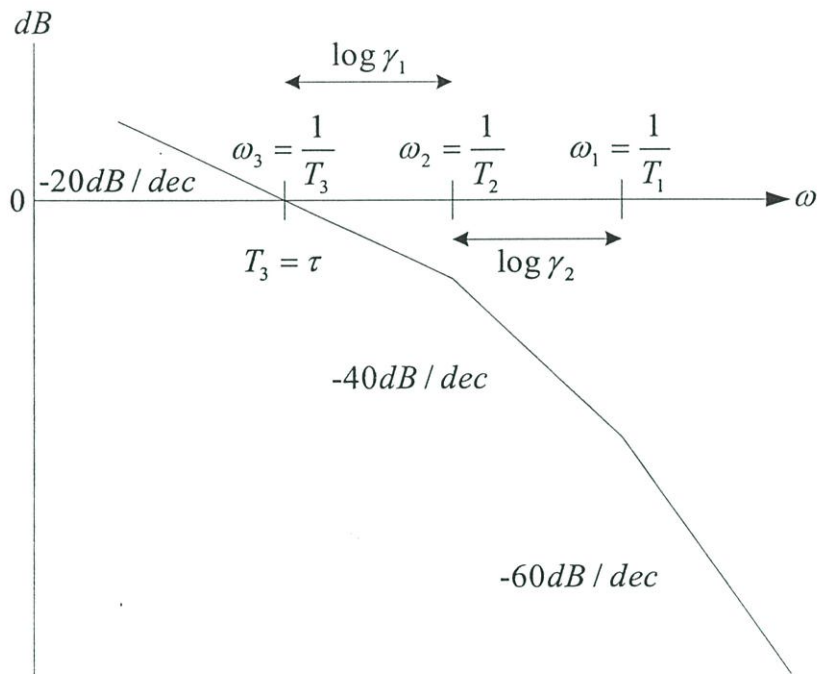
และฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดคือ

$$G_{cl}(s) = \frac{1}{(T_n \dots T_1)s^n + \dots + T_n T_{n-1} s^2 + T_n s + 1}$$

$$= \frac{1}{a_n s^n + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (3.35)$$

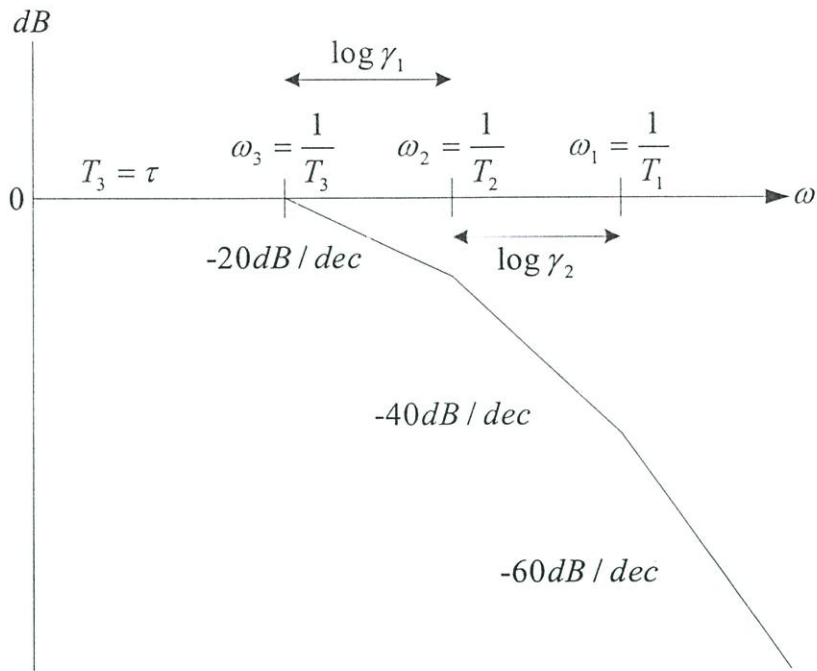
$$P(s) = a_n s^n + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 \quad (3.36)$$

โดย $P(s)$ คือสมการพหุนามคุณลักษณะ, $\omega_i = 1/T_i$ สำหรับ $i = 1, \dots, n$ คือความถี่หักมุม และจุดหักมุมนี้จะต่อเนื่องกันจากความถี่ต่ำไปสู่ความถี่สูงคือ $\omega_n, \omega_{n-1}, \dots, \omega_2, \omega_1$



รูปที่ 3.6 ผลตอบสนองต่อขนาดของระบบอันดับ 3 สำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดตามวิธีของMLS

สำหรับตัวอย่างการประมาณเส้นตรงของผลตอบสนองต่อขนาด สำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงเปิดอันดับ 3 แสดงได้ดังรูปที่ 3.6 ผลตอบสนองต่อขนาดจะมีขนาด -20 dB/dec โดยเริ่มจากช่วงความถี่ต่ำไปจนตัดแกน 0 dB ที่ความถี่ ω_n และที่ช่วงความถี่สูงขึ้นผลตอบสนองต่อขนาดจะลดลงอีก 20 dB/dec เมื่อพบกับความถี่หักมุมแต่ละจุด ในขณะที่เดียวกันผลตอบสนองต่อขนาดสำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงปิดอันดับ 3 แสดงได้ดังรูปที่ 3.7 จากความถี่ต่ำไปสู่ความถี่สูงผลตอบสนองต่อขนาดคือ 0 dB และเริ่มลดลง 20 dB/dec เมื่อพบกับความถี่หักมุมแต่ละจุด



รูปที่ 3.7 ผลตอบสนองต่อขนาดของระบบอันดับ 3 สำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดตามวิธีของ MLS

3.3 ความคล้ายคลึงกันของวิธี CDM กับวิธี MLS

ในการอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างวิธี CDM กับวิธี MLS นั้น พารามิเตอร์ของวิธี CDM (γ_i และ τ) กับพารามิเตอร์ของวิธี MLS (T_i) จะถูกอธิบายผ่านสมการ (3.12) โดยขั้นแรกแทนพารามิเตอร์ของวิธี MLS ในรูปแบบค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะ จากนั้นจึงแทนค่าสัมประสิทธิ์ของวิธี CDM จะเห็นได้ว่าค่าตรงนี้เสถียรภาพของวิธี CDM คืออัตราส่วนของค่าคงตัวเวลาของตัวควบคุมแบบ I

พารามิเตอร์ของวิธี MLS

$$\begin{aligned} a_0 &= 1 \\ a_1 &= T_n \\ a_2 &= T_n T_{n-1} \\ a_3 &= T_n T_{n-1} T_{n-2} \\ &\vdots \\ a_n &= \prod_{i=1}^n T_i \end{aligned}$$

พารามิเตอร์ของวิธี CDM

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{a_1^2}{a_0 a_2} = \frac{T_n}{T_{n-1}} \\ \gamma_2 &= \frac{a_2^2}{a_1 a_3} = \frac{T_{n-1}}{T_{n-2}} \\ &\vdots \\ \gamma_{n-1} &= \frac{a_{n-1}^2}{a_0 a_n} = \frac{T_2}{T_1} \end{aligned} \quad (3.37)$$

สมการต่างๆไปคือ

$$a_i = \prod_{k=n-1+i}^n T_k \quad (3.38)$$

$$\gamma_i = \frac{T_{n-i+1}}{T_{n-i}} \quad (3.39)$$

$$\tau = T_n \quad (3.40)$$

สำหรับตัวอย่าง เราสามารถเลือกจุดหักมุมสองจุด ω_1, ω_2 ตามที่ต้องการได้ โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังต่อไปนี้

$$\omega_1 = \frac{1}{T_1} \quad (3.41)$$

$$\omega_2 = \frac{1}{T_2} \quad (3.42)$$

$$\begin{aligned} \gamma_{n-1} &= \frac{T_2}{T_1} \\ &= \frac{1/\omega_2}{1/\omega_1} \\ &= \frac{\omega_1}{\omega_2} \end{aligned} \quad (3.43)$$

$$\log \gamma_{n-1} = \log \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (3.44)$$

ผลตอบสนองต่อขนาดจะแสดงอยู่ในรูปของลอการิทึม โดย $\log \omega_1 - \log \omega_2$ คือระยะห่างระหว่าง ω_1 และ ω_2 ดังนั้นค่าตรรกษีเสถียรภาพ γ_i ก็คืออินเวอร์สของระยะห่างระหว่างจุดหักมุมนั่นเอง

$$\begin{aligned} \log \gamma_{n-1} &= \log \omega_1 - \log \omega_2 = \text{ระยะห่าง} \\ \gamma_{n-1} &= 10^{\text{ระยะห่าง}} \end{aligned} \quad (3.45)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างวิธี CDM และวิธี MLS สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ค่าตรรกษีเสถียรภาพ γ_i คือระยะห่างระหว่างจุดหักมุม 2 จุดที่ต่อเนื่องกัน
2. ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ เทียบเท่ากับ T_n โดยเป็นอินเวอร์สของ $\omega_n = 1/T_n$ ซึ่งก็คือความถี่จุดหักมุมที่ต่ำที่สุด และสอดคล้องกับความถี่เกณฑ์ของไอเวอร์ ω_c ของผลตอบสนองต่อขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงปิด

3.3.1 คุณสมบัติผลตอบสนองทางความถี่ของวิธี CDM และวิธี MLS

ในส่วนนี้จะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างวิธี CDM กับวิธีของ MLS ในทางความถี่ ในขณะที่วิธีของ MLS ทำการจัดการกับตำแหน่งของจุดหักมุม แต่วิธี CDM ใช้ระยะห่างระหว่างจุดหักมุมเป็นตัวกำหนดคุณลักษณะของระบบควบคุม อย่างไรก็ตามสมรรถนะของระบบควบคุมโดยส่วนใหญ่แล้วก็ยังขึ้นอยู่กับรูปทรงผลตอบสนองทางความถี่

เมื่อพิจารณาถึงโครงสร้างอันดับ n ของวิธี MLS ด้วยจุดหักมุม $1/T_n, 1/T_{n-1}, \dots, 1/T_2, 1/T_1$ จากความถี่ต่ำไปสู่ความถี่สูง สามารถวิเคราะห์ได้ว่าถ้าระยะห่างระหว่างจุดหักมุมถูกแบ่งได้ดี เมื่อนั้นผลตอบสนองต่อขนาดของระบบควบคุมสามารถจะประมาณเป็นเส้นตรงได้ จากผลตอบสนองทางความถี่ของระบบควบคุมแบบวงเปิดสามารถสังเกตได้ดังนี้

1. ในการออกแบบให้ผลตอบสนองต่อขนาดในช่วงความถี่เกินครอสโอเวอร์ ω_c นั้นมีค่าเท่ากับ $-20dB/dec$ เป็นการออกแบบให้ระบบมีเสถียรภาพ โดย Bode ได้กล่าวไว้ว่า สำหรับระบบที่มีเสถียรภาพ นั้นผลตอบสนองต่อขนาดในช่วงใกล้ความถี่เกินครอสโอเวอร์ไม่ควรมากกว่า $-40dB/dec$
2. Bode ยังได้กล่าวอีกว่าผลตอบสนองต่อขนาดจากความถี่ต่ำไปสู่ความถี่สูงควรที่จะเป็นเส้นที่ราบเรียบ โดยสมมติให้ γ_i ทุกอันดับมีค่าเท่ากันและค่าของ γ_i ทุกอันดับต้องมากกว่า 1.5 สำหรับระบบที่มีเสถียรภาพ ดังนั้นจุดหักมุมของระบบที่มีเสถียรภาพจะถูกแบ่งโดยระยะห่างอย่างน้อยที่สุดคือ $10^{1.5}$ และเนื่องจากผลตอบสนองต่อขนาดของระบบควบคุมนั้นลดลง $20dB/dec$ ที่จุดหักมุมแต่ละจุด ดังนั้นวิธี CDM จึงให้ผลที่น่าพอใจตามที่ต้องการของ Bode ในด้านผลตอบสนองต่อขนาดที่ราบเรียบ
3. ผลตอบสนองต่อขนาดที่ความถี่สูง (จาก $\omega_1 = 1/T_1$ ถึง ∞) คือ $-20 \cdot n dB/dec$ ระบบควบคุมจะทำหน้าที่เหมือนกับตัวกรองความถี่ต่ำ โดยจะลดทอนสัญญาณความถี่สูง เช่นสัญญาณรบกวนเนื่องจาก n คืออันดับของระบบควบคุม ดังนั้นระบบควบคุมที่มีอันดับสูงๆ จะมีคุณลักษณะของความถี่คัทออฟที่ดีมาก

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างวิธี CDM กับผลตอบสนองต่อขนาดในทางความถี่ของระบบควบคุมแบบวงปิดนั้น สามารถแสดงได้ดังนี้

1. สมรรถนะของระบบควบคุมจะได้รับผลกระทบมากที่สุด สำหรับช่วงที่ผลตอบสนองต่อขนาดเข้าใกล้ $0dB$ ซึ่งขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ γ_1 และ γ_2 ในวิธีของ CDM จากสมการ 3.15 แสดงให้เห็นได้ว่า สมการพหุนามคุณลักษณะทั้งหมด $(a_n, a_{n-1}, \dots, a_2, a_1)$ จะได้รับผลกระทบมาจาก γ_1 และ γ_2 ดังนั้น เราจะเรียก γ_1 และ γ_2 ว่า γ อันดับต่ำ
2. ระบบควบคุมจะมีเสถียรภาพที่น้อยลงเมื่อระยะห่างช่วงความถี่สำหรับผลตอบสนองต่อขนาดในช่วง $0dB$ (ω_{n-1}/ω_n) นั้นลดลง โดยผลลัพธ์ของผลตอบสนองต่อความถี่

และผลตอบสนองต่อสัญญาณชั้นบันไดจะมีขนาดและค่าพุ่งเกินที่มากขึ้น เมื่อทำการพิจารณาตามวิธีของ CDM ความกว้างของช่วงความถี่ก็คือ $\log \gamma_1$ นั่นเอง โดยจากตัวอย่างการออกแบบหลายๆตัวอย่างพบว่า ค่า γ_1 ที่สูงจะทำให้ค่าเกนมารีจิ้นและค่าเฟสมารีจิ้นของระบบควบคุมมากขึ้นด้วย

- ค่าต่ำๆของอัตราส่วน (ω_1/ω_n) นั้นจะสอดคล้องกับระบบควบคุมที่มีการออสซิลเลทสูงและอัตราการหน่วงต่ำ สำหรับพารามิเตอร์ของวิธี CDM นั้นค่าอัตราส่วนนี้จะสมมูลย์กับสมการ $\sum_{i=1}^n \gamma_i$ ซึ่งหลังจากนี้จะเรียกว่า γ_i ผลตอบสนองต่อขนาดทั้งหมดสามารถวัดและแทนให้อยู่ในรูปแบบของระยะห่างทั้งหมด ระหว่างจุดหักมุมที่ความถี่ต่ำที่สุดและจุดหักมุมที่ความถี่สูงที่สุด เมื่อทำการวิเคราะห์โดยใช้วิธี MLS จะสังเกตเห็นได้ว่า ถ้า γ_i มีค่าน้อยๆ จะทำให้ผลตอบสนองต่อขนาดเกิดเรโซแนนท์พีคในทางความถี่ ซึ่งสอดคล้องกับการมีค่าพุ่งเกินที่สูงและการเกิดออสซิลเลทในทางผลตอบสนองทางเวลา สำหรับในทางทฤษฎีนั้นถ้าออกแบบระบบควบคุมโดยแบ่งระยะห่างระหว่างจุดหักมุมได้ดี จะทำให้ผลตอบสนองต่อขนาดหรือผลตอบสนองต่อสัญญาณชั้นบันไดนั้นมีค่าพุ่งเกินและการออสซิลเลทที่ต่ำ

3.4 การเลือกพารามิเตอร์ของวิธี CDM

ในส่วนตัวแล้วได้อธิบายถึงความสำคัญของตำแหน่งจุดหักมุมในทางความถี่และผลกระทบที่เกิดขึ้นกับผลตอบสนองที่สภาวะชั่วคราวของระบบควบคุม สำหรับในส่วนนี้จะอธิบายถึงการเลือกพารามิเตอร์ γ_i และ τ ของวิธี CDM โดยแนวคิดพื้นฐานนี้ก็คือการเลือกวางจุดหักมุมที่ทำให้ค่าเรโซแนนท์พีคและค่าพุ่งเกินของระบบควบคุมต่ำที่สุดนั่นเอง เมื่อทำการพิจารณาถึงฟังก์ชันถ่ายโอนป้อนกลับของตัวควบคุมแบบ I อันดับ 1 ตามวิธีของ MLS อีกครั้งหนึ่งจะได้ว่า

$$G_{cl1}(s) = \frac{1}{T_1 s + 1} \quad (3.46)$$

$$T_1 = \frac{1}{\omega_1} = 1 \quad (3.47)$$

$$\begin{aligned} |G_{cl1}(s)| &= -20 \log |1 + s| \\ &= -20 \log \sqrt{1 + \omega^2} \end{aligned} \quad (3.48)$$

โดยผลตอบสนองต่อขนาดที่ความถี่ ω_1 จะประมาณเท่ากับ $-3dB$ ดังได้อธิบายในส่วนที่แล้วว่า ผลตอบสนองต่อขนาดจะประกอบไปด้วยเส้นตรงที่ทำการประมาณขึ้นมาถ้าแบ่งระยะห่าง

ระหว่างจุดหักมุมได้ดี เนื่องจากอัตราการหน่วงของระบบควบคุมนั้นเป็นส่วนโดยตรงกับผลรวมระยะห่างทั้งหมดของจุดหักมุม γ_i ดังนั้นค่าพุงเกินและอัตราการหน่วงจึงกลายเป็นค่าที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนกับผลรวมระยะห่างทั้งหมด γ_i โดยถ้าทำการเพิ่มจุดหักมุมขึ้นมาโดยเลือกวาง ω_2 ที่ความถี่ซึ่งทำให้ $|G_{cl}(s)| < -1dB$ จะต้องกำหนดให้ $\omega_2 \leq 0.509$ เมื่อนั้นระยะห่างระหว่าง ω_1 และ ω_2 คำนวณได้โดย $\log \omega_1 - \log \omega_2 \geq 0.293$ ซึ่งสามารถแปลงได้เป็น $\gamma_{n-1} \geq 10^{0.293} = 1.963$

โดยทั่วไปแล้วในการออกแบบระบบควบคุมถ้ากำหนดให้ $\gamma_i = 2$ จะทำให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพที่ดีและผลตอบสนองของระบบควบคุมที่สภาวะชั่วคราวจะราบเรียบ แต่อย่างไรก็ตามผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดจะมีค่าพุงเกินประมาณ 6% จากการจำลองการทำงานโดยศาสตราจารย์ S.Manabe พบว่าค่าพุงเกินสามารถลดลงเป็นศูนย์ได้โดยกำหนดให้ $\gamma_1 = 2.5$ สำหรับผลตอบสนองทางความถี่การเพิ่มค่า γ_1 เป็น 2.5 นั้นทำให้ระยะห่างระหว่างจุดหักมุมในช่วงความถี่ต่ำเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าเรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นกับผลตอบสนองต่อขนาดสำหรับผลตอบสนองทางความถี่และเป็นผลให้เกิดค่าพุงเกินสำหรับผลตอบสนองต่อเวลานั้นจะถูกกำจัดไป

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของวิธี CDM ดังที่ได้อธิบายมานั้นสามารถเขียนได้อีกแบบหนึ่งโดยจะเรียกว่ารูปแบบของ Manabe (Manabe Form) และค่ามาตรฐานของ γ_i สำหรับวิธี CDM สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\gamma_{n-1} = \dots = \gamma_2 = 2, \quad \gamma_1 = 2.5 \quad (3.49)$$

และค่าเวลาเข้าที่สำหรับการออกแบบด้วยวิธี CDM คือ

$$t_s = 2.5\tau \sim 3\tau \quad (3.50)$$

จากสมการ (3.16) จะสังเกตเห็นได้ว่าสมการพหุนามคุณลักษณะนั้นถูกอธิบายอยู่ในรูปกำลังของ τs และค่าสัมประสิทธิ์อธิบายโดย γ_i ดังนั้นรูปทรงและความเร็วของผลตอบสนองสามารถพิจารณาได้โดยพารามิเตอร์ γ_i และ τ ตามลำดับ

คุณสมบัติพื้นฐานของค่าพารามิเตอร์ γ_i และ τ มาตรฐานสำหรับการออกแบบด้วยวิธี CDM สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ไม่มีค่าพุงเกินสำหรับกระบวนการที่เป็นแบบชนิด 1 และมีค่าพุงเกินประมาณ 40% สำหรับกระบวนการที่เป็นแบบชนิด 2
2. สำหรับระบบควบคุมที่มีค่าคงตัวเวลาสมมูลเท่ากันจะมีค่าเวลาเข้าที่น้อยที่สุด

3. ผลตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบขั้นบันไดมีลักษณะใกล้เคียงกัน ไม่ขึ้นกับอันดับของสมการพหุนามคุณลักษณะ
4. โพลของระบบควบคุมอันดับต่ำๆจะวางตัวในแนวตั้งขนานกับแกนจินตภาพ ส่วนโพลของระบบควบคุมอันดับสูงจะอยู่ภายในบริเวณล้อมรอบด้วยเส้นตรงที่ทำมุม $\pm 49.5^\circ$ จากแกนจริงลบ

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM ค่าดรรชนีเสถียรภาพที่กำหนดให้ $\gamma_1 = 2.5$ และ $\gamma_2 = \gamma_3 = 2$ นั้นเป็นเพียงเงื่อนไขเบื้องต้นเพื่อที่จะทำให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพและได้ผลตอบสนองของระบบควบคุมตามที่ต้องการ อย่างไรก็ตามไม่จำเป็นต้องกำหนดให้ $\gamma_4 \sim \gamma_{n-1} = 2$ โดยสามารถแปลงค่าได้ภายใต้เงื่อนไขดังนี้

$$\gamma_i > 1.5\gamma_i^* \quad \text{สำหรับ } i = 4 \sim n-1 \quad (3.51)$$

ดังนั้นผู้ออกแบบสามารถออกแบบตัวควบคุมได้อย่างอิสระ ซึ่งในบางครั้งอาจจะเลือกให้ค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_i มีค่าสูงๆ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านความคงทนของระบบควบคุมต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการ จากเงื่อนไขเสถียรภาพโดย Lipatov ระบบควบคุมจะมีเสถียรภาพเมื่อดรรชนีเสถียรภาพ γ_i ทุกค่ามีค่ามากกว่า 1.5 โดย Lipatov ได้พิสูจน์ไว้ใน [26] และถ้าค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_i ทุกตัวมีค่ามากกว่า 4 โพลของระบบควบคุมทั้งหมดจะอยู่บนแกนจริง ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วค่าดรรชนีเสถียรภาพนั้นจึงถูกเลือกให้มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5-4 แต่ในบางครั้งเมื่อพิจารณากระบวนการบางกระบวนการแล้วพบว่าค่าดรรชนีเสถียรภาพที่มากกว่าค่ามาตรฐาน ซึ่งในกรณีนี้ไม่จำเป็นที่จะต้องลดค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_i เพื่อให้เป็นค่าเดียวกับค่ามาตรฐาน

3.5 สรุป

จากที่ได้อธิบายมาแสดงให้เห็นได้ว่า วิธี CDM นั้นเป็นวิธีการออกแบบระบบควบคุมที่ได้มีการพัฒนามาจากวิธีของ Kellsler's Multiloop Structure (MLS) ซึ่งการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธี CDM นั้นจะสะดวกกว่าวิธี MLS เนื่องจากพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธี CDM นั้นมีจำนวนที่น้อย และสามารถนำเอาค่าสัมประสิทธิ์ของระบบควบคุมที่ได้ทำการออกแบบมาพล็อตลงในแผนผังค่าสัมประสิทธิ์เพื่อตรวจสอบถึง ความมีเสถียรภาพ, ผลตอบสนองต่อเวลา และความคงทนของระบบควบคุมที่ได้ออกแบบภายในแผนผังเดียว

ในบทต่อไปจะกล่าวถึงโครงสร้างของระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ I-P ทั้งในกรณีเฟสต่ำสุดและเฟสไม่ต่ำสุด รวมไปถึงการนำเอาวิธี CDM ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแบบ I-P

บทที่ 4

การออกแบบตัวควบคุม I-P ด้วยวิธี CDM

ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการ MIMO นั้นสามารถแบ่งโครงสร้างของตัวควบคุมได้เป็น 2 แบบด้วยกันคือตัวควบคุมแบบไม่แยกอิสระ (centralized) และตัวควบคุมแบบแยกอิสระ (decentralized) ซึ่งในทางปฏิบัติในตัวควบคุมแบบแยกอิสระจะได้รับความนิยมในการนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับการควบคุมกระบวนการ MIMO มากกว่า เนื่องจากโครงสร้างของตัวควบคุมนั้นเป็นแบบ Diagonal Matrix ซึ่งสามารถที่จะทำความเข้าใจได้ง่าย, ง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานและทำการออกแบบได้ง่ายกว่าตัวควบคุมแบบไม่แยกอิสระ ในขณะที่ตัวควบคุมแบบไม่แยกอิสระมีโครงสร้างที่เป็นแบบ Full Matrix ซึ่งคุณสมบัติของตัวควบคุมแบบนี้จะตรงกันข้ามกับตัวควบคุมแบบแยกอิสระทั้งหมดดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นในการทำการออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ดังนั้นจึงเลือกใช้โครงสร้างตัวควบคุมแบบแยกอิสระ ด้วยเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาในเบื้องต้นและตัวควบคุมที่ใช้จะเป็นตัวควบคุมแบบ I-P โดยพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจะได้จากการออกแบบด้วยวิธี CDM

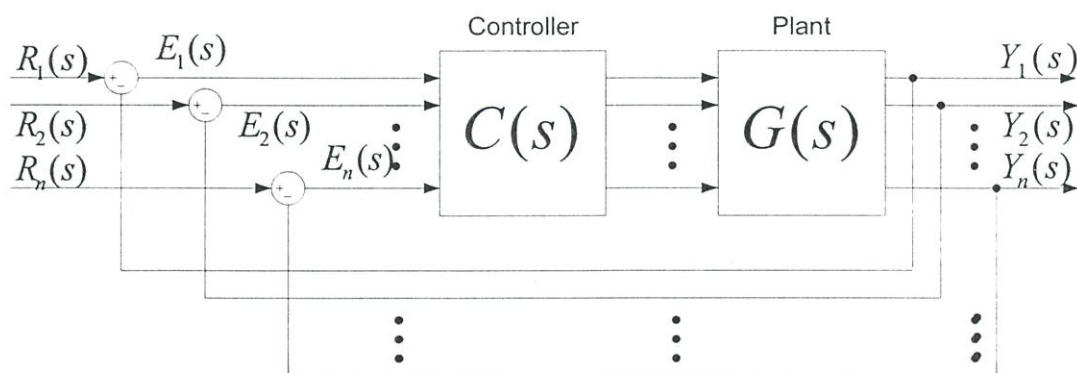
การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM สำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ดังนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณีคือกรณีเฟสต่ำสุดและกรณีเฟสไม่ต่ำสุด ซึ่งแต่ละกรณีจะแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ สำหรับวงรอบเอาต์พุต1 และสำหรับวงรอบเอาต์พุต2 โดยในการออกแบบตัวควบคุมจะใช้วิธี RGA ในการวิเคราะห์จับคู่อินพุต-เอาต์พุตที่จะทำการควบคุม ซึ่งจะแสดงถึงฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม

ในบทนี้จะอธิบายถึงโครงสร้างระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบแยกอิสระ ซึ่งเป็นรูปแบบทั่วไปที่ใช้สำหรับกระบวนการ MIMO, โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 และการออกแบบตัวควบคุม I-P ด้วยวิธี CDM

4.1 โครงสร้างระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบแยกอิสระ

ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการ MIMO นั้นตัวควบคุมแบบแยกอิสระจะได้รับความนิยมในการนำไปประยุกต์ใช้งานมากกว่าตัวควบคุมแบบไม่แยกอิสระ ดังได้อธิบายมาแล้วในเบื้องต้น ซึ่งรูปโครงสร้างของระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบแยกอิสระสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 โดย $G(s)$ คือเมทริกฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการและ $C(s)$ คือเมทริกฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบแยกอิสระ โดย $C(s)$ นั้นจะเป็นเมทริกแบบจัตุรัสมีขนาดเท่ากับจำนวนอินพุตของกระบวนการ ในขณะที่ $G(s)$ ไม่จำเป็นต้องเป็นเมทริกจัตุรัสก็ได้ ซึ่งอาจจะ

จำนวนอินพุตที่มากกว่าหรือน้อยกว่าจำนวนเอาต์พุตก็ได้ แต่ในกรณีนี้จะกำหนดให้ $G(s)$ เป็นเมทริกจัตุรัส โดย $G(s)$ และ $C(s)$ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



รูปที่ 4.1 โครงสร้างระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบแยกอิสระ

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) & \cdots & G_{1n}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) & \cdots & G_{2n}(s) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ G_{n1}(s) & G_{n2}(s) & \cdots & G_{nn}(s) \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$C(s) = \begin{bmatrix} G_{c1}(s) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & G_{c2}(s) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & G_{cn}(s) \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมแบบแยกอิสระสำหรับระบบควบคุมนั้น จะต้องทำการเลือกจับคู่อินพุต-เอาต์พุตที่เหมาะสมในการควบคุมเป็นอันดับแรกก่อน จากนั้นจึงทำการออกแบบตัวควบคุมโดยจะทำการออกแบบสำหรับแต่ละวงรอบเอาต์พุตแยกจากกัน

4.2 โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง

กระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงเป็นกระบวนการที่สามารถเลื่อนตำแหน่งซีโรของกระบวนการให้อยู่ทางด้านซ้ายหรือด้านขวาของระนาบ s ได้โดยการปรับค่าตำแหน่งพอล α_1 และ α_2 ทำให้กระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงนั้นเป็นกระบวนการที่สามารถเลือกโหมดในการทำงานของกระบวนการให้เป็นแบบเฟสต่ำสุดหรือไม่ต่ำสุดได้ โดยเมทริกฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการคือ

$$G_p(s) = \begin{bmatrix} \frac{\alpha_1 k_1 c_1}{(T_1 s + 1)} & \frac{(1 - \alpha_2) k_2 c_1}{(T_1 s + 1)(T_3 s + 1)} \\ \frac{(1 - \alpha_1) k_1 c_2}{(T_2 s + 1)(T_4 s + 1)} & \frac{\alpha_2 k_2 c_2}{(T_2 s + 1)} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในอีกรูปแบบหนึ่งได้ดังนี้

$$G_p(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

และจากการใช้วิธี RGA ในการวัดอินเตอร์แอคชันของกระบวนการจะได้ค่า RGA ดังนี้

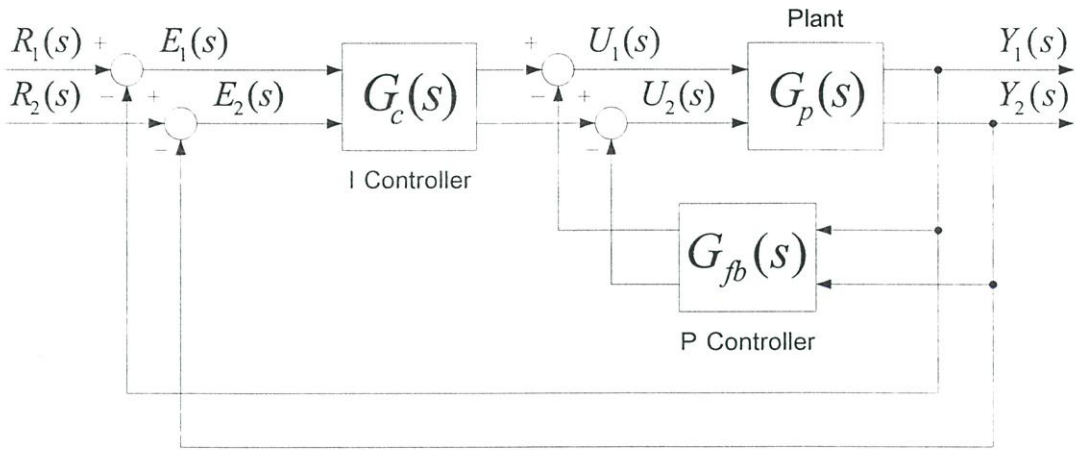
$$\lambda_{11} = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2 - 1} \quad (4.5)$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & 1 - \lambda_{11} \\ 1 - \lambda_{11} & \lambda_{11} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

ซึ่งในกรณีที่กระบวนการเป็นแบบเฟสต่ำสุด ($1 < \alpha_1 + \alpha_2 < 2$) ค่า λ_{11} จะมีค่าเป็นบวก และในกรณีที่กระบวนการเป็นแบบเฟสไม่ต่ำสุด ($0 < \alpha_1 + \alpha_2 < 1$) ค่า λ_{11} จะมีค่าเป็นลบ และจากกฎการจับคู่อินพุต-เอาต์พุตด้วยวิธี RGA ที่บอกว่าควรจับคู่อินพุต-เอาต์พุตที่มีค่า λ_{11} เป็นบวก จึงทำให้โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงสามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือกรณีเฟสต่ำสุดและกรณีเฟสไม่ต่ำสุด

4.2.1 โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงกรณีเฟสต่ำสุด

โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงกรณีเฟสต่ำสุดแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 โดย $G_p(s)$ คือเมทริกฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการซึ่งเป็นสมการเดียวกันกับสมการ (4.3), $G_c(s)$ คือเมทริกฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบ I และ $G_{fb}(s)$ คือเมทริกฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบ P ซึ่งเมทริกฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบ I และเมทริกฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบ P แสดงได้ดังนี้



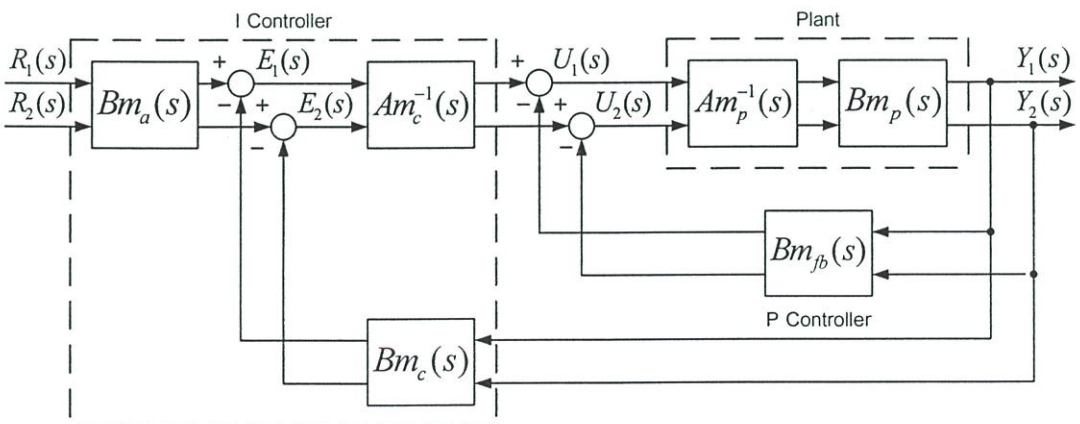
รูปที่ 4.2 โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงกรณีเฟสต่ำสุด

เมทริกฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบ I คือ

$$G_c(s) = \begin{bmatrix} G_{c1}(s) & 0 \\ 0 & G_{c2}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_{i1}}{s} & 0 \\ 0 & \frac{K_{i2}}{s} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

เมทริกฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบ P คือ

$$G_{fb}(s) = \begin{bmatrix} G_{fb1}(s) & 0 \\ 0 & G_{fb2}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{p1} & 0 \\ 0 & K_{p2} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$



รูปที่ 4.3 โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงกรณีเฟสต่ำสุดในรูปแบบมาตรฐานของวิธี CDM

จากรูปที่ 4.2 สามารถแสดงให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐานของวิธี CDM ได้ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งตัวควบคุมและกระบวนการจะถูกแสดงอยู่ในรูปของเมทริกสมการพหุนาม โดย $Bm_p(s)$ คือเมทริกตัวเศษพหุนามของกระบวนการ $Am_p(s)$ คือตัวร่วมส่วนพหุนามของกระบวนการ $Bm_c(s)$, $Bm_a(s)$ และ $Am_c(s)$ คือเมทริกสมการพหุนามของตัวควบคุมแบบ CDM และ $Bm_{fb}(s)$ คือเมทริกตัวเศษพหุนามของตัวควบคุมแบบป้อนกลับ

เมทริกสมการพหุนามของกระบวนการคือ

$$Bm_p(s) = \begin{bmatrix} B_{p11}(s) & B_{p12}(s) \\ B_{p21}(s) & B_{p22}(s) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \alpha_1 k_1 c_1 (T_2 s + 1)(T_3 s + 1)(T_4 s + 1) & (1 - \alpha_2) k_2 c_1 (T_2 s + 1)(T_4 s + 1) \\ (1 - \alpha_1) k_1 c_2 (T_1 s + 1)(T_3 s + 1) & \alpha_2 k_2 c_2 (T_1 s + 1)(T_3 s + 1)(T_4 s + 1) \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$A_p(s) = Am_p(s) = (T_1 s + 1)(T_2 s + 1)(T_3 s + 1)(T_4 s + 1)$$

เมทริกสมการพหุนามของตัวควบคุมแบบ CDM คือ

$$Bm_c(s) = \begin{bmatrix} B_{c1}(s) & 0 \\ 0 & B_{c2}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{i1} & 0 \\ 0 & K_{i2} \end{bmatrix}$$

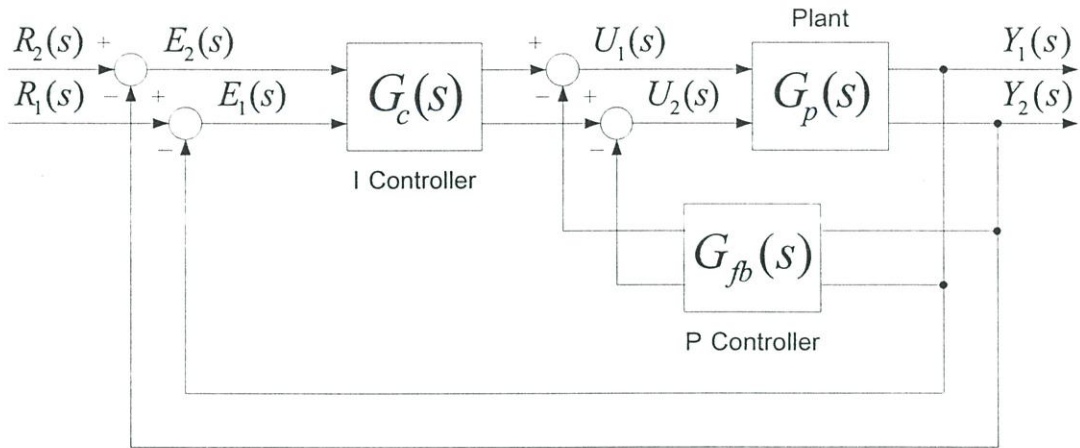
$$Am_c(s) = \begin{bmatrix} A_{c1}(s) & 0 \\ 0 & A_{c2}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s & 0 \\ 0 & s \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$Bm_a(s) = \begin{bmatrix} B_{a1}(s) \\ B_{a2}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{i1} \\ K_{i2} \end{bmatrix}$$

เมทริกสมการพหุนามของตัวควบคุมแบบป้อนกลับคือ

$$Bm_{fb}(s) = \begin{bmatrix} B_{fb1}(s) & 0 \\ 0 & B_{fb2}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{p1} & 0 \\ 0 & K_{p2} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

4.2.2 โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงกรณีเฟสไม่ต่ำสุด



รูปที่ 4.4 โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงกรณีเฟสไม่ต่ำสุด

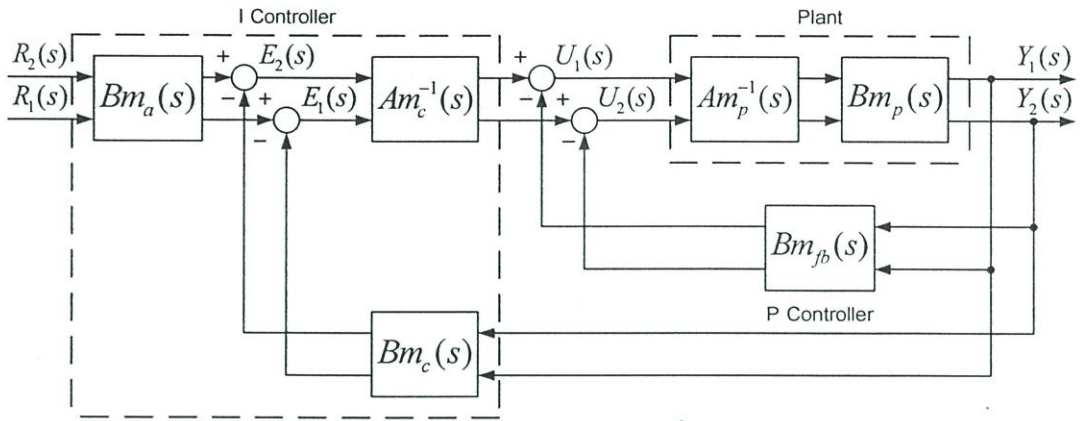
โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงกรณีเฟสไม่ต่ำสุดแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 โดย $G(s)$ คือเมทริกฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการซึ่งเป็นสมการเดียวกันกับสมการ (4.3), $G_c(s)$ คือเมทริกฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบ I และ $G_{fb}(s)$ คือเมทริกฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบ P ซึ่งเมทริกฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบ I และเมทริกฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบ P จะเป็นเหมือนกับสมการ (4.7) และ (4.8)

เมทริกฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบ I คือ

$$G_c(s) = \begin{bmatrix} G_{c1}(s) & 0 \\ 0 & G_{c2}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_{i1}}{s} & 0 \\ 0 & \frac{K_{i2}}{s} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

เมทริกฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบ P คือ

$$G_{fb}(s) = \begin{bmatrix} G_{fb1}(s) & 0 \\ 0 & G_{fb2}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{p1} & 0 \\ 0 & K_{p2} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$



รูปที่ 4.5 โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงกรณีเฟสไม่ต่ำสุดในรูปแบบมาตรฐานของวิธี CDM

จากรูปที่ 4.4 สามารถแสดงให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐานของวิธี CDM ได้ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งตัวควบคุมและกระบวนการจะถูกแสดงอยู่ในรูปของเมทริกสมการพหุนาม โดย $Bm_p(s)$ คือเมทริกตัวเศษพหุนามของกระบวนการ $Am_p(s)$ คือตัวร่วมส่วนพหุนามของกระบวนการ $Bm_c(s)$, $Bm_a(s)$ และ $Am_c(s)$ คือเมทริกสมการพหุนามของตัวควบคุมแบบ CDM และ $Bm_fb(s)$ คือเมทริกตัวเศษพหุนามของตัวควบคุมแบบป้อนกลับ

เมทริกสมการพหุนามของกระบวนการคือ

$$\begin{aligned}
 Bm_p(s) &= \begin{bmatrix} B_{p11}(s) & B_{p12}(s) \\ B_{p21}(s) & B_{p22}(s) \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \alpha_1 k_1 c_1 (T_2 s + 1)(T_3 s + 1)(T_4 s + 1) & (1 - \alpha_2) k_2 c_1 (T_2 s + 1)(T_4 s + 1) \\ (1 - \alpha_1) k_1 c_2 (T_1 s + 1)(T_3 s + 1) & \alpha_2 k_2 c_2 (T_1 s + 1)(T_3 s + 1)(T_4 s + 1) \end{bmatrix} \quad (4.14) \\
 A_p(s) = Am_p(s) &= (T_1 s + 1)(T_2 s + 1)(T_3 s + 1)(T_4 s + 1)
 \end{aligned}$$

เมทริกสมการพหุนามของตัวควบคุมแบบ CDM คือ

$$\begin{aligned}
 Bm_c(s) &= \begin{bmatrix} B_{c1}(s) & 0 \\ 0 & B_{c2}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{i1} & 0 \\ 0 & K_{i2} \end{bmatrix} \\
 Am_c(s) &= \begin{bmatrix} A_{c1}(s) & 0 \\ 0 & A_{c2}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s & 0 \\ 0 & s \end{bmatrix} \\
 Bm_a(s) &= \begin{bmatrix} B_{a1}(s) \\ B_{a2}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{i1} \\ K_{i2} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (4.15)$$

เมทริกซ์สมการพหุนามของตัวควบคุมแบบป้อนกลับคือ

$$Bm_{fb}(s) = \begin{bmatrix} B_{fb1}(s) & 0 \\ 0 & B_{fb2}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{p1} & 0 \\ 0 & K_{p2} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

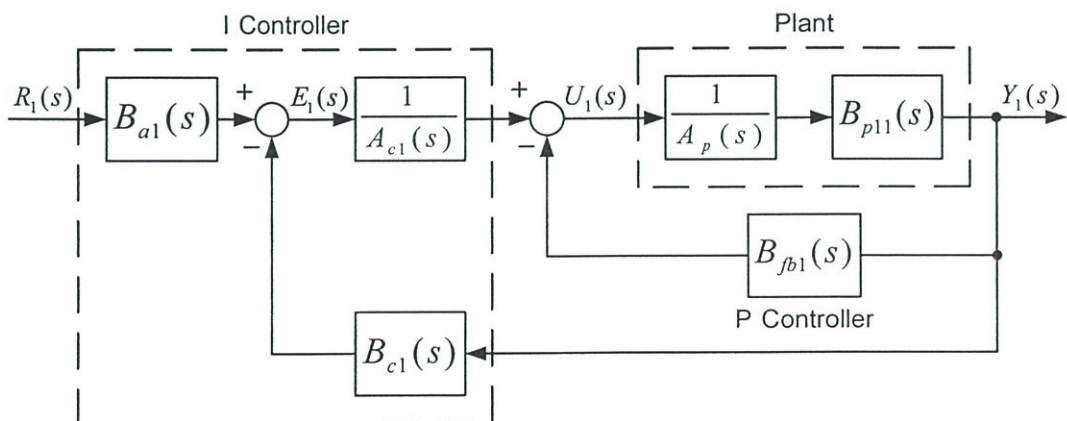
4.3 การออกแบบตัวควบคุม I-P ด้วยวิธี CDM สำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง

ในการออกแบบตัวควบคุม I-P ด้วยวิธี CDM สำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถังนั้น สามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณีด้วยกันคือกรณีเฟสต่ำสุดและกรณีเฟสไม่ต่ำสุด โดยในการออกแบบนั้นต้องทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของแต่ละวงรอบเอาต์พุตก่อน จากนั้นจึงนำสมการพหุนามคุณลักษณะของแต่ละวงรอบเอาต์พุต ไปเปรียบเทียบกับสมการพหุนามคุณลักษณะที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี CDM และทำการแก้สมการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมออกมา ซึ่งวิธีการออกแบบตัวควบคุม I-P ด้วยวิธี CDM สำหรับกรณีเฟสต่ำสุดและเฟสไม่ต่ำสุดอธิบายได้ดังต่อไปนี้

4.3.1 การออกแบบตัวควบคุม I-P ด้วยวิธี CDM สำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถังกรณีเฟสต่ำสุด

การออกแบบตัวควบคุม I-P ด้วยวิธี CDM สำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถังในกรณีเฟสต่ำสุดนั้นจะแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือการออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงรอบเอาต์พุต 1 ($Y_1(s) - R_1(s)$) และสำหรับวงรอบเอาต์พุต 2 ($Y_2(s) - R_2(s)$) โดยการออกแบบตัวควบคุมแต่ละวงรอบเอาต์พุตอธิบายได้ดังนี้

วงรอบเอาต์พุต 1 ($Y_1(s) - R_1(s)$)



รูปที่ 4.6 โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับวงรอบเอาต์พุต 1 กรณีเฟสต่ำสุด

โดยฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดสำหรับสำหรับวงรอบเอาต์พุต 1 คือ

$$\frac{Y_1(s)}{R_1(s)} = \frac{B_{a1}(s)B_{p11}(s)}{A_{c1}(s)(A_p(s) + B_{p11}(s)B_{fb1}(s)) + B_{c1}(s)B_{p11}(s)} \quad (4.17)$$

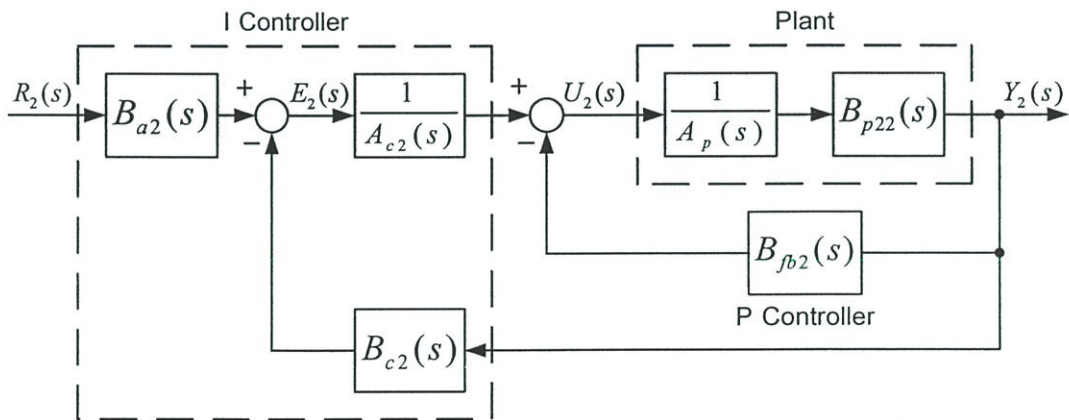
เมื่อแทน $B_{p11}(s), A_p(s)$ จากสมการ (4.9) $B_{c1}(s), B_{a1}(s), A_{c1}(s)$ จากสมการ (4.10) และ $B_{fb1}(s)$ จากสมการ (4.11) ลงในสมการ (4.17) จะได้

$$\frac{Y_1(s)}{R_1(s)} = \frac{K_{i1}\alpha_1 k_1 c_1}{T_1 s^2 + (1 + K_{p1}\alpha_1 k_1 c_1)s + K_{i1}\alpha_1 k_1 c_1} \quad (4.18)$$

และสมการพหุนามคุณลักษณะสำหรับวงรอบเอาต์พุต 1 คือ

$$P_{11}(s) = T_1 s^2 + (1 + K_{p1}\alpha_1 k_1 c_1)s + K_{i1}\alpha_1 k_1 c_1 \quad (4.19)$$

วงรอบเอาต์พุต 2 ($Y_2(s) - R_2(s)$)



รูปที่ 4.7 โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับวงรอบเอาต์พุต 2 กรณีเฟสต่ำสุด

โดยฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดสำหรับสำหรับวงรอบเอาต์พุต 2 คือ

$$\frac{Y_2(s)}{R_2(s)} = \frac{B_{a2}(s)B_{p22}(s)}{A_{c2}(s)(A_p(s) + B_{p22}(s)B_{fb2}(s)) + B_{c2}(s)B_{p22}(s)} \quad (4.20)$$

เมื่อแทน $B_{p22}(s), A_p(s)$ จากสมการ (4.9) $B_{c2}(s), B_{a2}(s), A_{c2}(s)$ จากสมการ (4.10) และ $B_{fb2}(s)$ จากสมการ (4.11) ลงในสมการ (4.20) จะได้

$$\frac{Y_2(s)}{R_2(s)} = \frac{K_{i2}\alpha_2 k_2 c_2}{T_2 s^2 + (1 + K_{p2}\alpha_2 k_2 c_2)s + K_{i2}\alpha_2 k_2 c_2} \quad (4.21)$$

และสมการพหุนามคุณลักษณะสำหรับวงรอบเอาต์พุต2 คือ

$$P_{22}(s) = T_2 s^2 + (1 + K_{p2}\alpha_2 k_2 c_2)s + K_{i2}\alpha_2 k_2 c_2 \quad (4.22)$$

จากฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดสำหรับวงรอบเอาต์พุต1 และวงรอบเอาต์พุต2 จะสังเกตเห็นได้ว่าสมการพหุนามคุณลักษณะของระบบควบคุมที่ออกแบบนั้นเป็นแบบอันดับ2 ซึ่งจะสมมูลกับฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดที่ออกแบบด้วยวิธี CDM ดังนี้

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{a_0}{a_0 \left(\frac{\tau^2}{\gamma_1} s^2 + \tau s + 1 \right)} \quad (4.23)$$

และสมการพหุนามคุณลักษณะที่ออกแบบด้วยวิธี CDM คือ

$$P(s) = a_0 \left(\frac{\tau^2}{\gamma_1} s^2 + \tau s + 1 \right) \quad (4.24)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการ (4.19), (4.22) กับสมการ (4.24) จะสังเกตเห็นว่ามีตัวแปรอยู่ 5 ตัว คือ K_i, K_p, a_0, γ_1 และ τ แต่มีสมการที่ต้องทำการแก้เพื่อหาค่าพารามิเตอร์อยู่ 3 สมการ ดังนั้นจึงทำให้สามารถที่จะกำหนดค่าตัวแปร 2 ตัวได้อย่างอิสระ โดยในการออกแบบนี้จะทำการกำหนดให้พารามิเตอร์ γ_1 และ τ เป็นตัวแปรอิสระ จากนั้นจึงทำการแก้สมการเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ K_i, K_p และ a_0 ซึ่งสอดคล้องกับการออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะด้วยวิธี CDM

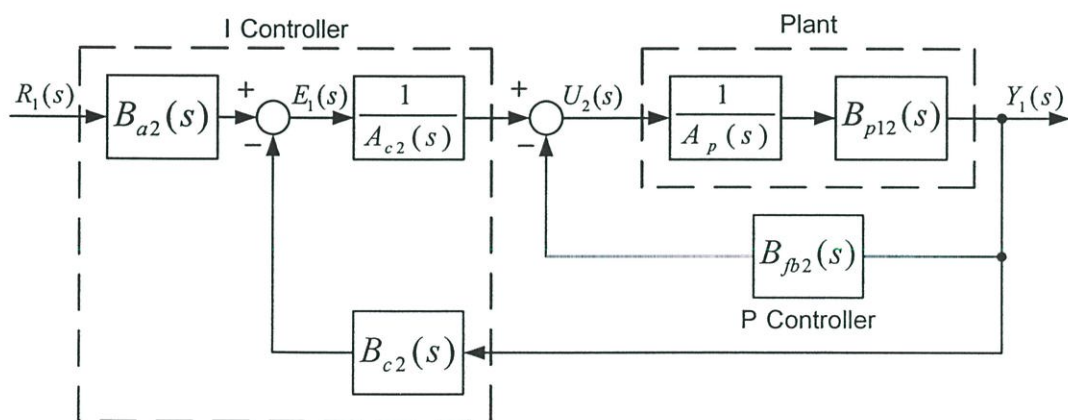
ในการออกแบบตัวควบคุม I-P ด้วยวิธี CDM สำหรับตัวควบคุมที่1และตัวควบคุมที่2 จะทำการออกแบบแยกจากกัน แต่จะมีขั้นตอนและวิธีในการออกแบบที่เหมือนกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. กำหนดค่าเวลาเข้าที่ t_s และหาค่าคงตัวเวลาสมมูล τ จากความสัมพันธ์ในสมการ (3.61) จากนั้นกำหนดค่าตรรกยะเสถียรภาพ γ_1 ที่เหมาะสมกับกระบวนการ
2. หาสมการพหุนามคุณลักษณะที่ออกแบบด้วยวิธี CDM ซึ่งอยู่ในรูปแบบสมการ (4.24)
3. เทียบสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะ ที่ได้จากการออกแบบในขั้นตอนที่ 2 (สมการ 4.24) กับสมการพหุนามคุณลักษณะสำหรับวงรอบเอาต์พุต 1 (สมการ 4.19) และสำหรับวงรอบเอาต์พุต 2 (สมการ 4.22) จากนั้นแก้สมการเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมตัวที่ 1 และตัวควบคุมตัวที่ 2 ซึ่งก็คือค่า K_I และ K_P

4.3.2 การออกแบบตัวควบคุม I-P ด้วยวิธี CDM สำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด

การออกแบบตัวควบคุม I-P ด้วยวิธี CDM สำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงในกรณีเฟสไม่ต่ำสุดนั้นก็จะแบ่งได้เป็น 2 ส่วนเช่นเดียวกับการออกแบบในกรณีเฟสต่ำสุดคือการออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงรอบเอาต์พุต 1 ($Y_1(s) - R_1(s)$) และสำหรับวงรอบเอาต์พุต 2 ($Y_2(s) - R_2(s)$) โดยการออกแบบตัวควบคุมแต่ละวงรอบเอาต์พุตอธิบายได้ดังนี้

วงรอบเอาต์พุต 1 ($Y_1(s) - R_1(s)$)



รูปที่ 4.8 โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับวงรอบเอาต์พุต 1 กรณีเฟสไม่ต่ำสุด

โดยฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดสำหรับสำหรับวงรอบเอาต์พุต 1 คือ

$$\frac{Y_1(s)}{R_1(s)} = \frac{B_{a2}(s)B_{p12}(s)}{A_{c2}(s)(A_p(s) + B_{p12}(s)B_{jb2}(s)) + B_{c2}(s)B_{p12}(s)} \quad (4.25)$$

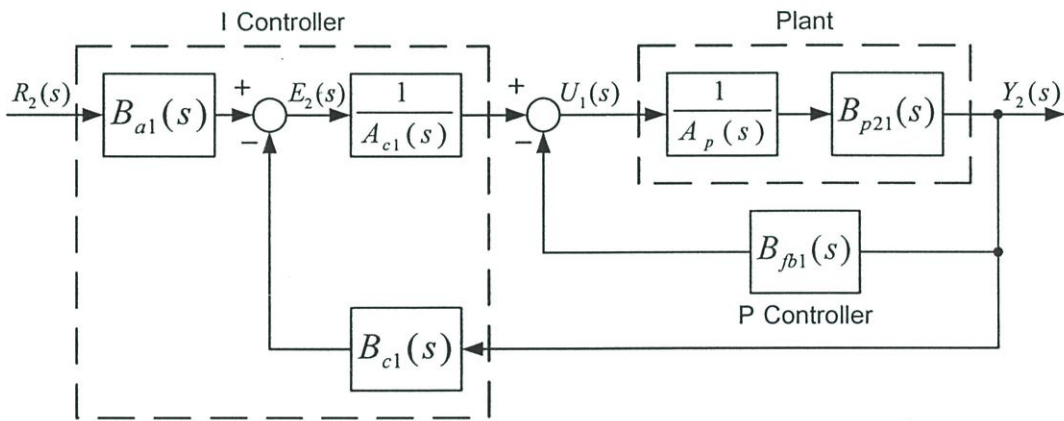
เมื่อแทน $B_{p12}(s), A_p(s)$ จากสมการ(4.14) $B_{c2}(s), B_{a2}(s), A_{c2}(s)$ จากสมการ(4.15) และ $B_{fb2}(s)$ จากสมการ (4.16) ลงในสมการ (4.25) จะได้

$$\frac{Y_1(s)}{R_1(s)} = \frac{K_{i2}(1-\alpha_2)k_2c_1}{T_1T_3s^3 + (T_1 + T_3)s^2 + (1+K_{p2}(1-\alpha_2)k_2c_1)s + K_{i2}(1-\alpha_2)k_2c_1} \quad (4.26)$$

และสมการพหุนามคุณลักษณะสำหรับวงรอบเอาต์พุต1 คือ

$$P_{12}(s) = T_1T_3s^3 + (T_1 + T_3)s^2 + (1+K_{p2}(1-\alpha_2)k_2c_1)s + K_{i2}(1-\alpha_2)k_2c_1 \quad (4.27)$$

วงรอบเอาต์พุต2 ($Y_2(s) - R_2(s)$)



รูปที่4.9 โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับวงรอบเอาต์พุต 2 กรณีเฟสไม่ต่ำสุด

โดยฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดสำหรับสำหรับวงรอบเอาต์พุต2 คือ

$$\frac{Y_2(s)}{R_2(s)} = \frac{B_{a1}(s)B_{p21}(s)}{A_{c1}(s)(A_p(s) + B_{p21}(s)B_{fb1}(s)) + B_{c1}(s)B_{p21}(s)} \quad (4.28)$$

เมื่อแทน $B_{p21}(s), A_p(s)$ จากสมการ(4.14) $B_{c1}(s), B_{a1}(s), A_{c1}(s)$ จากสมการ(4.15) และ $B_{fb1}(s)$ จากสมการ (4.16) ลงในสมการ (4.28) จะได้

$$\frac{Y_2(s)}{R_2(s)} = \frac{K_{i1}(1-\alpha_1)k_1c_2}{T_2T_4s^3 + (T_2 + T_4)s^2 + (1+K_{p1}(1-\alpha_1)k_1c_2)s + K_{i2}(1-\alpha_1)k_1c_2} \quad (4.29)$$

และสมการพหุนามคุณลักษณะสำหรับวงรอบเอาต์พุต1 คือ

$$P_{21}(s) = T_2 T_4 s^3 + (T_2 + T_4) s^2 + (1 + K_{p1}(1 - \alpha_1) k_1 c_2) s + K_{i2}(1 - \alpha_1) k_1 c_2 \quad (4.30)$$

จากฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดสำหรับวงรอบเอาต์พุต1และวงรอบเอาต์พุต2 จะสังเกตเห็นได้ว่าสมการพหุนามคุณลักษณะของระบบควบคุมที่ออกแบบนั้นเป็นแบบอันดับ3 ซึ่งจะสมมูลกับฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดที่ออกแบบด้วยวิธี CDM ดังนี้

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{a_0}{a_0 \left(\frac{\tau^3}{\gamma_1^2 \gamma_2} s^3 + \frac{\tau^2}{\gamma_1} s^2 + \tau s + 1 \right)} \quad (4.31)$$

และสมการพหุนามคุณลักษณะที่ออกแบบด้วยวิธี CDM คือ

$$P(s) = a_0 \left(\frac{\tau^3}{\gamma_1^2 \gamma_2} s^3 + \frac{\tau^2}{\gamma_1} s^2 + \tau s + 1 \right) \quad (4.32)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการ (4.27), (4.30) กับสมการ (4.32) จะสังเกตเห็นได้ว่ามีตัวแปรอยู่ 6 ตัว คือ K_i , K_p , a_0 , γ_1 , γ_2 และ τ แต่มีสมการที่ต้องทำการแก้เพื่อหาค่าพารามิเตอร์อยู่ 4 สมการ ดังนั้นจึงทำให้สามารถที่จะกำหนดค่าตัวแปรอย่างอิสระได้เพียง 2 ตัวแปร ซึ่งทำให้ต้องเลือกว่าจะทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ใดใน 3 ตัวนี้เป็นตัวแปรอิสระคือ γ_1 , γ_2 และ τ โดยในการออกแบบตัวควบคุมนี้จะกำหนดให้พารามิเตอร์ γ_1 และ γ_2 เป็นตัวแปรอิสระ จากนั้นจึงทำการแก้สมการเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ K_i , K_p , a_0 และ τ ซึ่งสอดคล้องกับการออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะด้วยวิธี CDM

ในการออกแบบตัวควบคุม I-P ด้วยวิธี CDM สำหรับตัวควบคุมที่1และตัวควบคุมที่2 จะทำการออกแบบแยกจากกัน แต่จะมีขั้นตอนและวิธีในการออกแบบที่เหมือนกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. กำหนดค่าดรชนี้เสถียรภาพ γ_1 และ γ_2 ที่เหมาะสมกับกระบวนการ
2. หาสมการพหุนามคุณลักษณะที่ออกแบบด้วยวิธี CDM ซึ่งอยู่ในรูปแบบสมการ (4.32) โดยติดตัวแปร τ ไว้
3. เทียบสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะ ที่ได้จากการออกแบบในขั้นตอนที่2 (สมการ 4.32) กับสมการพหุนามคุณลักษณะสำหรับวงรอบเอาต์พุต1 (สมการ 4.27)

และสำหรับวงรอบเอาต์พุต 2 (สมการ 4.30) จากนั้นแก้สมการเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมตัวที่ 1, ตัวควบคุมตัวที่ 2 และค่าคงตัวเวลาสมมูล ซึ่งก็คือ K_i , K_p และ τ

4.4 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงโครงสร้างของระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถังและการออกแบบตัวควบคุมแบบ I-P ด้วยวิธี CDM ทั้งในกรณีเฟสต่ำสุดและเฟสไม่ต่ำสุด โดยจะสังเกตเห็นว่าการออกแบบตัวควบคุมแบบ I-P ด้วยวิธี CDM ในกรณีเฟสต่ำสุดนั้นสามารถที่จะกำหนดค่าดรwxนี้เสถียรภาพ γ_i และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ได้ตามที่ต้องการ ในขณะที่กรณีเฟสไม่ต่ำสุดนั้นไม่สามารถกำหนดค่าดรwxนี้เสถียรภาพ γ_i และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ให้มีค่าตามที่ต้องการพร้อมกันได้ เนื่องจากพารามิเตอร์ของตัวควบคุมไม่เพียงพอ

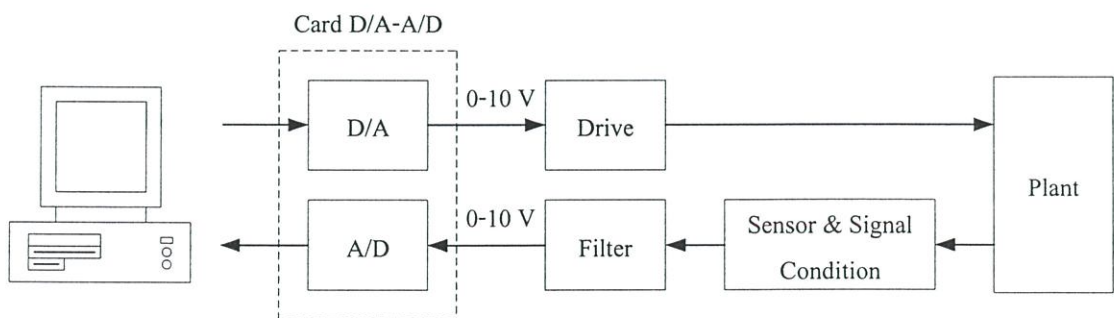
ในบทต่อไปจะกล่าวถึงโครงสร้างของระบบควบคุม และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำการทดลองควบคุมกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง รวมถึงพารามิเตอร์และจุดการทำงานของกระบวนการ รวมไปถึงการทดลองจำลองการทำงานกับการทดลองการทำงานกับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถังทั้งในกรณีเฟสต่ำสุดและเฟสไม่ต่ำสุด

บทที่ 5

การจำลองและการทดลองระบบควบคุม

ในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างของระบบควบคุม และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการควบคุมกับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง รวมถึงพารามิเตอร์และจุดการทำงานของกระบวนการทั้งในกรณีเฟสต่ำสุดและเฟสไม่ต่ำสุด เพื่อนำไปหาเมทริกฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการซึ่งจะนำไปสู่การวิเคราะห์กระบวนการและการออกแบบตัวควบคุมแบบ I-P ด้วยวิธี CDM สำหรับในแต่ละกรณี หลังจากนั้นจะนำตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไปทำการทดสอบโดยจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB ทั้งสองกรณี โดยในกรณีเฟสต่ำสุดนั้นมีขั้นตอนในการทดสอบดังนี้ ขั้นตอนแรกทำการทดสอบผลตอบสนองของระบบควบคุม เมื่อกำหนดให้อินพุตอ้างอิงของระบบควบคุมเป็นแบบขั้นบันได ขั้นตอนที่สองทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของการปรับค่าดรรรชนีเสถียรภาพ γ_i ว่ามีผลอย่างไรต่อผลตอบสนองของระบบควบคุม และขั้นตอนที่สามทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของการปรับค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ว่ามีผลอย่างไรต่อผลตอบสนองของระบบควบคุม และสำหรับในกรณีเฟสไม่ต่ำสุดนั้นจะมีขั้นตอนในการทดสอบดังนี้ ขั้นตอนแรกทำการทดสอบผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อกำหนดให้อินพุตอ้างอิงของระบบควบคุมเป็นแบบขั้นบันได และขั้นตอนที่สองทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของการปรับค่าดรรรชนีเสถียรภาพ γ_i ว่ามีผลอย่างไรต่อผลตอบสนองของระบบควบคุม ซึ่งหลังจากที่ได้ทำการศึกษาถึงผลจากการจำลองการทำงานตามขั้นตอนดังที่ได้กล่าวมาแล้วจะนำตัวควบคุมที่ได้ออกแบบมาทำการควบคุมกับกระบวนการจริง โดยมีขั้นตอนการทดลองเช่นเดียวกันกับขั้นตอนการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB

5.1 โครงสร้างระบบควบคุมของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง



รูปที่ 5.1 โครงสร้างระบบควบคุมของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง

รูปที่ 5.1 แสดงโครงสร้างระบบควบคุมของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถังซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้ ส่วนแรกคือคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) จะทำหน้าที่ในการรับและส่งข้อมูลจากอินเตอร์เฟซการ์ด (Card D/A-A/D) โดยจะนำข้อมูลที่ได้อาประมวลผลเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมให้แก่ระบบควบคุม ส่วนที่สองคืออินเตอร์เฟซการ์ดเป็นการ์ดแบบ ISA โดยจะทำหน้าที่ในการรับสัญญาณแบบอนาล็อกจากอุปกรณ์วัดระดับน้ำของถังที่ 1 และถังที่ 2 ที่ผ่านอุปกรณ์กรองความถี่ต่ำมาแล้วจึงทำการแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิตอล เพื่อส่งให้คอมพิวเตอร์ทำการประมวลผลในการสร้างสัญญาณควบคุม จากนั้นจะทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณควบคุมซึ่งอยู่ในรูปแบบดิจิตอลให้เป็นแบบอนาล็อกเพื่อส่งให้กับวงจรขับกระแสของปั้มน้ำทั้งสองวงจร ส่วนที่สามคืออุปกรณ์ขับกระแสของปั้มน้ำมีอยู่ด้วยกันสองชุด โดยเป็นวงจรขับกระแสแบบเชิงเส้น (Linear Amplifier) แบบเดียวกันทั้งสองชุด ทำหน้าที่ในการรับสัญญาณควบคุมที่อยู่ในรูปแบบอนาล็อกจากอินเตอร์เฟซการ์ดแล้วขยายขนาดสัญญาณแรงดันให้มากขึ้นเพื่อจ่ายให้กับปั้มน้ำทั้งสองตัวและส่วนสุดท้ายคืออุปกรณ์วัดระดับน้ำของถังที่ 1 , ถังที่ 2 และอุปกรณ์กรองความถี่ต่ำ โดยเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการวัดระดับน้ำจะใช้หลักการในการวัดแบบความดันแตกต่าง ซึ่งสัญญาณที่วัดได้จะถูกนำมาขยายขนาดของสัญญาณให้มากขึ้น และทำการส่งสัญญาณที่วัดได้ให้กับอุปกรณ์กรองความถี่ต่ำเพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนให้ลดน้อยลง จากนั้นจึงส่งสัญญาณซึ่งอยู่ในรูปแบบอนาล็อกให้กับอินเตอร์เฟซการ์ดต่อไป รายละเอียดของอุปกรณ์และวงจรที่ใช้ในการทดลองนั้นแสดงในภาคผนวก ก.

5.2 พารามิเตอร์และจุดการทำงานของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง

จากสมการที่ 2.1 จะสังเกตได้ว่า พารามิเตอร์ของกระบวนการสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ พารามิเตอร์ที่ทราบค่ามีลักษณะเป็นค่าคงที่ ประกอบด้วย A_i, a_{oi} โดย $i = 1 \sim 4$ และ g แสดงได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ของกระบวนการ

A_1, A_2, A_3, A_4	$[cm^2]$	69.3978
$a_{o1}, a_{o2}, a_{o3}, a_{o4}$	$[cm^2]$	0.1963
g	$[cm/s^2]$	981

และพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่านั้นมีลักษณะเป็นตัวแปรซึ่งขึ้นอยู่กับข้อกำหนดค่าประกอบด้วย α_i, u_i โดย $i = 1 \sim 2$ และ β_i โดย $i = 1 \sim 4$ ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดจุดการทำงานของกระบวนการ โดยในการทดลองนี้จะเลือกจุดการทำงานของกระบวนการ 2 จุด คือจุดการทำงานที่กระบวนการมี

คุณลักษณะเป็นแบบเฟสต่ำสุด (P_-) และจุดการทำงานที่กระบวนการมีคุณลักษณะเป็นแบบเฟสไม่ต่ำสุด (P_+)

ตารางที่ 5.2 จุดการทำงานของกระบวนการในกรณีเฟสต่ำสุด (P_-) และเฟสไม่ต่ำสุด (P_+)

	P_-	P_+
(h_1^0, h_2^0) [cm]	(11.1, 11.6)	(10.8, 11.5)
(h_3^0, h_4^0) [cm]	(0.68, 0.39)	(7.33, 3.99)
(u_1^0, u_2^0) [V]	(5, 5)	(5, 5)
(k_1, k_2) [cm ³ / V · s]	(2.6972, 2.3949)	(2.7887, 2.3950)
(α_1, α_2)	(0.791, 0.772)	(0.328, 0.237)
(β_1, β_2)	(0.4759, 0.4124)	(0.4759, 0.4124)
(β_3, β_4)	(0.3837, 0.5388)	(0.3837, 0.5388)

สำหรับจุดการทำงานในกรณีเฟสต่ำสุด (P_-) และเฟสไม่ต่ำสุด (P_+) จะได้ค่าคงตัวเวลาดังนี้

	(P_-)	(P_+)
(T_1, T_2)	(111.7417, 141.8047)	(110.2213, 131.2354)
(T_3, T_4)	(34.2382, 18.4475)	(112.6251, 59.1654)

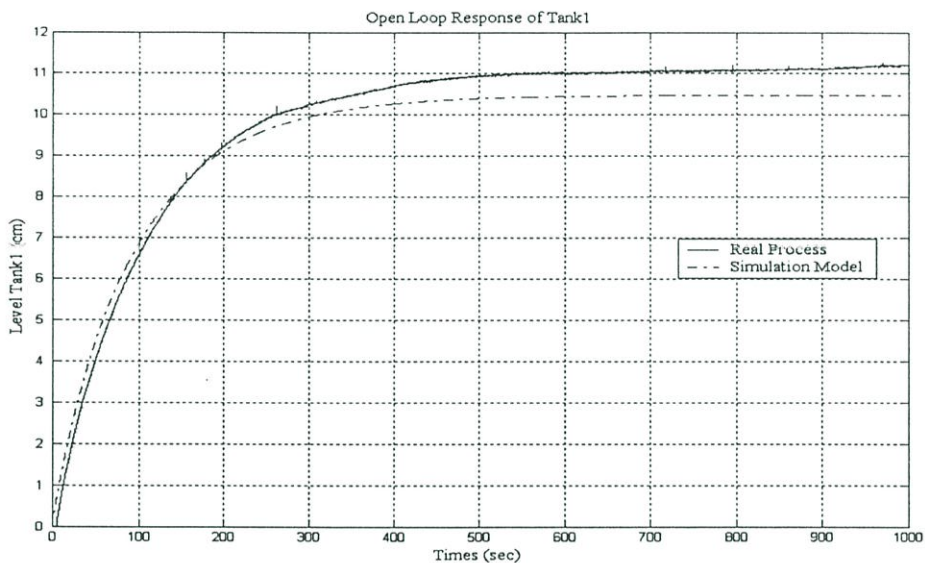
เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แทนในสมการ (2.4) จะได้เมทริกฟังก์ชันถ่ายโอน ณ จุดการทำงานในกรณีเฟสต่ำสุดและเฟสไม่ต่ำสุดดังนี้

$$G_{p-}(s) = \begin{bmatrix} \frac{3.4353}{(111.7417s+1)} & \frac{0.8792}{(111.7417s+1)(34.2382s+1)} \\ \frac{1.0707}{(131.8047s+1)(18.4475s+1)} & \frac{3.5115}{(131.8047s+1)} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

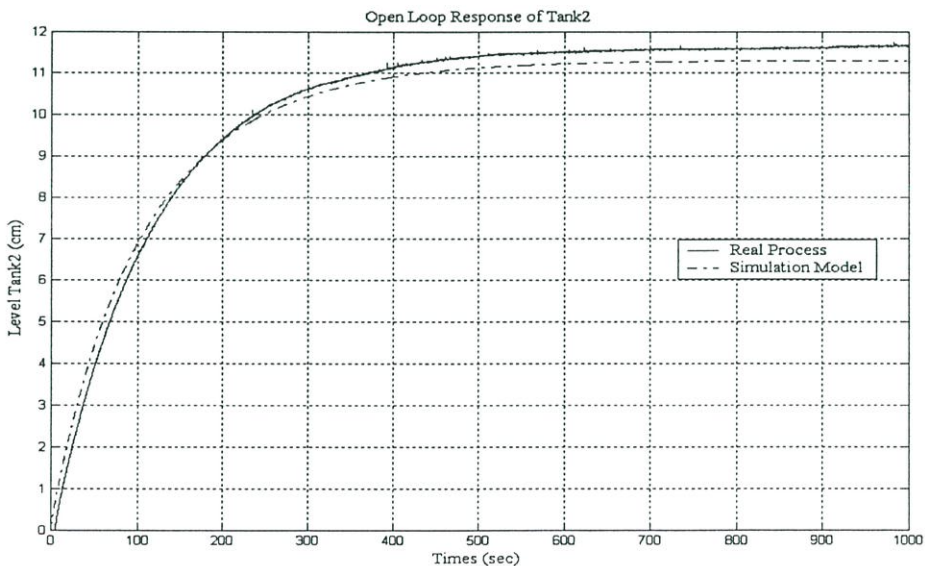
และ

$$G_{p+}(s) = \begin{bmatrix} \frac{1.4528}{(110.2213s+1)} & \frac{2.9025}{(110.2213s+1)(112.6251s+1)} \\ \frac{3.5439}{(131.2354s+1)(59.1654s+1)} & \frac{1.0734}{(131.2354s+1)} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

สำหรับการทดสอบความถูกต้องหรือความแม่นยำของแบบจำลอง ว่ามีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จากกระบวนการจริงมากน้อยเพียงใด จะทำการทดสอบโดยใช้แบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (2.1) เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากกระบวนการจริง โดยจะทำการจ่ายแรงดันอินพุตขนาด 5 โวลต์ให้กับอุปกรณ์ขับเคลื่อนของปั้มน้ำทั้งสองตัว ซึ่งการเปรียบเทียบผลจากกระบวนการจริงกับผลจากแบบจำลองในกรณีเฟสต่ำสุดและเฟสไม่ต่ำสุด แสดงได้ดังรูปที่ 5.2 และ 5.3



(ก)

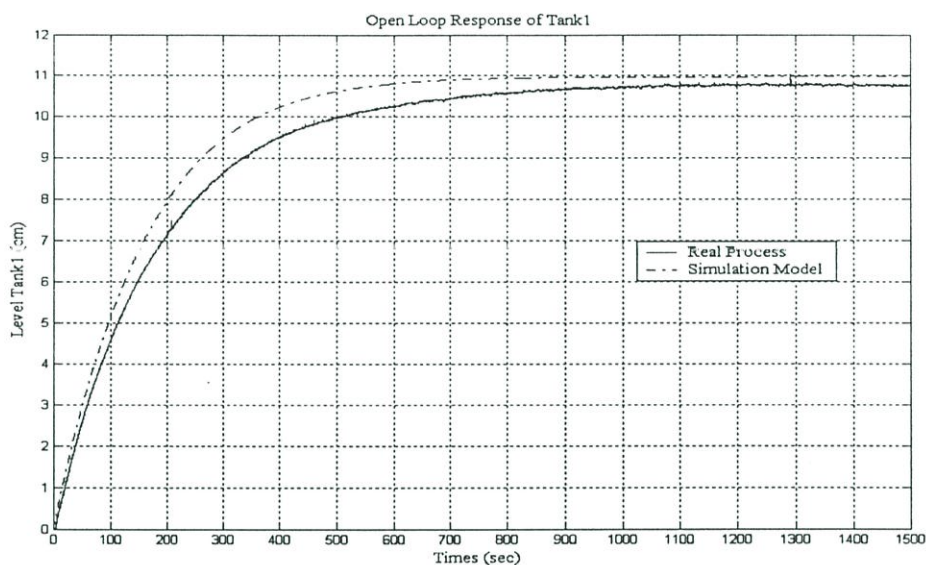


(ข)

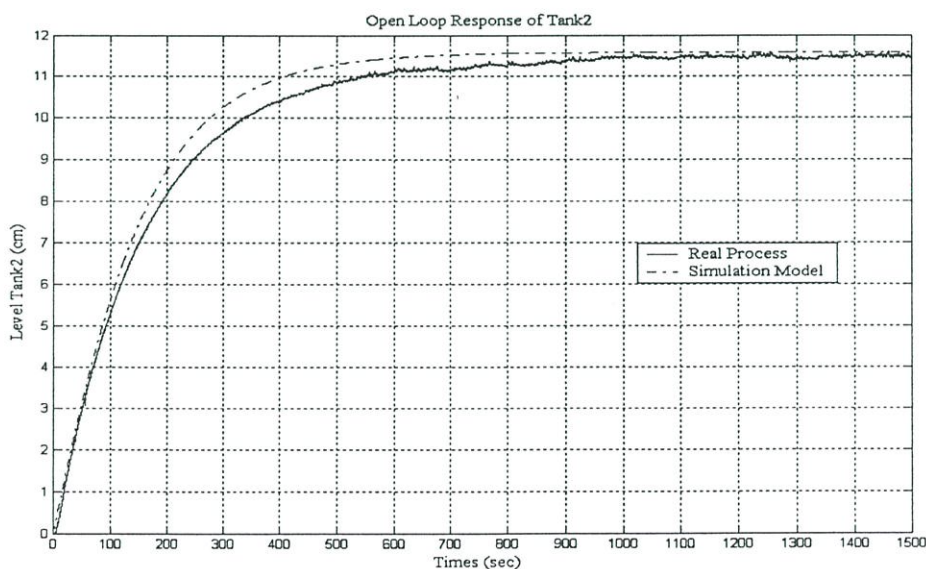
(ก) ระดับน้ำของถังที่ 1 (ข) ระดับน้ำของถังที่ 2

รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบผลตอบสนองของวงเปิดของกระบวนการกับแบบจำลองในกรณีเฟสต่ำสุด

จากรูปที่ 5.2 (ก) และ รูปที่ 5.2 (ข) จะสังเกตเห็นได้ว่าผลตอบสนองวงเปิดของแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับถังที่ 1 และถังที่ 2 นั้นจะใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมาก โดยผลตอบสนองจากแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นที่สภาวะคงตัว จะมีค่าน้อยกว่าผลตอบสนองที่ได้จากกระบวนการจริง ซึ่งความแตกต่างหรือความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวระหว่างผลตอบสนองจากแบบจำลองไม่เชิงเส้นกับกระบวนการจริงจะมีค่าไม่เกิน 10%



(ก)



(ข)

(ก) ระดับน้ำของถังที่ 1 (ข) ระดับน้ำของถังที่ 2

รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบผลตอบสนองวงเปิดของกระบวนการกับแบบจำลองในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด

จากรูปที่ 5.3 (ก) และ รูปที่ 5.3 (ข) จะสังเกตเห็นได้ว่าผลตอบสนองวงเปิดของแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับถึงที่ 1 และถึงที่ 2 นั้นจะใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมาก โดยผลตอบสนองจากแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นที่สภาวะคงตัว จะมีค่าที่มากกว่าผลตอบสนองที่ได้จากกระบวนการจริง ซึ่งความแตกต่างหรือความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวระหว่างผลตอบสนองจากแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นกับกระบวนการจริงจะมีค่าไม่เกิน 10%

5.3 กระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงกรณีเฟสต่ำสุด

5.3.1 การวิเคราะห์กระบวนการ

5.3.1.1 ตำแหน่งของโพลและซีโรของกระบวนการ

การหาตำแหน่งโพลและซีโรของกระบวนการนั้นสามารถทำได้โดย การหาดีเทอร์มิแนนท์ของเมทริกซ์ฟังก์ชันถ่ายโอนดังได้อธิบายมาแล้วในหัวข้อที่ 2.2.1 และดีเทอร์มิแนนท์ของเมทริกซ์ฟังก์ชันถ่ายโอนในสมการ (5.1) แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \det G_{p-}(s) &= \frac{12.978 \cdot [(34.2382s + 1)(18.4475s + 1) - 0.922]}{(111.7417s + 1)(131.8047s + 1)(34.2382s + 1)(18.4475s + 1)} \\ &= \frac{(s + 0.0584)(s + 0.025)}{(s + 0.0089)(s + 0.0076)(s + 0.0292)(s + 0.0542)} \end{aligned} \quad (5.3)$$

จากสมการ (5.3) จะเห็นได้ว่ากระบวนการจะมีโพลอยู่ที่ตำแหน่ง

$$p_1 = -0.0089, p_2 = -0.0076, p_3 = -0.0292, p_4 = -0.0542$$

และซีโรอยู่ที่ตำแหน่ง

$$z_1 = -0.0584, z_2 = -0.025$$

ซึ่งซีโร z_1 และซีโร z_2 จะมีทิศทางของซีโรเอาต์พุตและซีโรอินพุตคือ

	z_1	z_2
ทิศทางของซีโรเอาต์พุต	[0.957 ; 0.2902]	[-0.2478 ; -0.9688]
ทิศทางของซีโรอินพุต	[-0.4116 ; 0.9114]	[0.8705 ; -0.4922]

โดยซีโร z_1 นั้นจะมีผลกระทบต่อเอาต์พุตที่หนึ่งมากกว่าเอาต์พุตที่สอง และซีโร z_2 จะมีผลกระทบต่อเอาต์พุตที่สองมากกว่าเอาต์พุตที่หนึ่ง

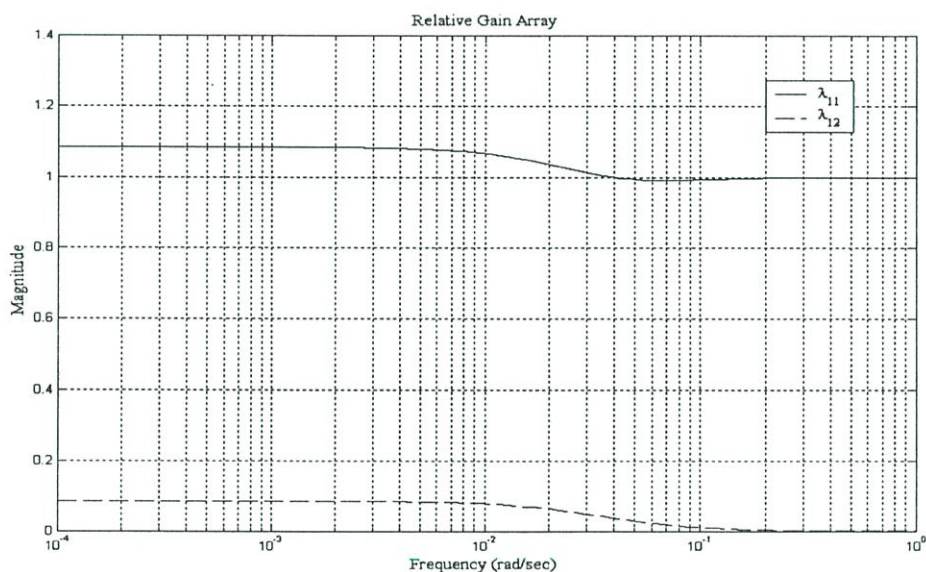
5.3.1.2 การวัดการอินเตอร์แอคชัน

การวัดการอินเตอร์แอคชันของกระบวนการจะใช้วิธี RGA ดังได้อธิบายมาแล้วในหัวข้อที่ 2.2.2 จากสมการ (5.1) จะได้ λ_{11} และ $\lambda_{12} = (1 - \lambda_{11})$ คือ

$$\lambda_{11} = \frac{(631.6091s^2 + 52.6857s + 1)}{(631.6091s^2 + 52.6857s + 0.922)} \quad (5.4)$$

$$\lambda_{12} = \frac{-0.078}{(631.6091s^2 + 52.6857s + 0.922)} \quad (5.5)$$

สมการที่ (5.4) และ (5.5) สามารถนำไปพล็อตกราฟเพื่อดูผลตอบสนองทางความถี่ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 5.4



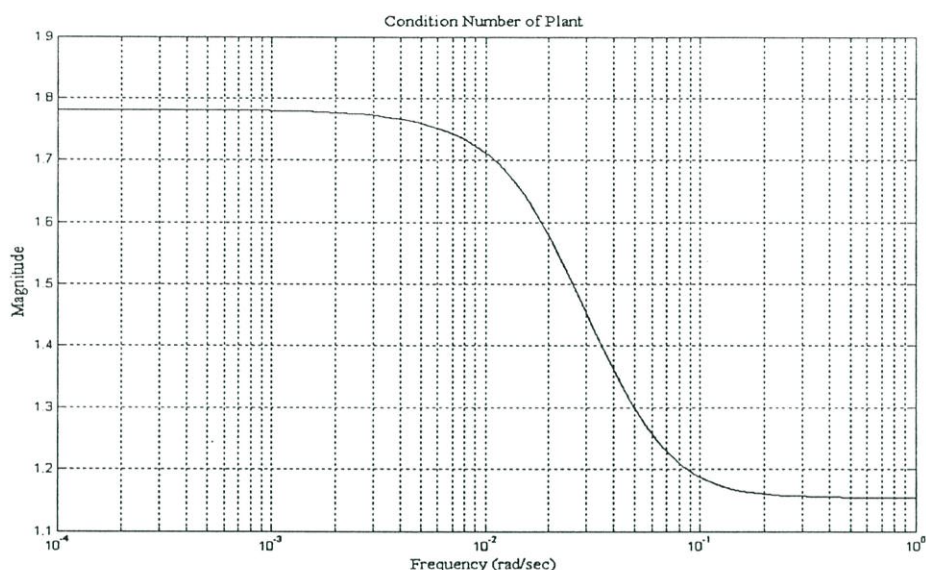
รูปที่ 5.4 RGA ของกระบวนการในกรณีเฟสต่ำสุด

จากรูปที่ 5.4 จะสังเกตเห็นได้ว่าผลตอบสนองทางความถี่ของ λ_{11} และ λ_{12} จะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยเครื่องหมายของ λ_{11} และ λ_{12} ในช่วงความถี่ต่ำ ($j\omega \rightarrow 0$) และในช่วงความถี่สูง ($j\omega \rightarrow \infty$) จะมีเครื่องหมายเป็นบวกเหมือนกัน ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่ากระบวนการเป็นแบบเฟสต่ำสุด และเมื่อทำการพิจารณาที่ในช่วงความถี่ต่ำ ($j\omega \rightarrow 0$) จะได้ RGA ของกระบวนการคือ

$$\Lambda(G_-(0)) = \begin{bmatrix} 1.0842 & -0.0842 \\ -0.0842 & 1.0842 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

5.3.1.3 ความไวของกระบวนการ

ความไวของกระบวนการนั้นสามารถวัดได้ โดยดูที่ค่า Condition Number (ϵ) ดังได้อธิบายมาแล้วในหัวข้อ 2.2.3 และผลตอบสนองทางความถี่ของค่า Condition Number (ϵ) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 ความไวต่อความไม่แน่นอนของกระบวนการในกรณีเฟสต่ำสุด

จากรูปที่ 5.5 จะสังเกตเห็นได้ว่าค่า Condition Number ซึ่งเป็นตัวชี้วัดว่ากระบวนการมีความไวมากน้อยเพียงใด จะมีค่าน้อยในช่วงความถี่สูงและมีค่าที่มากในช่วงความถี่ต่ำ ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่ากระบวนการนั้นจะมีความไวในช่วงความถี่ต่ำ (Steady State) มากกว่าในช่วงความถี่สูงและค่า Condition Number ในช่วงความถี่ต่ำนั้นจะมีค่าเท่ากับ 1.7808 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการในกรณีเฟสต่ำสุด ณ จุดการทำงานนี้นั้นสามารถทำการควบคุมได้ไม่ยากนักและไม่เป็นกระบวนการแบบ ill-Condition

5.3.2 การออกแบบตัวควบคุม

การออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงในกรณีเฟสต่ำสุดนั้น จะทำการออกแบบตามวิธีที่ได้อธิบายมาในหัวข้อที่ 4.3.1 ซึ่งจะกำหนดให้ค่าדרชนีเสถียรภาพและค่าคงตัวเวลาสมมูลมีค่าที่เท่ากันสำหรับวงรอบเอาต์พุต 1 และวงรอบเอาต์พุต 2 คือกำหนดให้ค่าดรชนีเสถียรภาพ $\gamma_1 = 2.5$ และค่าคงตัวเวลาสมมูล $\tau = 40$ เมื่อกำหนดให้ค่าเวลาเข้าที่ $t_s = 100$ วินาที $\tau = (t_s / 2.5)$ ซึ่งจะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม I-P ที่ 1 และตัวควบคุม I-P ที่ 2 แสดงได้ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมในกรณีเฟสต่ำสุด

ตัวควบคุม	γ_1	τ (sec)	K_i	K_p
I-P 1	2.5	40	0.0508	1.7419
I-P 2	2.5	40	0.0586	2.0612

5.3.3 การจำลองระบบควบคุม

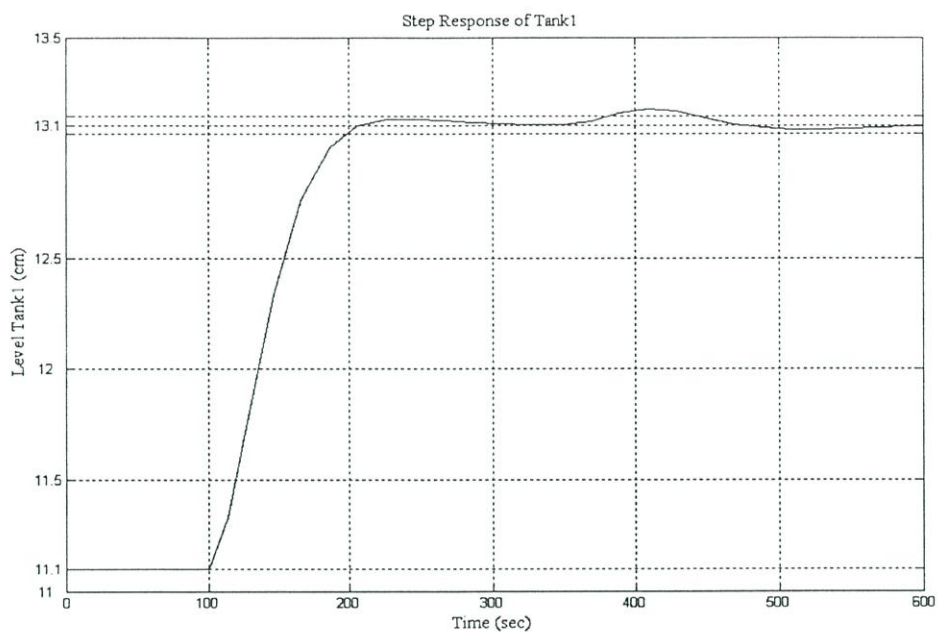
5.3.3.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได

การจำลองการควบคุมระบบควบคุมกระบวนการระดับน้ำ 4 ถังเพื่อดูผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได มีจุดประสงค์เพื่อต้องการทดสอบตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมระบบว่า มีประสิทธิภาพในการติดตามสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันไดเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่ ก่อนที่จะนำตัวควบคุมที่ออกแบบได้ไปทดลองกับกระบวนการจริง โดยการจำลองการทำงานจะกำหนดให้ระดับน้ำในถังที่ 1 และถังที่ 2 มีการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าเดิม 2 เซนติเมตร โดยระดับน้ำในถังที่ 1 จะเปลี่ยนจากเดิม 11.1 เซนติเมตรเป็น 13.1 เซนติเมตร และระดับน้ำในถังที่ 2 จะเปลี่ยนจากเดิม 11.6 เซนติเมตรเป็น 13.6 เซนติเมตร ซึ่งระดับน้ำในถังที่ 1 และถังที่ 2 จะมีการเปลี่ยนแปลงที่เวลา 100 วินาที และ 350 วินาทีตามลำดับ ผลตอบสนองของระบบควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 5.6 และสัญญาณควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 5.7

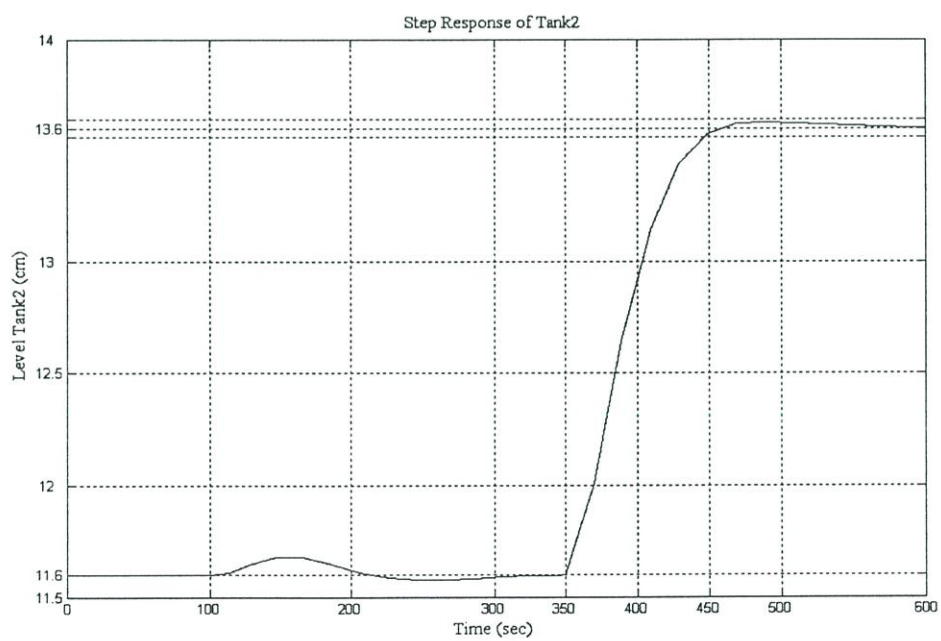
จากรูปที่ 5.6 (ก) และรูปที่ 5.6 (ข) จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบ I-P สามารถควบคุมให้ระดับน้ำเปลี่ยนไปยังระดับที่ 13.1 เซนติเมตร และ 13.6 เซนติเมตร สำหรับถังที่ 1 และถังที่ 2 ได้ตามที่ต้องการ โดยผลตอบสนองของระบบควบคุมจะมีค่าเวลาเข้าที่ตามที่ต้องการคือ 100 วินาทีสำหรับทั้ง 2 ถัง , มีค่าพุ่งเกินเล็กน้อย, ไม่มีค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัว และผลจากการอินเตอร์แอคชันระหว่างวงรอบควบคุมเมื่อสัญญาณอ้างอิงของระดับน้ำในถังที่ 1 เปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ระดับน้ำในถังที่ 2 เปลี่ยนแปลงไปจากระดับอ้างอิงเดิมมากที่สุด 8 % และกลับเข้าสู่ระดับอ้างอิงเดิมภายในเวลา 102 วินาที เมื่อสัญญาณอ้างอิงของระดับน้ำในถังที่ 2 เปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ระดับน้ำในถังที่ 1 เปลี่ยนแปลงไปจากระดับอ้างอิงเดิมมากที่สุด 7.3 % และกลับเข้าสู่ระดับอ้างอิงเดิมภายในเวลา 108 วินาที โดยสมรรถนะของระบบควบคุมสามารถแสดงสรุปได้ดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 สมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองในกรณีเฟสต่ำสุด

ผลตอบสนองของระบบควบคุม	t_s (sec)	P_o (%)	Interaction (%)	t_s of Interaction (sec)
ถังที่ 1	100	1.35	7.3	108
ถังที่ 2	100	1.42	8	102



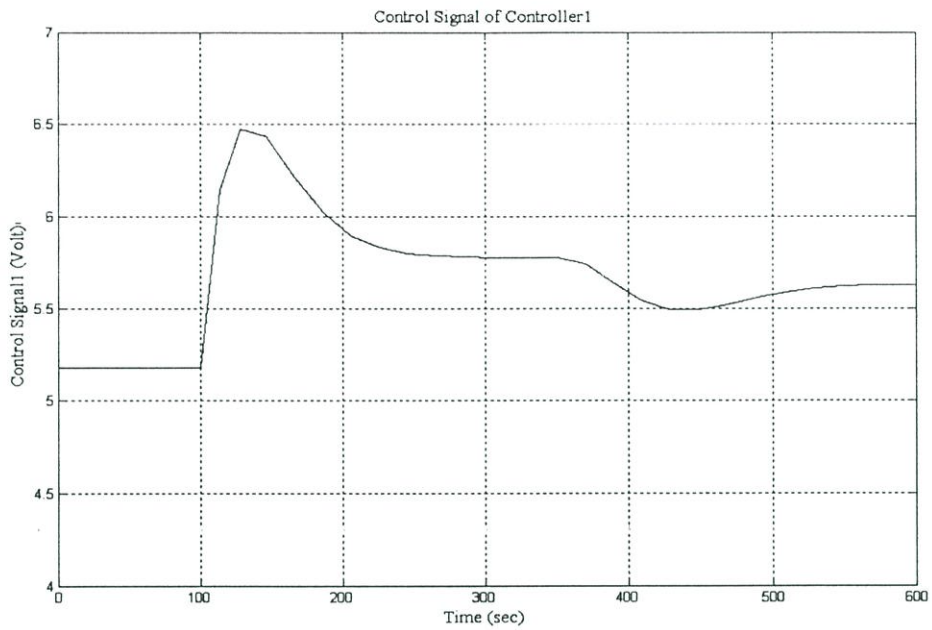
(ก)



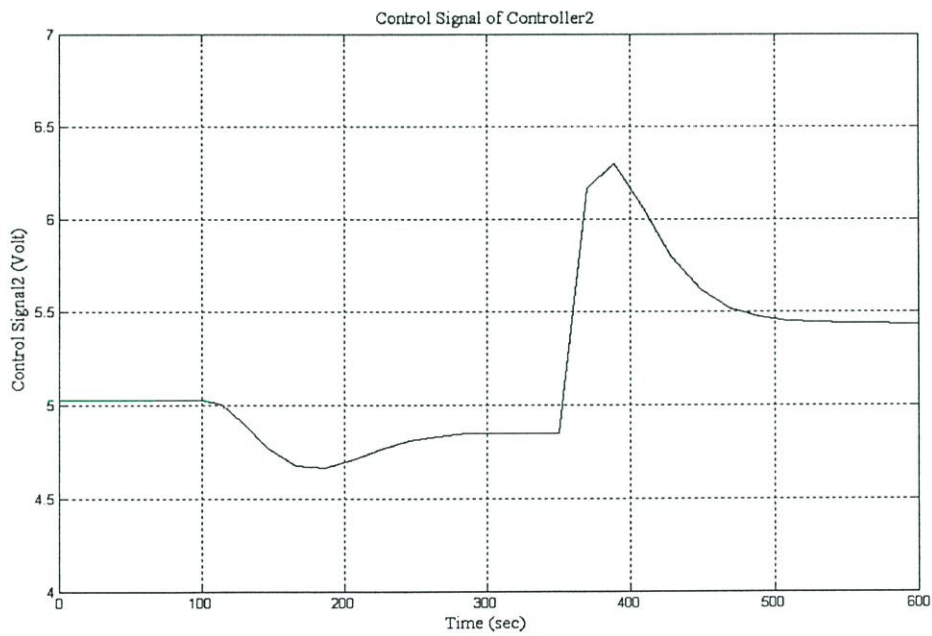
(ข)

(ก) ระดับน้ำของถังที่ 1 (ข) ระดับน้ำของถังที่ 2

รูปที่ 5.6 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได
ในกรณีเฟสต่ำสุด



(ก)



(ข)

(ก) ตัวควบคุม I-P 1 (ข) ตัวควบคุม I-P 2

รูปที่ 5.7 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันไดในกรณีเฟสต่ำสุด

5.3.3.2 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าดรชนี

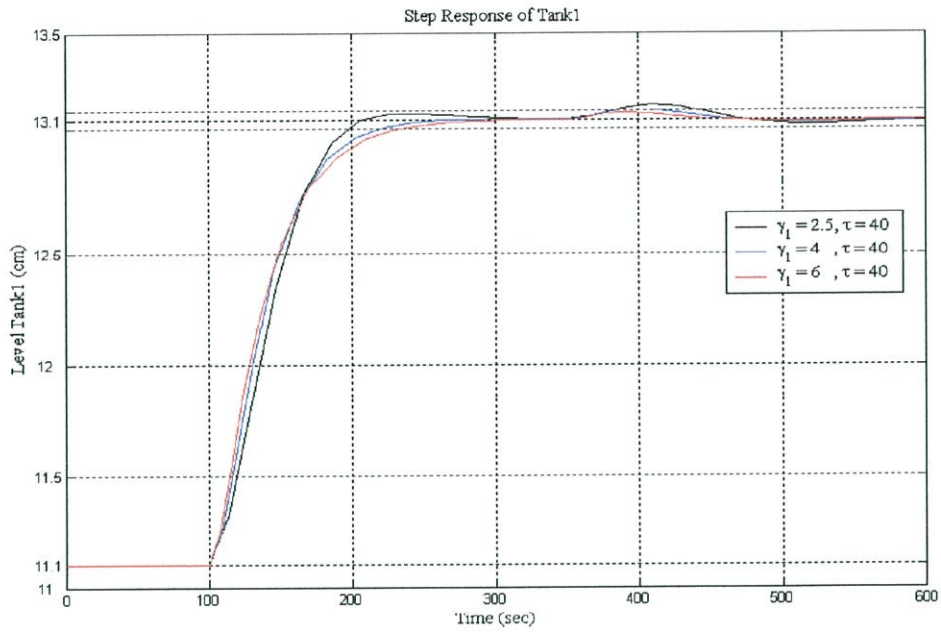
เสถียรภาพ γ_i

การออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธี CDM ได้กล่าวไว้ว่าค่าดรชนีเสถียรภาพ γ_i นั้นจะเป็นตัวที่กำหนดถึงความมีเสถียรภาพและความคงทนของระบบควบคุม โดยหากกำหนดให้ค่าดรชนีเสถียรภาพ γ_i มีค่ามาก ระบบควบคุมจะมีเสถียรภาพและความคงทนที่มากและในทางกลับกัน หากกำหนดให้ค่าดรชนีเสถียรภาพ γ_i มีค่าน้อย ระบบควบคุมจะมีเสถียรภาพและความคงทนที่น้อย ดังนั้นจึงได้ศึกษาถึงผลกระทบของการปรับค่าดรชนีเสถียรภาพ γ_i ที่มีต่อผลตอบสนองของระบบควบคุม โดยในการศึกษานี้จะทำการออกแบบตัวควบคุม I-P ทั้งสองตัว โดยกำหนดให้ γ_1 มีค่าเท่ากับ 2.5, 4 และ 6 ตามลำดับและคงค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ให้มีค่าเท่ากับ 40 เหมือนเดิม ผลตอบสนองของระบบควบคุมและสัญญาณควบคุมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9 ตามลำดับ

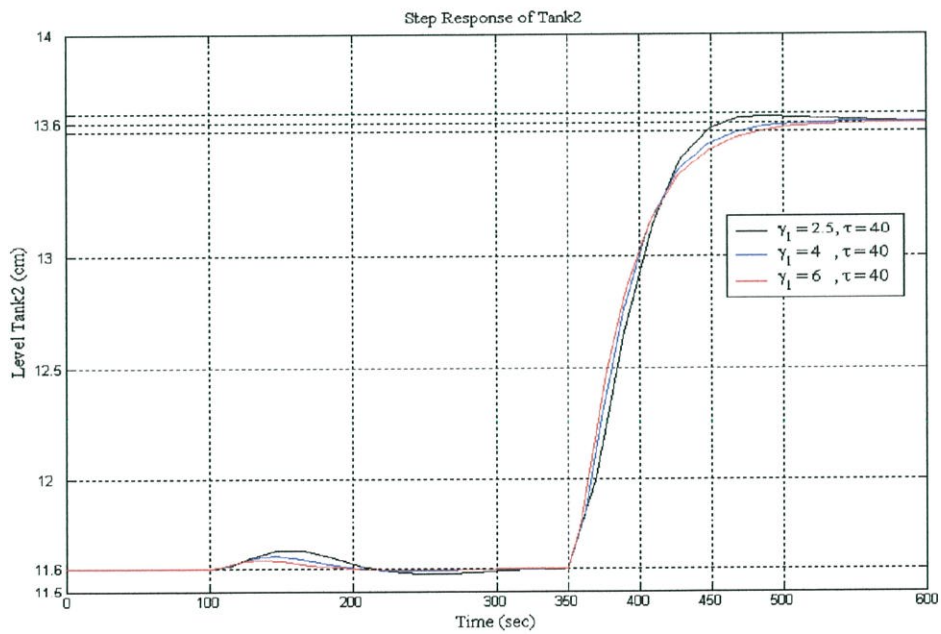
จากรูปที่ 5.8 (ก) และรูปที่ 5.8 (ข) จะสังเกตเห็นได้ว่าตัวควบคุม I-P ที่ออกแบบด้วยการกำหนดให้ค่าดรชนีเสถียรภาพ γ_1 มีค่ามาก จะทำให้ระบบควบคุมมีความคงทนมากขึ้น โดยเมื่ออินพุตอื่นมีการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอ้างอิง จะทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมต่อการอินเตอร์แอคชันระหว่างวงรอบควบคุมนั้นมีค่าที่ลดลงและสามารถกลับเข้าสู่ระดับอ้างอิงเดิมได้เร็วขึ้น ส่วนผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อระดับสัญญาณอ้างอิงเปลี่ยนแปลงไปจะมีค่าเวลาเข้าที่ช้าลง โดยสมรรถนะของระบบควบคุมสามารถแสดงเปรียบเทียบกันได้ดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด

ผลตอบสนอง ของระบบควบคุม		t_s (sec)	P_o (%)	Interaction (%)	t_s of Interaction (sec)
ถึงที่ 1	$\gamma_1 = 2.5, \tau = 40$	100	1.35	7.3	108
	$\gamma_1 = 4, \tau = 40$	125	0	4.5	88
	$\gamma_1 = 6, \tau = 40$	135	0	3.1	68
ถึงที่ 2	$\gamma_1 = 2.5, \tau = 40$	100	1.42	8	102
	$\gamma_1 = 4, \tau = 40$	125	0	5.4	82
	$\gamma_1 = 6, \tau = 40$	135	0	3.8	65



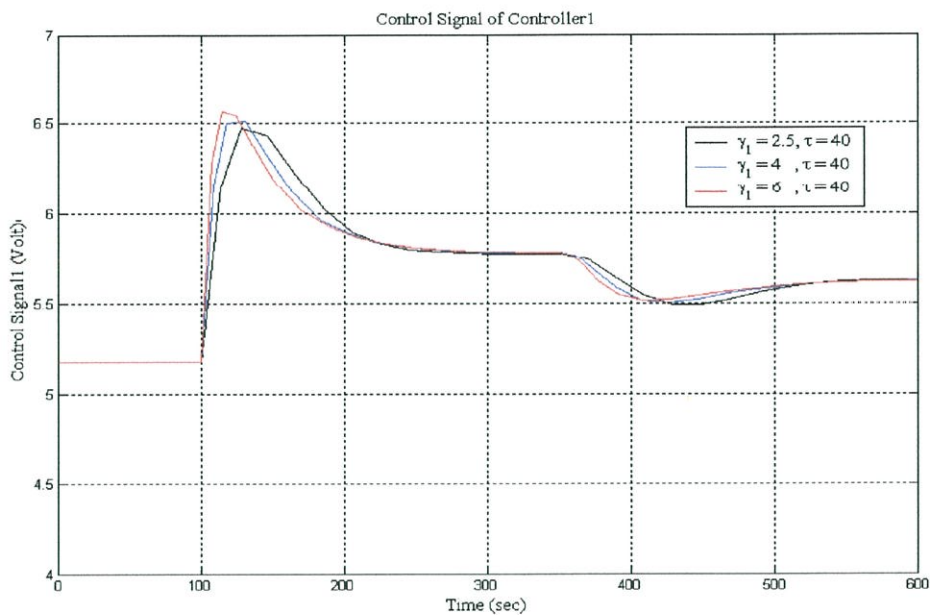
(ก)



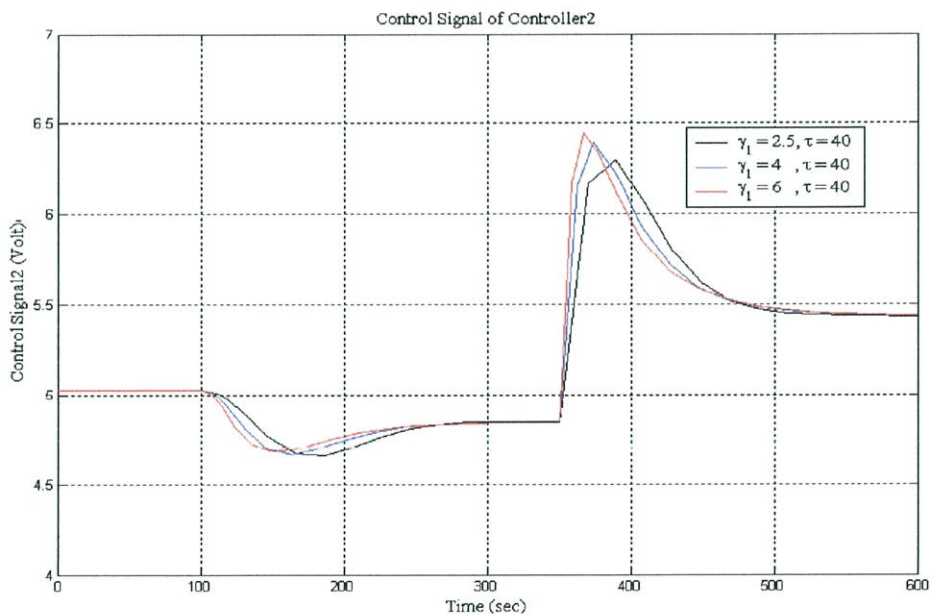
(ข)

(ก) ระดับน้ำของถังที่ 1 (ข) ระดับน้ำของถังที่ 2

รูปที่ 5.8 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด



(ก)



(ข)

(ก) ตัวควบคุม I-P 1 (ข) ตัวควบคุม I-P 2

รูปที่ 5.9 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด

จากรูปที่ 5.9 (ก) และ รูปที่ 5.9 (ข) จะเห็นได้ว่า สัญญาณควบคุมของตัวควบคุม I-P ที่ออกแบบโดยกำหนดให้ค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_1 มีค่ามากจะมีขนาดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ

ควบคุมที่มากที่สุดมากขึ้น และผลตอบสนองของสัญญาณควบคุมจะเพิ่มขึ้นและลดลงเร็วกว่าในกรณีที่กำหนดให้ค่าดรชนีเสถียรภาพ γ_1 มีค่าน้อย ซึ่งการเพิ่มขึ้นและลดลงที่เร็วขึ้นของสัญญาณควบคุมนั้นจะทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมเร็วขึ้นในตอนเริ่มต้นแต่จะเข้าสู่ค่าเวลาเข้าที่ช้าลง โดยขนาดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่มากที่สุดแสดงได้ดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 เปรียบเทียบขนาดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่มากที่สุดจากการจำลองเมื่อ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด

ขนาดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุม	$\gamma_1 = 2.5, \tau = 40$	$\gamma_1 = 4, \tau = 40$	$\gamma_1 = 6, \tau = 40$
I-P 1 (โวลท์)	1.295	1.368	1.395
I-P 2 (โวลท์)	1.481	1.551	1.596

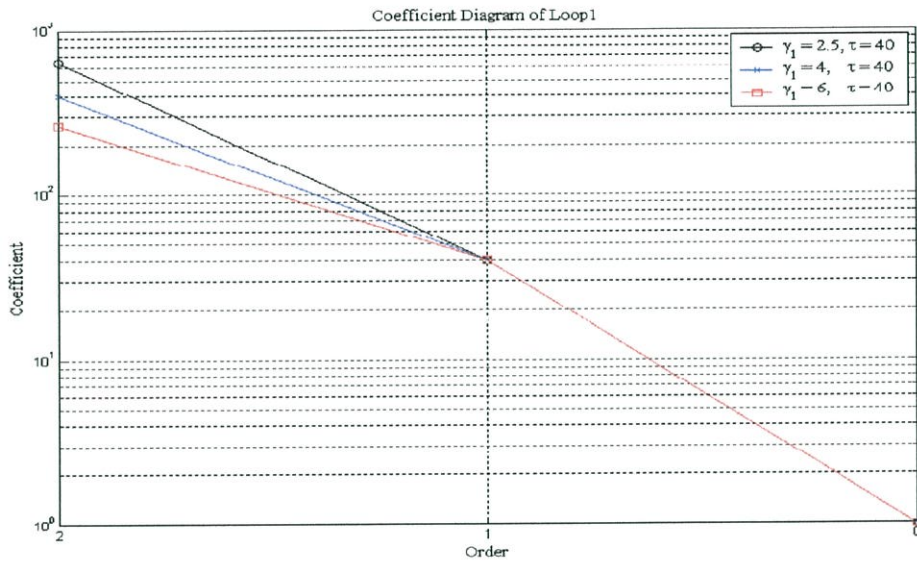
ตารางที่ 5.7 แสดงเปรียบเทียบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเมื่อค่า γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด โดยจากตารางนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อออกแบบให้ค่าดรชนีเสถียรภาพ γ_1 มีค่ามากขึ้นค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ I และตัวควบคุมแบบ P จะเพิ่มขึ้น โดยพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ P จะเพิ่มขึ้นในสัดส่วนที่มากกว่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ I ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าพารามิเตอร์นี้จะมีผลทำให้ผลตอบสนองของสัญญาณควบคุมเพิ่มเร็วขึ้นในช่วงแรก, ขนาดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่มากที่สุดเพิ่มขึ้นและในช่วงที่สัญญาณควบคุมลดลงก็จะเร็ว

ตารางที่ 5.7 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเมื่อ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด

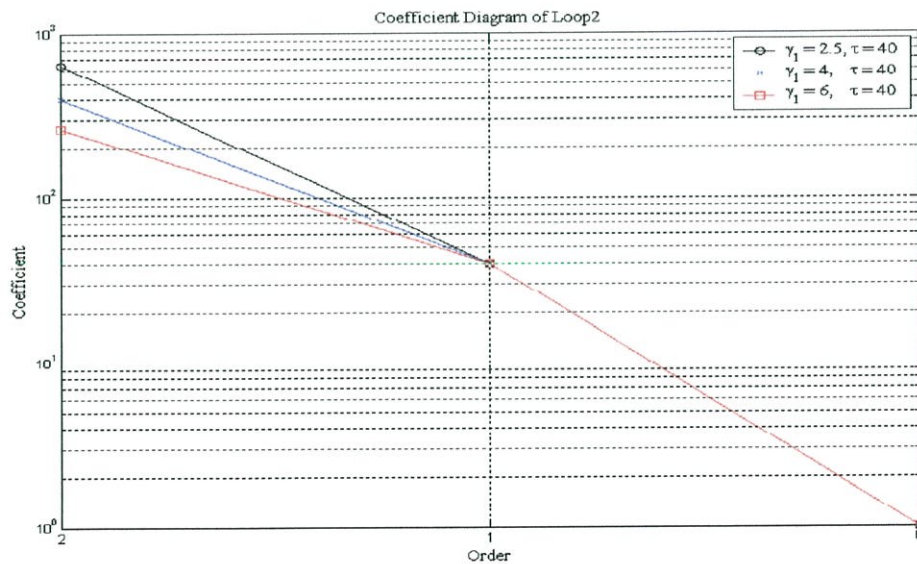
ตัวควบคุม		K_i	K_p
I-P 1	$\gamma_1 = 2.5, \tau = 40$	0.0508	1.7419
	$\gamma_1 = 4, \tau = 40$	0.0813	2.9617
	$\gamma_1 = 6, \tau = 40$	0.1220	4.5880
I-P 2	$\gamma_1 = 2.5, \tau = 40$	0.0586	2.0612
	$\gamma_1 = 4, \tau = 40$	0.0938	3.4687
	$\gamma_1 = 6, \tau = 40$	0.1408	5.3455

เมื่อนำเอาสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะ $P_{11}(s)$ และ $P_{22}(s)$ ที่ได้ออกแบบไว้สำหรับวงรอบเอาต์พุต 1 และวงรอบเอาต์พุต 2 ในกรณีที่เปลี่ยนแปลงค่าดรชนีเสถียรภาพ γ_1 มาพล็อตลงในแผนผังค่าสัมประสิทธิ์จะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.10 จากรูปที่ 5.10 (ก) และรูปที่

5.10 (ข) จะเห็นได้ว่าเมื่อกำหนดให้ค่าดรรรชนีเสถียรภาพ $\gamma_1 = 2.5$ (วงกลม) ความโค้งของเส้นค่าสัมประสิทธิ์จะมีค่าน้อย และเมื่อกำหนดให้ค่าดรรรชนีเสถียรภาพ $\gamma_1 = 4$ (กากบาท) และ $\gamma_1 = 6$ (สี่เหลี่ยม) ความโค้งของเส้นค่าสัมประสิทธิ์จะมากขึ้นตามลำดับทำให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพและความคงทนมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของวิธี CDM [12]



(ก)



(ข)

(ก) แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ของวงรอบเอาต์พุต 1 (ข) แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ของวงรอบเอาต์พุต 2
รูปที่ 5.10 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ของระบบควบคุมที่ออกแบบเมื่อค่าดรรรชนีเสถียรภาพ γ_1
เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด

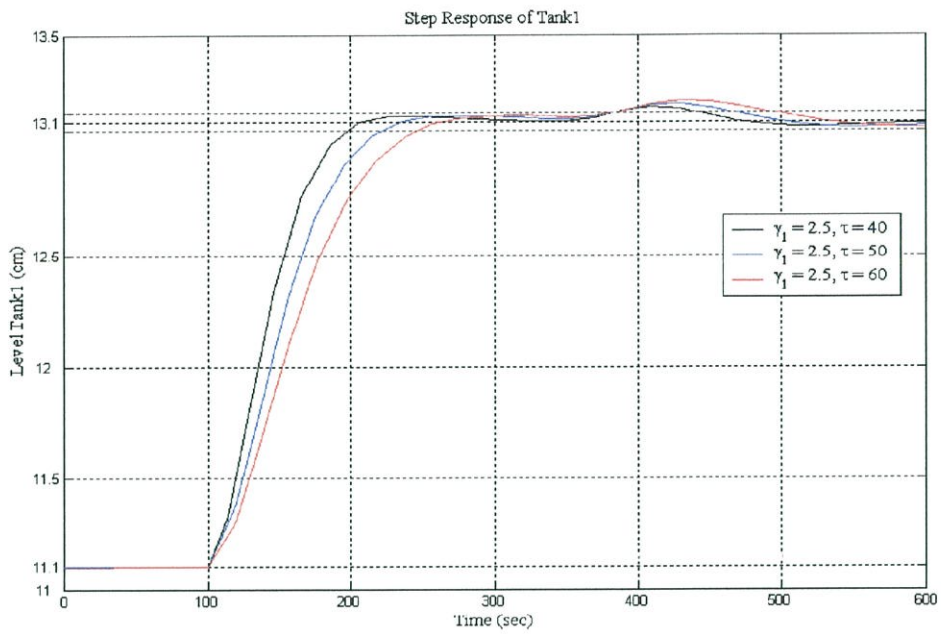
5.3.3.3 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าคงตัวเวลาสมมูล τ

การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM ได้กล่าวไว้ว่าค่าคงตัวเวลาสมมูล τ นั้นเป็นตัวที่กำหนดถึงความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุม โดยหากกำหนดให้ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ นั้นมีค่าที่น้อยผลตอบสนองของระบบควบคุมจะเร็ว และในทางกลับกันถ้าหากกำหนดให้ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ มีค่ามากผลตอบสนองของระบบควบคุมจะช้า ดังนั้นจึงได้ศึกษาถึงผลกระทบของการปรับค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ที่มีผลต่อผลตอบสนองของระบบควบคุม โดยในการศึกษานี้จะทำการออกแบบตัวควบคุมทั้งสองตัว โดยกำหนดให้ τ มีค่าเท่ากับ 40, 50 และ 60 ตามลำดับและคงค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_1 ให้มีค่าเท่ากับ 2.5 เหมือนเดิม ผลตอบสนองของระบบควบคุมและสัญญาณควบคุม แสดงได้ดังรูปที่ 5.11 และรูปที่ 5.12 ตามลำดับ

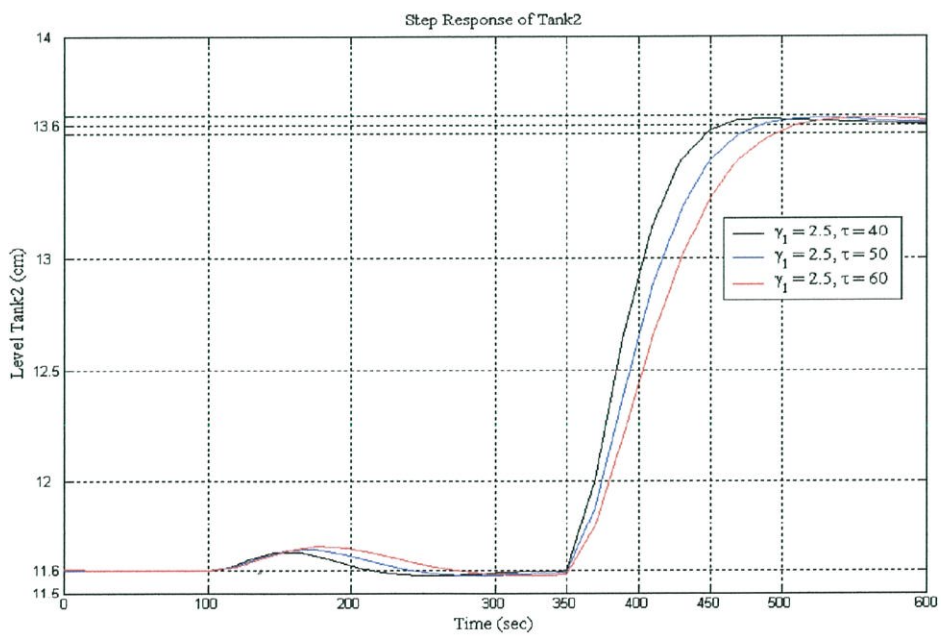
จากรูปที่ 5.11 (ก) และรูปที่ 5.11 (ข) จะสังเกตเห็นได้ว่าตัวควบคุม I-P ที่ออกแบบด้วยการกำหนดให้ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ มีค่ามากขึ้น จะทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมช้าลง และเมื่อเมื่ออินพุตอื่นมีการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอ้างอิง ผลตอบสนองของระบบควบคุมต่อการอินเตอร์แอคชันระหว่างวงรอบควบคุมนั้นมีค่าที่มากขึ้น และการกลับเข้าสู่ระดับอ้างอิงเดิมจะช้าลง โดยสมรรถนะของระบบควบคุมสามารถแสดงเปรียบเทียบกันได้ดังตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อ τ เปลี่ยนแปลงไป
ในกรณีเฟสต่ำสุด

ผลตอบสนอง ของระบบควบคุม		t_s (sec)	P_o (%)	Interaction (%)	t_s of Interaction (sec)
ถึงที่ 1	$\gamma_1 = 2.5, \tau = 40$	100	1.35	7.3	108
	$\gamma_1 = 2.5, \tau = 50$	125	1.44	8.37	138
	$\gamma_1 = 2.5, \tau = 60$	150	1.46	9.7	166
ถึงที่ 2	$\gamma_1 = 2.5, \tau = 40$	100	1.42	8	102
	$\gamma_1 = 2.5, \tau = 50$	125	1.45	9.33	127
	$\gamma_1 = 2.5, \tau = 60$	150	1.5	10.5	156



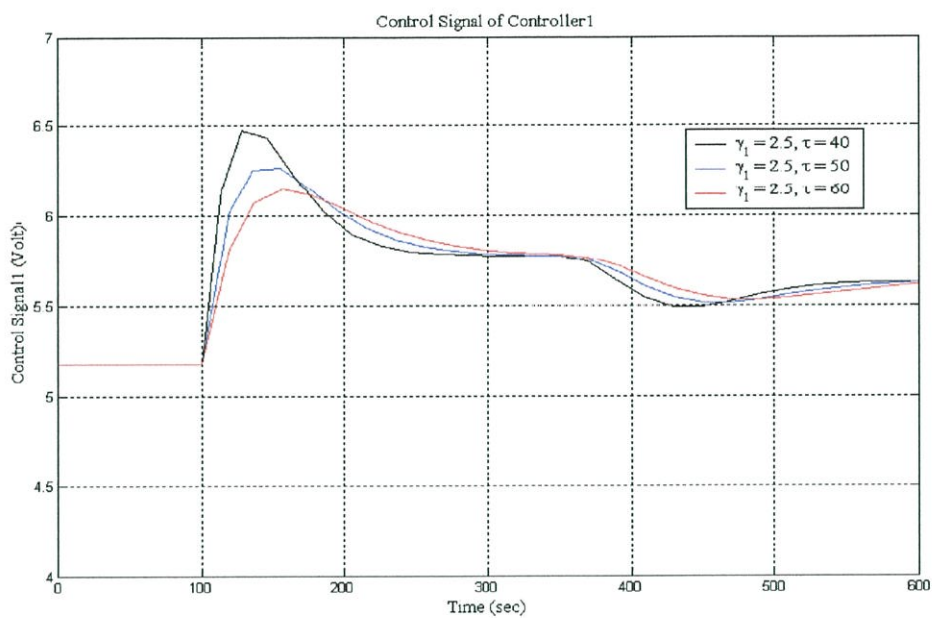
(ก)



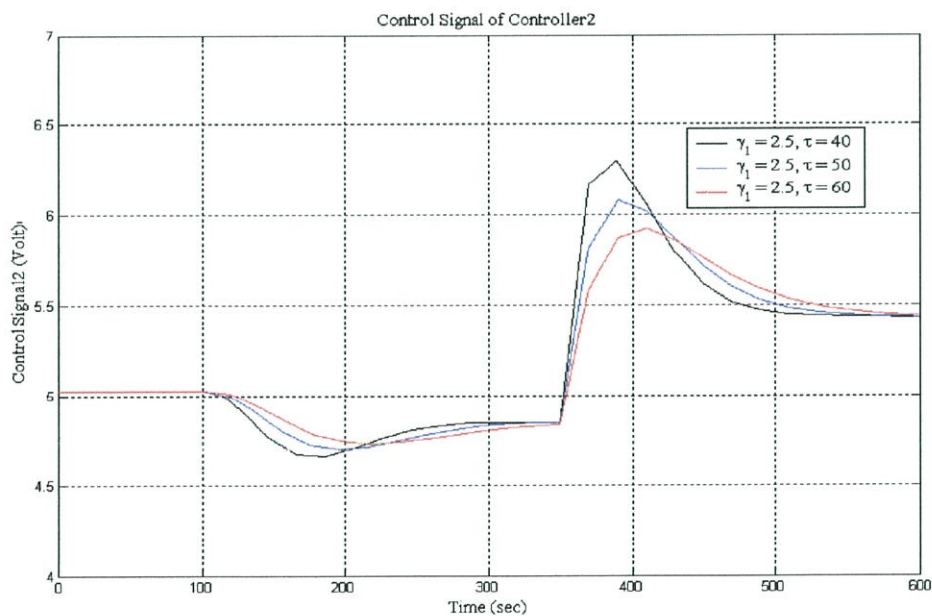
(ข)

(ก) ระดับน้ำของถังที่ 1 (ข) ระดับน้ำของถังที่ 2

รูปที่ 5.11 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อค่าคงตัวเวลาสมมูล τ เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด



(ก)



(ข)

(ก) ตัวควบคุม I-P 1 (ข) ตัวควบคุม I-P 2

รูปที่ 5.12 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อค่าคงตัวเวลาสมมูล τ เปลี่ยนแปลงไป
ในกรณีเฟสต่ำสุด

จากรูปที่ 5.12 (ก) และ รูปที่ 5.12 (ข) จะสังเกตเห็นได้ว่า สัญญาณควบคุมของตัว
ควบคุม I-P ที่ออกแบบโดยกำหนดให้ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ มีค่ามาก จะมีขนาดการเปลี่ยนแปลง

ของสัญญาณควบคุมที่มากที่สุดลดน้อยลง และผลตอบสนองของสัญญาณควบคุมจะเพิ่มขึ้นและลดลงช้ากว่าในกรณีที่กำหนดให้ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ มีค่าน้อย ซึ่งการเพิ่มขึ้นที่ช้าของสัญญาณควบคุมนั้นจะทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมช้าลง โดยขนาดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่มากที่สุดแสดงได้ดังตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 เปรียบเทียบขนาดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่มากที่สุดจากการจำลองเมื่อ τ เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด

ขนาดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุม	$\gamma_1 = 2.5, \tau = 40$	$\gamma_1 = 2.5, \tau = 50$	$\gamma_1 = 2.5, \tau = 60$
I-P 1 (โวลท์)	1.295	1.102	0.97
I-P 2 (โวลท์)	1.481	1.21	1.049

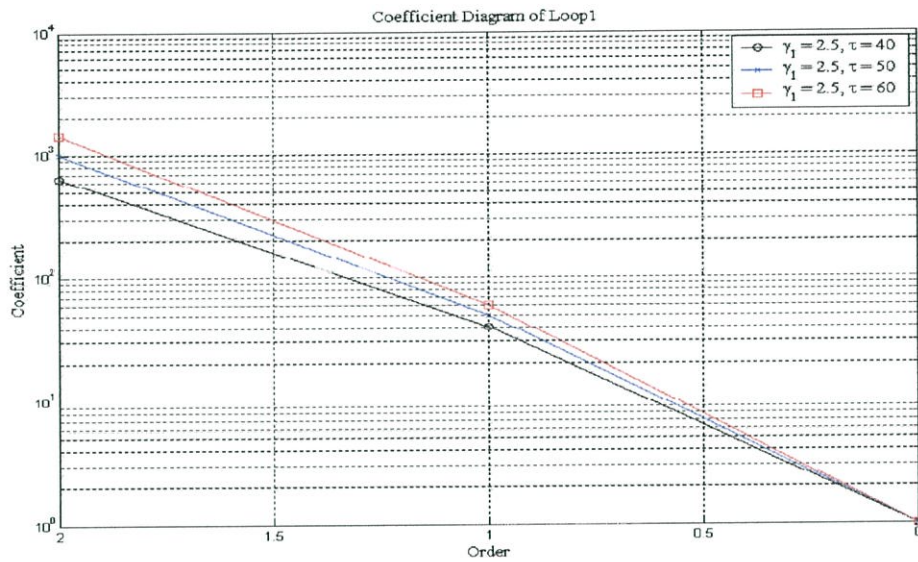
ตารางที่ 5.10 แสดงเปรียบเทียบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเมื่อ τ เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด โดยจากตารางจะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อทำการออกแบบให้ค่าคงตัวเวลาสมมูลเพิ่มมากขึ้นค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ I และตัวควบคุมแบบ P จะลดลง โดยพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ I จะลดลงในสัดส่วนที่มากกว่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ P ซึ่งการลดลงของค่าพารามิเตอร์นี้จะมีผลทำให้ผลตอบสนองของสัญญาณควบคุมเพิ่มขึ้นและลดลงช้า และขนาดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่มากที่สุดจะน้อยลง

ตารางที่ 5.10 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเมื่อ τ เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด

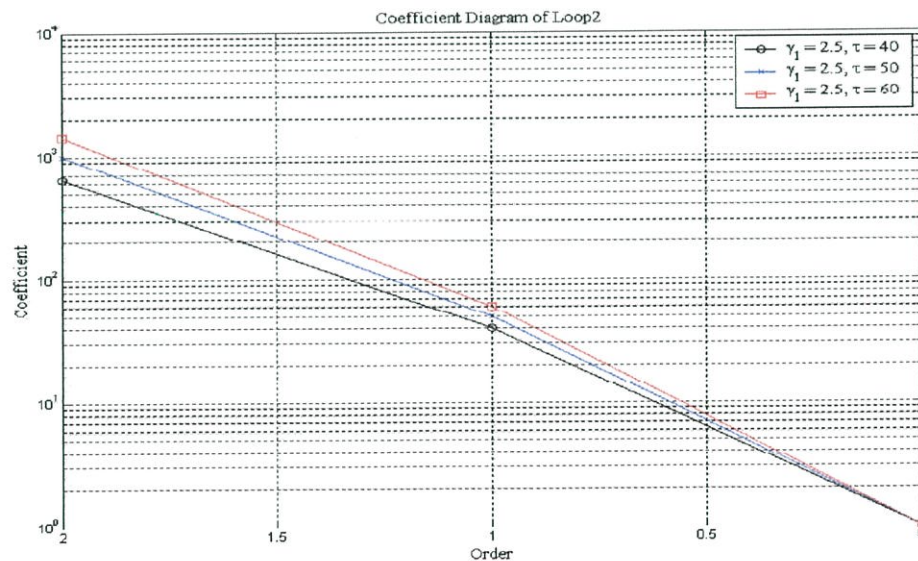
ตัวควบคุม		K_i	K_p
I-P 1	$\gamma_1 = 2.5, \tau = 40$	0.0508	1.7419
	$\gamma_1 = 2.5, \tau = 50$	0.0375	1.5920
	$\gamma_1 = 2.5, \tau = 60$	0.0325	1.3353
I-P 2	$\gamma_1 = 2.5, \tau = 40$	0.0586	2.0612
	$\gamma_1 = 2.5, \tau = 50$	0.0261	1.2792
	$\gamma_1 = 2.5, \tau = 60$	0.0226	1.0642

เมื่อนำเอาสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะ $P_{-11}(s)$ และ $P_{-22}(s)$ ที่ได้ออกแบบไว้สำหรับวงรอบเอาต์พุต 1 และวงรอบเอาต์พุต 2 ในกรณีที่เปลี่ยนแปลงค่าคงตัวเวลาสมมูล τ มาพล็อตลงในแผนผังค่าสัมประสิทธิ์จะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.13 จากรูปที่ 5.13 (ก) และรูปที่

5.14 (ข) จะเห็นได้ว่าเมื่อกำหนดให้ค่าคงตัวเวลาสมมูล $\tau = 40$ (วงกลม) ปลายเส้นโค้งของค่าสัมประสิทธิ์จะเอียง (ลาดชัน) ลงไปทางด้านซ้ายมากทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมนั้นเร็วขึ้น และเมื่อกำหนดให้ค่าคงตัวเวลาสมมูล $\tau = 50$ (กากบาท) และ $\tau = 60$ (สี่เหลี่ยม) ปลายเส้นโค้งของค่าสัมประสิทธิ์จะเอียง (ลาดชัน) ไปทางด้านซ้ายน้อยลงตามลำดับทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมช้าลง ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของวิธี CDM [12]



(ก)

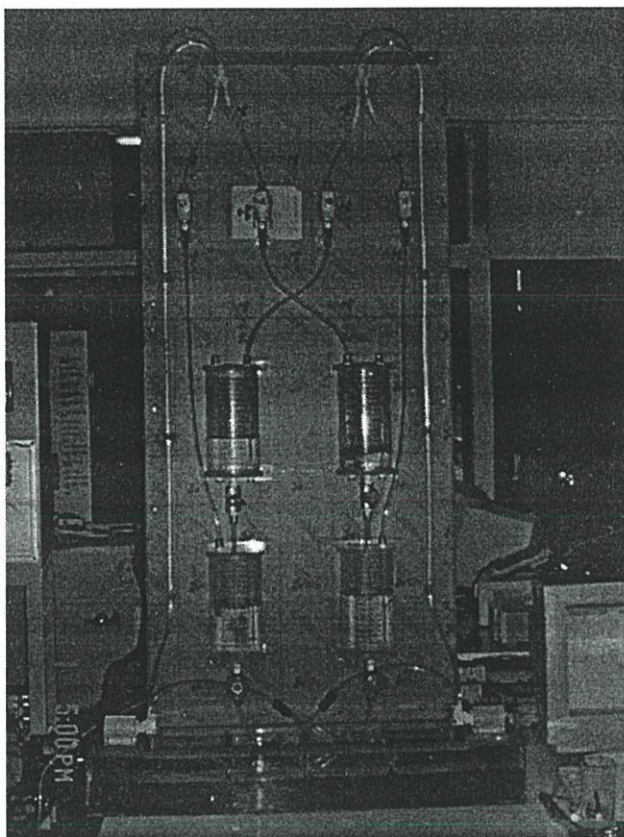


(ข)

(ก) แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ของวงรอบเอาต์พุต 1 (ข) แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ของวงรอบเอาต์พุต 2
รูปที่ 5.13 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ของระบบควบคุมที่ออกแบบเมื่อค่าคงตัวเวลาสมมูล τ เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด

5.3.4 การทดลองกับกระบวนการจริง

หลังจากที่ได้ทำการจำลองการควบคุมกระบวนการระดับน้ำ 4 ถังด้วยตัวควบคุม I-P ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM แล้ว ต่อไปจะนำตัวควบคุมดังกล่าวที่ได้ออกแบบมาใช้ทำการควบคุมกับกระบวนการจริง โดยจะใช้โปรแกรม MATLAB ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมซึ่งจะใช้ค่าเวลาชักตัวอย่าง (Sampling Time) เท่ากับ 0.1 วินาทีสำหรับตัวควบคุม I-P ทั้ง 2 ตัว ภาพถ่ายของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถังแสดงได้ดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 กระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง

ในการทดลองการควบคุมกระบวนการระดับน้ำ 4 ถังจะใช้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมขั้นตอนการทดลองและรูปแบบในการทดลองเช่นเดียวกันกับ การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB ที่ได้ทำการจำลองการทำงานไว้ก่อนหน้านี้ในหัวข้อที่ 5.3.3

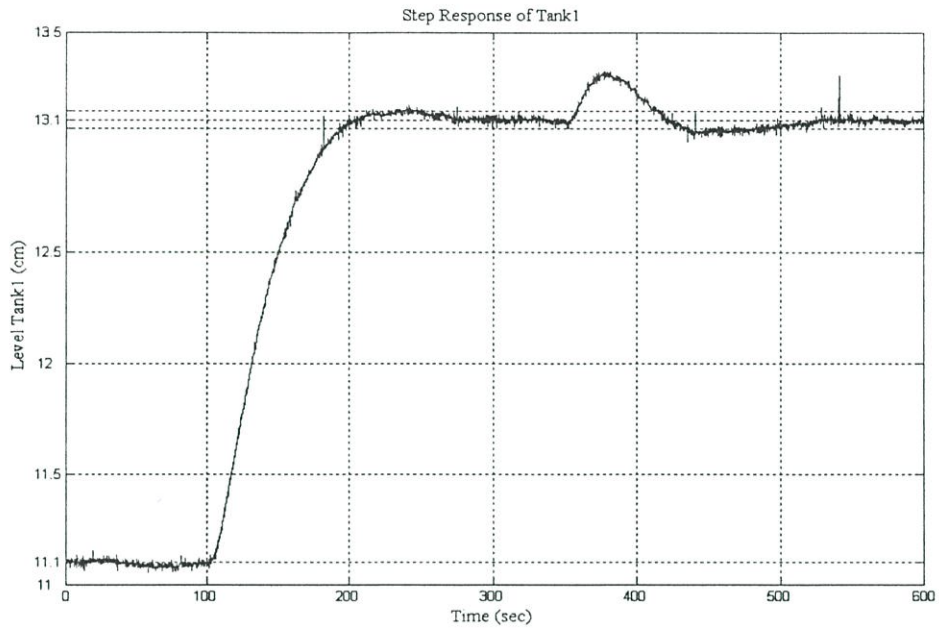
5.3.4.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได

ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันไดแสดงได้ดังรูปที่ 5.15 และ สัญญาณควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 5.16 จากรูปที่ 5.15 (ก) และรูปที่ 5.15 (ข) จะสังเกตเห็นได้ว่า ตัวควบคุม I-P สามารถควบคุมให้ระดับน้ำเปลี่ยนไปยังระดับที่ 13.1 เซนติเมตร และ 13.6 เซนติเมตร สำหรับถึงที่ 1 และถึงที่ 2 ได้ตามที่ต้องการ โดยค่าเวลาเข้าที่จะเร็วกว่าผลที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลองสำหรับทั้ง 2 ถึง, มีค่าพุ่งเกินเล็กน้อยสำหรับถึงที่ 1 และถึงที่ 2, ไม่มีค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัว ส่วนผลจากการอินเตอร์แอคชันระหว่างวงรอบควบคุมเมื่อสัญญาณอ้างอิงของระดับน้ำในถึงที่ 1 หรือ สัญญาณอ้างอิงของระดับน้ำในถึงที่ 2 เปลี่ยนแปลงไปจะมีค่ามากกว่าผลที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลอง ซึ่งการที่ผลจากการอินเตอร์แอคชันระหว่างวงรอบควบคุมนั้นมีค่ามากกว่าผลที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลองนั้น เกิดขึ้นเนื่องจากลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นของปั้มน้ำและวาล์ว และในการกลับเข้าสู่ระดับอ้างอิงเดิมเมื่อสัญญาณอ้างอิงของระดับน้ำในถึงอื่นเปลี่ยนแปลงไป จะมีช่วงเวลาที่นานกว่าผลที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลอง เหตุที่ใช้เวลานานกว่าก็เพราะว่าผลจากการทดลองจริงในขณะที่ผลตอบสนองของถึงที่ 1 และ ถึงที่ 2 ลดลงเพื่อจะกลับเข้าสู่ระดับอ้างอิงเดิมนั้น จะไม่สามารถกลับเข้าสู่ระดับอ้างอิงเดิมได้ทันที แต่จะลดต่ำลงไปมากกว่าจากนั้นจึงค่อยเพิ่มขึ้นเพื่อเข้าสู่ระดับอ้างอิงเดิม สำหรับสมรรถนะของระบบควบคุมสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.11

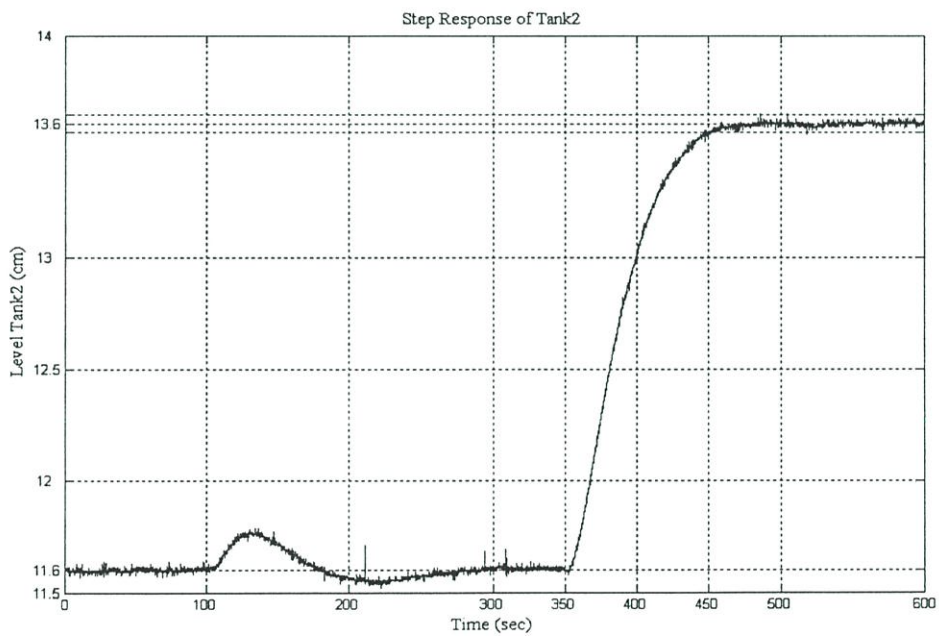
ตารางที่ 5.11 สมรรถนะของระบบควบคุมจากการทดลองในกรณีเฟสต่ำสุด

ผลตอบสนอง ของระบบควบคุม	t_s (sec)	P_o (%)	Interaction (%)	t_s of Interaction (sec)
ถึงที่ 1	94	2	22	160
ถึงที่ 2	97	0.5	17	150

จากรูปที่ 5.16 (ก) และรูปที่ 5.16 (ข) จะสังเกตเห็นได้ว่าผลตอบสนองของสัญญาณควบคุมในการทดลองจริงนั้น จะคล้ายกับผลตอบสนองของสัญญาณควบคุมจากการทดลองกับแบบจำลองในรูปที่ 5.7 (ก) และรูปที่ 5.7 (ข) แต่ต่างกันตรงขนาดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่มากที่สุดจากการทดลองจริงจะน้อยกว่าผลที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลอง ซึ่งการที่ขนาดการเปลี่ยนแปลงสัญญาณควบคุมที่มากที่สุดของการทดลองจริงนั้น น้อยกว่าผลที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลอง เกิดขึ้นเนื่องจากคุณลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นของปั้มน้ำ



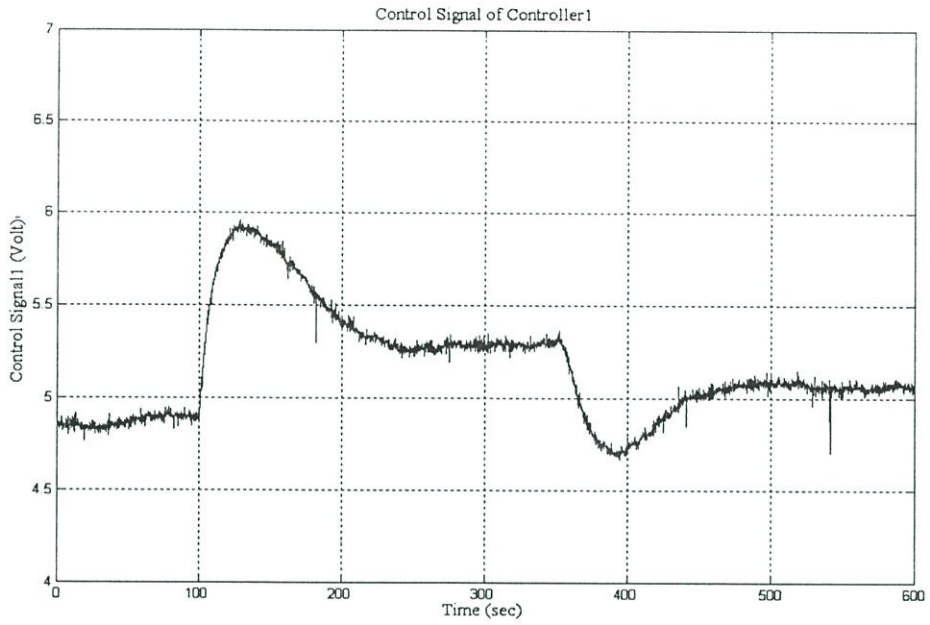
(ก)



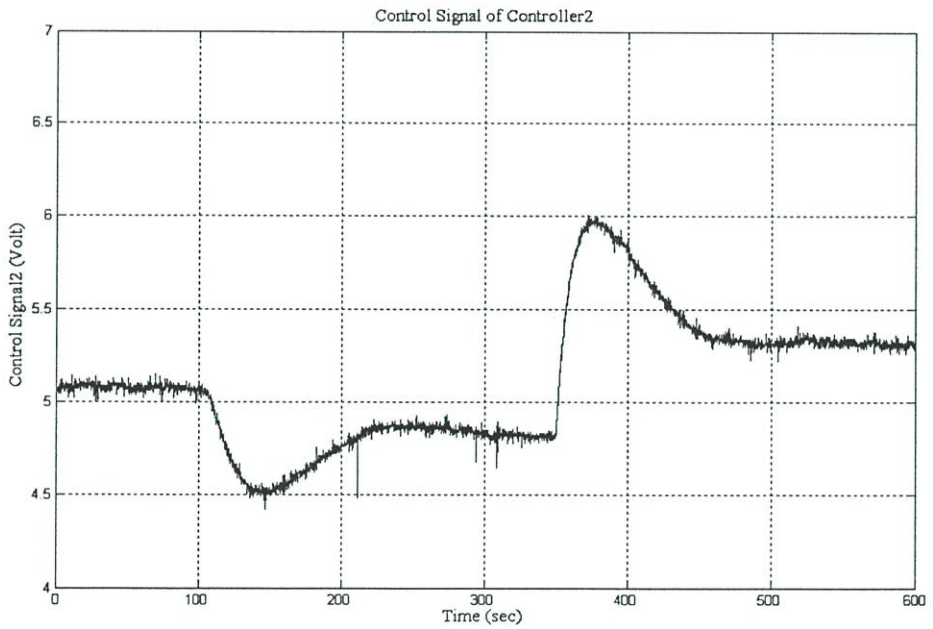
(ข)

(ก) ระดับน้ำของถังที่ 1 (ข) ระดับน้ำของถังที่ 2

รูปที่ 5.15 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได
ในกรณีเฟสต่ำสุด



(ก)



(ข)

(ก) ตัวควบคุม I-P 1 (ข) ตัวควบคุม I-P 2

รูปที่ 5.16 สัญญาณควบคุมจากการทดลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันไดในกรณีเฟสต่ำสุด

5.3.4.2 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าดรชนี

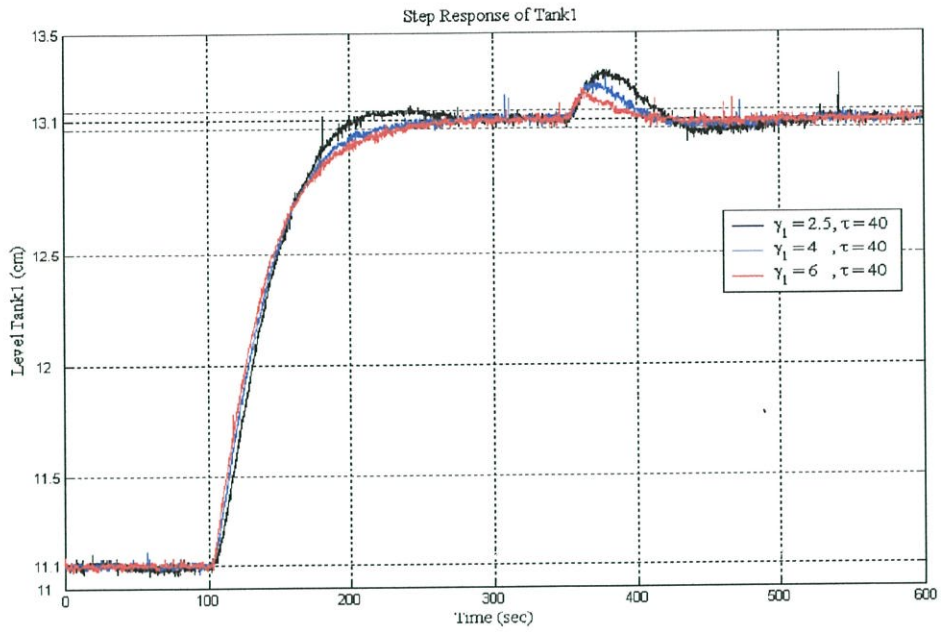
เสถียรภาพ γ_1

ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อนำตัวควบคุม I-P ที่ได้ทำการออกแบบ โดยกำหนดให้ค่าดรชนีเสถียรภาพ γ_1 มีค่าที่แตกต่างกันไปนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.17 และ สัญญาณควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 5.18

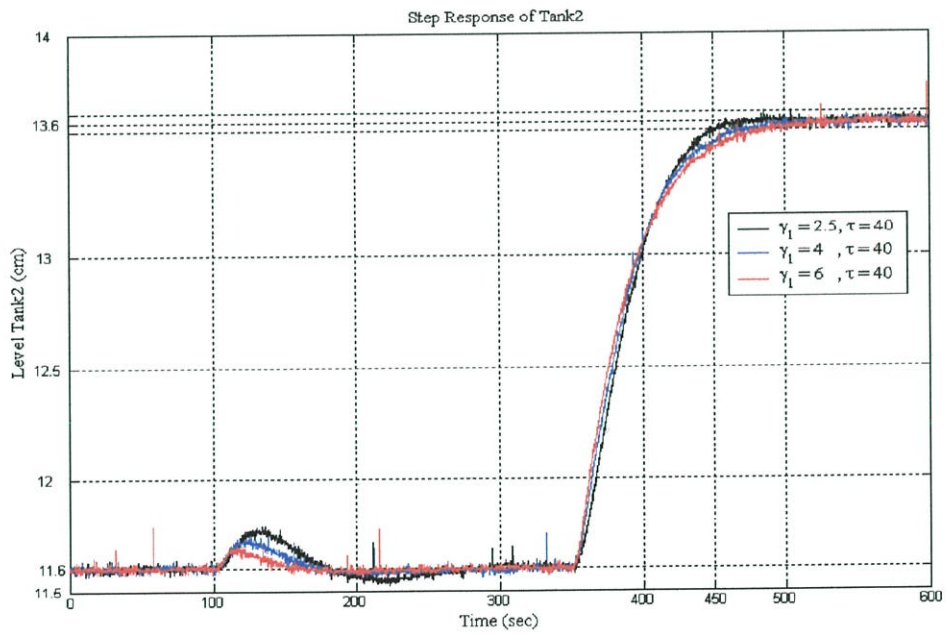
จากรูปที่ 5.17 (ก) และรูปที่ 5.17 (ข) จะสังเกตเห็นได้ว่า ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าดรชนีเสถียรภาพ γ_1 นั้นจะคล้ายกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB ในหัวข้อ 5.3.3.2 คือเมื่อควบคุมระบบควบคุมด้วยตัวควบคุม I-P ที่ออกแบบด้วยค่าดรชนีเสถียรภาพ γ_1 ที่มีค่ามากขึ้นจะทำให้ระบบควบคุมนั้นมีความคงทนที่มากขึ้น โดยเมื่ออินพุตอื่นมีการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอ้างอิง จะทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมต่อการอินเตอร์แอคชันระหว่างวงรอบควบคุมนั้นมีค่าที่ลดลงและสามารถกลับเข้าสู่ระดับอ้างอิงเดิมได้เร็วขึ้น ส่วนผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อระดับสัญญาณอ้างอิงเปลี่ยนแปลงไปจะมีค่าเวลาเข้าที่ช้าลง โดยสมรรถนะของระบบควบคุมสามารถแสดงเปรียบเทียบกันได้ดังตารางที่ 5.12

ตารางที่ 5.12 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อ γ_1 เปลี่ยนแปลงไป
ในกรณีเฟสต่ำสุด

ผลตอบสนอง ของระบบควบคุม		t_s (sec)	P_o (%)	Interaction (%)	t_s of Interaction (sec)
ถึงที่ 1	$\gamma_1 = 2.5, \tau = 40$	94	2	22	160
	$\gamma_1 = 4, \tau = 40$	120	0	17	60
	$\gamma_1 = 6, \tau = 40$	135	0	13	45
ถึงที่ 2	$\gamma_1 = 2.5, \tau = 40$	97	0.5	17	150
	$\gamma_1 = 4, \tau = 40$	120	0	12	60
	$\gamma_1 = 6, \tau = 40$	135	0	8	45



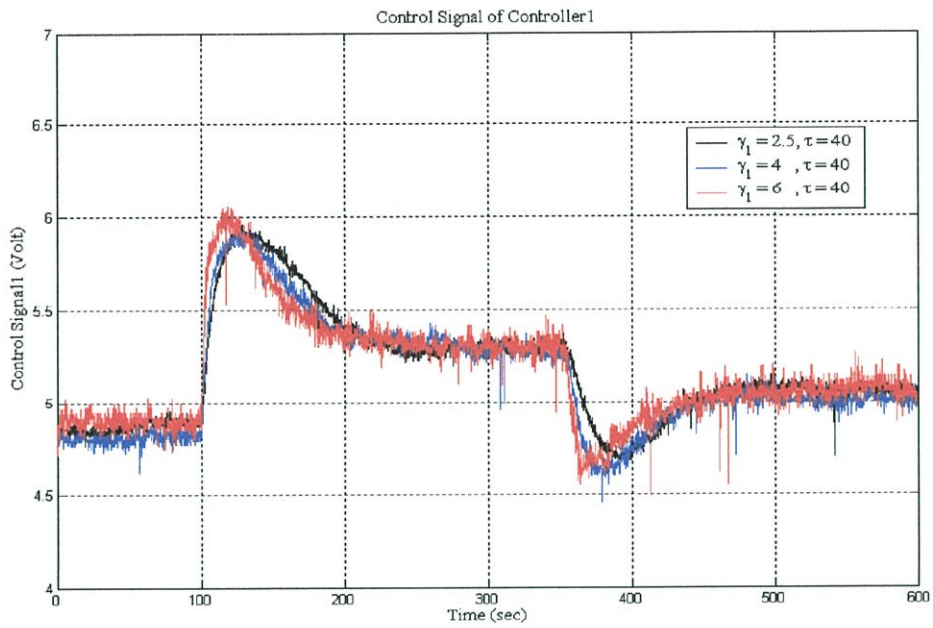
(ก)



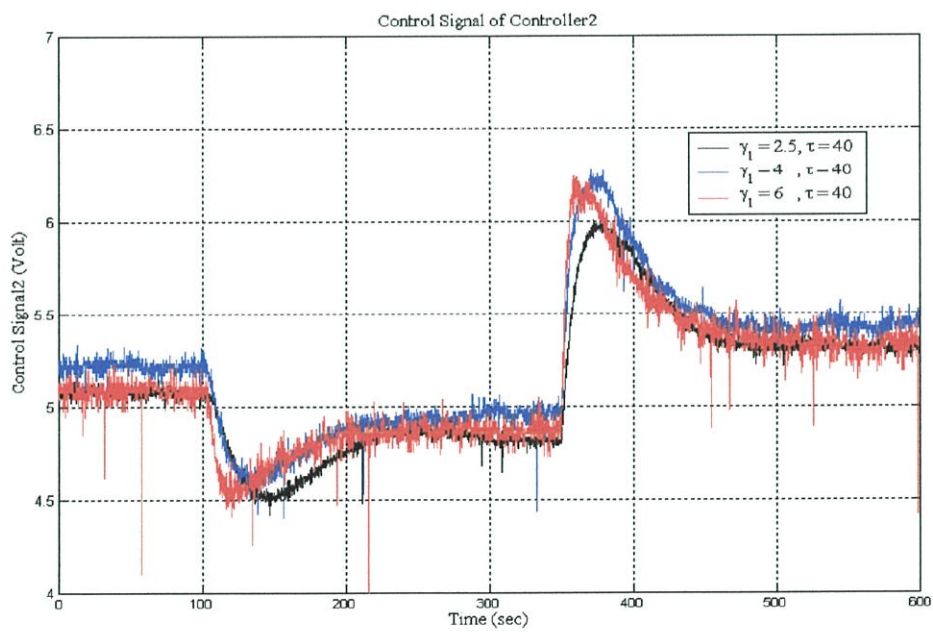
(ข)

(ก) ระดับน้ำของถังที่ 1 (ข) ระดับน้ำของถังที่ 2

รูปที่ 5.17 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อค่าดรชนีเสถียรภาพ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด



(ก)



(ข)

(ก) ตัวควบคุม I-P 1 (ข) ตัวควบคุม I-P 2

รูปที่ 5.18 สัญญาณควบคุมจากการทดลองเมื่อค่าตัวชดเชยเสถียรภาพ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด

จากรูปที่ 5.18 (ก) และ รูปที่ 5.18 (ข) จะสังเกตเห็นได้ว่า สัญญาณควบคุมของตัวควบคุม I-P ทั้งตัวควบคุมที่ 1 และตัวควบคุมที่ 2 นั้น ค่าเริ่มต้นของสัญญาณ (Initial Condition) จะมีค่าที่ไม่เท่ากันแต่จะใกล้เคียงกัน โดยเหตุที่สัญญาณควบคุมมีค่าเริ่มต้นไม่เท่ากันนั้นเกิดขึ้นเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นและความไวของกระบวนการ ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าค่าความไวของกระบวนการ ณ จุดการทำงานในกรณีเฟสต่ำสุดนี้มีค่าเท่ากับ 1.7808 ซึ่งถือได้ว่าเป็นค่าที่น้อย (ค่า Condition Number มีค่าน้อย) ทำให้ยังสามารถควบคุมกระบวนการเพื่อให้ทำงานได้ตามที่ต้องการ สำหรับผลตอบสนองของสัญญาณควบคุมจะคล้ายกับผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB ในหัวข้อ 5.3.3.2 แต่ขนาดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่มากที่สุดนั้นจะมีค่าน้อยกว่าการทดลองจากแบบจำลอง โดยขนาดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่มากที่สุดแสดงได้ดังตารางที่ 5.13

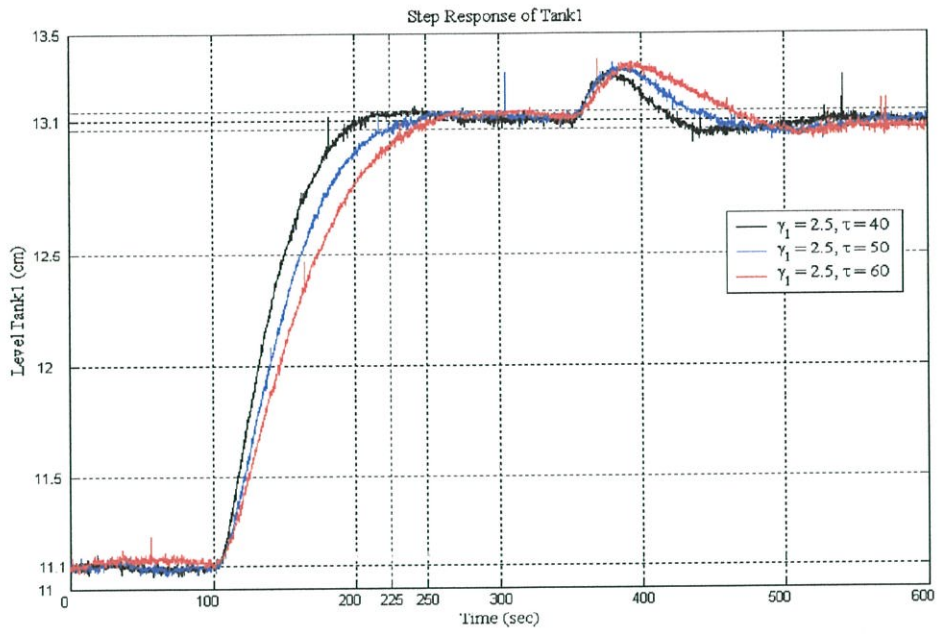
ตารางที่ 5.13 เปรียบเทียบขนาดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่มากที่สุดจากการทดลองเมื่อ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด

ขนาดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุม	$\gamma_1 = 2.5, \tau = 40$	$\gamma_1 = 4, \tau = 40$	$\gamma_1 = 6, \tau = 40$
I-P 1 (โวลท์)	1.04	1.08	1.11
I-P 2 (โวลท์)	1.18	1.26	1.31

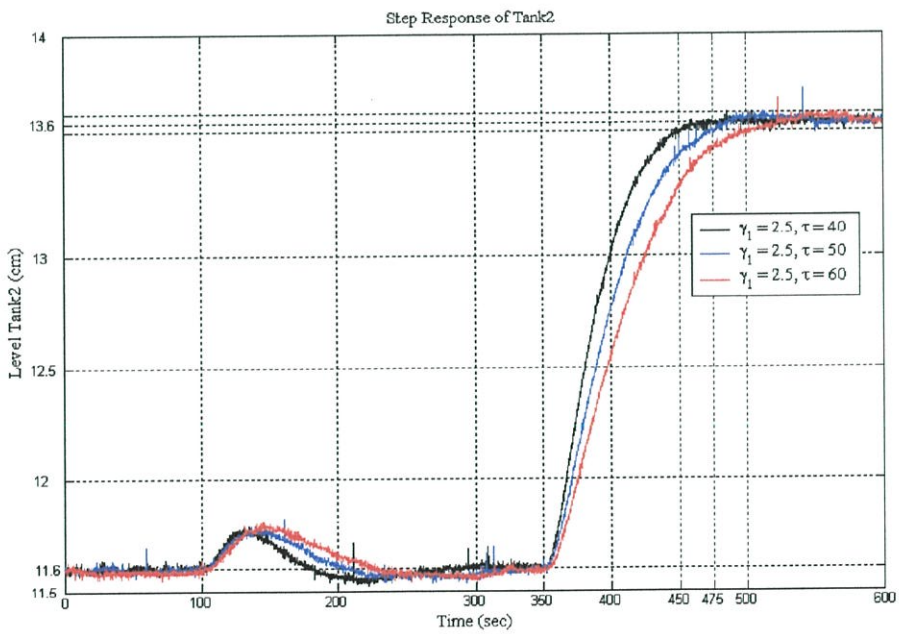
5.3.4.3 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าคงตัวเวลาสมมูล τ

ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อนำตัวควบคุม I-P ที่ได้ออกแบบโดยกำหนดให้ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ มีค่าต่างกันไปในนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.19 และสัญญาณควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 5.20

จากรูปที่ 5.19 (ก) และรูปที่ 5.19 (ข) จะสังเกตเห็นได้ว่า ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าคงตัวเวลาสมมูล τ จะคล้ายกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB ในหัวข้อ 5.3.3.3 คือ เมื่อควบคุมระบบควบคุมด้วยตัวควบคุม I-P ที่ออกแบบโดยกำหนดให้ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ มีค่ามากขึ้นจะทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมช้าลง โดยเมื่ออินพุตอื่นมีการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอ้างอิง จะทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมต่อการอินเตอร์แอคชันระหว่างวงรอบควบคุมนั้นมีค่าที่มากขึ้นและการกลับเข้าสู่ระดับอ้างอิงเดิมจะช้าลง สำหรับสมรรถนะของระบบควบคุมสามารถแสดงเปรียบเทียบกันได้ดังตารางที่ 5.14



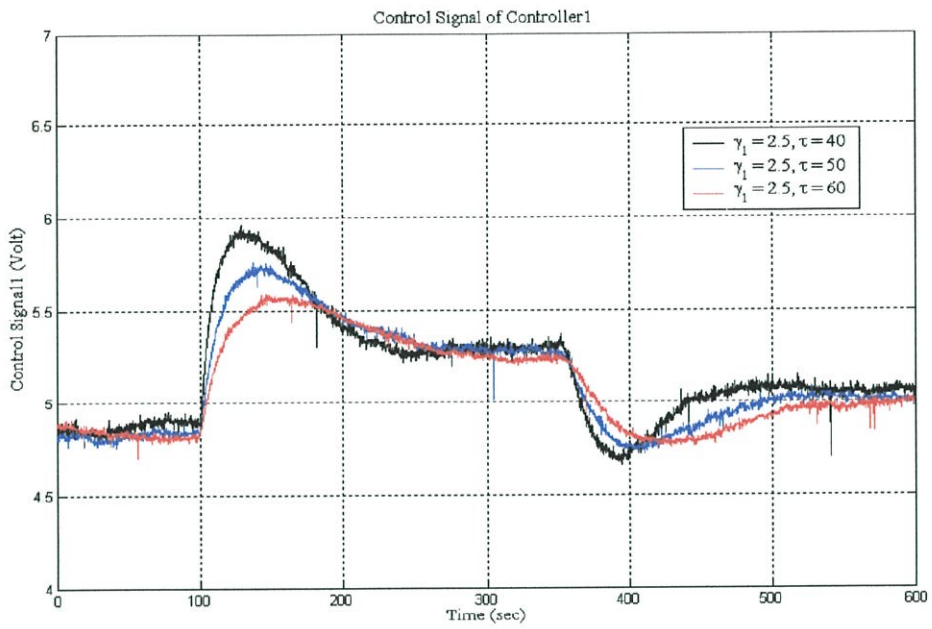
(ก)



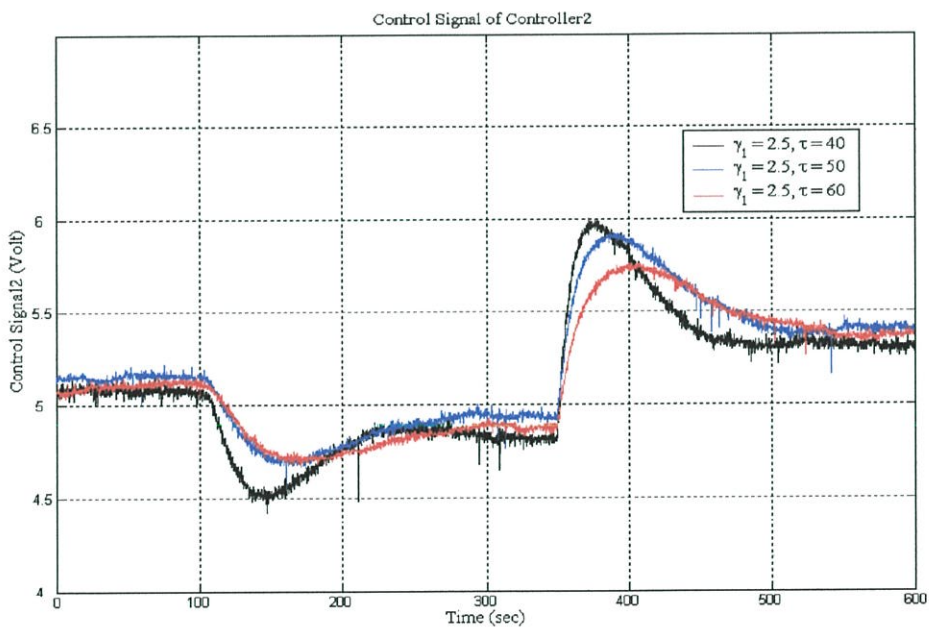
(ข)

(ก) ระดับน้ำของถังที่ 1 (ข) ระดับน้ำของถังที่ 2

รูปที่ 5.19 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อค่าคงตัวเวลาสมมูล τ เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด



(ก)



(ข)

(ก) ตัวควบคุม I-P 1 (ข) ตัวควบคุม I-P 2

รูปที่ 5.20 สัญญาณควบคุมจากการทดลองเมื่อค่าคงตัวเวลาสมมูล τ เปลี่ยนแปลงไป
ในกรณีเฟสต่ำสุด

ตารางที่ 5.14 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อ τ เปลี่ยนแปลงไป
ในกรณีเฟสต่ำสุด

ผลตอบสนอง ของระบบควบคุม		t_s (sec)	P_o (%)	Interaction (%)	t_s of Interaction (sec)
ถึงที่ 1	$\gamma_1 = 2.5, \tau = 40$	94	2	22	160
	$\gamma_1 = 2.5, \tau = 50$	122	2	23	205
	$\gamma_1 = 2.5, \tau = 60$	140	2	25	210
ถึงที่ 2	$\gamma_1 = 2.5, \tau = 40$	97	0.5	17	150
	$\gamma_1 = 2.5, \tau = 50$	122	1.5	17.5	205
	$\gamma_1 = 2.5, \tau = 60$	150	1.5	18	218

จากรูปที่ 5.20 (ก) และ รูปที่ 5.20 (ข) จะสังเกตเห็นได้ว่าสัญญาณควบคุมของตัวควบคุม I-P ทั้งตัวควบคุมที่ 1 และตัวควบคุมที่ 2 นั้น ค่าเริ่มต้นของสัญญาณ (Initial Condition) จะมีค่าที่ไม่เท่ากันแต่จะใกล้เคียงกัน ดังเหตุผลที่ได้อธิบายมาแล้วในหัวข้อที่ 5.3.4.2 สำหรับผลตอบสนองของสัญญาณควบคุมจะคล้ายกับผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB ในหัวข้อ 5.3.3.3 แต่ขนาดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่มากที่สุด จะน้อยกว่าการทดลองจากแบบจำลอง โดยขนาดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่มากที่สุดแสดงได้ดังตารางที่ 5.15

ตารางที่ 5.15 เปรียบเทียบขนาดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่มากที่สุดจากการ
ทดลองเมื่อ τ เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสต่ำสุด

ขนาดการเปลี่ยนแปลง ของสัญญาณควบคุม	$\gamma_1 = 2.5, \tau = 40$	$\gamma_1 = 2.5, \tau = 50$	$\gamma_1 = 2.5, \tau = 60$
I-P 1 (โวลท์)	1.04	0.89	0.77
I-P 2 (โวลท์)	1.18	0.98	0.86

5.4 กระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงกรณีเฟสไม่ต่ำสุด

5.4.1 การวิเคราะห์กระบวนการ

5.4.1.1 ตำแหน่งของโพลและซีโรของกระบวนการ

การหาตำแหน่งโพลและซีโรของกระบวนการนั้นสามารถทำได้โดย การหาดีเทอร์มิแนนท์ของเมทริกฟังก์ชันถ่ายโอนดังได้อธิบายมาแล้วในหัวข้อที่ 2.2.1 และดีเทอร์มิแนนท์ของเมทริกฟังก์ชันถ่ายโอนในสมการ (5.2) แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \det G_{p+}(s) &= \frac{1.5593 \cdot [(112.6251s + 1)(59.1654s + 1) - 5.5959]}{(110.2213s + 1)(131.2354s + 1)(112.6251s + 1)(59.1654s + 1)} \\ &= \frac{(s + 0.0446)(s - 0.0188)}{(s + 0.0091)(s + 0.0076)(s + 0.0089)(s + 0.0169)} \end{aligned} \quad (5.7)$$

จากสมการ (5.7) จะเห็นได้ว่ากระบวนการจะมีโพลอยู่ที่ตำแหน่ง

$$p_1 = -0.0091, p_2 = -0.0076, p_3 = -0.089, p_4 = -0.0169$$

และซีโรอยู่ที่ตำแหน่ง

$$z_1 = -0.0446, z_2 = 0.0188$$

การที่ซีโร z_2 อยู่ทางด้านขวาของระนาบ s นั้นจะทำให้แบนด์วิดท์ของระบบควบคุมถูกจำกัดลง โดยแบนด์วิดท์ของระบบควบคุมในกรณีเฟสไม่ต่ำสุดนั้นต้องน้อยกว่า $z_2/2$ หรือเขียนอีกแบบหนึ่งได้ $\omega_b < 0.0099 \text{ rad/sec}$ ซีโร z_1 และซีโร z_2 จะมีทิศทางของซีโรเอาต์พุตและซีโรอินพุตคือ

	z_1	z_2
ทิศทางของซีโรเอาต์พุต	[0.7684 ; 0.6399]	[-0.7149 ; 0.6992]
ทิศทางของซีโรอินพุต	[0.4447 ; 0.8957]	[-0.5392 ; 0.8422]

โดยซีโร z_1 และซีโร z_2 นั้นจะมีผลกระทบต่อทั้งสองเอาต์พุตพอกัน แต่ซีโร z_1 และซีโร z_2 จะมีผลกระทบต่อเอาต์พุตที่หนึ่งมากกว่าเอาต์พุตที่สอง

5.4.1.2 การวัดการอินเตอร์แอคชัน

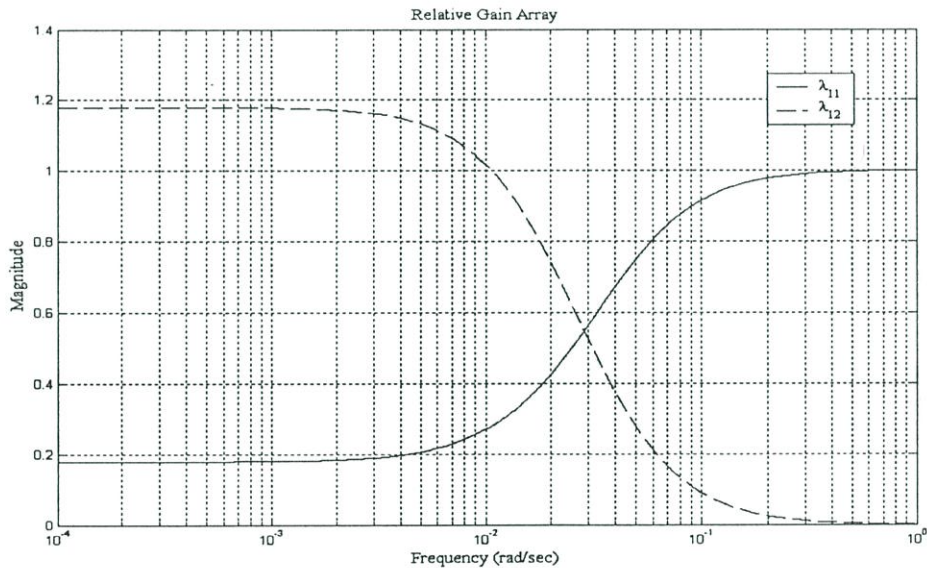
การวัดการอินเตอร์แอคชันของกระบวนการจะใช้วิธี RGA ดังได้อธิบายมาแล้วในหัวข้อที่

2.2.2 จากสมการ (5.2) จะได้ λ_{11} และ $\lambda_{12} = (1 - \lambda_{11})$ คือ

$$\lambda_{11} = \frac{(6663.5091s^2 + 171.7905s + 1)}{(6663.5091s^2 + 171.7905s - 5.5959)} \quad (5.8)$$

$$\lambda_{12} = \frac{-6.6959}{(6663.5091s^2 + 171.7905s - 5.5959)} \quad (5.9)$$

สมการที่ (5.8) และ (5.9) สามารถนำไปพล็อตกราฟเพื่อดูผลตอบสนองทางความถี่ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 5.21



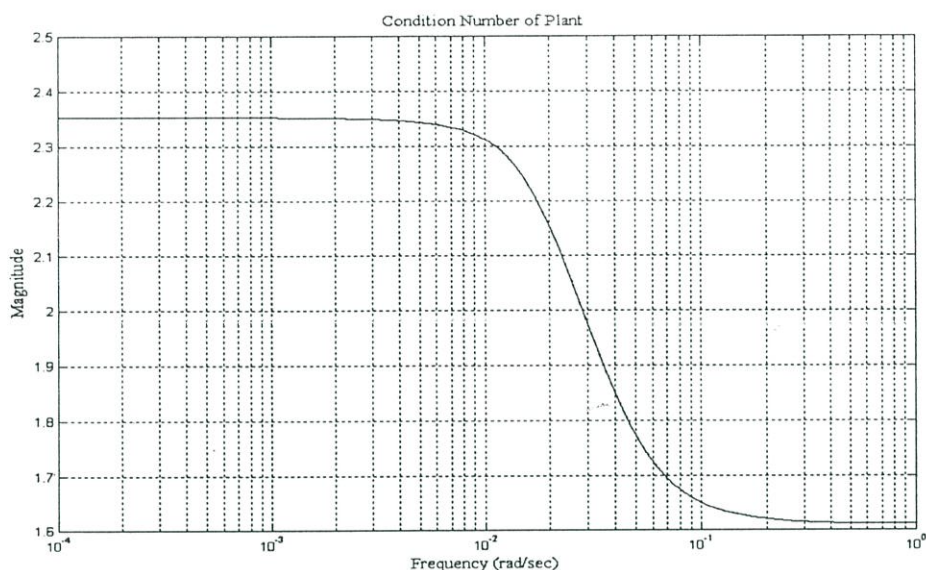
รูปที่ 5.21 RGA ของกระบวนการในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด

จากรูปที่ 5.4 จะสังเกตเห็นได้ว่าผลตอบสนองทางความถี่ของ λ_{11} และ λ_{12} จะเป็นไปในทิศทางที่ต่างกัน โดยในช่วงความถี่ต่ำ ($j\omega \rightarrow 0$) เครื่องหมายของ λ_{11} และ λ_{12} จะเป็นลบและบวก ส่วนในช่วงความถี่สูง ($j\omega \rightarrow \infty$) เครื่องหมายของ λ_{11} และ λ_{12} จะเป็นบวกและลบ ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่ากระบวนการเป็นแบบเฟสไม่ต่ำสุดเนื่องจากมีขั้วโรที่อยู่ที่ขวามถี่ของระนาบ s และเมื่อทำการพิจารณาในช่วงความถี่ต่ำ ($j\omega \rightarrow 0$) จะได้ RGA ของกระบวนการคือ

$$\Lambda(G_+(0)) = \begin{bmatrix} -0.1787 & 1.1787 \\ 1.1787 & -0.1787 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

5.4.1.3 ความไวของกระบวนการ

ความไวของกระบวนการนั้นสามารถวัดได้ โดยดูที่ค่า Condition Number (ϵ) ดังได้อธิบายมาแล้วในหัวข้อ 2.2.3 และผลตอบสนองทางความถี่ของค่า Condition Number (ϵ) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.22



รูปที่ 5.22 ความไวต่อความไม่แน่นอนของกระบวนการในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด

จากรูปที่ 5.22 จะสังเกตเห็นได้ว่าค่า Condition Number ซึ่งเป็นตัวที่ชี้ว่ากระบวนการมีความไวมากน้อยเพียงใด จะมีค่าที่น้อยในช่วงความถี่สูงและมีค่าที่มากในช่วงความถี่ต่ำ ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่ากระบวนการนั้นจะมีความไวในช่วงความถี่ต่ำ (Steady State) มากกว่าในช่วงความถี่สูงและค่า Condition Number ในช่วงความถี่ต่ำนั้นจะมีค่าเท่ากับ 2.3536 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด ณ จุดการทำงานนี้นั้นสามารถทำการควบคุมได้ยากกว่าในกรณีเฟสต่ำสุด เนื่องจากค่า Condition Number มากกว่า แต่จะไม่เป็นกระบวนการแบบ ill-Condition

5.4.2 การออกแบบตัวควบคุม

การออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงในกรณีเฟสไม่ต่ำสุดนั้น จะทำการออกแบบตามวิธีที่ได้อธิบายมาในหัวข้อที่ 4.3.2 ซึ่งจะกำหนดให้ค่าดรชนีเสถียรภาพมีค่าที่เท่ากันสำหรับวงรอบเอาต์พุต 1 และวงรอบเอาต์พุต 2 คือ กำหนดให้ค่าดรชนีเสถียรภาพ $\gamma_1 = 5$ และ $\gamma_2 = 3$ ส่วนค่าคงตัวเวลาสมมูล τ นั้นจะได้จากการแก้สมการในตอนที่ออกแบบตัวควบคุม ซึ่งจะได้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ 1 และตัวควบคุมที่ 2 แสดงได้ดังตารางที่ 5.16

ตารางที่ 5.16 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด

ตัวควบคุม	γ_1	γ_2	τ (sec)	K_i	K_p
I-P 1	5	3	611.704	0.00071792	0.157
I-P 2	5	3	835.5765	0.00054983	0.1149

5.4.3 การจำลองระบบควบคุม

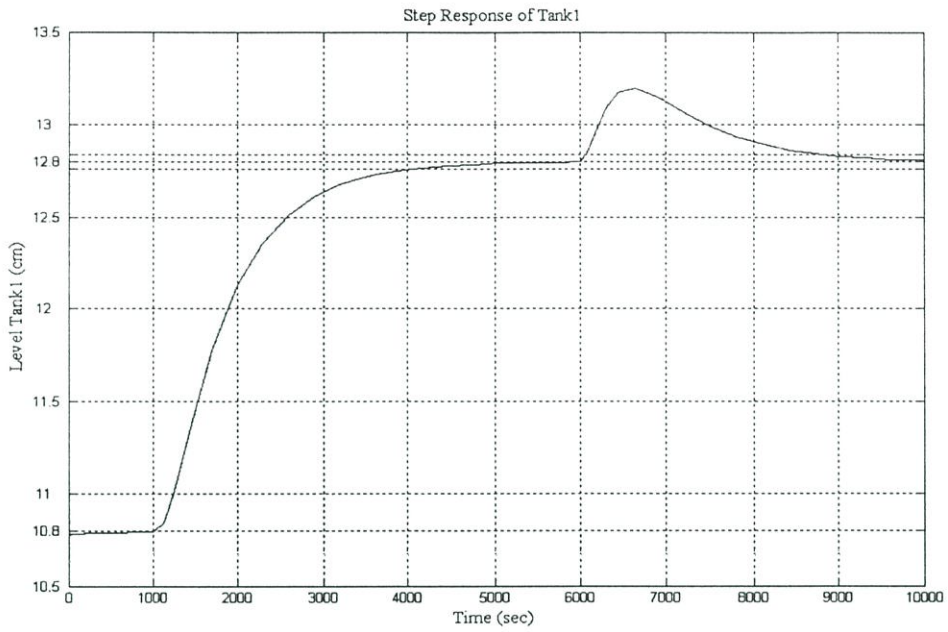
5.4.3.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได

การจำลองการควบคุมระบบควบคุมกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงเพื่อดูผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได มีจุดประสงค์เพื่อต้องการทดสอบตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมระบบว่า มีประสิทธิภาพในการติดตามสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันไดเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่ ก่อนที่จะนำตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไปทดลองกับกระบวนการจริง โดยในการจำลองการทำงานจะกำหนดให้ระดับน้ำในถังที่ 1 และถังที่ 2 มีการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าเดิม 2 เซนติเมตร โดยระดับน้ำในถังที่ 1 จะเปลี่ยนจากเดิม 10.8 เซนติเมตรเป็น 12.8 เซนติเมตร และระดับน้ำในถังที่ 2 จะเปลี่ยนจากเดิม 11.5 เซนติเมตรเป็น 13.5 เซนติเมตร ซึ่งระดับน้ำในถังที่ 1 และถังที่ 2 จะมีการเปลี่ยนแปลงที่เวลา 1000 วินาที และ 6000 วินาทีตามลำดับ ผลตอบสนองของระบบควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 5.23 และสัญญาณควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 5.24

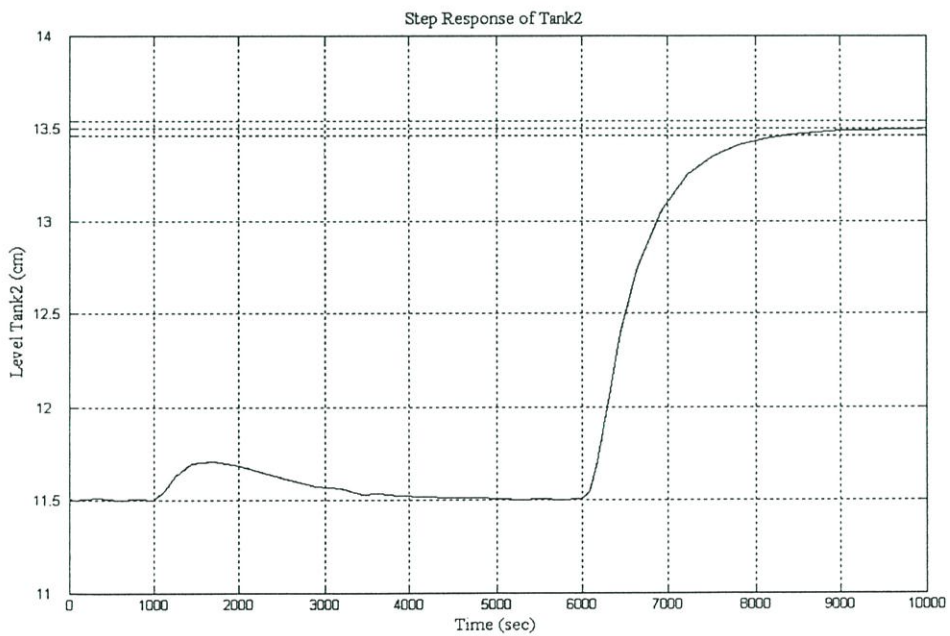
จากรูปที่ 5.23 (ก) และรูปที่ 5.23 (ข) จะสังเกตเห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบ I-P สามารถควบคุมให้ระดับน้ำเปลี่ยนไปยังระดับที่ 12.8 เซนติเมตร และ 13.5 เซนติเมตร สำหรับถังที่ 1 และถังที่ 2 ได้ตามที่ต้องการ โดยผลตอบสนองของระบบควบคุมจะมีค่าเวลาเข้าที่เท่ากับ 3054 วินาที (ประมาณ 3.655τ สำหรับตัวควบคุม I-P 2) และ 2348 วินาที (ประมาณ 3.8385τ สำหรับตัวควบคุม I-P 1) สำหรับถังที่ 1 และ สำหรับถังที่ 2 ,ไม่มีค่าพุ่งเกิน และไม่มีค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัวทั้ง 2 ถัง โดยสมรรถนะของระบบควบคุมสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.17

ตารางที่ 5.17 สมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด

ผลตอบสนองของระบบควบคุม	t_s (sec)	P_o (%)	Interaction (%)	t_s of Interaction (sec)
ถังที่ 1	3054	0	40	3333
ถังที่ 2	2348	0	20.8	2980



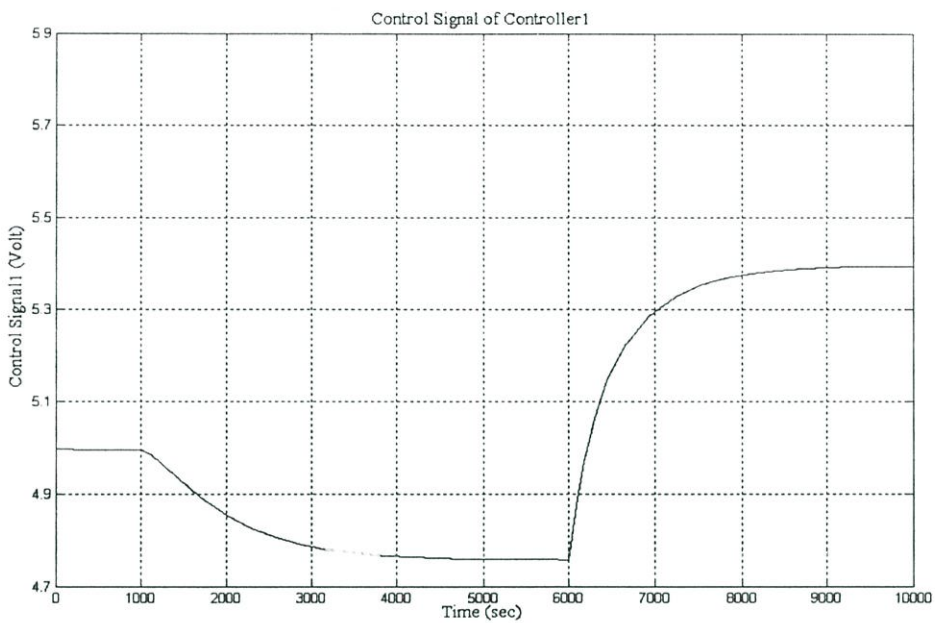
(ก)



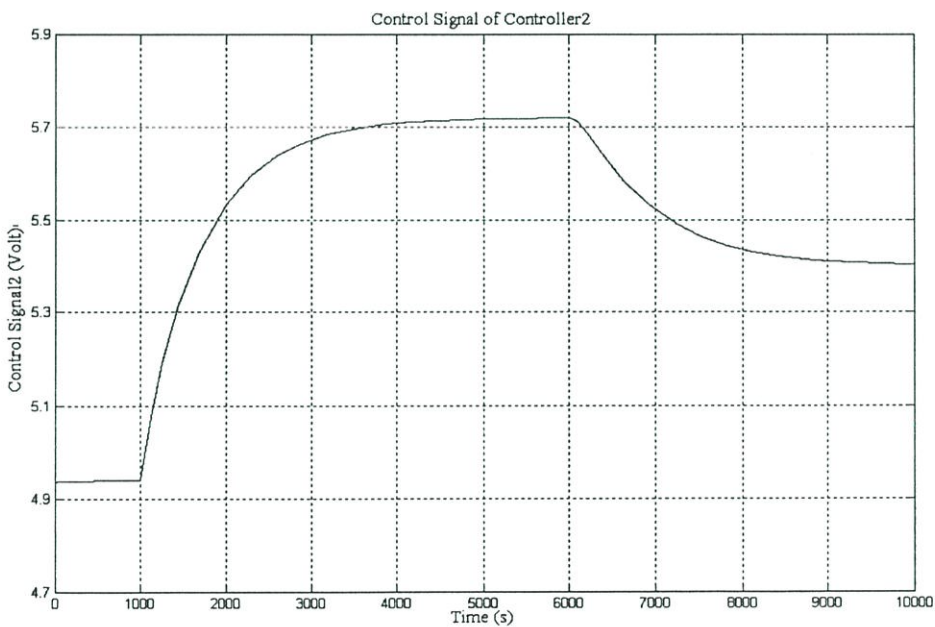
(ข)

(ก) ระดับน้ำของถังที่ 1 (ข) ระดับน้ำของถังที่ 2

รูปที่ 5.23 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได
ในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด



(ก)



(ข)

(ก) ตัวควบคุม I-P 1 (ข) ตัวควบคุม I-P 2

รูปที่ 5.24 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันไดในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด

5.4.3.2 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าดรรชนี

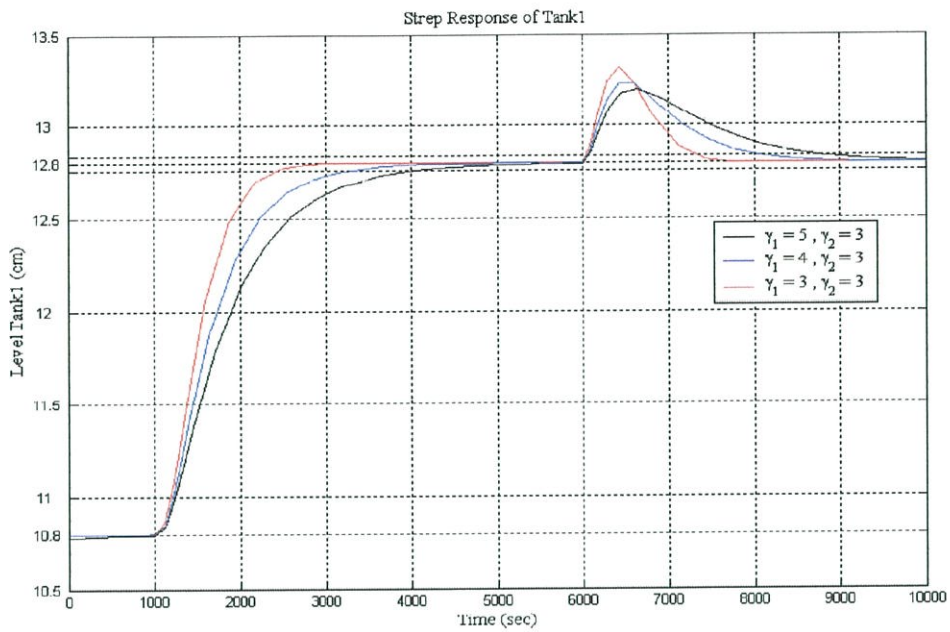
เสถียรภาพ γ_i

หัวข้อนี้จะทำการศึกษาดังผลกระทบบที่มีต่อผลตอบสนองของระบบควบคุม เมื่อค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_i เปลี่ยนแปลงไป โดยในการศึกษานี้จะทำการออกแบบตัวควบคุมทั้งสองตัว โดยกำหนดให้ γ_1 มีค่าเท่ากับ 5, 4 และ 3 ตามลำดับ และคงค่า γ_2 ให้เท่ากับ 3 ส่วนค่าคงตัวเวลาสมมูล τ นั้นจะได้ออกมาจากการแก้สมการในตอนที่ออกแบบตัวควบคุม ผลตอบสนองของระบบควบคุมและสัญญาณควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 5.25 และ รูปที่ 5.26 ตามลำดับ

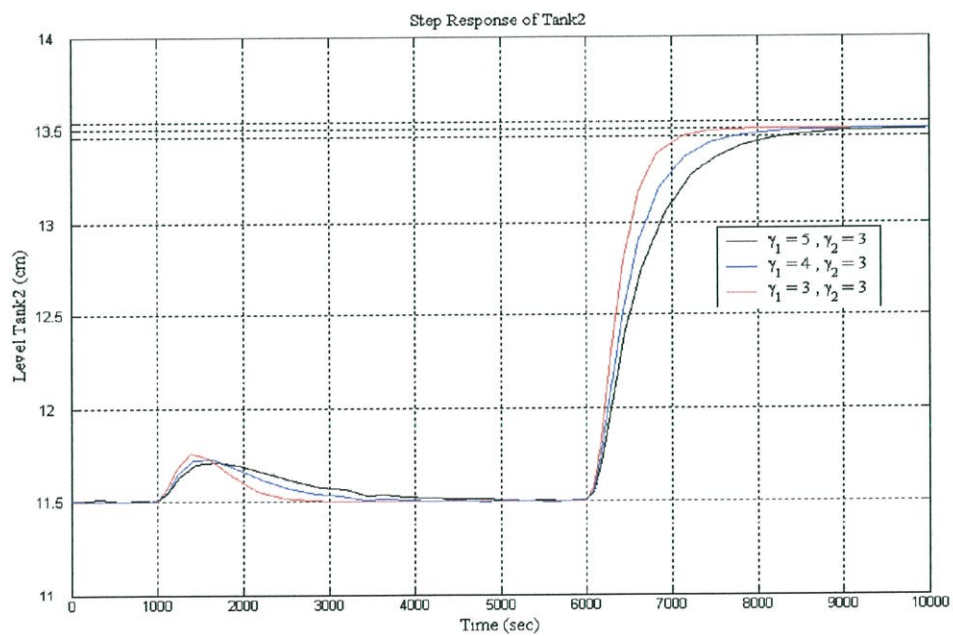
จากรูปที่ 5.25 (ก) และรูปที่ 5.25 (ข) จะสังเกตเห็นได้ว่าตัวควบคุม I-P ที่ออกแบบโดยการกำหนดให้ค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_1 มีค่าที่น้อยจะทำให้ระบบควบคุมมีความคงทนน้อยลง โดยเมื่ออินพุตอื่นมีการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอ้างอิง จะทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมต่อการอินเตอร์แอคชันระหว่างวงรอบควบคุมนั้นมีค่าที่เพิ่มขึ้น แต่จะสามารถกลับเข้าสู่ระดับอ้างอิงเดิมได้เร็วขึ้น และผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อระดับสัญญาณอ้างอิงเปลี่ยนแปลงไปก็จะมีค่าเวลาเข้าที่เร็วขึ้น เหตุที่เป็นดังนี้ก็เพราะว่าเมื่อ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ค่า τ เปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน โดยเมื่อ γ_1 มีค่าลดลงค่า τ ก็ลดลง ซึ่งจะทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมเร็วขึ้นสมรรถนะของระบบควบคุมสามารถแสดงเปรียบเทียบกันได้ดังตารางที่ 5.18

ตารางที่ 5.18 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อ γ_1 เปลี่ยนแปลงไป
ในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด

ผลตอบสนอง ของระบบควบคุม		t_s (sec)	P_o (%)	Interaction (%)	t_s of Interaction (sec)
ถึงที่ 1	$\gamma_1 = 5, \gamma_2 = 3$	3054	0	40	3333
	$\gamma_1 = 4, \gamma_2 = 3$	2252	0	43.8	2427
	$\gamma_1 = 3, \gamma_2 = 3$	1441	0	51.2	1446
ถึงที่ 2	$\gamma_1 = 5, \gamma_2 = 3$	2348	0	20.8	2980
	$\gamma_1 = 4, \gamma_2 = 3$	1703	0	22.4	2270
	$\gamma_1 = 3, \gamma_2 = 3$	1135	0	25.2	1428



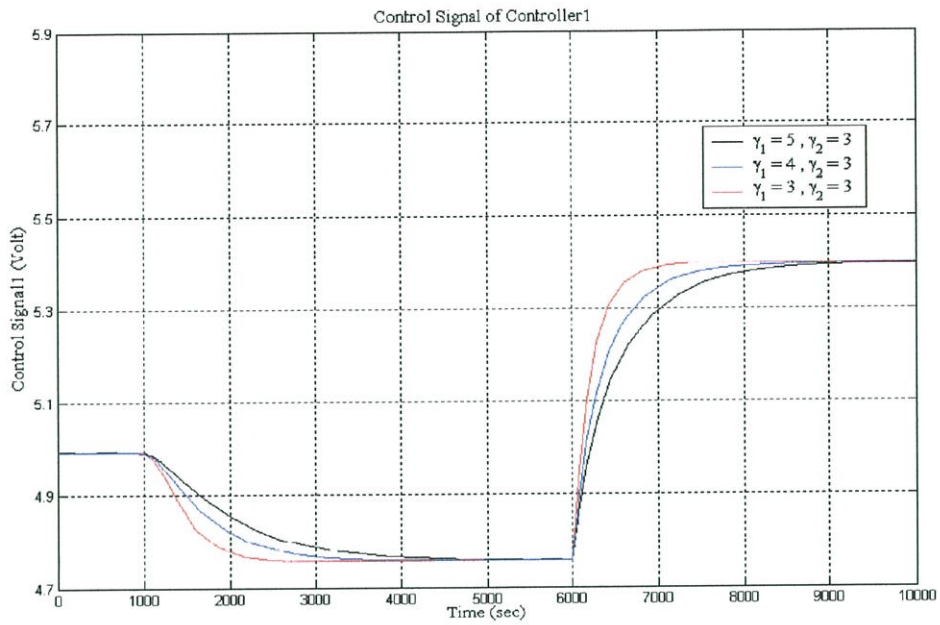
(ก)



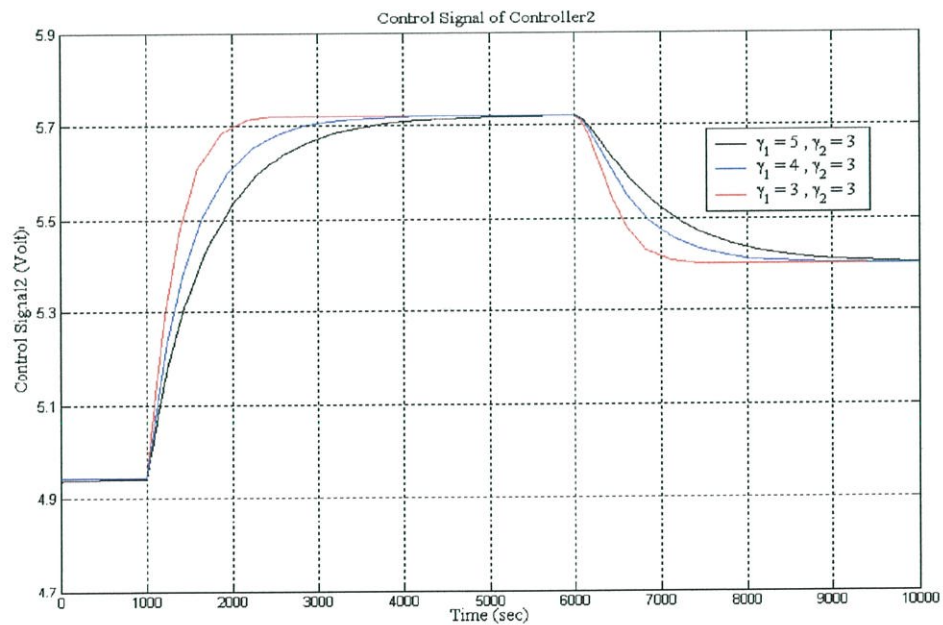
(ข)

(ก) ระดับน้ำของถังที่ 1 (ข) ระดับน้ำของถังที่ 2

รูปที่ 5.25 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อค่าตรรกยะเสถียรภาพ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด



(ก)



(ข)

(ก) ตัวควบคุม I-P 1 (ข) ตัวควบคุม I-P 2

รูปที่ 5.26 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อค่าดรชนี้เสถียรภาพ γ_1 เปลี่ยนแปลงไป
ในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด

จากรูปที่ 5.26 (ก) และรูปที่ 5.26 (ข) จะเห็นได้ว่าสัญญาควบคุมของตัวควบคุม I-P ที่ออกแบบโดยกำหนดให้ค่าดรรรชนีเสถียรภาพ γ_1 มีค่าน้อยนั้น ผลตอบสนองของสัญญาควบคุมจะเร็วกว่าในกรณีที่ออกแบบโดยกำหนดให้ค่าดรรรชนีเสถียรภาพ γ_1 มีค่าที่มาก เหตุที่เป็นดังนั้นก็เพราะว่าในการออกแบบตัวควบคุมโดยกำหนดให้ค่า γ_1 เปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ค่า τ เปลี่ยนแปลงไปด้วยโดยเมื่อกำหนดให้ค่า γ_1 มีค่าน้อยค่า τ ก็จะมีค่าที่และเมื่อกำหนดให้ γ_1 มีค่าที่มาก ค่า τ ก็จะมีค่าที่มากเช่นเดียวกันทำให้ผลตอบสนองของสัญญาควบคุมและระบบควบคุมเร็วขึ้น ซึ่งจะสอดคล้องกับหลักการของวิธี CDM [12] ที่ว่าค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ที่น้อยจะทำให้ผลตอบสนองของสัญญาควบคุมและระบบควบคุมเร็วกว่าค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ที่มาก สำหรับขนาดของการเปลี่ยนแปลงสัญญาควบคุมที่มากที่สุดนั้นจะเท่ากันคือ 0.639 โวลท์

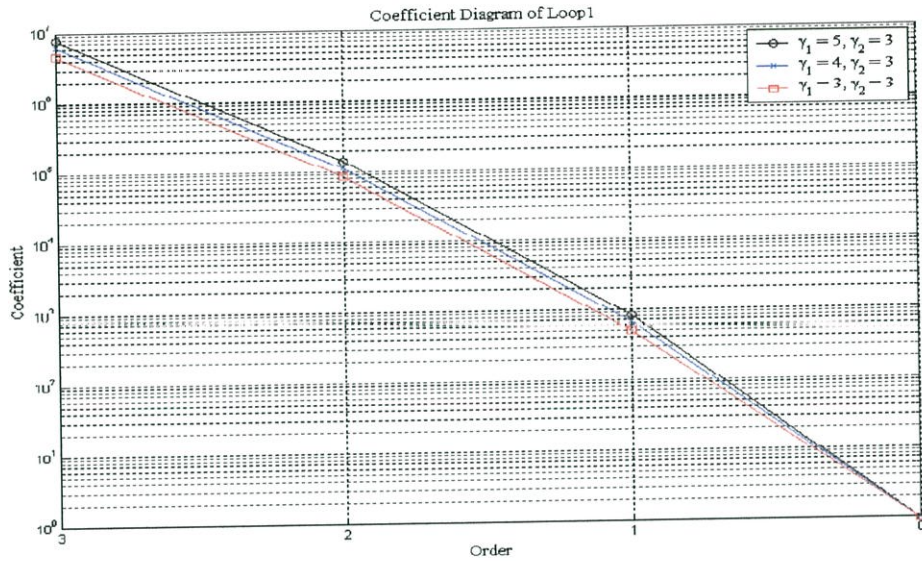
ตารางที่ 5.19 แสดงเปรียบเทียบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเมื่อ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด โดยจากตารางจะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อออกแบบให้ค่าดรรรชนีเสถียรภาพ γ_1 มีค่าน้อยลงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ I จะเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ P จะคงที่และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ จะลดลง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าพารามิเตอร์ I นั้นจะทำให้ผลตอบสนองของสัญญาควบคุมและระบบควบคุมเร็วขึ้น

ตารางที่ 5.19 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเมื่อ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด

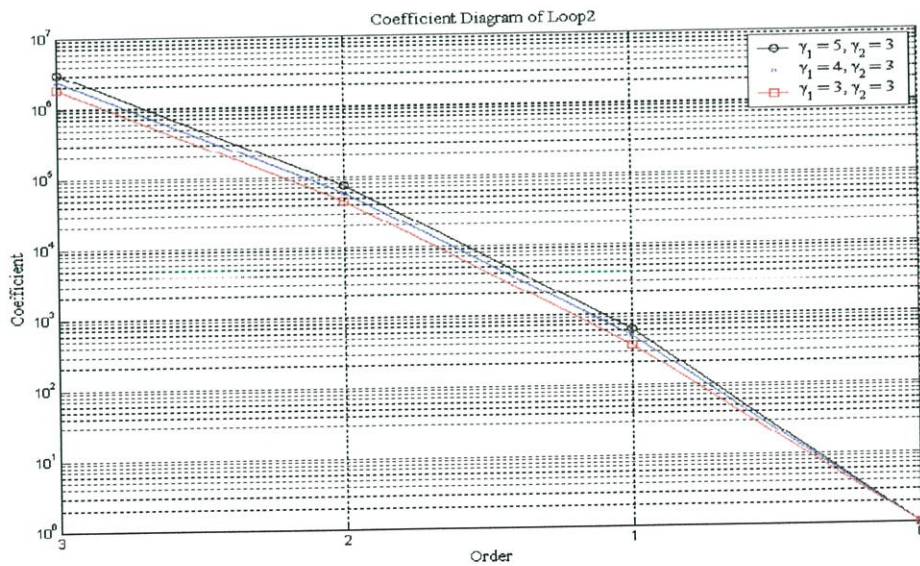
ตัวควบคุม		τ	K_i	K_p
I-P 1	$\gamma_1 = 5, \gamma_2 = 3$	611.704	0.00071792	0.157
	$\gamma_1 = 4, \gamma_2 = 3$	489.3632	0.0008974	0.157
	$\gamma_1 = 3, \gamma_2 = 3$	367.0224	0.0012	0.157
I-P 2	$\gamma_1 = 5, \gamma_2 = 3$	835.5765	0.00054983	0.1149
	$\gamma_1 = 4, \gamma_2 = 3$	668.4612	0.00068729	0.1149
	$\gamma_1 = 3, \gamma_2 = 3$	501.3459	0.00091639	0.1149

เมื่อนำเอาสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะ $P_{+12}(s)$ และ $P_{+21}(s)$ ที่ได้ออกแบบไว้สำหรับวงรอบเอาต์พุต 1 และวงรอบเอาต์พุต 2 ในกรณีที่เปลี่ยนแปลงค่าดรรรชนีเสถียรภาพ γ_1 มาพล็อตลงในแผนผังค่าสัมประสิทธิ์จะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.27 จากรูปที่ 5.27 (ก) และรูปที่ 5.27 (ข) จะเห็นได้ว่าเมื่อกำหนดให้ค่าดรรรชนีเสถียรภาพ $\gamma_1 = 5$ (วงกลม) ปลายเส้นโค้งของค่าสัมประสิทธิ์จะเอียง (ลาดชัน) ขึ้นไปทางด้านขวามากและความโค้งของเส้นค่าสัมประสิทธิ์จะมีค่ามาก ทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมช้าลงแต่จะมีเสถียรภาพและความคงทนมาก และเมื่อ

กำหนดให้ค่าดรรชนีเสถียรภาพ $\gamma_1 = 4$ (กากบาท) และ $\gamma_1 = 3$ (สี่เหลี่ยม) ปลายเส้นโค้งของค่าสัมประสิทธิ์จะเอียง (ลาดชัน) ลงไปทางด้านซ้ายมากขึ้นและความโค้งของเส้นค่าสัมประสิทธิ์จะมีค่าน้อยลงตามลำดับ ซึ่งทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมเร็วขึ้นแต่จะมีเสถียรภาพและความคงทนลดลง สอดคล้องกับหลักการของวิธี CDM [12]



(ก)



(ข)

(ก) แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ของวงรอบเอาต์พุต 1 (ข) แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ของวงรอบเอาต์พุต 2
รูปที่ 5.27 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ของระบบควบคุมที่ออกแบบเมื่อค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด

5.4.4 การทดลองกับกระบวนการจริง

หลังจากที่ได้ทำการจำลองการควบคุมกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงด้วยตัวควบคุม I-P ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM แล้ว ต่อไปจะนำตัวควบคุมดังกล่าวที่ได้ออกแบบมาใช้ทำการควบคุมกับกระบวนการจริง โดยจะใช้โปรแกรม MATLAB ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมซึ่งจะใช้ค่าเวลาชักตัวอย่าง (Sampling Time) เท่ากับ 0.1 วินาทีสำหรับตัวควบคุม I-P ทั้ง 2 ตัว ส่วนพารามิเตอร์และขั้นตอนการทดลองจะทำเช่นเดียวกันกับการจำลองการทำงานก่อนหน้าในหัวข้อ 5.4.3

5.4.4.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได

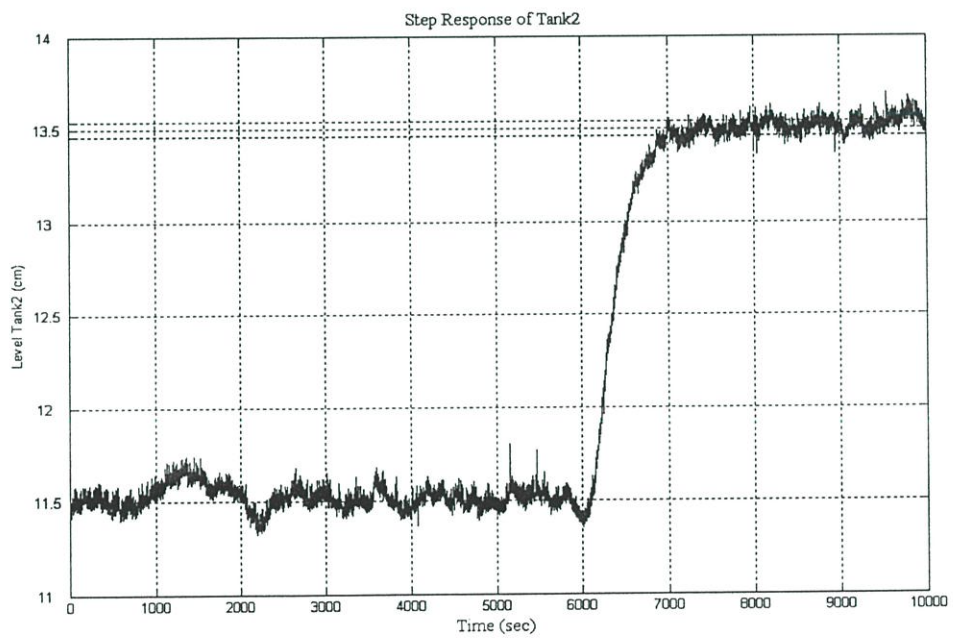
ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันไดแสดงได้ดังรูปที่ 5.28 และสัญญาณควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 5.29 จากรูปที่ 5.28 (ก) และรูปที่ 5.28 (ข) จะสังเกตเห็นได้ว่าตัวควบคุม I-P สามารถควบคุมให้ระดับน้ำเปลี่ยนไปยังระดับที่ 12.8 เซนติเมตร และ 13.5 เซนติเมตรสำหรับถึงที่ 1 และถึงที่ 2 ได้ตามที่ต้องการ โดยค่าเวลาเข้าที่จะเร็วกว่าผลที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลองสำหรับทั้ง 2 ถึง, มีค่าพุ่งเกินเล็กน้อยสำหรับถึงที่ 1, ไม่มีค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัว การที่ค่าเวลาเข้าที่ของผลที่ได้จากการทดลองจริงเร็วกว่าผลที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลองนั้นเกิดขึ้นเนื่องจากลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นและความไวของกระบวนการ ส่วนผลจากการอินเตอร์แอคชันที่เกิดขึ้นระหว่างวงรอบควบคุมเมื่อสัญญาณอ้างอิงของระดับน้ำในถึงที่ 1 หรือสัญญาณอ้างอิงของระดับน้ำในถึงที่ 2 เปลี่ยนแปลงไปจะมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลอง ซึ่งการที่ผลจากการอินเตอร์แอคชันระหว่างวงรอบควบคุมนั้นมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลอง ก็เพราะว่าสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมทั้ง 2 ตัวนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างช้าๆ และขนาดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมก็ไม่มากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณควบคุมในกรณีเฟสต่ำสุด และในการกลับเข้าสู่ระดับอ้างอิงเดิมเมื่อสัญญาณอ้างอิงของระดับน้ำในถึงอื่นมีการเปลี่ยนแปลงไป จะมีช่วงเวลาที่จะเร็วกว่าผลที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลอง เหตุที่ใช้เวลาเร็วกว่าก็เพราะว่าผลตอบสนองของระบบควบคุมนั้นเร็วจึงทำให้การกลับเข้าสู่ระดับอ้างอิงเดิมเร็วขึ้นด้วย สมรรถนะของระบบควบคุมสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.20

ตารางที่ 5.20 สมรรถนะของระบบควบคุมจากการทดลองในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด

ผลตอบสนอง ของระบบควบคุม	t_s (sec)	P_o (%)	Interaction (%)	t_s of Interaction (sec)
ถึงที่ 1	1500	2	45	2000
ถึงที่ 2	1300	0	18	2000



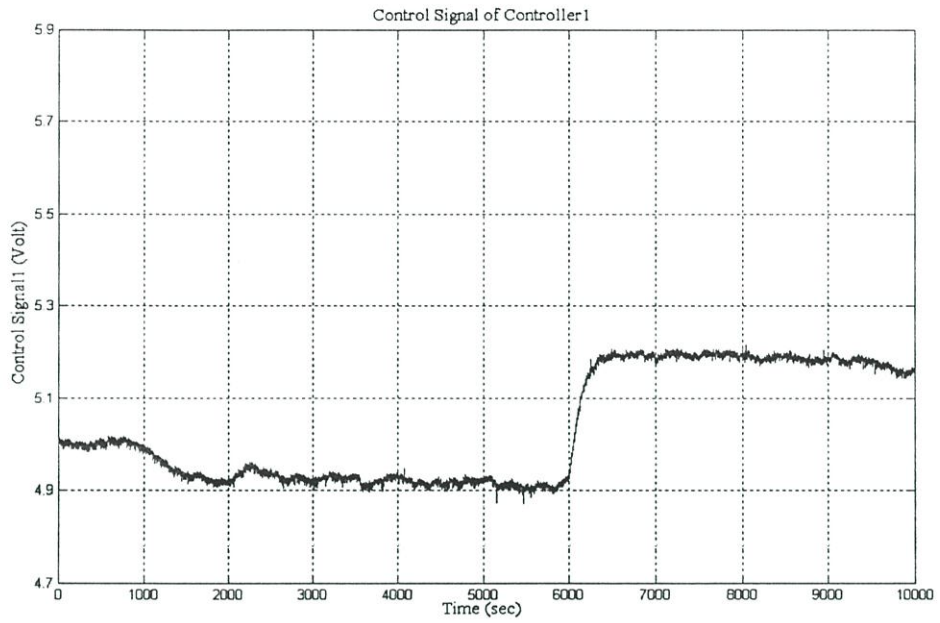
(ก)



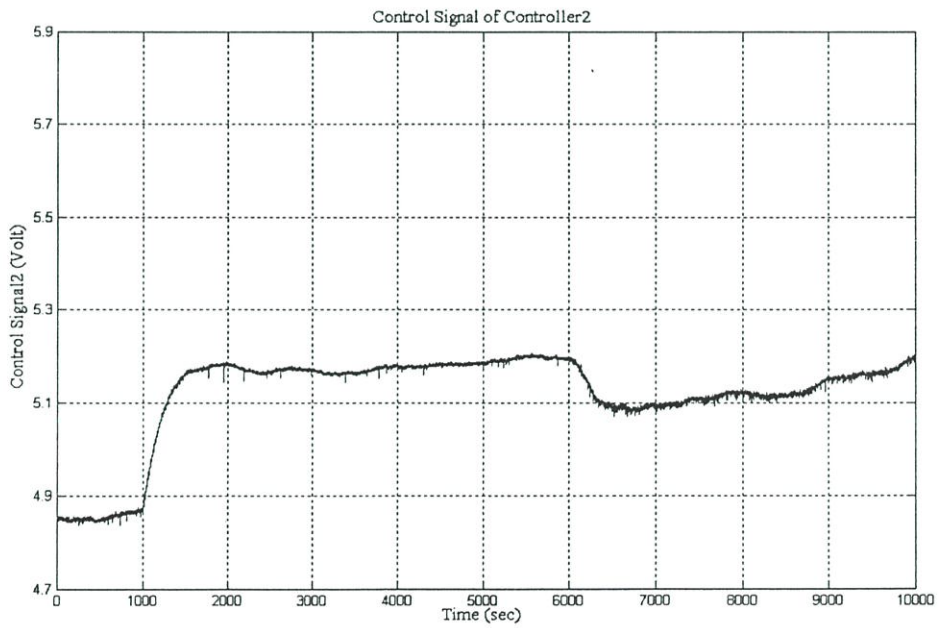
(ข)

(ก) ระดับน้ำของถังที่ 1 (ข) ระดับน้ำของถังที่ 2

รูปที่ 5.28 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได
ในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด



(ก)



(ข)

(ก) ตัวควบคุม I-P 1 (ข) ตัวควบคุม I-P 2

รูปที่ 5.29 สัญญาณควบคุมจากการทดลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันไดในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด

5.4.4.2 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าดรชนี

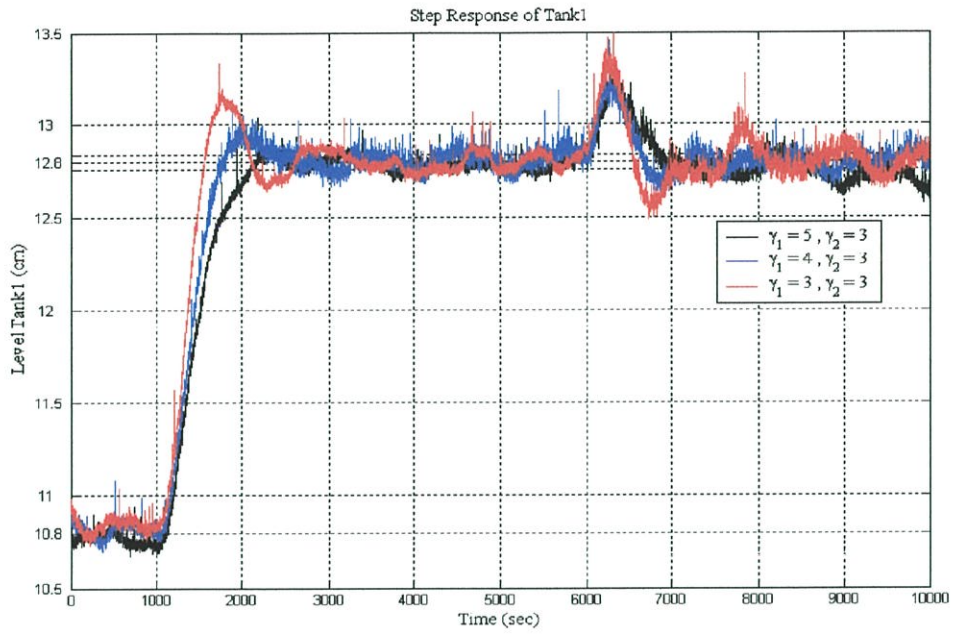
เสถียรภาพ γ_i

ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อนำตัวควบคุม I-P ที่ได้ออกแบบโดยกำหนดให้ค่าดรชนีเสถียรภาพ γ_1 มีค่าแตกต่างกันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.30 และสัญญาณควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 5.31

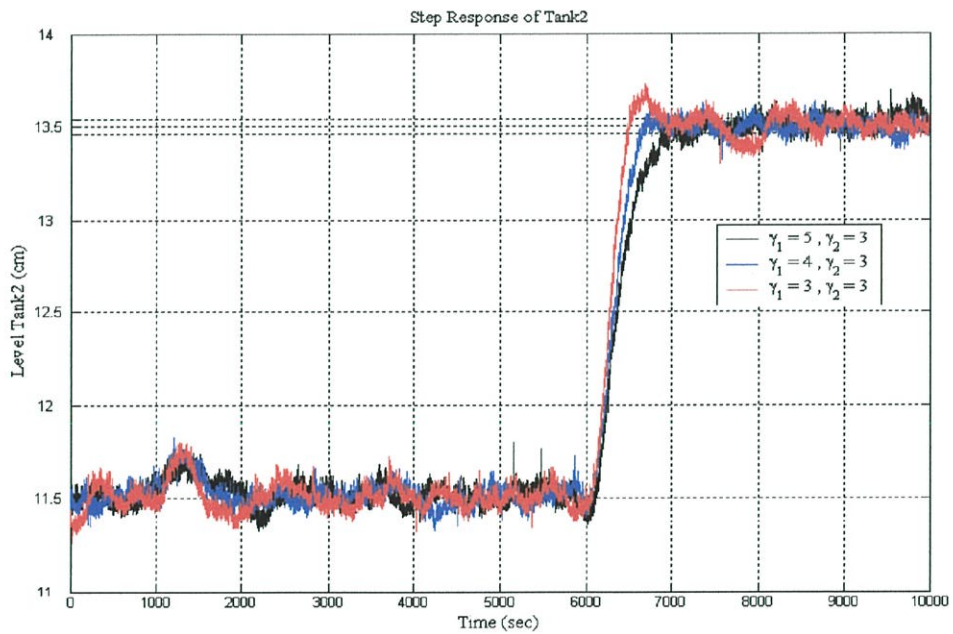
จากรูปที่ 5.30 (ก) และรูปที่ 5.30 (ข) จะสังเกตเห็นได้ว่าตัวควบคุม I-P ที่ออกแบบด้วยการกำหนดให้ค่าดรชนีเสถียรภาพ γ_1 มีค่าน้อย จะทำให้ระบบควบคุมมีความคงทนน้อยลง โดยเมื่ออินพุตอื่นมีการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอ้างอิง จะทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมต่อการอินเตอร์แอคชันระหว่างวงรอบควบคุมนั้นมีค่าที่เพิ่มขึ้นแต่จะสามารถกลับเข้าสู่ค่าระดับอ้างอิงเดิมได้เร็วขึ้น ส่วนผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อระดับสัญญาณอ้างอิงเปลี่ยนแปลงไปจะเร็วขึ้นแต่จะมีค่าเวลาเข้าที่ช้าลงและมีค่าพุ่งเกินที่มากขึ้น ซึ่งค่อนข้างจะแตกต่างจากผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB ในหัวข้อ 5.3.4.2 เนื่องจากผลจากการทดลองกับแบบจำลองนั้นไม่มีค่าพุ่งเกิน โดยเหตุที่มีค่าเวลาเข้าที่ช้าลงและมีค่าพุ่งเกินที่มากขึ้นนั้นเกิดขึ้นเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นและความไวของกระบวนการ ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าค่าความไวของกระบวนการ ณ จุดการทำงานในกรณีเฟสไม่ต่ำสุดนี้มีค่าเท่ากับ 2.3536 ซึ่งมากกว่าการทดลองในกรณีเฟสต่ำสุดที่มีค่าเท่ากับ 1.7808 ทำให้การควบคุมกระบวนการเพื่อให้สามารถทำงานได้ตามที่ต้องการนั้นยากมากกว่าในกรณีเฟสต่ำสุด สำหรับสมรรถนะของระบบควบคุมสามารถแสดงเปรียบเทียบกันได้ดังตารางที่ 5.21

ตารางที่ 5.21 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด

ผลตอบสนอง ของระบบควบคุม		t_s (sec)	P_o (%)	Interaction (%)	t_s of Interaction (sec)
ถังที่ 1	$\gamma_1 = 5, \gamma_2 = 3$	1500	2	45	2000
	$\gamma_1 = 4, \gamma_2 = 3$	1500	8	48	1730
	$\gamma_1 = 3, \gamma_2 = 3$	1600	15	50	1620
ถังที่ 2	$\gamma_1 = 5, \gamma_2 = 3$	1300	0	18	2000
	$\gamma_1 = 4, \gamma_2 = 3$	1400	2	23	1500
	$\gamma_1 = 3, \gamma_2 = 3$	1500	8	25	1135



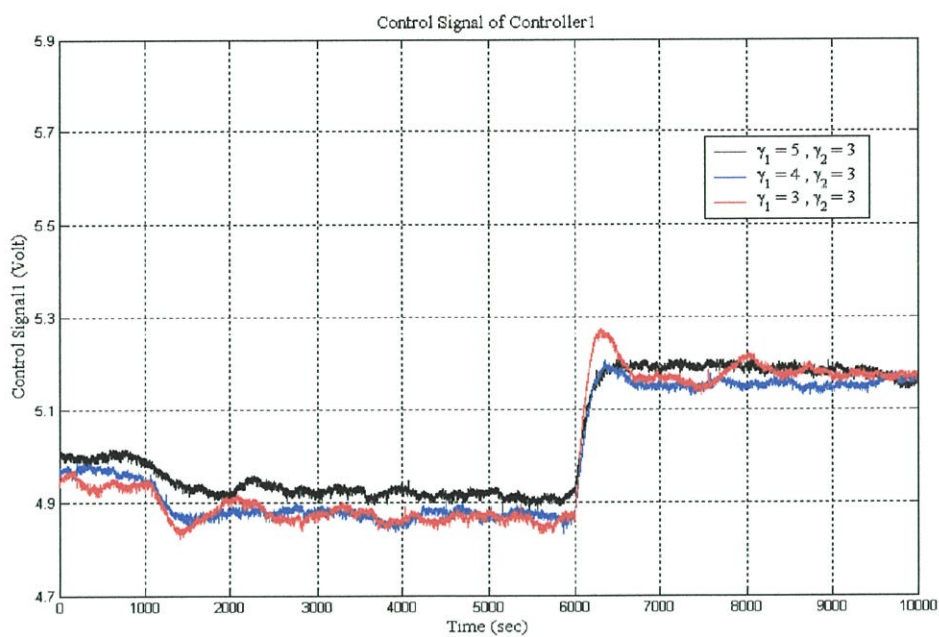
(ก)



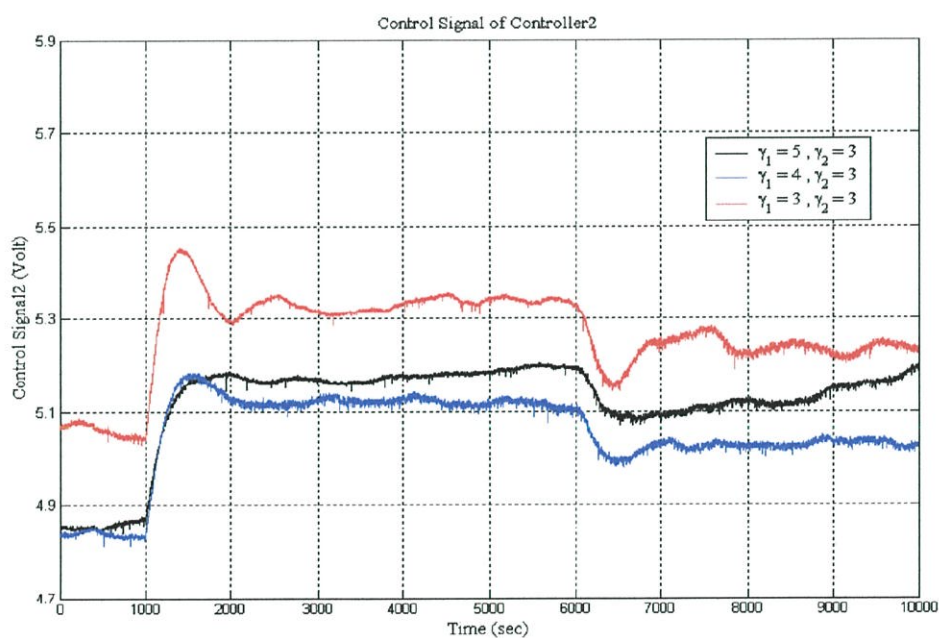
(ข)

(ก) ระดับน้ำของถังที่ 1 (ข) ระดับน้ำของถังที่ 2

รูปที่ 5.30 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อค่าดรชนีเสถียรภาพ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด



(ก)



(ข)

(ก) ตัวควบคุม I-P 1 (ข) ตัวควบคุมที่ I-P 2

รูปที่ 5.31 สัญญาณควบคุมจากการทดลองเมื่อค่าธรรมเนียมเสถียรภาพ γ_1 เปลี่ยนแปลงไป
ในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด

จากรูปที่ 5.31 (ก) จะสังเกตเห็นได้ว่าสัญญาณควบคุมของตัวควบคุม I-P ตัวที่ 1 ค่าเริ่มต้นของสัญญาณ (Initial Condition) จะมีค่าที่ไม่เท่ากันแต่จะใกล้เคียงกันและผลตอบสนองของสัญญาณควบคุมค่อนข้างที่จะคล้ายคลึงกับ ผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB ในหัวข้อที่ 5.4.4.2 ในขณะที่ตัวควบคุม I-P ตัวที่ 2 นั้นค่าเริ่มต้นของสัญญาณจะใกล้เคียงกันสำหรับกรณี $\gamma_1 = 5, \gamma_2 = 3$ และ $\gamma_1 = 4, \gamma_2 = 3$ สำหรับกรณีที่ $\gamma_1 = 3, \gamma_2 = 3$ ค่าเริ่มต้นของสัญญาณนั้นจะแตกต่างกันมาก และผลตอบสนองของสัญญาณควบคุมนั้นก็ค่อนข้างที่จะแตกต่างจากผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB ในหัวข้อที่ 5.4.4.2 ซึ่งจากรูปที่ 5.31 (ข) สังเกตเห็นได้ว่าระดับของสัญญาณควบคุมหลังจากที่มีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณอ้างอิงของระดับน้ำในถังที่ 1 หรือถังที่ 2 นั้นจะมีค่าที่ค่อนข้างแตกต่างกันไม่ใกล้เคียงกันเท่าไรนัก แต่สำหรับสัญญาณควบคุมของตัวควบคุม I-P 1 ในรูปที่ 5.31 (ก) นั้นระดับของสัญญาณควบคุมหลังจากที่มีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณอ้างอิงของระดับน้ำในถังที่ 1 หรือถังที่ 2 จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันมากไม่แตกต่างกันเท่าไร ซึ่งเหตุการณ์ที่กล่าวมาทั้งหมดนี้นั้นก็เกิดเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นและความไวของกระบวนการ ขนาดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่มากที่สุดแสดงได้ดังตารางที่ 5.22

ตารางที่ 5.22 เปรียบเทียบขนาดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่มากที่สุดจากการทดลองเมื่อ γ_1 เปลี่ยนแปลงไปในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด

ขนาดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุม	$\gamma_1 = 5, \gamma_2 = 3$	$\gamma_1 = 4, \gamma_2 = 3$	$\gamma_1 = 3, \gamma_2 = 3$
I-P 1 (โวลท์)	0.28	0.32	0.4
I-P 2 (โวลท์)	0.315	0.35	0.41

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุม I-P ด้วยวิธี CDM สำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง ทั้งในกรณีเฟสต่ำสุดและเฟสไม่ต่ำสุด ซึ่งโครงสร้างของตัวควบคุม I-P นั้นจะเป็นแบบโครงสร้างตัวควบคุมแบบแยกอิสระ โดยในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM นั้นจะต้องรู้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงก่อน ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงนั้น จะได้มาจากสมการสมดุลมวลและกฎของเบอร์นูลี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มานั้นจะเป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงได้ใช้วิธีของอนุกรมเทเลอร์เพื่อแปลงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ให้เป็นแบบจำลองเชิงเส้น จากนั้นจึงนำแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นนี้ไปออกแบบตัวควบคุม I-P ด้วยวิธี CDM โดยในการออกแบบตัวควบคุมนั้นจะทำการออกแบบตัวควบคุมแบบแยกอิสระจากกัน ทั้งในกรณีเฟสต่ำสุดและเฟสไม่ต่ำสุด หลังจากที่ได้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมเรียบร้อยแล้วก็จะนำตัวควบคุมไปจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB และทดลองกับกระบวนการจริงต่อไป

การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB และการทดลองกับกระบวนการจริงนั้นแบ่งออกได้เป็น 2 กรณีด้วยกันคือกรณีเฟสต่ำสุดและเฟสไม่ต่ำสุด โดยในกรณีเฟสต่ำสุดนั้นจะมีขั้นตอนในการทดสอบดังนี้ ขั้นตอนแรกทำการทดสอบผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อกำหนดอินพุตของระบบควบคุมเป็นแบบขั้นบันได ขั้นตอนที่สองทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของการปรับค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_i ว่ามีผลอย่างไรต่อผลตอบสนองของระบบควบคุม และขั้นตอนที่สามทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของการปรับค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ว่ามีผลอย่างไรต่อผลตอบสนองของระบบควบคุม ส่วนในกรณีเฟสไม่ต่ำสุดนั้นจะมีขั้นตอนในการทดสอบดังนี้ ขั้นตอนแรกทำการทดสอบผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อกำหนดอินพุตของระบบควบคุมเป็นแบบขั้นบันได และขั้นตอนที่สองทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของการปรับค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_i ว่ามีผลอย่างไรต่อผลตอบสนองของระบบควบคุม

จากผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB และการทดลองกับกระบวนการจริงในกรณีเฟสต่ำสุดนั้นพบว่า เมื่อบ้อนสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดให้กับระบบควบคุมตัวควบคุม I-P สามารถควบคุมระดับน้ำทั้ง 2 ถึง ได้ตามที่ต้องการ โดยผลตอบสนองของระบบควบคุมจะมีค่าเวลาเข้าที่ตามที่ต้องการ, มีค่าพุ่งเกินเล็กน้อยและไม่มีค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัว ส่วนผลจากการอินเตอร์แอคชันที่เกิดขึ้นระหว่างวงรอบควบคุมในการทดลองจริงนั้น จะมีค่าที่มากกว่าผลที่ได้จาก

การจำลอง ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องมาจากลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นของปั๊มน้ำและวาล์ว และในการกลับเข้าสู่ระดับอ้างอิงเดิมเมื่อสัญญาณอ้างอิงของระดับน้ำในถังอื่นเปลี่ยนแปลงไปจะใช้ช่วงเวลาที่ยาวนานกว่าผลที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลอง เนื่องจากผลตอบสนองของระบบควบคุมนั้น จะไม่สามารถกลับเข้าสู่ระดับอ้างอิงเดิมได้ทันที แต่จะลดต่ำลงไปมากกว่าจากนั้นจึงค่อยเพิ่มขึ้นเพื่อเข้าสู่ระดับอ้างอิงเดิม ส่วนผลจากการทดลองในกรณีที่ออกแบบตัวควบคุมโดยทำการปรับค่าดรรรชนีเสถียรภาพ γ_i จะพบว่า ตัวควบคุม I-P ที่ออกแบบโดยกำหนดให้ค่าดรรรชนีเสถียรภาพ γ_1 ที่มีค่ามากขึ้นจะทำให้ระบบควบคุมนั้นมีความคงทนมากขึ้น โดยเมื่ออินพุตอื่นมีการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณอ้างอิง จะทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมต่อการอินเตอร์แอคชันระหว่างวงรอบควบคุมนั้นมีค่าที่ลดลงและสามารถกลับเข้าสู่ระดับอ้างอิงเดิมได้เร็วขึ้น ส่วนผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อระดับสัญญาณอ้างอิงเปลี่ยนแปลงไปจะมีค่าเวลาเข้าที่ช้าลง นอกจากนี้ผลจากการทดลองในกรณีที่ออกแบบตัวควบคุมโดยทำการปรับค่าคงตัวเวลาสมมูล τ นั้นพบว่า ตัวควบคุม I-P ที่ออกแบบโดยกำหนดให้ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ที่มีค่ามากขึ้นจะทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมช้าลง โดยเมื่ออินพุตอื่นมีการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณอ้างอิง จะทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมต่อการอินเตอร์แอคชันระหว่างวงรอบควบคุมนั้นมีค่าที่มากขึ้นและการกลับเข้าสู่ระดับอ้างอิงเดิมจะช้าลง

ส่วนผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB และการทดลองกับกระบวนการจริงในกรณีเฟสไม่ต่ำสุดนั้นพบว่า เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดให้กับระบบควบคุมตัวควบคุม I-P สามารถควบคุมระดับน้ำถึง 2 ถังได้ตามที่ต้องการ แต่ผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ได้จากแบบจำลองและผลตอบสนองที่ได้จากการทดลองจริงจะแตกต่างกัน โดยค่าเวลาเข้าที่จากการทดลองจริงจะเร็วกว่าผลที่ได้จากแบบจำลองสำหรับทั้ง 2 ถัง และผลที่ได้จากการทดลองจริงจะมีค่าพุ่งเกินเล็กน้อยสำหรับถังที่ 1 ในขณะที่ผลที่ได้จากแบบจำลองนั้นจะไม่พุ่งเกินแต่สิ่งหนึ่งที่เหมือนกันคือไม่มีค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัว เหตุที่ค่าเวลาเข้าที่ของผลจากการทดลองจริงนั้นเร็วกว่าผลที่ได้จากการจำลองนั้น เกิดขึ้นเนื่องจากลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นและความไวของกระบวนการ สำหรับผลจากการอินเตอร์แอคชันที่เกิดขึ้นระหว่างวงรอบควบคุม ผลที่ได้จากการทดลองจริงนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากแบบจำลอง ซึ่งการที่ค่าอินเตอร์แอคชันมีค่าใกล้เคียงกันก็เพราะว่าสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมทั้ง 2 ตัวนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างช้าๆ และขนาดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมก็ไม่มากนักเมื่อเทียบกับในกรณีเฟสต่ำสุด และในการกลับเข้าสู่ระดับอ้างอิงเดิมเมื่อสัญญาณอ้างอิงของระดับน้ำในถังอื่นเปลี่ยนแปลงไป ผลจากการทดลองจริงจะมีช่วงเวลาที่ยาวนานกว่าผลที่ได้จากแบบจำลอง นอกจากนี้ผลจากแบบจำลองและผลจากการทดลองจริงในกรณีที่ออกแบบตัวควบคุมโดยทำการปรับค่าดรรรชนีเสถียรภาพ γ_1 จะพบว่าตัวควบคุม I-P ที่ได้ออกแบบโดยกำหนดให้ค่าดรรรชนีเสถียรภาพ γ_1 มีค่าน้อยจะทำให้ระบบ

ควบคุมมีความคงทนน้อยลง โดยเมื่ออินพุตอื่นมีการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณอ้างอิงจะทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมต่อการอินเตอร์แอคชันระหว่างวงรอบควบคุมนั้นมีค่าที่เพิ่มขึ้น แต่จะสามารถกลับเข้าสู่ระดับอ้างอิงเดิมได้เร็วขึ้น ส่วนผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองและการทดลองจริงเมื่อระดับสัญญาณอ้างอิงเปลี่ยนแปลงไปจะเร็วขึ้น แต่ผลตอบสนองจากการทดลองจริงจะมีค่าเวลาเข้าที่ช้าลงและมีค่าพุ่งเกินมากขึ้น ในขณะที่ผลตอบสนองจากแบบจำลองจะมีค่าเวลาเข้าที่เร็วขึ้นและไม่มีค่าพุ่งเกิน โดยเหตุที่ผลตอบสนองจากการทดลองจริงมีค่าเวลาเข้าที่ช้าลงและมีค่าพุ่งเกินมากขึ้นนั้น เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นและความไวของกระบวนการ ซึ่งจุดการทำงานในการทดลองในกรณีเฟสไม่ต่ำสุดนี้ค่าความไวต่อความไม่แน่นอนของกระบวนการจะมีค่ามากกว่าในกรณีเฟสต่ำสุด ทำให้การควบคุมกระบวนการเพื่อให้สามารถทำงานตามที่ต้องการนั้นยากมากกว่าในกรณีเฟสต่ำสุด

6.2 ปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางในการแก้ปัญหา

ปัญหาที่พบในการทดลองนั้นมีด้วยกันหลายปัญหาโดยแต่ละปัญหานั้น สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. เมื่อจ่ายแรงดันคงที่ค่าหนึ่งให้กับปั้มน้ำ อัตราการไหลของน้ำที่ได้จากปั้มน้ำนั้นจะไม่คงที่ ซึ่งเหตุที่อัตราการไหลของปั้มน้ำไม่คงที่นั้นเกิดขึ้นจากลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นของปั้มน้ำและกระแสที่ขับเพื่อให้ปั้มน้ำทำงานนั้นไม่คงที่ สำหรับแนวทางในการแก้ปัญหาคือ ใช้ตัวควบคุมอีกตัวหนึ่งเพื่อทำหน้าที่ในการควบคุมอัตราการไหลของปั้มน้ำให้คงที่
2. ในการดูน้ำของปั้มน้ำนั้น บ่อยครั้งมักจะมีเศษของอุปกรณ์เล็กๆน้อยๆที่อยู่ในน้ำเช่น เศษพลาสติก, เศษโลหะ ฯลฯ ถูกดูดเข้าไปด้วย ทำให้เกิดการอุดตันในตัวปั้มน้ำและเป็นสาเหตุให้อัตราการไหลของปั้มน้ำลดลง แนวทางในการแก้ปัญหาคือใช้อุปกรณ์ในการกรองน้ำเพื่อกรองเศษวัสดุเล็กๆน้อยๆที่อยู่ในน้ำก่อนที่จะดูดเข้าปั้มน้ำ
3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนของปั้มน้ำนั้นเมื่อใช้เวลาดูแลนานๆ จะเกิดความร้อนสะสมที่ตัวไอซีมาก ถึงแม้ว่าจะมีตัวระบายความร้อนติดอยู่ที่ตัวไอซีก็ตาม ทำให้การขับเคลื่อนของปั้มน้ำนั้นไม่สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ แรงดันและกระแสที่เข้าสู่ปั้มน้ำจะลดลงแม้ว่าแรงดันที่จ่ายให้กับอุปกรณ์ขับเคลื่อนจะคงที่ จึงเป็นสาเหตุทำให้อัตราการไหลของปั้มน้ำลดลง แนวทางในการแก้ปัญหาคือใช้ไอซีที่สามารถทนกระแสได้สูงมากขึ้น หรือเปลี่ยนตัวระบายความร้อนให้มีขนาดใหญ่ขึ้น
4. สัญญาณแรงดันที่ได้จากอุปกรณ์ปรับแต่งสัญญาณของตัวเซ็นเซอร์วัดระดับน้ำนั้น มีความแปรปรวนสูง เหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าความดันที่เข้าสู่เซ็นเซอร์วัดระดับน้ำนั้น

ไม่คงที่ทำให้สัญญาณเอาต์พุตจากเซ็นเซอร์วัดระดับน้ำไม่คงที่ไปด้วย และเนื่องจากแรงดันเอาต์พุตจากเซ็นเซอร์วัดระดับน้ำนั้นมีค่าน้อยมาก ทำให้ต้องใช้อัตราขยายในการขยายสัญญาณที่สูงมาก ดังนั้นสัญญาณแรงดันที่ได้จากเซ็นเซอร์วัดระดับน้ำเมื่อผ่านวงจรขยายสัญญาณแล้ว สัญญาณแรงดันที่ได้จะมีความแปรปรวนสูงมาก แนวทางในการแก้ปัญหาคือ ใช้เซ็นเซอร์วัดระดับน้ำแบบอื่น เช่น เซ็นเซอร์วัดระดับน้ำแบบคาปาซิทีฟ หรือแบบอุลตราโซนิก

5. วาล์วที่ใช้ในการปรับพื้นที่หน้าตักน้ำด้านออกสำหรับถังที่ 1 และถังที่ 2 นั้นจะมีจำนวนรอบในการปรับที่น้อยกว่าวาล์วปรับพื้นที่หน้าตักน้ำด้านออกสำหรับถังที่ 3 และถังที่ 4 ทำให้ความละเอียดในการปรับพื้นที่หน้าตักน้ำด้านออกสำหรับถังที่ 1 และถังที่ 2 นั้นน้อยกว่าสำหรับน้ำด้านออกถังที่ 3 และถังที่ 4 แนวทางในการแก้ปัญหาคือ หา วาล์วที่มีจำนวนรอบในการปรับมากๆ

6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุม I-P ด้วยวิธี CDM สำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง ซึ่งโครงสร้างของตัวควบคุมนั้นเป็นโครงสร้างตัวควบคุมแบบแยกอิสระ ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM โดยใช้โครงสร้างตัวควบคุมแบบไม่แยกอิสระจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ นอกจากนี้การนำตัวชดเชยมาใช้ร่วมกับการออกแบบตัวควบคุมเช่น ตัวชดเชยแบบสแตติกดีคัปปลิ่ง (static decoupling) หรือ ตัวชดเชยแบบไดนามิกดีคัปปลิ่ง (dynamic decoupling) ก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ

เอกสารอ้างอิง

- [1] K.H. Johansson, "The Quadruple-Tank Process: A Multivariable Laboratory Process with an Adjustable Zero," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 8, No. 3, 2000, pp. 456-465.
- [2] G. Zames, "Feedback and Optimal Sensitivity: Model Reference Transformations, Multiplicative Seminorms and Approximate Inverses," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. AC-26, 1981, pp. 301-320.
- [3] G. Zames and B. A. Francis, "Feedback, Minimax Sensitivity, and Optimal Robustness," IEEE Transaction on Automatic Control, vol. AC-28, 1983, pp. 585-601.
- [4] K.H. Johansson, A. Horch, O. Wijk, and A. Hansson, "Teaching Multivariable Control using the Quadruple-Tank Process," Proceedings of the 38th Conference on Decision & Control, Dec1999, pp. 807-812
- [5] E.P. Gatzke, R. Vadigepalli, E.S. Meadows and F.J. Doyle III, "Experiences with an Experimental Project in a Graduate Control Course," Chemical Engineering Education, 33(4), 1999, pp. 270-275.
- [6] E.P. Gatzke, E.S. Meadows, C. Wang and F.J. Doyle III, "Model Based Control of a Four-Tank System," Computation on Chemical Engineering, Vol. 24, 2000, pp. 1503-1509.
- [7] E. Rusli, S. Ang and Richard D.Braatz, "A Quadruple Tank Process Control Experiment," Technical Report, Department of Chemical and Biomolecular Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA, 2001
- [8] เทียนชัย สุขศรี, วิริยะ กองรัตน์ และ อาจินต์ น่วมสำราญ, "การออกแบบระบบควบคุม 2-DOF ด้วยวิธีทางเดินรากสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง," การประชุมทางวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 42, กรุงเทพมหานคร, 2547
- [9] K. H. Johansson, "Relay Feedback and Multivariable Control," Ph.D. dissertation, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 1997

- [10] R. Vadigepalli, E. P. Gatzke, and F. J. Doyle II, "Robust H-infinity Control of a Multivariable Experimental 4-Tank system," *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 40(8), 2001, pp. 1916-1927.
- [11] D. Henriksson, A. Cervin, J. Akesson, K-E Arzen, "On Dynamic Real-Time Scheduling of Model Predictive Controllers," *Proceedings of the 41st IEEE Conference of Decision and Control*, Las Vegas, Nevada, USA, 2002, pp.1325-1330.
- [12] S. Manabe, "Coefficient Diagram Method," 14th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace, Seoul, 1998.
- [13] J. Lo, "An Algebraic Approach to Control System Design," Master Thesis, Department of Applied Science, University of Waterloo, Waterloo, Canada, 1996.
- [14] S.E. Hamamci, I. Kaya and M. Köksal, "Improving Performance for a Class of Processes using Coefficient Diagram Method," *MED'01 The 9th Mediterranean Conference on Control and Automation*, Dubrovnik, Croatia, June, 2001.
- [15] S.E. Hamamci and A. Uçar "A Model Based CDM Controller for Uncertain Systems," 16th IFAC Workshop on distributed Computer Control Systems Sydney, Australia, November - December, 2000.
- [16] S.E. Hamamci and M. Köksal, "Robust Control of a DC Motor by Coefficient Diagram Method", *MED'01 The 9th Mediterranean Conference on Control and Automation*, Dubrovnik, Croatia, June, 2001.
- [17] L. Samaramayake and S. Alahakoon, "Condition Monitoring and Distributed Real-Time Control of Industrial Drive Systems via Ethernet," *Proceedings of the Invited lecture for the annual general meeting, Central province of the Institute of Engineers Sri Lanka, IESL, Kandy, Sri Lanka, September 2003*, pp. 32-38
- [18] L. Samaranyake, S. Alahakoon and Keerthi Walgama, "Speed Controller Strategies for Distributed Motion Control Via Ethernet," *Proceedings of the 18th IEEE International Symposium on Intelligent Control, ISIC03, Houston, USA, October 2003*, pp. 322-327

- [19] S. Manabe, "Application of Coefficient Diagram Method to MIMO Design in Aerospace," 15th Triennial World Congress, Barcelona, Spain, 2002
- [20] L. Donguk, A. Byungjun, K. Youngho and L. Manhyung, "The Tension Control by using CDM of the Full Stand Hot Finishing Mill," International Conference on Control Automation and Systems, Jeonbuk, Korea, 2002, pp. 1043-1048
- [21] S.E. Hamamci and M. Koksai, "Robust Controller Design for TITO Processes with Coefficient Diagram Method," IEEE , 2003, pp. 1431-1436.
- [22] Tianchai Suksri, Viriya Kongratana, Arjin Numsomran, Taweeapol Suesut, Thanit Trisuwannawat and Kitti Tirasesth, "I-P Controller Design for Quadruple-Tank System," International Conference on Control Automation and Systems, Gyeongju, Korea, 2003, pp.1862-1866
- [23] E.Bristol, "On a New Measure of Interaction for Multivariable Process Control", IEEE Transactions on Automatic Control, 11:133 1966
- [24] S. Skogestad and I. Postlethwaite, " Multivariable Feedback Control," John Wiley& Sons, New York, NY, 1996.
- [25] M.Morari and E.Zafiriou, Robust Process Control, Prentic-Hall,Eaglewood cliffs, NJ, 1989
- [26] A.V. Lipatov and N.I. Sokolov, "Some Sufficient Conditions for Stability and Instability of Continuous Linear Stationary System," Automat. Remote Contr., No.39, 1979, pp.1285-1291.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

รายละเอียดของอุปกรณ์และวงจรที่ใช้ในการทดลอง

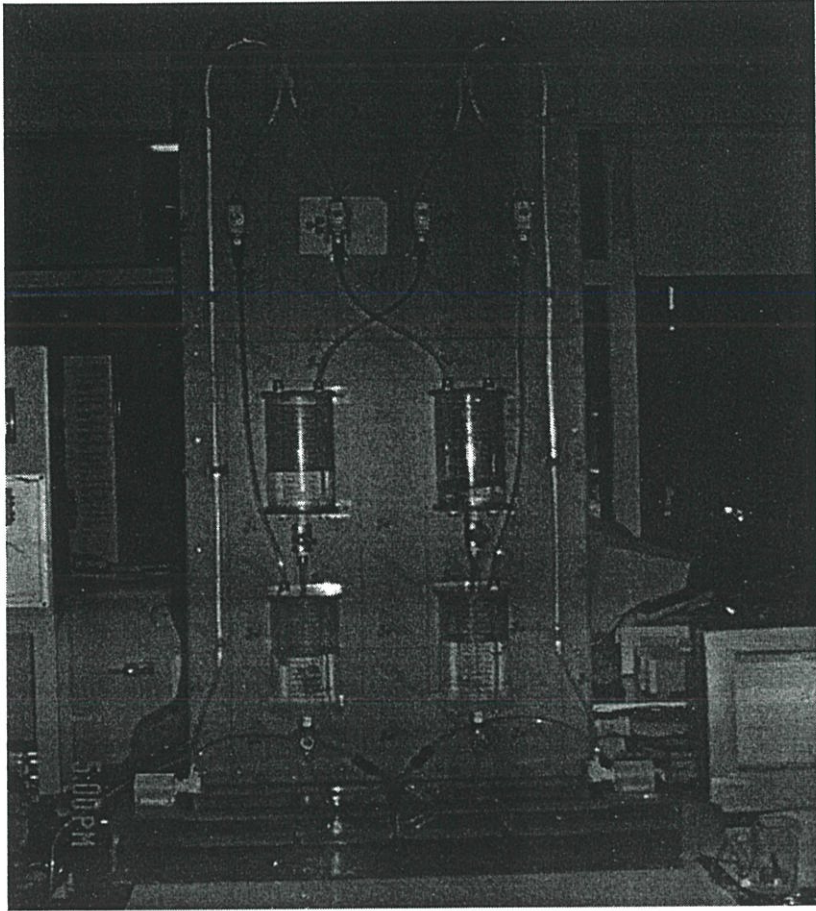
ในการควบคุมการทำงานของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงเพื่อให้สามารถทำงานได้ตามที่ ต้องการนั้นต้องใช้อุปกรณ์ต่างมากมายหลายชนิดมาประกอบเข้าด้วยกัน ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการ ทดลองนั้นสามารถแบ่งเป็น 9 ส่วนด้วยกัน ซึ่งประกอบไปด้วย

1. กระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง
2. เซ็นเซอร์ที่ใช้วัดระดับน้ำ
3. วงจรปรับแต่งสัญญาณแรงดันที่ได้รับจากเซ็นเซอร์
4. วงจรกรองความถี่ต่ำ
5. วงจรขับกระแส
6. ปั๊มน้ำ
7. การ์ดแปลงสัญญาณ A/D และ D/A
8. แหล่งจ่ายไฟ

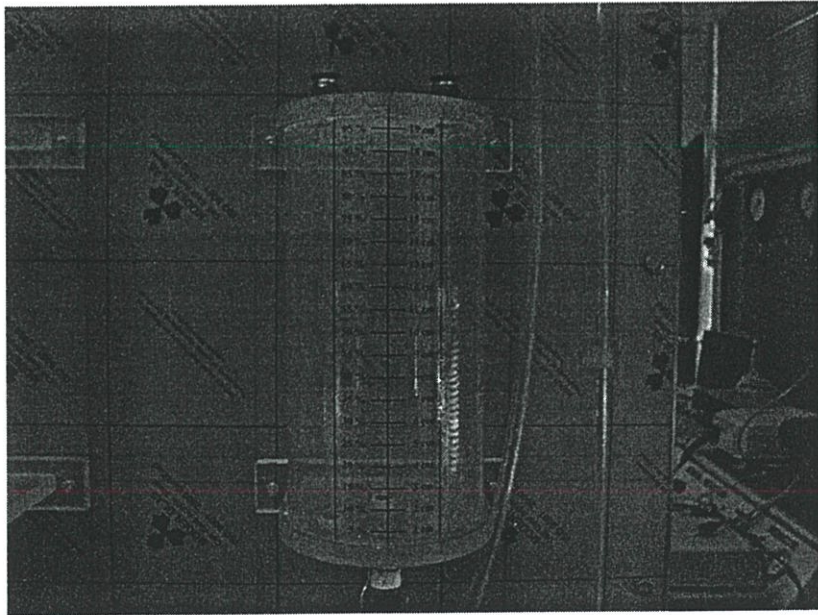
โดยรายละเอียดของอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองนั้นสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

ก.1 กระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง

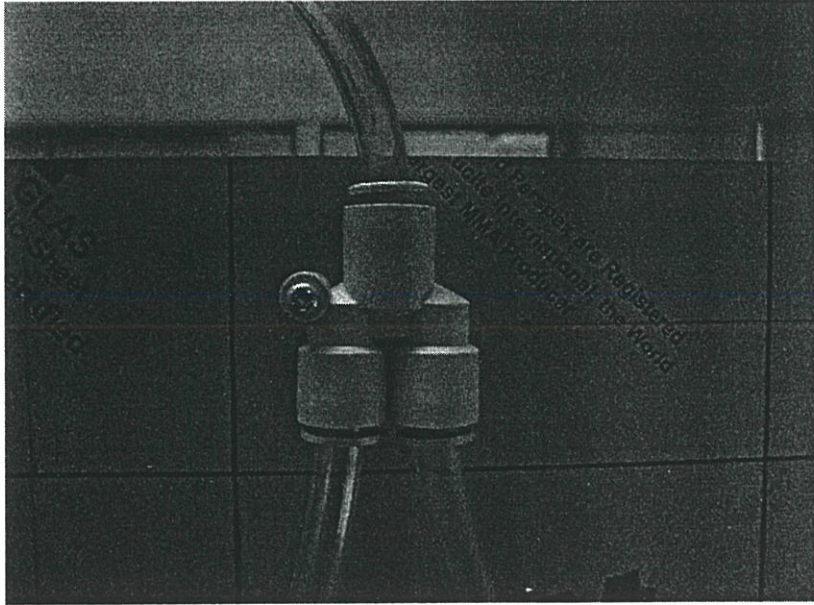
กระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงนั้นจะประกอบไปด้วยถังน้ำ 4 ใบด้วยกัน แสดงได้ดังรูปที่ ก.1 ถังน้ำแต่ละใบนั้นจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกคือ 10 เซนติเมตร ส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง ด้านในคือ 9.4 เซนติเมตร และสูง 20 เซนติเมตร แสดงได้ดังรูปที่ ก.2 โดยถังน้ำแต่ละใบนั้นจะมี วาล์วที่ใช้ในการปรับสัดส่วนการไหลของน้ำกับวาล์วที่ใช้ในการเปิดหรือปิดน้ำที่จะเข้าสู่ถังกับวาล์ว ที่ใช้ในการปรับพื้นที่หน้าตัดของรูน้ำด้านออกจากถังเป็นของตัวเอง น้ำที่ไหลเข้าสู่ถังน้ำแต่ละใบ นั้นจะถูกปั๊มขึ้นมาจากบ่อเก็บน้ำด้านล่าง ซึ่งบ่อเก็บน้ำจะมีขนาดความจุเท่ากับ $40 \times 80 \times 10$ เซนติเมตร โดยปั๊มน้ำทางด้านซ้ายมือนั้นจะถูกใช้เพื่อจ่ายน้ำให้กับถังใบที่ 1 ซึ่งอยู่ทางด้านล่าง ซ้ายกับถังใบที่ 4 ซึ่งอยู่ทางด้านบนขวา ส่วนปั๊มน้ำทางด้านขวามือนั้นจะถูกใช้เพื่อจ่ายน้ำให้กับถัง ใบที่ 2 ซึ่งอยู่ทางด้านล่างขวากับถังใบที่ 3 ซึ่งอยู่ทางด้านบนซ้าย โดยสายยางที่ใช้ต่อกับปั๊มน้ำแต่ ละตัวนั้นจะเป็นสายยางอ่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 8 มิลลิเมตร ส่วนอุปกรณ์ที่ใช้ใน การแบ่งปริมาณน้ำระหว่างถังใบที่ 1 กับถังใบที่ 4 และถังใบที่ 2 กับถังใบที่ 3 นั้นจะใช้อุปกรณ์ฟิต ดึงที่เป็น 3 ทางรูปตัว Y แสดงได้ดังรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.1 กระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง



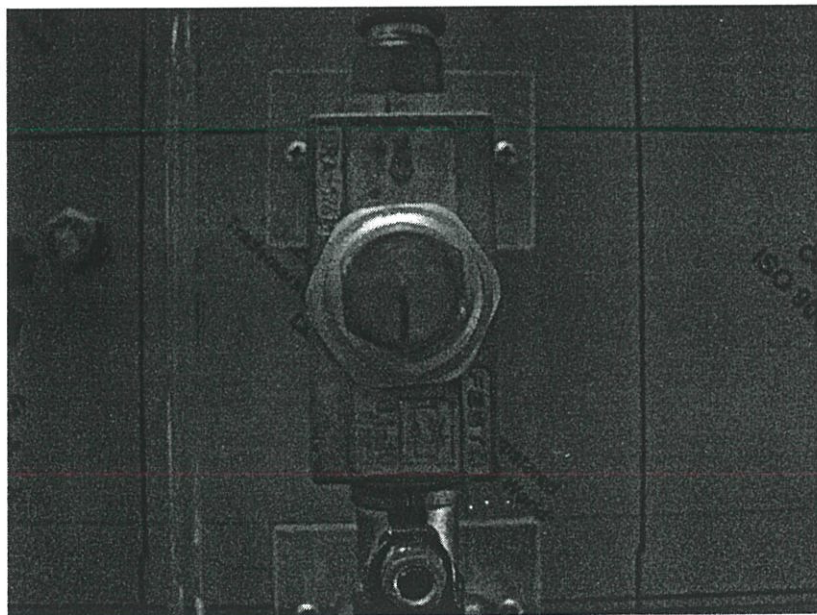
รูปที่ ก.2 ถังน้ำที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ก.3 อุปกรณ์ฟิตติ้งรูปตัว Y

ก.1.1 วาล์วปรับสัดส่วนการไหล

วาล์วที่ใช้ในการปรับอัตราการไหลสำหรับปริมาณน้ำที่จะเข้าสู่แต่ละถังนั้น จะใช้วาล์วของบริษัท Festo รุ่น GRA-1/4-B ซึ่งจะมีจำนวนรอบในการปรับสูงมากถึง 12 รอบ ทำให้สามารถปรับสัดส่วนการไหลของน้ำที่ไหลผ่านวาล์วได้ละเอียดมาก โดยรูปภาพของวาล์วนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ ก.4 ส่วนข้อมูลและรายละเอียดของวาล์วแสดงได้ดังตารางที่ ก.1



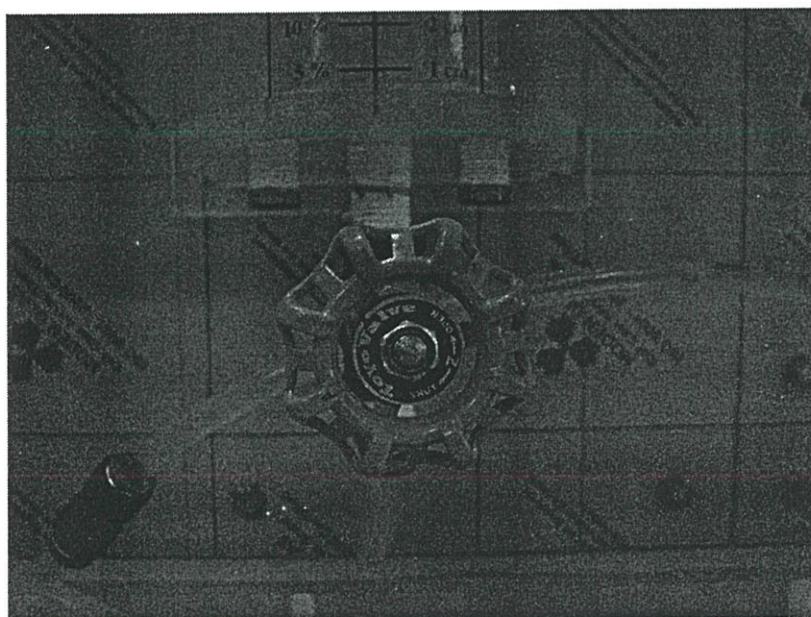
รูปที่ ก.4 วาล์วที่ใช้ในการปรับสัดส่วนการไหล

ตารางที่ ก.1 รายละเอียดทางเทคนิคของวาล์วปรับสัดส่วนการไหล

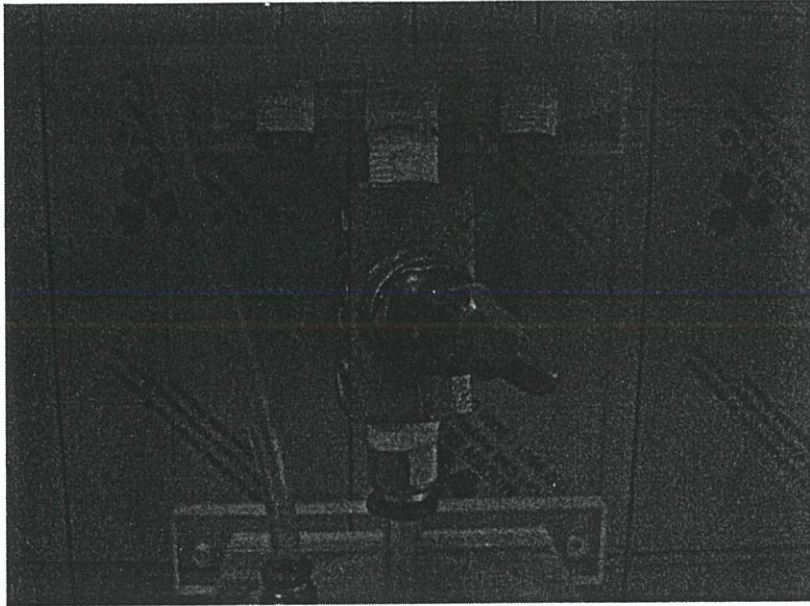
Type of Mounting		2 through holes in housing
Connection		G1/4
Nominal size	In flow control direction	4.5 mm
	Against flow control direction	5.8 mm
Standard nominal flow rate	In flow control direction	0.....420 l/min
	Against flow control direction	780/min
Pressure range		0.1.....10 bar
Temperature range		-20.....+75 °C
Materials	Housing	Die-cast ZnAl, brass
	Seal	Perbunan
Weight		0.180 kg

ก.1.2 วาล์วปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำด้านออก

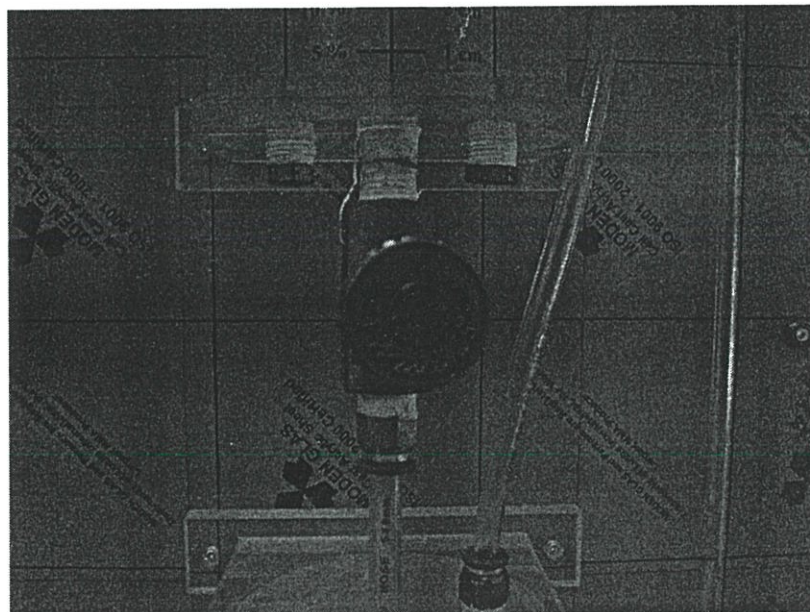
วาล์วที่ใช้ในการปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำทางด้านออกของถังน้ำใบที่ 1 และถังน้ำใบที่ 2 นั้น จะใช้วาล์วแบบเดียวกัน แสดงได้ดังรูปที่ ก.5 และสำหรับถังใบที่ 3 กับใบที่ 4 นั้นจะใช้วาล์วคนละแบบแตกต่างกันไป แสดงได้ดังรูปที่ ก.6 และรูปที่ ก.7 โดยวาล์วปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำด้านออกแต่ละอันนั้นจะมีลักษณะการเชื่อมต่อที่เหมือนกันคือ เชื่อมต่อแบบ G 1/4



รูปที่ ก.5 วาล์วปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำด้านออกสำหรับถังใบที่ 1 และถังใบที่ 2



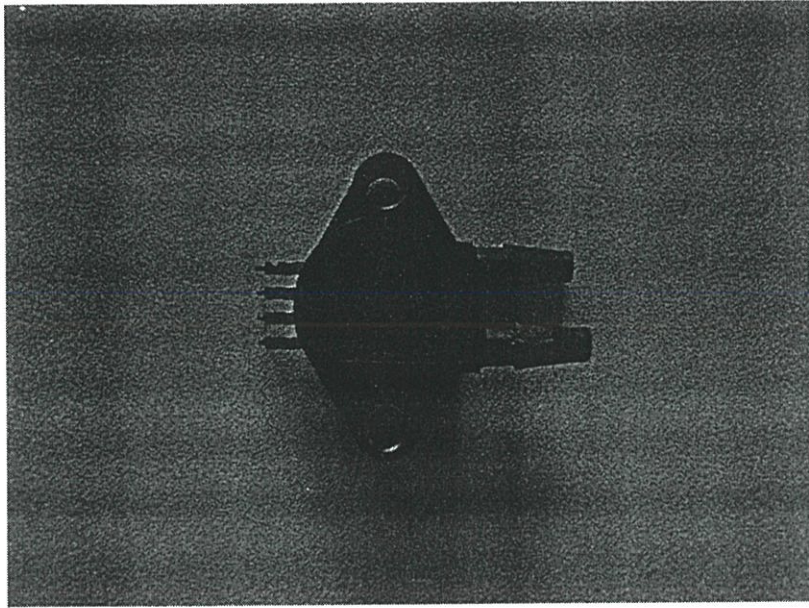
รูปที่ ก.6 วาล์วปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำด้านออกสำหรับถังใบที่ 3



รูปที่ ก.7 วาล์วปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำด้านออกสำหรับถังใบที่ 4

ก.2 เซ็นเซอร์วัดระดับน้ำ

เซ็นเซอร์วัดระดับน้ำที่เลือกใช้สำหรับกระบวนการนี้จะเลือกใช้ ตัวเซ็นเซอร์แบบความดันของบริษัท Motorola รุ่น MPX 2010 DP ซึ่งใช้หลักการวัดแบบความดันแตกต่าง โดยจะมีช่วงการวัดเท่ากับ 0-10 KPa และความไวในการวัดคือ 2.5 mV/KPa รูปของตัวเซ็นเซอร์แสดงดังรูปที่ ก.8



รูปที่ ก.8 เชนเซอร์ที่ใช้ในการวัดระดับน้ำ

การต่อเซนเซอร์เพื่อใช้ในการวัดระดับน้ำนั้นจะใช้สายยางขนาด 6 มิลลิเมตรที่ต่อมาจากด้านก้นถังของถังน้ำแต่ละใบ ต่อเข้าทางด้านความดันสูงของตัวเซนเซอร์และทางด้านความดันต่ำของตัวเซนเซอร์จะเปิดไว้เพื่อให้เจอกับบรรยากาศ เนื่องจากถังน้ำที่ใช้ในระบบการเป็นถังน้ำแบบเปิด จึงทำให้ความดันแตกต่างกันขึ้นอยู่กับระดับน้ำเพียงอย่างเดียว โดยความดันแตกต่างที่เข้าสู่ตัวเซนเซอร์คือ

$$\begin{aligned}\Delta P &= P_{high} - P_{low} \\ &= (\rho gh + P_{atm}) - P_{atm} \\ \Delta P &= \rho gh\end{aligned}$$

โดย

ρ	คือ ความหนาแน่นของน้ำ	1000 kg/m ³
g	คือ แรงโน้มถ่วงของโลก	9.81 m/s ²
h	คือ ระดับน้ำที่วัด	m
ΔP	คือ ความดันแตกต่าง	KPa

เนื่องจากถังน้ำแต่ละใบสูง 20 เซนติเมตร ดังนั้นความดันแตกต่างสูงสุดที่ตัวเซนเซอร์จะได้รับคือ

$$\begin{aligned}\Delta P &= (1000 \times 9.81 \times 0.2) / 1000 \\ &= 1.962 \text{ KPa}\end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้ช่วงความดันแตกต่างเท่ากับ

$$\Delta P = 0 - 1.962 \text{ KPa}$$

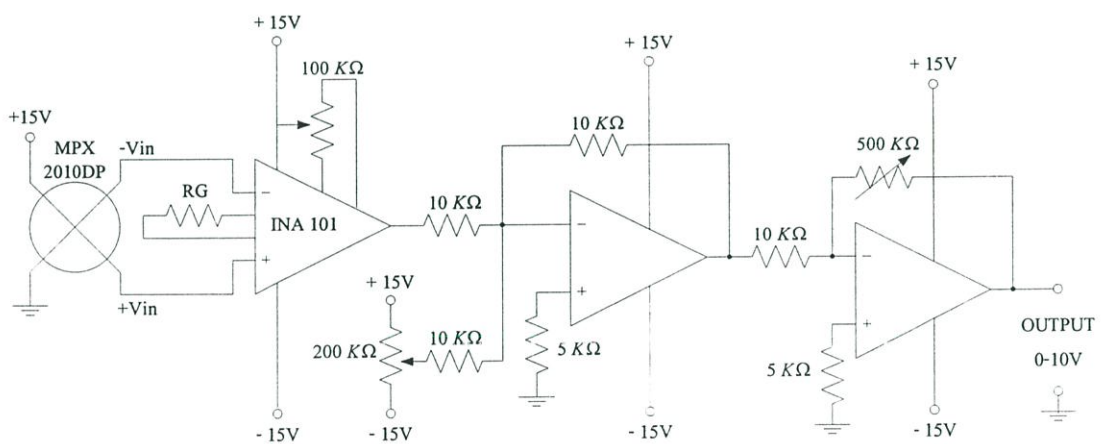
และเนื่องจากความไวในการวัดของตัวเซ็นเซอร์คือ 2.5 mV/KPa ดังนั้นตัวเซ็นเซอร์นี้จะให้เอาต์พุตออกมาสูงสุดเท่ากับ

$$\begin{aligned} V_{out} &= (2.5 \times 10^{-3} \times 1.962) + \text{offset} \\ &= 4.905 \text{ mV} + \text{offset} \end{aligned}$$

โดย offset คือ ค่าแรงดันคงที่ค่าหนึ่งซึ่งเกิดขึ้นเนื่องมาจากการจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงให้กับตัวเซ็นเซอร์ที่มากกว่าหรือน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ ซึ่งเซ็นเซอร์นี้ต้องการไฟเลี้ยงขนาด $+10 \text{ Vdc}$ แต่ในการทดลองได้ใช้ไฟเลี้ยงขนาด $+15 \text{ Vdc}$ จ่ายให้กับตัวเซ็นเซอร์ จึงทำให้เกิดแรงดัน offset ขึ้น

ก.3 วงจรปรับแต่งสัญญาณ

เนื่องจากสัญญาณที่วัดได้จากตัวเซ็นเซอร์นั้นมีขนาดของสัญญาณที่น้อยมากและช่วงการวัดของสัญญาณแคบ จึงทำให้จำเป็นต้องปรับแต่งสัญญาณแรงดันให้มีขนาดที่สูงมากพอก่อนที่จะนำไปใช้งาน โดยวงจรที่ใช้ในการปรับแต่งสัญญาณแสดงได้ดังรูปที่ ก.9



รูปที่ ก.9 วงจรปรับแต่งสัญญาณของตัวเซ็นเซอร์วัดระดับน้ำ

การทำงานของวงจรปรับแต่งสัญญาณนี้จะประกอบไปด้วย 3 ภาคด้วยกัน ซึ่งต่อเรียงกันไป เริ่มตั้งแต่รับสัญญาณแรงดันมาจากตัวเซ็นเซอร์คือ

1. ภาค Instrument Amplifier
2. ภาค Zero
3. ภาค Span

ซึ่งการทำงานของแต่ละภาคอธิบายได้ดังนี้

ภาค Instrument Amplifier

ภาคนี้จะทำหน้าที่ในการขยายสัญญาณแรงดันที่ได้รับมาจากตัวเซ็นเซอร์ ให้มีขนาดของสัญญาณที่มากขึ้นก่อนที่จะเข้าสู่ภาค Zero เพื่อให้สามารถที่จะปรับแต่งสัญญาณได้ง่ายขึ้น โดยจะเลือกใช้ไอซี เบอร์ INA 101 ของบริษัท Burr-Brown เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการดังนี้

- มีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณตามอุณหภูมิต่ำมาก คือ $0.25\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$
- มีค่าออฟเซตของสัญญาณต่ำ คือ $0.25\mu\text{V}$
- มีคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นหรือช่วงการทำงานสูง
- มีค่าซีเอ็มอาร์อาร์สูง คือ 106 dB ที่ความถี่ 60 Hz
- มีค่าความต้านทานที่ด้านอินพุตสูง คือ $10^{10}\Omega$

สำหรับอัตราขยายของไอซีเบอร์นี้มีค่าเท่ากับ $\left[1 + \frac{40 \times 10^3}{R_G}\right]$

โดยในการทดลองนี้กำหนดให้ $R_G = 80\Omega$ ซึ่งจะทำให้ได้อัตราขยายเท่ากับ 501 เท่า ซึ่งอัตราขยายขนาดนี้ จะทำให้สัญญาณแรงดันที่ได้รับมาจากตัวเซ็นเซอร์มีขนาดของสัญญาณที่มากเพียงพอที่จะเข้าสู่ภาค Zero ต่อไป

ภาค Zero

ภาคนี้จะทำหน้าที่ในการปรับขนาดของสัญญาณแรงดันที่ได้รับมาจากภาค Instrument Amplifier ให้มีค่าเป็น 0 V โดยใช้หลักการของการบวกลบสัญญาณที่อินพุตของ Op-Amp ซึ่ง Op-Amp ที่ใช้นั้นเลือกใช้ ไอซีเบอร์ OPA 4228 และต่อ Op-Amp แบบ Inverting-Amplifier

ภาค Span

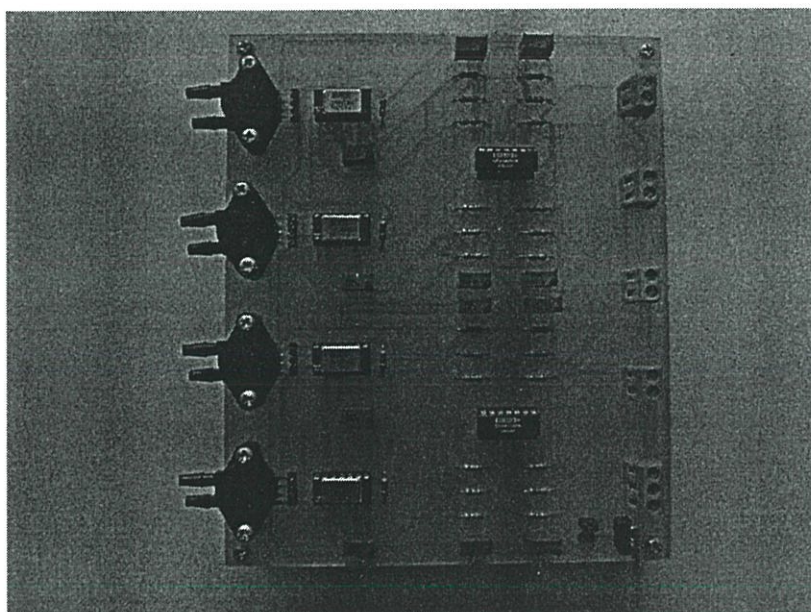
ภาคนี้จะทำหน้าที่ในการขยายสัญญาณแรงดันที่ได้รับมาจากภาค Zero ให้มีค่าเป็น 10 V โดย Op-Amp ที่ใช้นั้นก็จะใช้ไอซีเบอร์ OPA 4228 เช่นเดียวกับภาค Zero และต่อ Op-Amp แบบ Inverting-Amplifier

การ Calibrate สัญญาณ

ในการ Calibrate สัญญาณแรงดันสำหรับวงจรปรับแต่งสัญญาณนี้ จะ Calibrate แรงดันให้อยู่ในช่วง $0\text{-}10\text{ V}$ โดยวิธีในการ Calibrate คือ

1. ที่ระดับน้ำ 0 เซนติเมตร ปรับภาค Zero เพื่อให้สัญญาณแรงดันที่เอาท์พุทมีค่าเท่ากับ 0 V
2. ที่ระดับน้ำ 20 เซนติเมตร ปรับภาค Span เพื่อให้สัญญาณแรงดันที่เอาท์พุทมีค่าเท่ากับ 10 V
3. ทำซ้ำข้อ 1-2 ไปเรื่อยๆ จนกว่าจะได้สัญญาณแรงดันเอาท์พุทตามที่ต้องการ ซึ่งในการ Calibrate จริงๆ นั้น จะต้องทำประมาณ 3-5 ครั้ง จึงจะได้ช่วงของสัญญาณแรงดันตามที่ต้องการ

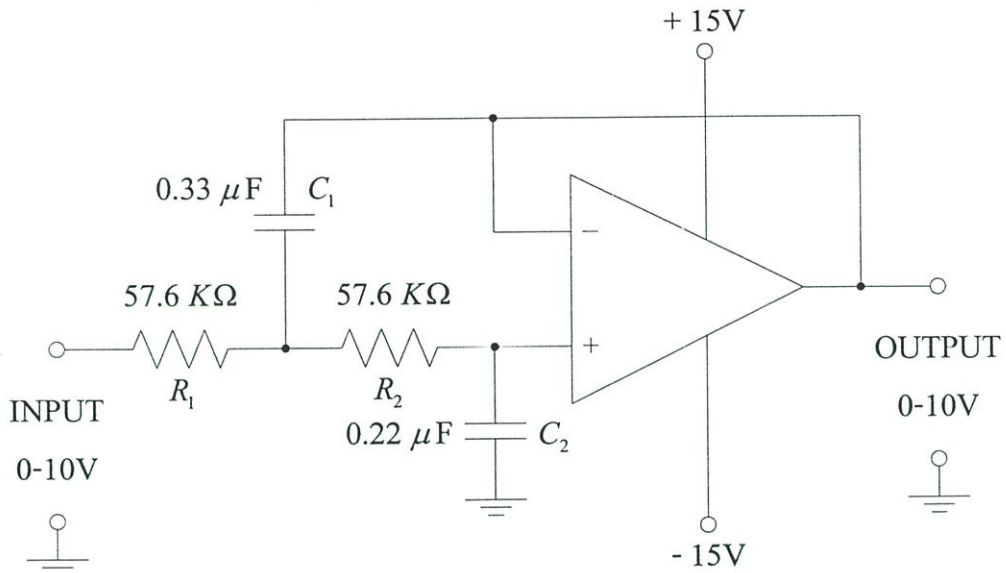
รูปอุปกรณ์ปรับแต่งสัญญาณของตัวเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการทดลองจริงแสดงได้ดังรูปที่ ก.10 โดยอุปกรณ์ปรับแต่งสัญญาณนี้จะประกอบไปด้วยวงจรปรับแต่งสัญญาณที่ได้อธิบายมาแล้ว 4 วงจรด้วยกัน ซึ่งจะใช้สำหรับวัดระดับน้ำของถังแต่ละใบ



รูปที่ ก.10 อุปกรณ์ปรับแต่งสัญญาณของตัวเซ็นเซอร์วัดระดับน้ำ

ก.4 วงจรรองความถี่

วงจรรองความถี่จะรับสัญญาณแรงดันขนาด 0-10 V จากวงจรปรับแต่งสัญญาณของตัวเซ็นเซอร์ โดยวงจรรองความถี่นี้เป็นแบบกรองความถี่ต่ำซึ่งจะทำหน้าที่กำจัดสัญญาณรบกวนที่มีความถี่สูงกว่าความถี่คัทออฟทิ้งไป รูปวงจรรองความถี่ต่ำแสดงได้ดังรูปที่ ก.11



รูปที่ ก.11 วงจรกรองความถี่

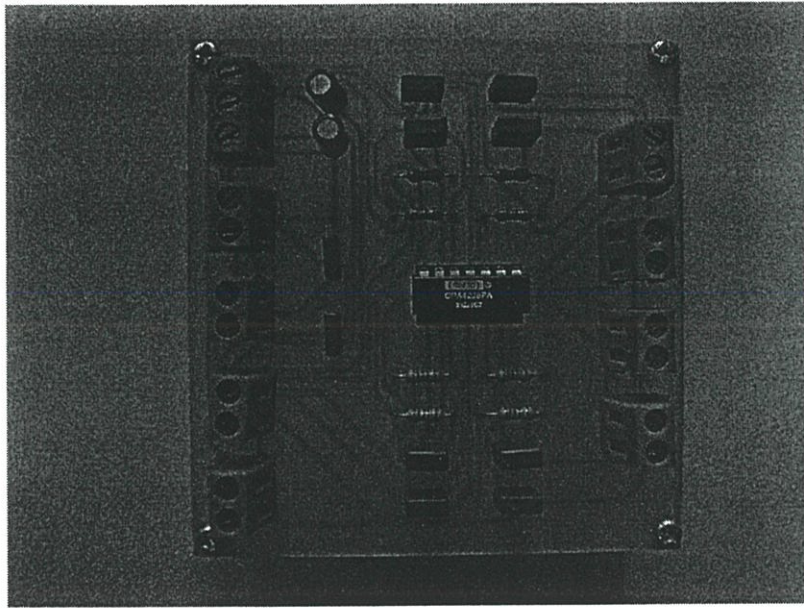
จากรูปสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{V_{Out}}{V_{In}} &= \frac{\left(\frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2} \right)}{s^2 + \left(\frac{2}{C_1 \sqrt{R_1 R_2}} \right) s + \left(\frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2} \right)} \\ &= \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \end{aligned}$$

นั่นคือจะได้

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}} \text{ และ } \xi = \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}$$

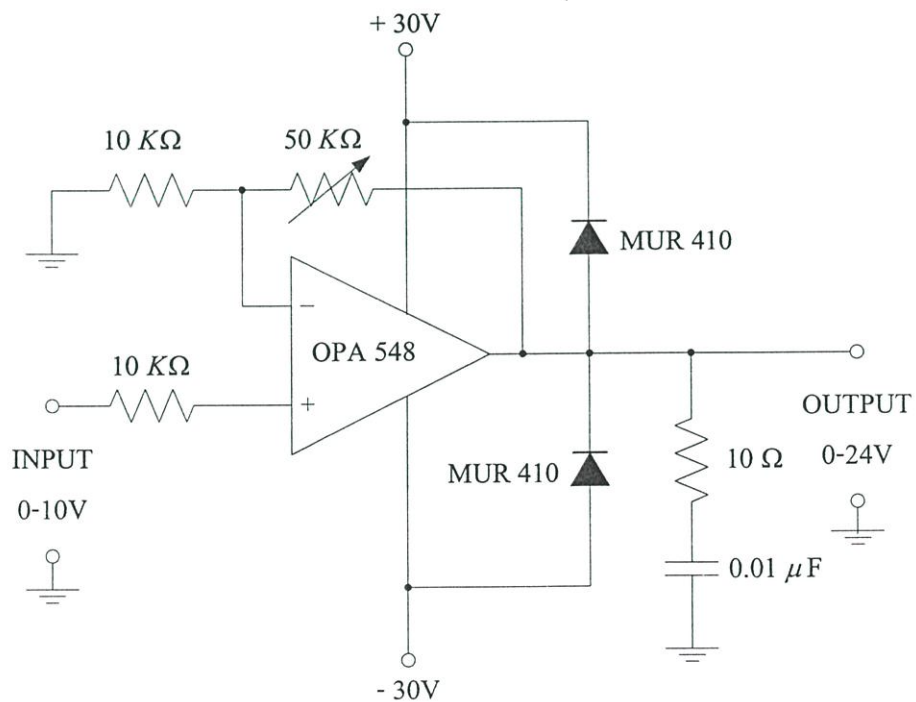
ในการทดลองนี้จะเลือกกำหนดให้ความถี่คัทออฟ $f_c = 10 \text{ Hz}$ ซึ่งจะได้ $\omega_n = 2\pi f_c = 6.3$ และกำหนดให้ $\xi = 0.707$ จึงเลือกค่า $R_1 = R_2 = 57.6 \text{ K}\Omega$, $C_1 = 0.33 \text{ }\mu\text{F}$ และ $C_2 = 0.22 \text{ }\mu\text{F}$ เนื่องจากสัญญาณแรงดันอินพุตที่รับมาจากวงจรปรับแต่งสัญญาณมีด้วยกัน 4 สัญญาณ ดังนั้นอุปกรณ์ที่ใช้ในการกรองความถี่ต่ำจึงประกอบไปด้วยวงจรกรองความถี่ 4 วงจรด้วยกัน รูปของอุปกรณ์ที่ใช้ในการกรองความถี่ต่ำแสดงได้ดังรูปที่ ก.12



รูปที่ ก.12 อุปกรณ์กรองความถี่

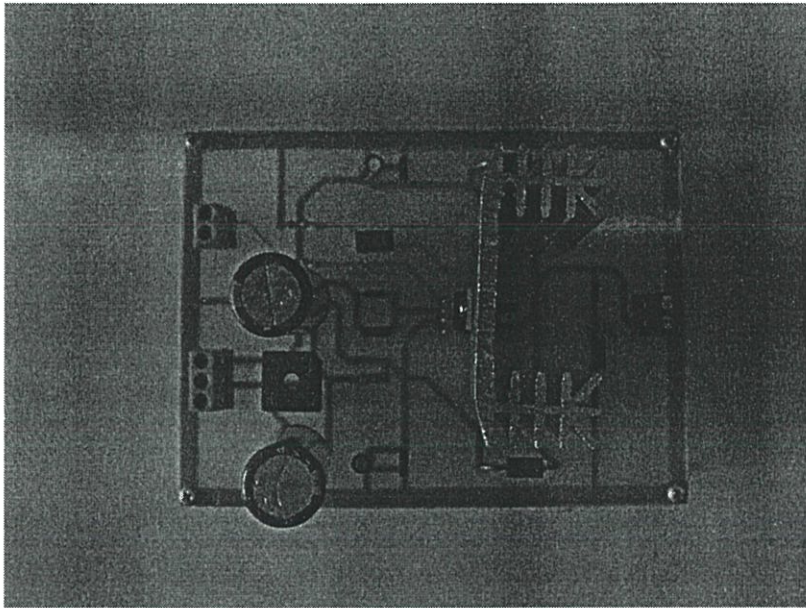
ก.5 วงจรขับกระแส

วงจรขับกระแสเป็นวงจรที่ทำหน้าที่ในการควบคุมการทำงานของปั้มน้ำ เพื่อให้สามารถจ่ายน้ำได้มากหรือน้อยตามสัญญาณควบคุมที่ได้รับมาจากตัวควบคุม ซึ่งรูปของวงจรขับกระแสดังได้ดังรูปที่ ก.13



รูปที่ ก.13 วงจรขับกระแส

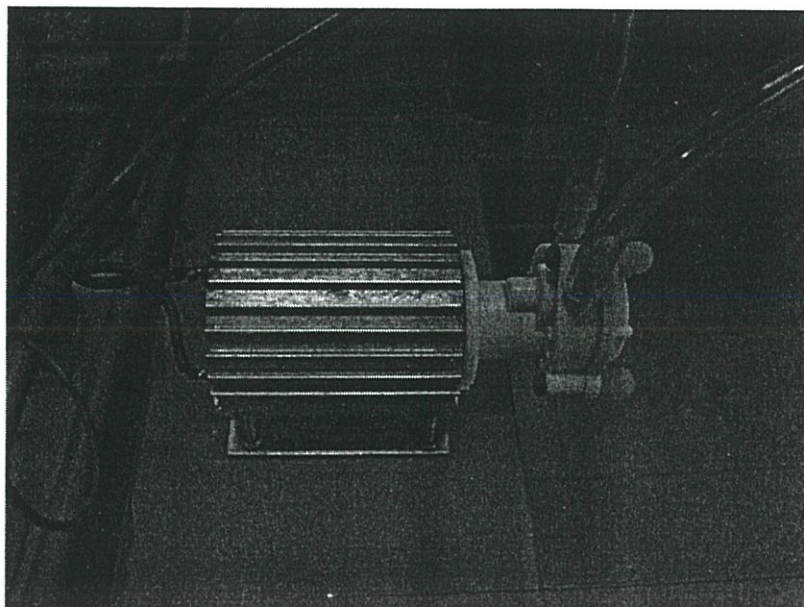
จากรูปจะเห็นได้ว่าวงจรขับกระแสนี้จะใช้ Op-Amp เพียงอย่างเดียวเท่านั้น โดย Op-Amp ที่ใช้นี้จะใช้ ไอซีเบอร์ OPA 548 ของบริษัท Burr-Brown ซึ่งเป็น Power Op-Amp ที่สามารถจ่ายกระแสได้สูงถึง 3 A และสามารถทำงานภายในช่วงแรงดัน +60 V หรือ ± 30 V ลักษณะของวงจรขับกระแสจะเป็นวงจรขับกระแสที่เป็นแบบเชิงเส้น โดยจะรับสัญญาณแรงดันอินพุตขนาด 0-10 V มาจากส่วน D/A และขยายสัญญาณแรงดันเอาท์พุตให้มีขนาด 0-24 V เพื่อจ่ายให้กับปั้มน้ำต่อไป เนื่องจากปั้มน้ำที่ใช้มี 2 ตัว ดังนั้นจึงต้องใช้วงจรขับกระแส 2 วงจรด้วยกัน รูปของอุปกรณ์ที่ใช้ในการขับกระแสให้กับปั้มน้ำแต่ละตัวแสดงได้ดังรูปที่ ก.14



รูปที่ ก.14 อุปกรณ์ขับกระแสของปั้มน้ำ

ก.6 ปั้มน้ำ

ปั้มน้ำที่ใช้ในการทดลองทั้ง 2 ตัวนั้นจะใช้ของบริษัท API Instruments รุ่น P6 10.0006 ซึ่งจะเป็นปั้มน้ำแบบเกียร์ปั้ม โดยรูปของปั้มน้ำที่ใช้ในการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ ก.15 ส่วนข้อมูลคุณและรายละเอียดของปั้มน้ำแสดงได้ดังตารางที่ ก.2



รูปที่ ก.15 ปั้มน้ำที่ใช้ในการทดลอง

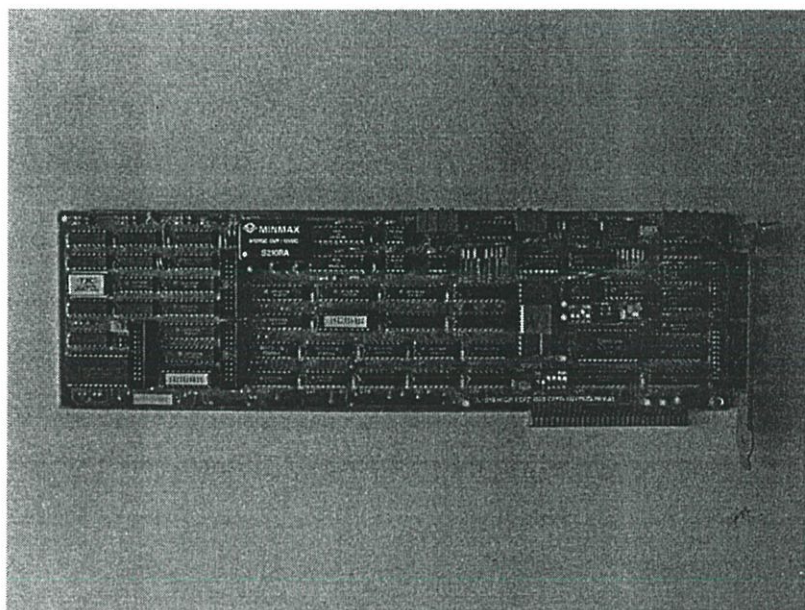
ตารางที่ ก.2 รายละเอียดทางเทคนิคของปั้มน้ำ

Max Flow rate	2200 ml/min (Vdc)
Max. Suction	10 ft. H ₂ O wet, 4" dry
Max. Pressure	20 psig (46 ft. H ₂ O)
Port Size (OD)	4.8 mm (0.18") hose barb
Power Require (Vdc)	24 Vdc (up to 28W)
Max Operating Temp	93 ^o C (200 ^o F)
Ambient Fluid Temp	0 to 93 ^o C (32 to 200 ^o F)
Particulates	No
Run dry	No
Max. Viscosity	200 cps
Dimensions	88 × 81 × 92 mm (4 × 1.75 × 2.63)
Weight	1.4 kg (3 lb.)

ก.7 การ์ดแปลงสัญญาณ A/D และ D/A

การ์ดแปลงสัญญาณ A/D และ D/A ที่ใช้ในการทดลองนี้จะใช้การ์ดรุ่น PCL-818 ของบริษัท Advantech ซึ่งจะเป็นการ์ดที่มีลักษณะการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์แบบ ISA การ์ดนี้จะทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุม กับอุปกรณ์ขับเคลื่อนของปั๊มน้ำและอุปกรณ์รองความถี่ต่ำ โดยรูปของการ์ดแปลงสัญญาณ A/D และ D/A แสดงได้ดังรูปที่ ก.15 และการ์ดจะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆดังนี้

- ส่วนแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล (A/D)
- ส่วนแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาล็อก (D/A)
- ส่วนดิจิตอลอินพุต (D Input)
- ส่วนดิจิตอลเอาต์พุต (D Output)



รูปที่ ก.15 การ์ดแปลงสัญญาณ A/D และ D/A

ส่วนแปลงสัญญาณ A/D

ส่วนแปลงสัญญาณ A/D นี้จะทำหน้าที่ในการรับสัญญาณแรงดันจากอุปกรณ์รองความถี่และแปลงให้อยู่ในรูปของสัญญาณดิจิตอลเพื่อส่งให้กับคอมพิวเตอร์หรือตัวควบคุมต่อไป โดยส่วนแปลงสัญญาณ A/D นี้จะมีจำนวนช่องในการรับสัญญาณถึง 16 ช่อง, มีความละเอียดสูงถึง 12 บิต, มีความเที่ยงตรงสูงถึง $\pm 0.01\%$ หรือ ± 1 บิต, มีความเป็นเชิงเส้นมากถึง ± 1 บิต, และมีความเร็วในการแปลงสัญญาณสูงที่สุดถึง 100 KHz นอกจากนี้ยังสามารถเลือกช่วงของสัญญาณอินพุตที่จะรับเข้ามาได้หลายแบบ ขึ้นอยู่กับการเลือกที่สวิทช์หรือเลือกทางซอฟต์แวร์

ส่วนแปลงสัญญาณ D/A

ส่วนแปลงสัญญาณ D/A นี้จะทำหน้าที่ในการรับสัญญาณควบคุมจากคอมพิวเตอร์หรือตัวควบคุม และแปลงให้อยู่ในรูปของสัญญาณอนาล็อกเพื่อส่งให้กับชุดขับเคลื่อนของปั้มน้ำต่อไป โดยส่วนแปลงสัญญาณ D/A นี้จะมีจำนวนช่องในการส่งสัญญาณ 2 ช่อง, มีความละเอียดสูงถึง 12 บิต, มีความเป็นเชิงเส้นมากถึง ± 0.5 บิต และมีความเร็วในการแปลงสัญญาณสูงถึง $5 \mu\text{s}$ นอกจากนี้ยังสามารถเลือกช่วงของสัญญาณเอาต์พุตที่จะส่งออกไปได้หลายแบบ ขึ้นอยู่กับการเลือกที่สวิทช์หรือเลือกทางซอฟต์แวร์

ก.8 แหล่งจ่ายไฟ

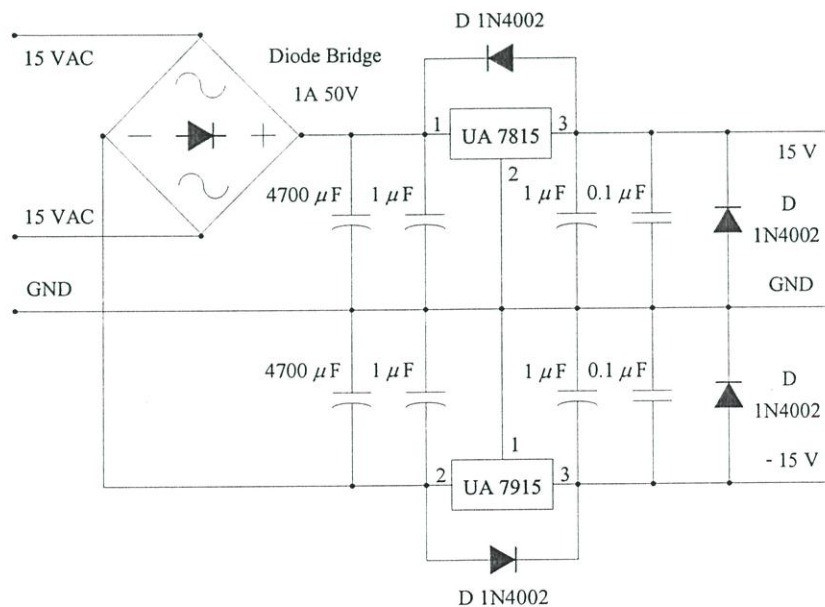
แหล่งจ่ายไฟสำหรับจ่ายแรงดันให้กับอุปกรณ์นั้นจะสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ

1. แหล่งจ่ายไฟที่ใช้ในการจ่ายแรงดันให้กับอุปกรณ์ปรับแต่งสัญญาณและอุปกรณ์กรองความถี่ต่ำ
2. แหล่งจ่ายไฟที่ใช้ในการจ่ายแรงดันให้กับอุปกรณ์ขับเคลื่อนของปั้มน้ำ

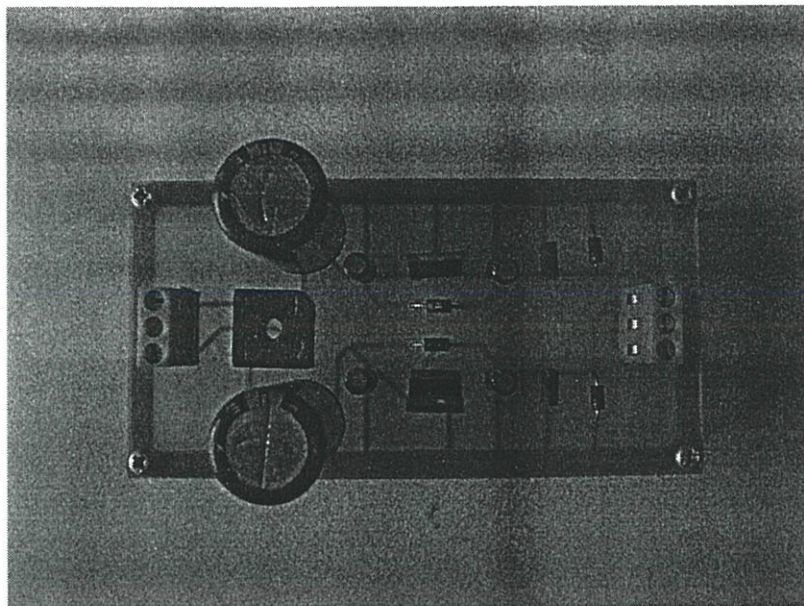
ซึ่งรายละเอียดของแหล่งจ่ายไฟทั้ง 2 ส่วนอธิบายได้ดังนี้

ก.8.1 แหล่งจ่ายไฟสำหรับอุปกรณ์ปรับแต่งสัญญาณและอุปกรณ์กรองความถี่

แหล่งจ่ายไฟสำหรับจ่ายแรงดันให้กับอุปกรณ์ปรับแต่งสัญญาณ และอุปกรณ์กรองความถี่ นั้นจะใช้จากแหล่งจ่ายไฟอันเดียวกันซึ่งจะเป็นแหล่งจ่ายไฟขนาด $\pm 15 \text{ V}$, 1 A โดยรูปของวงจรแหล่งจ่ายไฟแสดงได้ดังรูปที่ ก.17 และรูปอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟแสดงได้ดังรูปที่ ก.18



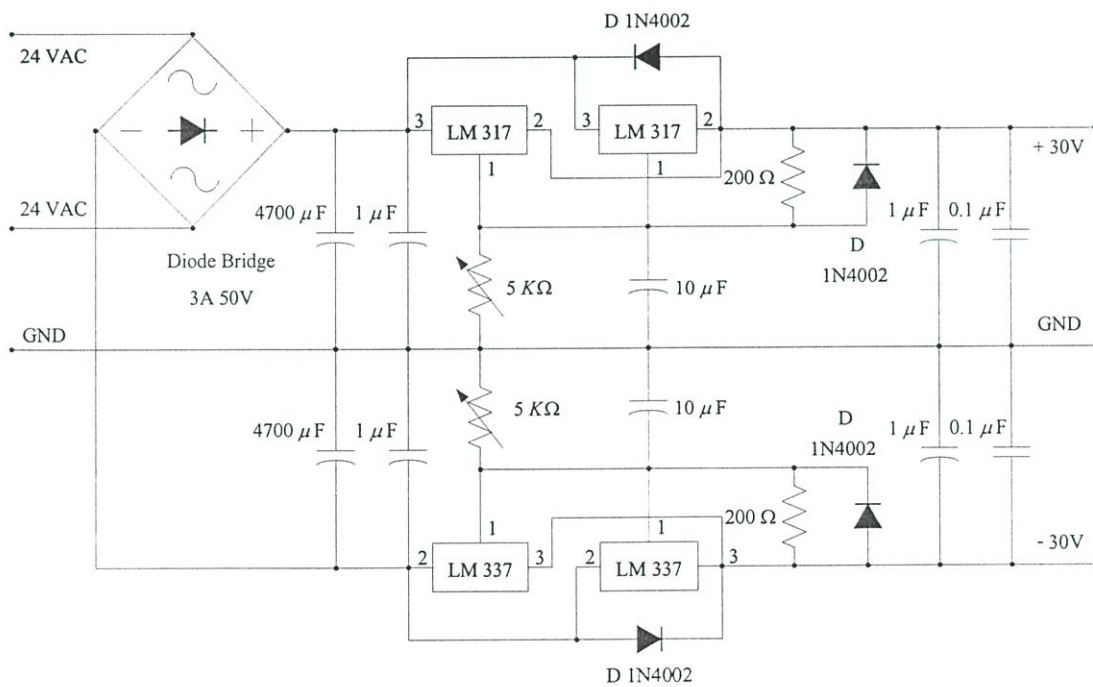
รูปที่ ก.17 วงจรแหล่งจ่ายไฟขนาด $\pm 15 \text{ V}$, 1 A



รูปที่ ก.18 อุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟขนาด $\pm 15\text{ V}$, 1 A

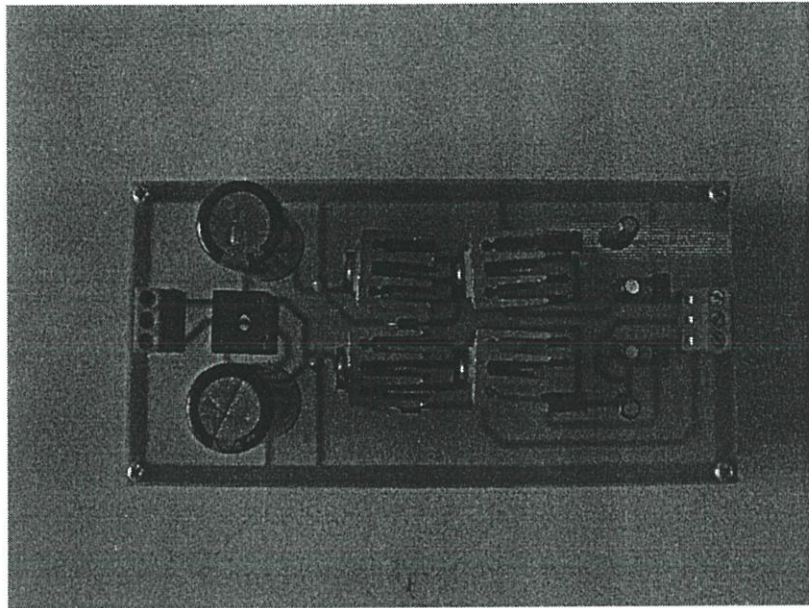
ก.8.2 แหล่งจ่ายไฟสำหรับอุปกรณ์ขับเคลื่อนของปั๊มน้ำ

แหล่งจ่ายไฟสำหรับอุปกรณ์ขับเคลื่อนของปั๊มน้ำนั้นจะใช้แหล่งจ่ายไฟขนาด $\pm 30\text{ V}$, 3 A รูปของวงจรแหล่งจ่ายไฟแสดงได้ดังรูปที่ ก.19 และรูปอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟแสดงได้ดังรูปที่ ก.20



รูปที่ ก.19 วงจรแหล่งแหล่งจ่ายไฟขนาด $\pm 30\text{ V}$, 3 A

เนื่องจากไอซีเรกกูเลเตอร์ที่ใช้ในการรักษาระดับแรงดันอ้างอิงให้คงที่ขนาด ± 30 V นั้นไม่มี ดังนั้นในการทดลองนี้จึงใช้ไอซีเรกกูเลเตอร์เบอร์ LM 317 และ LM 337 ซึ่งเป็นไอซีเรกกูเลเตอร์แบบปรับค่าแรงดันได้ แต่เนื่องจากไอซีนี้สามารถจ่ายกระแสได้สูงสุดเพียง 1.5 A ดังนั้นเพื่อให้เหมาะสมในการการใช้งานกับอุปกรณ์ขับเคลื่อนของปั้มน้ำจึงนำเอาไอซีเรกกูเลเตอร์นี้มาต่อขนานกันเพื่อให้สามารถจ่ายกระแสได้มากขึ้นถึง 3 A



รูปที่ ก.20 อุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟขนาด ± 30 V, 3 A

ภาคผนวก ข.

โปรแกรมที่ใช้ในการหาแบบจำลองกระบวนการ,
วิเคราะห์กระบวนการและออกแบบตัวควบคุม

ข.1 โปรแกรมหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง

% Parameter of Process

A1=69.397781; A2=69.397781; A3=69.397781; A4=69.397781;

a1=0.093427; a2=0.08097; a3=0.075324; a4=0.105771;

g=981;kc=1;

% Parameter of Minimum Phase Process

gammam1=0.791; gammam2=0.772;

km1=2.697241; km2=2.394903;

hm10=11.1; hm20=11.6; hm30=0.68 hm40=0.39

% Time Constant of Minimum Phase Process

tm1=A1/a1*sqrt(2*hm10/g); tm2=A2/a2*sqrt(2*hm20/g);

tm3=A3/a3*sqrt(2*hm30/g); tm4=A4/a4*sqrt(2*hm40/g);

% Parameter of Non-Minimum Phase Process

gammanm1=0.328; gammanm2=0.237;

knm1=2.788744; knm2=2.395091;

hnm10=10.8; hnm20=11.5; hnm30=7.33; hnm40=3.99;

% Time Constant of Non-Minimum Phase Process

tnm1=A1/a1*sqrt(2*hnm10/g); tnm2=A2/a2*sqrt(2*hnm20/g);

tnm3=A3/a3*sqrt(2*hnm30/g); tnm4=A4/a4*sqrt(2*hnm40/g);

% State-Space of MinimumPhase

```
am= [ (-1/tm1)  0  (A3/(A1*tm3))  0  ;
      0  (-1/tm2)  0  (A4/(A2*tm4)) ;
      0  0  (-1/tm3)  0  ;
      0  0  0  (-1/tm4)  ];
```

```
bm= [ ((gammam1*km1/A1))  0  ;
```

```

0          ((gammam2*km2/A2)) ;
0          ((1-gammam2)*km2/A3) ;
((1-gammam1)*km1/A4)      0      ];

```

```

cm= [ kc  0  0  0  0 ;
      0  kc  0  0  0 ];

```

```

dm= [ 0  0 ;
      0  0 ];

```

```

sys=ss(am,bm,cm,dm);

```

```

Gm=tf(sys)

```

```

% State-Space of Non-Minimum Phase

```

```

anm= [ (-1/tnm1)  0  (A3/(A1*tnm3))  0      ;
        0  (-1/tnm2)  0  (A4/(A2*tnm4)) ;
        0  0  (-1/tnm3)  0      ;
        0  0  0  (-1/tnm4)  ];

```

```

bnm= [ ((gammanm1*km1/A1))      0      ;
        0  ((gammanm2*knm2/A2)) ;
        0  ((1-gammanm2)*knm2/A3) ;
        ((1-gammanm1)*km1/A4)      0      ];

```

```

cnm= [ kc  0  0  0  0 ;
      0  kc  0  0  0 ];

```

```

dnm= [ 0  0 ;
      1  0 ];

```

```

sys=ss(anm,bnm,cnm,dnm);

```

```

Gnm=tf(sys)

```

ข.2 โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงกรณีเฟสต่ำสุด

```

% Time Constant
tm=[tm1 tm2 tm3 tm4]

% Poles
pm=[-1/tm1 -1/tm2 -1/tm3 -1/tm4]

% Zeros
zm=roots([tm3*tm4 tm3+tm4 (1-((1-gammam1)*(1-gammam2)/gammam1/gammam2))]);
zm=[zm(1) zm(2)]

% Direction of Zero
z1=zm(1)
n=[(gammam1*km1*tm1/A1/(1+(tm1*z1)))
(1-gammam2)*km2*tm1/A1/((1+(tm1*z1))*(1+(tm3*z1))) ;
(1-gammam1)*km1*tm2/A2/((1+(tm2*z1))*(1+(tm4*z1)))
(gammam2*km2*tm2/A2/(1+(tm2*z1))) ] ;
[u,s,v]=svd(n)
z2=zm(2)
n=[(gammam1*km1*tm1/A1/(1+(tm1*z2)))
(1-gammam2)*km2*tm1/A1/((1+(tm1*z2))*(1+(tm3*z2))) ;
(1-gammam1)*km1*tm2/A2/((1+(tm2*z2))*(1+(tm4*z2)))
(gammam2*km2*tm2/A2/(1+(tm2*z2))) ] ;
[u,s,v]=svd(n)

% RGA
rgam11=minreal((Gm(1,1)*Gm(2,2))/((Gm(1,1)*Gm(2,2))-(Gm(1,2)*Gm(2,1))))
rgam12=minreal(1-rgam11)
a=evalfr(rgam11,0);
rgam=[a 1-a;1-a a]

```

```

w = logspace(-4,0,100);
sv1 = sigma(rgam11,w);
sv2 = sigma(rgam12,w);
figure(1);
semilogx(w, sv1)
figure(1);hold;
semilogx(w, sv2)

grid

title('Relative Gain Array')
xlabel('Frequency (rad/sec)')
ylabel('Magnitude')

% Gain of Plant
gainm=[ gammam1*km1*tm1/A1    (1-gammam2)*km2*tm1/A1 ;
        (1-gammam1)*km1*tm2/A2    gammam2*km2*tm2/A2]

[u,s,v]=svd(gainm)
conditionnumberm=s(1,1)/s(2,2)
w=logspace(-4,0,100);
sv=sigma(Gm,w);
for i=1:100
    sv1=sv(1,i);
    sv2=sv(2,i);
    svg(i)=sv1/sv2;
end

figure(3);
semilogx(w,svg)

grid;

title('Condition Number of Plant')
xlabel('Frequency (rad/sec)')
ylabel('Magnitude');

```

ข.3 โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงกรณีเฟสไม่ต่ำสุด

```

% Time Constant
tnm=[tnm1 tnm2 tnm3 tnm4]

% Poles
pnm=[-1/tnm1 -1/tnm2 -1/tnm3 -1/tnm4]

% Zeros
znm=roots([tnm3*tnm4 tnm3+tnm4
           (1-((1-gammanm1)*(1-gammanm2)/gammanm1/gammanm2))]);
znm=[znm(1) znm(2)]

% Direction of Zero
z1=znm(1)
n=[(gammanm1*knm1*tnm1/A1/(1+(tnm1*z1)))
   (1-gammanm2)*knm2*tnm1/A1/((1+(tnm1*z1))*(1+(tnm3*z1))) ;
   (1-gammanm1)*knm1*tnm2/A2/((1+(tnm2*z1))*(1+(tnm4*z1)))
   (gammanm2*knm2*tnm2/A2/(1+(tnm2*z1))) ] ;
[u,s,v]=svd(n)
z2=znm(2)
n=[(gammanm1*knm1*tnm1/A1/(1+(tnm1*z2)))
   (1-gammanm2)*knm2*tnm1/A1/((1+(tnm1*z2))*(1+(tnm3*z2))) ;
   (1-gammanm1)*knm1*tnm2/A2/((1+(tnm2*z2))*(1+(tnm4*z2)))
   (gammanm2*knm2*tnm2/A2/(1+(tnm2*z2))) ] ;
[u,s,v]=svd(n)

% RGA
rganm11=minreal((Gnm(1,1)*Gnm(2,2))/((Gnm(1,1)*Gnm(2,2))-(Gnm(1,2)*Gnm(2,1))))
rganm12=(1-rganm11)
a=evalfr(rganm11,0);

```

```

rganm=[a 1-a;1-a a]
w = logspace(-4,0,100);
sv1 = sigma(rganm11,w);
sv2 = sigma(rganm12,w);
figure(1);
semilogx(w, sv1)
figure(1);hold;
semilogx(w, sv2)
grid
title('Relative Gain Array')
xlabel('Frequency (rad/sec)')
ylabel('Magnitude')

% Gain of Plant
gainnm=[ gammanm1*knm1*tnm1/A1 (1-gammanm2)*knm2*tnm1/A1 ;
        (1-gammanm1)*knm1*tnm2/A2 gammanm2*knm2*tnm2/A2]
[u,s,v]=svd(gainnm)
conditionnumbernm=s(1,1)/s(2,2)
w=logspace(-4,0,100);
sv=sigma(Gnm,w);
for i=1:100
    sv1=sv(1,i);
    sv2=sv(2,i);
    svg(i)=sv1/sv2;
end
figure(3);
semilogx(w,svg)
grid;
title('Condition Number of Plant')
xlabel('Frequency (rad/sec)')
ylabel('Magnitude');

```

ข.4 โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม I-P กรณีเฟสต่ำสุด

```

%CDM I-P FOR MINIMUM PHASE
% LOOP1
p1=tm1;p0=1;b0=(gammam1*tm1*km1*kc/A1);
r1=2.5; tao_cdmipm1=40;
tao=tao_cdmipm1;
syms ki kp
eq1=[num2str(tao),'/',num2str(r1),'=',num2str(tm1),'/((kp*',num2str(b0),'')+1)'];
eq2=[num2str(tao),'=(((kp*',num2str(b0),'')+1)/(ki*',num2str(b0),''))'];
s=solve(eq1,eq2,ki,kp);
ki_cdmipm1=double(s.ki);
kp_cdmipm1=double(s.kp);

% LOOP2
p1=tm2;p0=1;b0=(gammam2*tm2*km2*kc/A2);
r1=2.5;tao_cdmipm2=40;
tao=tao_cdmipm2;
syms ki kp
eq1=[num2str(tao),'/',num2str(r1),'=',num2str(tm2),'/((kp*',num2str(b0),'')+1)'];
eq2=[num2str(tao),'=(((kp*',num2str(b0),'')+1)/(ki*',num2str(b0),''))'];
s=solve(eq1,eq2,ki,kp);
ki_cdmipm2=double(s.ki);
kp_cdmipm2=double(s.kp);

'CDM I-P FOR MINIMUM PHASE LOOP1'
kp=kp_cdmipm1
ki=ki_cdmipm1
'CDM I-P FOR MINIMUM PHASE LOOP2'
kp=kp_cdmipm2
ki=ki_cdmipm2

```

ข.4 โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม I-P กรณีเฟสไม่ต่ำสุด

```

%LOOP1
p2=tnm1*tnm3;p1=tnm1+tnm3;p0=1;b0=((1-gammanm2)*tnm1*knm2*kc/A1);
r1=๓;r2=3;
syms kp ki tao
eq1=['tao/(',num2str(r1), '*',num2str(r2),')=',num2str(p2),'/(',num2str(p1),')'];
eq2=['tao/',num2str(r1),'=(',num2str(p1),')/((kp*',num2str(b0),')+ ',num2str(p0),')'];
eq3=['tao=((kp*',num2str(b0),')+ ',num2str(p0),')/((ki*',num2str(b0),'))'];
s=solve(eq1,eq2,eq3,kp,ki,tao);
tao_cdmipnm2=double(s.tao);
kp_cdmipnm2=double(s.kp);
ki_cdmipnm2=double(s.ki);

%LOOP2
p2=tnm2*tnm4;p1=tnm2+tnm4;p0=1;b0=((1-gammanm1)*tnm2*knm1*kc/A2);
r1=๓;r2=3;
syms kp ki tao
eq1=['tao/(',num2str(r1), '*',num2str(r2),')=',num2str(p2),'/(',num2str(p1),')'];
eq2=['tao/',num2str(r1),'=(',num2str(p1),')/((kp*',num2str(b0),')+ ',num2str(p0),')'];
eq3=['tao=((kp*',num2str(b0),')+ ',num2str(p0),')/((ki*',num2str(b0),'))'];
s=solve(eq1,eq2,eq3,kp,ki,tao);
tao_cdmipnm1=double(s.tao);
kp_cdmipnm1=double(s.kp);
ki_cdmipnm1=double(s.ki);

'CDM I-P FOR NON-MINIMUM PHASE LOOP1 CONTROL BY CONTROLLER 2'
kp=kp_cdmipnm2
ki=ki_cdmipnm2
tao=tao_cdmipnm2

```

'CDM I-P FOR NON-MINIMUM PHASE LOOP2 CONTROL BY CONTROLLER 1'

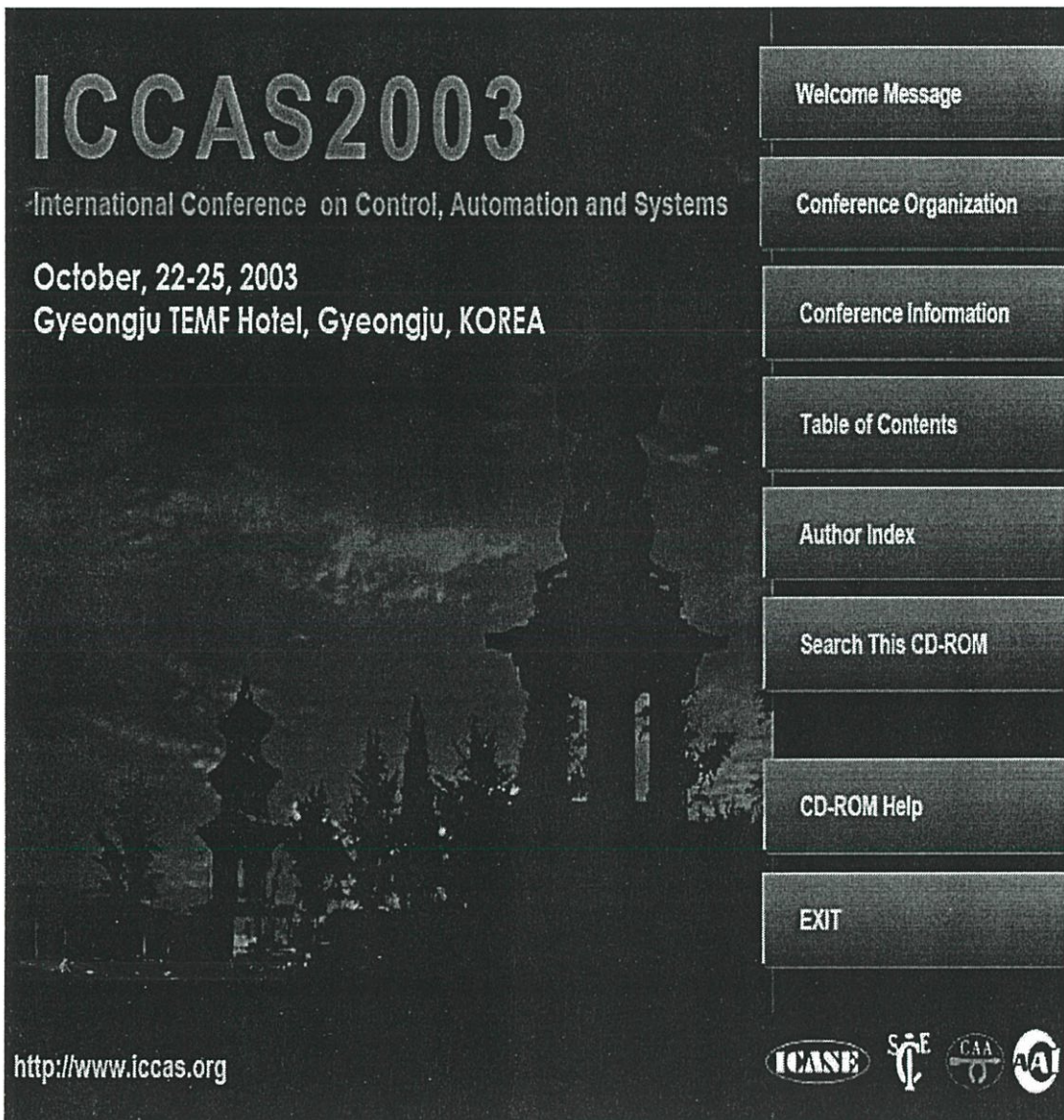
kp=kp_cdmipnm1

ki=ki_cdmipnm1

tao=tao_cdmipnm1

ภาคผนวก ค.

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์



The image shows a dark-themed menu screen for the ICCAS2003 CD-ROM. The background features a faint, artistic rendering of a traditional Korean architectural structure, possibly a gate or pavilion, with intricate details and a sense of depth. The text is presented in a clean, sans-serif font, with the main title 'ICCAS2003' in a large, bold, light-colored font. Below it, the subtitle 'International Conference on Control, Automation and Systems' is in a smaller font. The dates and location are listed in a medium-sized font. On the right side, there is a vertical list of menu items, each enclosed in a rectangular button with a subtle gradient and a thin border. At the bottom left, the website URL is provided. At the bottom right, there are four logos: ICASE, SAE, CAA, and AAI, each in its own circular or oval frame.

ICCAS2003

International Conference on Control, Automation and Systems

October, 22-25, 2003
Gyeongju TEMF Hotel, Gyeongju, KOREA

- Welcome Message
- Conference Organization
- Conference Information
- Table of Contents
- Author Index
- Search This CD-ROM
- CD-ROM Help
- EXIT

<http://www.iccas.org>

ICASE SAE CAA AAI

I-P Controller Design for Quadruple-Tank System

Tianchai Suksri, Viriya Kongratana, Arjin Numsomran, Taweepol Suesut, Thanit Trisuwannawat and Kittitirasesh
 Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
 (Tel : +66-2-326-4203/-4; Fax : +66-2-326-4203/-4 Ext. 103; E-mail : ktkitti@kmitl.ac.th)

Abstract: A control system design with Coefficient Diagram Method (CDM) is proven that effective for SISO control design. But the control system design for MIMO via CDM is not concrete procedure. In this paper presents the control system design method for quadruple-tank process via CDM. By using the decentralized method for both non-minimum phase and minimum phase are made. The results from Integral-Proportional (I-P) controller's design via CDM and standard Proportional-Integral (PI) controls are also shown to compare the merits of the proposed controllers.

Keywords: Quadruple-Tank, CDM

1. INTRODUCTION

One of the main problems with mathematical models of physical systems is that the parameters used in the models cannot be determined with absolute accuracy. Inaccurate parameters can arise from many different factors. The values of parameters may change with time or various effects. These differences existing between the actual system and system model is called uncertainty. However, the actual system parameters may change during operation or the input signal takes too large. In these cases, the linear model is no longer representing the actual system and causes practical problems. Therefore, a robust controller is needed to stabilize these types of systems for the entire range of expected variations in the plant parameters.

This paper presents a quadruple-tank control system using I-P controller design by CDM [4]. By using the Structure of the I-P Controller in the controlled system, it is not necessary to use the prefilter. The parameter of I-P controller is designed based on the stability and the speed of controlled system, which are defined in the term of the standard stability index and the equivalent time constant. When the settling time of the controlled system has been selected, the equivalent time constant is obtained. 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 explicit form. Hence, the transient and the steady state performances can be obtained as desired.

The step responses of the controlled system using I-P Controller compared to the step responses of the controlled system using PI Controller tuned by relay feedback method [1] are shown by various MATLAB's numerical examples. The step responses of the controlled system using I-P controller has little overshoot and reaches the desired settling time without adjustment as mentioned [4], it is better than the step response of the controlled system using PI controller designed by relay feedback method. Furthermore, the I-P controller can reduce the effect of interaction between two-loops of outputs better than PI controller. The numerical results of step responses for both minimum and non-minimum phase system are also show a good robustness when the plant parameters are varied.

2. QUADRUPLE-TANK PROCESS

Consider the quadruple-tank process shown in Fig. 1. This laboratory process has been used to illustrate many issues in multivariable control [1]. The target is to control the level in the lower two tanks with two pumps. The process inputs are u_1 and u_2 (input voltages to the pumps) and the outputs are y_1 and y_2 (voltage from level measurement devices). The linear

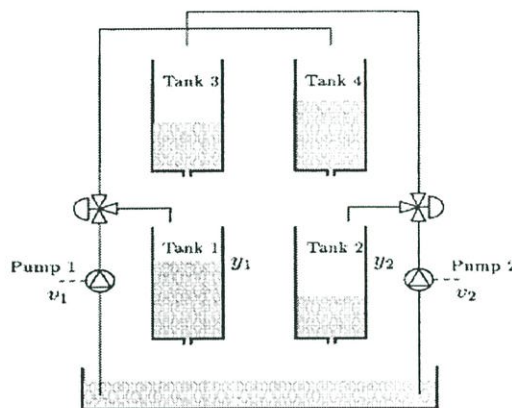


Fig. 1 Schematic diagram of the quadruple-tank process

-ised dynamics for the process is given as

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{\alpha_1 c_1}{1 + sT_1} & \frac{(1 - \alpha_2)c_1}{(1 + sT_3)(1 + sT_1)} \\ \frac{(1 - \alpha_1)c_2}{(1 + sT_4)(1 + sT_2)} & \frac{\alpha_2 c_2}{1 + sT_2} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

where

$$T_i = \frac{A_i}{a_i} \sqrt{\frac{2h_i^0}{g}}, \quad i = 1, \dots, 4 \quad (2)$$

and $c_1 = T_1 k_1 k_c / A_1$, $c_2 = T_2 k_2 k_c / A_2$. Here A_i is the cross-sectional area of tank i , a_i is the cross-sectional area of the outlet hole, h_i^0 is the steady-state water level, k_i is the gain of the pump i , k_c is the measurement gain, and g is the acceleration of gravity. The parameters $\alpha_1, \alpha_2 \in (0, 1)$ are determined from how the valves are prior set to an experiment; the flow to tank 1 is proportional to α_1 and the flow to tank 4 is proportional to $(1 - \alpha_1)$, and similarly for α_2 with respect to tank 2 and tank 3. Since

$$\det G(s) = \frac{c_1 c_2}{\alpha_1 \alpha_2 \prod_{i=1}^4 (1 + sT_i)} \times \left[(1 + sT_3)(1 + sT_4) - \frac{(1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2)}{\alpha_1 \alpha_2} \right] \quad (3)$$

and transfer matrix G has two finite zeros for $\alpha_1, \alpha_2 \in (0, 1)$.

The system is non-minimum phase for

$$0 < \alpha_1 + \alpha_2 < 1,$$

and minimum phase for

$$1 < \alpha_1 + \alpha_2 < 2.$$

Hence, by changing a single valve we can make the multivariable level control problem more or less difficult.

The relative gain (RGA) was introduced by Bristol [2] as a measure of interaction in multivariable control systems. The RGA Λ is defined as $\Lambda = G(0) * G^{-T}(0)$, where the asterisk denotes the schur product (element-by-element matrix multiplication) and $-T$ inverse transpose. It is possible to show that the elements of each row and column of Λ sum up to one, so for a 2×2 system the RGA is determined by the scalar $\lambda = \Lambda_{11}$. The RGA is used as a tool mainly in the process industry to decide on control structure issues such as input-output pairing for decentralized controllers [3]. The RGA of the Quadruple-Tank Process is given by the simple expression

$$\lambda = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2 - 1},$$

where

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda & 1 - \lambda \\ 1 - \lambda & \lambda \end{bmatrix}.$$

The physical modeling and RGA of minimum phase system and non-minimum phase system give the two transfer matrices as follows [1]:

2.1 Case of minimum phase system

$$G_-(s) = \begin{bmatrix} \frac{2.6}{1+62s} & \frac{1.5}{(1+23s)(1+62s)} \\ \frac{1.4}{(1+30s)(1+90s)} & \frac{2.8}{1+90s} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\Lambda_- = \begin{bmatrix} 1.4 & 0.4 \\ 0.4 & 1.4 \end{bmatrix}$$

2.2 Case of non-minimum phase system

$$G_+(s) = \begin{bmatrix} \frac{1.5}{1+63s} & \frac{2.5}{(1+39s)(1+63s)} \\ \frac{2.5}{(1+56s)(1+91s)} & \frac{1.6}{1+91s} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\Lambda_+ = \begin{bmatrix} -0.635 & 1.635 \\ 1.635 & -0.635 \end{bmatrix}$$

3. STRUCTURE OF THE CONTROL SYSTEM WITH I-P CONTROLLER

From RGA analysis suggests that input-output pairing for decentralized control be chosen. In case of minimum phase system, transfer function G_{11} and G_{22} are used for design the controller, but the case of non-minimum phase system the transfer function G_{12} and G_{21} are instead used.

The structure of MIMO control system using I-P controller for minimum phase and non-minimum phase are shown in Fig.

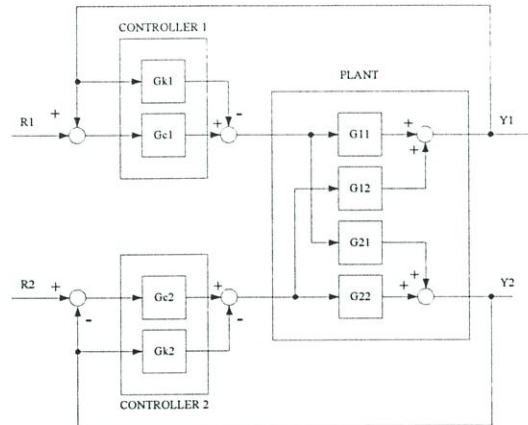


Fig. 2 Structure of the MIMO minimum phase control system

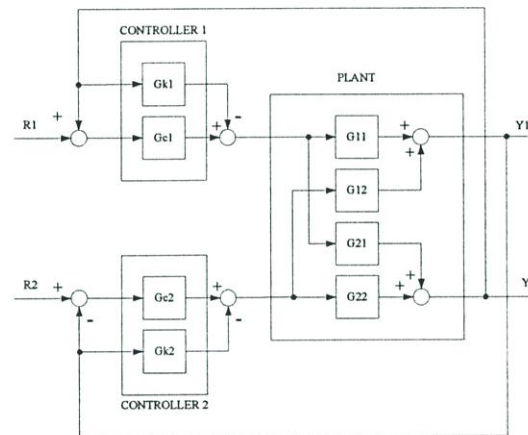


Fig. 3 Structure of the MIMO non-minimum phase control system.

2 and Fig. 3 respectively, where

$$G_{c1}(s) = \frac{K_{i1}}{s}, G_{k1}(s) = K_{p1},$$

$$G_{c2}(s) = \frac{K_{i2}}{s}, G_{k2}(s) = K_{p2},$$

and transfer matrix of system is

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_{11}}{a_1s + a_0} & \frac{K_{12}}{b_2s^2 + b_1s + b_0} \\ \frac{K_{21}}{c_2s^2 + c_1s + c_0} & \frac{K_{22}}{d_1s + d_0} \end{bmatrix}.$$

The transfer functions used for design are:

3.1 Case of minimum phase system

Loop 1 (Y1-R1),

$$\frac{Y_1(s)}{R_1(s)} = \frac{G_{c1}(s)G_{11}(s)}{1 + G_{c1}(s)G_{11}(s) + G_{k1}(s)G_{11}(s)}.$$

Characteristic equation is

$$P_{-11} = 1 + G_{c1}(s)G_{11}(s) + G_{k1}(s)G_{11}(s) \\ = a_1s^2 + (a_0 + K_{p1}K_{11})s + K_{i1}K_{11}. \quad (6)$$

Loop 2 (Y2-R2),

$$\frac{Y_2(s)}{R_2(s)} = \frac{G_{c2}(s)G_{22}(s)}{1 + G_{c2}(s)G_{22}(s) + G_{k2}(s)G_{22}(s)}.$$

Characteristic equation is

$$P_{-22} = 1 + G_{c2}(s)G_{22}(s) + G_{k2}(s)G_{22}(s) \\ = d_1s^2 + (d_0 + K_{p2}K_{22})s + K_{i2}K_{22}. \quad (7)$$

3.2 Case of non-minimum phase system

Loop 1 (Y1-R2),

$$\frac{Y_1(s)}{R_2(s)} = \frac{G_{c2}(s)G_{12}(s)}{1 + G_{c2}(s)G_{12}(s) + G_{k2}(s)G_{12}(s)}.$$

Characteristic equation is

$$P_{+12} = 1 + G_{c2}(s)G_{12}(s) + G_{k2}(s)G_{12}(s) \\ = b_2s^3 + b_1s^2 + (b_0 + K_{p2}K_{12})s + K_{i2}K_{12}. \quad (8)$$

Loop 2 (Y2-R1),

$$\frac{Y_2(s)}{R_1(s)} = \frac{G_{c1}(s)G_{21}(s)}{1 + G_{c1}(s)G_{21}(s) + G_{k1}(s)G_{21}(s)}.$$

Characteristic equation is

$$P_{+21} = 1 + G_{c1}(s)G_{21}(s) + G_{k1}(s)G_{21}(s) \\ = c_2s^3 + c_1s^2 + (c_0 + K_{p1}K_{21})s + K_{i1}K_{21}. \quad (9)$$

4. COEFFICIENT DIAGRAM METHOD

The CDM is used for design the controller so that the step response of the controlled system satisfies both transient and steady state response specifications, and also satisfies the requirements of stability, faster response and robustness. Generally, the order of the controller designed by CDM is lower than the order of the plant [4]. However, when using the I-P controller for the first order plant, the order of the controller is equal to the order of the plant, and for the second order plant, the order of the controller is lower than the order of the plant equal one, but the integrator of the $G_{c1}(s)$ and $G_{c2}(s)$ virtually makes the plant to be second order and third order respectively. Thus, the CDM condition is satisfied.

The polynomials form of the controller and the plant are generally be written respectively in the form [4]

$$A_c(s) = l_\lambda s^\lambda + l_{\lambda-1}s^{\lambda-1} + \dots + l_0 \quad (10)$$

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

and

$$A_p(s) = p_k s^k + p_{k-1}s^{k-1} + \dots + p_0 \quad (11)$$

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

where $\lambda < k$ and $m < k$.

The polynomials characteristic equation from Fig. 2 and Fig. 3 can be written in the form

$$P(s) = a_n s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0 \\ = \sum_{i=0}^n a_i s^i, \quad (12)$$

where a_0, a_1, \dots, a_n are the real coefficients.

The stability index γ_i , the equivalent time constant τ and the stability limit γ_i^* are defined as follows:

$$\gamma_i = \frac{a_i^2}{a_{i+1}a_{i-1}}, \quad (13)$$

$$\tau = \frac{a_1}{a_0}, \quad (14)$$

$$\gamma_i^* = \frac{1}{\gamma_{i+1}} + \frac{1}{\gamma_{i-1}}; \quad \gamma_0, \gamma_n = \infty. \quad (15)$$

From equation (13) - (15), the coefficients a_i and the characteristic equation $P(s)$ is

$$a_i = a_0 \tau^i \frac{1}{\gamma_{i-1} \dots \gamma_2 \gamma_1^{i-1}} = a_0 \tau^i \prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{(\gamma_{i-j})^j}, \quad (16)$$

$$P_+(s) = a_0 \left\{ \sum_{i=2}^n \left(\prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{\gamma_{i-j}^j} \right) (\tau s)^i \right\} + \tau s + 1. \quad (17)$$

4.1 Case of minimum phase system

From equation (12) and (17), the characteristic equation can be expressed as

$$P_-(s) = a_2 s^2 + a_1 s + a_0. \quad (18)$$

4.2 Case of non-minimum phase system

In the same way, the characteristic equation for this case is

$$P_+(s) = a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0. \quad (19)$$

The coefficients in equation (12) came from the chosen stability index γ_i and equivalent time constant τ . By equating the $P(s)$ of equation (12) with the $P_-(s)$ of equation (18) or the $P_+(s)$ of equation (19), such that the I-P controller for each case are obtained.

5. NUMERICAL EXAMPLES

In this section, the design procedures of I-P Controller via CDM for both cases are verified through the MATLAB. The step responses of the control systems that employ the proposed I-P controller and the PI controller tuned by relay feedback method [1] are also be compared.

5.1 Case of minimum phase system

Loop 1 (Y1-R1)

$$G_{-11}(s) = \frac{2.6}{62s + 1}$$

Here, the desired settling time $t_s = 20$ secs, then the equivalent time constant $\tau = 8$. The stability index $\gamma_1 = 3$ is chosen, hence the $P_-(s)$ can be expressed as

$$P_-(s) = 62s^2 + 23.427392s + 2.927938.$$

Equated the above $P_-(s)$ to the $P_{-11}(s)$ of the plant with the I-P controller in the equation (6), then the I-P controller is

$$K_{p1} = 8.62592, \quad K_{i1} = 1.12613.$$

Loop 2 (Y2-R2)

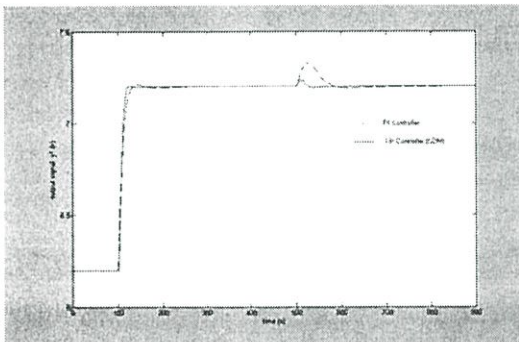
$$G_{-22}(s) = \frac{2.8}{90s + 1}$$

In the same manner, the $P_-(s)$ is

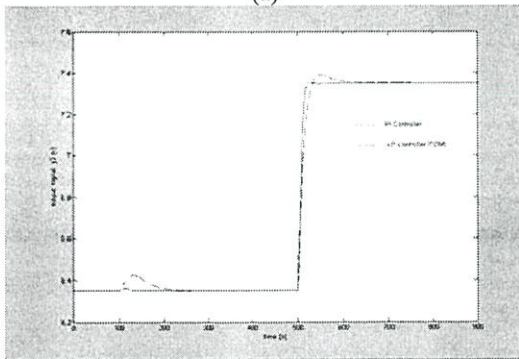
$$P_-(s) = 90s^2 + 33.445812s + 4.179084.$$

Equated the above $P_-(s)$ to the $P_{-22}(s)$ of the plant with the I-P controller in equation (7), the I-P controller is

$$K_{p2} = 11.58779, \quad K_{i2} = 1.49253.$$



(a)



(b)

Fig. 4. Step responses of minimum phase system

The step response in Fig. 4(a) is for the tank 1 and Fig. 4(b) is for tank 2. In both figures, it is evidence that the settling time from the proposed I-P controller is satisfied for both tanks, while the responses obtained from PI controller tuned by relay feedback method have more than effect from the interaction among the tanks.

5.2 Case of non-minimum phase system

Since the I-P controller cannot be achieved by specifying the settling time t_s , the equivalent time constant τ is obtained by specifying the values of the stability index γ_2, γ_1 . Then the equivalent time constant τ and parameter K_i and K_p of I-P controller are obtained by equating the characteristic polynomial (12) to the characteristic polynomial (19).

Loop 1 (Y1-R2)

$$G_{+12}(s) = \frac{2.5}{(63s + 1)(39s + 1)} = \frac{2.5}{2457s^2 + 102s + 1}$$

Selected the stability index $\gamma_1 = 3$ and $\gamma_2 = 2$, then $\tau = 144.529$ secs, and settling time t_s is approximate 361.322 secs. The $P_+(s)$ is then

$$P_+(s) = 2457s^3 + 102s^2 + 2.1312925s + 0.014684.$$

Equated the above $P_+(s)$ to the $P_{+12}(s)$ of the plant with the I-P controller in equation (8), the I-P controller is

$$K_{p2} = 0.452517, \quad K_{i2} = 0.0058736.$$

Loop 2 (Y2-R1)

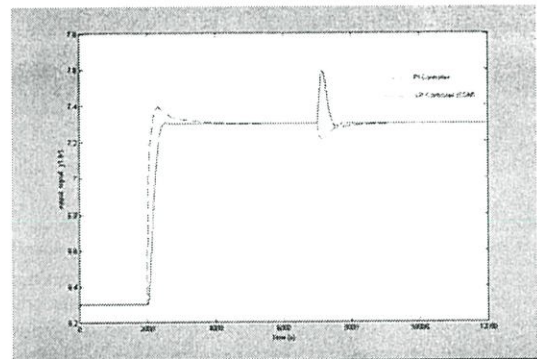
$$G_{+21}(s) = \frac{2.5}{(91s + 1)(56s + 1)} = \frac{2.5}{5096s^2 + 147s + 1}$$

In the same manner, from the selected $\gamma_1 = 3$ and $\gamma_2 = 2$, then $\tau = 208$ secs and settling time t_s is approximate 520 secs. The $P_+(s)$ is then

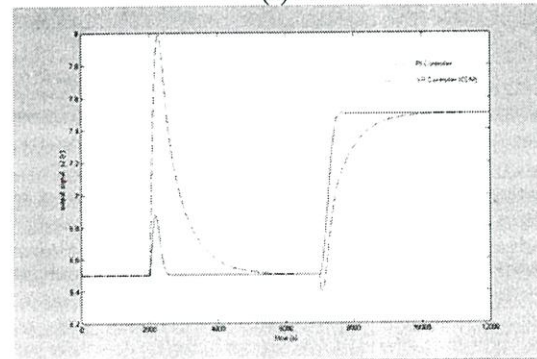
$$P_+(s) = 5096s^3 + 147s^2 + 2.1065075s + 0.01011.$$

Equated the above $P_+(s)$ to the $P_{+21}(s)$ of the plant with the I-P controller in equation (9), the I-P controller is

$$K_{p1} = 0.442603, \quad K_{i1} = 0.004044.$$



(a)



(b)

Fig. 5. Step response of non-minimum phase system

The step response in Fig. 5(a) is for the tank 1 and Fig. 5(b) is for tank 2. Although the responses from the proposed I-P controller of tank 1 compared with the PI Controller has the effect from the interaction more than PI controller, but the response of tank 2 is clearly shown that it differ from the response of the PI controller so much. Then we can conclude that even the plant is a non-minimum phase system, the proposed controller also be suitably applied. Moreover, the settling time are satisfied for both tanks with small in overshoots.

5.3 Case of the system with parameters α_1 and α_2 changed

In order to investigate the plant with variation of parameters α_1, α_2 of the quadruple-tank are changed $\pm 10\%$, we also classify the results in two cases as follows:

Case of minimum phase system

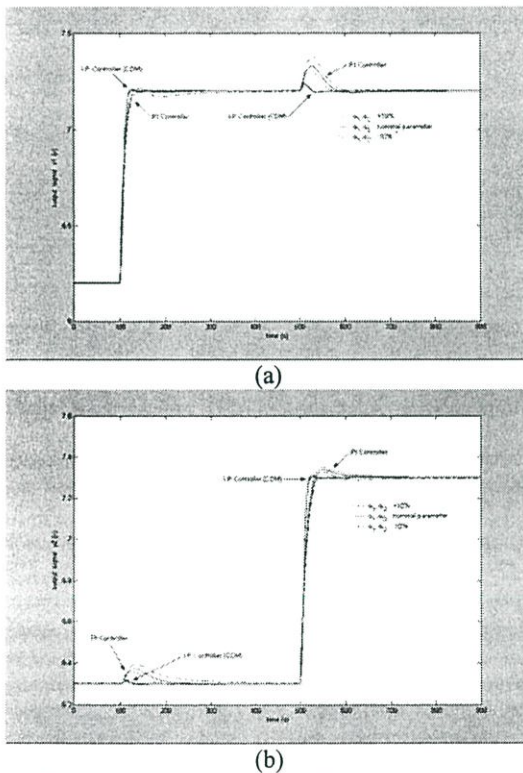


Fig. 6 Step responses of minimum phase system when α_1, α_2 varied $\pm 10\%$

The step responses of the control system when α_1, α_2 are changed $\pm 10\%$ shown in Fig. 6(a) for tank 1 and Fig. 6(b) for tank 2 respectively. It is obviously seen that the responses from I-P controller has a little changed, while the responses from PI controller are more observable change.

Case of non-minimum phase system

This case is look like the case of nominal plant without the changing of α_1, α_2 as in section 5.2. That is the response of tank 2 from the I-P controller is still better than that of the PI controller as well.

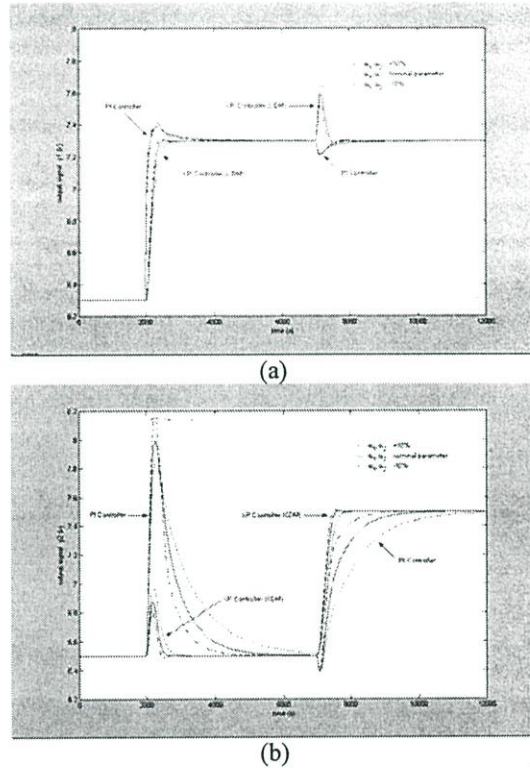


Fig. 7 Step responses of non-minimum phase system when α_1, α_2 varied $\pm 10\%$

6. CONCLUSION

The design procedures of the I-P controller by CDM for quadruple-tank process have been proposed in this paper. The step responses between the proposed I-P controller and PI controller are compared for both minimum and non-minimum phase systems to verify that the transient and steady state response specifications are obtained with robustness in all cases.

REFERENCES

- [1] K.H. Johansson, "The Quadruple-tank process a multivariable with an adjust zero", *IEEE Trans Control Syst. Technol.*, 8, (3), 2000, pp. 456-465
- [2] E.Bristol, "On a new measure of interaction for multivariable process control", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 11:133 1966
- [3] M.Morari and E.Zafiriou, *Robust Process Control*, Prentic-Hall, Eaglewood cliffs, NJ, 1989
- [4] S.Manabe, "Coefficient Diagram Method", *14 th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace*, Seoul, Aug 1998.

การประชุมทางวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ครั้งที่ 42
3-6 กุมภาพันธ์ 2547

42th Kasetsart University Annual Conference 2004

ฝ่ายแผนงานโครงการและการดำเนินงาน
จัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 42
กองบริการการศึกษา
อาคารสารนิเทศ 50 ปี ชั้น 9
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพฯ 10900
โทรศัพท์ และโทรสาร 0 2942 8167-0
E-mail : pod.wed@ku.ac.th website : http://edbaserv.ku.ac.th

“ เกษตรศาสตร์
เพื่อการพัฒนาคุณภาพชีวิต ”
" Agricultural Science for Life Quality Development "

การออกแบบระบบควบคุม 2-DOF ด้วยวิธีทางเดินรากสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง Design of the Two Degree of Freedom by Root Locus Techniques for Quadruple-tank

เทียนชัย สุขศรี, วิริยะ กองรัตน์ และ อาจินต์ น่วมสำราญ

Tianchai Suksri, Viriya Kongratana, and Arjin Numsomran

บทคัดย่อ

การออกแบบระบบควบคุมแบบ 2-DOF สำหรับกระบวนการ SISO ด้วยวิธีทางเดินรากนั้นเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อนและมีประสิทธิภาพ สามารถออกแบบให้ระบบควบคุมมีผลตอบสนองชั่วคราวและผลตอบสนองที่สถานะคงตัวได้ตามที่ต้องการโดยไม่ต้องมีการปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุม แต่สำหรับการออกแบบระบบควบคุมสำหรับกระบวนการ MIMO ด้วยวิธีทางเดินรากนั้นยังไม่มีวิธีในการออกแบบที่แน่นอน บทความนี้จึงได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถังด้วยวิธีทางเดินรากโดยมีโครงสร้างของตัวควบคุมเป็นแบบ 2-DOF ในการออกแบบตัวควบคุมจะทำการออกแบบโดยใช้วิธีแบบแยกอิสระ (decentralized) ทำการออกแบบตัวควบคุมทั้งในกรณีเฟสต่ำสุดและเฟสไม่ต่ำสุด

ABSTRACT

The controls design of 2-DOF for SISO process by root locus method, is not complicated and efficiently. It can design the controls system to have the transient and steady state responses, and do not adjust gain of controller. However, due to controls design for MIMO process, by root locus method, there is not exact method. This paper are present the controls design method for Quadruple-Tank Process, by root locus method that there is the structure of 2-DOF control system. For controls design will be decentralized method to design both minimum and non-minimum phases.

Key Words: Quadruple-tank, Root-Locus Techniques, Two-Degree of Freedom

E-mail: aaa_kmitt@hotmail.com

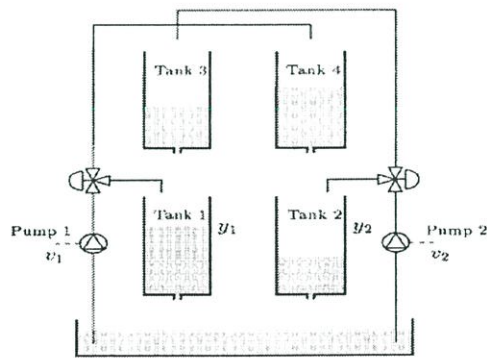
คำนำ

การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางเดินรากเป็นวิธีสำหรับการออกแบบตัวควบคุมวิธีหนึ่ง โดยการออกแบบจะทำการกำหนดตำแหน่งขั้วของตัวควบคุมภายใต้เงื่อนไขของมุม (Angle Condition) ในวิธีทางเดินของราก โดยมีจุดประสงค์ที่จะทำให้กระบวนการที่ถูกควบคุมมีเสถียรภาพ และมีผลตอบสนองที่สภาวะคงตัวตามที่ต้องการ โดยการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางเดินของรานั้นจะไม่ได้ผลตอบสนองของระบบตามที่ต้องการในการออกแบบครั้งแรกต้องมีการปรับแต่งค่าอัตราขยายของตัวควบคุม ดังนั้นจึงได้มีผู้คิดค้นวิธีการออกแบบระบบควบคุมแบบ 2-DOF ด้วยวิธีทางเดินของราก [1] เพื่อให้ระบบมีผลตอบสนองตามที่ต้องการโดยไม่ต้องมีการปรับแต่งค่าอัตราขยายของตัวควบคุม

ในบทความนี้จะแสดงถึงการออกแบบระบบควบคุมแบบ 2-DOF สำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง (Quadruple-tank) [2] ด้วยวิธีทางเดินราก [1] โดยการออกแบบจะใช้วิธีแบบแยกอิสระ (decentralized) และใช้การวิเคราะห์ RGA [3] ในการจับคู่วงรอบเอาต์พุตที่จะทำการควบคุม การทดลองจะทำการเปรียบเทียบผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบ 1-DOF และ 2-DOF ที่ออกแบบด้วยวิธีทางเดินรากทั้งในกรณีเฟสต่ำสุด (minimum phase) และ เฟสไม่ต่ำสุด (non-minimum phase)

กระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง

ในส่วนนี้เราจะพิจารณากระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง [2] ดังแสดงในรูปที่ 1. ซึ่งกระบวนการนี้ถูกใช้เป็นการทดลองในการทดลองเพื่อทำการอธิบายถึงการควบคุมกระบวนการแบบหลายตัวแปร โดยเป้าหมายก็คือการควบคุมระดับน้ำในถังน้ำ 2 ถังด้านล่างด้วยปั้มน้ำ 2 ตัว โดยอินพุตของกระบวนการคือ u_1 และ u_2 (แรงดันอินพุตที่จ่ายให้กับปั้มน้ำ) และเอาต์พุต คือ y_1 และ y_2 (แรงดันที่ได้จากอุปกรณ์วัดระดับน้ำ) โดยแบบจำลองเชิงเส้นสำหรับกระบวนการ [2] คือ



รูปที่ 1. รูปแบบของกระบวนการ 4 ถัง

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{\gamma_1 c_1}{(1+sT_1)} & \frac{(1-\gamma_2)c_1}{(1+sT_3)(1+sT_1)} \\ \frac{(1-\gamma_1)c_2}{(1+sT_4)(1+sT_2)} & \frac{\gamma_2 c_2}{1+sT_2} \end{bmatrix}, \quad T_i = \frac{A_i}{a_i} \sqrt{\frac{2h_i^0}{g}}, \quad i=1, \dots, 4 \quad (1)$$

และ $c_1 = T_1 k_1 k_c / A_1$, $c_2 = T_2 k_2 k_c / A_2$ โดย A_i คือพื้นที่หน้าตัดของถัง i , a_i คือพื้นที่หน้าตัดของรูทางออกของถัง i , h_i^0 คือระดับน้ำที่สภาวะคงตัวของแต่ละถังในตอนเริ่มต้น, k_i คืออัตราขยายของปั้มน้ำ i , k_c คืออัตราขยาย

ของอุปกรณ์วัดระดับน้ำและ g คือแรงโน้มถ่วงของโลก พารามิเตอร์ γ_1 และ γ_2 นั้นจะมีค่าอยู่ในช่วง 0-1 ทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดตำแหน่งการเปิดและปิดของวาล์ว โดยน้ำที่ไหลเข้าสู่ถัง 1 จะเป็นสัดส่วนกับ γ_1 และน้ำที่ไหลเข้าสู่ถังที่ 4 จะเป็นสัดส่วนกับ $(1-\gamma_1)$ ในทำนองเดียวกันสำหรับน้ำที่ไหลเข้าสู่ถังที่ 2 จะเป็นสัดส่วนกับ γ_2 และน้ำที่ไหลเข้าสู่ถังที่ 3 จะเป็นสัดส่วนกับ $(1-\gamma_2)$ และ

$$\det G(s) = \frac{c_1 c_2}{\gamma_1 \gamma_2 \prod_{i=1}^4 (1+sT_i)} \times \left[(1+sT_3)(1+sT_4) - \frac{(1-\gamma_1)(1-\gamma_2)}{\gamma_1 \gamma_2} \right] \quad (2)$$

โดยทรานส์เฟอร์เมตริกซ์ $G(s)$ มีซีโรอยู่สองตัวสำหรับ $\gamma_1, \gamma_2 \in (0,1)$ ระบบจะเป็นแบบเฟสต่ำสุดสำหรับและเฟสไม่ต่ำสุดสำหรับ $0 < \gamma_1 + \gamma_2 < 1$ และ $1 < \gamma_1 + \gamma_2 < 2$ ตามลำดับ

การวัดการรบกวนกันระหว่างวงรอบควบคุม (interaction) สำหรับระบบควบคุมหลายตัวแปรจะใช้วิธี RGA (Relative Gain Array) ซึ่งถูกแนะนำโดย Bristol [3] วิธีการวัด RGA จะกำหนดให้ $\Lambda = G(0) * G^{-T}(0)$ การกำหนดให้ดังนี้คือการคูณของเมตริกซ์โดยคูณแบบตำแหน่งต่อตำแหน่งและ $-T$ คืออินเวอร์สทรานสโพส โดยผลรวมแต่ละแถวและแต่ละหลักของ Λ จะมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นสำหรับกระบวนการแบบ 2×2 RGA ถูกพิจารณาโดย $\lambda = \Lambda_{11}$ RGA นี้เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์มากในกระบวนการอุตสาหกรรม ซึ่งจะถูกใช้เพื่อตัดสินใจว่าจะทำการจับคู่อินพุต-เอาต์พุต สำหรับตัวควบคุมแบบ decentralized [4] โดย RGA ของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถังคือ

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda & 1-\lambda \\ 1-\lambda & \lambda \end{bmatrix}, \lambda = \frac{\gamma_1 \gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2 - 1}$$

แบบจำลองทางกายภาพ RGA ตำแหน่งไหลและซีโร ของระบบกรณีเฟสต่ำสุดและเฟสไม่ต่ำสุดที่ใช้ในการทดลองแสดงได้ดังสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ

กรณีเฟสต่ำสุด

$$G_-(s) = \begin{bmatrix} \frac{2.6}{(1+62s)} & \frac{1.5}{(1+23s)(1+62s)} \\ \frac{1.4}{(1+30s)(1+90s)} & \frac{2.8}{(1+90s)} \end{bmatrix}, \quad \Lambda_- = \begin{bmatrix} 1.4 & -0.4 \\ -0.4 & 1.4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Poles = $(-0.017, -0.011, -0.043, -0.033)$, Zeros = $(-0.06, -0.018)$

กรณีเฟสไม่ต่ำสุด

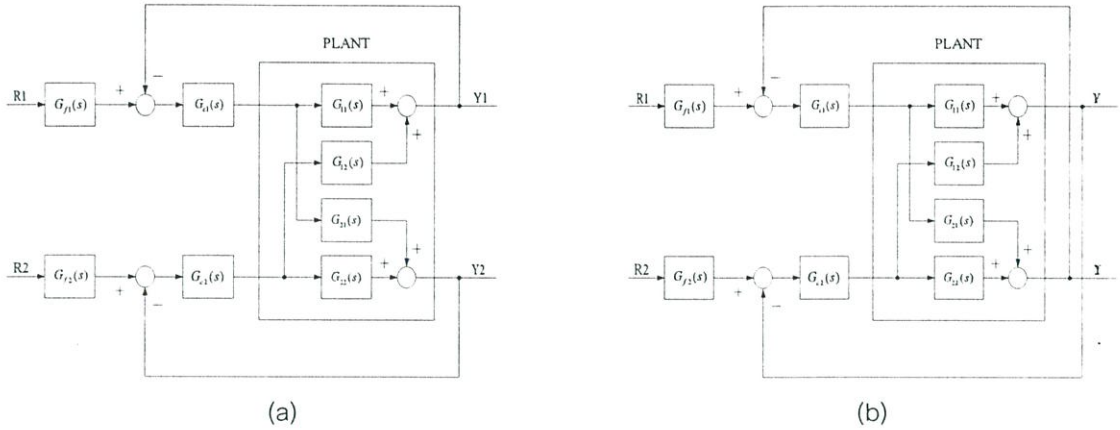
$$G_+(s) = \begin{bmatrix} \frac{1.06}{(1+63s)} & \frac{2.48}{(1+50s)(1+63s)} \\ \frac{3.28}{(1+53s)(1+91s)} & \frac{1.4}{(1+91s)} \end{bmatrix}, \quad \Lambda_+ = \begin{bmatrix} -0.225 & 1.225 \\ 1.225 & -0.225 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Poles = $(-0.015, -0.011, -0.025, -0.017)$, Zeros = $(-0.057, 0.013)$

โครงสร้างของระบบควบคุม

การวิเคราะห์ RGA เป็นการแนะนำถึงการจับคู่อินพุต-เอาต์พุตที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม ในกรณีระบบเป็นแบบเฟสต่ำสุด ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน $G_{-11}(s)$ และ $G_{-22}(s)$ จะถูกใช้สำหรับออกแบบตัวควบคุม, แต่กรณีที่เป็นแบบเฟสไม่ต่ำสุด ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน $G_{+12}(s)$ และ $G_{+21}(s)$ จะถูกใช้ในการออกแบบ

โครงสร้างของระบบควบคุม MIMO ที่ใช้ระบบควบคุมแบบ 2-DOF สำหรับกรณีเฟสต่ำสุดและเฟสไม่ต่ำสุดแสดงได้ในรูปที่ 2(a) และ 2(b) ตามลำดับ โดยถ้าระบบควบคุมเป็นแบบ 1-DOF จะไม่มีส่วนของตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้า (Feed forward) G_f



รูปที่ 2. โครงสร้างของระบบควบคุมแบบ 2-DOF กรณีเฟสต่ำสุด (a) และกรณีเฟสไม่ต่ำสุด (b)

โดยในกรณีเฟสต่ำสุดนั้นจะทำการออกแบบโดยใช้ $G_{-11}(s)$ และ $G_{-22}(s)$ ในการออกแบบและเนื่องจากเป็นกระบวนการแบบอันดับหนึ่งชนิดศูนย์ ดังนั้นตัวควบคุมที่ใช้สำหรับกรณีเฟสต่ำสุดคือ

$$G_{c1}(s) = \frac{Kc_1(s + z_{c1})}{s}, G_{f1}(s) = \frac{z_{c1}}{(s + z_{c1})} \quad G_{c2}(s) = \frac{Kc_2(s + z_{c2})}{s}, G_{f2}(s) = \frac{z_{c2}}{(s + z_{c2})}$$

และในกรณีเฟสไม่ต่ำสุดนั้น $G_{+12}(s)$ และ $G_{+21}(s)$ ที่ใช้ในการออกแบบเป็นกระบวนการแบบอันดับสองชนิดศูนย์ ดังนั้นตัวควบคุมที่ใช้สำหรับกรณีเฟสไม่ต่ำสุดคือ

$$G_{c1}(s) = \frac{Kc_1(s + z_{c1})(s + z_{c11})}{s}, G_{f1}(s) = \frac{z_{c1}}{(s + z_{c1})} \quad G_{c2}(s) = \frac{Kc_2(s + z_{c2})(s + z_{c22})}{s}, G_{f2}(s) = \frac{z_{c2}}{(s + z_{c2})}$$

การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางเดินราก

ในการออกแบบตัวควบคุมนั้นจะต้องทำการกำหนดผลตอบสนองของสภาวะชั่วคราวและที่สภาวะคงตัว [1] ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 1) คุณลักษณะของผลตอบสนองชั่วคราวอธิบายได้ในรูปของค่าพุ่งเกิน (Percent Overshoot P.O.)
- 2) คุณลักษณะของผลตอบสนองที่สภาวะคงตัวอธิบายได้ในรูปของค่าเวลาเข้าที่ (Settling time t_s)

วิธีการในการออกแบบเพื่อให้ได้ผลตอบสนองชั่วคราวและผลตอบสนองที่สภาวะคงตัวตามที่ต้องการสามารถทำได้ตามขั้นตอนต่อไปนี้

ขั้นที่ 1. ทำการหาอัตราการหน่วง (damping ratio: ζ), ความถี่ธรรมชาติ (undamped natural frequency: ω_n) และหาจุด s_d โดยพิจารณาจากคุณลักษณะที่สภาวะคงตัวและสภาวะอยู่ตัวที่ต้องการจากการ (5)

$$P.O. = 100 * e^{\zeta\pi / \sqrt{1-\zeta^2}} \%, \quad t_s^{(\pm 2\%)} = 4 / \zeta\omega_n, \quad s_d = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \quad (5)$$

ขั้นที่ 2. หาผลรวมของมุมที่จุด s_d ของระบบแบบรูปเปิด $G_c(s)G_p(s)$ ด้วยวิธีทางกราฟิกหรือการคำนวณ เมื่อนั้นพิจารณามุมที่จำเป็นของ $\angle(s_d + z_c)$ เพื่อที่จะทำให้ผลรวมของมุมเป็นไปตามเงื่อนไข (6)

$$\sum(\theta_z + \theta_{zc}) + \sum\theta_p = -(2k+1)\pi, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

ขั้นที่ 3. หาอัตราขยาย K_c ของตัวควบคุมจากเงื่อนไขขนาดของวิธีการรูทไลต์ส

$$K_c = K_{sd} = \frac{1}{|G(s_d)H(s_d)|} \quad (7)$$

ขั้นที่ 4. แทนพารามิเตอร์ทุกตัวในสมการของตัวควบคุม

ขั้นที่ 5. วาดทางเดินรากของ $G_c(s)G_p(s)$ เพื่อให้แน่ใจว่าทางเดินรากเดินผ่านจุด s_d ที่กำหนด
 ขั้นที่ 6. เพื่อให้ผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดสามารถได้ผลตอบสนองตามที่ต้องการ ทำการเพิ่มตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้า ในสมการ (8) ดังแสดงในรูปของโครงสร้างระบบควบคุม 2(a) และ 2(b)

$$G_f(s) = \frac{z_c}{(s + z_c)} \tag{8}$$

ผลการทดลอง

ในส่วนนี้จะแสดงให้เห็นถึงวิธีการในการออกแบบตัวควบคุม 2-DOF ด้วยวิธีทางเดินรากสำหรับกรณีเฟสต่ำสุดและเฟสไม่ต่ำสุด โดยจะทำการเปรียบเทียบผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดสำหรับตัวควบคุมแบบ 1-DOF และ 2-DOF ที่ออกแบบด้วยวิธีทางเดินราก

กรณีเฟสต่ำสุด

ในกรณีเฟสต่ำสุดนี้จะใช้ $G_{-11}(s)$ และ $G_{-22}(s)$ ในการออกแบบตัวควบคุม โดยในการออกแบบนั้นจะทำการกำหนดคุณลักษณะของระบบตามที่ต้องการให้เหมือนกันคือ

$$P.O. \leq 5\%, t_s^{(\pm 2\%)} \leq 30 \text{ sec}, e_{ss}(t) = 0$$

จากคุณลักษณะที่ต้องการจะได้ $\zeta = 0.690106, \omega_n = 0.204576, s_d = -0.133333 \pm j0.148053$

วงรอบเอาต์พุต 1
$$G_{-11} = \frac{2.6}{(62s + 1)}$$

จากการออกแบบตามขั้นตอนที่กล่าวมา จะได้มุม θ_{zc} , ตำแหน่งซีโร z_c อัตราขยาย K_c ดังนี้

$$\theta_{zc1} = 80.371726, z_{c1} = 0.158449, K_{c1} = 5.974358$$

ดังนั้นจะได้ตัวควบคุมและตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้าสำหรับวงรอบเอาต์พุต 1 ดังนี้

$$G_{c1}(s) = \frac{5.974358(s + 0.158449)}{s}, G_{f1} = \frac{0.158449}{(s + 0.158449)}$$

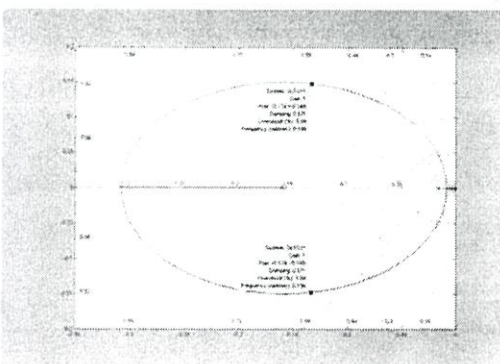
วงรอบเอาต์พุต 2
$$G_{-22} = \frac{2.8}{(90s + 1)}$$

จากการออกแบบตามขั้นตอนที่กล่าวมา จะได้มุม θ_{zc} , ตำแหน่งซีโร z_c อัตราขยาย K_c ดังนี้

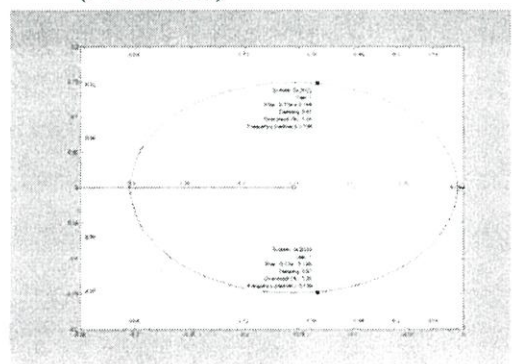
$$\theta_{zc2} = 81.54597, z_{c2} = 0.155338, K_{c2} = 8.214285$$

ดังนั้นจะได้ตัวควบคุมและตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้าสำหรับวงรอบเอาต์พุต 2 ดังนี้

$$G_{c2}(s) = \frac{8.214285(s + 0.155338)}{s}, G_{f2} = \frac{0.155338}{(s + 0.155338)}$$

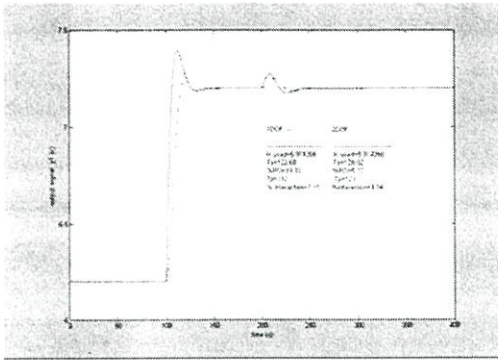


(a)

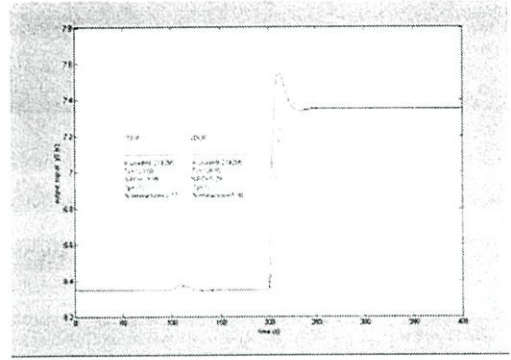


(b)

รูปที่ 3. ทางเดินรากของระบบที่ออกแบบสำหรับวงรอบเอาต์พุต 1 (a) และวงรอบเอาต์พุต 2 (b)



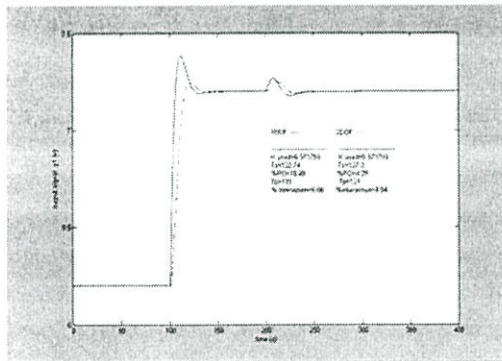
(a)



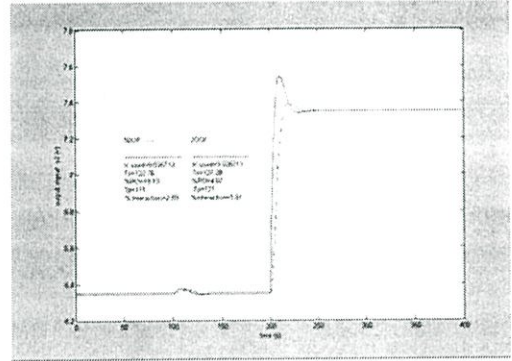
(b)

รูปที่ 4. เปรียบเทียบผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดของระบบควบคุมแบบ 1-DOF และ 2-DOF

ผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดในรูป4.(a) คือสำหรับถึง1 และรูป4.(b) คือสำหรับถึง2 ตามลำดับ จากทั้งสองรูปแสดงให้เห็นว่าค่าเวลาเข้าที่ของระบบควบคุมแบบ1-DOFและ2-DOFสามารถได้ตามที่ต้องการ แต่ค่าพุงเกินของระบบควบคุมแบบ1-DOFจะมากกว่าระบบควบคุมแบบ2-DOF สังเกตเห็นได้ว่าค่าพุงเกินของระบบควบคุมแบบ2-DOFจะมากกว่าที่ออกแบบไว้ซึ่งเป็นผลมาจากการรบกวนกันระหว่างวงรอบควบคุม ดังนั้นถ้าเราต้องการให้ระบบมีค่าพุงเกินตามข้อกำหนด สามารถทำได้โดยปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุม ซึ่งในกรณีนี้จะทำการเพิ่มค่าอัตราขยายของตัวควบคุมทั้งสองเพิ่มขึ้น10% แสดงได้ดังรูปที่5. จากผลของการปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมเพิ่มขึ้นจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองสำหรับถึง1 และถึง2สามารถได้ตามข้อกำหนดที่ต้องการ



(a)



(b)

รูปที่ 5. เปรียบเทียบผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดของระบบควบคุมแบบ 1-DOF และ 2-DOF เมื่อเพิ่มอัตราขยาย ของตัวควบคุมขึ้น 10%

กรณีเฟสไม่ต่ำสุด

ในกรณีเฟสต่ำสุดนี้จะใช้ $G_{-12}(s)$ และ $G_{-21}(s)$ ในการออกแบบตัวควบคุม โดยในการออกแบบนั้นจะทำการกำหนดคุณลักษณะของวงรอบเอาต์พุต1 และของวงรอบเอาต์พุต2 คือ

$$P.O. \leq 5\%, ts(\pm 2\%) \leq 400\text{sec}, e_{ss}(t) = 0 \qquad P.O. \leq 5\%, ts(\pm 2\%) \leq 500\text{sec}, e_{ss}(t) = 0$$

จากคุณลักษณะที่ต้องการจะได้

$$\zeta = 0.690106, \omega_n = 0.015342, s_d = -0.01 \pm j0.011104$$

$$\zeta = 0.690106, \omega_n = 0.012274, s_d = -0.008 \pm j0.008883$$

สำหรับวงรอบเอาต์พุต 1 และ วงรอบเอาต์พุต 2 ตามลำดับ

วงรอบเอาท์พุต 1
$$G_{s12} = \frac{2.48}{(3150s^2 + 113s + 1)}$$

จากการออกแบบตามขั้นตอนที่กล่าวมา จะได้มุม θ_{zc} , ตำแหน่งซีโริ z_c อัตราขยาย K_c ดังนี้

$$\theta_{zc2} = 16.855605, z_{c21} = 0.021, z_{c22} = 0.046649, K_{c2} = 5.952316$$

ดังนั้นจะได้ตัวควบคุมและตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้าสำหรับวงรอบเอาท์พุต 1 ดังนี้

$$G_{c2}(s) = \frac{5.952316(s + 0.021)(s + 0.046649)}{s}, G_{f2} = \frac{0.046649}{(s + 0.046649)}$$

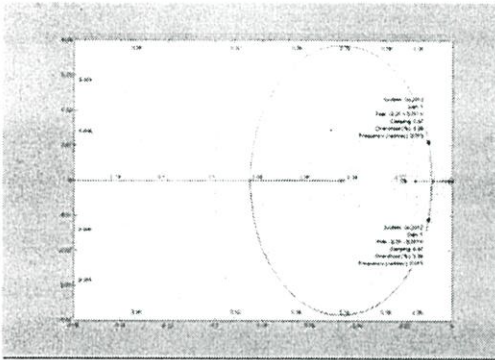
วงรอบเอาท์พุต 2
$$G_{s21} = \frac{3.28}{(4823s^2 + 144s + 1)}$$

จากการออกแบบตามขั้นตอนที่กล่าวมา จะได้มุม θ_{zc} , ตำแหน่งซีโริ z_c อัตราขยาย K_c ดังนี้

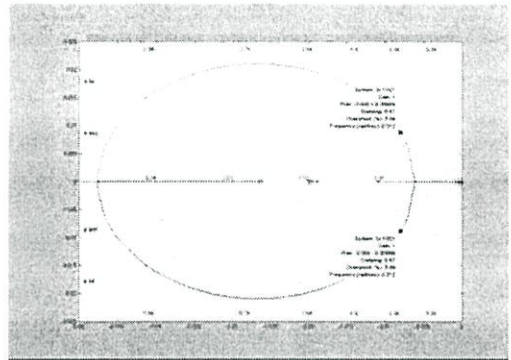
$$\theta_{zc1} = 25.855185, z_{c11} = 0.019867, z_{c12} = 0.02633, K_{c1} = 7.658375$$

ดังนั้นจะได้ตัวควบคุมและตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้าสำหรับวงรอบเอาท์พุต 2 ดังนี้

$$G_{c2}(s) = \frac{7.658375(s + 0.19867)(s + 0.02633)}{s}, G_{f2} = \frac{0.02633}{(s + 0.02633)}$$

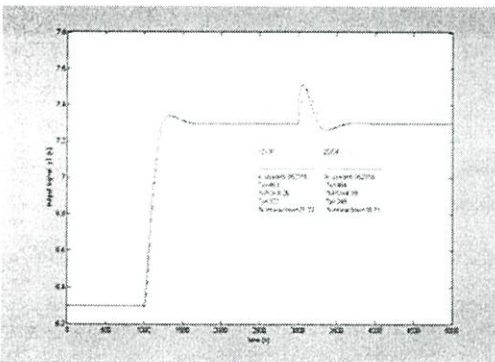


(a)

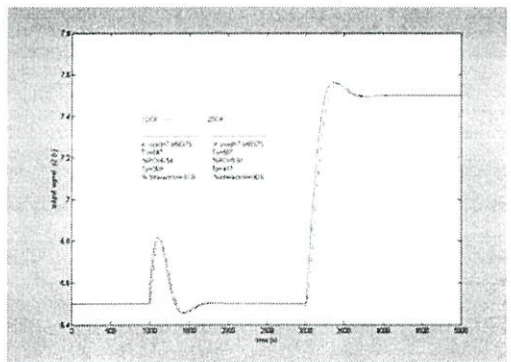


(b)

รูปที่ 6. ทางเดินรากของระบบที่ออกแบบสำหรับวงรอบเอาท์พุต 1 (a) และวงรอบเอาท์พุต 2 (b)



(a)

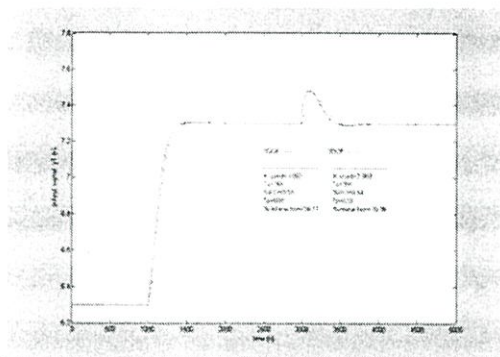


(b)

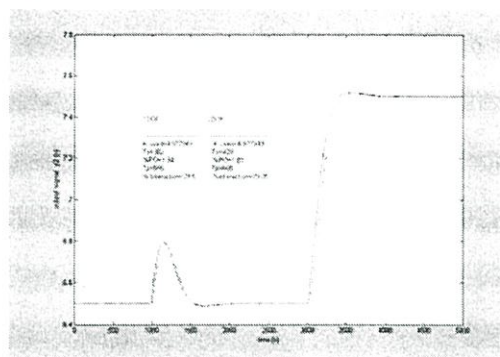
รูปที่ 7. เปรียบเทียบผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดของระบบควบคุมแบบ 1-DOF และ 2-DOF

ผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดในรูป 7.(a) คือสำหรับถึง 1 และรูป 7.(b) คือสำหรับถึง 2 ตามลำดับ จากทั้งสองรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าค่าเวลาเข้าที่ของระบบควบคุมแบบ 1-DOF และ 2-DOF นั้นไม่สามารถได้ตามที่ต้องการและสำหรับค่าพุงเกินของถึง 1 นั้นจะได้ตามที่ต้องการคือไม่เกิน 5% แต่ถึง 2 นั้นจะเกิน 5% ซึ่งเป็นผลมาจากการรบกวนกันระหว่างวงรอบควบคุม ดังนั้นถ้าเราต้องการให้ระบบนั้นสามารถได้ค่าเวลาเข้าที่และค่าพุงเกินตามที่ต้องการ สามารถทำได้โดยการปรับอัตราขยายของตัวควบคุมซึ่งในกรณีนี้จะปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุม

ทั้งสองลดลงมา 35% แสดงได้ดังรูปที่ 8. ซึ่งจากผลของการปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมลดลงจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองสำหรับถึง 1 และถึง 2 สามารถได้ตามข้อกำหนดที่ต้องการ



(a)



(b)

รูปที่ 8. เปรียบเทียบผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดของระบบควบคุมแบบ 1-DOF และ 2-DOF เมื่อลดอัตราขยายของตัวควบคุม 35 %

สรุป

บทความนี้ได้เสนอวิธีการออกแบบระบบควบคุมแบบ 2-DOF ด้วยวิธีทางเดินรากสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง ซึ่งจากผลการทดลองโดยทำการเปรียบเทียบผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดของระบบควบคุมแบบ 1-DOF และ 2-DOF ในกรณีเฟสต่ำสุดและเฟสไม่ต่ำสุดพบว่า ระบบควบคุมแบบ 2-DOF นั้นจะไม่สามารถให้ผลตอบสนองตามที่ต้องการในการออกแบบครั้งแรกได้ เนื่องจากผลจากการรบกวนกันระหว่างวงรอบควบคุม ต้องมีการปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมเพื่อให้ได้ผลตอบสนองตามข้อกำหนดที่ต้องการ ซึ่งในกรณีเฟสต่ำสุด ระบบควบคุมแบบ 2-DOF นั้นจะปรับเพิ่มค่าอัตราขยายของตัวควบคุมเพียงเล็กน้อยเพื่อให้ได้ผลตอบสนองของระบบตามข้อกำหนดที่ต้องการ ต่างจากระบบควบคุมแบบ 1-DOF ที่ต้องปรับเพิ่มค่าอัตราขยายของตัวควบคุมมาก และในกรณีเฟสไม่ต่ำสุดนั้นระบบควบคุมแบบ 1-DOF และ 2-DOF นั้นทำการปรับลดค่าอัตราขยายของระบบควบคุมเท่ากัน ก็จะได้ผลตอบสนองของระบบตามข้อกำหนดที่ต้องการ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Numsomran A., "2-DOF Control System Designed By Root Locus Technique", Proceeding of the 15th KACC control, Korea. October 2000
- [2] K.H. Johansson, "The Quadruple-tank process a multivariable with an adjust zero", *IEEE Trans Control Syst. Technol.*, (3), 2000, pp. 456-465
- [3] E. Bristol, "On a new measure of interaction for multivariable process control", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 11:133 1966
- [4] M. Morari and E. Zafiriou, *Robust Process Control*, Prentice-Hall, Eaglewood cliffs, NJ, 1989

ประวัติผู้เขียน

นาย เทียนชัย สุขศรี เกิดเมื่อวันที่ 16 กรกฎาคม พ.ศ. 2521 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษา ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนคริสต์ธรรมศึกษาจังหวัดกรุงเทพมหานคร ในปี พ.ศ. 2536 สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขาวิชาช่างอิเล็กทรอนิกส์ จากโรงเรียนเทคโนโลยีช่างอุตสาหกรรมกรุงเทพในปี พ.ศ. 2539 ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ ชั้นสูง (ปวส.) สาขาวิชาเทคนิคคอมพิวเตอร์ จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพในปี พ.ศ. 2541 จากนั้นได้เข้าศึกษาในระดับปริญญาตรีที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม (เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง) ในปี พ.ศ. 2543 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทที่คณะบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม ปีการศึกษา 2543