

การออกแบบตัวควบคุมแบบดีคัปปลิงสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง  
โดยวิธีกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ

DESIGN OF DECOUPLED CONTROLLER FOR QUADRUPLE-TANK  
PROCESS USING CHARACTERISTIC RATIO ASSIGNMENT

ธีรชัย วงศ์คำ

THEERACHAI WONGKHAM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-EN-M-060-004

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

**การออกแบบตัวควบคุมแบบดีคัปปลิงสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง  
โดยวิธีกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ**

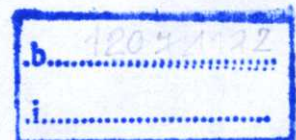
**DESIGN OF DECOUPLED CONTROLLER FOR QUADRUPLE-TANK  
PROCESS USING CHARACTERISTIC RATIO ASSIGNMENT**



ธีรชัย วงศ์คำ

**THEERACHAI WONGKHUM**

วพ.  
ค 6220  
0552  
เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....**95057**  
วัน,เดือน,ปี.....**20 พ.ค. 2552**



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2552

KMITL-2009-EN-M-060-004

**DESIGN OF DECOUPLED CONTROLLER FOR QUADRUPLE-TANK  
PROCESS USING CHARACTERISTIC RATIO ASSIGNMENT**

**THEERACHAI WONGKHUM**

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

**2009**

**KMITL-2009-EN-M-060-004**

**COPYRIGHT 2009**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**คณะวิศวกรรมศาสตร์**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

---

**หัวข้อวิทยานิพนธ์** การออกแบบตัวควบคุมแบบดีคัปปลิงสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง โดยวิธีกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ

**Thesis Title** Design of Decoupled Controller for Quadruple – Tank Process using Characteristic Ratio Assignment

**นักศึกษา** นายธีรชัย วงศ์คำ

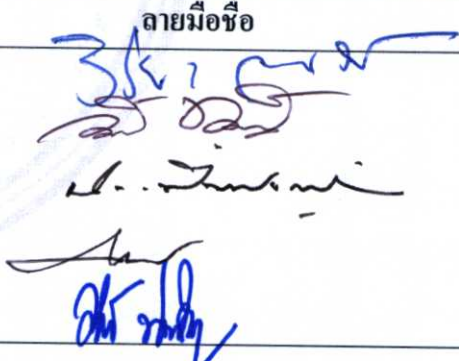
**รหัสประจำตัว** 48060856

**ปริญญา** วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

**สาขาวิชา** วิศวกรรมการวัดคุม

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์** รศ.อาจินต์ น่วมสำราญ

**หมายเลขวิทยานิพนธ์** KMITL-2009-EN-M-060-004

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.วิริยะ	กองรัตน์	
รศ.ดร.วิทยา	ทิพย์สุวรรณพร	
รศ.ดร.ประเสริฐ	ปิ่นปฐมรัฐ	
รศ.สุพรรณ	กุลพานิชย์	
รศ.อาจินต์	น่วมสำราญ	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 17 ธันวาคม พ.ศ. 2551 เวลา 09.00-11.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 17 ธันวาคม พ.ศ. 2551

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบตัวควบคุมแบบค้ำปลึงสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงโดยวิธีกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ
นักศึกษา	นายธีรัชย์ วงศ์คำ
รหัสนักศึกษา	48060856
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2551
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.อาจินต์ น่วมสำราญ

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้กล่าวเกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง โดยใช้วิธีการกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ ซึ่งเป็นวิธีการการออกแบบตัวควบคุมโดยใช้เทคนิคการวางโพลรูปแบบหนึ่งที่อยู่บนพื้นฐานการกำหนดพารามิเตอร์ของสมการคุณลักษณะ เทคนิคดังกล่าวนี้สามารถปรับความเร็วของผลตอบสนองและอัตราการหน่วงโดยพารามิเตอร์เพียงตัวเดียว ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเทคนิคการกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ มาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระดับน้ำ 4 ถึง โดยมีโครงสร้างของตัวควบคุมในลักษณะตัวควบคุมแบบแยกอิสระโดยชุดค้ำปลึงเพื่อช่วยให้สามารถแยกระบบของกระบวนการระดับน้ำแบบ 4 ถึง ให้เป็นระบบแบบ SISO ขึ้นมาสองกระบวนการและช่วยลดผลกระทบของการอินเตอร์แอคชั่นระหว่างวงรอบควบคุมของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง ผลการทดลองสามารถพิสูจน์ได้โดยการจำลองการทำงานจากโปรแกรม MATLAB เปรียบเทียบกับการทดลองควบคุมกระบวนการจริง พบว่าการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ สามารถควบคุมระดับน้ำของกระบวนการให้มีผลตอบสนองได้ตามที่ต้องการและไม่มีค่าผิดพลาดที่สภาวะตัว

<b>Thesis Title</b>	Design of Decoupled Controller for Quadruple-Tank Process using Characteristic Ratio Assignment
<b>Student</b>	Mr. Theerachai Wongkhum
<b>Student ID.</b>	48060856
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Instrumentation Engineering
<b>Year</b>	2008
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Arjin Numsomran

### **ABSTRACT**

This thesis presents a controller design for Quadruple-tank based on the characteristic ratio assignment (CRA). CRA is a design technique of pole placement based on defining parameter of characteristic equation. This technique is able to adjust speed of response time and damping ratios by means of only one parameter. By using the decentralized CRA controller, interaction between each loop transfer function is eliminated by conventional decouple design method. The results obtained in this thesis verification are demonstrated by MATLAB simulation and real experiment, which that the CRA can be designed to meet both transient and steady-state response.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เพราะได้รับคำปรึกษาและความอนุเคราะห์จาก รศ.อาจินต์ น่วมสำราญ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นทั้งทางด้านทฤษฎีและปฏิบัติรวมถึงแนวทางการคิดริเริ่มในการทำวิจัย ตลอดจนการฝึกฝนให้ผู้เขียนมีความสามารถในการทำวิจัย รวมถึงการเอาใจใส่ดูแลอย่างสม่ำเสมอ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ได้ให้การสนับสนุนและคำปรึกษาในงานวิจัยจนสำเร็จตามวัตถุประสงค์

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. วิทยา ทิพย์สุวรรณพร ที่ให้คำแนะนำและสอบถามความคืบหน้าของการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีเสมอมา

ขอกราบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณพี่จตุรรัตน์ ชาวไร่เงิน พี่เทียนชัย สุขศรี พี่อำนาจ มีมงคล คุณไมตรี ธรรมมา คุณสันติ ถึงศรีปิ่น และคุณยศวดีพร วงศ์สิทธิ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา กำลังใจ และคำแนะนำดี ๆ เสมอมาและขอขอบคุณน้องๆ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมทุกคนที่เป็นกำลังใจ

และท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้าน ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ธีรชัย วงศ์คำ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	VI
สารบัญรูป .....	VII
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา .....	2
บทที่ 2 กระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง.....	4
2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	5
2.2 สภาพคงตัวของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง .....	7
2.3 คุณลักษณะของกระบวนการ .....	7
2.4 ซีโรของกระบวนการ MIMO .....	8
2.3 บทสรุป.....	9
บทที่ 3 วิธีการกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะและการดีคัปลิ่ง .....	10
3.1 วิธีกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ .....	10
3.2 การออกแบบดีคัปลิ่ง.....	26
3.3 บทสรุป.....	29
บทที่ 4 การออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงโดยวิธีอัตราส่วนคุณลักษณะ .....	30
4.1 โครงสร้างของระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบแยกอิสระ .....	30
4.2 โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง .....	31
4.3 การออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ CRA.....	35

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4 การออกแบบตัวควบคุมแบบดีคัมปลิงสำหรับกระบวนการระดับ 4 ถึงโดยวิธี CRA.....	36
4.5 การลดรูปอันดับของสมการ โพลีโนเมียลของฟังก์ชันถ่ายโอน.....	41
4.6 บทสรุป.....	44
<b>บทที่ 5 การจำลองและการทดลองระบบควบคุม.....</b>	<b>45</b>
5.1 โครงสร้างระบบควบคุมของกระบวนการระดับ 4 ถึง.....	45
5.2 พารามิเตอร์และจุดการทำงานของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง.....	46
5.3 กระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงแบบดีคัมปลิงกรณีเฟสไม่ต่ำสุด.....	50
5.4 กระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงแบบอินเวอร์สดีคัมปลิงกรณีเฟสไม่ต่ำสุด.....	68
<b>บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>86</b>
6.1 บทสรุป.....	86
6.2 ปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางในการแก้ไขปัญหา.....	87
6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางพัฒนา.....	88
<b>บรรณานุกรม.....</b>	<b>89</b>
<b>ภาคผนวก.....</b>	<b>91</b>
ภาคผนวก ก. ....	92
ภาคผนวก ข. ....	103
ภาคผนวก ค. ....	111
<b>ประวัติผู้เขียน.....</b>	<b>119</b>

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 พารามิเตอร์ของกระบวนการ.....	46
5.2 จุดการทำงานของกระบวนการในกรณีเฟสต่ำสุด ( $P_-$ ) และเฟสไม่ต่ำสุด ( $P_+$ ) .....	47
5.3 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมในกรณีเฟสต่ำสุด .....	53
5.4 สมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองในกรณีเฟสต่ำสุด .....	55
5.5 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ตัวควบคุมแบบพีไอเมื่อค่า $k$ เปลี่ยนแปลงไปเมื่อ เมื่อต้องการเปลี่ยนแปลงค่าเวลาเข้าที่ของผลตอบสนองของระบบควบคุม.....	55
5.6 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า $k$ เปลี่ยนแปลงไป .....	57
5.7 ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอเมื่อปรับค่า $k$ เมื่อต้องการปรับอัตราการหน่วง ของผลตอบสนองของระบบควบคุม .....	57
5.8 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า $k$ เปลี่ยนแปลงไป.....	59
5.9 ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีทางเดินรากและวิธี CRA.....	59
5.10 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันไดระหว่าง พารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยวิธีทางเดินรากและวิธี CRA.....	61
5.11 สมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองในกรณีเฟสต่ำสุด .....	63
5.12 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า $k$ เปลี่ยนแปลงไป.....	65
5.13 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า $k$ เปลี่ยนแปลงไป.....	66
5.14 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันไดระหว่าง พารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยวิธีทางเดินรากและวิธี CRA .....	68
5.15 พารามิเตอร์ของระบบควบคุมกรณีเฟสไม่ต่ำสุด .....	71
5.16 สมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด .....	73
5.17 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ตัวควบคุมแบบพีไอเมื่อค่า $k$ เปลี่ยนแปลงไปเมื่อ เมื่อต้องการเปลี่ยนแปลงค่าเวลาเข้าที่ของผลตอบสนองของระบบควบคุม.....	74
5.18 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า $k$ เปลี่ยนแปลงไป.....	75
5.19 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ตัวควบคุมแบบพีไอเมื่อค่า $k$ เปลี่ยนแปลงไปเมื่อ เมื่อต้องการเปลี่ยนแปลงอัตราการหน่วงของผลตอบสนองของระบบควบคุม.....	76
5.20 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า $k$ เปลี่ยนแปลงไป.....	77
5.21 สมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด .....	79
5.22 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า $k$ เปลี่ยนแปลงไป.....	82
5.23 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า $k$ เปลี่ยนแปลงไป.....	84

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แบบจำลองกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง.....	4
3.1 โครงสร้างโดยทั่วไปของระบบควบคุม.....	12
3.2 โครงสร้างมาตรฐานของระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี CRA.....	12
3.3 ผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับความเร็ว ผลตอบสนองของระบบควบคุม โดยการปรับค่า $k$ .....	21
3.4 ตำแหน่งโพลวงปิดของระบบควบคุมเมื่อปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุม โดยการปรับค่า $k$ .....	22
3.5 ผลตอบสนองทางความถี่ของระบบควบคุมเมื่อปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุม โดยการปรับค่า $k$ .....	22
3.6 ผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับอัตราการหน่วงผลตอบสนองของระบบควบคุม โดยการปรับค่า $k$ .....	25
3.7 ตำแหน่งโพลวงปิดของระบบควบคุมเมื่อปรับอัตราการหน่วงผลตอบสนองของระบบควบคุม โดยการปรับค่า $k$ .....	25
3.8 ผลตอบสนองทางความถี่ของระบบควบคุมเมื่อปรับอัตราการหน่วงผลตอบสนองของระบบ ควบคุมโดยการปรับค่า $k$ .....	26
3.9 โครงสร้างของกระบวนการแบบ TITO.....	27
3.10 โครงสร้างของระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับ 4 ถึงที่ประกอบด้วยชุด ดีคัปปลิง.....	28
3.11 โครงสร้างของระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับ 4 ถึงที่ประกอบด้วยชุด อินเวอร์สดีคัปปลิง.....	29
4.1 โครงสร้างของระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบอิสระ .....	30
4.2 บล็อกไดอะแกรมสำหรับกระบวนการระดับแบบ 4 ถึง .....	32
4.3 โครงสร้างของกระบวนการระดับน้ำแบบ 4 ถึงที่ประกอบด้วยชุดดีคัปปลิงที่ใช้ใน กรณีเฟสต่ำสุด .....	33
4.4 โครงสร้างของกระบวนการระดับน้ำแบบ 4 ถึงที่ประกอบด้วยชุดดีคัปปลิงที่ใช้ใน กรณีเฟสไม่ต่ำสุด.....	34
4.5 โครงสร้างมาตรฐานของระบบควบคุมที่ออกแบบโดยวิธี CRA.....	35
4.6 โครงสร้างมาตรฐานของระบบควบคุมของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง โดยใช้ตัวควบคุมแบบ CRA สำหรับกรณีเฟสต่ำสุด .....	36

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 โครงสร้างมาตรฐานของระบบควบคุมของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง โดยใช้ตัวควบคุมแบบ CRA สำหรับกรณีเฟสไม่ต่ำสุด.....	37
4.8 แสดงตำแหน่งโพล-ซีโรของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน $G_1(s)$ และ $G_2(s)$ .....	42
4.9 เปรียบเทียบผลตอบสนองแบบขั้นบันไดระหว่าง $G_1(s)$ และ $G_{n1}(s)$ .....	43
4.10 เปรียบเทียบผลตอบสนองแบบขั้นบันไดระหว่าง $G_2(s)$ และ $G_{n2}(s)$ .....	43
5.1 โครงสร้างของระบบควบคุมของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง.....	45
5.2 เปรียบเทียบผลตอบสนองวงเปิดของกระบวนการกับแบบจำลองในกรณีเฟสต่ำสุด .....	49
5.3 เปรียบเทียบผลตอบสนองวงเปิดของกระบวนการกับแบบจำลองในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด.....	50
5.4 แสดงตำแหน่งโพล-ซีโรของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน $G_1(s)$ และ $G_2(s)$ .....	51
5.5 เปรียบเทียบผลตอบสนองแบบขั้นบันไดระหว่าง $G_1(s)$ และ $G_{n1}(s)$ .....	52
5.6 เปรียบเทียบผลตอบสนองแบบขั้นบันไดระหว่าง $G_2(s)$ และ $G_{n2}(s)$ .....	52
5.7 โปรแกรม Simulink ที่ใช้จำลองการทำงานของระบบควบคุม .....	53
5.8 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองกระบวนการ .....	54
5.9 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันไดในกรณีเฟสต่ำ.....	54
5.10 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับความเร็ว ผลตอบสนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า $k$ .....	56
5.11 สัญญาณควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับความเร็วผลตอบสนองของ ระบบควบคุมโดยการปรับค่า $k$ .....	56
5.12 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับอัตราการ หน่วงผลตอบสนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า $k$ .....	58
5.13 สัญญาณควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับอัตราการหน่วงผลตอบ สนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า $k$ .....	58
5.14 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณ ขั้นบันไดระหว่างพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยทางเดินรากและวิธี CRA .....	60
5.15 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณ ขั้นบันไดระหว่างพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยทางเดินรากและวิธี CRA .....	60
5.16 รูปชุดทดลองกระบวนการระดับน้ำแบบ 4 ถัง.....	61
5.17 รูปโปรแกรม Simulink ที่ใช้ทดลองการทำงานของระบบควบคุม .....	62
5.18 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อป้อนอินพุตขั้นบันได.....	63

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.19	สัญญาควบคุมของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อป้อนอินพุทขั้นบันได..... 63
5.20	ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาขั้นบันไดเมื่อปรับ ความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า $k$ ..... 64
5.21	สัญญาควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาขั้นบันไดเมื่อปรับความเร็วผลตอบสนองของ ระบบควบคุมโดยการปรับค่า $k$ ..... 64
5.22	ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาขั้นบันไดเมื่อปรับอัตราการ หน่วงผลตอบสนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า $k$ ..... 65
5.23	สัญญาควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาขั้นบันไดเมื่อปรับอัตราการหน่วงผลตอบ สนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า $k$ ..... 66
5.24	แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญา ขั้นบันไดระหว่างพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยทางเดินรากและวิธี CRA ..... 67
5.25	แสดงการเปรียบเทียบสัญญาควบคุมของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญา ขั้นบันไดระหว่างพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยทางเดินรากและวิธี CRA ..... 67
5.26	แสดงตำแหน่งโพล-ซีโรของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน $G_1(s)$ และ $G_2(s)$ กรณีเฟสไม่ต่ำสุด ..... 69
5.27	เปรียบเทียบผลตอบสนองแบบขั้นบันไดระหว่าง $G_1(s)$ และ $G_{n1}(s)$ ..... 70
5.28	เปรียบเทียบผลตอบสนองแบบขั้นบันไดระหว่าง $G_2(s)$ และ $G_{n2}(s)$ ..... 70
5.29	ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองกระบวนการ ..... 72
5.30	สัญญาควบคุมของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อป้อนอินพุทขั้นบันไดกรณีเฟส ไม่ต่ำสุด..... 72
5.31	ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาขั้นบันไดเมื่อปรับ ความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า $k$ ..... 72
5.32	สัญญาควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาขั้นบันไดเมื่อปรับความเร็วผลตอบสนองของ ระบบควบคุมโดยการปรับค่า $k$ ..... 74
5.33	ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาขั้นบันไดเมื่อปรับอัตราการ หน่วงผลตอบสนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า $k$ ..... 75
5.34	ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาขั้นบันไดเมื่อปรับอัตราการหน่วง ผลตอบสนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า $k$ ..... 76

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.35 สัญญาณควบคุมของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับอัตราการ หน้าต่างผลตอบสนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า $k$ .....	77
5.36 รูปโปรแกรม Simulink ที่ใช้ทดลองการทำงานของระบบควบคุม .....	78
5.37 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อป้อนอินพุทขั้นบันได .....	78
5.38 สัญญาณควบคุมของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อป้อนอินพุทขั้นบันได .....	79
5.39 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับ ความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า $k$ .....	80
5.40 สัญญาณควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับความเร็วผลตอบสนองของ ระบบควบคุมโดยการปรับค่า $k$ มีค่าเท่ากับ 1.0, 1.1 และ 1.2 ตามลำดับ .....	81
5.41 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับอัตราการ หน้าต่างผลตอบสนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า $k$ .....	82
5.42 สัญญาณควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับอัตราการหน้าต่างผลตอบ สนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า $k$ มีค่าเท่ากับ 1.0, 1.1 และ 1.2 ตามลำดับ .....	83
5.43 การเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุมระหว่างมีชุดคิ่บปลี่กับระบบ ที่ไม่มีชุดคิ่บปลี่ .....	84
5.44 การเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมของระบบควบคุมระหว่างมีชุดคิ่บปลี่กับระบบ ที่ไม่มีชุดคิ่บปลี่ .....	85

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในกระบวนการที่มีองค์ประกอบเอาต์พุตเพียงหนึ่งเอาต์พุตและมีองค์ประกอบของสัญญาณควบคุมเพียงหนึ่งตัวแปร กระบวนการนั้นจัดเป็นกระบวนการแบบหนึ่งอินพุต-หนึ่งเอาต์พุต(Single Input Single Output: SISO) และสำหรับกระบวนการใดๆ ที่มีมากกว่าหนึ่งอินพุตและหนึ่งเอาต์พุต สามารถจำแนกได้ว่าเป็นกระบวนการแบบหลายอินพุต-หลายเอาต์พุต(Multi Input Multi Output: MIMO) หรือกระบวนการแบบหลายตัวแปร(Multivariable Process) ซึ่งพบมากในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อาทิ โรงไฟฟ้า หรือในโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมี [1,2] เป็นต้น ระบบควบคุมสำหรับกระบวนการเหล่านี้มีความยุ่งยากซับซ้อนมากกว่ากระบวนการแบบ SISO เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวมีผลจากอินเทอร์แอคชันระหว่างองค์ประกอบอื่นๆ ของกระบวนการ อีกทั้งวิธีการควบคุมในรูปแบบของ SISO ยังไม่สามารถนำมาใช้กับระบบ MIMO ได้อย่างมีประสิทธิภาพเท่าที่ควร เนื่องจากไม่สามารถออกแบบให้ตัวควบคุมทำงานครอบคลุมได้ทั้งกระบวนการ วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการระดับนำ 4 ถึง ซึ่งมีลักษณะของกระบวนการเป็นแบบกระบวนการแบบ MIMO รูปแบบหนึ่งที่รู้จักกันในรูปแบบของกระบวนการแบบสองอินพุต-สองเอาต์พุต (Two Input Two Output: TITO) [3] สำหรับวิธีการนำเสนอเป็นวิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบแยกอิสระ(Decentralized) พร้อมหาคัดค้านปลิง (Decoupling) เพื่อช่วยให้สามารถแยกระบบของกระบวนการให้เป็นระบบ SISO สำหรับการออกแบบตัวควบคุมนั้นอาศัยหลักการการออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีการกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ (Characteristic Ratio Assignment: CRA)[4]

วิธีการกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะCRA เป็นวิธีการออกแบบตัวควบคุมทางพีชคณิตวิธีหนึ่งที่พัฒนาจากวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient Diagram Method: CDM)[5] ซึ่งการออกแบบนั้นอยู่บนพื้นฐานขนาดที่สัมพันธ์กันของค่าสัมประสิทธิ์สมการพหุนามคุณลักษณะ วัตถุประสงค์ในการออกแบบนั้นเพื่อต้องการสร้างสมการคุณลักษณะที่เหมาะสม วิธี CRA จะใช้สมการพหุนามแสดงแทนระบบ โดยเทอมเศษ (Numerator) และเทอมส่วน (Denominator) ของฟังก์ชันถ่ายโอนจะพิจารณาแยกกัน ในการออกแบบตัวควบคุมนั้นทำได้โดยการกำหนดสมการคุณลักษณะหรือสมการพหุนามคุณลักษณะที่ต้องการของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด โดยพิจารณาข้อกำหนดด้านสมรรถนะ (Performance Specification) ของระบบควบคุม และค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะที่ได้จากวิธี CRA จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะที่ได้จากตัวควบคุมและกระบวนการ เพื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาถึงโครงสร้างและคุณลักษณะของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง
2. เพื่อศึกษาถึงวิธีการออกแบบชุดคัตปลิ่งสำหรับไปออกแบบระบบควบคุมแบบกระจายส่วนสำหรับกระบวนการแบบ TITO
3. เพื่อศึกษาถึงวิธีการออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถังที่มีโครงสร้างแบบกระจายส่วน โดยวิธีคัตปลิ่งและออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีอัตราส่วนคุณลักษณะ CRA

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาโครงสร้างกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง และหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ
2. ออกแบบตัวควบคุมแบบคัตปลิ่งโดยวิธีกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ CRA เพื่อควบคุมกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง ในกรณีเฟสต่ำสุดและเฟสไม่ต่ำสุด
  - 2.1 ทำการทดสอบเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับความเร็วของระบบควบคุมโดยการปรับค่าพารามิเตอร์  $k$
  - 2.2 ทำการทดสอบเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับอัตราการหน่วงของระบบควบคุมโดยการปรับค่าพารามิเตอร์  $k$
3. ทำการทดสอบเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ได้จากการออกแบบตัวควบคุมโดยวิธี CRA และวิธีทางเดินราก Root Locus สำหรับกรณีเฟสต่ำสุด
4. ทำการทดสอบเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ได้จากการออกแบบตัวควบคุมแบบคัตปลิ่งและไม่มีชุดคัตปลิ่งโดยวิธี CRA สำหรับกรณีเฟสไม่ต่ำสุด
5. นำตัวควบคุมที่ได้ ออกแบบมาจำลองการทำงานของระบบควบคุมด้วยโปรแกรม MATLAB จากนั้นนำตัวควบคุมไปทดลองกับกระบวนการจริง

## 1.4 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 วัตถุประสงค์และทฤษฎีที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ ขอบเขตของการศึกษา และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบท

บทที่ 2 อธิบายถึงคุณลักษณะของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง, การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง และคุณลักษณะของกระบวนการ

บทที่ 3 อธิบายถึงทฤษฎีพื้นฐานของวิธี CRA และการออกแบบชุดดิสcretizing ที่ใช้สำหรับออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง

บทที่ 4 อธิบายถึงโครงสร้างระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบแยกอิสระ โครงสร้างของระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับ 4 ถังในกรณีเฟสต่ำสุดและเฟสไม่ต่ำสุด และการออกแบบตัวควบคุมแบบดิสcretizing โดยวิธี CRA และการออกแบบตัวควบคุมพีไอ ด้วยวิธี CRA สำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง

บทที่ 5 อธิบายถึงการนำตัวควบคุมแบบดิสcretizing ที่ได้ทำการออกแบบด้วยวิธี CRA ดังขั้นตอนที่กล่าวในบทที่ 4 มาจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB จากนั้นจึงนำตัวควบคุมไปทดลองกับกระบวนการจริง

บทที่ 6 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

และในส่วนสุดท้ายของวิทยานิพนธ์นี้เป็นภาคผนวกแสดงถึง รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ได้นำมาใช้ในการทดลอง, โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง, ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์และประวัติผู้เขียน

## 2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สมการทางคณิตศาสตร์สำหรับแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถังนี้ จะมีรายละเอียดที่คล้ายคลึงกันกับ [6] ซึ่งในแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษานี้จะเพิ่มวาล์ว  $\beta_i$  เข้าไปที่ ด้านออกของแต่ละถัง ซึ่งจะทำให้สามารถปรับพื้นที่หน้าตัดของรูน้ำด้านออกให้มีขนาดเท่าเดิมหรือเล็กลงจากเดิมได้ รูปแบบที่แสดงแทนกระบวนการแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 โดย  $\alpha_i$  คือวาล์วที่ใช้ในการปรับสัดส่วนการไหลของน้ำที่เข้าสู่แต่ละถัง ซึ่งในกรณีศึกษานี้จะกำหนดให้  $\alpha_3$  และ  $\alpha_4$  มีค่าเท่ากับ  $(1-\alpha_2)$  และ  $(1-\alpha_1)$  จากสมการสมดุลมวลและกฎของเบอร์นูลลี (Bernoulli's) จะได้สมการความแตกต่างดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{dh_1(t)}{dt} &= -\frac{\beta_1 a_1}{A_1} \sqrt{2gh_1(t)} + \frac{\beta_3 a_3}{A_1} \sqrt{2gh_3(t)} + \frac{\alpha_1 k_1}{A_1} u_1(t) \\ \frac{dh_2(t)}{dt} &= -\frac{\beta_2 a_2}{A_2} \sqrt{2gh_2(t)} + \frac{\beta_4 a_4}{A_2} \sqrt{2gh_4(t)} + \frac{\alpha_2 k_2}{A_2} u_2(t) \\ \frac{dh_3(t)}{dt} &= -\frac{\beta_3 a_3}{A_3} \sqrt{2gh_3(t)} + \frac{(1-\alpha_2) k_2}{A_3} u_2(t) \\ \frac{dh_4(t)}{dt} &= -\frac{\beta_4 a_4}{A_4} \sqrt{2gh_4(t)} + \frac{(1-\alpha_1) k_1}{A_4} u_1(t) \end{aligned} \quad (2.1)$$

โดย

$h_i(t)$	คือ ระดับน้ำในถัง $i$	$i = 1 \sim 4$	; cm
$a_i$	คือ พื้นที่หน้าตัดของรูน้ำด้านออกของถัง $i$	$i = 1 \sim 4$	; cm <sup>2</sup>
$A_i$	คือ พื้นที่หน้าตัดของถัง $i$	$i = 1 \sim 4$	; cm <sup>2</sup>
$\beta_i$	คือ ค่าตำแหน่งวาล์วที่ต่อด้านออกจากถัง $i$	$i = 1 \sim 4$	
$\alpha_i$	คือ ค่าตำแหน่งวาล์วที่ต่ออยู่กับปั๊ม $i$	$i = 1, 2$	
$k_i$	คือ ค่าอัตราขยายของปั๊ม $i$	$i = 1, 2$	; cm <sup>3</sup> /V*s
$g$	คือ แรงโน้มถ่วงของโลก		981 cm/s <sup>2</sup>
$u_i$	คือ แรงดันที่จ่ายให้กับปั๊ม $i$	$i = 1, 2$	; V

อัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้าถังที่ 1 จะเป็นสัดส่วนกับ  $\alpha_1 k_1 u_1$  และอัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้าถังที่ 4 จะเป็นสัดส่วนกับ  $(1-\alpha_1) k_1 u_1$  และในทำนองเดียวกันสำหรับถังที่ 2 และถังที่ 3 สัญญาณอินพุทหรือสัญญาณควบคุมที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการคือ  $u_1$  และ  $u_2$  (ค่าสัญญาณแรงดันที่จ่ายให้กับปั๊มน้ำ) และสัญญาณเอาต์พุทที่วัดจากกระบวนการคือ  $y_1$  และ  $y_2$  (ค่าสัญญาณแรงดันจากอุปกรณ์วัด) จะ

ถูกปรับให้เป็นสัดส่วนเดียวกันกับความสูงของระดับน้ำที่วัดได้ คือ  $y_1 = k_{m1}h_1$  และ  $y_2 = k_{m2}h_2$  โดย  $k_{m1} = k_{m2} = 1$

จากสมการ (2.1) สามารถทำให้เป็นแบบจำลองเชิงเส้นในรูปแบบของสมการสแตท-สเปซได้โดยกำหนดให้  $x_i = h_i - h_i^0$  และ  $u_i = u_i - u_i^0$

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

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

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-เอาต์พุตนั้นไม่มีซีโรซึ่งการพิจารณาแบบนี้เป็นการพิจารณาเพียงส่วนย่อยของระบบเท่านั้น โดยสำหรับกระบวนการแบบ MIMO นั้นการพิจารณาโพลและซีโรของกระบวนการทั้งหมด จะแตกต่างจากระบบ SISO ซึ่งวิธีในการหา นั้นจะได้กล่าวต่อไป

## 2.2 สภาวะคงตัวของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง

เมื่อพิจารณาในสภาวะคงตัว ( $h_i^0, u_i^0$ ) สมการอนุพันธ์ใน (2.1) จะสามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned}\frac{\beta_1 a_1}{A_1} \sqrt{2gh_1^0} &= \frac{\alpha_1 k_1}{A_1} u_1^0 + \frac{(1-\alpha_2) k_2}{A_1} u_2^0 \\ \frac{\beta_2 a_2}{A_2} \sqrt{2gh_2^0} &= \frac{(1-\alpha_1) k_1}{A_2} u_1^0 + \frac{\alpha_2 k_2}{A_2} u_2^0 \\ \frac{\beta_3 a_3}{A_3} \sqrt{2gh_3^0} &= \frac{(1-\alpha_2) k_2}{A_3} u_2^0 \\ \frac{\beta_4 a_4}{A_4} \sqrt{2gh_4^0} &= \frac{(1-\alpha_1) k_1}{A_4} u_1^0\end{aligned}\tag{2.6}$$

โดย

$h_i^0$  คือ ระดับน้ำในถัง  $i$  ที่สภาวะคงตัว  $i = 1 \sim 4$  ; cm

$u_i^0$  คือ แรงดันที่จ่ายให้กับปั๊ม  $i$  ที่สภาวะคงตัว  $i = 1, 2$  ; V

สมการที่ (2.6) นี้เป็นสมการที่ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการ ณ จุดการทำงานต่าง ๆ และค่าพารามิเตอร์ที่ได้นั้นจะได้นำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการต่อไป

## 2.3 คุณลักษณะของกระบวนการ

ในการพิจารณาถึงคุณลักษณะหรือคุณสมบัติพื้นฐานของกระบวนการแบบ MIMO นั้น โดยส่วนใหญ่แล้วจะทำการพิจารณาถึงซีโรของกระบวนการ, การวัดการอินเตอร์แอคชันและความไวของกระบวนการ [6] โดยคุณลักษณะของสิ่งเหล่านี้สามารถอธิบายได้ดังนี้

- ซีโรของกระบวนการจะประกอบด้วยตำแหน่งและทิศทางโดยตำแหน่งและทิศทางของ ซีโรนั้น จะเป็นสิ่งที่อธิบายเกี่ยวกับขีดจำกัดทางด้านผลตอบสนองของระบบควบคุมและผลกระทบต่อเอาต์พุตของระบบควบคุมตามลำดับ

- การวัดการอินเตอร์แอคชันหรือการวัดผลกระทบ ที่เกิดขึ้นระหว่างวงรอบควบคุมหรือวงรอบเอาต์พุตจะเป็นสิ่งที่บอกถึงความยากหรือง่ายในการควบคุมกระบวนการ และจับคู่อินพุต-เอาต์พุตของระบบควบคุมที่เหมาะสมในการควบคุม
- ความไวของกระบวนการ จะเป็นสิ่งที่บอกถึงความยากหรือง่ายในการควบคุมกระบวนการซึ่งขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการ  
คุณสมบัติเหล่านี้จะบอกถึงคุณสมบัติ ข้อจำกัดและความยากหรือง่ายในการควบคุมกระบวนการ สำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง

## 2.4 ซีโรของกระบวนการ MIMO

การหาตำแหน่งและทิศทางซีโรสำหรับกระบวนการแบบหลายอินพุต-เอาต์พุต MIMO นั้นเป็นสิ่งสำคัญมาก เนื่องจากซีโรของกระบวนการนั้นสามารถเกิดขึ้นได้แม้ว่าฟังก์ชันถ่ายโอนย่อยของกระบวนการแต่ละอินพุต-เอาต์พุตไม่มีซีโรอยู่เลยก็ตาม กระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงก็เป็นกระบวนการหนึ่งที่ฟังก์ชันถ่ายโอนย่อยในแต่ละอินพุต-เอาต์พุตไม่มีซีโร แต่เมื่อวิเคราะห์ทั้งระบบแล้วนั้นจะพบว่ากระบวนการนี้มีซีโรซ่อนอยู่ ซึ่งซีโรของกระบวนการสามารถอยู่ได้ทั้งด้านซ้ายหรือด้านขวาของระนาบ  $s$  ก็ได้โดยการปรับตำแหน่งขั้ว  $\alpha_1$  และ  $\alpha_2$  นอกจากนี้แล้วผลจากการปรับค่าตำแหน่งขั้ว  $\alpha_1$  และ  $\alpha_2$  ยังมีผลทำให้ทิศทางของซีโรเปลี่ยนไป ซึ่งทิศทางของซีโรนี้จะเป็นตัวกำหนดถึงเอาต์พุตที่จะได้รับผลกระทบจากซีโรตัวนั้น

การหาตำแหน่งซีโรของกระบวนการนั้นสามารถหาได้จากการทำดีเทอร์มิแนนต์เมทริกฟังก์ชันถ่ายโอน (2.4) นั้นเอง

$$\det G_p(s) = \frac{\alpha_1 \alpha_2 k_1 k_2 c_1 c_2}{\prod_{i=1}^4 (T_i s + 1)} \left[ (T_3 s + 1)(T_4 s + 1) - \frac{(1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2)}{\alpha_1 \alpha_2} \right] \quad (2.7)$$

ดังนั้นเมทริกฟังก์ชันถ่ายโอน  $G_p(s)$  จะมีซีโรอยู่ 2 ตัว โดยซีโรตัวหนึ่งจะอยู่ด้านซ้ายของระนาบ  $s$  เสมอในขณะที่ซีโรอีกตัวหนึ่งนั้นสามารถอยู่ได้ทั้งด้านซ้ายหรือด้านขวาของระนาบ  $s$  กำหนดให้  $\eta \in (0, \infty)$

$$\eta = \frac{(1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2)}{\alpha_1 \alpha_2} \quad (2.8)$$

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

การที่ซีโรของกระบวนการนี้ตัวหนึ่งอยู่ได้ทั้งด้านซ้ายและด้านขวาของระนาบ  $s$  สามารถอธิบายได้โดยคุณสมบัติทางกายภาพของกระบวนการคือ กำหนดให้  $q_i$  คืออัตราการไหลจากปัมป์  $i$  และสมมติให้อัตราการไหล  $q_1 = q_2$  เมื่อนั้นผลรวมของปริมาณน้ำทั้งหมดที่ไหลเข้าสู่ถึงด้านบนคือ  $[2 - (\alpha_1 + \alpha_2)]q_1$  และผลรวมของปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่ถึงด้านล่างคือ  $(\alpha_1 + \alpha_2)q_1$  ดังนั้นปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่ถึงด้านล่างจะมากกว่าถึงด้านบนก็ต่อเมื่อ  $(\alpha_1 + \alpha_2) > 1$  ซึ่งสอดคล้องกับการที่กระบวนการมีคุณสมบัติเป็นแบบเฟสต่ำสุด และถ้าปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่ถึงด้านบนมากกว่าถึงด้านล่างกระบวนการก็จะมีคุณลักษณะเป็นแบบเฟสไม่ต่ำสุด จากที่ได้ทำการอธิบายมาสามารถสังเกตเห็นได้ว่า ถ้าปริมาณน้ำไหลเข้าสู่ถึงด้านล่างมากกว่าถึงด้านบน  $y_1$  และ  $y_2$  ควรที่จะถูกควบคุมด้วย  $u_1$  และ  $u_2$  ในทางกลับกัน ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่ถึงด้านบนมากกว่าถึงด้านล่าง  $y_1$  และ  $y_2$  ก็ควรที่จะถูกควบคุมด้วย  $u_1$  และ  $u_2$

## 2.5 สรุป

จากที่ทำการอธิบายมาแสดงให้เห็นได้ว่ากระบวนการระดับน้ำ 4 ถังนั้นเป็นกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาถึงพฤติกรรม และการอธิบายถึงขีดจำกัดทางด้านสมรรถนะในการออกแบบตัวควบคุมของระบบควบคุมแบบหลายอินพุต-หลายเอาต์พุต MIMO อันเนื่องมาจากตำแหน่งซีโรที่อยู่ทางด้านขวาของระนาบ  $s$  ซึ่งจากแบบจำลองเชิงเส้นของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง พบว่า ตำแหน่งซีโรของกระบวนการนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าตำแหน่งของพารามิเตอร์  $\alpha_1, \alpha_2 \in (0, 1)$  โดยถ้า  $\alpha_1 + \alpha_2 < 1$  กระบวนการจะเป็นแบบเฟสไม่ต่ำสุดและถ้า  $\alpha_1 + \alpha_2 > 1$  กระบวนการจะเป็นแบบเฟสต่ำสุด ทำให้สามารถเลือกคุณลักษณะในการทำงานของกระบวนการได้

## บทที่ 3

# วิธีการกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะและการดีคัปลิ่ง

ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการ MIMO นั้นสามารถแบ่งโครงสร้างของตัวควบคุมได้เป็น 2 แบบด้วยกันคือตัวควบคุมแบบไม่แยกอิสระ (Centralized) และตัวควบคุมแบบแยกอิสระ (Decentralized) ซึ่งในทางปฏิบัติในตัวควบคุมแบบแยกอิสระจะได้รับความนิยมในการนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับการควบคุมกระบวนการแบบ MIMO มากกว่า เนื่องจากโครงสร้างของตัวควบคุมนั้นสามารถที่จะทำความเข้าใจได้ง่าย, ง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน และทำการออกแบบได้ง่ายกว่าตัวควบคุมแบบไม่แยกอิสระ ดังนั้นในการทำการออกแบบตัวควบคุมสำหรับการออกแบบกระบวนการระดับน้ำ 4 ถังนี้จึงเลือกใช้โครงสร้างตัวควบคุมแบบแยกอิสระ ด้วยเหตุผลดังกล่าวมาในเบื้องต้นและตัวควบคุมที่ใช้จะเป็นตัวควบคุมแบบพีไอ (PI Controller) โดยพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจะได้จากการออกแบบด้วยวิธีการกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ CRA

ในบทนี้จะอธิบายถึงหลักการการออกแบบตัวควบคุมโดยอาศัยวิธีการกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ CRA และการจัดรูปแบบโครงสร้างของระบบ TITO ให้เป็นแบบกระจายส่วนด้วยการดีคัปลิ่ง

### 3.1 วิธีการกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ CRA

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

โดยทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุมแบบดั้งเดิม (Classical Control Theory) นั้น จะทำการออกแบบตัวควบคุมแบบลูปเปิด (Open Loop) โดยจะใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนแทนระบบ ซึ่งในขั้นแรกนั้นจะสมมุติตัวควบคุมตามเงื่อนไขที่กำหนดขึ้นมาก่อน หาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบกับตัวควบคุมและนำฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดที่ได้มาตรวจสอบว่าได้คุณสมบัติตามที่ต้องการหรือไม่ หากคุณสมบัติที่ได้ไม่เป็นที่น่าพอใจ ต้องเปลี่ยนตัวควบคุมและทำการออกแบบใหม่จนกว่าจะฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ วิธีที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับวิธีนี้ก็มีความเหมือน การออกแบบตัวควบคุม โดยตรวจสอบผลตอบสนองทางความถี่ (Frequency Response), การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางเดินราก (Root Locus Method) และเนื่องจากการ

ออกแบบตัวควบคุมด้วยทฤษฎีนี้จะฟังก์ชันถ่ายโอนในการออกแบบ ซึ่งในบางครั้งนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนอาจจะไม่เที่ยงตรง อันเนื่องมาจากมีโพลและซีโรอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน ทำให้ระบบนั้นไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable) และไม่สามารถสังเกตได้ (Unobservable)

ทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุมแบบใหม่ (Modern Control Theory) จะทำการออกแบบตัวควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed Loop) โดยขั้นแรกจะนำเงื่อนไขที่กำหนดต่าง ๆ มาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดก่อนและหาตัวควบคุมฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด จากนั้นทำการตรวจสอบระบบควบคุมว่าทำงานภายใต้เงื่อนไขที่ต้องการหรือไม่ ถ้าไม่เป็นไปตามที่ต้องการต้องกลับไปแก้ไขฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดและหาตัวควบคุมใหม่จนกว่าจะได้ตัวควบคุมที่พอใจ วิธีที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับวิธีนี้ก็มีความเหมือน การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการวางโพล (Pole Placement Method), การออกแบบตัวควบคุมแบบดีที่สุด (Optimal Control) และในการออกแบบตัวควบคุมด้วยทฤษฎีนี้จะใช้สมการที่อยู่ในรูปแบบของ สเตท-สเปซ (State-Space) แทนระบบซึ่งการแทนระบบให้อยู่ในรูปแบบ สเตท-สเปซ (State-Space) นั้นจะมีความเที่ยงตรงและเหมาะสมในการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์

ทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุมแบบพีชคณิต (Algebraic Approach) วิธีนี้จะกำหนดค่าของพารามิเตอร์บางตัวในฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดและตัวควบคุมก่อน จากนั้นค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดและตัวควบคุมจะหาได้จาก การออกแบบ ซึ่งการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี กำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ (Characteristic Ratio Assignment Method: CRA) จะใช้ทฤษฎีนี้ในการออกแบบ

CRA เป็นวิธีการออกแบบแบบพีชคณิต ซึ่งการออกแบบนั้นอยู่บนพื้นฐานขนาดที่สัมพันธ์กันของค่าสัมประสิทธิ์สมการพหุนามคุณลักษณะ (Characteristic Polynomial) วัตถุประสงค์ในการออกแบบก็คือต้องการสมการคุณลักษณะ (Characteristic Equation) ที่เหมาะสม ดังนั้นวิธีนี้จึงดูเหมือนกับเป็นวิธีการวางโพลโดยอ้อม (Indirect Pole Placement Method) โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบด้วยวิธี CRA จะประกอบไปด้วยค่าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะ  $\alpha$ , ค่าคงตัวเวลาสมมูล  $\tau$  และค่าพารามิเตอร์  $k$  ซึ่งพารามิเตอร์ของวิธี CRA นี้จะใช้สำหรับทำการออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะที่ต้องการ วิธี CRA จะใช้สมการพหุนามแสดงแทนระบบ โดยเทอมเศษ (Numerator) และเทอมส่วน (Denominator) ของฟังก์ชันถ่ายโอนจะพิจารณาแยกกัน ในการออกแบบตัวควบคุมนั้นทำได้โดยทำการกำหนดสมการคุณลักษณะหรือสมการพหุนามคุณลักษณะที่ต้องการของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด โดยพิจารณาข้อกำหนดด้านสมรรถนะ (Performance Specification) ของระบบควบคุม และค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะที่ได้จากวิธี CRA จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะที่ได้จากตัวควบคุมและกระบวนการ เพื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมต่อไป

### 3.1.1 คุณลักษณะพื้นฐานของวิธี CRA

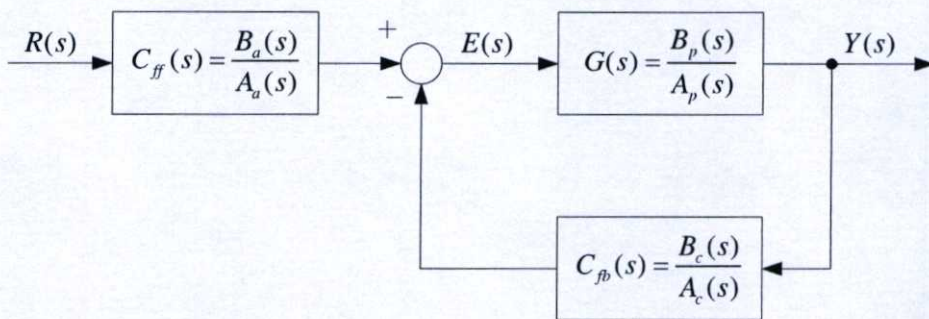
คุณลักษณะพื้นฐานของวิธี CRA มี 3 ข้อด้วยกัน คือ

1. ใช้สมการพหุนามแสดงแทนระบบ
2. สมการพหุนามคุณลักษณะและตัวควบคุมสามารถออกแบบได้ทันที
3. ทฤษฎีเงื่อนไขที่พอเพียงสำหรับเสถียรภาพ โดย Lipatov ถูกรวมเข้าไว้เป็นทฤษฎีพื้นฐานของวิธี CRA

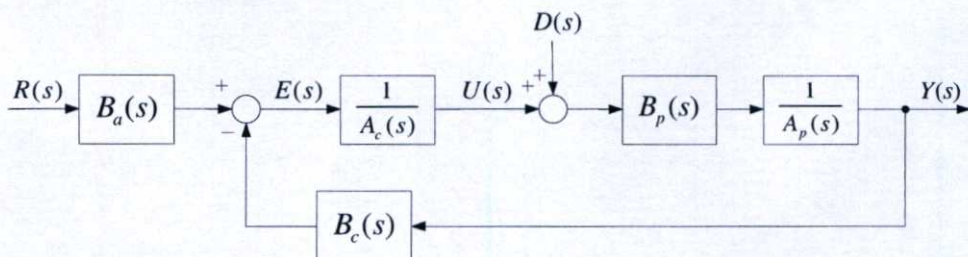
การออกแบบระบบควบคุมหรือตัวควบคุมด้วยวิธี CRA นั้นจะอยู่บนพื้นฐานของการเลือกค่าสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะ  $\alpha_i$  , ค่าคงตัวเวลาสมมูล  $\tau$  โดยค่า  $\tau$  จะเป็นตัวกำหนดความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุม ส่วนค่า  $\alpha_i$  นั้นจะเป็นตัวกำหนดเสถียรภาพและรูปทรงของผลตอบสนองของระบบควบคุม การเปลี่ยนแปลงของค่า  $\alpha_i$  จะคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบควบคุมซึ่งเป็นตัวกำหนดความคงทนของระบบควบคุม

### 3.1.2 โครงสร้างของระบบควบคุม

โครงสร้างทั่วไปของระบบควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 จากรูปจะเห็นได้ว่าระบบควบคุมประกอบไปด้วยกระบวนการ  $G(s) = B_p(s)/A_p(s)$  ตัวควบคุมแบบป้อนกลับ  $C_{fb} = B_c(s)/A_c(s)$  ในลูปป้อนกลับ และตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้า  $C_{ff} = B_a(s)/A_a(s)$



รูปที่ 3.1 โครงสร้างโดยทั่วไปของระบบควบคุม



รูปที่ 3.2 โครงสร้างมาตรฐานของระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี CRA

เพื่อความสะดวกในการนำไปประยุกต์ใช้งาน โครงสร้างระบบควบคุมสามารถทำให้อยู่ในรูปแบบอย่างง่ายได้โดยให้  $A_u(s) = B_c(s)$  แสดงได้ดังรูปที่ 3.2 โครงสร้างของระบบควบคุมแบบนี้เรียกว่าโครงสร้างระบบควบคุมแบบ 2 องศาอิสระ (Two Degree of Freedom : 2DOF) ระบบควบคุมแบบ 2 องศาอิสระนั้น เป็นระบบควบคุมที่มีตัวควบคุม 2 ตัว ที่อิสระต่อกันเพื่อให้สามารถปรับปรุงระบบควบคุมให้ผลตอบสนองของระบบเป็นตามข้อกำหนด ซึ่งโครงสร้างระบบควบคุมแบบ 2 องศาอิสระ (Two Degree of Freedom : 2DOF) ดังรูป 3.2 นั้นเป็นโครงสร้างมาตรฐานของระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี CRA สำหรับกระบวนการหนึ่งอินพุต-หนึ่งเอาต์พุต (Single Input - Single Output : SISO) โดย  $B_p(s)$  และ  $A_p(s)$  คือสมการพหุนามของกระบวนการ,  $B_c(s)$ ,  $A_c(s)$  และ  $B_a(s)$ ,  $A_u(s)$  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  $B_a(s), A_p(s)$  ใช้เพื่อลดผลกระทบจากซีโรของตัวควบคุมพีไอดี ในการออกแบบและจำลองการทำงานของระบบควบคุม ต้องคำนึงถึงขนาดของสัญญาณควบคุมด้วย ซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอนของสัญญาณควบคุมสำหรับการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธี CRA คือ

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

จากโครงสร้างระบบควบคุมแบบ 2 องศาอิสระ (2-DOF) ตัวควบคุมแบบป้อนกลับจะถูกใช้เพื่อวางโพลของระบบควบคุมหรือกำหนดโหมคการทำงานของระบบควบคุม ซึ่งเป็นตัวพิจารณาถึงผลตอบสนองชั่วคราวและรูปทรงผลตอบสนองของระบบควบคุม ส่วนตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้าจะถูกใช้เพื่อวางซีโรของระบบควบคุม ซึ่งเป็นตัวกำหนดถึงผลตอบสนองที่สภาวะชั่วคราวและที่สภาวะคงตัวของระบบควบคุม ดังนั้นปัญหาในการสร้างตัวควบคุมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ข้อหลักๆคือ

1. เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่สภาวะชั่วคราว และรูปทรงผลตอบสนองของระบบควบคุมตามที่ต้องการ ซึ่งก็คือการวางโพลของระบบควบคุมที่เหมาะสมโดยใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับ
2. เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่สภาวะชั่วคราว และผลตอบสนองที่สภาวะคงตัวหรือคุณสมบัติในการติดตามสัญญาณตามที่ต้องการ ซึ่งก็คือการวางซีโรของระบบควบคุมที่เหมาะสม โดยใช้ตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้า

### 3.1.2.1 การวางโพล

การวางโพลเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดของการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CRA เพราะว่าโพลของระบบควบคุมนั้นมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกับสมการคุณลักษณะ ดังนั้นถ้าพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมทั้งหมด  $G_{cl}(s) = N_{cl}(s) / D_{cl}(s)$  จะเห็นได้ว่าสมการพหุนามในเทอมส่วน  $D_{cl}(s)$  ก็คือสมการคุณลักษณะของระบบควบคุมนั่นเอง 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 CRA ดังนั้นปัญหาในการหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบป้อนกลับสามารถทำได้โดยการแก้สมการเชิงเส้นซึ่งจะทำให้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมป้อนกลับ ( $B_c(s), A_c(s)$ ) ได้

### 3.1.2.2 การวางซีโร

ในการวางซีโรเพื่อใช้ในการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงนั้น สามารถแบ่งชนิดของการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงได้เป็น 2 ชนิดคือ การติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบอุดมคติและการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบไม่อุดมคติ โดยการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบอุดมคตินั้นสามารถติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงใดๆ ได้ในทันทีทันใด ซึ่งการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบนี้สามารถใช้ได้ในทางทฤษฎีเท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติแล้วนั้นไม่สามารถทำได้เพราะถูกจำกัดด้วยขนาดของสัญญาณควบคุม ในขณะที่การติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบไม่อุดมคตินั้นจะไม่สามารถติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงได้ในทันทีทันใด แต่จะค่อยๆ เข้าสู่สัญญาณอินพุตอ้างอิง ซึ่งการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงชนิดนี้สามารถใช้ได้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นในที่นี้จะอธิบายแต่เพียงการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบไม่อุดมคติเท่านั้น

โดยทั่วไปแล้ว การติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบไม่อุดมคติสำหรับระบบควบคุมนั้นสามารถแบ่งชนิดของสัญญาณอินพุตได้ 3 แบบคือ สัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได (Step), สัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบความเร็ว (Velocity) และสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบอัตราเร่ง (Accelerator) ซึ่งการวางซีโรเพื่อใช้ในการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงทั้ง 3 ชนิดนี้ ทำได้โดยกฎของพีชคณิตต่างๆ และกฎที่ใช้ในการวางซีโรจะอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีค่าสุดท้าย (Final Value Theorem) ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

การวางซีโรเพื่อใช้ติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิง เพื่อความเหมาะสมและมีเสถียรภาพ ฟังก์ชันถ่ายโอน  $G_{cl}(s)$  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  $m, n \geq 2$

### 3.1.3 การออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะด้วยวิธี CRA

ในส่วนนี้จะอธิบายถึงการออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะด้วยวิธี CRA โดยสมการพหุนามคุณลักษณะของระบบควบคุมป้อนกลับนั้นจะเป็นสมการเดียวกันกับสมการคุณลักษณะในสมการ (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 ค่าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะ  $\alpha_i$ , ค่าคงตัวเวลาสมมูล  $\tau$  ที่ใช้ในการออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะ

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

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

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

$$a_i = \frac{a_0 \tau}{\alpha_{i-1} \dots \alpha_2 \alpha_1^{i-1}} \quad (3.14)$$

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

เมื่อแทนสัมประสิทธิ์  $a_i$  แต่ละอันดับในสมการ (3.11) จะได้สมการพหุนามคุณลักษณะในเทอมของ  $a_0$ ,  $\tau$  และ  $\alpha_i$  ดังนี้

$$P(s) = a_0 \left[ \sum_{i=2}^n \left( \prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{(\alpha_{i-j})^j} \right) (\tau s)^i \right] + \tau s + 1 \tag{3.15}$$

### 3.1.3.1 การเลือกพารามิเตอร์ของวิธี CRA

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CRA สามารถทำได้โดยทำการกำหนดค่า  $\tau$  และค่า  $\alpha_i$  ตามที่ต้องการ โดยค่า  $\alpha_i$  จะเป็นสิ่งที่กำหนดถึงอัตราการหน่วงของระบบควบคุมซึ่งในการกำหนดค่า  $\alpha_i$  จะต้องกำหนดตามเงื่อนไขของ Lipatov และ Sokolov [5] แสดงได้ดังนี้

$$\sqrt{\alpha_i \alpha_{i+1}} > 1.4656 \quad \text{สำหรับ } i = 1, 2, \dots, n-2 \tag{3.16}$$

$$\alpha_i \geq 1.12374 \alpha_i^* \quad \text{สำหรับ } i = 2, 3, \dots, n-2 \tag{3.17}$$

$$\alpha_i^* = \frac{1}{\alpha_{i+1}} + \frac{1}{\alpha_{i-1}} \quad \text{โดย } \alpha_n = \alpha_0 = \infty \tag{3.18}$$

จากสมการ (3.15) จะเห็นได้ว่าสมการพหุนามคุณลักษณะถูกอธิบายอยู่ในรูปกำลังของ  $\tau s$  และสัมประสิทธิ์อธิบายโดย  $\alpha_i$  ดังนั้นรูปทรงและความเร็วของผลตอบสนองสามารถพิจารณาได้โดยพารามิเตอร์  $\alpha_i$  และ  $\tau$  ตามลำดับ

ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CRA ค่าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะ กำหนดให้  $\alpha_1 = 2.5$  และ  $\alpha_2 = \alpha_3 = 2$  นั้นเป็นเพียงเงื่อนไขเบื้องต้นเพื่อให้ระบบได้ผลตอบสนองตามที่ต้องการ อย่างไรก็ตามไม่จำเป็นต้องกำหนดให้  $\alpha_4 \sim \alpha_{n-1} = 2$  โดยสามารถแปลงค่าได้ภายใต้เงื่อนไขดังนี้

$$\alpha_i > 1.5 \alpha_i^* \quad \text{สำหรับ } i = 4 \sim n-1 \tag{3.19}$$

ดังนั้นผู้ออกแบบสามารถออกแบบตัวควบคุมได้อย่างอิสระ ในบางครั้งอาจจะเลือกให้ค่าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะ  $\alpha_i$  มีค่าสูงๆ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านความคงทนของระบบควบคุมต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการ จากเงื่อนไข

เสถียรภาพโดย Lipatov ระบบควบคุมจะมีเสถียรภาพเมื่อค่าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะ  $\alpha_i$  ทุกค่ามีค่ามากกว่า 1.5 โดย Lipatov ได้พิสูจน์ไว้ใน [5] และถ้าค่าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะ  $\alpha_i$  ทุกตัวมีค่ามากกว่า 4 โพลของระบบทั้งหมดจะอยู่บนแกนจริง ดังนั้นค่าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะ  $\alpha_i$  จึงถูกเลือกให้มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5-4 แต่ในบางครั้งเมื่อพิจารณากระบวนการบางกระบวนการแล้วพบว่า มีค่าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะ ที่มากกว่าค่ามาตรฐาน ซึ่งในกรณีนี้ไม่จำเป็นที่จะต้องลดค่าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะ  $\alpha_i$  เพื่อให้เป็นค่าเดียวกับค่ามาตรฐาน

### 3.1.3.2 การปรับค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมด้วยวิธี CRA

ในการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธี CRA นั้นการเลือกค่าพารามิเตอร์  $\alpha_i$  และ  $\tau$  นั้นเป็นสิ่งที่สำคัญมาก เนื่องจากค่า  $\alpha_i$  จะเป็นตัวกำหนดรูปทรงผลตอบสนองของระบบควบคุม ส่วน  $\tau$  เป็นตัวกำหนดความเร็วหรือค่าเวลาเข้าที่ของระบบควบคุม โดยส่วนใหญ่แล้วในการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธี CRA เบื้องต้นนั้น จะทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ภายใต้เงื่อนไขของ Lipatov และ Sokolov ซึ่งสามารถให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ดี คือมีไม่มีค่าพุ่งเกินและมีค่าเวลาเข้าที่ตามที่ต้องการ แต่อย่างไรก็ตาม การกำหนดค่าพารามิเตอร์ตามรูปแบบดังกล่าวนี้ ไม่สามารถใช้ได้กับทุกกระบวนการเสมอไป อาจจะต้องมีการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์  $\alpha_i$  และ  $\tau$  เพื่อให้ได้ผลตอบสนองตามที่ต้องการ ซึ่งการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์  $\alpha_i$  และ  $\tau$  จะแบ่งได้เป็น 2 กรณีคือ

1. รูปทรงผลตอบสนองของระบบควบคุมได้ตามที่ต้องการ แต่ค่าเวลาเข้าที่ของระบบไม่ได้ตามที่ต้องการ ซึ่งในกรณีนี้จะทำการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์  $\tau$
2. ค่าเวลาเข้าที่ของระบบได้ตามที่ตามที่ต้องการ แต่รูปทรงผลตอบสนองของระบบไม่ได้ตามที่ต้องการ ซึ่งในกรณีนี้จะทำการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์  $\alpha_i$

โดยทั่วไปแล้ว การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์  $\alpha_i$  และ  $\tau$  นั้นจะใช้วิธีการลองผิดลองถูกกันไปเรื่อยๆจนกว่าจะได้ผลตอบสนองของระบบควบคุมตามที่ต้องการ ซึ่งอาจจะใช้ระยะเวลาที่นานและยุ่งยาก ดังนั้นวิธีในการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์  $\alpha_i$  และ  $\tau$  ที่ง่ายและมีประสิทธิภาพจึงจำเป็น ซึ่งในส่วนต่อไปจะอธิบายถึงการปรับแต่งพารามิเตอร์  $\alpha_i$  และ  $\tau$  สำหรับแต่ละกรณี ดังที่ได้อธิบายมา

### 3.1.3.3 การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ $\tau$

เมื่อรูปทรงผลตอบสนองของระบบควบคุมได้ตามที่ต้องการ แต่ค่าเวลาเข้าที่ยังไม่ได้ตามที่ต้องการ จำเป็นที่จะต้องทำการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์  $\tau$  โดยการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์  $\tau$  นั้นสามารถอธิบายได้ดังนี้

สมมติให้  $G_{cl}(s)$  เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบควบคุมที่ออกแบบไว้ในตอนแรก

โดย

$$G_{cl}(s) = \frac{a_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad a_i > 0 \text{ สำหรับ } i = 0 \sim n \quad (3.20)$$

สัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะและอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะสามารถเขียนได้ในรูปแบบดังนี้สัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะ

$$A = [a_n \quad a_{n-1} \quad \dots \quad a_1 \quad a_0] \quad (3.21)$$

ส่วนกลับของสมการคุณลักษณะ

$$B = [b_{n-1} \quad b_{n-2} \quad \dots \quad b_1 \quad b_0] \quad (3.22)$$

อัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะ

$$C = [c_{n-2} \quad c_{n-3} \quad \dots \quad c_1 \quad c_0] \quad (3.23)$$

โดย

$$b_i = \frac{a_i}{a_{i+1}} \quad \text{สำหรับ } i = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (3.24)$$

$$c_i = \frac{b_{i+1}}{b_i} \quad \text{สำหรับ } i = 0, 1, 2, \dots, n-2 \quad (3.25)$$

ทำการจัดสมการ (3.20) ใหม่ให้อยู่ในรูปแบบดังนี้

$$G_{cl}(s) = \frac{a_0/a_n}{s^n + \frac{a_{n-1}}{a_n} s + \dots + \frac{a_1}{a_n} s + \frac{a_0}{a_n}} \quad (3.26)$$

จากสมการ (3.26) สามารถเขียนสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะให้อยู่ในรูปแบบของอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะได้ดังนี้

$$A = \left[ 1 \quad \prod_{i=n-1}^{n-1} b_i \quad \dots \quad \prod_{i=2}^{n-1} b_i \quad \prod_{i=1}^{n-1} b_i \right] \quad (3.27)$$

ถ้าทำการเพิ่มค่าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะในสัดส่วนที่เท่ากันคือ  $k$  จะได้สัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะดังนี้

$$A = \left[ 1 \quad k \prod_{i=n-1}^{n-1} b_i \quad \dots \quad k^{n-1} \prod_{i=2}^{n-1} b_i \quad k^n \prod_{i=1}^{n-1} b_i \right] \quad (3.28)$$

จากสมการ (3.27) และสมการ (3.28) จะสังเกตได้ว่าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะยังเหมือนเดิม ไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงไป โดยสิ่งที่เปลี่ยนแปลงไปก็คือค่าคงตัวเวลาสมมูล  $\tau$  จากสมการ (3.28) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังนี้

$$G_{mcl}(s) = \frac{k^n a_0}{a_n s^n + k a_{n-1} s^{n-1} + \dots + k^{n-1} a_1 s + k^n a_0} \quad (3.29)$$

จากสมการ (3.29) จะสังเกตเห็นได้ว่า ค่า  $\tau$  ของระบบควบคุมเปลี่ยนไปเป็น

$$\tau = \frac{1}{k} \left( \frac{a_1}{a_0} \right) \quad (3.30)$$

โดยถ้าทำการเพิ่มค่า  $k$  ขึ้นจะทำให้ค่า  $\tau$  มีค่าน้อยลง ซึ่งก็คือผลตอบสนองของระบบควบคุมเร็วขึ้นและในทางกลับกันถ้าค่า  $k$  อยู่ในช่วง  $0 < k < 1$  ผลตอบสนองของระบบควบคุมจะช้าลง

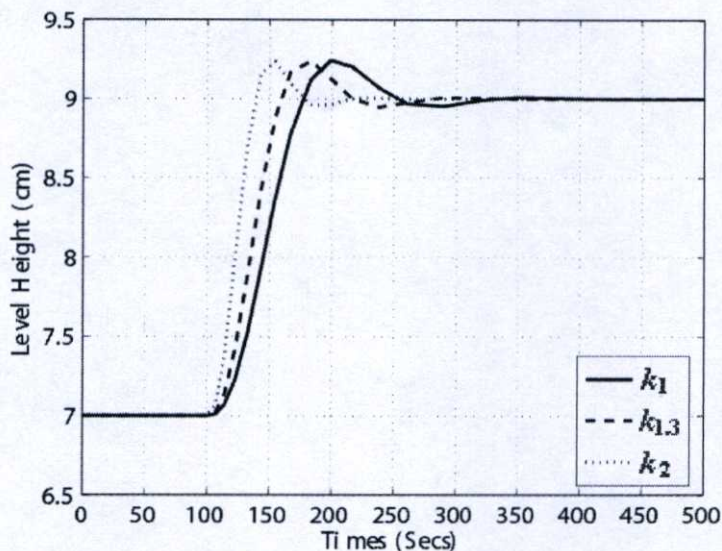
วิธีที่ใช้ในการปรับผลตอบสนองของระบบให้ได้ค่าเวลาเข้าที่ตามที่ต้องการทำได้โดยพิจารณาว่า จากเดิมค่าเวลาเข้าที่ของระบบควบคุมอยู่ที่ค่าเวลาเท่าไร จากนั้นให้เลือกค่าเวลาเข้าที่ที่ต้องการ และทำการหาค่า  $k$  โดยใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$k = \frac{t_{s,old}}{t_{s,new}} \quad (3.31)$$

โดย  $t_{old}$  คือค่าเวลาเข้าที่ของระบบควบคุมเดิม และ  $t_{new}$  คือค่าเวลาเข้าที่ของระบบควบคุมที่ต้องการ หลังจากที่ได้ค่า  $k$  แล้วนำไปแทนในสมการ (3.30) ก็จะได้ค่า  $\tau$  ของระบบควบคุมค่าใหม่ออกมา

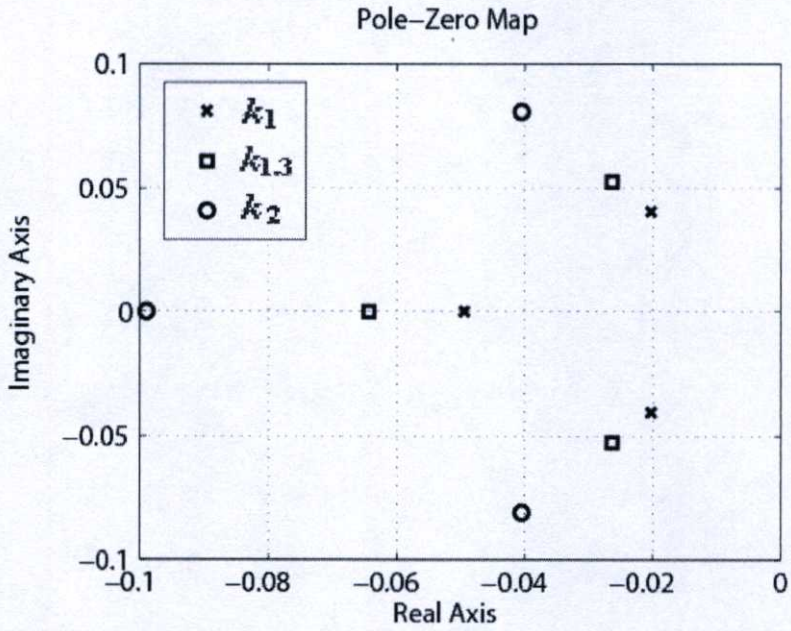
### 3.1.3.4 ผลของการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ $\tau$ ที่มีต่อผลตอบสนองของระบบควบคุม

จากรูปที่ 3.3 แสดงการผลตอบสนองของระบบควบคุมกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน ต่อสัญญาณขั้นบันไดที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรม Matlab เมื่อปรับแต่งค่าพารามิเตอร์  $\tau$  เพื่อปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุม โดยการปรับเพิ่มค่า  $k$  จาก 1 เป็น 1.3 และ 2 ซึ่งจากความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์  $k$  ที่มีต่อค่าพารามิเตอร์  $\tau$  หรือความเร็วของผลตอบสนอง ดังที่ได้แสดงในสมการที่ 3.30 และ 3.31 เป็นผลให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมนั้นเร็วขึ้น ตามลำดับ

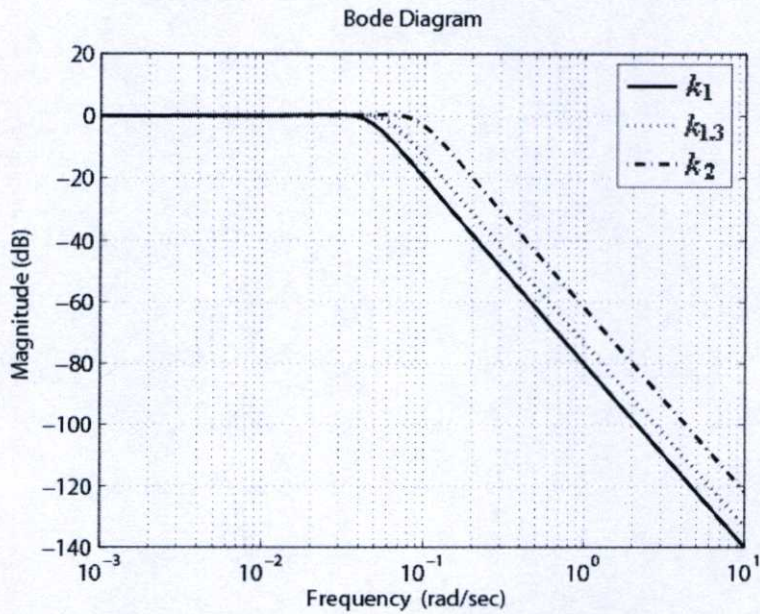


รูปที่ 3.3 ผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับความเร็ว ผลตอบสนองของระบบควบคุม โดยการปรับค่า  $k$

การปรับค่าพารามิเตอร์  $k$  เป็นผลให้ความเร็วของผลตอบสนองของระบบควบคุมเปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 3.3 นั้น เป็นผลมาจาก ค่าตำแหน่งรากของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบควบคุมเลื่อนไปทางซ้ายของระนาบ  $s$  ในลักษณะมุมของรากไม่เปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งตำแหน่งของรากของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบควบคุมที่เปลี่ยนแปลงไปในลักษณะนี้ ทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมเร็วขึ้นโดยยังคงรูปทรงไว้ดังเดิม ส่วนรูปที่ 3.5 นั้นแสดงผลตอบสนองทางความถี่ของระบบควบคุมเมื่อปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า  $k$  ซึ่งจะเห็นว่าผลตอบสนองของระบบควบคุมมีความถี่เพิ่มขึ้น โดยที่ขนาดยังคงเดิมเมื่อปรับเพิ่มค่าพารามิเตอร์  $k$



รูปที่ 3.4 ตำแหน่งโพลวงปิดของระบบควบคุมเมื่อปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุม โดยการปรับค่า  $k$



รูปที่ 3.5 ผลตอบสนองทางความถี่ของระบบควบคุมเมื่อปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุม โดยการปรับค่า  $k$

### 3.1.3.5 การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ $\alpha_i$

ในกรณีที่ค่าเวลาเข้าที่ของระบบควบคุมได้ตามที่ต้องการ แต่รูปทรงผลตอบสนองของระบบควบคุมไม่ได้ตามที่ต้องการนั้นจำเป็นที่จะต้องปรับแต่งค่าพารามิเตอร์  $\alpha_i$  โดยการปรับแต่งค่า  $\alpha_i$  นั้นสามารถอธิบายได้ดังนี้

สมมติให้  $G_{cl}(s)$  เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบควบคุมที่ออกแบบไว้ในตอนแรก โดย

$$G_{cl}(s) = \frac{a_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad a_i > 0 \text{ สำหรับ } i = 0 \sim n \quad (3.32)$$

โดยสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะ, ส่วนกลับของสมการคุณลักษณะและอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะจะมีรูปแบบเดียวกับสมการ (3.21), (3.22) และ (3.23) จัดสมการ (3.32) ใหม่ให้อยู่ในรูปแบบดังนี้

$$G_{cl}(s) = \frac{1}{\frac{a_n}{a_0} s^n + \frac{a_{n-1}}{a_0} s^{n-1} + \dots + \frac{a_1}{a_0} s + 1} \quad (3.33)$$

จากสมการ (3.33) สามารถเขียนสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะให้อยู่ในรูปแบบของส่วนกลับของสมการพหุนามคุณลักษณะได้ดังนี้

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{\prod_{i=0}^{n-1} b_i} & \frac{1}{\prod_{i=0}^{n-2} b_i} & \dots & \frac{1}{\prod_{i=0}^1 b_i} & \frac{1}{\prod_{i=0}^0 b_i} \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

จากสมการ (3.34) สามารถเขียนให้อยู่ในอีกรูปแบบหนึ่งได้ดังนี้

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{\left[ \prod_{i=0}^{n-2} c_i \prod_{i=0}^{n-3} c_i \dots \prod_{i=0}^0 c_i \right] b_0^n} & \frac{1}{\left[ \prod_{i=0}^{n-3} c_i \prod_{i=0}^{n-4} c_i \dots \prod_{i=0}^0 c_i \right] b_0^{n-1}} & \dots & \frac{1}{b_0} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

ถ้าทำการเพิ่มค่าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะในสัดส่วนที่เท่ากันคือ  $k$  จะได้สัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะใหม่ดังนี้

$$A = \left[ \frac{1}{k^{\frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{2}} \left[ \prod_{i=0}^{n-2} c_i \prod_{i=0}^{n-3} c_i \dots \prod_{i=0}^0 c_i \right] b_0^n} \quad \frac{1}{k^{\frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{2}} \left[ \prod_{i=0}^{n-3} c_i \prod_{i=0}^{n-4} c_i \dots \prod_{i=0}^0 c_i \right] b_0^{n-1}} \dots \frac{1}{b_0} \quad 1 \right] \quad (3.36)$$

จากสมการ (3.35) และสมการ (3.36) จะสังเกตได้ว่าค่า  $\tau$  ยังคงเหมือนเดิมไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลง โดยสิ่งที่เปลี่ยนแปลงไปก็คือค่าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะ จากสมการ (3.36) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังนี้

$$G_{mcl}(s) = \frac{k^{\frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{2}} a_0}{a_n s^n + k^{n-1} a_{n-1} s^{n-1} + \dots + k^{\frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{2}} a_1 s + k^{\frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{2}} a_0} \quad (3.37)$$

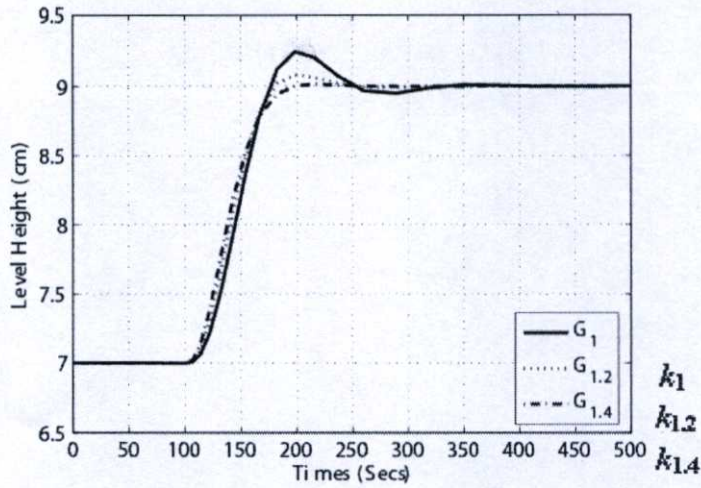
ซึ่งจะได้อัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะดังสมการที่ 3.38

$$\alpha_i = k \frac{a_i^2}{a_{i-1} a_{i+1}} \quad (3.38)$$

วิธีในการปรับผลตอบแทนของระบบควบคุมให้ได้รูปทรงตามที่ต้องการนั้น ไม่มีวิธีที่แน่นอนตายตัวเหมือนกับกรณีของการปรับ  $\tau$  โดยในกรณีนี้จะต้องค่อยๆ ลองปรับค่า  $k$  จนกว่าจะได้รูปทรงผลตอบแทนที่ต้องการ ถ้าค่า  $k > 1$  จะทำให้ผลตอบแทนของระบบควบคุมช้าลงและค่าพุงเกินก็จะลดลง แต่ถ้า  $0 < k < 1$  จะทำให้ผลตอบแทนของระบบควบคุมเร็วขึ้นค่าพุงเกินก็จะมากขึ้น ถึงแม้ว่าวิธีนี้จะต้องลองผิดลองถูกในการปรับค่า  $k$  แต่ก็ยังดีกว่าการปรับค่า  $\alpha_i$  โดยตรง เนื่องจากถ้าระบบควบคุมเป็นแบบอันดับสูงๆ ค่า  $\alpha_i$  ที่จะทำให้การปรับก็มากตามไปด้วย หลังจากที่ได้รูปทรงผลตอบแทนของระบบควบคุมตามที่ต้องการแล้ว ค่าเวลาเข้าที่ของระบบควบคุมอาจจะมีค่าที่ลดลงหรือเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากอัตราการหน่วงของระบบควบคุมได้เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำการปรับค่าเวลาเข้าที่ให้ได้ตามที่ต้องการอีกครั้งหนึ่ง

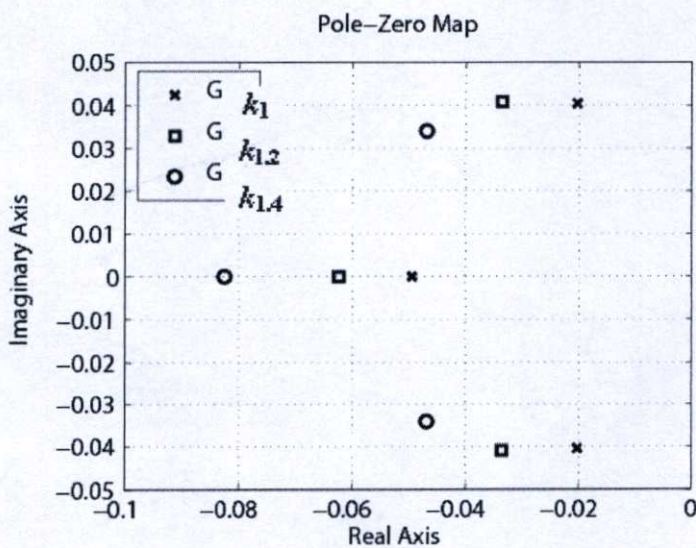
### 3.1.3.6 ผลของการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ $\alpha_i$ ที่มีต่อผลตอบแทนของระบบควบคุม

จากรูปที่ 3.6 แสดงผลตอบแทนของระบบควบคุมกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน [8] ต่อสัญญาณขั้นบันไดที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรม Matlab เมื่อปรับอัตราการหน่วงของระบบควบคุม โดยการปรับเพิ่มค่า  $k$  จาก 1 เป็น 1.2 และ 1.4 ซึ่งจากความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์  $k$  ที่มีต่ออัตราส่วนสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะ  $\alpha_i$  ดังที่ได้แสดงในสมการที่ 3.38 เป็นผลให้อัตราการหน่วงของระบบควบคุมเพิ่มขึ้น ตามลำดับ

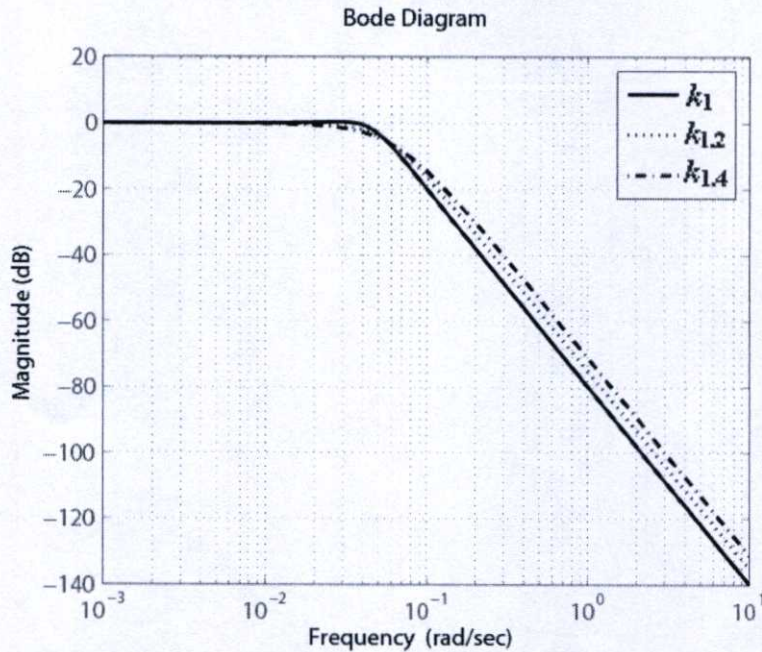


รูปที่ 3.6 ผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับอัตราकरणวงของระบบควบคุมโดยการปรับค่า  $k$

การปรับค่าพารามิเตอร์  $k$  เป็นผลอัตราकरणวงของระบบควบคุมเพิ่มขึ้นทำให้ค่าพุงเกินของผลตอบสนองลดลงดังรูปที่ 3.6 นั้น เป็นผลมาจาก ค่าตำแหน่งโพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบควบคุมที่เปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยค่าตำแหน่งรากของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบควบคุมเลื่อนไปทางซ้ายของระนาบ  $s$  เป็นผลให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมเร็วขึ้น ค่า Cosine มุมของรากเพิ่มขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์ค่าพุงเกินลดลง ส่วนรูปที่ 3.8 นั้น แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของระบบควบคุมเมื่อปรับอัตราकरणวงของระบบควบคุมโดยการปรับค่า  $k$



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งโพลวงปิดของระบบควบคุมเมื่อปรับอัตราकरणวงของระบบควบคุมโดยการปรับค่า  $k$



รูปที่ 3.8 ผลตอบสนองทางความถี่ของระบบควบคุมเมื่อปรับอัตราการหน่วงของระบบควบคุม โดยการปรับค่า  $k$

### 3.2 การออกแบบดีคัปปลิง

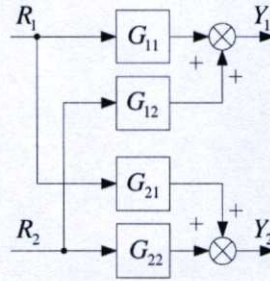
ในการศึกษาระบบควบคุมโดยทั่วไปเราจะศึกษาเพียงระบบที่เป็นแบบ SISO เท่านั้น บ่อยครั้งที่พบว่าหลายๆ กระบวนการที่พบในการทำงานนั้นเป็นระบบที่ต้องการการควบคุมตัวแปรในกระบวนการนั้นมากกว่าหนึ่ง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือจุดมุ่งหมายของการควบคุมมีมากกว่าหนึ่งนั่นเอง กระบวนการเหล่านี้สามารถพิจารณาแบบ SISO ได้ครบใดที่องค์ประกอบภายในระบบไม่มีการอินเตอร์แอคชัน (Interaction) ภายในซึ่งกันและกัน การดีคัปปลิง (Decoupling) ถูกนำมาใช้ออกแบบระบบของกระบวนการเพื่อช่วยให้สามารถแยกระบบของกระบวนการแบบ MIMO ให้เป็นระบบ SISO สำหรับการออกแบบระบบควบคุมต่อไป

การพิจารณาเลือกใช้งานชุดดีคัปปลิงนั้น [9],[10] ได้แสดงถึงการเปรียบเทียบถึงความมีเสถียรภาพ ความคงทนของระบบและการนำไปใช้ของชุดดีคัปปลิงแบบต่างๆ สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้กล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมแบบดีคัปปลิงสำหรับกระบวนการระดับ 4 ดังกล่าวไว้ในบทที่ 2 ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะสามารถแบ่งคุณลักษณะของกระบวนการได้เป็น 2 ลักษณะคือ กระบวนการระดับนำ 4 ถึงกรณีเฟสต่ำสุดและกระบวนการระดับนำ 4 ถึงกรณีเฟสไม่ต่ำสุด สำหรับกรณีเฟสต่ำสุดนั้นซีโรของกระบวนการอยู่ทางซ้ายของระนาบ  $s$  ทั้งคู่ ชุดดีคัปปลิงที่นำมาใช้ร่วมในการออกแบบตัวควบคุมนั้นสามารถนำมาลดผลของการอินเตอร์แอคชันระหว่างลูปควบคุมได้โดยตรง แต่สำหรับกรณีเฟสไม่ต่ำสุดนั้นพบว่าซีโรของกระบวนการอยู่ทางขวาของระนาบ  $s$  ทำให้การออกแบบตัวควบคุมนั้นทำได้ยาก ดังนั้นการนำเอาการดีคัปปลิง

แบบอินเวอร์ส (Inverted Decoupling) มาใช้ร่วมในการออกแบบตัวควบคุมนั้นเพื่อให้ระบบที่ไม่มีเสถียรภาพนั้นสามารถควบคุมได้

### 3.2.1 โครงสร้างและการออกแบบชุดดีคัปปลิงแบบพื้นฐาน

หลักการของการออกแบบดังกล่าวจะเป็นการนำชุดดีคัปปลิงมาต่อร่วมกับทรานส์เฟอร์เมทริกของกระบวนการเพื่อลดผลกระทบของการอินเตอร์แอคชันระหว่างลูปทรานด์เพอร์ฟังก์ชันจะถูกกำจัดไป พิจารณากระบวนการแบบ TITO ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ไดอะแกรมโครงสร้างของกระบวนการแบบ TITO

โดยเมทริกฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการคือ

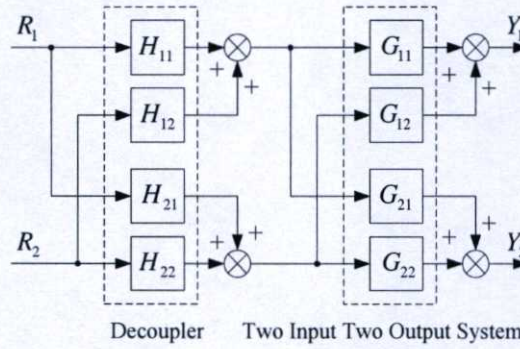
$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

เมื่อพิจารณาจากองค์ประกอบของเมทริกฟังก์ชัน  $G_{11}(s), G_{22}(s)$  เป็นลูปของทรานด์เพอร์ฟังก์ชันของ  $R_1 - Y_1$  และ  $R_2 - Y_2$  และมี  $G_{12}(s), G_{21}(s)$  เป็นการคัปปลิงระหว่างลูปของฟังก์ชันถ่ายโอนผลของการคัปปลิงนี้เราเรียกว่า Interaction ที่มีผลกระทบต่อระบบควบคุมได้หลายลักษณะ ในกรณีนี้ผลกระทบดังกล่าวสามารถกำจัดหรือลดผลกระทบได้โดยการใช้เทคนิคการดีคัปปลิง วิธีการดีคัปปลิงใช้หลักการจัดรูปแบบทรานด์เพอร์เมทริกฟังก์ชันของระบบให้เป็นเมทริกแนวทแยงโดยการใช้ดีคัปปลิงเมทริก รูปที่ 3.10 แสดงถึง โครงสร้างของดีคัปปลิงที่ประกอบกับกระบวนการแบบ TITO ดีคัปปลิงเมทริกสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.40

$$H(s) = \begin{bmatrix} H_{11}(s) & H_{12}(s) \\ H_{21}(s) & H_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

เมื่อใช้ดีคัปปลิงทรานด์เพอร์เมทริกพร้อมกับกระบวนการ TITO ทรานด์เพอร์เมทริกทั้งระบบสามารถจัดรูปแบบเมทริกแนวทแยงดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} G_{n1} & 0 \\ 0 & G_{n2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \quad (3.41)$$



**รูปที่ 3.10** โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำแบบ 4 ถึง 2 ที่ประกอบด้วยชุดคัตติคัปปลิง

เมื่อพิจารณาจากการออกแบบชุดคัตติคัปปลิงจะสามารถกำหนดให้  $H_{11}$  และ  $H_{22} = I$  สำหรับ  $H_{12}$  และ  $H_{21}$  หาได้จากสมการ (3) ซึ่งได้ดังต่อไปนี้

$$H_{12} = -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} \quad (3.42a)$$

$$H_{21} = -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} \quad (3.42b)$$

เมื่อกำหนดให้  $H_{11}$ ,  $H_{12}$ ,  $H_{21}$  และ  $H_{22}$  ในสมการ (3) จะสามารถจัดรูปแบบระบบแบบกระจายส่วนได้ดังสมการต่อไปนี้

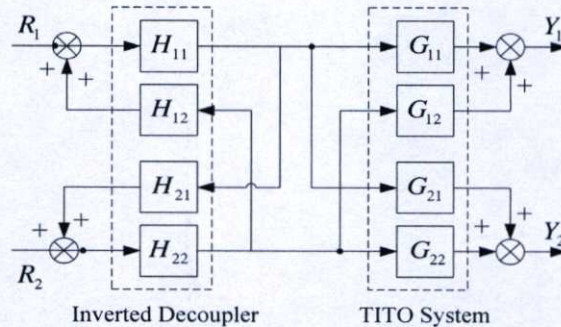
$$Y_1 = \left( G_{11}(s) - \frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} G_{12}(s) \right) R_1 - 0R_2 = G_{n1}(s)R_1 \quad (3.43a)$$

$$Y_2 = 0R_1 - \left( G_{22}(s) - \frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} G_{21}(s) \right) R_2 = G_{n2}(s)R_2 \quad (3.43b)$$

เมื่อพิจารณาจากสมการ (3.43a) และ (3.43b) จะเห็นได้ว่าผลของการเกิดอินเตอร์แอคชันระหว่างลูฟฟิงก์ชันถ่ายโอนจะถูกกำจัดไป ระบบใหม่ที่ได้จะมีลักษณะการกระจายส่วนซึ่งสะดวกในการควบคุมและสามารถนำมาออกแบบระบบควบคุมในลักษณะตัวควบคุมแบบหนึ่งอินพุทหนึ่งเอาต์พุท SISO ได้

### 3.2.2 โครงสร้างและการออกแบบชุดคัปปลิงแบบอินเวอร์ส

หลักการออกแบบชุดคัปปลิงแบบอินเวอร์สนั้นก็พื้นฐานและวัตถุประสงค์เช่นเดียวกับการออกแบบชุดคัปปลิงแบบพื้นฐาน โดยจะมีลักษณะการเชื่อมต่อดังแสดงได้ในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำแบบ 4 ถึง 2 ที่ประกอบด้วยชุดอินเวอร์สคัปปลิง

พิจารณาจากรูปที่ 3.11 จะเห็นได้ว่าทิศทางของสัญญาณที่ผ่านชุดคัปปลิงและตำแหน่งของจุดเชื่อมต่อสัญญาณจะแตกต่างออกไปจากชุดคัปปลิงแบบพื้นฐานแต่การหาค่าพารามิเตอร์ของชุดคัปปลิงนั้นมีลักษณะเช่นเดียวกัน

### 3.2 สรุป

การออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ CRA ซึ่งเป็นวิธีการการออกแบบตัวควบคุมโดยใช้เทคนิคการวางโพลรูปแบบหนึ่งที่อยู่บนพื้นฐานการกำหนดพารามิเตอร์ของสมการคุณลักษณะ ซึ่งวิธี CRA นั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม สำหรับกระบวนการหนึ่งอินพุต-หนึ่งเอาต์พุต SISO ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับวิธีการออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการแบบ TITO นั้นวิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบ CRA สามารถนำมาออกแบบได้โดยมีโครงสร้างของสร้างของตัวควบคุมจะเป็นแบบแยกอิสระ (Decentralized) โดยใช้เทคนิคการคัปปลิงเพื่อช่วยให้สามารถแยกกระบวนการของกระบวนการ TITO ให้เป็นระบบ SISO สำหรับการออกแบบระบบควบคุมต่อไป

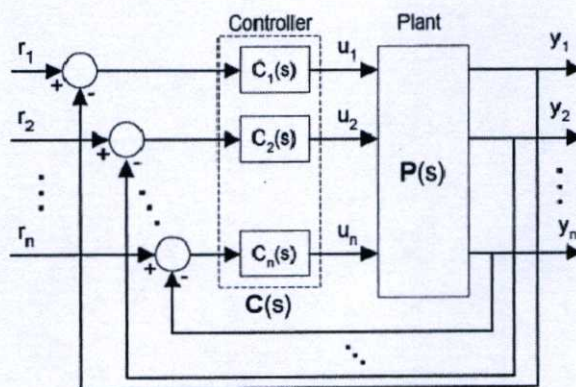
## บทที่ 4

# การออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง โดยวิธีกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ CRA

การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ CRA สำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงนี้ สามารถแบ่งเป็น 2 กรณีคือกรณีเฟสต่ำสุดและเฟสไม่ต่ำสุดและในแต่ละกรณีจะแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเมื่อต้องการปรับความเร็วและการปรับอัตราการหน่วงของผลตอบสนองของระบบควบคุม โดยจะอธิบายในหลักการและวิเคราะห์สมการที่มาของการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทั้งนี้โปรแกรมที่สร้างขึ้นสำหรับหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแสดงรายละเอียดดังภาคผนวก ข.

### 4.1 โครงสร้างระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบแยกอิสระ

ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการ MIMO นั้นตัวควบคุมแบบแยกอิสระจะได้รับความนิยมในการนำไปประยุกต์ใช้งานมากกว่าตัวควบคุมแบบไม่แยกอิสระ ดังได้อธิบายมาแล้วในเบื้องต้น ซึ่งรูปโครงสร้างของระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบแยกอิสระสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 โดย  $G(s)$  คือเมทริกฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการและ  $C(s)$  คือเมทริกแบบจตุรัสมีขนาดเท่ากับจำนวนอินพุทของกระบวนการ ในขณะที่  $G(s)$  ที่ไม่จำเป็นต้องเป็นเมทริกจัตุรัสก็ได้ ซึ่งอาจจะมีจำนวนอินพุทที่มากกว่าหรือน้อยกว่าจำนวนเอาต์พุทก็ได้ แต่ในกรณีนี้จะกำหนดให้  $G(s)$  เป็นเมทริกจัตุรัส โดย  $G(s)$  และ  $C(s)$  สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



รูปที่ 4.1 โครงสร้างระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบอิสระ

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

$$C(s) = \begin{bmatrix} C_1(s) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & C_2(s) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & C_n(s) \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมแบบแยกอิสระสำหรับระบบควบคุมนั้น จะต้องทำการออกแบบเลือกจับคู่อินพุท-เอาต์พุทที่เหมาะสมในการควบคุมเป็นอย่างแรกก่อน จากนั้นจึงทำการออกแบบตัวควบคุม โดยจะทำการออกแบบสำหรับแต่ละวงรอบเอาต์พุทแยกจากกัน

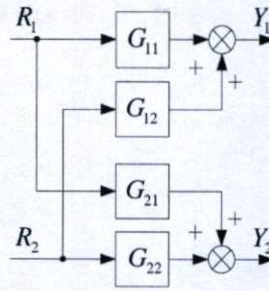
#### 4.2 โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง

กระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงเป็นกระบวนการที่สามารถเลื่อนตำแหน่งซีโรของกระบวนการให้อยู่ด้านซ้ายหรือด้านขวาของระนาบ  $s$  ได้โดยการปรับค่าตำแหน่งขั้ว  $\alpha_1$  และ  $\alpha_2$  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

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



รูปที่ 4.2 บล็อกไดอะแกรมสำหรับกระบวนการระดับน้ำแบบ 4 ถัง

เมื่อพิจารณาจากองค์ประกอบของเมทริกซ์ฟังก์ชัน  $G_{11}(s), G_{22}(s)$  เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของ  $R_1 - Y_1$  และ  $R_2 - Y_2$  และมี  $G_{12}(s), G_{21}(s)$  เป็นการคัปปลิงระหว่างวงรอบควบคุมของฟังก์ชันถ่ายโอน ผลของการคัปปลิงนี้เราเรียกว่าอินเตอร์แอคชัน (Interaction) ที่ให้ผลกระทบต่อระบบควบคุมได้หลายลักษณะ ในกรณีนี้ผลกระทบดังกล่าวสามารถกำจัดหรือลดผลกระทบได้โดยการใช้เทคนิคการดีคัปปลิง

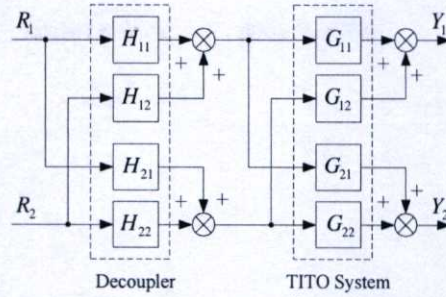
#### 4.2.1 โครงสร้างกระบวนการระดับน้ำ 4 ถังที่ประกอบด้วยชุดดีคัปปลิง กรณีเฟสต่ำสุด

โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง กรณีเฟสต่ำสุดแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 จากผลของ  $G_{12}(s), G_{21}(s)$  ที่เป็นการคัปปลิงระหว่างวงรอบควบคุมของฟังก์ชันถ่ายโอน ในกรณีนี้ผลกระทบดังกล่าวสามารถกำจัดหรือลดผลกระทบได้โดยการใช้เทคนิคการดีคัปปลิง วิธีการดีคัปปลิงใช้หลักการจัดรูปเมทริกซ์ฟังก์ชันของระบบให้เป็นเมทริกซ์แนวทแยงโดยการใช้ดีคัปปลิงเมทริกซ์ รูปที่ 4.3 แสดงถึงโครงสร้างของดีคัปปลิงที่ประกอบกับกระบวนการระดับน้ำแบบ 4 ถัง ดีคัปปลิงเมทริกซ์สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.5)

$$H(s) = \begin{bmatrix} H_{11}(s) & H_{12}(s) \\ H_{21}(s) & H_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

เมื่อทำการดีคัปปลิงโดยดีคัปปลิงเมทริกซ์แล้วเราจะได้เมทริกซ์ฟังก์ชันถ่ายโอนซึ่งอยู่ในรูป เมทริกซ์ทแยงซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} G_{n1} & 0 \\ 0 & G_{n2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$



**รูปที่ 4.3** โครงสร้างของกระบวนการระดับน้ำ 4 ดังที่ประกอบด้วยชุดดีคัปปลิ่ง  
ในกรณีเฟสต่ำสุด

จากวิธีการออกแบบชุดดีคัปปลิ่งนั้น กำหนดให้  $H_{11}$  และ  $H_{12} = I$  และสำหรับ  $H_{21}$  และ  $H_{22}$  สามารถหาได้จาก

$$H_{12}(s) = -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} \quad (4.7 \text{ ก})$$

$$H_{22}(s) = -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} \quad (4.7 \text{ ข})$$

เมื่อได้ค่า  $H_{11}$ ,  $H_{12}$ ,  $H_{21}$  และ  $H_{22}$  เราสามารถจัดรูปแบบของระบบแบบกระจายส่วน  
ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$Y_1 = \left( G_{11}(s) - \frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} G_{12}(s) \right) R_1 - 0R_2 = G_{n1}(s)R_1 \quad (4.8 \text{ ก})$$

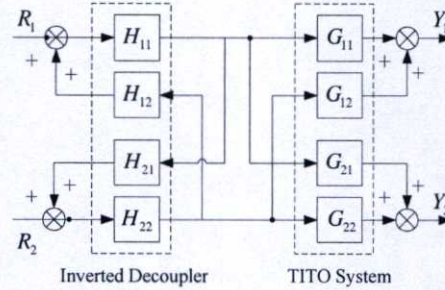
$$Y_2 = 0R_1 - \left( G_{22}(s) - \frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} G_{21}(s) \right) R_2 = G_{n2}(s)R_2 \quad (4.8 \text{ ข})$$

จากสมการดังกล่าวจะเห็นได้ว่า การอินเตอร์แอคชันระหว่างวงรอบควบคุมจะถูกกำจัด  
ออกไป และจะได้ระบบใหม่ที่ถูกทำให้มีลักษณะการกระจายตัวเพื่อสะดวกในการควบคุม และ  
สามารถนำวิธีการออกแบบระบบควบคุมแบบ SISO มาประยุกต์ใช้งานกับระหว่างวงรอบควบคุม  
ได้

#### 4.2.2 โครงสร้างกระบวนการระดับน้ำ 4 ดังที่ประกอบด้วยชุดดีคัปปลิ่ง กรณีเฟสไม่ ต่ำสุด

เช่นเดียวกับกรณีเฟสต่ำสุด โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ดัง  
กรณีเฟสไม่ต่ำสุดแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 จากผลของ  $G_{12}(s)$ ,  $G_{21}(s)$  ที่เป็นการคัปปลิ่งระหว่าง  
วงรอบควบคุมของฟังก์ชันถ่ายโอนในกรณีนี้ผลกระทบดังกล่าวสามารถกำจัดหรือลดผลกระทบ  
ได้โดยการใช้เทคนิคการดีคัปปลิ่งแต่เนื่องด้วยกรณีเฟสไม่ต่ำสุดนี้การควบคุมทำได้ยาก

เนื่องจากกรณีเฟสไม่ต่ำสุดจะมีซีโรอยู่ด้านขวาของระนาบ  $s$  ทำให้การต่อวงรอบควบคุมจึงใช้การต่อชุดคัตกลับป้อนให้มีลักษณะอินเวอร์สเพื่อให้วงรอบควบคุมสามารถควบคุมได้ในสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงกรณีเฟสไม่ต่ำสุด ดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 หลักการการคัตกลับป้อนก็ใช้หลักการเช่นเดียวกันกับกรณีเฟสต่ำสุด กล่าวคือคัตกลับป้อนเมทริกสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.9)



รูปที่ 4.4 โครงสร้างของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงที่ประกอบด้วยชุดคัตกลับป้อนแบบอินเวอร์สคัตกลับป้อนที่ใช้ในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด

$$H(s) = \begin{bmatrix} H_{11}(s) & H_{12}(s) \\ H_{21}(s) & H_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

เมื่อทำการคัตกลับป้อนโดยคัตกลับป้อนเมทริกแล้วเราจะได้ทรานด์เฟอร์เมทริกซึ่งอยู่ในรูปเมทริกทแยงซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} G_{n1} & 0 \\ 0 & G_{n2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

จากวิธีการออกแบบชุดคัตกลับป้อนนั้น กำหนดให้  $H_{11}$  และ  $H_{12} = I$  และสำหรับ  $H_{21}$  และ  $H_{22}$  สามารถหาได้จาก

$$H_{12}(s) = -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} \quad (4.11 \text{ ก})$$

$$H_{22}(s) = -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} \quad (4.11 \text{ ข})$$

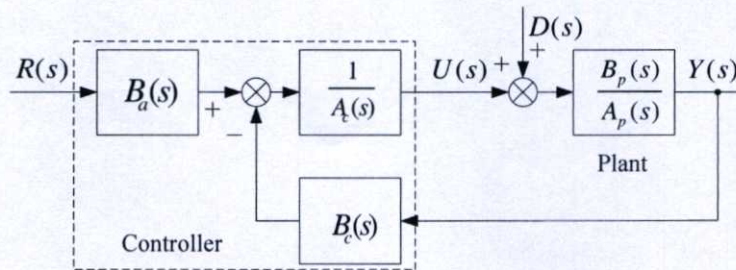
เมื่อได้ค่า  $H_{11}$ ,  $H_{12}$ ,  $H_{21}$  และ  $H_{22}$  เราสามารถจัดรูปแบบของระบบแบบกระจายส่วนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$Y_1 = \left( G_{11}(s) - \frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} G_{12}(s) \right) R_1 - 0R_2 = G_{n1}(s)R_1 \quad (4.12 \text{ ก})$$

$$Y_2 = 0R_1 - \left( G_{22}(s) - \frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} G_{21}(s) \right) R_2 = G_{n2}(s)R_2 \quad (4.12 \text{ ข})$$

### 4.3 การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ CRA

การออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธีกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ (Characteristic Ratio Assignment: CRA) เป็นวิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบพีชคณิต ซึ่งการออกแบบนั้นอยู่บนพื้นฐานขนาดที่สัมพันธ์กันของค่าสัมประสิทธิ์สมการพหุนามคุณลักษณะ (Characteristic Polynomial) ที่มีโครงสร้างของระบบควบคุมดังนี้



รูปที่ 4.5 โครงสร้างมาตรฐานของระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี CRA

โดย

$B_p(s)$  และ  $A_p(s)$  คือสมการโพลีโนเมียลในเศษและส่วนของกระบวนการ  
 $B_c(s)$ ,  $A_c(s)$  และ  $B_a(s)$ ,  $A_a(s)$  คือสมการโพลีโนเมียลของตัวควบคุมที่ออกแบบ  
 จากรูปที่ 4.5 จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมป้อนกลับดังนี้

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{B_a(s)B_p(s)}{A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s)} \quad (4.13)$$

โดยในกรณีของระบบควบคุมกระบวนการระดับ 4 ถึงที่ประกอบด้วยชุดดีคัปปลิ่งจะสามารถแทนตัวแปรได้ดังนี้

$$B_p(s) = p_2s^2 + p_1s + p_0 \quad (4.14)$$

$$A_p(s) = q_3s^3 + q_2s^2 + q_1s + q_0$$

$$B_c(s) = K_p s + K_i$$

$$A_c(s) = s$$

$$B_{d1}(s) = m$$

เมื่อแทนสมการที่ (4.14) ในสมการที่ (4.13) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนและสมการพหุนามคุณลักษณะของระบบควบคุมป้อนกลับดังสมการที่ (4.15) และ (4.16) ตามลำดับ

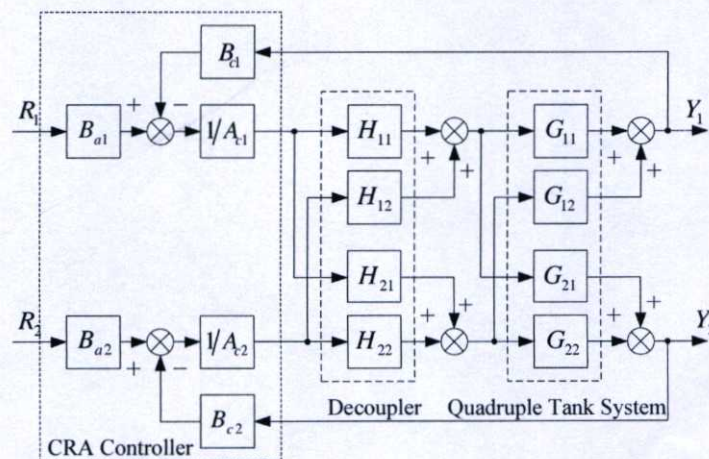
$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{m(p_2 s^2 + p_1 s + p_0)}{q_3 s^4 + (q_2 + K_p p_2) s^3 + (q_1 + K_p p_1 + K_i p_2) s^2 + (q_0 + K_p p_0 + K_i p_1) s + K_i p_0} \quad (4.15)$$

$$P(s) = q_3 s^4 + (q_2 + K_p p_2) s^3 + (q_1 + K_p p_1 + K_i p_2) s^2 + (q_0 + K_p p_0 + K_i p_1) s + K_i p_0 \quad (4.16)$$

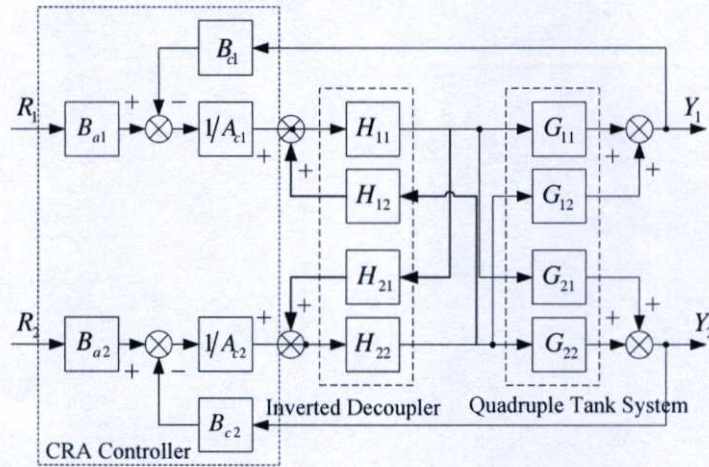
โดยสมการคุณลักษณะที่ได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมป้อนกลับดังสมการที่ 4.16 เป็นสมการคุณลักษณะของระบบควบคุมที่ใช้สำหรับทำการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธี CRA

#### 4.4 การออกแบบตัวควบคุมแบบดีคัปปลิงสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถังโดยวิธี

##### CRA



รูปที่ 4.6 โครงสร้างของระบบควบคุมของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถังโดยใช้ตัวควบคุมแบบ CRA สำหรับกรณีเฟสต่ำสุด



รูปที่ 4.7 โครงสร้างของระบบควบคุมของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถังโดยใช้ตัวควบคุมแบบ CRA สำหรับกรณีเฟสไม่ต่ำสุด

ในการออกแบบตัวควบคุมแบบดีคัปปลิงด้วยวิธี CRA สำหรับกระบวนการระดับ 4 ถังนั้น จะทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของกระบวนการกับตัวควบคุมโดยสำหรับหัวข้อนี้จะใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ จากนั้นจึงนำสมการพหุนามคุณลักษณะไปเปรียบเทียบกับสมการพหุนามคุณลักษณะที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี CRA และทำการแก้สมการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ ซึ่งวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอ ด้วยวิธี CRA อธิบายดังต่อไปนี้

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดและสมการคุณลักษณะของระบบควบคุมป้อนกลับจากการออกแบบด้วยวิธี CRA แสดงดังสมการที่ (4.17) และสมการที่ (4.18) ตามลำดับ

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{a_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (4.17)$$

$$p(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0, \quad \forall a_i > 0 \quad (4.18)$$

การออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะด้วยวิธี CRA ดังสมการที่ (4.18) สามารถทำได้ โดยทำการกำหนดค่า  $\tau$  และค่า  $\alpha_i$  ค่า  $\tau$  เป็นตัวกำหนดความเร็วของผลตอบสนองและค่า  $\alpha_i$  จะกำหนดถึงอัตราकरणของระบบควบคุม โดยการกำหนดค่า  $\alpha_i$  จะต้องกำหนดตามเงื่อนไขของ Lipatov และ Sokolov เพื่อความมีเสถียรภาพของระบบควบคุม แสดงได้ดังนี้

$$\sqrt{\alpha_i \alpha_{i+1}} > 1.4656 \quad \text{สำหรับ } i = 1, 2, \dots, n-2 \quad (4.19)$$

$$\alpha_i \geq 1.12374 \alpha_i^* \quad \text{สำหรับ } i = 2, 3, \dots, n-2 \quad (4.20)$$

$$\alpha_i^* = \frac{1}{\alpha_{i+1}} + \frac{1}{\alpha_i - 1} \quad \text{โดย } \alpha_n = \alpha_0 = \infty \quad (4.21)$$

จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะดังต่อไปนี้

$$\alpha_1 = \frac{a_1^2}{a_0 a_2}, \quad \alpha_2 = \frac{a_2^2}{a_1 a_3}, \quad \dots, \quad \alpha_{n-1} = \frac{a_{n-1}^2}{a_{n-2} a_n} \quad (4.22)$$

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} \quad (4.23)$$

ทำให้สามารถหาอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะในสมการที่ (4.18) ได้จาก

$$\frac{a_4}{a_3} = \frac{\tau}{\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3} \quad (4.24)$$

$$\frac{a_3}{a_2} = \frac{\tau}{\alpha_1 \alpha_2}$$

$$\frac{a_2}{a_1} = \frac{\tau}{\alpha_1}$$

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

เมื่อนำค่าจากสมการ (4.24) ไปแทนในสมการ (4.18) และทำการเทียบสัมประสิทธิ์สมการพหุนามคุณลักษณะในสมการที่ (4.18) กับสัมประสิทธิ์สมการพหุนามคุณลักษณะในสมการที่ (4.17) แล้วแก้สมการเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอโดยจากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสมการคุณลักษณะ

$$\frac{\tau}{\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3} = \frac{q_3}{q_2 + K_p p_2} \quad (4.25)$$

$$\tau = \frac{q_1 + K_p p_0 + K_i p_1}{K_i p_0}$$

และจัดรูปสมการได้ดังสมการที่(4.26)

$$K_p = \frac{1}{\tau p_2} [\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 q_3 - \tau q_2] \quad (4.26)$$

$$K_i = \frac{(q_1 + K_p p_0)}{(\tau p_0 - p_1)}$$

#### 4.4.1 การปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุม

ในการปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุม สามารถทำได้โดยการปรับค่า  $\tau$  โดยวิธี CRA นั้นจะใช้พารามิเตอร์  $k$  ในการปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุม ซึ่งวิธีการปรับค่า  $\tau$  แสดงได้ดังนี้

จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะและพารามิเตอร์  $k$  ดังต่อไปนี้

$$\tau = \frac{1}{k} \left( \frac{a_1}{a_0} \right) \quad (4.27)$$

โดยเพิ่มค่า  $k$  ขึ้นเมื่อต้องการให้ค่า  $\tau$  มีค่าน้อยลงซึ่งก็คือผลตอบสนองของระบบควบคุมเร็วขึ้นและในทางกลับกัน กำหนดให้ค่า  $k$  มีค่าอยู่ในช่วง  $0 < k < 1$  เมื่อต้องการให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมจะช้าลง

จากนั้นนำค่า  $k$  ที่กำหนดแทนลงในสมการที่ (4.17) ในรูปแบบที่แสดงดังสมการที่ (4.27)

$$p(s) = a_n s^n + k a_{n-1} s^{n-1} + \dots + k^{n-1} a_1 s + k^n a_0 \quad (4.28)$$

ในกรณีสำหรับระบบควบคุมแบบตีกลับถึงสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง จะได้สมการพหุนามคุณลักษณะดังสมการที่ (4.28)

$$P(s) = q_3 s^4 + (q_2 + K_p p_2) k s^3 + (q_1 + K_p p_1 + K_i p_2) k^2 s^2 + (q_0 + K_p p_0 + K_i p_1) k^3 s + K_i p_0 k^4 \quad (4.29)$$

เทียบสัมประสิทธิ์สมการพหุนามคุณลักษณะในสมการที่ (4.29) กับ สัมประสิทธิ์สมการพหุนามคุณลักษณะในสมการที่ (4.18) แก้สมการเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอโดยจากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสมการคุณลักษณะ

$$\frac{\tau}{k\alpha_1\alpha_2\alpha_3} = \frac{q_3}{q_2 + K_p p_2} \quad (4.30)$$

$$\frac{\tau}{k} = \frac{q_1 + K_p p_0 + K_i p_1}{K_i p_0}$$

และจัดรูปสมการได้ดังสมการที่(4.31)

$$K_p = \frac{1}{\tau p_2} [k\alpha_1\alpha_2\alpha_3 q_3 - \tau q_2] \quad (4.31)$$

$$K_i = \frac{k(q_1 + K_p p_0)}{(\tau p_0 - k p_1)}$$

#### 4.4.2 การปรับอัตราส่วนวงของระบบควบคุม

ในการปรับอัตราส่วนวงของระบบควบคุม สามารถทำได้โดยการปรับค่า  $\alpha_i$  โดยถ้าหากระบบควบคุมมีอันดับสูงๆ จะทำให้มีจำนวนพารามิเตอร์  $\alpha_i$  ในการปรับหลายตัว ทำให้ไม่สะดวกและยุ่งยากต่อการปรับค่าพารามิเตอร์  $\alpha_i$  โดยวิธี CRA นั้นจะใช้พารามิเตอร์  $k$  เพียงตัวเดียว ในการปรับอัตราส่วนวงของระบบควบคุม ซึ่งทำให้สะดวกและง่ายต่อการปรับอัตราส่วนวง วิธีการปรับค่า  $\alpha_i$  แสดงได้ดังนี้

จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะและพารามิเตอร์  $k$  ดังต่อไปนี้

$$\alpha_1 = k \frac{a_1^2}{a_0 a_2}, \quad \alpha_2 = k \frac{a_2^2}{a_1 a_3}, \quad \dots, \quad \alpha_{n-1} = k \frac{a_{n-1}^2}{a_{n-2} a_n} \quad (4.32)$$

วิธีการปรับอัตราส่วนวงของระบบควบคุมนั้น จะต้องค่อยๆปรับค่า  $k$  จนกว่าจะได้อัตราส่วนวงของระบบควบคุมตามที่ต้องการ โดยถ้ากำหนดให้  $k > 1$  จะทำให้อัตราส่วนวงของระบบควบคุมเพิ่มขึ้น แต่ถ้า  $0 < k < 1$  จะทำให้อัตราส่วนวงของระบบควบคุมลดลง จากนั้นนำค่า  $k$  ที่กำหนดแทนลงในสมการที่ (4.18) ในรูปแบบที่แสดงดังสมการที่ 4.32

$$p(s) = a_n s^n + k^{n-1} a_{n-1} s^{n-1} + \dots + k^{\frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{2}n} a_1 s + k^{\frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{2}n} a_0 \quad (4.33)$$

ในกรณีสำหรับระบบควบคุมแบบคิ่คัปปลิงสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง จะได้สมการพหุนามคุณลักษณะดังสมการที่ 4.34

$$P(s) = q_3 s^4 + (q_2 + K_p p_2) k^3 s^3 + (q_1 + K_p p_1 + K_i p_2) k^5 s^2 + (q_0 + K_p p_0 + K_i p_1) k^6 s + K_i p_0 k^6 \quad (4.34)$$

เทียบสัมประสิทธิ์สมการพหุนามคุณลักษณะในสมการที่ 4.33 กับ สัมประสิทธิ์สมการพหุนามคุณลักษณะในสมการที่ 4.18 แก้สมการเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีโดยจากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสมการคุณลักษณะ

$$\frac{\tau}{k^3 \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3} = \frac{q_3}{q_2 + K_p p_2} \quad (4.35)$$

$$\tau = \frac{q_1 + K_p p_0 + K_i p_1}{K_i p_0}$$

และจัดรูปสมการได้ดังสมการที่(4.36)

$$K_p = \frac{1}{\tau p_2} [k^3 \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 q_3 - \tau q_2] \quad (4.36)$$

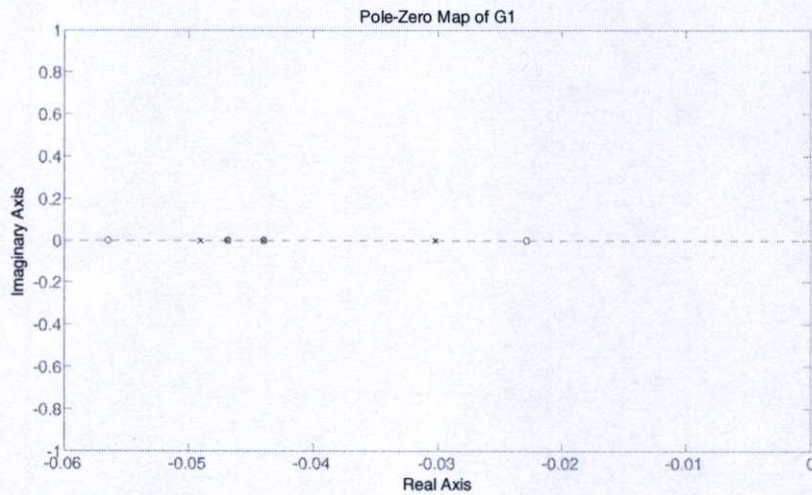
$$K_i = \frac{(q_1 + K_p p_0)}{(\tau p_0 - p_1)}$$

#### 4.5 การลดรูปอันดับของสมการโพลีโนเมียลของฟังก์ชันถ่ายโอน

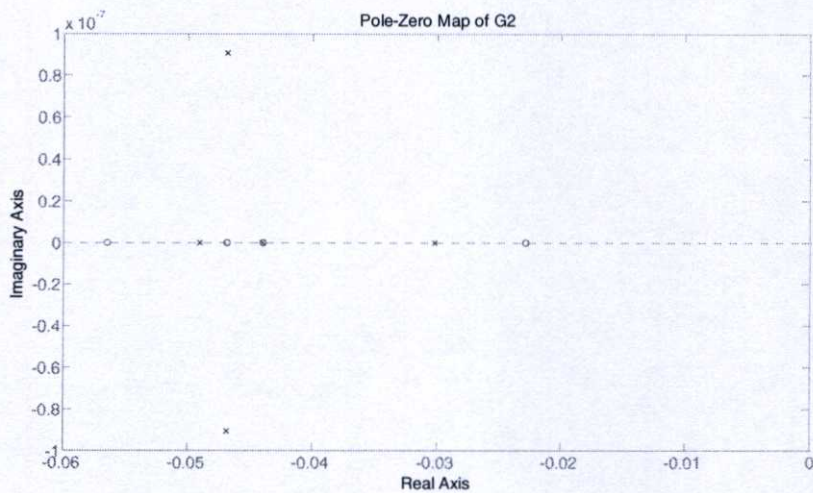
จากหัวข้อดังกล่าวมาข้างต้นพบว่าสำหรับการแทนตัวแปรต่างๆ ของกระบวนการและการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของชุดคิ่คัปปลิงนั้น จะเห็นได้ว่าฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการโพลีโนเมียลสำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบที่ 1 และฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบที่สอง ดังตัวอย่างในสมการที่ (4.37) และ (4.38) นั้น

$$G_1(s) = \frac{2.104 \times 10^5 s^4 + 3.442 \times 10^4 s^3 + 2024 s^2 + 49.56 s + 0.4054}{6.14 \times 10^6 s^5 + 1.295 \times 10^6 s^4 + 1.073 \times 10^5 s^3 + 4337 s^2 + 84.93 s + 0.6361} \quad (4.37)$$

$$G_2(s) = \frac{2.104 \times 10^5 s^4 + 3.442 \times 10^4 s^3 + 2024 s^2 + 49.56 s + 0.4054}{6.135 \times 10^6 s^5 + 1.334 \times 10^6 s^4 + 1.137 \times 10^5 s^3 + 4724 s^2 + 94.74 s + 0.7235} \quad (4.38)$$



(ก)



(ข)

(ก) ตำแหน่งโพล-ซีโรของ  $G_1(s)$  (ข) ตำแหน่งโพล-ซีโรของ  $G_2(s)$

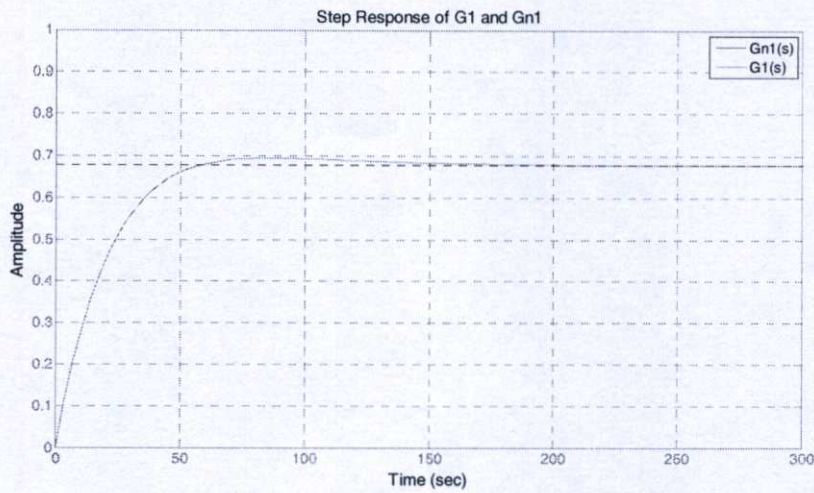
**รูปที่ 4.8** แสดงตำแหน่งของโพล-ซีโรของทรานเฟอร์ฟังก์ชันของ  $G_1(s)$  และ  $G_2(s)$

จะเห็นได้ว่าฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการทั้งสองสมการมีอันดับเท่ากับ 5 โดยมีซีโร 4 ตัวและโพล 5 ตัว ซึ่งเป็นสมการโพลีโนเมียลที่มีอันดับสูง การที่จะนำฟังก์ชันถ่ายโอนนี้ไปออกแบบตัวควบคุม อาจจะทำให้เกิดความยุ่งยากแก่ผู้ที่ทำการออกแบบ และเมื่อพิจารณาถึงกรณีที่ฟังก์ชันถ่ายโอนมีตำแหน่งของซีโรและโพลที่อยู่ในตำแหน่งซ้อนทับกันซึ่งตำแหน่งของซีโรและโพลดังกล่าวสามารถที่จะทำการหักล้างกันออกไปได้ ซึ่งในที่นี้ได้้นำโปรแกรม MatLab มาใช้ในการคำนวณเพื่อลดอันดับของสมการโพลีโนเมียล โดยการใช้คำสั่ง *min real* ซึ่งเป็นคำสั่งที่ช่วยใน

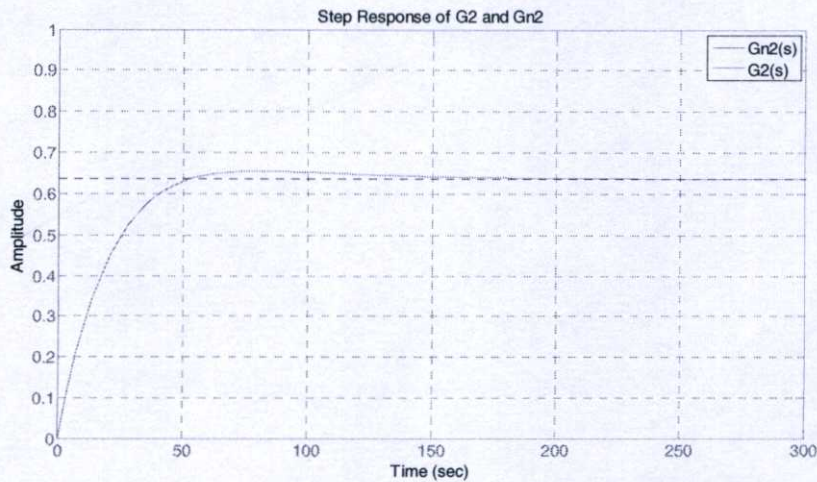
การแยกตัวประกอบเพื่อคำนวณหาค่าตำแหน่งซีโรและโพลที่อยู่ในตำแหน่งที่สามารถหักล้างกันได้ (ถ้ามี) และจะช่วยกำจัดตำแหน่งของซีโรและโพลนั้นออกไปให้เหลือเพียงซีโรและโพลที่ไม่ซ้ำกัน สำหรับสมการโพลีโนเมียลของฟังก์ชันถ่ายโอน  $G_1(s)$  และ  $G_2(s)$  จะสามารถเขียนได้ใหม่ดังสมการที่ (4.39) และ (4.40) ตามลำดับ

$$G_{n1}(s) = \frac{0.03427s^2 + 0.002135s + 2.586 \times 10^{-5}}{s^3 + 0.1097s^2 + 0.003808s + 4.057 \times 10^{-5}} \quad (4.39)$$

$$G_{n2}(s) = \frac{0.03429s^2 + 0.002137s + 2.588 \times 10^{-5}}{s^3 + 0.1162s^2 + 0.004216s + 4.618 \times 10^{-5}} \quad (4.40)$$



รูปที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบของผลตอบสนองแบบขั้นบันไดระหว่าง  $G_1(s)$  และ  $G_{n1}(s)$



รูปที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบของผลตอบสนองแบบขั้นบันไดระหว่าง  $G_2(s)$  และ  $G_{n2}(s)$

จากรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองต่ออินพุตแบบขั้นบันไดในส่วน  
ของ  $G_1(s)$ ,  $G_2(s)$  และ  $G_{n1}(s)$ ,  $G_{n2}(s)$  มีลักษณะผลสนองเช่นเดียวกันและสามารถซ้อนทับกัน  
ได้โดยสนิท ดังนั้นจึงสามารถนำเอาฟังก์ชันถ่ายโอน  $G_{n1}(s)$ ,  $G_{n2}(s)$  มาทดแทน  $G_1(s)$ ,  $G_2(s)$   
ได้ในการออกแบบตัวควบคุม

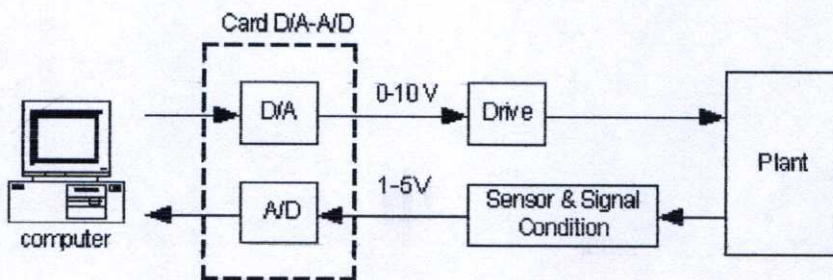
#### 4.6 สรุป

การออกแบบตัวควบคุมแบบดิคัปปลิงสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง ด้วยวิธีกำหนด  
อัตราส่วนคุณลักษณะ CRA ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 นั้น เป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการออกแบบตัว  
ควบคุมผู้ทำวิทยานิพนธ์ตั้งใจนำเสนอในจุดประสงค์ ของความสะดวกในการปรับค่าพารามิเตอร์  
ของตัวควบคุม โดยยกตัวอย่างใช้กับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง ซึ่งด้วยวิธีการปรับแต่ง  
พารามิเตอร์ที่โออย่างมีรูปแบบด้วยวิธี CRA ดังที่อธิบายด้วยสมการข้างต้น สามารถปรับความเร็ว  
และรูปทรงของผลตอบสนองของระบบควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังจะแสดงให้เห็นได้จาก  
ผลการทดลองในบทต่อไป

## การจำลองและการทดลองระบบควบคุม

ในบทนี้จะกล่าวถึง โครงสร้างของระบบควบคุม และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการควบคุมกับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถังแบบ รวมถึงพารามิเตอร์และจุดการทำงานของกระบวนการของกระบวนการทั้งในกรณีเฟสต่ำสุดและเฟสไม่ต่ำสุด เพื่อนำไปหาเมทริกฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการซึ่งนำไปสู่การวิเคราะห์กระบวนการและการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ ด้วยวิธี CRA หลังจากนั้นจะนำตัวควบคุมที่ได้ออกแบบ ไปทำการทดสอบโดยจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้ ขั้นตอนแรกทำการทดสอบผลตอบสนองของระบบควบคุม เมื่อกำหนดให้อินพุตอ้างอิงของระบบควบคุมเป็นแบบขั้นบันได ขั้นตอนที่สองทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของการปรับค่าพารามิเตอร์  $k$  ว่ามีผลอย่างไรต่อค่าเวลาเข้าที่ของผลตอบสนองของระบบควบคุม ขั้นตอนที่สามทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของการปรับค่าพารามิเตอร์  $k$  ว่ามีผลอย่างไรต่อเปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินของผลตอบสนองของระบบควบคุม ขั้นตอนที่สี่จะทำการเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุมระหว่างตัวควบคุมที่ออกแบบโดยวิธี CRA และตัวควบคุมที่ออกแบบโดยวิธีทางเดินราก (Root Locus) สำหรับกระบวนการแบบต่ำสุดและเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ประกอบด้วยชุดดีคัมปลิ่ง (อินเวอร์สดีคัมปลิ่ง) กับระบบควบคุมที่ไม่มีชุดดีคัมปลิ่งในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด ซึ่งหลังจากที่ได้ทำการศึกษาถึงผลจากการจำลองการทำงานตามขั้นตอนดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จะนำตัวควบคุมที่ได้ออกแบบมาทำการควบคุมกับกระบวนการจริง โดยมีขั้นตอนการทดลองเช่นเดียวกับขั้นตอนการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB

### 5.1 โครงสร้างระบบควบคุมของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง



รูปที่ 5.1 โครงสร้างระบบควบคุมของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง

รูปที่ 5.1 แสดงโครงสร้างระบบควบคุมของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง ซึ่งประกอบด้วย ส่วนต่างๆดังนี้ ส่วนแรกคือคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) จะทำหน้าที่ในการรับและส่งข้อมูลจาก อินเตอร์เฟสการ์ด(Card D/A-A/D) โดยจะนำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลเพื่อสร้างสัญญาณควบคุม ให้แก่ระบบควบคุม ส่วนที่สองคืออินเตอร์เฟสการ์ดเป็นการ์ดแบบ PCI โดยจะทำหน้าที่ในการ รับสัญญาณแบบอนาล็อกจากอุปกรณ์วัดระดับน้ำของถังที่ 1 และถังที่ 2 และทำการแปลงให้เป็น สัญญาณดิจิทัล เพื่อส่งผลให้คอมพิวเตอร์ทำการประมวลผลในการสร้างสัญญาณควบคุม จากนั้นจะทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณควบคุมซึ่งอยู่ในรูปแบบดิจิทัลให้เป็นแบบอนาล็อกเพื่อ ส่งให้กับวงจรถับกระแสของปั้มน้ำ ส่วนที่สามคืออุปกรณ์ขับกระแสของปั้มน้ำ โดยเป็นวงจรถับ กระแสแบบเชิงเส้น (Linear Amplifier) ทำหน้าที่ในการรับสัญญาณควบคุมที่อยู่ในรูปแบบ อนาล็อกจากอินเตอร์เฟสการ์ดแล้วขยายขนาดสัญญาณแรงดันให้มากขึ้นเพื่อจ่ายให้กับปั้มน้ำและ ส่วนสุดท้ายคืออุปกรณ์วัดระดับน้ำของถังที่สองซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดความดันแตกต่าง(Differential Pressure Transmitter ) ซึ่งจะทำการวัดระดับน้ำในถังและให้สัญญาณอนาล็อกมาตรฐาน ส่งไปยัง อินเตอร์เฟสการ์ดต่อไป รายละเอียดของอุปกรณ์และวงจรถับที่ใช้ในการทดลองนั้นแสดงใน ภาคผนวก ก.

## 5.2 พารามิเตอร์และจุดการทำงานของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง

จากสมการที่ 2.1 จะสังเกตได้ว่า พารามิเตอร์ของกระบวนการสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ด้วยกันคือ พารามิเตอร์ที่ทราบค่าและมีลักษณะคงที่ ประกอบด้วย  $A_n, a_{oi}$  โดย  $i=1 \sim 4$  และ  $g$  แสดงได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ของกระบวนการ

$A_1, A_2, A_3, A_4$ [ $\text{cm}^2$ ]	70
$a_1, a_2, a_3, a_4$ [ $\text{cm}^2$ ]	0.5028
$g$ [ $\text{cm} / \text{s}^2$ ]	981

และพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่านั้นมีลักษณะเป็นตัวแปรซึ่งขึ้นอยู่กับการกำหนดค่าองค์ประกอบ ด้วย  $\alpha_i, u_i$  โดย  $i=1 \sim 2$  และ  $\beta_i$  โดย  $i=1 \sim 4$  ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดจุดการทำงานของ กระบวนการที่มีคุณลักษณะเฟสต่ำสุด ( $P_-$ ) และจุดทำงานของกระบวนการที่คุณลักษณะของ กระบวนการเป็นแบบเฟสไม่ต่ำสุด ( $P_+$ )

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

	$P_-$	$P_+$
$(h_1^0, h_2^0)$ [cm]	(3.4, 3.0)	(3.5, 2.4)
$(h_3^0, h_4^0)$ [cm]	(2.0, 1.0)	(2.0, 1.5)
$(u_1^0, u_2^0)$ [V]	(7, 7)	(7, 7)
$(k_1, k_2)$ [cm <sup>3</sup> / V.s]	(3.237, 3.218)	(3.240, 3.154)
$(\alpha_1, \alpha_2)$	(0.741, 0.746)	(0.444, 0.457)
$(\beta_1, \beta_2)$	(0.549, 0.587)	(0.530, 0.657)
$(\beta_3, \beta_4)$	(0.182, 0.263)	(0.381, 0.462)

สำหรับจุดการทำงานในกรณีเฟสต่ำสุด ( $P_-$ ) และเฟสไม่ต่ำสุด ( $P_+$ ) จะได้ค่าเวลาคงตัวดังนี้

	$P_-$	$P_+$
$(T_1, T_2)$	(22.7286, 21.3435)	(22.1892, 14.8226)
$(T_3, T_4)$	(33.0849, 20.3713)	(23.3331, 16.6643)

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แทนในสมการ(2.4) จะได้เมทริกฟังก์ชันถ่ายโอน ณ จุดการทำงานในกรณีเฟสต่ำสุด ( $P_-$ ) และเฟสไม่ต่ำสุด ( $P_+$ ) ดังนี้

$$G_{p-}(s) = \begin{bmatrix} \frac{0.7235}{21.11s + 1} & \frac{0.2465}{1031s^2 + 69.96s + 1} \\ \frac{0.2222}{443.3s^2 + 42.45s + 1} & \frac{0.6361}{18.55s + 1} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

และ

$$G_{p+}(s) = \begin{bmatrix} \frac{0.456}{22.19s + 1} & \frac{0.5429}{517.7s^2 + 45.52s + 1} \\ \frac{0.3815}{247s^2 + 31.49s + 1} & \frac{0.3052}{14.82s + 1} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

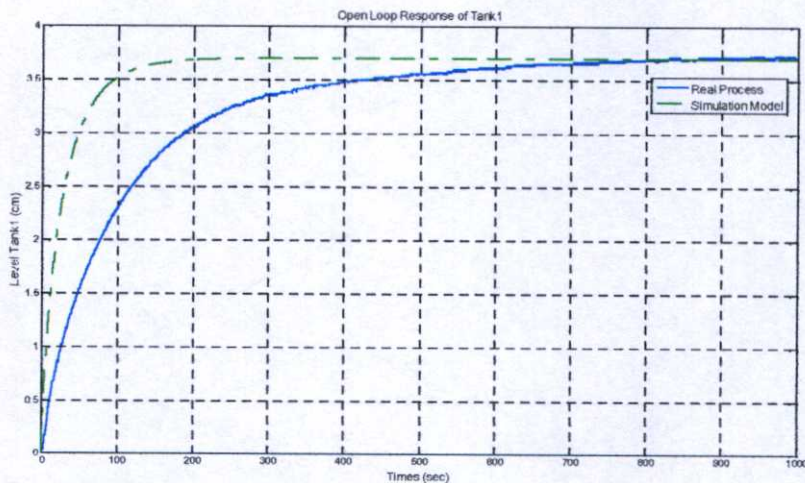
จากเมทริกฟังก์ชันถ่ายโอน ณ จุดการทำงานในกรณีเฟสต่ำสุด ( $P_-$ ) และเฟสไม่ต่ำสุด ( $P_+$ ) เมื่อแทนในสมการ (4.7 ก) และ (4.7 ข) จะสามารถแสดงดีคัมปลิงเมทริกของกระบวนการได้ดังนี้

$$H_{p-}(s) = \left[ \begin{array}{c|c} 1 & \frac{5.205s + 0.2465}{746.1s^2 + 50.61s + 0.7235} \\ \hline \frac{4.121s + 0.2222}{282s^2 + 27s + 0.6361} & 1 \end{array} \right] \quad (5.3)$$

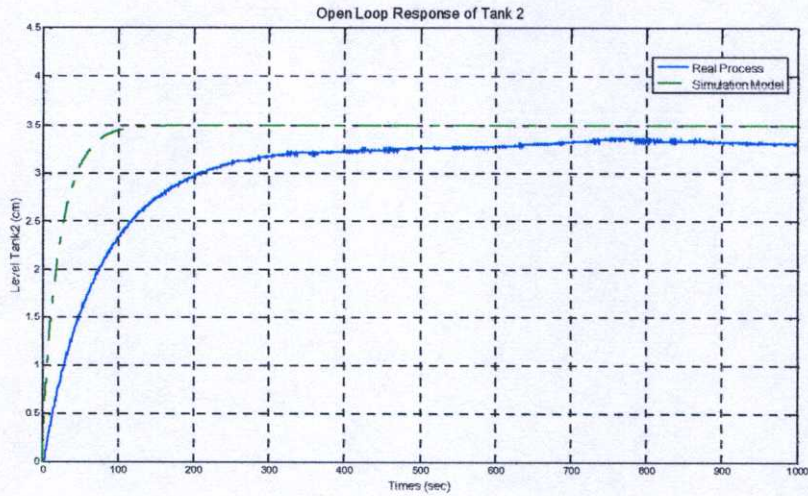
และ

$$H_{p+}(s) = \left[ \begin{array}{c|c} 1 & \frac{12.05s + 0.5429}{236.1s^2 + 20.76s + 0.456} \\ \hline \frac{5.654s + 0.3815}{75.39s^2 + 9.61s + 0.3052} & 1 \end{array} \right] \quad (5.4)$$

สำหรับการทดสอบความถูกต้องหรือความแม่นยำของแบบจำลอง ว่ามีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จากกระบวนการจริงมากน้อยเพียงใด จะทำการทดสอบโดยใช้แบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (2.1) เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากกระบวนการจริง โดยจะทำการจ่ายแรงดันอินพุตขนาด 7 โวลต์ให้กับอุปกรณ์ขับเคลื่อนปั้มน้ำและบันทึกผลตอบสนองที่ได้จากกระบวนการจริงและจากการจำลองโดยโปรแกรม MATLAB ซึ่งผลเปรียบเทียบที่ได้จากผลตอบสนองของกระบวนการจริงกับผลแบบจำลองในกรณีเฟสต่ำสุดและเฟสไม่ต่ำสุด แสดงได้ดังรูปที่ 5.2 และรูปที่ 5.3



(ก)

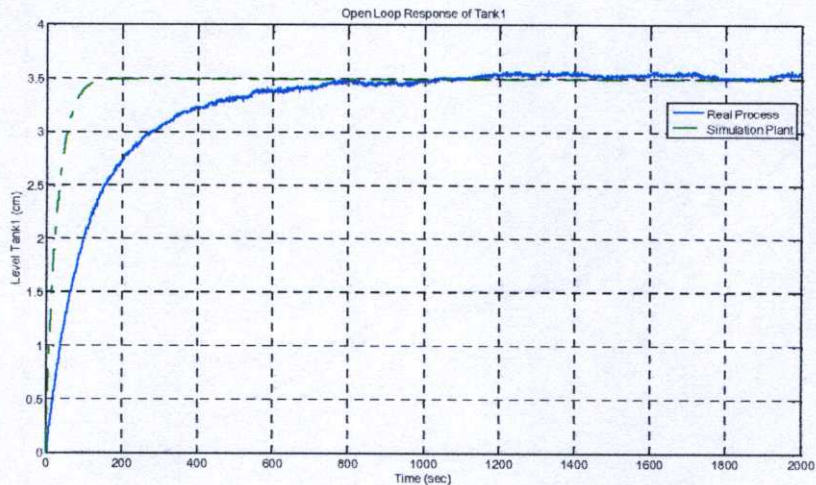


(ข)

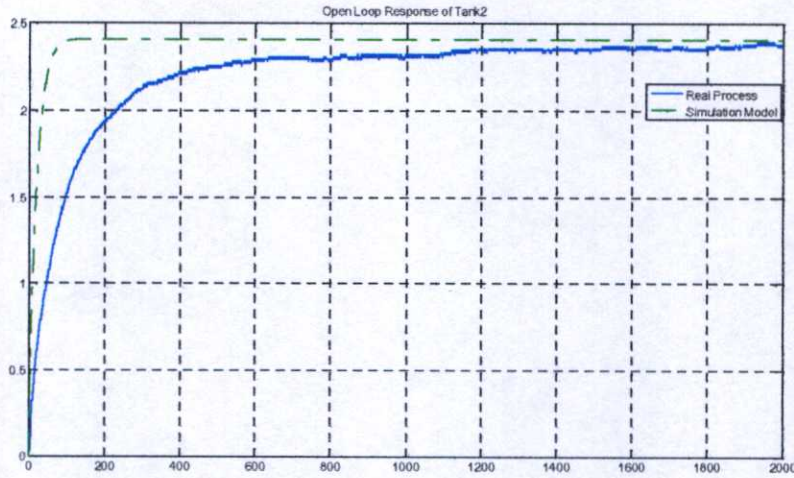
(ก) ระดับน้ำของถังที่ 1 (ข) ระดับน้ำของถังที่ 2

รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบผลตอบสนองวงเปิดของกระบวนการกับแบบจำลองในกรณีเฟสต่ำสุด

จากรูปที่ 5.2 (ก) และรูปที่ 5.2 (ข) จะสังเกตเห็นได้ว่าผลตอบสนองวงเปิดของแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับถังที่ 1 และถังที่ 2 นั้นจะใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมาก โดยค่าความแตกต่างหรือความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวระหว่างผลตอบสนองจากแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นกับกระบวนการจริงจะมีค่าไม่เกิน 10 %



(ก)



(ข)

(ก) ระดับน้ำของถังที่ 1 (ข) ระดับน้ำของถังที่ 2

รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบผลตอบสนองวงเปิดของกระบวนการกับแบบจำลองในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด

จากรูปที่ 5.3 (ก) และรูปที่ 5.3 (ข) จะสังเกตเห็นได้ว่าผลตอบสนองวงเปิดของแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับถังที่ 1 และถังที่ 2 นั้นจะใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมาก โดยค่าความแตกต่างหรือความผิดพลาดที่สถานะคงตัวระหว่างผลตอบสนองจากแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นกับกระบวนการจริงจะมีค่าไม่เกิน 10 %

### 5.3 กระบวนการระดับน้ำ 4 ถังแบบตีคัปปลิงกรณีเฟสต่ำสุด

#### 5.3.1 โครงสร้างและคุณลักษณะของกระบวนการ

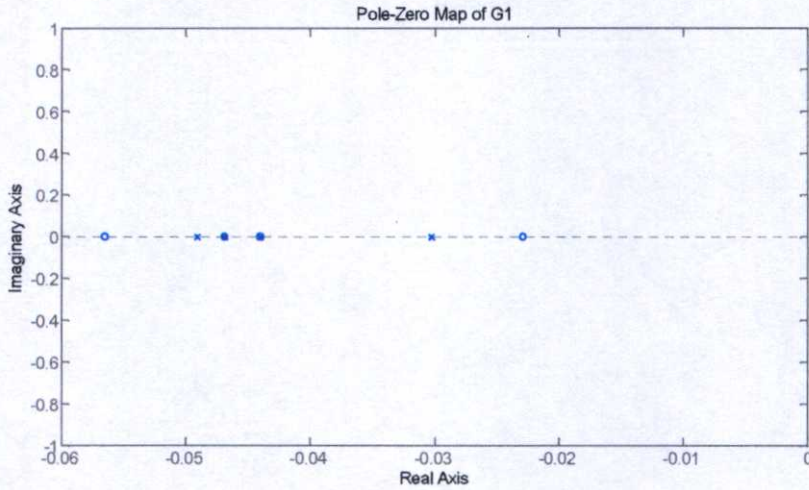
พิจารณาโครงสร้างของกระบวนการสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถังแบบตีคัปปลิงกรณีเฟสต่ำสุดนั้น จากเมทริกซ์ฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ (5.1) และตีคัปปลิงเมทริกซ์ในสมการที่ (5.3) นั้น เมื่อพิจารณาตามเงื่อนไขการออกแบบระบบควบคุมแบบกระจายส่วนดังได้อธิบายมาแล้วในหัวข้อ 4.2 จะสามารถแสดงฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการได้ดังนี้

$$G_1(s) = \frac{2.104 \times 10^5 s^4 + 3.442 \times 10^4 s^3 + 2024 s^2 + 49.56 s + 0.4054}{6.14 \times 10^6 s^5 + 1.295 \times 10^6 s^4 + 1.073 \times 10^5 s^3 + 4337 s^2 + 84.93 s + 0.6361} \quad (5.5)$$

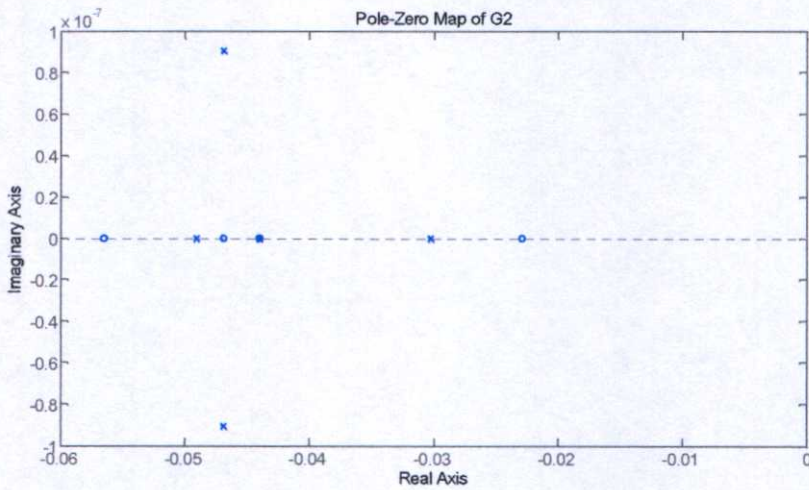
$$G_2(s) = \frac{2.104 \times 10^5 s^4 + 3.442 \times 10^4 s^3 + 2024 s^2 + 49.56 s + 0.4054}{6.135 \times 10^6 s^5 + 1.334 \times 10^6 s^4 + 1.137 \times 10^5 s^3 + 4724 s^2 + 94.74 s + 0.7235} \quad (5.6)$$

เมื่อ  $G_1(s)$  และ  $G_2(s)$  เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการที่ได้จัดโครงสร้างให้มีรูปแบบโครงสร้างแบบกระจายส่วนโดยการตีคัปปลิง รูปแบบดังกล่าวสามารถนำไปออกแบบตัวควบคุม

## ตามลักษณะการออกแบบตัวควบคุมแบบ SISO ต่อไป



(ก)



(ข)

(ก) ตำแหน่งโพล-ซีโรของ  $G_1(s)$  (ข) ตำแหน่งโพล-ซีโรของ  $G_2(s)$

รูปที่ 5.4 แสดงตำแหน่งของโพล-ซีโรของทรานเฟอร์ฟังก์ชันของ  $G_1(s)$  และ  $G_2(s)$

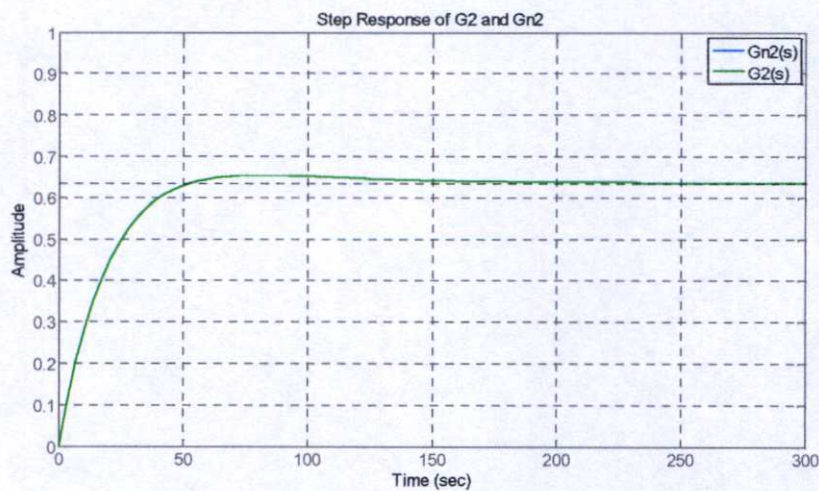
จากรูปที่ 5.4 (ก) และรูปที่ 5.4 (ข) จะพบว่ามีตำแหน่งโพลและซีโรของกระบวนการซ้อนทับกันอยู่เมื่อพิจารณาถึงผลตอบสนองของระบบจากโพลและซีโรที่อยู่ ณ ตำแหน่งเดียวกัน นั้นสามารถที่จะละผลของโพลและซีโรคู่ดังกล่าวนั้นไปได้ ดังกล่าวนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการเมื่อทำการลดอันดับของฟังก์ชันถ่ายโอน  $G_1(s)$  และ  $G_2(s)$  จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการใหม่ดังนี้

$$G_{n1}(s) = \frac{0.03427s^2 + 0.002135s + 2.586 \times 10^{-5}}{s^3 + 0.1097s^2 + 0.003808s + 4.057 \times 10^{-5}} \quad (5.7)$$

$$G_{n2}(s) = \frac{0.03429s^2 + 0.002137s + 2.588 \times 10^{-5}}{s^3 + 0.1162s^2 + 0.004216s + 4.618 \times 10^{-5}} \quad (5.8)$$



รูปที่ 5.5 แสดงการเปรียบเทียบของผลตอบสนองแบบขั้นบันไดระหว่าง  $G_1(s)$  และ  $G_{n1}(s)$



รูปที่ 5.6 แสดงการเปรียบเทียบของผลตอบสนองแบบขั้นบันไดระหว่าง  $G_2(s)$  และ  $G_{n2}(s)$

จากรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 จะเห็นว่าผลตอบสนองต่ออินพุตแบบขั้นบันไดในส่วน  
ของ  $G_1(s)$ ,  $G_2(s)$  และ  $G_{n1}(s)$ ,  $G_{n2}(s)$  มีลักษณะผลสนองเช่นเดียวกันและสามารถซ้อนทับกัน  
ได้โดยสนิท ดังนั้นจึงสามารถนำเอาฟังก์ชันถ่ายโอน  $G_{n1}(s)$ ,  $G_{n2}(s)$  มาทดแทน  $G_1(s)$ ,  $G_2(s)$   
ได้ในการออกแบบตัวควบคุม

### 5.3.2 การออกแบบตัวควบคุม

การออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงในกรณีเฟสต่ำสุดนั้น จะทำ  
การออกแบบตามวิธีที่ได้อธิบายมาในหัวข้อที่ 4.3 ซึ่งจะกำหนดให้ค่า  $\alpha_1 = 2.5$ ,  $\alpha_2 = 2.5$ ,  
 $\alpha_3 = 2.5$  และค่าเวลากงตัวสมมูล  $\tau = 100$  ซึ่งจะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอที่ 1 และ  
ตัวควบคุมพีไอที่ 2 แสดงได้ดังตารางที่ 5.3

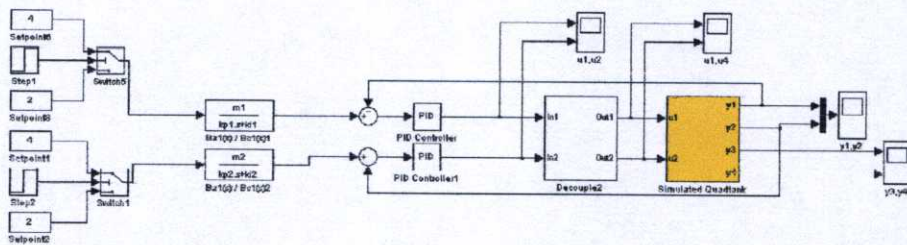
ตารางที่ 5.3 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมในกรณีเฟสต่ำสุด

ตัวควบคุม	$K_p$	$K_i$
Loop 1	1.3583	0.1678
Loop 2	1.1680	0.1694

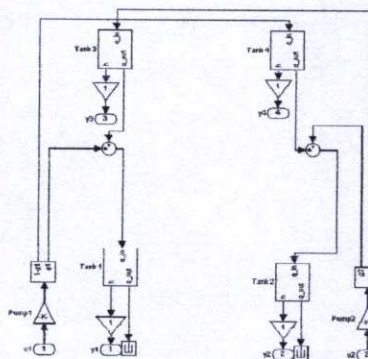
### 5.3.3 การจำลองระบบควบคุม

#### 5.3.3.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได

การจำลองการควบคุมระบบควบคุมกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง ด้วยแบบจำลองระบบควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.7 เพื่อดูผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได มีจุดประสงค์เพื่อต้องการทดสอบตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมระบบว่ามีประสิทธิภาพในการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบขั้นบันไดเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่ ก่อนที่จะนำตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไปทดลองกับกระบวนการจริง โดยการจำลองการทำงานจะกำหนดให้ระดับน้ำในถังที่ 1 และถังที่ 2 มีการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าเดิม 20% โดยในระดับน้ำในถังที่ 1 จะเปลี่ยนแปลงจากเดิม 20% ไปยังที่ค่า 40% และระดับน้ำในถังที่ 2 จะเปลี่ยนแปลงจากเดิม 20% ไปยังที่ค่า 40% ซึ่งระดับน้ำในถังที่ 1 และถังที่ 2 จะมีการเปลี่ยนแปลงที่เวลา 200 วินาที และ 400 วินาทีตามลำดับผลตอบสนองของระบบควบคุมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.8



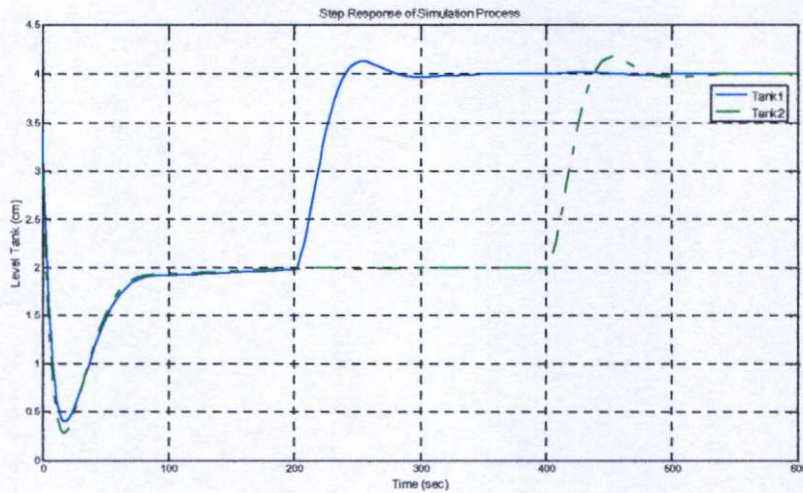
(ก)



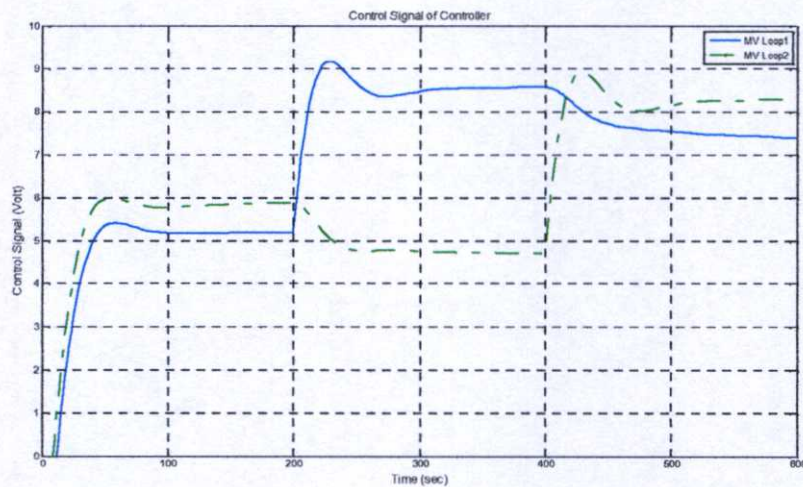
(ข)

(ก) การจำลองระบบควบคุมของกระบวนการ (ข) แบบจำลองกระบวนการระดับ 4 ถัง

รูปที่ 5.7 โปรแกรม Simulink ที่ใช้จำลองการทำงานของระบบควบคุม



รูปที่ 5.8 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองกระบวนการ



รูปที่ 5.9 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันไดในกรณีเฟสต่ำสุด

จากรูปผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดของระบบควบคุมกระบวนการระดับน้ำ 4 ดังรูปที่ 5.8 จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบพีไอ ที่ออกแบบด้วยวิธี CRA นั้น สามารถควบคุมให้ระบบสามารถติดตามอินพุตอ้างอิงที่เปลี่ยนจากระดับ 20% ไปยังระดับที่ 40% สำหรับถังที่ 1 และถังที่ 2 ได้ตามที่ต้องการ โดยผลตอบสนองของระบบควบคุมจะมีเวลาเข้าที่ตามที่ต้องการคือ 100 วินาที สำหรับทั้ง 2 ถัง, มีค่าพุงเกินเล็กน้อย, ไม่มีค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัว และผลของการอินเตอร์แอคชั่นระหว่างวงรอบควบคุมเมื่อสัญญาณอ้างอิงของระดับน้ำถังที่ 1 เปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ระดับน้ำในถังที่ 2 เปลี่ยนแปลงไปจากระดับอ้างอิงเดิมมากที่สุดคือ 0.5 % และกลับสู่ระดับอ้างอิงเดิมในเวลา 50 วินาที เมื่อสัญญาณอ้างอิงของระดับน้ำในถังที่ 2 เปลี่ยนไปจะทำให้ระดับน้ำในถังที่ 1 เปลี่ยนไปจากระดับอ้างอิงเดิมมากที่สุด 0.5 % และกลับสู่ระดับอ้างอิงเดิมในเวลา 50 วินาที โดยสมรรถนะของระบบควบคุมสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 สมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองในกรณีเฟสต่ำสุด

ผลตอบสนองของระบบควบคุม	$t_s$ (sec)	PO (%)	Interaction (%)	$t_s$ of Interaction (sec)
ครั้งที่ 1	158	3.125	0.5	50
ครั้งที่ 2	150	4.25	0.5	50

### 5.3.3.2 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ $k$ เมื่อต้องการเปลี่ยนค่าเวลาเข้าที่ของผลตอบสนองของระบบควบคุม

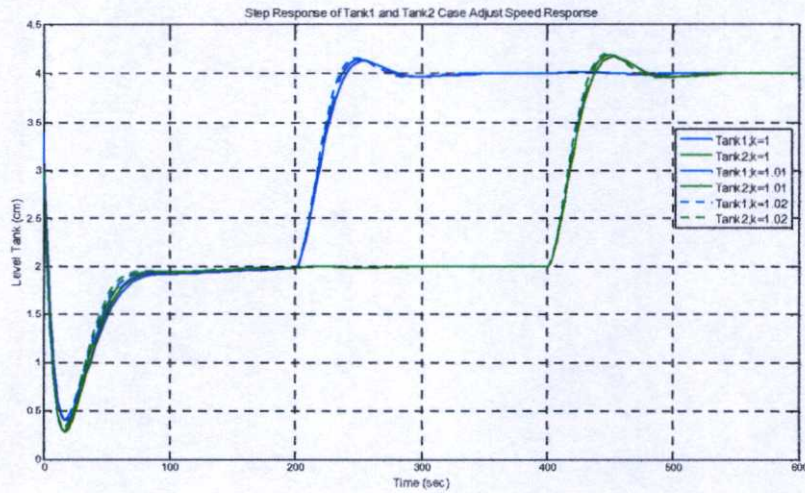
การออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธี CRA ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.3 นั้น สมรรถนะของระบบควบคุม สามารถปรับเปลี่ยนให้เป็นตามต้องการได้ ด้วยการปรับค่าพารามิเตอร์  $k$  ดังนั้นจึงได้ศึกษาถึงผลกระทบของการปรับค่าพารามิเตอร์  $k$  ที่มีต่อค่าเวลาเข้าที่ของผลตอบสนองของระบบควบคุม โดยในการศึกษานี้จะทำการออกแบบตัวควบคุมพีไอ ด้วยการปรับค่าพารามิเตอร์  $k$  จาก 1 เป็น 1.01 และ 1.02 ตามลำดับ (การเลือกใช้ค่า  $k$  นั้นสามารถเลือกใช้งานได้ตามความเหมาะสม ในที่นี้ค่าที่ใช้ดังกล่าวเป็นค่าที่สามารถนำมาแทนค่าเพื่อให้เห็นความแตกต่างของผลตอบสนองได้)

จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะและพารามิเตอร์  $k$  ที่มีต่อค่าคงที่เวลา  $\tau$  จะได้ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ ดังตารางที่ 5.5

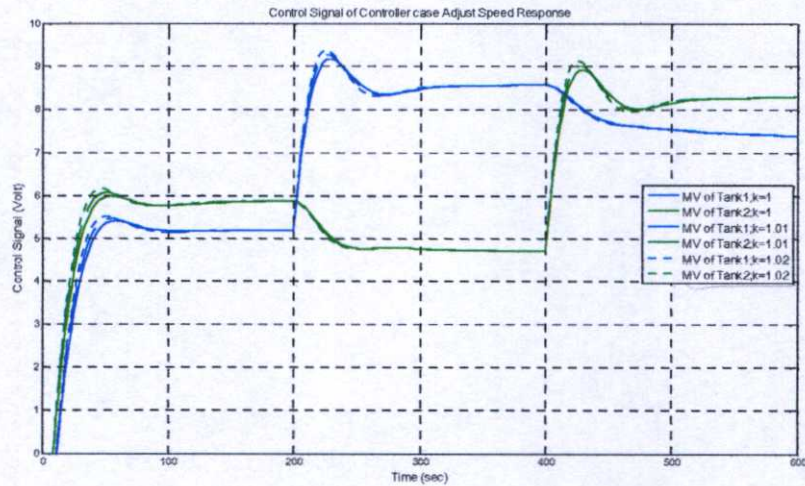
ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอเมื่อค่า  $k$  เปลี่ยนแปลงไปเมื่อต้องการเปลี่ยนค่าเวลาเข้าที่ของผลตอบสนองของระบบควบคุม

ตัวควบคุม		$K_p$	$K_i$
Loop 1	$\alpha_1 = 2.5, \alpha_2 = 2.5, \alpha_3 = 2.5, \tau = 100, k = 1.00$	1.3583	0.1678
	$\alpha_1 = 2.5, \alpha_2 = 2.5, \alpha_3 = 2.5, \tau = 100, k = 1.01$	1.4039	0.1807
	$\alpha_1 = 2.5, \alpha_2 = 2.5, \alpha_3 = 2.5, \tau = 100, k = 1.02$	1.4495	0.1950
Loop 2	$\alpha_1 = 2.5, \alpha_2 = 2.5, \alpha_3 = 2.5, \tau = 100, k = 1.00$	1.1680	0.1694
	$\alpha_1 = 2.5, \alpha_2 = 2.5, \alpha_3 = 2.5, \tau = 100, k = 1.01$	1.2136	0.1824
	$\alpha_1 = 2.5, \alpha_2 = 2.5, \alpha_3 = 2.5, \tau = 100, k = 1.02$	1.2591	0.1968

ผลตอบสนองของระบบควบคุมและสัญญาณควบคุมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.9 และรูปที่ 5.10 ตามลำดับ



รูปที่ 5.10 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับความเร็ว  
ผลตอบสนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า  $k$



รูปที่ 5.11 สัญญาณควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับความเร็ว  
ผลตอบสนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า  $k$

จากรูปที่ 5.10 แสดงผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับค่า  $k$  จากรูปสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อปรับให้ค่า  $k$  เพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 1.01 และ 1.02 จะทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมเร็วขึ้น ในขณะที่ค่าพ่วงเกินและรูปทรงผลตอบสนองของระบบควบคุมยังเหมือนเดิมโดยสมรรถนะของระบบควบคุมสามารถแสดงเปรียบเทียบกันได้ ดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า  $k$  เปลี่ยนแปลงไป

ผลตอบสนอง ของระบบ ควบคุม	$k$	$t_s$ (sec)	$PO$ (%)	$Interaction$ (%)	$t_s$ of $Interaction$ (sec)
Loop 1	1.00	158	3.125	0.5	50
	1.01	150	3.5	0.5	49
	1.02	140	4	0.5	48
Loop 2	1.00	150	4.25	0.5	50
	1.01	140	4.5	0.5	49
	1.02	133	5	0.5	48

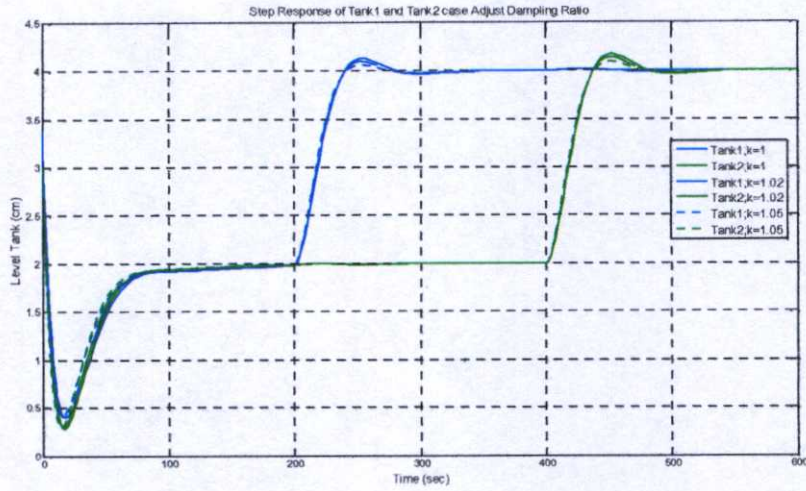
### 5.3.3.3 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ $k$ เมื่อต้องการเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์ค่าพุงเกินของผลตอบสนองของระบบควบคุม

จากการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธี CRA ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.3 นั้น สมรรถนะของระบบควบคุม สามารถปรับเปลี่ยนให้เป็นตามต้องการได้ ด้วยการปรับค่าพารามิเตอร์  $k$  ดังนั้นจึงได้ศึกษาถึงผลกระทบของการปรับค่าพารามิเตอร์  $k$  ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์ค่าพุงเกินของผลตอบสนองของระบบควบคุม โดยในการศึกษานี้จะทำการออกแบบตัวควบคุมพีไอ ด้วยการปรับค่าพารามิเตอร์  $k$  จาก 1 เป็น 1.02 และ 1.05 ตามลำดับ(การเลือกใช้ค่า  $k$  นั้นสามารถเลือกใช้งานได้ตามความเหมาะสม ในที่นี้ค่าที่ใช้ดังกล่าวเป็นค่าที่สามารถนำมาแทนค่าเพื่อให้เห็นความแตกต่างของผลตอบสนองได้) จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะและพารามิเตอร์  $k$  ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์ค่าพุงเกิน จะได้ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดีดังตารางที่ 5.7

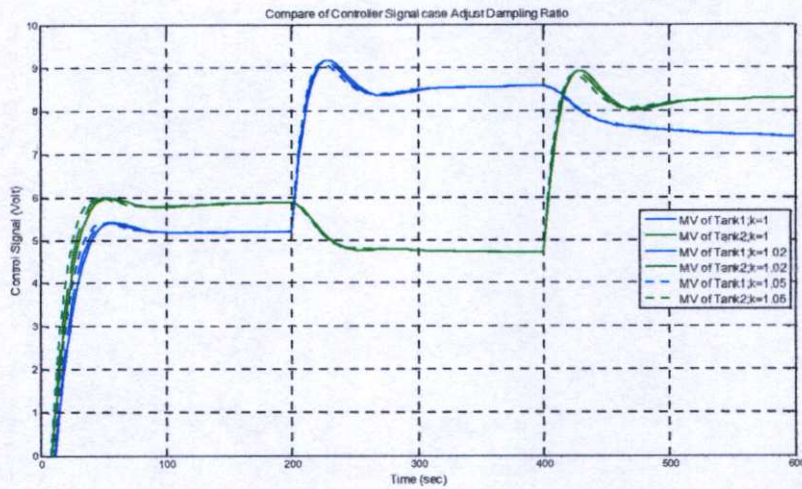
ตารางที่ 5.7 ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอเมื่อปรับค่า  $k$  เมื่อต้องการปรับอัตราการหน่วงของผลตอบสนองของระบบควบคุม

ตัวควบคุม		$K_p$	$K_i$
Loop 1	$\alpha_1 = 2.5, \alpha_2 = 2.5, \alpha_3 = 2.5, \tau = 100, k = 1.00$	1.3583	0.1678
	$\alpha_1 = 2.5, \alpha_2 = 2.5, \alpha_3 = 2.5, \tau = 100, k = 1.02$	1.6374	0.1838
	$\alpha_1 = 2.5, \alpha_2 = 2.5, \alpha_3 = 2.5, \tau = 100, k = 1.05$	2.0770	0.2090
Loop 2	$\alpha_1 = 2.5, \alpha_2 = 2.5, \alpha_3 = 2.5, \tau = 100, k = 1.00$	1.1680	0.1694
	$\alpha_1 = 2.5, \alpha_2 = 2.5, \alpha_3 = 2.5, \tau = 100, k = 1.02$	1.4469	0.1854
	$\alpha_1 = 2.5, \alpha_2 = 2.5, \alpha_3 = 2.5, \tau = 100, k = 1.05$	1.8862	0.2106

ผลตอบสนองของระบบควบคุมและสัญญาณควบคุมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.11 และรูปที่ 5.12 ตามลำดับ



รูปที่ 5.12 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับอัตราการหน่วงของระบบควบคุมโดยการปรับค่า  $k$  ไป



รูปที่ 5.13 สัญญาณควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับอัตราการหน่วงของระบบควบคุมโดยการปรับค่า  $k$

จากรูปที่ 5.12 แสดงผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับค่า  $k$  จากรูปสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อปรับให้ค่า  $k$  เพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 1.02 และ 1.05 จะทำให้เปอร์เซ็นต์ค่าพุงเกินของผลตอบสนองของระบบควบคุมลดลง ในขณะที่ค่าเวลาเข้าที่ของและรูปทรงผลตอบสนองของระบบควบคุมยังเหมือนเดิมโดยสมรรถนะของระบบควบคุมสามารถแสดงเปรียบเทียบกันได้ ดังตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า  $k$  เปลี่ยนแปลงไป

ผลตอบสนอง ของระบบ ควบคุม	$k$	$t_s$ (sec)	$PO$ (%)	$Interaction$ (%)	$t_s$ of $Interaction$ (sec)
Loop 1	1.00	158	3.125	0.5	50
	1.02	157	2.5	0.5	50
	1.05	156	1.5	0.5	50
Loop 2	1.00	150	4.25	0.5	50
	1.02	149	3.25	0.5	50
	1.05	148	2.25	0.5	50

#### 5.3.3.4 การเปรียบเทียบการปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโดยวิธีทางเดินราก

##### Root Locus กับการปรับแต่งพารามิเตอร์โดยวิธี CRA

ในการหาค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมสำหรับกระบวนการแบบ SISO นั้น มีเทคนิคการออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการได้หลายวิธี ผู้ออกแบบสามารถเลือกวิธีการให้เหมาะสมกับระบบและตามแต่สมรรถนะของระบบควบคุมที่ต้องการ ในหัวข้อนี้จะทำการเปรียบเทียบการปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมระหว่างเทคนิคการออกแบบด้วยทางเดินรากกับการปรับแต่งพารามิเตอร์โดยวิธี CRA ซึ่งมีเงื่อนไขในการออกแบบเพื่อเปรียบเทียบถึงสมรรถนะของระบบควบคุมดังนี้คือ

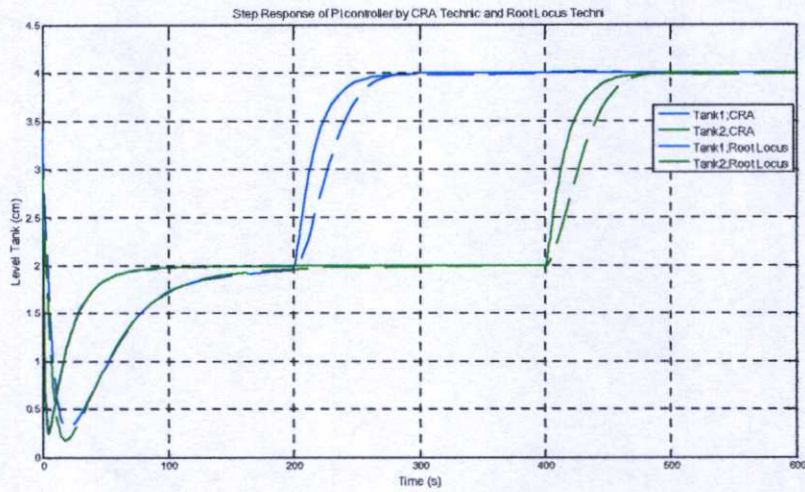
วิธีการออกแบบ	$P.O.$ (%)	$t_s$ (sec)
การออกแบบตัวควบคุมแบบ พีไอโดยวิธีทางเดินราก Root Locus	$P.O. < 5$	100
การออกแบบตัวควบคุมแบบ พีไอโดยวิธี CRA	$P.O. < 5$	100

จากเงื่อนไขในการออกแบบข้างต้นจะสามารถหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงกรณีเฟสต่ำสุดได้ดังตารางที่ 5.9

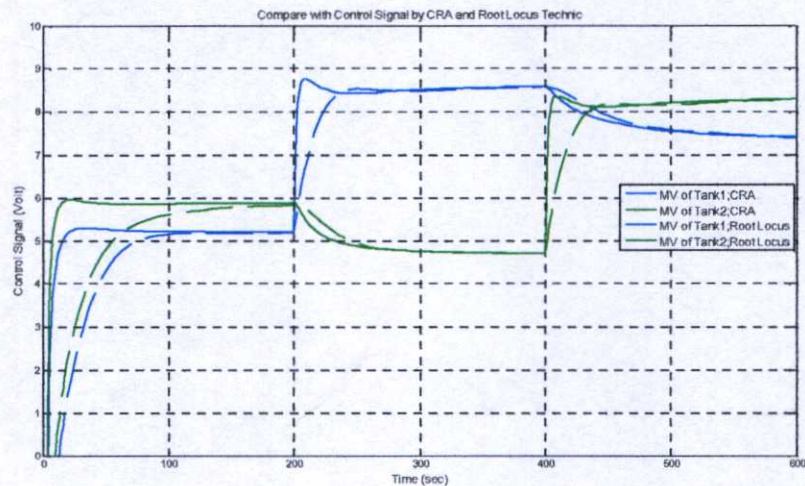
ตารางที่ 5.9 ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ ที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีทางเดินรากและวิธี CRA

ตัวควบคุม	$K_p$	$K_i$	
CRA Loop 1	$\alpha_1 = 4, \alpha_2 = 4, \alpha_3 = 4, \tau = 100$	15.4742	0.9772
CRA Loop 2	$\alpha_1 = 4, \alpha_2 = 4, \alpha_3 = 4, \tau = 100$	15.2756	0.9790
Root Locus Loop1	$P.O. < 5\%, t_s = 100 \text{ sec}$	1.4000	0.1050
Root Locus Loop2	$P.O. < 5\%, t_s = 100 \text{ sec}$	1.4298	0.1072

ผลตอบสนองของระบบควบคุมและสัญญาณควบคุมสำหรับตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีทางเดินรากและวิธี CRA สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.14 ตามลำดับ



รูปที่ 5.14 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันไดระหว่างพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยวิธีทางเดินรากและวิธี CRA



รูปที่ 5.15 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันไดระหว่างพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยวิธีทางเดินรากและวิธี CRA

จากรูปที่ 5.14 แสดงผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดของตัวควบคุมที่อาศัยเทคนิคการปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ต่างกัน จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองของตัวควบคุมที่ได้อาศัยเทคนิคของตัวควบคุมแบบ CRA นั้นให้สมรรถนะของระบบควบคุมที่ดีกว่าทั้งในด้านเปอร์เซ็นต์ฟุงเกิน, ค่าเวลาเข้าที่ และผลของการอินเตอร์แอคชั่นระหว่างวงรอบระบบควบคุมที่ได้รับผลน้อยมาก อีกทั้งเทคนิคการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมนั้นยังสามารถทำได้ง่ายและสะดวกกว่าเทคนิคการปรับแต่งพารามิเตอร์โดยวิธีทางเดินราก อีกทั้งยังสามารถกำหนด

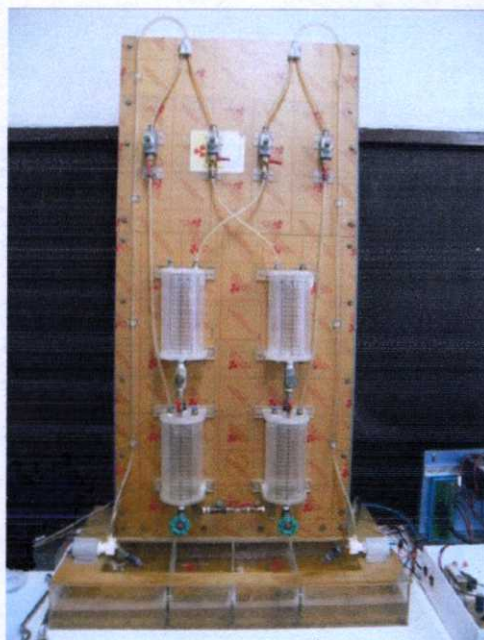
เงื่อนไขของผลตอบสนองของระบบที่ไม่มีค่าพุ่งเกินได้โดยการปรับแต่งค่า  $\alpha_i$  ที่เป็นเงื่อนไขของการออกแบบตัวควบคุม ผลสรุปของสมรรถนะของระบบควบคุมสามารถแสดงเปรียบเทียบกันได้ ดังตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันได ระหว่างพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ออกแบบโดย CRA และ Root Locus

ผลตอบสนองของระบบควบคุม	$t_s$ (sec)	$PO$ (%)	$Interaction$ (%)	$t_s$ of $Interaction$ (sec)
CRA Loop 1	90	0	0	0
CRA Loop 2	92	0	0	0
Root Locus Loop1	140	1.1	0.375	50
Root Locus Loop2	143	1.2	0.125	50

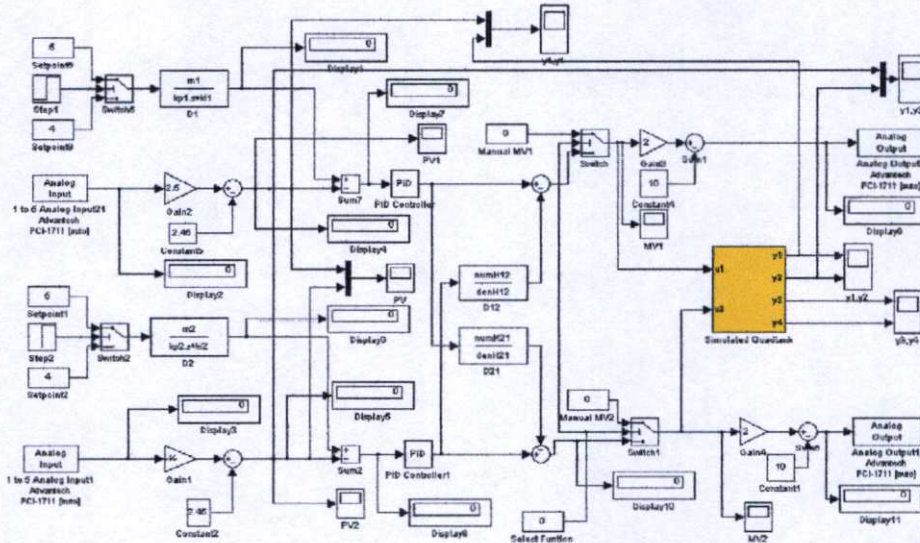
#### 5.3.4 การทดลองกับกระบวนการจริง

หลังจากที่ได้ทำการจำลองการควบคุมกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง ด้วยตัวควบคุมพีไอ ที่ออกแบบด้วยวิธี CRA แล้ว ต่อไปจะนำตัวควบคุมดังกล่าวที่ได้ออกแบบมาใช้ทำการควบคุมกับกระบวนการจริง โดยจะใช้โปรแกรม MATLAB ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมซึ่งใช้ค่าเวลาเก็บตัวอย่าง (Sampling Time) เท่ากับ 0.1 วินาที ภาพถ่ายของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง แสดงดังรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 แสดงรูปชุดทดลองกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง

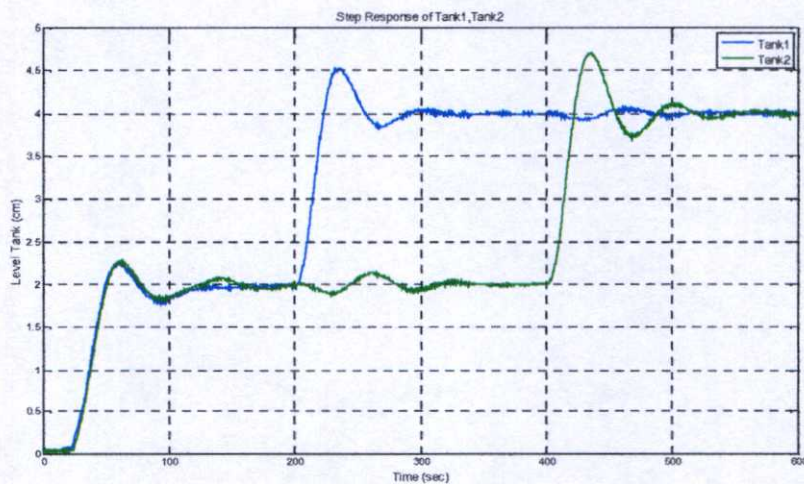
ในการทดลองการควบคุมกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง จะใช้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ขั้นตอนการทดลองและรูปแบบในการทดลองเช่นเดียวกันกับ การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB ที่ได้ทำการจำลองการทำงานในหัวข้อที่ 5.3.1 โปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในการทดลองกับกระบวนการจริง แสดงดังรูปที่ 5.17



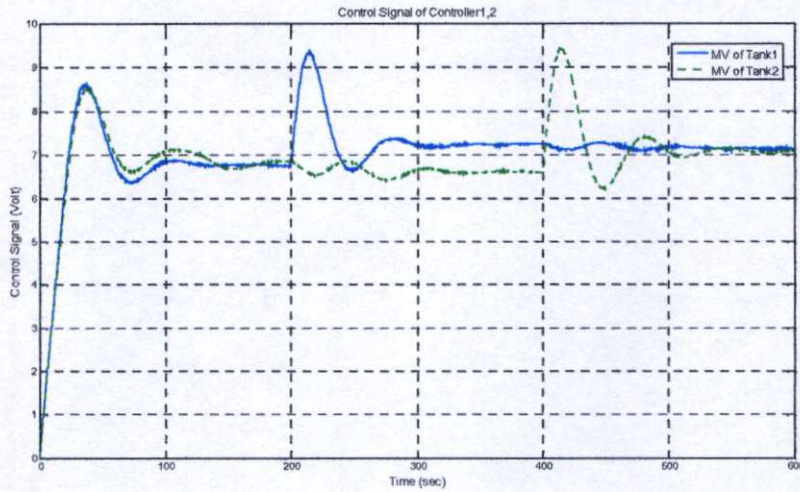
รูปที่ 5.17 โปรแกรม Simulink ที่ใช้ทดลองการทำงานของระบบควบคุม

#### 5.3.4.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได

ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได แสดงดังรูปที่ 5.17 และ สัญญาณควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได



รูปที่ 5.19 สัญญาณควบคุมจากการทดลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได

จากรูปผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดของระบบควบคุมกระบวนการระดับน้ำ 4 ดังรูปที่ 5.18 จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบพีไอ ที่ออกแบบด้วยวิธี CRA นั้น สามารถควบคุมให้ระบบสามารถติดตามอินพุตอ้างอิงที่เปลี่ยนจากระดับ 20% ไปยังระดับที่ 40% สำหรับถังที่ 1 และถังที่ 2 ได้ตามที่ต้องการ โดยผลตอบสนองของระบบควบคุมจะมีเวลาเข้าที่เร็วกว่าผลที่ได้จากการทดสอบกับแบบจำลองในถังที่ 1 แต่ในถังที่ 2 เวลาในการเข้าที่ช้ากว่าการทดสอบจากแบบจำลองกระบวนการ, มีค่าพุ่งเกินสำหรับถังที่ 1 และถังที่ 2 ส่วนผลของการอินเตอร์แอคชั่นระหว่างวงรอบควบคุมนั้นมีค่ามากกว่าจากการทดลองกระบวนการจำลองและมีลักษณะการแกว่งตัวในช่วงค่าลบและค่าบวกรอบค่าระดับอ้างอิงเดิม ซึ่งผลของการอินเตอร์แอคชั่นระหว่างวงรอบควบคุมนั้นมีมากกว่าผลที่ได้จากการแบบจำลองกระบวนการนั้น เกิดขึ้นเนื่องจากลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นของปั๊มน้ำและวาล์ว และในการกลับสู่ค่าในระดัอ้างอิงเดิมเมื่อสัญญาณอ้างอิงของระดับน้ำถังอื่นเปลี่ยนไป จะมีช่วงเวลาที่นานกว่าก็เพราะผลตอบสนองของถังที่ 1 และถังที่ 2 ลดลงเพื่อเข้าระดับอ้างอิงเดิมนั้นไม่สามารถเข้าสู่ระดับอ้างอิงได้ทันที แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะแกว่งตัวรอบระดับอ้างอิงจนกว่าจะสามารถเข้าสู่ระดับอ้างอิงได้

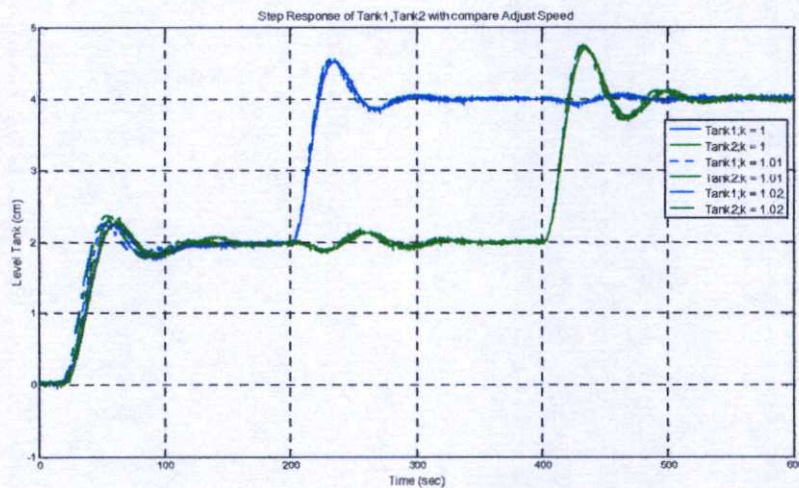
ตารางที่ 5.11 สมรรถนะของระบบควบคุมจากการทดลองในกรณีเฟสต่ำสุด

ผลตอบสนองของระบบควบคุม	$t_s$ (sec)	$PO$ (%)	$Interaction$ (%)	$t_s$ of $Interaction$ (sec)
ถังที่ 1	120	12.5	-5	150
ถังที่ 2	150	17.5	-1.875	100

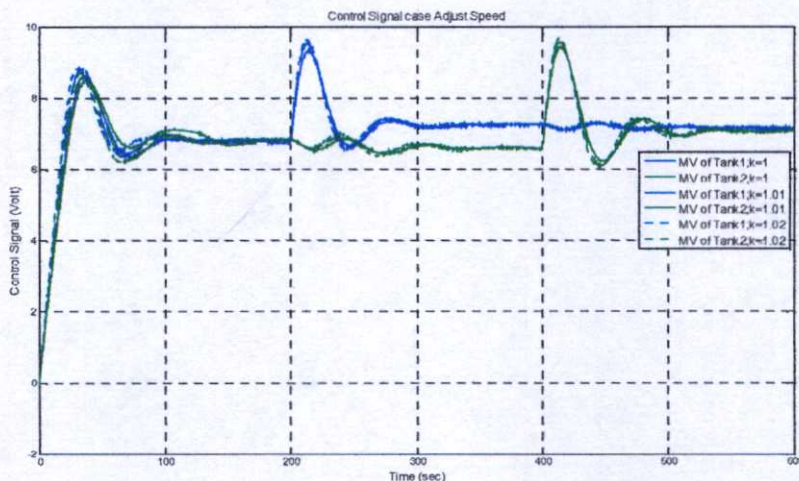
### 5.3.4.2 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ $k$ เมื่อต้องการเปลี่ยนค่าเวลาเข้าที่ของผลตอบสนองของระบบควบคุม

ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อนำเอาตัวควบคุมแบบพีไอ ที่ได้ทำการออกแบบโดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์  $k$  จาก 1 เป็น 1.01 และ 1.02 ตามลำดับ

จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะและพารามิเตอร์  $k$  ที่มีต่อค่าคงที่เวลา  $\tau$  ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันไดแสดงดังรูปที่ 5.19 และสัญญาณควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.20 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า  $k$



รูปที่ 5.21 สัญญาณควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า  $k$

จากรูปที่ 5.20 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับค่า  $k$  เพื่อปรับความเร็วของผลตอบสนองของระบบควบคุม จากรูปสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อปรับให้ค่า  $k$  เพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 1.01 และ 1.02 จะทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมเร็วขึ้น ในขณะที่ค่าพุง

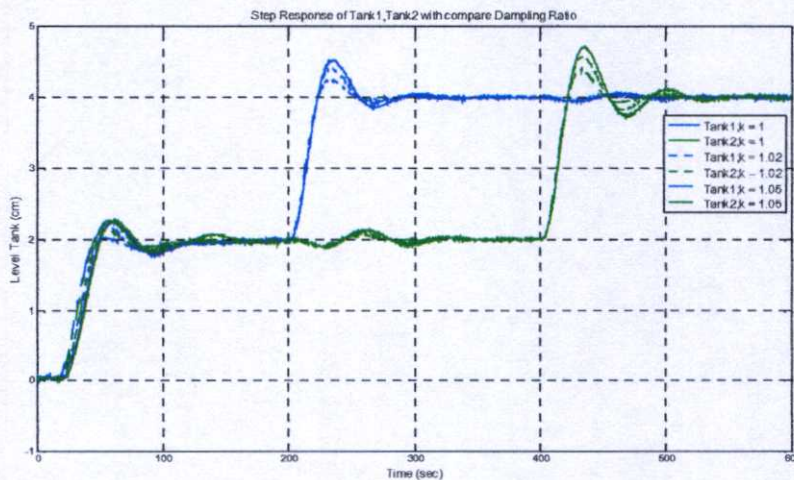
เกินและรูปทรงผลตอบสนองของระบบควบคุมยังคงเดิมโดยสมรรถนะของระบบควบคุมสามารถแสดงเปรียบเทียบกันได้ดังตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.12 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า  $k$  เปลี่ยนแปลงไป

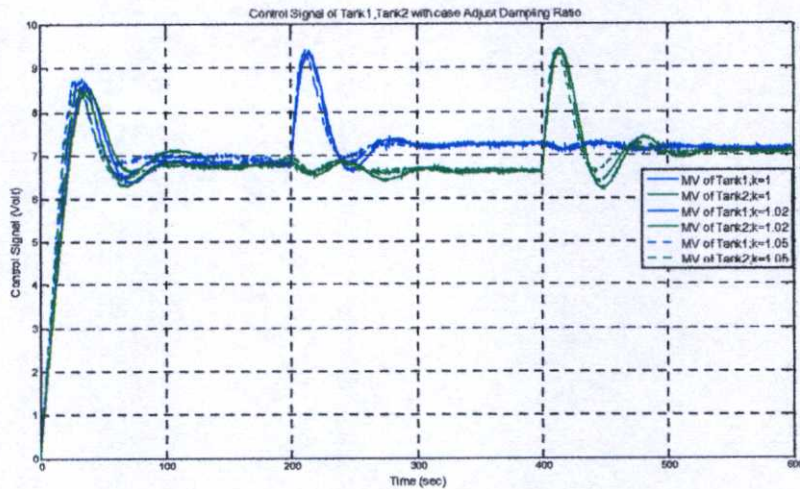
ผลตอบสนองของระบบควบคุม	$k$	$t_s$ (sec)	$PO$ (%)	$Interaction$ (%)	$t_s$ of $Interaction$ (sec)
Loop 1	1.00	130	12.5	-5	150
	1.01	125	13.25	-6.25	150
	1.02	120	13.75	-6.25	150
Loop 2	1.00	130	17.5	-1.875	100
	1.01	127	18.25	-2	100
	1.02	125	18.25	-2	100

#### 5.3.4.3 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ $k$ เมื่อต้องการเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์ค่าพุงเกินของผลตอบสนองของระบบควบคุม

ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อนำเอาตัวควบคุมแบบพีไอ ที่ได้ทำการออกแบบโดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์  $k$  จาก 1 เป็น 1.02 และ 1.05 ตามลำดับจากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสัมพันธ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะและพารามิเตอร์  $k$  ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์ค่าพุงเกิน สามารถพิจารณาได้จากผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันไดแสดงดังรูปที่ 5.22 และสัญญาณควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.23



รูปที่ 5.22 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับอัตราส่วนพุงเกินของระบบควบคุมโดยการปรับค่า  $k$



รูปที่ 5.23 สัญญาณควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับปรับอัตราการหน่วงของระบบควบคุมโดยการปรับค่า  $k$

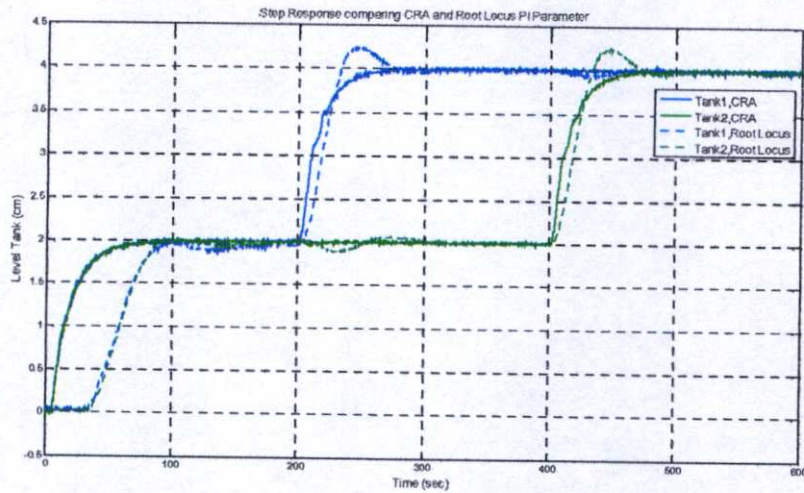
จากรูปที่ 5.22 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับค่า  $k$  เพื่อปรับค่าพ่วงเกินของผลตอบสนองของระบบควบคุม จากรูปสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อปรับให้ค่า  $k$  เพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 1.02 และ 1.05 จะทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมลง ในขณะที่ค่าความเร็วและรูปทรงผลตอบสนองของระบบควบคุมยังคงเดิม โดยสมรรถนะของระบบควบคุมสามารถแสดงเปรียบเทียบกัน ได้ดังตารางที่ 5.11

ตารางที่ 5.13 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า  $k$  เปลี่ยนแปลงไป

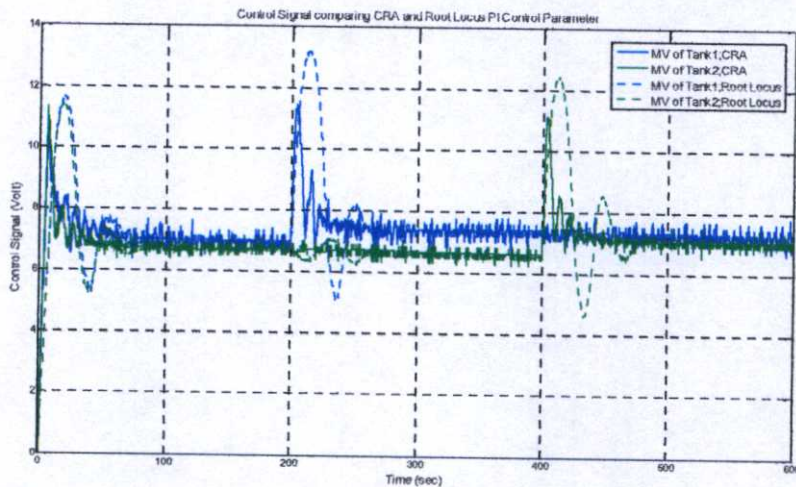
ผลตอบสนองของระบบควบคุม	$k$	$t_s$ (sec)	$PO$ (%)	$Interaction$ (%)	$t_s$ of $Interaction$ (sec)
Loop 1	1.00	130	12.5	-5	150
	1.02	130	10	-5	150
	1.05	130	6.25	-5	150
Loop 2	1.00	130	17.5	-1.875	100
	1.02	130	13.75	-1.875	100
	1.05	130	10	-1.875	100

#### 5.3.4.4 การเปรียบเทียบการปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโดยวิธีทางเดินราก Root Locus กับการปรับแต่งพารามิเตอร์โดยวิธี CRA

ผลตอบสนองของระบบควบคุมและสัญญาณควบคุมสำหรับตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีทางเดินรากและวิธี CRA สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.24 และรูปที่ 5.25 ตามลำดับ



รูปที่ 5.24 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุมต่อสัญญาณขั้นบันไดระหว่างพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยวิธีทางเดินรากและวิธี CRA



รูปที่ 5.25 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันไดระหว่างพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยวิธีทางเดินรากและวิธี CRA

จากรูปที่ 5.24 แสดงผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดของตัวควบคุมที่อาศัยเทคนิคการปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ต่างกัน จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองของตัวควบคุมที่ได้อาศัยเทคนิคของตัวควบคุมแบบ CRA นั้นให้สมรรถนะของระบบควบคุมที่ดีกว่าทั้งในด้านเปอร์เซ็นต์ฟุงเกิน, ค่าเวลาเข้าที่ และผลของการอินเตอร์แอคชั่นระหว่างวงรอบระบบควบคุมที่ได้รับผลน้อยมาก อีกทั้งเทคนิคการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมนั้นยังสามารถทำได้ง่ายและสะดวกกว่าเทคนิคการปรับแต่งพารามิเตอร์โดยวิธีทางเดินราก อีกทั้งยังสามารถกำหนดเงื่อนไขของผลตอบสนองของระบบที่ไม่มีค่าฟุงเกินได้โดยการปรับแต่งค่า  $\alpha$ , ที่เป็นเงื่อนไขของการออกแบบตัวควบคุม ผลสรุปของสมรรถนะของระบบควบคุมสามารถแสดงเปรียบเทียบกันได้ดังตารางที่ 5.14

ตารางที่ 5.14 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันได  
ระหว่างพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ออกแบบโดย CRA และ Root Locus

ผลตอบสนองของ ระบบควบคุม	$t_s$ (sec)	$PO$ (%)	$Interaction$ (%)	$t_s$ of $Interaction$ (sec)
CRA Loop 1	70	0	-1.25	15
CRA Loop 2	72	0	0	0
Root Locus Loop1	90	5.25	-5	90
Root Locus Loop2	92	5.25	-1.25	70

#### 5.4 กระบวนการระดับน้ำ 4 ถังแบบอินเวอร์ตตีกลับปลิงกรณีเฟสไม่ต่ำสุด

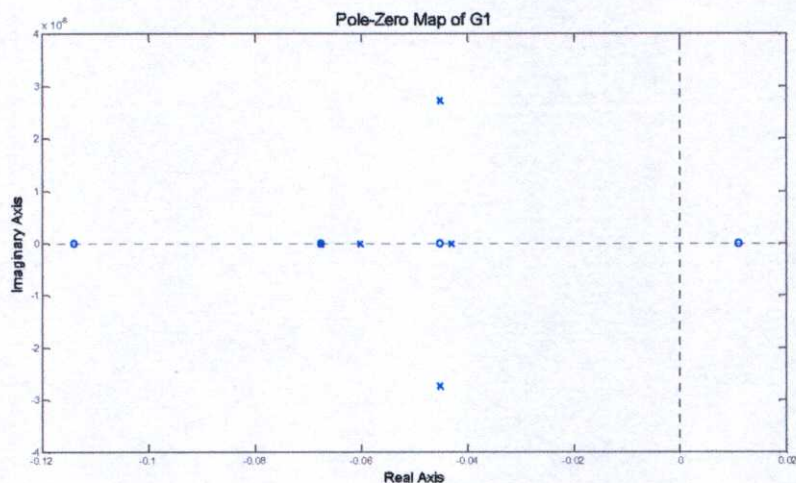
##### 5.4.1 โครงสร้างและคุณลักษณะของกระบวนการ

พิจารณาโครงสร้างของกระบวนการสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถังแบบอินเวอร์ตตีกลับปลิงกรณีเฟสไม่ต่ำสุดนั้น จากเมทริกฟังกชันถ่ายโอนดังสมการที่ (5.1) และตีกลับปลิงเมทริกในสมการที่ (5.3) นั้น เมื่อพิจารณาตามเงื่อนไขการออกแบบระบบควบคุมแบบกระจายส่วนดังกล่าวได้อธิบายมาแล้วในหัวข้อ 4.2 จะสามารถแสดงฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการได้ดังนี้

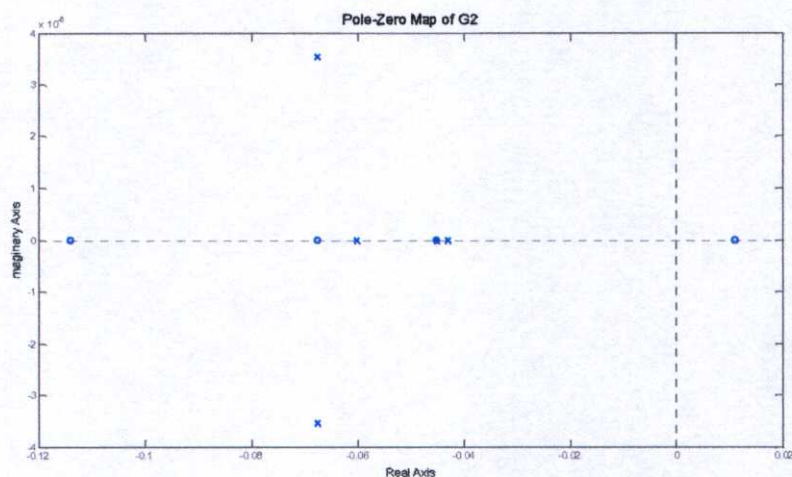
$$G_1(s) = \frac{1.78 \times 10^4 s^4 + 3834 s^3 + 237.8 s^2 + 3.053 s - 0.6791}{8.661 \times 10^5 s^5 + 2.256 \times 10^5 s^4 + 2.329 \times 10^4 s^3 + 1192 s^2 + 30.28 s + 0.3052} \quad (5.9)$$

$$G_2(s) = \frac{1.78 \times 10^4 s^4 + 3834 s^3 + 237.8 s^2 + 3.053 s - 0.06791}{8.644 \times 10^5 s^5 + 2.445 \times 10^5 s^4 + 2.742 \times 10^4 s^3 + 1523 s^2 + 41.88 s + 0.456} \quad (5.10)$$

เมื่อ  $G_1(s)$  และ  $G_2(s)$  เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการที่ได้จัดโครงสร้างให้มีรูปแบบโครงสร้างแบบกระจายส่วนโดยการตีกลับปลิง รูปแบบดังกล่าวสามารถนำไปออกแบบตัวควบคุมตามลักษณะการออกแบบตัวควบคุมแบบ SISO ต่อไป



(ก)



(ข)

(ก) ตำแหน่งโพล-ซีโรของ  $G_1(s)$  (ข) ตำแหน่งโพล-ซีโรของ  $G_2(s)$

รูปที่ 5.26 แสดงตำแหน่งของโพล-ซีโรของทรานเฟอร์ฟังก์ชันของ  $G_1(s)$  และ  $G_2(s)$  กรณิเฟสไม่ต่ำสุด

จากรูปที่ 5.26 (ก) และรูปที่ 5.26 (ข) จะพบว่ามีตำแหน่งโพลและซีโรของระบบเกิดการซ้อนทับกันอยู่เมื่อพิจารณาถึงผลตอบสนองของระบบจากโพลและซีโรที่อยู่ ณ ตำแหน่งเดียวกันนั้นสามารถที่จะละผลของโพลและซีโรคู่ดังกล่าวนั้นไปได้ อีกทั้งในกรณีเฟสไม่ต่ำสุดยังพบว่ามีซีโรของระบบการวางตัวอยู่ทางขวาของระนาบ  $s$  ดังกล่าวนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบการเมื่อทำการลดอันดับของฟังก์ชันถ่ายโอน  $G_1(s)$  และ  $G_2(s)$  จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบการใหม่ดังนี้

$$G_{n1}(s) = \frac{0.02055s^2 + 0.002114s - 2.579 \times 10^{-5}}{s^3 + 0.1479s^2 + 0.007208s + 0.0001159} \quad (5.11)$$

$$G_{n2}(s) = \frac{0.02059s^2 + 0.002118s - 2.584 \times 10^{-5}}{s^3 + 0.1703s^2 + 0.009512s + 0.0001735} \quad (5.12)$$



รูปที่ 5.27 แสดงการเปรียบเทียบของผลตอบสนองแบบขั้นบันไดระหว่าง  $G_1(s)$  และ  $G_{n1}(s)$



รูปที่ 5.28 แสดงการเปรียบเทียบของผลตอบสนองแบบขั้นบันไดระหว่าง  $G_2(s)$  และ  $G_{n2}(s)$

จากรูปที่ 5.27 และรูปที่ 5.28 จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองต่ออินพุตแบบขั้นบันไดในส่วน  
ของ  $G_1(s)$ ,  $G_2(s)$  และ  $G_{n1}(s)$ ,  $G_{n2}(s)$  มีลักษณะผลสนองเช่นเดียวกันและสามารถซ้อนทับกัน  
ได้โดยสนิท ดังนั้นจึงสามารถนำเอาฟังก์ชันถ่ายโอน  $G_{n1}(s)$ ,  $G_{n2}(s)$  มาทดแทน  $G_1(s)$ ,  $G_2(s)$   
ได้ในการออกแบบตัวควบคุม

### 5.4.2 การออกแบบตัวควบคุม

การออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงในกรณีเฟสต่ำสุดนั้น จะทำการออกแบบตามวิธีที่ได้อธิบายมาในหัวข้อที่ 4.3 ซึ่งจะกำหนดให้ค่า  $\alpha_1 = 6, \alpha_2 = 6, \alpha_3 = 6$  และค่าเวลาคงตัวสมมูล  $\tau = 250$  ซึ่งจะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอที่ 1 และตัวควบคุมพีไอที่ 2 แสดงได้ดังตารางที่ 5.13

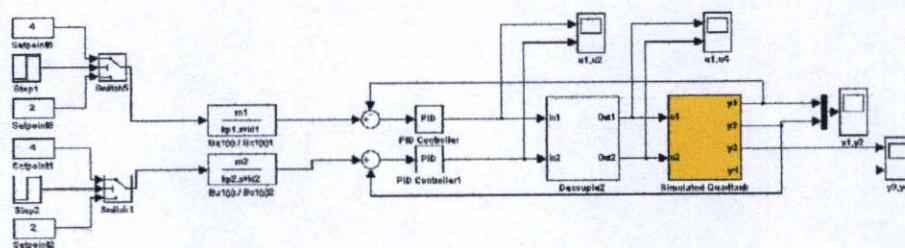
ตารางที่ 5.15 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมในกรณีเฟสต่ำสุด

ตัวควบคุม	$K_p$	$K_i$
Loop 1	34.8467	0.0914
Loop 2	33.6911	0.0813

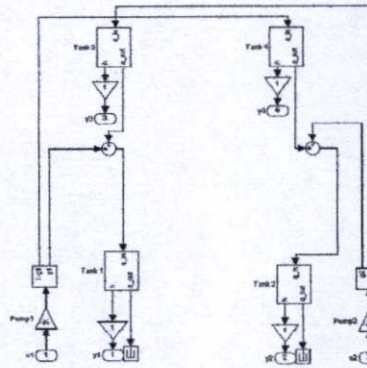
### 5.4.3 การจำลองระบบควบคุม

#### 5.4.3.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได

การจำลองการควบคุมระบบควบคุมกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง ด้วยแบบจำลองระบบควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.29 เพื่อดูผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได มีจุดประสงค์เพื่อต้องการทดสอบตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมระบบว่ามีประสิทธิภาพในการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบขั้นบันไดเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่ ก่อนที่จะนำตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไปทดลองกับกระบวนการจริง โดยการจำลองการทำงานจะกำหนดให้ระดับน้ำในถังที่ 1 และถังที่ 2 มีการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าเดิม 20% โดยในระดับน้ำในถังที่ 1 จะเปลี่ยนแปลงจากเดิม 20% ไปยังที่ค่า 40% และระดับน้ำในถังที่ 2 จะเปลี่ยนแปลงจากเดิม 20% ไปยังที่ค่า 40% ซึ่งระดับน้ำในถังที่ 1 และถังที่ 2 จะมีการเปลี่ยนแปลงที่เวลา 2000 วินาที และ 4000 วินาทีตามลำดับผลตอบสนองของระบบควบคุมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.30



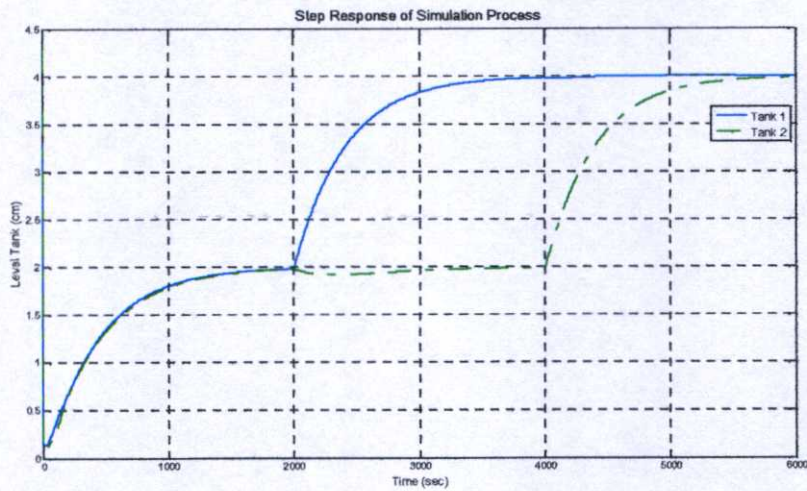
(ก)



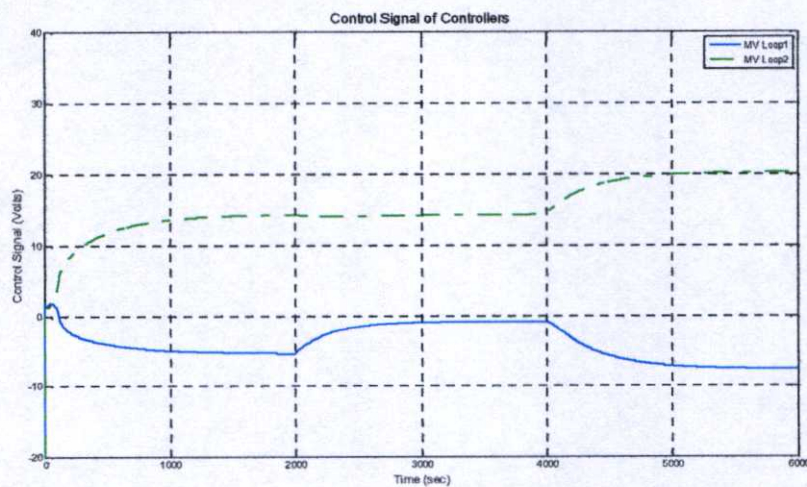
(ข)

(ก) การจำลองระบบควบคุมของกระบวนการ (ข) แบบจำลองกระบวนการระดับ 4 ถึง

รูปที่ 5.29 โปรแกรม Simulink ที่ใช้จำลองการทำงานของระบบควบคุม



รูปที่ 5.30 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองกระบวนการ



รูปที่ 5.31 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันไดในกรณีเฟสต่ำสุด

จากรูปผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดของระบบควบคุมกระบวนการระดับน้ำ 4 ดังรูปที่ 5.30 จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบพีไอที่ออกแบบด้วยวิธี CRA และใช้ร่วมกับชุดอินเวอร์สดีคัปปลิงนั้น สามารถควบคุมให้กระบวนการกรณีเฟสไม่ต่ำสุดให้ระบบสามารถติดตามอินพุตอ้างอิงที่เปลี่ยนจากระดับ 20% ไปยังระดับที่ 40% สำหรับถึงที่ 1 และถึงที่ 2 ได้ตามที่ต้องการ โดยผลตอบสนองของระบบควบคุมจะมีเวลาเข้าที่ตามที่ต้องการคือ 1600 วินาที สำหรับทั้ง 2 ถึงแม้ไม่มีค่าผิดพลาดที่สถานะคงตัว และผลของการอินเตอร์แอคชั่นระหว่างวงรอบควบคุมเมื่อสัญญาณอ้างอิงของระดับน้ำถึงที่ 1 เปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ระดับน้ำในถึงที่ 2 เปลี่ยนแปลงไปจากระดับอ้างอิงเดิมมากที่สุดคือ - 4 % และกลับสู่ระดับอ้างอิงเดิมในเวลา 1200 วินาที เมื่อสัญญาณอ้างอิงของระดับน้ำในถึงที่ 2 เปลี่ยนไป ระดับน้ำของถึงที่ 1 จะไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในถึงที่ 2 โดยสมรรถนะของระบบควบคุมสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.16

ตารางที่ 5.16 สมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองในกรณีเฟสไม่ต่ำสุด

ผลตอบสนองของระบบควบคุม	$t_r$ (sec)	PO (%)	Interaction (%)	$t_r$ of Interaction (sec)
ถึงที่ 1	1600	0.0	0	0
ถึงที่ 2	1600	0.0	-4	1200

#### 5.4.3.2 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ $k$ เมื่อต้องการเปลี่ยนค่าเวลาเข้าที่ของผลตอบสนองของระบบควบคุม

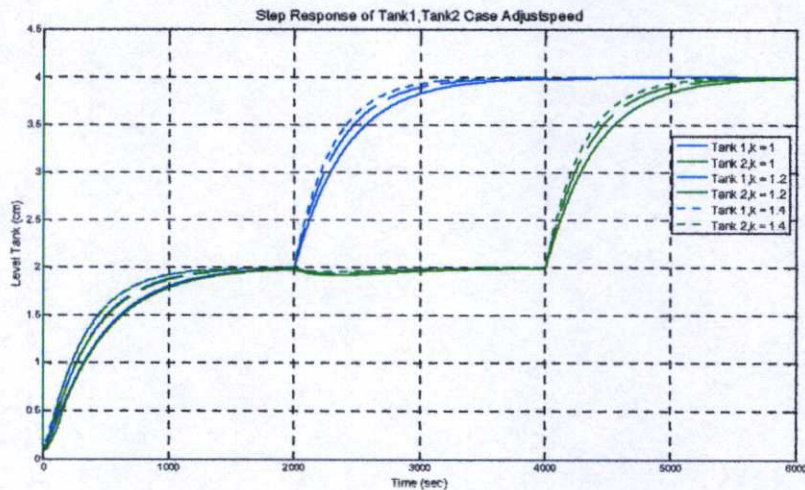
การออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธี CRA ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.3 นั้น สมรรถนะของระบบควบคุม สามารถปรับเปลี่ยนให้เป็นตามต้องการได้ ด้วยการปรับค่าพารามิเตอร์  $k$  ดังนั้นจึงได้ศึกษาถึงผลกระทบของการปรับค่าพารามิเตอร์  $k$  ที่มีต่อค่าเวลาเข้าที่ของผลตอบสนองของระบบควบคุม โดยในการศึกษานี้จะทำการออกแบบตัวควบคุมพีไอ ด้วยการปรับค่าพารามิเตอร์  $k$  จาก 1 เป็น 1.2 และ 1.4 ตามลำดับ (การเลือกใช้ค่า  $k$  นั้นสามารถเลือกใช้งานได้ตามความเหมาะสม ในที่นี้ค่าที่ใช้ดังกล่าวเป็นค่าที่สามารถนำมาแทนค่าเพื่อให้เห็นความแตกต่างของผลตอบสนองได้)

จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะและพารามิเตอร์  $k$  ที่มีต่อค่าคงที่เวลา  $\tau$  จะได้ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ ดังตารางที่ 5.17

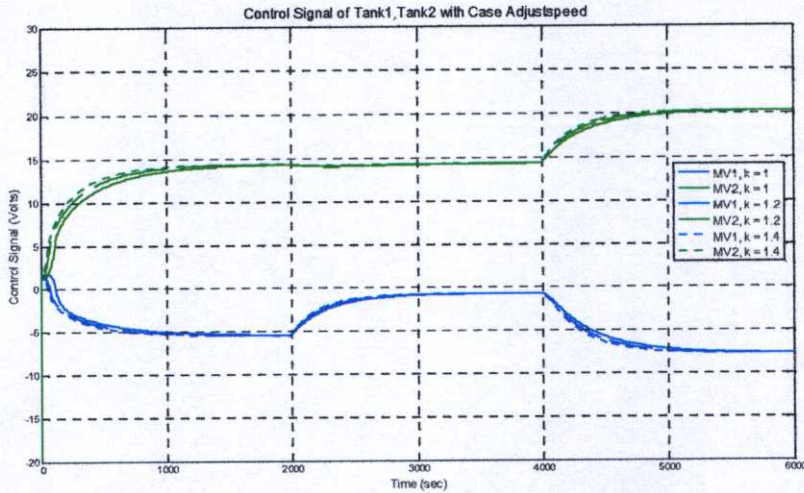
ตารางที่ 5.17 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอเมื่อค่า  $k$  เปลี่ยนแปลงไปเมื่อต้องการเปลี่ยนค่าเวลาเข้าที่ของผลตอบสนองของระบบควบคุม

ตัวควบคุม		$K_p$	$K_i$
Loop 1	$\alpha_1 = 6, \alpha_2 = 6, \alpha_3 = 6, \tau = 250, k = 1.0$	34.8467	0.0914
	$\alpha_1 = 6, \alpha_2 = 6, \alpha_3 = 6, \tau = 250, k = 1.2$	33.6911	0.0813
	$\alpha_1 = 6, \alpha_2 = 6, \alpha_3 = 6, \tau = 250, k = 1.4$	43.2555	0.1335
Loop 2	$\alpha_1 = 6, \alpha_2 = 6, \alpha_3 = 6, \tau = 250, k = 1.0$	42.0835	0.1218
	$\alpha_1 = 6, \alpha_2 = 6, \alpha_3 = 6, \tau = 250, k = 1.2$	51.6642	0.1810
	$\alpha_1 = 6, \alpha_2 = 6, \alpha_3 = 6, \tau = 250, k = 1.4$	50.4760	0.1680

ผลตอบสนองของระบบควบคุมและสัญญาณควบคุมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.30 และรูปที่ 5.31 ตามลำดับ



รูปที่ 5.32 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า  $k$



รูปที่ 5.33 สัญญาณควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับความเร็ว  
ผลตอบสนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า  $k$

จากรูปที่ 5.30 แสดงผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับค่า  $k$  จากรูปสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อปรับให้ค่า  $k$  เพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 1.2 และ 1.4 จะทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมเร็วขึ้น ในขณะที่ค่าพ่วงเกินและรูปทรงผลตอบสนองของระบบควบคุมยังเหมือนเดิมโดยสมรรถนะของระบบควบคุมสามารถแสดงเปรียบเทียบกันได้ ดังตารางที่ 5.18

ตารางที่ 5.18 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า  $k$  เปลี่ยนแปลงไป

ผลตอบสนอง ของระบบ ควบคุม	$k$	$t_s$ (sec)	$PO$ (%)	$Interaction$ (%)	$t_s$ of $Interaction$ (sec)
Loop 1	1.0	1300	0.0	0.0	0.0
	1.2	1100	0.0	0.0	0.0
	1.4	960	0.0	0.0	0.0
Loop 2	1.0	1250	0.0	-4	450
	1.2	1050	0.0	-3	675
	1.4	925	0.0	-2.5	975

#### 5.4.3.3 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ $k$ เมื่อต้องการ เปลี่ยนเปอร์เซ็นต์ค่าพ่วงเกินของผลตอบสนองของระบบควบคุม

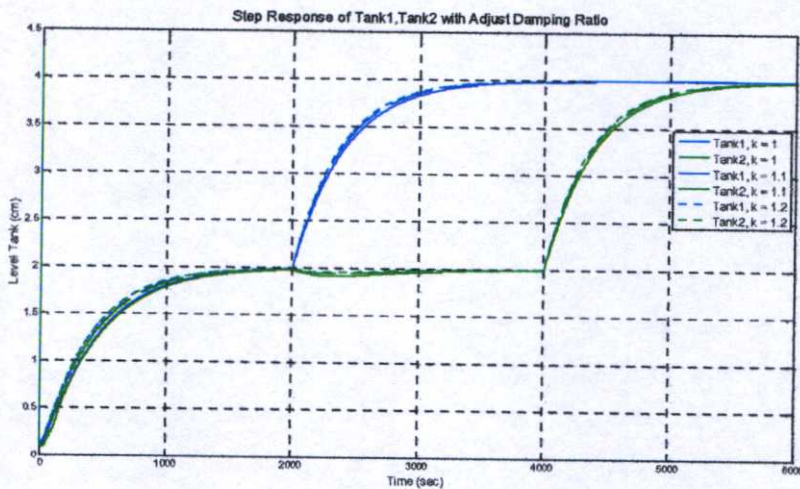
จากการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธี CRA ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.3 นั้นสมรรถนะของระบบควบคุม สามารถปรับเปลี่ยนให้เป็นตามต้องการได้ ด้วยการปรับค่าพารามิเตอร์  $k$  ดังนั้นจึงได้ศึกษาถึงผลกระทบของการปรับค่าพารามิเตอร์  $k$  ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์

ค่าพ่วงเกินของผลตอบสนองของระบบควบคุม โดยในการศึกษานี้จะทำการออกแบบตัวควบคุมพีไอ ด้วยการปรับค่าพารามิเตอร์  $k$  จาก 1 เป็น 1.1 และ 1.2 ตามลำดับ (การเลือกใช้ค่า  $k$  นั้นสามารถเลือกใช้งานได้ตามความเหมาะสม ในที่นี้ค่าที่ใช้ดังกล่าวเป็นค่าที่สามารถนำมาแทนค่าเพื่อให้เห็นความแตกต่างของผลตอบสนองได้) จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสัมพันธ์ประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะและพารามิเตอร์  $k$  ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์ค่าพ่วงเกิน จะได้ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดังตารางที่ 5.19

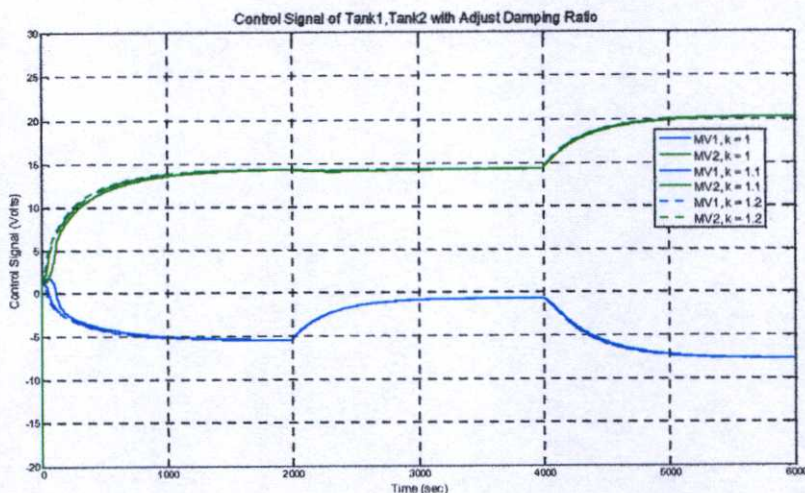
ตารางที่ 5.19 ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอเมื่อปรับค่า  $k$  เมื่อต้องการปรับอัตราการหน่วงของผลตอบสนองของระบบควบคุม

ตัวควบคุม		$K_p$	$K_i$
Loop 1	$\alpha_1 = 6, \alpha_2 = 6, \alpha_3 = 6, \tau = 250, k = 1.0$	34.8467	0.0914
	$\alpha_1 = 6, \alpha_2 = 6, \alpha_3 = 6, \tau = 250, k = 1.1$	33.6911	0.0813
	$\alpha_1 = 6, \alpha_2 = 6, \alpha_3 = 6, \tau = 250, k = 1.2$	48.7632	0.1334
Loop 2	$\alpha_1 = 6, \alpha_2 = 6, \alpha_3 = 6, \tau = 250, k = 1.0$	47.5806	0.1231
	$\alpha_1 = 6, \alpha_2 = 6, \alpha_3 = 6, \tau = 250, k = 1.1$	65.4546	0.1836
	$\alpha_1 = 6, \alpha_2 = 6, \alpha_3 = 6, \tau = 250, k = 1.2$	64.2395	0.1733

ผลตอบสนองของระบบควบคุมและสัญญาณควบคุมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.11 และรูปที่ 5.12 ตามลำดับ



รูปที่ 5.34 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับอัตราการหน่วง ของระบบควบคุมโดยการปรับค่า  $k$  ไป



รูปที่ 5.35 สัญญาณควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับอัตราการ  
หน่วงของระบบควบคุมโดยการปรับค่า  $k$

จากรูปที่ 5.34 แสดงผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับค่า  $k$  จากรูปสังเกตเห็น  
ได้ว่าเมื่อปรับให้ค่า  $k$  เพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 1.1 และ 1.2 จะทำให้ขนาดของผลตอบสนองของ  
กระบวนการมากขึ้นเมื่อเทียบที่เวลาเท่ากัน ในขณะที่ค่าเวลาเข้าที่และรูปทรงผลตอบสนองของ  
ระบบควบคุมยังมีลักษณะเช่นเดิมโดยสมรรถนะของระบบควบคุมสามารถแสดงเปรียบเทียบกัน  
ได้ ดังตารางที่ 5.20

ตารางที่ 5.20 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า  $k$  เปลี่ยนแปลงไป

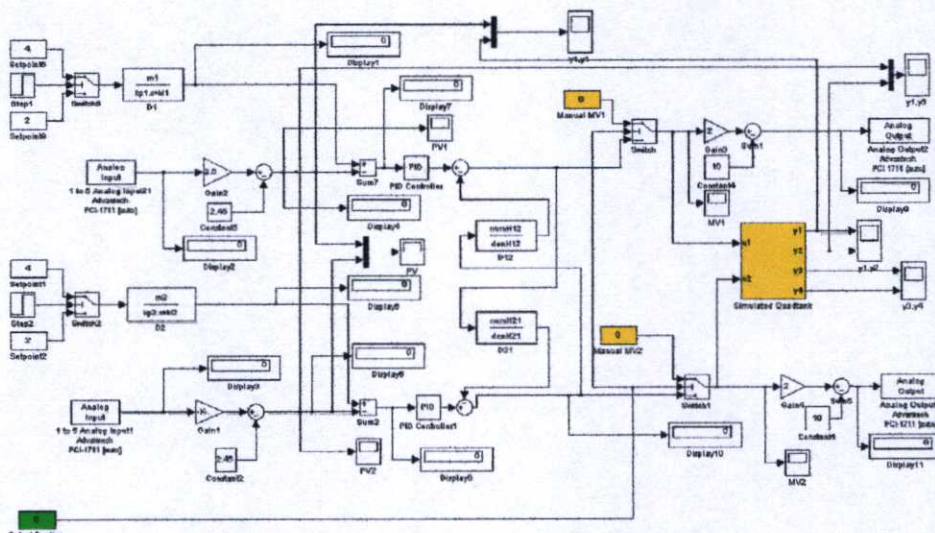
ผลตอบสนอง ของระบบ ควบคุม	$k$	$t_s$ (sec)	$PO$ (%)	$Interaction$ (%)	$t_s$ of $Interaction$ (sec)
Loop 1	1.0	1300	0.0	0.0	0.0
	1.1	1250	0.0	0.0	0.0
	1.2	1200	0.0	0.0	0.0
Loop 2	1.0	1275	0.0	-4.0	970
	1.1	1200	0.0	-3.0	690
	1.2	1175	0.0	-2.0	400

#### 5.4.4 การทดลองกับกระบวนการจริง

หลังจากที่ได้ทำการจำลองการควบคุมกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง ด้วยตัวควบคุมพีไอ ที่  
ออกแบบด้วยวิธี CRA แล้ว ต่อไปจะนำตัวควบคุมดังกล่าวที่ได้ออกแบบมาใช้ทำการควบคุมกับ

กระบวนการจริง โดยจะใช้โปรแกรม MATLAB ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมซึ่งใช้ค่าเวลาชักตัวอย่าง (Sampling Time) เท่ากับ 0.1 วินาที

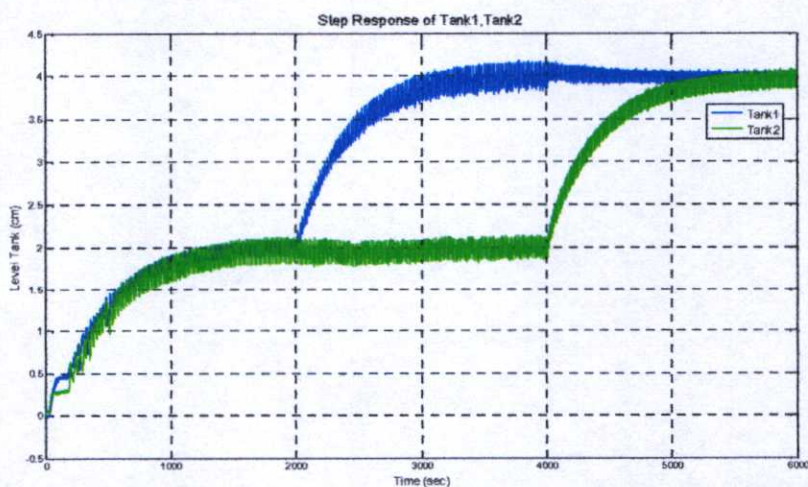
ในการทดลองการควบคุมกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง จะใช้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ขั้นตอนการทดลองและรูปแบบในการทดลองเช่นเดียวกับ การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB ที่ได้ทำการจำลองการทำงานในหัวข้อที่ 5.3.1 โปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในการทดลองกับกระบวนการจริง แสดงดังรูปที่ 5.36



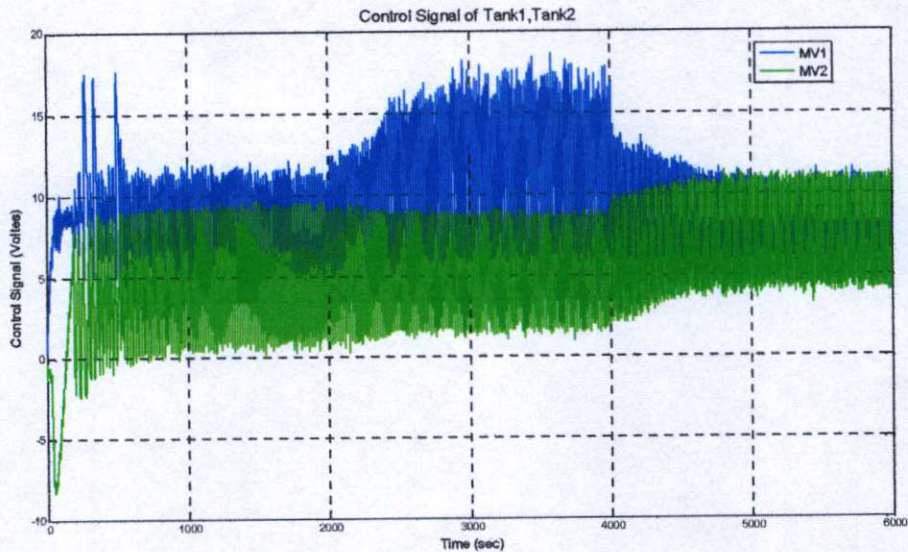
รูปที่ 5.36 โปรแกรม Simulink ที่ใช้ทดลองการทำงานของระบบควบคุม

### 5.3.4.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได

ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันไดแสดงดังรูปที่ 5.37 และ สัญญาณควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.38



รูปที่ 5.37 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได



รูปที่ 5.38 สัญญาณควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันได

จากรูปผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดของระบบควบคุมกระบวนการระดับน้ำ 4 ดังรูปที่ 5.37 จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบพีไอ ที่ออกแบบด้วยวิธี CRA นั้น สามารถควบคุมให้ระบบสามารถติดตามอินพุตอ้างอิงที่เปลี่ยนจากระดับ 20% ไปยังระดับที่ 40% สำหรับถังที่ 1 และถังที่ 2 ได้ตามที่ต้องการ โดยผลตอบสนองของระบบควบคุมจะมีเวลาเข้าที่เท่ากับที่ได้จากการทดสอบกับแบบจำลองทั้งในกรณีถังที่ 1 และในถังที่ 2, มีค่าพุงเกินสำหรับถังที่ 1 และถังที่ 2 ส่วนผลของการอินเตอร์แอคชั่นระหว่างวงรอบควบคุมนั้นมีค่ามากกว่าจากการทดลองกระบวนการจำลองและมีลักษณะการแกว่งตัวในช่วงค่าลบและค่าบวกรอบค่าระดับอ้างอิงเดิม ซึ่งผลของการอินเตอร์แอคชั่นระหว่างวงรอบควบคุมนั้นมีมากกว่าผลที่ได้จากการแบบจำลองกระบวนการนั้นเกิดขึ้นเนื่องจากลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นของปั้มน้ำและวาล์ว และในการกลับสู่ค่าในระดับอ้างอิงเดิมเมื่อสัญญาณอ้างอิงของระดับน้ำดังอื่นเปลี่ยนไป จะมีช่วงเวลาที่นานกว่าก็เพราะผลตอบสนองของถังที่ 1 และถังที่ 2 ลดลงเพื่อเข้าระดับอ้างอิงเดิมนั้นไม่สามารถเข้าสู่ระดับอ้างอิงได้ทันที แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะแกว่งตัวรอบระดับอ้างอิงจนกว่าจะสามารถเข้าสู่ระดับอ้างอิงได้

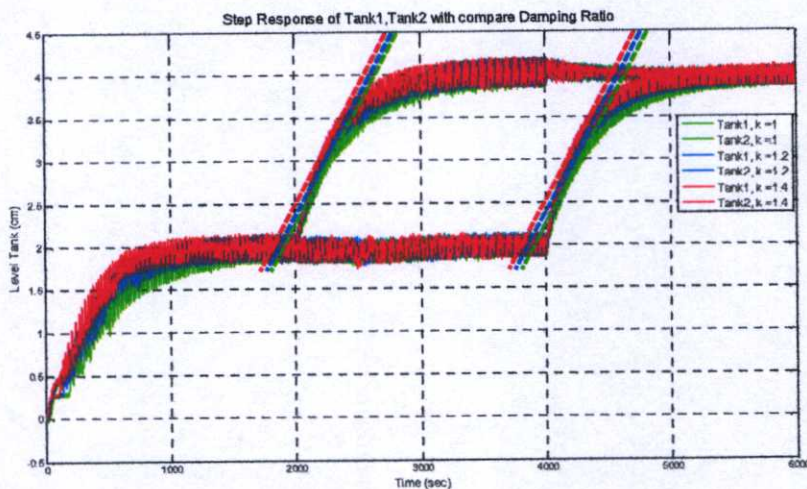
ตารางที่ 5.21 สมรรถนะของระบบควบคุมจากการทดลองในกรณีเฟสค่าสุด

ผลตอบสนองของระบบควบคุม	$t_s$ (sec)	PO (%)	Interaction (%)	$t_s$ of Interaction (sec)
ถังที่ 1	1100	0.0	0.0	0.0
ถังที่ 2	1300	0.0	-2.5	1200

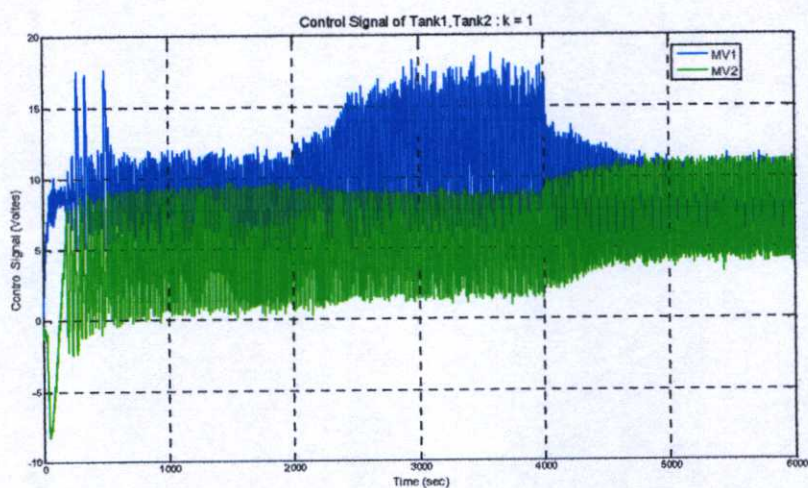
#### 5.4.4.2 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ $k$ เมื่อต้องการเปลี่ยนค่าเวลาเข้าที่ของผลตอบสนองของระบบควบคุม

ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อนำเอาตัวควบคุมแบบพีไอ ที่ได้ทำการออกแบบโดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์  $k$  จาก 1 เป็น 1.2 และ 1.4 ตามลำดับ

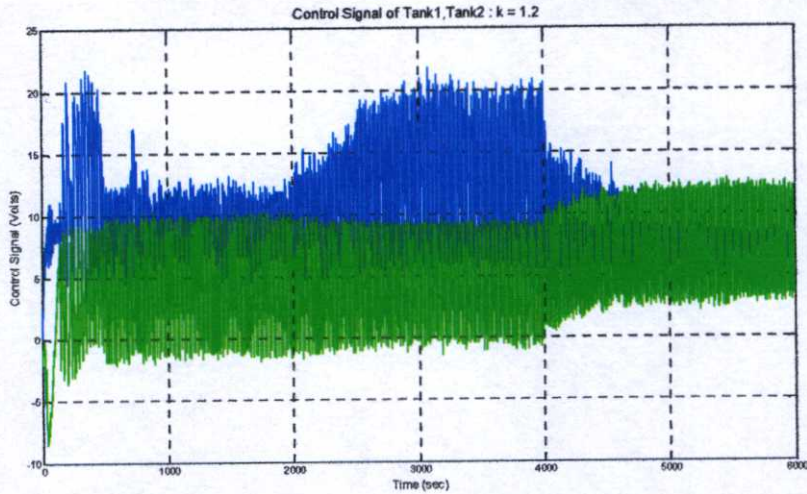
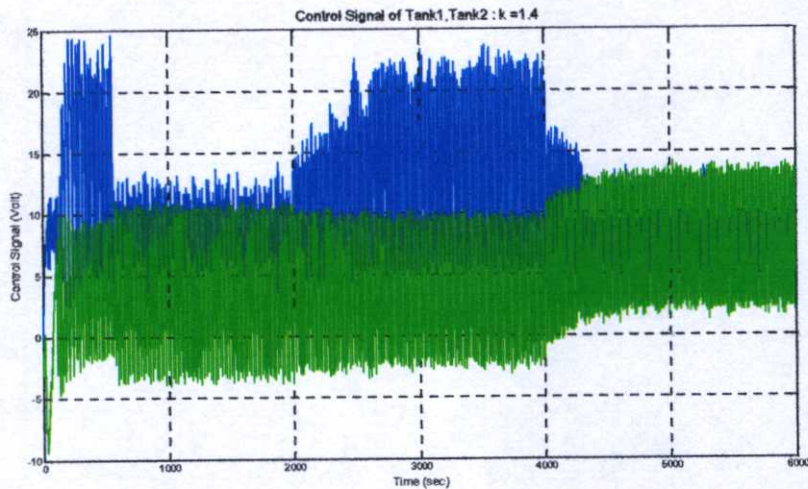
จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะและพารามิเตอร์  $k$  ที่มีต่อค่าคงที่เวลา  $\tau$  ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันไดแสดงดังรูปที่ 5.39 และสัญญาณควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.39 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า  $k$



(ก) สัญญาณควบคุมเมื่อ  $k = 1.0$

(ข) สัญญาณควบคุมเมื่อ  $k = 1.2$ (ค) สัญญาณควบคุมเมื่อ  $k = 1.4$ 

รูปที่ 5.40 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า  $k$  มีค่าเท่ากับ 1.0, 1.2 และ 1.4 ตามลำดับ

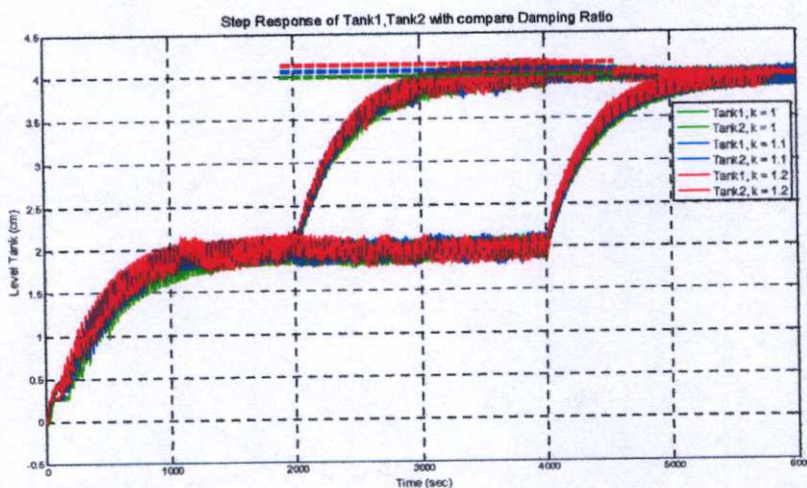
จากรูปที่ 5.39 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับค่า  $k$  เพื่อปรับความเร็วของผลตอบสนองของระบบควบคุม จากรูปสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อปรับให้ค่า  $k$  เพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 1.2 และ 1.4 จะทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมเร็วขึ้น ในขณะที่ค่าพ่วงเกินและรูปทรงผลตอบสนองของระบบควบคุมยังคงเดิม โดยสมรรถนะของระบบควบคุมสามารถแสดงเปรียบเทียบกันได้ดังตารางที่ 5.22

ตารางที่ 5.22 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า  $k$  เปลี่ยนแปลงไป

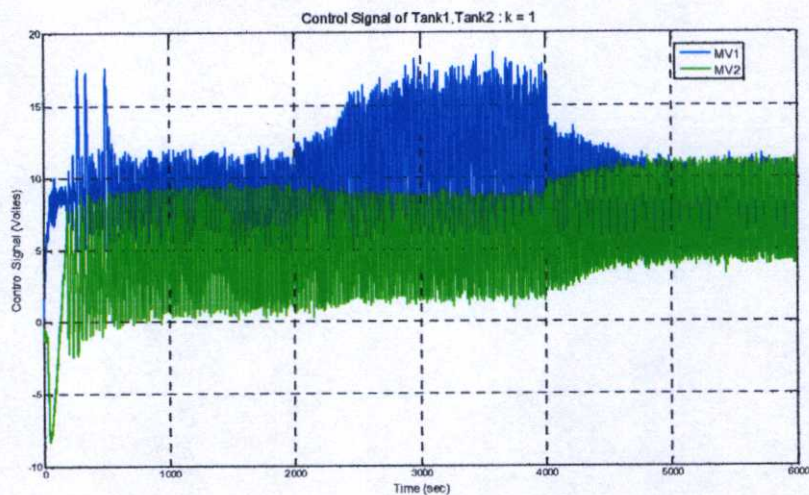
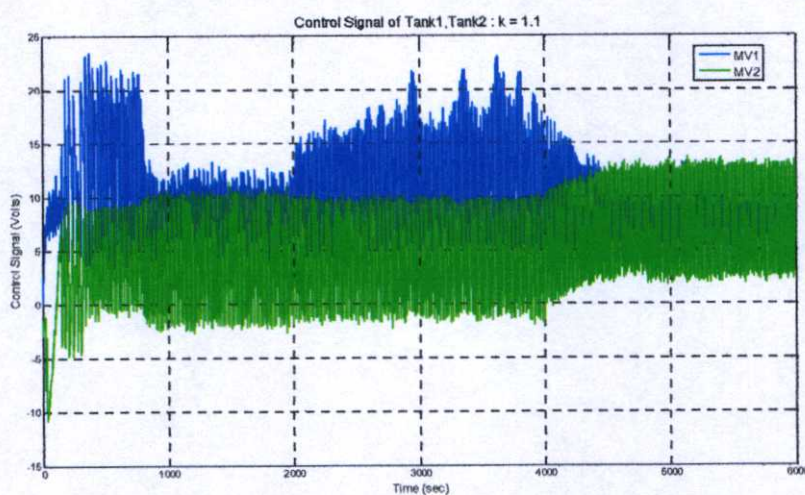
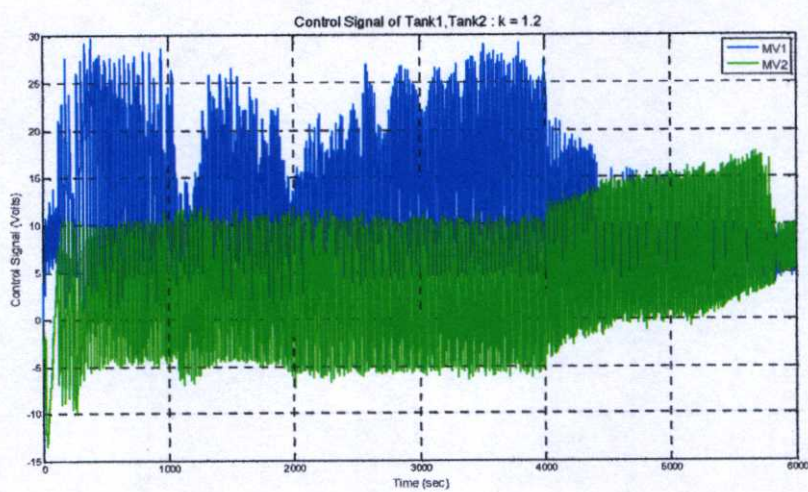
ผลตอบสนอง ของระบบ ควบคุม	$k$	$t_s$ (sec)	$PO$ (%)	$Interaction$ (%)	$t_s$ of $Interaction$ (sec)
Loop 1	1.0	1100	0.0	0	0
	1.2	1000	0.0	0	0
	1.4	950	0.0	0	0
Loop 2	1.0	1300	0.0	-2.5	1200
	1.2	1200	0.0	-2.0	1100
	1.4	125	0.0	-1.75	1000

#### 5.4.4.3 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ $k$ เมื่อต้องการ เปลี่ยนเปอร์เซ็นต์ค่าพุงเกินของผลตอบสนองของระบบควบคุม

ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อนำเอาตัวควบคุมแบบพีไอ ที่ได้ทำการออกแบบโดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์  $k$  จาก 1 เป็น 1.1 และ 1.2 ตามลำดับจากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะและพารามิเตอร์  $k$  ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์ค่าพุงเกิน สามารถพิจารณาได้จากผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันไดแสดงดังรูปที่ 5.41 และสัญญาณควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.42



รูปที่ 5.41 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับ  
อัตราकरणห้วงของระบบควบคุมโดยการปรับค่า  $k$

(ก) สัญญาณควบคุมเมื่อ  $k = 1.0$ (ข) สัญญาณควบคุมเมื่อ  $k = 1.1$ (ค) สัญญาณควบคุมเมื่อ  $k = 1.2$ 

รูปที่ 5.42 สัญญาณควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับปรับอัตราการทำงาน of ระบบควบคุม โดยการปรับค่า  $k$

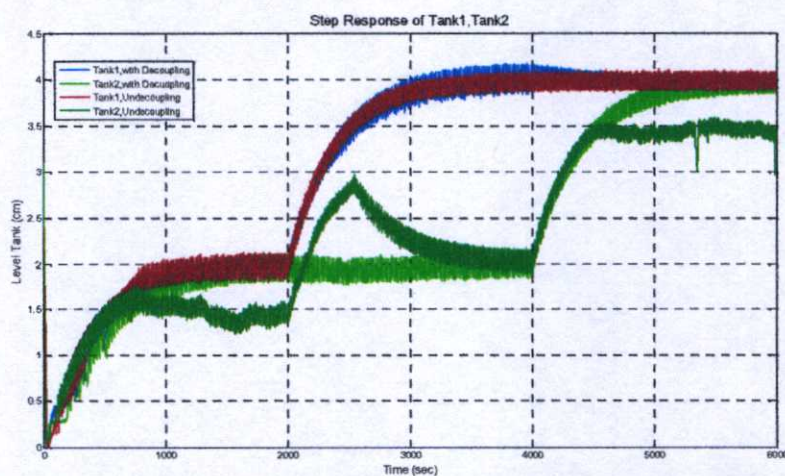
จากรูปที่ 5.41 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับค่า  $k$  เพื่อปรับค่าพ่วงเกินของผลตอบสนองของระบบควบคุม จากรูปสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อปรับให้ค่า  $k$  เพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 1.1 และ 1.1 จะทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมลง ในขณะที่ค่าความเร็วและรูปทรงผลตอบสนองของระบบควบคุมยังคงเดิม โดยสมรรถนะของระบบควบคุมสามารถแสดงเปรียบเทียบกันได้ดังตารางที่ 5.23

ตารางที่ 5.23 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า  $k$  เปลี่ยนแปลงไป

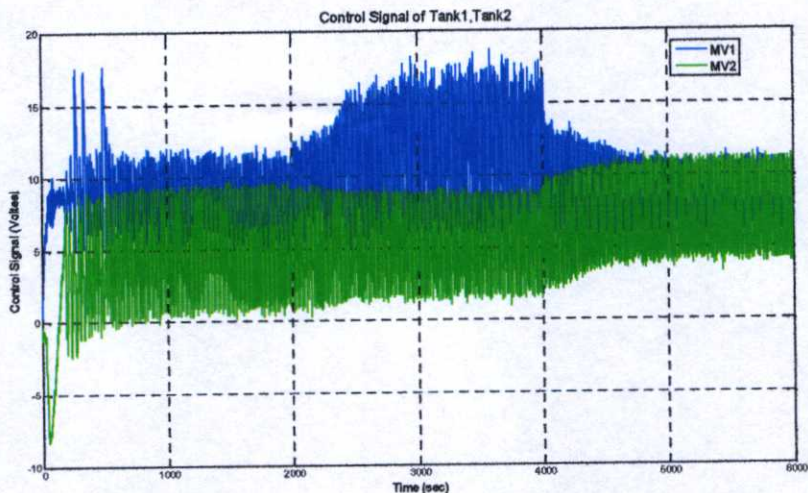
ผลตอบสนองของระบบควบคุม	$k$	$t_s$ (sec)	$PO$ (%)	$Interaction$ (%)	$t_s$ of $Interaction$ (sec)
Loop 1	1.0	1100	0.0	0	0
	1.2	1050	0.0	0	0
	1.4	975	0.0	0	0
Loop 2	1.0	1300	0.0	-2.5	1200
	1.2	1200	0.0	-2.0	1100
	1.4	125	0.0	-1.75	1000

#### 5.4.4.4 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบควบคุมที่มีชุดคัตปลิงแบบอินเวอร์สคัตปลิงกับระบบควบคุมที่ไม่มีชุดคัตปลิง

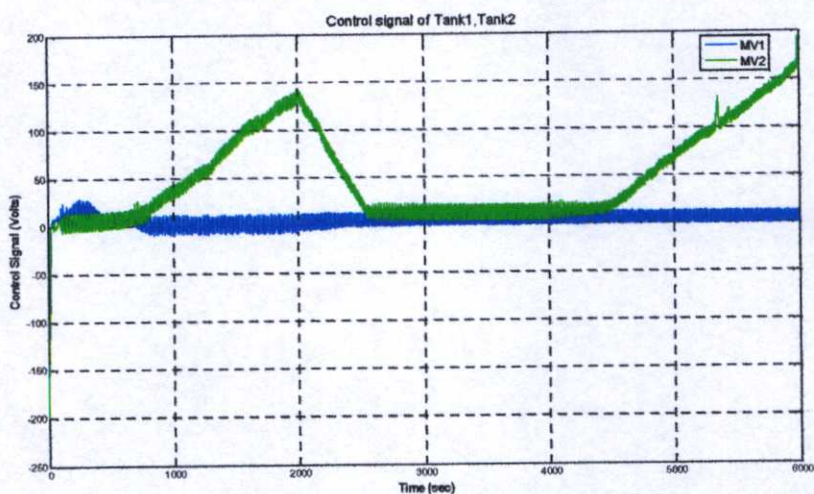
ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อนำเอาตัวควบคุมแบบพีไอ ที่ได้ทำการออกแบบมาทำการเปรียบเทียบระหว่างระบบที่มีชุดคัตปลิงกับระบบที่ไม่มีชุดคัตปลิง โดย สามารถพิจารณาได้จากผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันไดแสดงดังรูปที่ 5.43 และสัญญาณควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.44



รูปที่ 5.43 การเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุมระหว่างระบบที่มีชุดคัตปลิงกับระบบที่ไม่มีชุดคัตปลิง



(ก) สัญญาณควบคุมของระบบที่มีคัตกลับ



(ข) สัญญาณควบคุมของระบบที่ไม่มีคัตกลับ

รูปที่ 5.44 การเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมของระบบควบคุมระหว่างระบบที่มีชุดคัตกลับกับระบบที่ไม่มีชุดคัตกลับ

## บทที่ 6

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 6.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบดิจิทัลสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึงโดยวิธีการกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ ทั้งในกรณีเฟสต่ำสุดและเฟสไม่ต่ำสุด ซึ่งโครงสร้างของตัวควบคุมนั้นเป็นโครงสร้างตัวควบคุมแบบแยกอิสระ โดยในออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CRA นั้นจะต้องรู้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง ก่อน ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถึง จะได้จากสมการสมดุลมวลและกฎของเบอร์นูลิโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มานั้นจะเป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงได้ใช้วิธีของอนุกรมเทเลอร์เพื่อแปลงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ให้เป็นแบบจำลองเชิงเส้น จากนั้นจึงนำแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นนี้ไปออกแบบชุดดิจิทัล เพื่อให้กระบวนการระดับน้ำแบบ 4 ถึง แยกโครงสร้างของระบบให้เป็นแบบอิสระต่อกันจำนวน 2 ชุด ระบบที่ได้รับการแยกอิสระโดยชุดดิจิทัลจะถูกนำไปออกแบบตัวควบคุมโดยอาศัยเทคนิคการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CRA ต่อไป พารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้จะนำไปจำลองการทำงานโดยโปรแกรม MATLAB และทดลองกับกระบวนการจริงต่อไป

การจำลองการทำงานของระบบควบคุมด้วยโปรแกรม MATLAB และทดลองกับกระบวนการจริงนั้นแบ่งออกได้เป็น 2 กรณีด้วยกันคือกรณีเฟสต่ำสุดและเฟสไม่ต่ำสุด โดยกรณีเฟสต่ำสุดนั้นจะมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้ ขั้นตอนแรกทำการทดสอบผลตอบสนองของระบบควบคุม เมื่อกำหนดให้อินพุตอ้างอิงของระบบควบคุมเป็นแบบขั้นบันได ขั้นตอนที่สองทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของการปรับค่าพารามิเตอร์  $k$  ว่ามีผลอย่างไรต่อค่าเวลาไต่ของผลตอบสนองของระบบควบคุม ขั้นตอนที่สามทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของการปรับค่าพารามิเตอร์  $k$  ว่ามีผลอย่างไรต่อเปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินของผลตอบสนองของระบบควบคุม ขั้นตอนี่สี่ทำการเปรียบเทียบการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมกับเทคนิคการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางเดินราก ส่วนในกรณีไม่เฟสต่ำสุดนั้นจะมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้ ขั้นตอนแรกทำการทดสอบผลตอบสนองของระบบควบคุม เมื่อกำหนดให้อินพุตอ้างอิงของระบบควบคุมเป็นแบบขั้นบันได ขั้นตอนที่สองทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของการปรับค่าพารามิเตอร์  $k$  ว่ามีผลอย่างไรต่อค่าเวลาไต่ของผลตอบสนองของระบบควบคุม ขั้นตอนี่สามทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของการปรับค่าพารามิเตอร์  $k$  ว่ามีผลอย่างไรต่อเปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินของผลตอบสนองของระบบควบคุม ขั้นตอนี่สี่จะทำการทดสอบเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุมในกรณีที่ถูควบคุมมีชุดดิจิทัลกับกระบวนการที่ไม่มีชุดดิจิทัล ซึ่งในกรณี

เฟสไม่ต่ำสุดนี้ชุดคิ่คัปปลิงจะมีลักษณะเป็นการคิ่คัปปลิงแบบอินเวอร์สคิ่คัปปลิงเพื่อให้กระบวนการระดับน้ำแบบ 4 ถึงกรณีเฟสไม่ต่ำสุดสามารถควบคุมได้เนื่องจากผลของซีโรของกระบวนการที่วางตัวอยู่ด้านขวาของระนาบ  $s$

ซึ่งหลังจากที่ได้ทำการศึกษาถึงผลจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB และทดลองกับกระบวนการจริงตามขั้นตอนดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นพบว่าทั้งกรณีเฟสต่ำสุดและเฟสไม่ต่ำสุดนั้น เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดให้กับระบบควบคุมแบบคิ่คัปปลิงโดยวิธี CRA นั้นสามารถควบคุมระดับน้ำในถังทั้ง 2 ได้ตามต้องการ โดยมีค่าเวลาใต้ตามต้องการ, มีค่าพุ่งเกินเล็กน้อย, ไม่มีค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัว และระบบควบคุมยังสามารถรักษาระดับที่ต้องการควบคุมได้ ส่วนผลจากการทดลองในกรณีที่ออกแบบตัวควบคุมโดยทำการปรับค่าเวลาเข้าที่ พบว่าเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์  $k$  ให้มีค่ามากขึ้น จะทำให้ผลตอบสนองมีค่าเวลาเข้าที่ลดลง ส่วนผลจากการทดลองในกรณีที่ออกแบบตัวควบคุมโดยทำการปรับค่าอัตราการหน่วง พบว่าเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์  $k$  ให้มีค่ามากขึ้น ผลตอบสนองจะมีค่าพุ่งเกินลดลง และจากการเปรียบเทียบเทคนิคการปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโดยวิธี CRA กับวิธีทางเดินรากพบว่า วิธี CRA สามารถปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมได้ง่ายกว่าและสามารถกำหนดคุณลักษณะของผลตอบสนองได้ดีกว่า อาทิ เช่นการกำหนดให้ค่าพุ่งเกินของผลตอบสนองให้เป็นศูนย์หรือการใช้เวลาการเข้าที่ที่น้อยกว่าวิธีการออกแบบโดยเทคนิคทางเดินราก และในส่วนของกรณีเฟสไม่ต่ำสุดที่ใช้การคิ่คัปปลิงแบบอินเวอร์สคิ่คัปปลิงนั้นผลของชุดคิ่คัปปลิงสามารถช่วยให้กระบวนการสามารถควบคุมได้และมีผลตอบสนองได้อย่างที่ทำการออกแบบไว้

## 6.2 ปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางในการแก้ปัญหา

ปัญหาที่พบในการทดลองนั้นพบว่ามีความหลายปัญหาด้วยกัน สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. อุปกรณ์วัดระดับแบบความดันแตกต่าง (Differential Pressure Transmitter) ที่ไม่ได้ทำการติดตั้งอย่างถาวรทำให้ช่วงการวัดอาจขยับเลื่อนไปได้ หากมีการขยับตำแหน่งตัววัดระดับแบบความดันแตกต่าง หรือฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากการหมุนวาล์วที่ตัววัดระดับแบบความดันแตกต่าง แนวทางการแก้ปัญหาคือต้องทำการกำหนดช่วงการวัดก่อนที่จะเก็บผลการทดลอง และตรวจสอบความถูกต้องของเอาต์พุตจากตัววัดระดับแบบความดันแตกต่างขณะทำการทดลองว่าถูกต้องหรือไม่

2. ในการควบน้ำของปั้มน้ำนั้น บ่อยครั้งมักจะมีเศษผงตะกอน ถูกดูดเข้าไป ทำให้เกิดการอุดตันในตัวปั้มน้ำและเป็นสาเหตุให้อัตราการไหลของปั้มน้ำลดลง แนวทางการแก้ปัญหาคือใช้อุปกรณ์ กรองน้ำเพื่อกันไม่ให้เศษผงตะกอนสามารถไหลเข้าไปยังปั้มน้ำได้

3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนของปั๊มน้ำนั้นเมื่อใช้เวลาทดลองนานๆ จะเกิดความร้อนสะสมที่ตัวไอซีมาก ถึงแม้จะมีตัวระบายความร้อนติดอยู่ที่ตัวไอซีก็ตาม ทำให้การขับเคลื่อนของปั๊มน้ำนั้นไม่สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ แรงดันและกระแสที่เข้าสู่ปั๊มน้ำจะลดลง แม้ว่าแรงดันที่จ่ายให้กับอุปกรณ์ขับเคลื่อนจะคงที่ จึงเป็นสาเหตุให้อัตราการไหลของปั๊มน้ำลดลง แนวทางการแก้ไขปัญหาคือ ใช้ไอซีที่สามารถทนกระแสได้สูงมากขึ้น หรือเปลี่ยนตัวระบายความร้อนให้มีขนาดใหญ่ขึ้น

4. การทดลองติดต่อกันเป็นเวลานาน มีผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของปั๊มน้ำต่ำลง เป็นผลให้อัตราการไหลเข้าของน้ำลดลงอันเนื่องมาจากค่ากำลังของปั๊มตกลงนั่นเอง แนวทางแก้ไขคือ ควรออกแบบการทดลองและการเก็บผลให้ใช้ระยะเวลาเหมาะสมกับความสามารถของตัวอุปกรณ์

5. วาล์วที่ใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการต่าง ๆ อาทิ วาล์วชุดปรับพื้นที่ตัดรูด้านออกของถัง หรือวาล์วชุดปรับพื้นที่ด้านเข้าของถัง มีลักษณะไม่เชิงเส้นและแตกต่างกัน ทำให้การปรับตำแหน่งของวาล์วในการหาจุดทำงานของกระบวนการทำได้ยาก

### 6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบดิจิทัลโดยวิธีการกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง ซึ่งโครงสร้างตัวควบคุมนั้นมีโครงสร้างตัวควบคุมแบบแยกอิสระโดยชุดดิจิทัล ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CRA โดยใช้โครงสร้างตัวควบคุมแบบไม่แยกอิสระจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ

สำหรับกระบวนการระดับน้ำ 4 ถังนั้นเมื่อพิจารณาถึงการเลือกวาล์วในการปรับแต่งพารามิเตอร์ของกระบวนการ อาทิ วาล์วชุดปรับพื้นที่หน้าตัดรูด้านเข้าและออกของกระบวนการหากสามารถเลือกวาล์วที่มีลักษณะที่เป็นเชิงเส้นมาใช้งานได้ก็จะสามารถปรับแต่งพารามิเตอร์ของกระบวนการได้ง่ายและสะดวกขึ้น หรือหากการเลือกวาล์วที่มีลักษณะที่เป็นเชิงเส้นที่มีขนาดเล็กมาใช้งานนั้นทำได้ยากการเลือกติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหลในกระบวนการก็เป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถทำได้เพื่อลดเวลาในการทำงานต่อไป

## บรรณานุกรม

- [1] J.M. Maciejowaki, "**Multivariable Feedback Design**," Addison - Wesley, 1989
- [2] S. Skogestad, and I. Postlethwaite., "**Multivariable Feedback Control Analysis and Design**," JohnWiley & Sons, Chichester, 1996.
- [3] M. Zhuang, and D.P. Althenon, "**PID controller design for a TITO system**," IEE Proc.- Control Theory Appl., Vol.141, No.2, pp.111 – 120, 1994.
- [4] Y.C. Kim, L.H. Keel and S.P. Bhattacharyya, "**Transient Response Control via Characteristic Ratio Assignment**," IEEE Transactions on Automatic Control , Vol.48, No.12, 2003, pp. 2238-2244.
- [5] S. Manabe, "**Coeficient Diagram Method**," Presented at the 14<sup>th</sup> IFAC Sympsium on Automatic Control in Areospace, Seoul, 1998
- [6] K.H. Johnsson, "**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.
- [7] E. Gagnon, A. Pomerleau and A. Desbiens. , "**Simplified, ideal or inverted decoupling?**". ISA Transactions 37 (1998). : 265-276
- [8] Harold L. Wade, "**Inverted decoupling: a neglected technique**" ISA Transactions. Vol. 36. No.1, 1997, pp. 3-10
- [9] S. Jayasuriya and J.W. Song. 1990, **On the Synthesis of Compensators for Non Overshooting Step Response**. Proceedings American Control Conference. : 683-684
- [10] R.H. Middleton and S.F. Grabe, "**Slow Stable Open-Loop Poles: To Cancel or not to Cancel**" Automatica, Vol.35, 1999, pp. 877-886
- [11] A.V. Lipatov and N.I. Sokolov, "**Some Sufficient Conditions for Stability and Instability of Continuous Linear Stationary Systems**", Translated from Automatika, No.9, 1978, pp. 30-37
- [12] J. Lo, "An Algebraic Approach to Control System Design," Master Thesis, Department of Applied Science, University of Waterloo, Waterloo Canada, 1996.
- [13] Katsuhiko Ogata, **Modern Control Engineering**, Third Edition, University Of Minnesota, Prentice Hall Internationnal, Inc. 1997

- [14] Carlos A. Smith, Ph.D.,P.E, University of South Florida, Armando B. Corripio, Ph.D., P.E., Louisiana State University, "**Principles and Practice of Automatic Process Control**", **Second** Edition, John Wiley & Sons, Inc.
- [15] Wojciech Grega, "**Minimum-Time Liquid Level Control**", Institute of Automatics Technical University of Mining and Metallurgy, Poland
- [16] W.Grega, "**Modelling and Control of a Tank System**", Proc. Of the 12<sup>th</sup> IASTED Int. Conf., Acta Press, Zurich, 1993, s.175-178
- [17] Armstrong, B.; Perez, R., "**Controls laboratory program with an accent on discovery learning**", IEEE Control Systems Magazine, Volume: 21 Issue: 1, ISSN: 0272-1708, pp14-20.
- [18] Anderson, B. D. O., and J. B. Moore, "**Linear Optimal Control**". Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1971.
- [19] Brogan, W.L., "**Modern Control Theory**". Upper Saddle River, NJ: Pentice Hall, 1985.
- [20] Cannon, R., "**Dynamics of physical Systems**". New York: McGraw-Hill Book Company, 1967.
- [21] Cunningham, W J., "**Introduction to Nonlinear Analysis**". New York: McGraw-Hill Book Company, 1958.
- [22] Dorf, R. C., and R. H. Bishop, "**Modern Control Systems**", 9<sup>th</sup> ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001.
- [23] Evans, W. R., "**The Use of Zeros and Poles for Frequency Response or Transient Response**," ASME Trans. 76(1954),pp.1135-44.
- [24] Friedland, B., "**Control System Design**". New York: McGraw-Hill Book Company, 1986.

### **ภาคผนวก ก.**

**รายละเอียดของอุปกรณ์และวงจรที่ใช้ในการทดลอง**

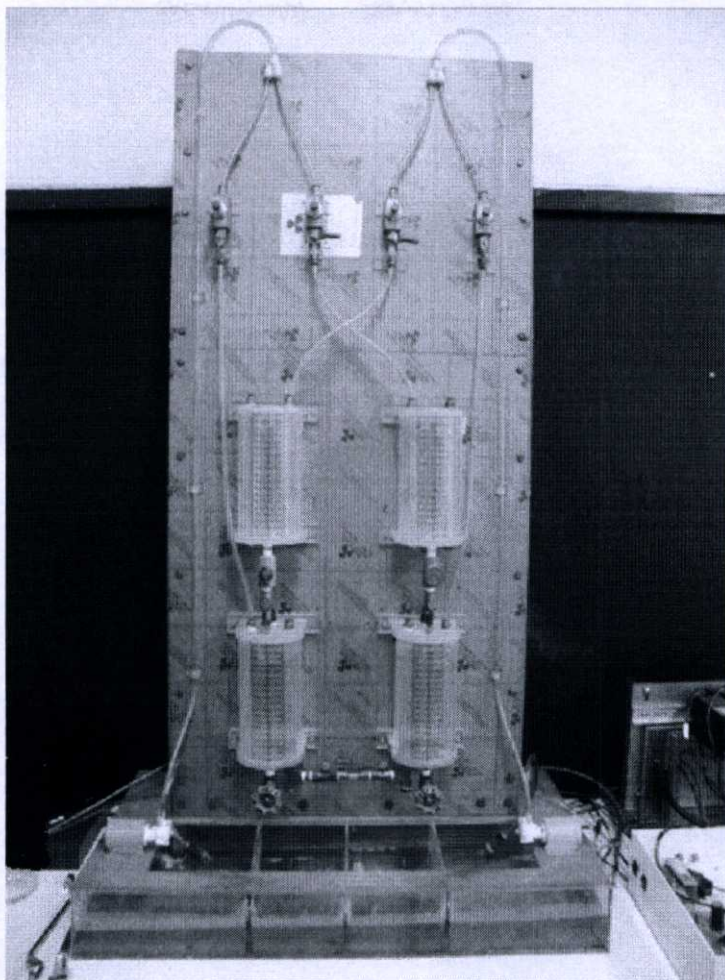
ในการควบคุมการทำงานของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง เพื่อให้สามารถทำงานได้ตามที่  
ต้องการนั้นต้องใช้อุปกรณ์ต่างๆมาประกอบเข้าด้วยกัน ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนั้นสามารถ  
แบ่งเป็น 8 ส่วนด้วยกัน ซึ่งประกอบด้วย

1. กระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง
2. Differential Pressure Transmitter
3. วงจรปรับแต่งสัญญาณแรงดันที่ได้รับจากเซ็นเซอร์
4. วงจรขับกระแส
5. ปั๊มน้ำ
6. การ์ดแปลงสัญญาณ A/D และ D/A
7. แหล่งจ่ายไฟ

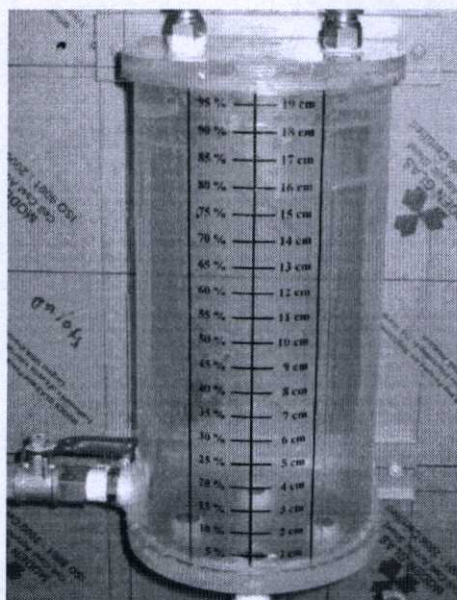
โดยรายละเอียดของอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองนั้นสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

#### ก.1 กระบวนการระดับน้ำ 4 ถัง

กระบวนการระดับน้ำ 4 ถังจะประกอบไปด้วยถังน้ำ 4 ใบด้วยกัน แสดงได้ดังรูปที่ ก.1  
ถังน้ำแต่ละใบจะมีขนาดพื้นที่หน้าตัด  $66.25 \text{ cm}^2$  และสูง 18.5 เซนติเมตร แสดงได้ดังรูปที่ ก.2  
โดยถังใบที่ 2 จะมีวาล์วที่ใช้ในการปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำด้านออกจากถัง แสดงได้ดังรูปที่ ก.3 น้ำ  
ที่ไหลเข้าสู่ถังน้ำแต่ละใบนั้นจะถูกปั๊มขึ้นมาจากบ่อเก็บน้ำด้านล่าง ซึ่งบ่อเก็บน้ำจะมีขนาดความจุ  
เท่ากับ  $40 \times 80 \times 10$  เซนติเมตร โดยปั๊มน้ำทางด้านขวานั้นจะถูกใช้เพื่อจ่ายน้ำให้ถังใบที่ 1 ซึ่งอยู่  
ทางด้านขวามือ และน้ำจะถูกจ่ายไปยังถังใบที่ 2 ซึ่งอยู่ทางด้านซ้ายมือ โดยผ่านวาล์วที่ใช้ในการ  
ปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำด้านออกจากถังที่ 1 ไปยังถังที่ 2 แสดงดังรูป ก.4 สายยางที่ใช้ต่อกับปั๊มน้ำ  
นั้นจะเป็นสายยางอ่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 8 มิลลิเมตร



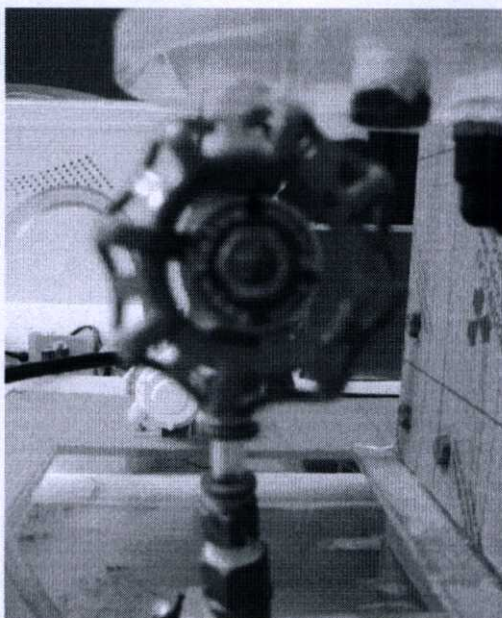
รูปที่ ก.1 กระบวนการณ์ระดับ 4 ถัง



รูปที่ ก.2 ถังน้ำที่ใช้ในการทดลอง

### ก.1.1 วาล์วปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำด้านออก

วาล์วที่ใช้ในการปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำทางด้านออกของถังใบที่ 2 แสดงได้ดังรูป ก. 3



รูปที่ ก.3 วาล์วที่ใช้ในการปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำด้านออกจากถังใบที่ 2

### ก.1.2 อุปกรณ์วัดระดับน้ำ ( Differential Pressure Transmitter )

อุปกรณ์ที่ใช้วัดระดับน้ำที่เลือกใช้สำหรับกระบวนการนี้จะเลือกใช้ อุปกรณ์วัดแรงดันแบบความดันแตกต่าง (Differential Pressure Transmitter) ของ Rosemount รุ่น 3051CD Range 0-250 inH<sub>2</sub>O ค่าความแม่นยำคือ  $\pm 0.065\%$  of Span ใช้พาวเวอร์ซัพพลาย 0-24 VDC และ ให้เอาต์พุต 4/20 mA พร้อมกับสัญญาณดิจิทัล HART รูปของอุปกรณ์วัดระดับน้ำแสดงได้ดังรูป ก.5

### ตารางที่ ก.2 รายละเอียดทางเทคนิคของอุปกรณ์วัดระดับน้ำ ( Differential Pressure Transmitter )

Reference Accuracy	0.065% of Span
Installed Stability	0.125% URL/ 5yr
Response Time	100ms
Max Working Pressure (MWP)	420Bar (6ksi)
Differential Pressure Range	-250 to 250 inH <sub>2</sub> O
Sensor Technology	Capacitance (DP)
Communication Protocol	4-20mA & HART, Fieldbus
Rangeability	100 to 1



รูปที่ ก.5 อุปกรณ์วัดระดับน้ำ ( Differential Pressure Transmitter )

การวัดระดับน้ำนั้นจะใช้สายยางขนาด 8 มิลลิเมตรที่ต่อมาจากด้านก้นถังของถังน้ำไปที่ 2 ต่อเข้าทางด้านความดันสูงของตัวอุปกรณ์วัดความดันแตกต่าง ส่วนทางด้านความดันต่ำของตัวอุปกรณ์จะเปิดไว้เพื่อรับความดันบรรยากาศ เนื่องจากถังน้ำที่ใช้ในกระบวนการเป็นถังน้ำแบบเปิด ความดันแตกต่างที่วัด โดยอุปกรณ์วัดความดันแตกต่างจึงสัมพันธ์กับระดับน้ำในถังดังต่อไปนี้

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

$$\Delta P = \rho gh$$

โดย

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของน้ำ  $1000 \text{ kg/cm}^3$

$g$  คือ แรงโน้มถ่วงของโลก  $9.81 \text{ m/s}^2$

$h$  คือ ระดับน้ำที่วัด  $\text{m}$

$\Delta P$  คือ ความดันแตกต่าง  $\text{KPa}$

ในการทดลองกำหนด ช่วงการวัดอยู่ที่ระยะ 0 เซนติเมตรถึง 18.5 เซนติเมตร

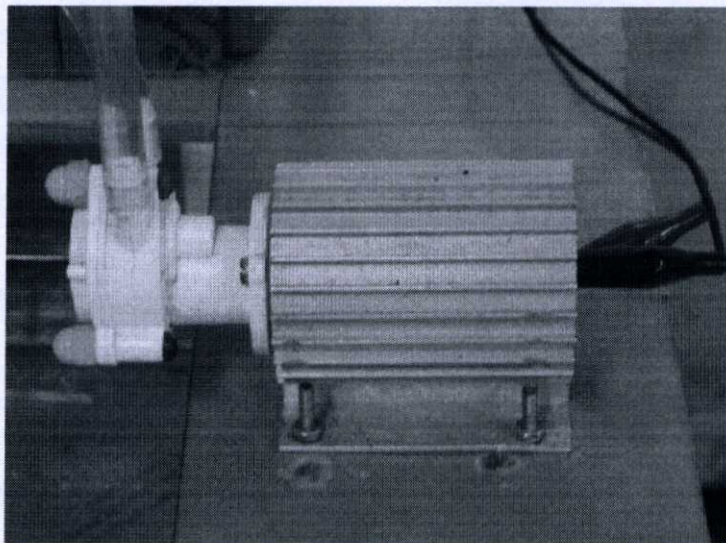
$$\begin{aligned}\Delta P &= (1000 \times 9.81 \times 0.185) / 1000 \\ &= 1.814 \text{ KPa}\end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้ช่วงความดันแตกต่างเท่ากับ

$$\Delta P = 0 - 1.814 \text{ KPa}$$

เมื่อกำหนดช่วงความดันแตกต่างข้างต้นให้เป็นช่วงการวัดระดับ 0% ถึง 100% ของระดับน้ำในถังที่ 2 อุปกรณ์วัดแรงดันแบบความดันแตกต่าง ( Differential Pressure Transmitter ) จะให้เอาต์พุตเป็นค่ากระแสไฟฟ้า 4-20 mA ที่สัมพันธ์กับระดับน้ำในถังที่ 2 ที่ความสูง 0 ถึง 18.5 เซนติเมตร

### ก.1.3 ป้อนน้ำ



รูปที่ ก.6 ป้อนน้ำที่ใช้ในการทดลอง

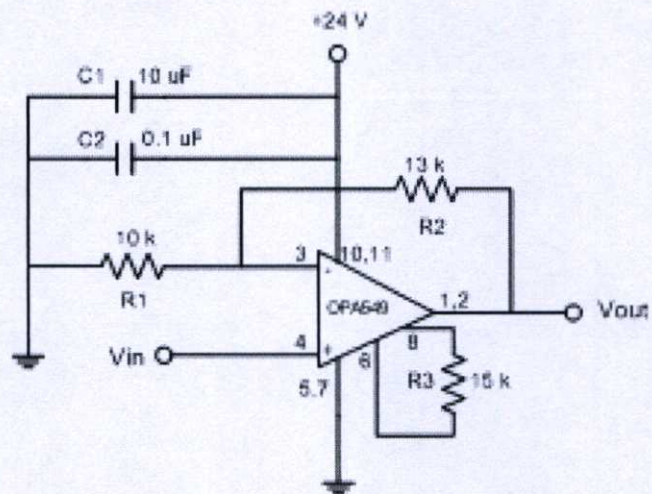
ป้อนน้ำที่ใช้ในการทดลองนั้นจะใช้ของบริษัท API Instruments รุ่น P6 10.0006 ซึ่งจะเป็นป้อนน้ำแบบเกียร์ป้อน โดยรูปของป้อนน้ำที่ใช้ในการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ ก.6 ส่วนข้อมูลคุณสมบัติและรายละเอียดของป้อนน้ำแสดงได้ดังตารางที่ ก.1

**ตารางที่ ก.2** รายละเอียดทางเทคนิคของปั้มน้ำ

Max Flow rate	2200 ml/min (Vdc)
Max. Suction	10 ft. H <sub>2</sub> O wet, 4" dry
Max. Pressure	20 psig (46 ft. H <sub>2</sub> O)
Port Size (OD)	4.8 mm (0.18") hose barb
Power Require (Vdc)	24 Vdc (up to 28W)
Max Operating Temp	93 <sup>0</sup> C (200 <sup>0</sup> F)
Ambient Fluid Temp	0 to 93 <sup>0</sup> C (32 to 200 <sup>0</sup> 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.1.4 วงจรออปแอมป์ (Operation Amplifier) ที่ใช้ขับมอเตอร์ (Drive Motor)

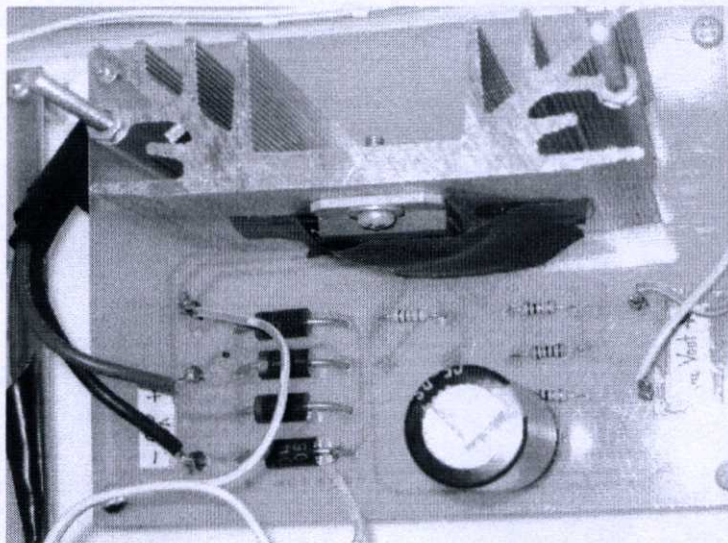
ออปแอมป์สามารถนำไปสร้างเป็นวงจรแบบอินเวอร์ตติ้ง (Inverting), แบบนอนอินเวอร์ตติ้ง (Non-inverting) หรือดิฟเฟอเรนเชียล แอมพลิฟายเออร์ (Differential Amplifier) ได้โดยใช้การป้อนกลับแบบลบ ( Negative Feedback ) เพื่อให้ได้อัตราการขยายที่เสถียรและเพิ่มช่วงการใช้งาน (Bandwidth) ของวงจร จากคุณสมบัติทางอุดมคติของออปแอมป์ คือความต้านทานด้านอินพุตสูง ความต้านทานด้านเอาต์พุตต่ำ อัตราการขยายสูงและช่วงใช้งานกว้าง แต่ในการนำวงจรออปแอมป์ไปใช้งานจริงอาจจะได้ผลไม่ตรงกับคุณสมบัติทางอุดมคติ โดยอาจจะมีเอาต์พุตออฟเซตโวลเตจ (Output Offset Voltage) คือความต่างศักย์ทางด้านเอาต์พุตเมื่ออินพุตทั้ง 2 ขา (บวกและลบ) ต่อดงกราวด์ ซึ่งเราสามารถใช่วงจรชดเชยเพื่อให้ออปแอมป์มีคุณสมบัติใกล้เคียงอุดมคติ

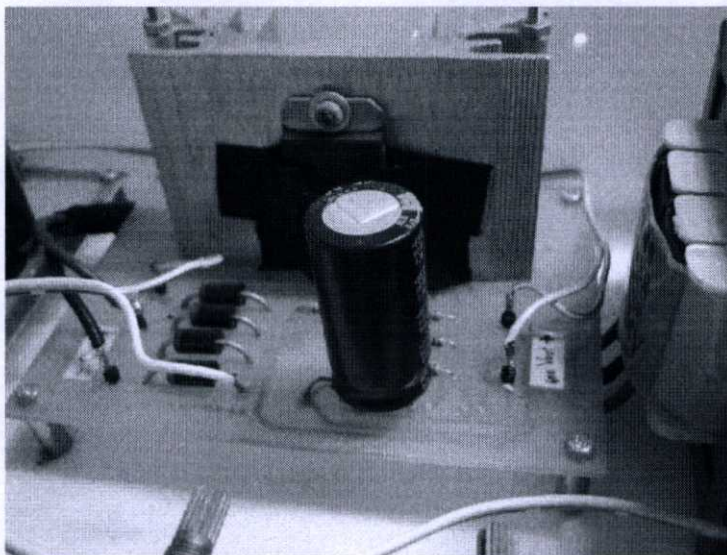


รูปที่ ก.7 วงจรออปแอมป์แบบไม่กลับเฟส (Noninverting) ที่ใช้ขั้วมอเตอร์

อัตราขยายของวงจร

$$\begin{aligned} \frac{V_o}{V_{in}} &= 1 + \frac{R_2}{R_1} \\ &= 1 + \frac{13k}{10k} \\ &= 2.4 \text{ เท่า} \end{aligned}$$

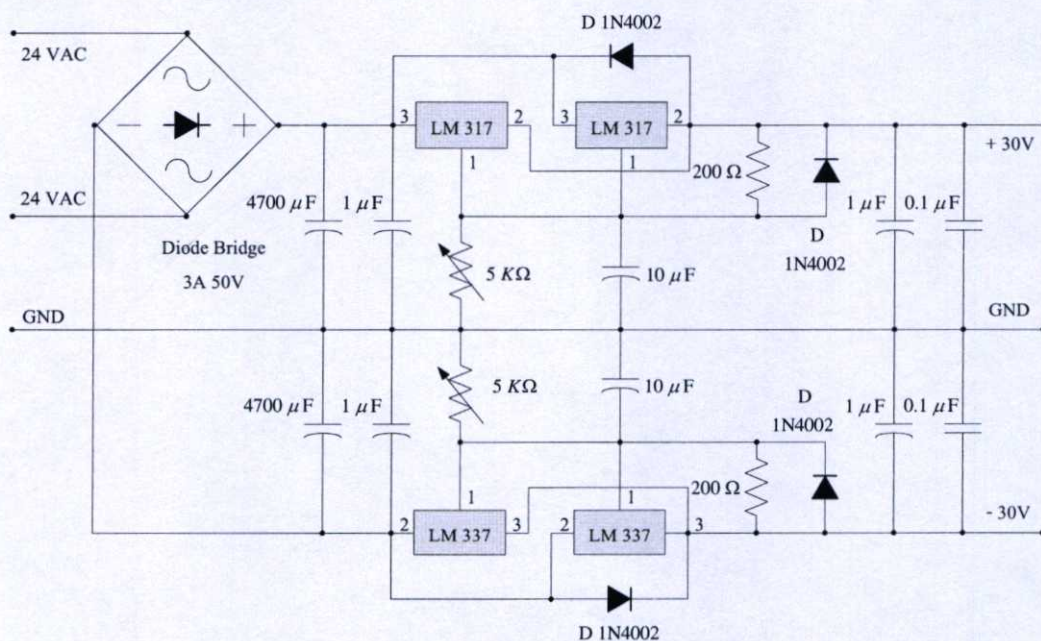




รูปที่ ก.8 อุปกรณ์ขับเคลื่อนของปั๊มน้ำ

### ก.1.5 แหล่งจ่ายไฟสำหรับอุปกรณ์

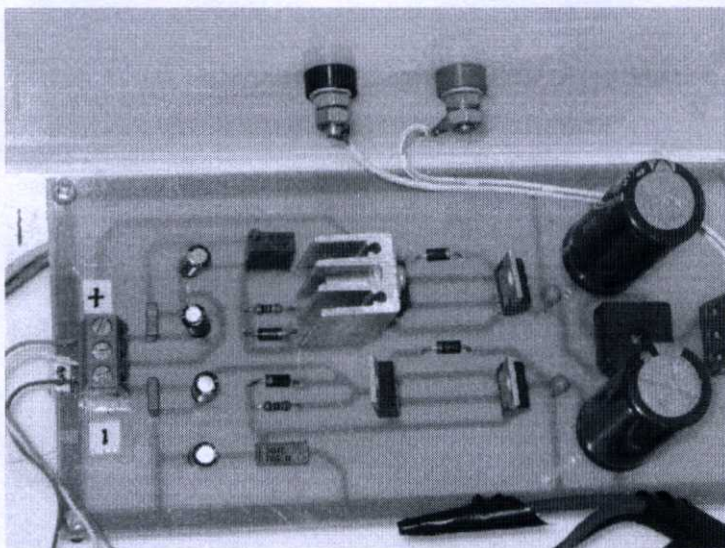
แหล่งจ่ายไฟสำหรับอุปกรณ์ขับเคลื่อนของปั๊มน้ำนั้นจะใช้แหล่งจ่ายไฟขนาด  $\pm 15$  V, 3 A โดยรูปของวงจรแหล่งจ่ายไฟแสดงดังรูปที่ 2.10 และรูปอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟแสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ ก.9 วงจรแหล่งแหล่งจ่ายไฟขนาด  $\pm 15$  V, 3 A

เนื่องจากไอซีเรกกูเลเตอร์ที่ใช้ในการรักษาระดับแรงดันอ้างอิงให้คงที่ขนาด  $\pm 30$  V นั้นไม่มี ดังนั้นในการทดลองนี้จึงใช้ไอซีเรกกูเลเตอร์เบอร์ LM 317 และ LM 337 ซึ่งเป็นไอซีเรกกูเล

เตอร์แบบปรับค่าแรงดันได้ แต่เนื่องจากไอซีนี้สามารถจ่ายกระแสได้สูงสุดเพียง 1.5 A ดังนั้นเพื่อให้เหมาะสมในการใช้งานกับอุปกรณ์ขับกระแสของปั้มน้ำ จึงนำเอาไอซีเรกกูเลเตอร์นี้มาต่อขนานกัน เพื่อให้สามารถจ่ายกระแสได้มากขึ้นถึง 3 A

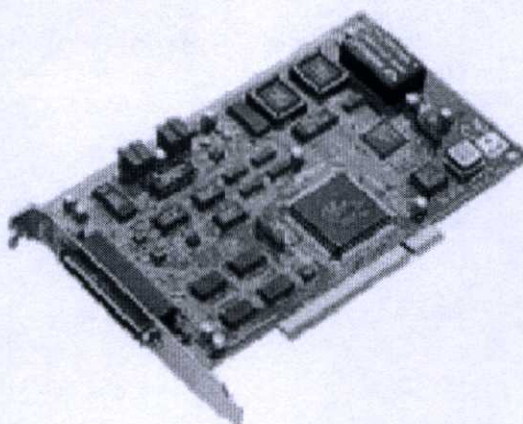


รูปที่ ก.10 อุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟขนาด  $\pm 15\text{ V}$ , 3 A

#### ก.1.6 การ์ดแปลงสัญญาณ A/D และ D/A

การ์ดแปลงสัญญาณ A/D และ D/A ที่ใช้ในการทดลองนี้จะใช้การ์ดรุ่น PCI-1711 ของบริษัท Advantech ซึ่งจะเป็นการ์ดที่มีลักษณะการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์แบบ ISA การ์ดนี้จะทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุม กับอุปกรณ์ขับกระแสของปั้มน้ำและอุปกรณ์กรองความถี่ต่ำ โดยรูปของการ์ดแปลงสัญญาณ A/D และ D/A แสดงได้ดังรูปที่ 2.12 และการ์ดจะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆดังนี้

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



รูปที่ ก.11 การ์ดแปลงสัญญาณ A/D และ D/A

#### ก.1.7.1 ส่วนแปลงสัญญาณ A/D

ส่วนแปลงสัญญาณ A/Dนี้จะทำหน้าที่ในการรับสัญญาณแรงดันจากอุปกรณ์กรองความถี่ และแปลงให้อยู่ในรูปของสัญญาณดิจิทัล เพื่อส่งให้กับคอมพิวเตอร์หรือตัวควบคุมต่อไป โดย ส่วนแปลงสัญญาณ A/D นี้จะมีจำนวนช่องในการรับสัญญาณถึง 16 ช่อง, มีความละเอียดสูงถึง 12 บิต, มีความเที่ยงตรงสูงถึง  $\pm 0.01\%$  หรือ  $\pm 1$ บิต, มีความเป็นเชิงเส้นมากถึง  $\pm 1$ บิต, และมีความเร็วในการแปลงสัญญาณสูงสุดถึง 100 KHz นอกจากนี้ยังสามารถเลือกช่วงของสัญญาณ อินพุตที่จะรับเข้ามาได้หลายแบบ ขึ้นอยู่กับการเลือกที่สวิทช์หรือเลือกทางซอฟต์แวร์

#### ก.1.7.2 ส่วนแปลงสัญญาณ D/A

ส่วนแปลงสัญญาณ D/Aนี้จะทำหน้าที่ในการรับสัญญาณควบคุมจากคอมพิวเตอร์หรือตัวควบคุม และแปลงให้อยู่ในรูปของสัญญาณอนาล็อกเพื่อส่งให้กับชุดขับเคลื่อนของปั๊มน้ำต่อไป โดยส่วนแปลงสัญญาณ D/A นี้จะมีจำนวนช่องในการส่งสัญญาณ 2 ช่อง, มีความละเอียดสูงถึง 12 บิต, มีความเป็นเชิงเส้นมากถึง  $\pm 0.5$  บิต และมีความเร็วในการแปลงสัญญาณสูงถึง  $5\mu s$  นอกจากนี้ยังสามารถเลือกช่วงของสัญญาณเอาต์พุตที่จะส่งออกไปได้หลายแบบ ขึ้นอยู่กับการเลือกที่สวิทช์หรือเลือกทางซอฟต์แวร์

## **ภาคผนวก ข.**

**โปรแกรมที่ใช้ในการหาแบบจำลองกระบวนการ, และออกแบบตัวควบคุม**

ข.1 โปรแกรมหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการระดับน้ำ 4 ถังและชุดดีคัปปลิง  
สำหรับกรณีเฟสต่ำสุดและเฟสไม่ต่ำสุด

\*\*\*\*\*

clear

clc

% Use for Calculation Parameter Simulation

% Process Parameter

% Tank Parameter

A1=70;

A2=70;

A3=70;

A4=70;

a = 0.5028;

% Beta parameter

beta1=0.530;

beta2=0.657;

beta3=0.320;

beta4=0.370;

% Outlet tanks cosssection

a1=a\*beta1;

a2=a\*beta2;

a3=a\*beta3;

a4=a\*beta4;

% Gain of Pump

k1=3.154;

k2=3.240;

% Gain of Output

kc = 1;

% gravity

g=981;

% gamma Parameter Minimum Phase

gammam1 = 0.543;

gammam2 = 0.556;

```

% h-operating Point
hm10=3.5;
hm20=2.4;
hm30=2;
hm40=1.5;

%Time Constant of 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);

% Cal Parameter Constant
c1 = tm1/A1;
c2 = tm2/A2;

% Cal Transfer Function
num11 = [gammam1*k1*c1];
den11 = [tm1 1];
G11 = tf(num11,den11)

num12 = [(1-gammam2)*k2*c1];
den12 = [(tm1*tm3) (tm1+tm3) 1];
G12 = tf(num12,den12)

num21 = [(1-gammam1)*k1*c2];
den21 = [(tm2*tm4) (tm2+tm4) 1];
G21 = tf(num21,den21)

num22 = [gammam2*k2*c2];
den22 = [tm2 1];
G22 = tf(num22,den22)

% Cal Decoupling
H12 = G12/G11
H21 = G21/G22

```

```
% Fix Parameter Decoupling
% parameter H12
numH12 = [num12*den11]
denH12 = [den12*num11]
%%% parameter H21
numH21 = [num21*den22]
denH21 = [den21*num22]

% Tranfer function for Find out Controller parameters

Gn1 = G11-((G21/G22)*G12) % Full parameter Loop1
Gn2 = G22-((G12/G11)*G21) % Full parameter Loop2

G1 = minreal(Gn1,0.001)% Reduces parameter Loop1
G2 = minreal(Gn2,0.001)% Reduces parameter Loop2
```

ข.2 โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอโดยวิธี CRA กรณีปรับความเร็วผลตอบสนอง  
ของระบบควบคุม

```
%*****
%      CRA For Quadruple Tank Process with Decoupler
%      Case Dampling Adjustment (PI-Controller)
%*****

clc
clear

% Parameter of Quadruple Tank Process with Decoupler
% Bp1(s)
p21 = 0.02055;
p11 = 0.002114;
p01 = 2.579e-005;
% Ap1(s)
q31 = 1;
q21 = 0.1479;
q11 = 0.007208;
q01 = 0.0001159;
%Parameter of CRA controller
alfa1 = 6;
alfa2 = 6;
alfa3 = 6;
k = 1;
tao = 250;
% Cal Condtion Condition
a1 = alfa1*alfa2*alfa3;
a2 = a1*(k^3);
```

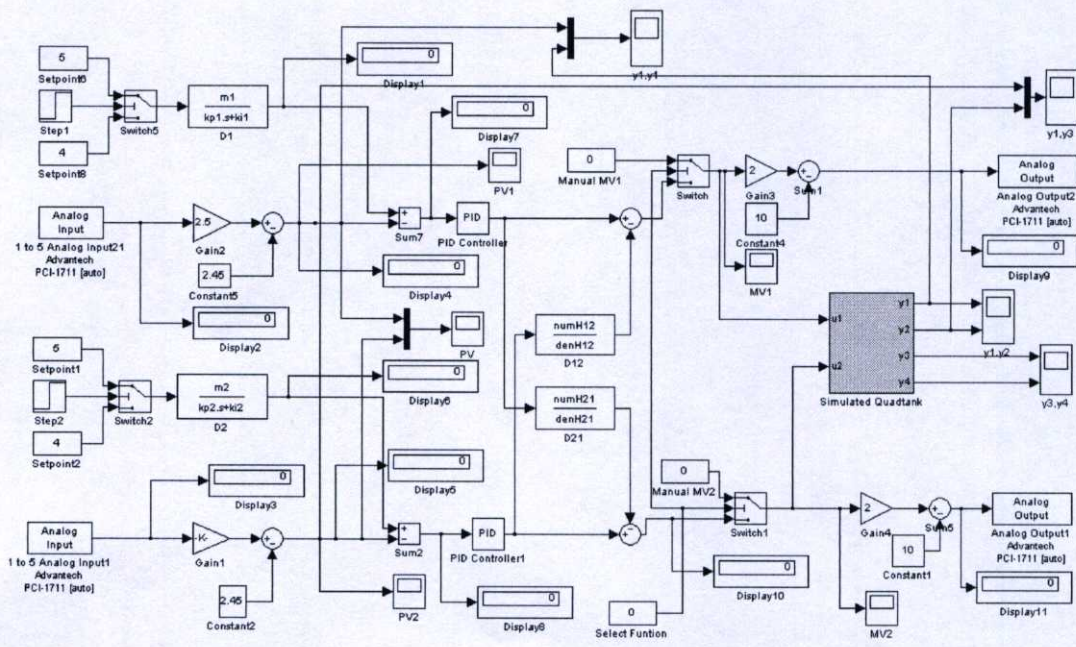
```

% Calculation
syms kp1 ki1
eq1 = [num2str(tao),'=',('num2str(q01),'+(-kp1*',num2str(p01),')+(ki1*',num2str(p11),'))/(-
ki1*',num2str(p01),')');
eq2 =
[num2str(tao),'/',num2str(a2),'=',('num2str(q31),')/('num2str(q21),'+(kp1*',num2str(p21),'))');
S = solve(eq1,eq2,kp1,ki1);
kp1 = double(S.kp1)
ki1 = double(S.ki1)
m1 = ki1
% Calculation for Loop 2
% Bp2(s)
p22 = 0.02059;
p12 = 0.002118;
p02 = 2.584e-005;
% Ap2(s)
q32 = 1;
q22 = 0.1703;
q12 = 0.009512;
q02 = 0.0001735;
% Calculation
syms kp2 ki2

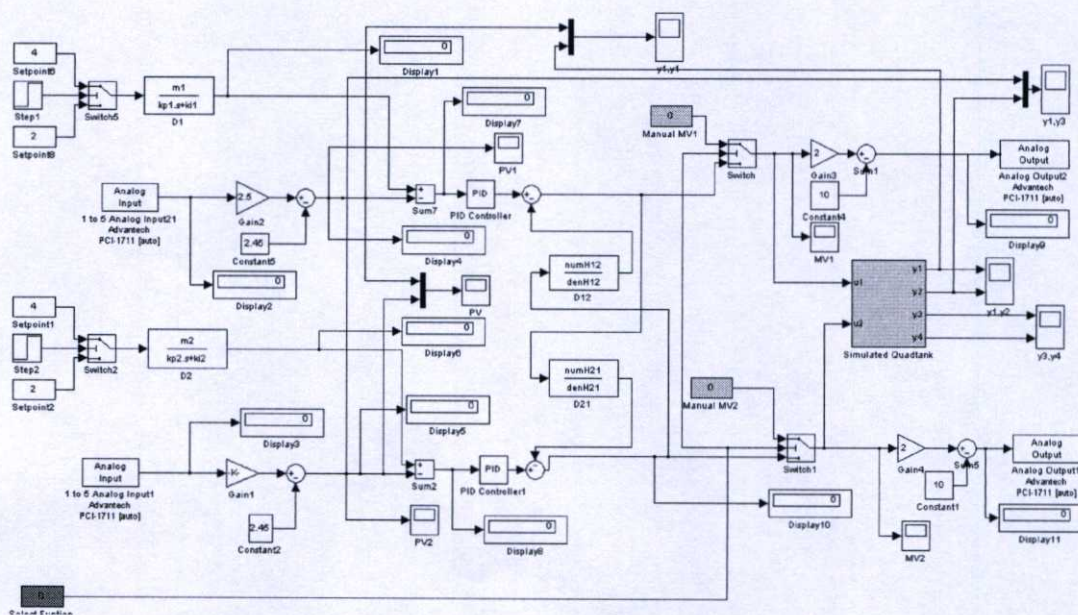
eq3 = [num2str(tao),'=',('num2str(q02),'+(-kp2*',num2str(p02),')+(ki2*',num2str(p12),'))/(-
ki2*',num2str(p02),')');
eq4 =
[num2str(tao),'/',num2str(a2),'=',('num2str(q32),')/('num2str(q22),'+(kp2*',num2str(p22),'))');
T = solve(eq3,eq4,kp2,ki2);
kp2 = double(T.kp2)
ki2 = double(T.ki2)
m2 = ki2

```

#### ข.4 โปรแกรม Simulink ที่ใช้ในการทดลองกรณีเฟสต่ำสุด



## ข.5 โปรแกรม Simulink ที่ใช้ในการทดลองกรณีเฟสไม่ต่ำสุด



**ภาคผนวก ค.**

**ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่**

# ICCAS 2007



International Conference on Control, Automation and Systems 2007

• PROCEEDINGS

Welcome Message

Conference Organization

Conference Information

Plenary Talks, Invited Talks & Special Session

Table of Contents

Author Index

Financial Contribution

E-proceeding Search

EXIT

October 17-20, 2007  
COEX, Seoul, Korea

IEEE Catalog Number: 07EX1874 ISBN: 978-89-950038-6-2 98560  
in conjunction with KRC 2007



### Design of Decoupled Controller for TITO System using Characteristic Ratio Assignment

Arjin Numsomran<sup>2</sup>, Theerachai Wongkhum<sup>2</sup>, Tianchai Suksri<sup>1</sup>, Phongchai Nilas<sup>2</sup> and Jutarut Chaoraingern<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, Department of Instrumentation Engineering,  
Pathumwan Institute of Technology, Bangkok, Thailand

<sup>2</sup> Faculty of Engineering, Department of Instrumentation Engineering,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand  
(Tel : +668 1 925 0356; E mail: knarjin@kmitl.ac.th)

**Abstract:** Most control performances in actual design are usually defined by the time domain response such as overshoot, rising time, settling time, steady state error, etc.. There are few control design methods, which are able to apply directly to the purpose. The pole placement method is the most popular. The Characteristic Ratio Assignment (CRA) is one technique of pole placement based on defined parameter of characteristic equation. This technique can adjust speed response and the damping ratios by only one parameter. In this paper, CRA is used to design controller for two-input two-output (TITO) systems. By using the decentralized CRA controllers and eliminate interaction between loop transfer function with conventional decoupler design method. Several examples are present to illustrate the effectiveness of the proposed method and compared it with existing ones. It is shown that CRA design is stable, robust, whilst giving the desired time domain performance.

**Keywords:** Characteristic Ratio Assignment (CRA) SISO Controllers, TITO Systems, Decoupling

## 1. INTRODUCTION

Processes with only one output being controlled by a single manipulated variable are classified as single-input single-output (SISO) systems. For the process having more than one control loop can be called multi-input multi-output (MIMO) or multivariable process which very often found in power plant, refinery process, chemical industries and many other fields [1],[2]. The control of these processes is more difficult than SISO processes. Because there is an interaction between other control loops of MIMO processes. Therefore the method used for SISO systems cannot be used for control of MIMO systems effectively. The most common form or well-known form of MIMO system is a two-input two-output (TITO) system [3]. Many techniques have been present in the literature for the control of TITO system. The controller used for TITO systems often found that PID controller, ISTE optimization method [3, 4], frequency based tuning method [5], Nyquist stability analysis [6], dominant pole placement [7], decentralized relay autotune method [8, 9] are among them.

The characteristic ratio assignment (CRA) [10] is original developed from coefficient diagram method (CDM) [11]. CRA is one technique based on defined parameter of characteristic equation similar CDM, but this technique can be adjusted speed response and damping ratios of system arbitrary by only one parameter. Therefore, this technique is convenient and suitable for tuning controller under the requirement of the system.

The rest of the paper organized as follows. The method for remove interaction with decoupler design method explained in Section II. In Section III, illustrate concept of CRA and techniques for adjustment speed response and damping ratios of system. The method design of decentralized controller by CRA for TITO system is proposed in Section IV. The examples for test and shown that valuable of CRA design proposed is clarified in Section V. Finally, conclusions are given in section VI.

## 2. DECOUPLING DESIGN METHOD

The structure of TITO system can show in form of block diagram in Fig.1 and transfer matrix for this system is

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

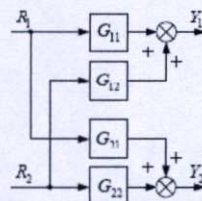


Fig. 1 A general structure of TITO system

From Eq. (1) element of diagonal matrix  $G_{11}$  and  $G_{22}$  are direct loop transfer function of  $R_1-Y_1$  and  $R_2-Y_2$ , while off diagonal matrix  $G_{12}$  and  $G_{21}$  are cross coupling between loop transfer function. The effect of cross coupling is called interaction, which this effect can produce several undesirable influences or prohibits satisfactory control system. In this case, the effect can be removed or decreased to minimize by using decoupling method. Decoupling method is a technique used to transform the transfer matrix of the system to a diagonal transfer matrix by using a decoupler matrix. Fig.2 shows a block diagram of a decoupler incorporated with a TITO system and a decoupler matrix for a TITO system as shown in Eq. (2).

$$H(s) = \begin{bmatrix} H_{11}(s) & H_{12}(s) \\ H_{21}(s) & H_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (2)$$

When a decoupler is incorporated into a TITO system, the overall transfer matrix can be transformed to a diagonal transfer matrix also.

$$\begin{bmatrix} G_{11}(s) & 0 \\ 0 & G_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{11}(s) & H_{12}(s) \\ H_{21}(s) & H_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (3)$$

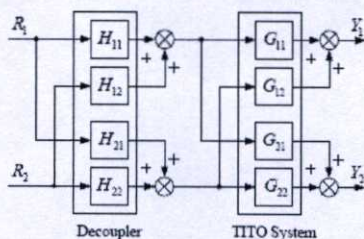


Fig. 2 The configuration of decoupler with TITO system

According to conventional decoupler design [2], assign  $H_{11}$  and  $H_{22} = I$  for  $H_{12}$  and  $H_{21}$  obtain by solve Eq. (3)

$$H_{12} = -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} \quad (4a)$$

$$H_{21} = -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} \quad (4b)$$

When assign  $H_{11}$ ,  $H_{12}$ ,  $H_{21}$  and  $H_{22}$  in Eq. (3), the decentralized system can be represented by following equation

$$Y_1 = \left( G_{11}(s) - \frac{G_{12}(s)}{G_{22}(s)} G_{21}(s) \right) R_1 - 0 R_2 = G_{11}(s) R_1 \quad (5a)$$

$$Y_2 = 0 R_1 - \left( G_{22}(s) - \frac{G_{21}(s)}{G_{11}(s)} G_{12}(s) \right) R_2 = G_{22}(s) R_2 \quad (5b)$$

In Eq. (5a) and (5b), interaction between loop transfer function are eliminated. The new decentralized system is expedient to control and SISO control system design for applied to each loop transfer function.

In some case time delay is incorporate with the system. The decoupler design method can use by estimate time delay with Pade approximation or use the direct steady-state decoupler [12].

### 3. SIMULATION EXAMPLES

Naslin [13] has studied the problems to optimize damping ratios of control systems, and he found that the damping ratios relates with characteristic ratios. The relation of characteristic equation can be illustrated as follow.

$$p(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0, \quad \forall a_i > 0 \quad (6)$$

Where, the characteristic ratios is given by,

$$\alpha_1 = \frac{a_1^2}{a_0 a_2}, \quad \alpha_2 = \frac{a_2^2}{a_1 a_3}, \quad \dots, \quad \alpha_{n-1} = \frac{a_{n-1}^2}{a_{n-2} a_n} \quad (7)$$

and the inverse of characteristic equation is given as

$$b_0 = \frac{a_0}{a_1}, \quad b_1 = \frac{a_1}{a_2}, \quad \dots, \quad b_{n-1} = \frac{a_{n-1}}{a_n} \quad (8)$$

Otherwise, it is able to depict the relation of coefficient ratio and characteristic pulsances as,

$$\alpha_1 = \frac{b_1}{b_0}, \quad \alpha_2 = \frac{b_2}{b_1}, \quad \dots, \quad \alpha_{n-1} = \frac{b_{n-1}}{b_{n-2}} \quad (9)$$

Thus the generalized time constant is given by

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} \quad (10)$$

Given Eq. (7)-(8), it is able to describe in another form by the coefficient of characteristic equation

$$A = [a_n \ a_{n-1} \ \dots \ a_1 \ a_0] \quad (11)$$

$$B = [b_{n-1} \ b_{n-2} \ \dots \ b_1 \ b_0] \quad (12)$$

$$C = [c_{n-2} \ c_{n-3} \ \dots \ c_1 \ c_0] \quad (13)$$

where

$$b_i = \frac{a_i}{a_{i+1}} \quad i = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (14)$$

$$c_i = \frac{b_{i+1}}{b_i} \quad i = 0, 1, 2, \dots, n-2 \quad (15)$$

The controller design by CRA method can done by assigns value of generalized time constant ( $\tau$ ) and characteristic ratios ( $\alpha_i$ ) up to system requirement. To define the value of  $\alpha_i$ , it is under the rule of Lipatov and Sokolov [14] in order to retain the system stability which is given by.

$$\sqrt{\alpha_i \alpha_{i-1}} > 1.4656, \quad i = 1, 2, \dots, n-2 \quad (16)$$

$$\alpha_i \geq 1.12374 \alpha_{i-1}, \quad i = 2, 3, \dots, n-2 \quad (17)$$

$$\alpha_i^* = \frac{1}{\alpha_{i+1}} + \frac{1}{\alpha_i - 1}, \quad \alpha_n = \alpha_0 = \infty \quad (18)$$

#### A. Adjustment speed response of control system

Kim [15] propose convenient method for adjust a speed response of control system, the CRA method can be tuned by changing a value of time constant as shown in the next equation. Assume, the transfer function is given as

$$G(s) = \frac{a_0}{a_n s^n + a_{n-1} s + \dots + a_1 s + a_0} \quad (19)$$

Then it is arranged in new format

$$G(s) = \frac{a_0/a_n}{s^n + \frac{a_{n-1}}{a_n} s + \dots + \frac{a_1}{a_n} s + \frac{a_0}{a_n}} \quad (20)$$

Eq. (20) is able to construct the coefficient as inverse form of characteristic equation

$$A = \left[ 1 \ \prod_{i=n-1}^{n-1} b_i \ \dots \ \prod_{i=1}^{n-1} b_i \ \prod_{i=0}^{n-1} b_i \right] \quad (21)$$

When increasing a gain with equivalent ration by  $k$ , it is obtained by

$$A = \left[ 1 \ k \prod_{i=n-1}^{n-1} b_i \ \dots \ k^{n-1} \prod_{i=1}^{n-1} b_i \ k^n \prod_{i=0}^{n-1} b_i \right] \quad (22)$$

From Eq. (21) and (22), coefficient ratio is unchanged, but the generalized time constant is able to change as shown in Eq. (23) and (24) respectively.

$$G_k(s) = \frac{k^n a_0}{a_n s^n + k a_{n-1} s^{n-1} + \dots + k^{n-1} a_1 s + k^n a_0} \quad (23)$$

$$\tau = \frac{1}{k} \left( \frac{a_1}{a_0} \right) \quad (24)$$

When  $k > 1$ , speed response will be fast, then  $0 < k < 1$ ; speed response will be slow.

Suppose that  $G_1(s)$  and  $G_2(s)$  are all pole systems with the same characteristic ratios. Let  $\tau_1$  and  $\tau_2$  be their respective generalized time constants. Then for an

arbitrary  $t_1$  and  $t_2$ ,

$$y_2(t) = y_1 \left( \frac{t_1}{\tau_2} \cdot t \right) \quad \text{by} \quad \tau_2 = \frac{t_2}{t_1} \tau_1 \quad (25)$$

**B. Adjustment damping ratios of control system**

To adjust the damping ratios, if the system is high order then there are many parameters ( $\alpha_i$ ) to be adjusted. Thus Kim [16] offer easy method for adjust ( $\alpha_i$ ). The CRA method is designed for tuning only one parameter that follows as,

$$G(s) = \frac{1}{\frac{a_n}{a_0} s^n + \frac{a_{n-1}}{a_0} s^{n-1} + \dots + \frac{a_1}{a_0} s + 1} \quad (26)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{\prod_{i=0}^{n-1} b_i} & \frac{1}{\prod_{i=0}^{n-2} b_i} & \dots & \frac{1}{\prod_{i=0}^1 b_i} & \frac{1}{\prod_{i=0}^0 b_i} & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{\left[ \prod_{i=0}^{n-1} c_i \prod_{i=0}^{n-3} c_i \dots \prod_{i=0}^0 c_i \right] b_0^n} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{\left[ \prod_{i=0}^{n-1} c_i \prod_{i=0}^{n-4} c_i \dots \prod_{i=0}^0 c_i \right] b_0^{n-1}} \dots \frac{1}{b_0} & 1 \end{bmatrix}$$

When the coefficient ratio is increase by  $k$  then the new characteristic equation is giving by

$$A = \begin{bmatrix} \left( \frac{1}{k} \right)^{\frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{2}n} & \frac{1}{\left[ \prod_{i=0}^{n-2} c_i \prod_{i=0}^{n-4} c_i \dots \prod_{i=0}^0 c_i \right] b_0^n} \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\left[ \left( \frac{1}{k} \right)^{\frac{1}{2}n^2 - \frac{3}{2}n + 1} \dots \frac{1}{b_0} & 1 \right]$$

Finally, Eq (28) and (29) formulated to the Eq (30) when  $k > 1$ ; damping ratios increased then  $0 < k < 1$ ; damping ratios decreased.

$$G_k(s) = \frac{k^{\frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{2}n} a_0}{a_n s^n + k^{n-1} a_{n-1} s^{n-1} + \dots + k^{\frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{2}n} a_1 s + k^{\frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{2}n} a_0} \quad (30)$$

**4. DESIGN PROCEDURE**

The systematic CRA design procedure for the TITO system can be summarized as in the following steps:

**1. Digaonalization of the system via the decoupler**

Transform the TITO system into diagonal transfer matrix by using conventional decoupling method for removed or decrease interaction effect to minimize. The following SISO design procedure is applied for each of the diagonal transfer function

**2. Comprehensive concern the SISO design**

**2.1 Choice of the controller polynomials A(s) and B (s)**

Fig. 3 represents the block diagram of control system designed. The polynomials form of the plant and the controller generally write respectively in the form [11].

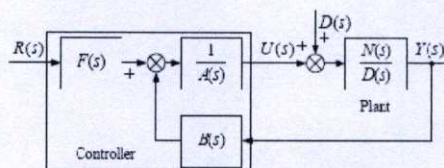


Fig. 3 A block diagram of control system

$$D(s) = a_n s^n + a_{n-1} + \dots + a_0 \quad (31)$$

$$N(s) = b_m s^m + b_{m-1} + \dots + b_0$$

and

$$A(s) = l_n s^n + l_{n-1} s^{n-1} + \dots + l_0 \quad (32)$$

$$B(s) = k_i s^i + k_{i-1} s^{i-1} + \dots + k_0$$

$$F(s) = k_0$$

where  $m \leq n$  and  $i \leq n$

**2.2 Choice of the design parameters**

The CRA design parameters compose the generalized time constant ( $\tau$ ) and the characteristic ratios ( $\alpha_i$ ) [10]. The generalized time constant determines the time response speed of system. The characteristic ratios assign the stability and the waveform of the system time response and robustness property.

-Choice of the generalized time constant: Considered according to the standard Manabe form [11]. If  $t_s$  denotes the desired settling time, this relation expresses the choice of  $\tau$  by  $\tau = t_s / (2.5 \sim 3)$ .

-Choice of the characteristic ratios: According to the Manabe form [11], the characteristic ratios are chosen as  $\alpha_1 = 2.5, \alpha_i = 2 \quad i = 2 \sim (n-1), \alpha_n = \alpha_n = \infty$  (33)

The above values can be changed arbitrary according conditions in Eqs. (16-18).

**3. Determination**

From Eqs. (30-31), the characteristic polynomial of system is

$$P(s) = A(s)D(s) + B(s)N(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 \quad (34)$$

The coefficients of this polynomial are expressed in terms of  $k$  and  $l$  i.e the coefficients of the controller polynomials. From Eq. (7) and Eq. (10), the target characteristic polynomial to be used to design the parameters of a controller is

$$P_t(s) = c_0 \left\{ \sum_{i=1}^n \left( \prod_{l=1}^{i-1} \frac{1}{\alpha_l} \right) (\tau s)^i \right\} + \tau s + 1 \quad (35)$$

Then assign design parameter define in previous part and replace in Eq. (34). Diophantine equation is obtained by equating the characteristic polynomial of system Eq. (34) with the target characteristic

polynomial Eq. (35). Also parameters of a controller obtain by result from the known generalized time constant ( $\tau$ ) and characteristic ratios ( $\alpha_i$ ).

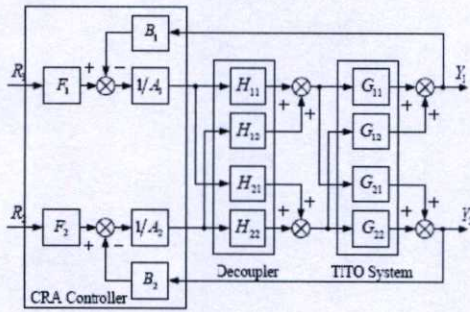


Fig. 4 The TITO system with CRA controller

#### 4. Testing the system and adjust system response

The TITO system with CRA controller shown in Fig.4. After choose design parameters according condition in part 2.2 and then determine system response from simulation. If system response unsatisfied such as large overshoot or slow response. Then adjust damping ratios according section III part B., from there adjust speed response corresponding section III part A.

### 5. SIMULATION EXAMPLES

In this section two examples are given to clarify the proposed method. For transfer function with time delay, 1/1 Pade approximation is used. The Rosenbrock problem [17] is considered in the first example. For the second example, a first order process with time delay introduced by Wang [9] is considered.

#### A. Example 1

The system

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)^2} \begin{bmatrix} (a-s) & (2-s) \\ (1/3-s) & 1-s \end{bmatrix}$$

was originally proposed by Rosenbrock [17]. The value of  $a$  is 1 for the nominal case. This process is controlled by Majhi with both PI-PD controller and PID controller designed according to Zhuang's ISTE optimization method. The same system is controlled by CRA and the results are compared in this example. All of the three methods use the conventional decoupling method to overcome the interaction effects. The conventional decoupler for this problem is

$$H(s) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{-s+1/3}{s-1} \\ \frac{-s+2}{s-1} & 1 \end{bmatrix}$$

Also the transfer functions of diagonal transfer matrix are resulted to be

$$G_{n1}(s) = G_{n2}(s) = \frac{-1/3}{s^2-1}$$

For CRA design method, first assigned design parameters arbitrary. In this case assigned follow as  $\tau=1$

$\alpha_1=\alpha_2=2$ ,  $\alpha_3=5$  for loop1 and loop2. The adjustment of speed response and damping ratios can be produced by adjusting value of  $k$  according to Eq.(23) and Eq.(30) respectively.

For loop 1 and 2 the equation for adjustment of speed response is

$$G_k(s) = \frac{0.16k^4}{0.001s^4 + 0.02k^3s^3 + 0.08k^2s^2 + 0.16k^3s + 0.16k^4}$$

and equation for adjustment of speed response is

$$G_k(s) = \frac{0.16k^6}{0.001s^4 + 0.02k^3s^3 + 0.08k^3s^2 + 0.16k^6s + 0.16k^6}$$

Then improve system response following topic 3 and 4 by trial tuning  $k=1, 1.15, 1.3$  respectively, the system response shown in Fig.5. Result of trial tuning  $k$  obtained  $\tau=0.8$   $\alpha_1=\alpha_2=2.6$ ,  $\alpha_3=6.5$  and the controller polynomials are computed as  $A(s)=0.001s^2+0.0549s$ ,  $B(s)=-1.3954s^2-4.59s-5.6565$ ,  $F(s)=-5.6565$ . For this example, Majhi has obtained  $K_p=-10$ ,  $T_i=2.819$ ,  $T_d=0.785$  for PID controller by using Zhuang's optimization method. The results of Majhi for PI-PD controller are  $K_p=-10$ ,  $T_i=0.548$ ,  $T_d=9.849$   $K_f=-16.297$

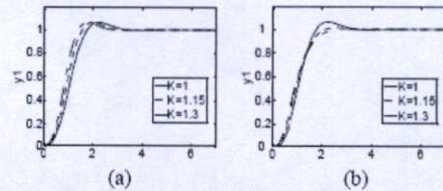


Fig. 5 The response of step change for loop 1 and 2 corresponding adjustment by  $k$ ; (a) adjust speed response, (b) adjust damping ratios

The response of unit step change shown in Fig.6 for three cases. The time domain performance values of which control signals are very similar for the three different designs are listed in Table 1. It is seen apparently in Fig. 6 and Table 1 that the CRA control system shows a better performance in controlling the treated process. Fig. 7 shows that CRA rejects the external disturbance better when the reference input of the control system is zero and the disturbance is a unit step function. Finally, the plots to show the robustness of the control system with respect to the possible variations of the plant parameters during the run time are shown in Fig. 8 by considering the best two methods. The unit step responses of the control systems are shown on a single plot by considering the changes in the parameter of the plant transfer matrix in the interval  $\pm 15\%$  of the nominal value with 5% steps. The curves in this plot well show the robustness of the CRA control system is quiet good.

Table 1 Performance Values of the Time Response Curves in fig.6

	Setting Time	% Overshoot
CRA	1.6 s	0
Majhi PI-PD	3.67 s	4.5
Zhuang PID	9.35 s	63.9

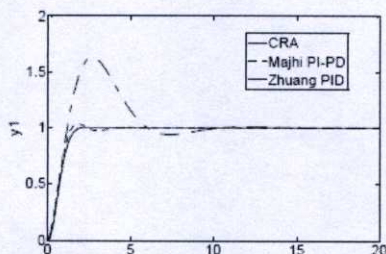


Fig. 6 The unit step responses of loop1 for the three different control systems

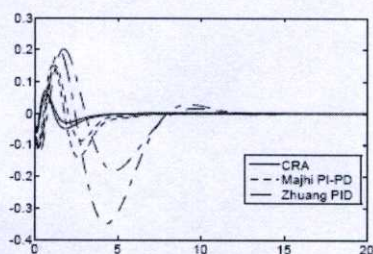


Fig. 7. Control system responses for loop1 and 2 when there is only unit step disturbances at the plant input.

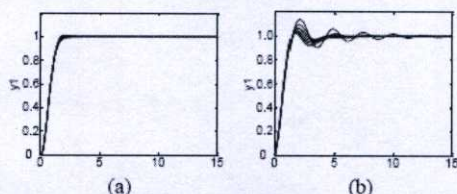


Fig. 8. Change of unit step responses with respect to the variations in the a parameter of the transfer matrix in Example 1; a) CRA, b) PI-PD.

### B. Example 2

Consider the solid-fuel boiler plant:

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{-Ke^{-\theta}}{Ts+1} & -1 \\ 0 & \frac{-e^{-10s}}{60s+1} \end{bmatrix}$$

which  $K=1$ ,  $T=10$ , and  $\theta=2$  for the nominal case. The controller design for this plant has been treated previously by Wang *et al* [9]. According to this, the following transfer matrix for the controller is suggested

$$K(s) = \begin{bmatrix} -2.61(1 + \frac{1}{10s}) & -3.08(1 + \frac{1}{58.8s} + 2.04s) \\ 0 & 3.14(1 + \frac{1}{60s}) \end{bmatrix}$$

To start the design by CRA,  $H_{12}(s)=-e^{2s}$  and  $H_{21}(s)=0$  are obtained when the decoupling method. Due to the problem in the realization of  $H_{12}(s)$ ,  $H_{12}(s)=-1$  is chosen as the steady-state decoupler. The new SISO plant transfer functions are  $G_{n1}(s)=G_{11}(s)$  and  $G_{n2}(s)=G_{22}(s)$ .

For CRA design method, first assigned design parameters arbitrary. In this case assigned follow as  $\tau=5$  for loop1,  $\tau=25$  for loop2 and  $\alpha_1=\alpha_2=2$ ,  $\alpha_3=5$  both loop1 and loop2. The adjustment of speed response and damping ratios can be produced by adjusting value of  $k$  according to Eq. (23) and Eq. (30) respectively.

For loop 1 and 2 the equation for adjustment of speed response is

$$G_{k1}(s) = \frac{(-0.256s + 0.256)k^4}{s^4 + 4ks^3 + 3.2k^2s^2 + 2.38k^3s + 0.0256k^4}$$

$$G_{k2}(s) = \frac{(-0.01229s + 0.002458)k^4}{6s^4 + 4.8ks^3 + 0.768k^2s^2 + 0.06144k^3s + 0.002458k^4}$$

and equation for adjustment of speed response is

$$G_{k1}(s) = \frac{(-0.256s + 0.256)k^5}{s^4 + 4k^3s^3 + 3.2k^2s^2 + 2.38k^3s + 0.0256k^4}$$

$$G_{k2}(s) = \frac{(-0.01229s + 0.002458)k^5}{6s^4 + 4.8k^3s^3 + 0.768k^2s^2 + 0.06144k^3s + 0.002458k^4}$$

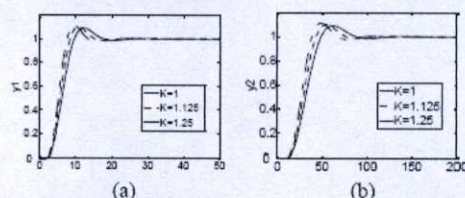


Fig. 9 The step change of adjustment speed response for loop 1 and 2; (a) loop1, (b) loop2

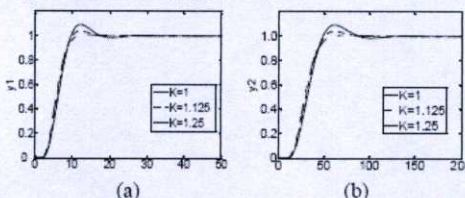


Fig. 10 The step change of adjustment damping ratios for loop 1 and 2; (a) loop1, (b) loop2

Then improve system response following topic 3 and 4 by trial tuning  $k=1$ , 1.125, 1.25 respectively for adjust speed response and  $k=1$ , 1.125, 1.25 respectively for adjust damping ratios, the system response shown in Fig.9. and Fig.10. Result of trial tuning  $k$  obtained  $\tau=4$  for loop1,  $\tau=20$  for loop2 and  $\alpha_1=\alpha_2=2.4$ ,  $\alpha_3=6$  both loop1 and loop2. The controller polynomials are computed as  $A(s)=0.1s^2+1.3279s$ ,  $B(s)=-5.7385s^2-8.0033s-1.8662$ ,  $F(s)=-1.8662$  for loop1 and  $A(s)=0.1s^2+0.27s$ ,  $B(s)=-7.1299s^2-1.9695s-0.0896$ ,  $F(s)=-0.0896$ .

The response to a unit step input change and a unit step disturbance (at the time of  $t=30s$  for the loop1 and  $t=150s$  for the loop2) for the proposed CRA design and the design method proposed by Wang *et al* [9] are illustrated in Fig. 11. From this figure and the performance values appearing in Table 2, it is seen that the CRA controller has a more successful time domain performance. A transient response with a very high magnitude and a steady-state error appear in Wang's method when there is not a signal at the reference input

of channel 1 in Fig. 11b.

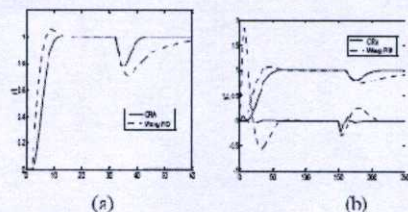


Fig.11 The unit step responses, (a) Loop1, (b) Loop2

Table1. Performance Values of the Time Response Curves in fig.6

	Settling Time	% Overshoot
CRA-y1	7.61 s	1
Wang-y1	12.17 s	5.8
CRA-y2	38 s	1.14
Wang-y2	60.4 s	5.65

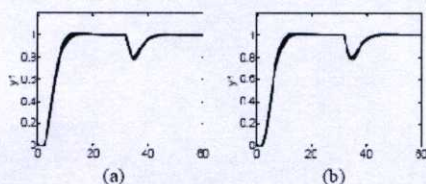


Fig. 12 Change of unit step responses with respect to the variations in the  $K$ ,  $T$  and  $\theta$  parameters of the transfer matrix in Example 2; a) CRA, b) Wang PID.

The time domain response curves are presented in Fig. 9 to exhibit the effects of the parameter variations during the running process. A variation of  $\pm 20\%$  is assumed with steps of 5% in the values of  $K$  and  $T$  for  $\theta=1.8$  in the first channel. The figure shows that CDM controller is less sensitive to the parameter changes.

## 6. CONCLUSIONS

A design procedure by using the polynomial approach CRA is given to control of the TITO processes in this paper. The basis of this procedure are that the conventional decoupling method is used for diagonalization of the plant and then the parameters of CRA controller for obtained SISO sub-processes are chosen properly to achieve the optimal control performance. It is shown by the comparative design examples in Section 5 with different process properties that CRA exhibit better performance than the PID and PID-like control design methods commonly used in industry.

## REFERENCES

- [1] J.M. Maciejowski, *Multivariable Feedback Design*, Addison-Wesley, 1989
- [2] S. Skogestad, and I. Postlethwaite, *Multivariable Feedback Control Analysis and Design*, John Wiley & Sons, Chichester, 1996
- [3] M. Zhuang, and D.P. Atherton, "PID controller design for a TITO system", *IEE Proc.-Control Theory Appl.*, Vol.141, No.2, pp.111-120, 1994
- [4] S. Majhi, "SISO controller for TITO systems", presented at the Int. Conf. on Energy, Automation and Information Tech., 2001
- [5] A. Desbiens, A. Pomerleau, and D. Hodouin, "Frequency based tuning of SISO controller for two-by-two processes", *IEE Proc. Control Theory Appl.*, Vol.143, pp.49-551, 1996.
- [6] D.Chen and D. F. Seborg, "Design of decentralized PI control systems based on Nyquist stability analysis", *Journal of Process Control*, Vol.13, pp.27-35, 2003
- [7] Yu Zhang, Ing-Guo Wang; and K.J. Aström, "Dominant pole placement for multi-loop control systems" *Proc. of American Control Conf.*, Vol.3, pp.1965-1969, 2000
- [8] Z. J. Palmor, Y. Halevi and N. Krasney, "Automatic tuning of decentralized PID controllers for TITO processes", *Automatica*, Vol. 31, No.7, pp. 1001-1010, 1995
- [9] Q.C. Wang, B. Zou, T.H. Lee and Q. Bi "Auto tuning of multivariable PID controllers from decentralized relay feedback", *Automatica*, Vol.33, No.3, pp. 319-330, 1997
- [10] Y. C. Kim, L. H. Keel and S. P. Dhattacharyya, "Transient Response Control via Characteristic Ratio Assignment", *IEEE Transactions On Automatic Control*, Vol.48, No.12, pp.2238-2244, 2003
- [11] S. Manabe, "Coefficient Diagram Method", presented at the 14th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace, Seoul, 1998.
- [12] F. Varquer, and F. Marilla, "Tuning Decentralized PID controller for MIMO systems with decouplers", presented at the 15th IFAC World Congress Barcelona, Spain, 2002.
- [13] P. Naslin, "Essentials of optimal control", London Boston: Technical Publishers Inc, Cambridge, MA, pp. 30-51, 1969
- [14] A.V. Lipatov and N.I. Sokolov "Some Sufficient Conditions for Stability and Instability of Continuous Linear Stationary Systems", *Translated from Automatika*, No.9, pp. 30-37, 1978
- [15] D. Kim, H. Kim and W. Choi, "A new design method for transient response control", presented at the SICE2003 Annual Conference, Fukui, 2003
- [16] D. Kim and H. Kim, "Advanced pole placement methodology for no overshooting condition" *Proc. 7th Korea-Russia International Symposium, KORUS 2003*, pp.462-467
- [17] H.H. Rosenbrock, *State-Space and Multivariable Theory*, Nelson, London, U.K., 1970
- [18] R.K. Wood and M.W. Berry, "Terminal composition control of a binary distillation column", *Chem. Engng. Sci.*, Vol.28, pp.1707-1717, 1973

## ประวัติผู้เขียน

นายธีรชัย วงศ์คำ เกิดเมื่อวันที่ 20 มีนาคม พ.ศ. 2522 ที่จังหวัดเชียงใหม่ สำเร็จการศึกษา ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูงจากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตภาคพายัพ ในปี พ.ศ. 2541 จากนั้นได้เข้าศึกษาในระดับปริญญาตรีที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการวัดคุม(เกียรตินิยมอันดับสอง) จากภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2546 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการวัดคุม ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2548 โดยในปี พ.ศ. 2547 ได้เข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกรประจำ ส่วนปฏิบัติการระบบท่อเขต 2 บริษัท ปตท.จำกัด(มหาชน) จนถึงปัจจุบัน