การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะสำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน

PID CONTROLLER DESIGN USING CHARACTERISTIC RATIO ASSIGNMENT METHOD FOR COUPLED-TANK PROCESS

จุฑารัตน์ ชาวไร่เจิน

JUTARUT CHAORAI-NOERN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2176-6

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะสำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน

PID CONTROLLER DESIGN USING CHARACTERISTIC RATIO ASSIGNMENT METHOD FOR COUPLED-TANK PROCESS



จุฑารัตน์ ชาวไร่เงิน

JUTARUT CHAORAI-NGERN

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 63395
วัน,เดือน,ปี 28 ส.ค. 2549

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2176-6

PID CONTROLLER DESIGN USING CHARACTERISTIC RATIO ASSIGNMENT METHOD FOR COUPLED-TANK PROCESS

JUTARUT CHAORAI-NGERN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2006

ISBN 974-15-2176-6

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะสำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน
นักศึกษา	นางสาว จุฑารัตน์ ชาวไร่เงิน
รหัสนักศึกษา	44061403
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. ธนิตย์ ตรีสุวรรณวัฒน์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ. อาจินต์ น่วมสำราญ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะสำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน ซึ่งกระบวนการควบคุมระดับน้ำแบบสองถังเป็นที่นิยมในการนำมาทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบพีไอดีในห้องปฏิบัติการพื้นฐานทางวิศวกรรม เนื่องจากกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันนั้นจะมีคุณลักษณะของความไม่เป็นเชิงเส้นและความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์สูง สำหรับวิทยานิพนธ์เล่มนี้ นำเสนอวิธีการกำหนดอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะ (CRA) ซึ่งสามารถปรับสมรรถนะของผลตอบสนองของระบบควบคุมได้ดังต้องการ อีกทั้งสามารถปรับอัตราการหน่วงและความเร็วในการตอบสนองของระบบควบคุมได้ง่ายและสะดวก ในการทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุม จะทำโดยการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB และทำการทดลองควบคุมกระบวนการจริง จากการทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุม พบว่าการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ สามารถควบคุมระดับน้ำของกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันให้มีผลตอบสนองได้ตามที่ต้องการ

Thesis Title	PID Controller Design using Characteristic Ratio Assignment Method for Coupled-Tank Process
Student	Miss Jutarut Chaorai-ngern
Student ID.	44061403
Degree	Master of Engineering
Programme	Master Degree of Instrumentation Engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Asst. Prof. Thanit Treesuwannawat
Thesis Coordinate Advisor	Asst. Prof. Arjin Numsomran

ABSTRACT

This thesis presents a PID controller design using characteristic ratio assignment method for coupled-tank process. The Coupled-Tank process is very challenge for a test of PID controller performance in engineering laboratory because It has high uncertainty of parameters and nonlinear model. For this thesis presents characteristic ratio assignment method (CRA) emphatically which satisfies a performance specification of control system. Furthermore it's very convenient and fast changeable in damping ratio of system and speed of response adjustment. Finally, we will give a simulation example to show the validity of our design by MATLAB and real experiment which made we found that PID controller is designed by CRA can meet the perfect transient and steady-state response requirement.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำ และความอนุเคราะห์จาก ผศ.ดร. ธนิตย์ ตรีสุวรรณวัฒน์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ที่ได้ให้การสนับสนุนและคำปรึกษาในงานวิจัยจนสำเร็จตามวัตถุประสงค์

ขอกราบพระคุณ ผศ. อาจินต์ น่วมสำราญ ที่กรุณาแนะแนวทาง ให้คำปรึกษาแนะนำทั้งทางด้านทฤษฎีและทางด้านปฏิบัติ เอาใจใส่ในตลอดทุกขั้นตอนของการทำวิจัย

ขอขอบคุณหัวหน้าและเพื่อนร่วมงานบริษัทโพลีเทคโนโลยีจำกัด ที่ให้โอกาส และสนับสนุนทั้งในเรื่องเวลาตลอดจนอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

จุฑารัตน์ ชาวไร่เงิน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง..... VIII

สารบัญรูป.....VIIII

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....2

1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....2

1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....2

บทที่ 2 กระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน.....4

2.1 การวัดระดับโดยการวัดความดันดิฟเฟอเรนเชียล.....4

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....6

2.3 คุณลักษณะของกระบวนการ.....7

2.4 สรุป.....9

บทที่ 3 วิธีการกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะสำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน 10

3.1 คุณลักษณะพื้นฐานของวิธี CRA.....11

3.2 โครงสร้างของระบบควบคุม.....12

3.2.1 การวางโพล.....14

3.2.2 การวางซีโร่.....15

3.3 การออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะด้วยวิธี CRA.....16

3.3.1 การเลือกพารามิเตอร์ของวิธี CRA.....17

3.3.2 การปรับค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมด้วยวิธี CRA 18

3.3.3 การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ τ 18

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.3.3.1 ผลของการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ τ ที่มีต่อผลตอบสนองของระบบควบคุม.....21

3.3.4 การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ α_i 23

3.3.4.1 ผลของการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ α_i ที่มีต่อผลตอบสนอง ของระบบควบคุม.....24

3.4 สรุป.....27

บทที่ 4 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดี ด้วยวิธี CRA.....28

4.1 ตัวควบคุมแบบ Proportional Integral Derivative (PID).....28

4.1.1 ผลของพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PID กับกระบวนการ.....29

4.1.1.1 ผลของ Proportional Band (PB) กับกระบวนการ.....29

4.1.1.2 ผลของ Integral Time กับกระบวนการ.....30

4.1.1.3 ผลของ Derivative Time กับกระบวนการ.....30

4.2 โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีCRA.....31

4.3 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดี ด้วยวิธี CRA สำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน.....33

4.3.1 การปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุม.....35

4.3.2 การปรับอัตราการหน่วงของระบบควบคุม.....36

4.4 สรุป.....38

บทที่ 5 การจำลองและการทดลองระบบควบคุม.....39

5.1 โครงสร้างระบบควบคุมของกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน.....39

5.2 การหาค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน.....40

5.3 การออกแบบตัวควบคุม.....43

5.3.1 การจำลองระบบควบคุม.....45

5.3.1.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได.....45

5.3.1.2 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ k เมื่อต้องการเปลี่ยนค่าเวลาเข้าที่ของผลตอบสนองของระบบควบคุม.....48

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.3.1.3 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ k เมื่อต้องการเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินของผลตอบสนองของระบบควบคุม.....53

5.3.1.4 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการ (β_2) เพื่อทดสอบความคงทนของระบบควบคุม.....58

5.3.2 การทดลองกับกระบวนการจริง.....61

5.3.2.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได... 62

5.3.2.2 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ k เมื่อต้องการเปลี่ยนค่าเวลาเข้าที่ของผลตอบสนองของระบบควบคุม..... 64

5.3.2.3 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ k เมื่อต้องการเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินของผลตอบสนองของระบบควบคุม.....67

5.3.2.4 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการ (β_2) เพื่อทดสอบ Robustness ของระบบควบคุม.....70

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....73

6.1 บทสรุป.....73

6.2 ปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางในการแก้ปัญหา..... 74

6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....74

บรรณานุกรม.....76

ภาคผนวก.....78

ภาคผนวก ก. รายละเอียดของอุปกรณ์และวงจรที่ใช้ในการทดลอง.....79

ภาคผนวก ข. โปรแกรมที่ใช้ในการหาแบบจำลองกกระบวนการ, และออกแบบตัวควบคุม.....91

ภาคผนวก ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่..... 103

ประวัติผู้เขียน.....110

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

5.1 พารามิเตอร์ของกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน.....40
5.2 สมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได.....46
5.3 ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดีเมื่อปรับค่า k เมื่อต้องการเปลี่ยนค่าเวลาเข้าที่ของผลตอบสนองของระบบควบคุม.....49
5.4 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า k เปลี่ยนแปลงไป..... 52
5.5 ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดีเมื่อปรับค่า k เมื่อต้องการปรับอัตราการหน่วงของผลตอบสนองของระบบควบคุม.....54
5.6 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า k เปลี่ยนแปลงไป.....57
5.7 เปรียบเทียบความคงทนของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการเปลี่ยนแปลงไป.....60
5.8 สมรรถนะของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได.....63
5.9 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อค่า k เปลี่ยนแปลงไป.....66
5.10 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อค่า k เปลี่ยนแปลงไป..... 69
5.11 เปรียบเทียบความคงทน ของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการเปลี่ยนแปลงไป.....72

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 กระบวนการระดับน้ำ 2 ถังแบบมีผลต่อกัน.....4

2.2 การวัดระดับน้ำถังที่ 2 โดยอุปกรณ์วัดความดันดิฟเฟอเรนเชียล.....4

3.1 โครงสร้างทั่วๆไปของระบบควบคุม.....12

3.2 โครงสร้างมาตรฐานของระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี CRA.....12

3.3 ผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันได้เมื่อปรับความเร็ว ผลตอบสนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า k 21

3.4 ตำแหน่งโพลวงปิดของระบบควบคุมเมื่อปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า k 22

3.5 ผลตอบสนองทางความถี่ของระบบควบคุมเมื่อปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า k 22

3.6 ผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันได้เมื่อปรับอัตราการหน่วงของระบบควบคุมโดยการปรับค่า k 25

3.7 ตำแหน่งโพลวงปิดของระบบควบคุมเมื่อปรับอัตราการหน่วงของระบบควบคุมโดยการปรับค่า k 26

3.8 ผลตอบสนองทางความถี่ของระบบควบคุมเมื่อปรับอัตราการหน่วงของระบบควบคุมโดยการปรับค่า k 26

4.1 รูปแบบของตัวควบคุมแบบพีไอดี.....28

4.2 โครงสร้างระบบควบคุม.....31

5.1 โครงสร้างระบบควบคุมของกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน.....39

5.2 โปรแกรม Simulink ที่ใช้เปรียบเทียบผลจากกระบวนการจริงกับผลจากแบบจำลอง.....42

5.3 เปรียบเทียบผลตอบสนองวงเปิดของกระบวนการกับแบบจำลอง.....43

5.4 โปรแกรม Simulink ที่ใช้จำลองการทำงานของระบบควบคุม.....46

5.5 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได.....47

5.6 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได.....47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.7 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันได้เมื่อปรับความเร็ว ผลตอบสนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า k 50

5.8 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า k มีค่าเท่ากับ 1.....50

5.9 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า k มีค่าเท่ากับ 1.2.....51

5.10 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า k มีค่าเท่ากับ 1.42.....51

5.11 ตำแหน่งโพลวงปิดของระบบควบคุมเมื่อปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า.....52

5.12 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันได้เมื่อปรับอัตราการหน่วงของระบบควบคุมโดยการปรับค่า k ไป.....55

5.13 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า k มีค่าเท่ากับ 1.....55

5.14 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า k มีค่าเท่ากับ 1.1.....56

5.15 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า k มีค่าเท่ากับ 1.3.....56

5.16 ตำแหน่งโพลวงปิดของระบบควบคุมเมื่อปรับอัตราการหน่วงของระบบควบคุมโดยการปรับค่า k 57

5.17 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันได้เมื่อปรับพารามิเตอร์ของกระบวนการ.....58

5.18 สัญญาณควบคุมจากการจำลองที่ β_2 ณ Nominal.....59

5.19 สัญญาณควบคุมจากการจำลองที่ -10% ของ β_2 Nominal.....59

5.20 สัญญาณควบคุมจากการจำลองที่ +10% ของ β_2 Nominal.....60

5.21 กระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน.....61

5.22 โปรแกรม Simulink ที่ใช้ทดลองการทำงานของระบบควบคุม.....62

5.23 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได.....62

5.24 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได.....63

5.25 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันได้เมื่อปรับความเร็ว ผลตอบสนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า k 64

5.26 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า k มีค่าเท่ากับ 1.....65

5.27 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า k มีค่าเท่ากับ 1.2.....65

5.28 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า k มีค่าเท่ากับ 1.42.....66

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.29 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันได้เมื่อปรับอัตราการหน่วงของระบบควบคุมโดยการปรับค่า k 67
5.30 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า k มีค่าเท่ากับ 1.....68
5.31 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า k มีค่าเท่ากับ 1.1.....68
5.32 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า k มีค่าเท่ากับ 1.3.....69
5.33 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการทดลองต่อสัญญาณขั้นบันได้เมื่อปรับพารามิเตอร์ของกระบวนการ.....70
5.34 สัญญาณควบคุมจากการทดลองที่ β_2 ณ Nominal.....71
5.35 สัญญาณควบคุมจากการทดลองที่ -10% ของ β_2 Nominal.....71
5.36 สัญญาณควบคุมจากการทดลองที่ +10% ของ β_2 Nominal.....72

เศษ (Numerator) และส่วนส่วน (Denominator) ของฟังก์ชันถ่ายโอนจะพิจารณาแยกกัน ในการออกแบบตัวควบคุมนั้นทำได้โดยทำการกำหนดสมการคุณลักษณะหรือสมการพหุนามคุณลักษณะที่ต้องการของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด โดยพิจารณาข้อกำหนดด้านสมรรถนะ (Performance Specification) ของระบบควบคุม และค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะที่ได้จากวิธี CRA จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะที่ได้จากตัวควบคุมและกระบวนการ เพื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมต่อไป ด้วยวิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CRA วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอ การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธี CRA โดยเลือกทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมกับ กระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันที่มีคุณลักษณะของความไม่เป็นเชิงเส้นและความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์สูง จากผลการทดลอง ได้พิสูจน์ให้เห็นว่าการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CRA นั้นสามารถควบคุมและปรับแต่งผลตอบสนองทางเวลาของระบบควบคุมได้ตามความต้องการ

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาถึงโครงสร้างและคุณลักษณะของกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน
2. เพื่อศึกษาถึงโครงสร้างของระบบควบคุมที่ใช้กับกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน
3. เพื่อศึกษาถึงวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธี CRA

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาโครงสร้างกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันและหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ
2. ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธี CRA เพื่อควบคุมกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน
3. นำตัวควบคุมพีไอดี ที่ได้ออกแบบมาจำลองการทำงานของระบบควบคุมด้วยโปรแกรม MATLAB จากนั้นนำตัวควบคุมไปทดลองกับกระบวนการจริง

1.4 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 วัตถุประสงค์และทฤษฎีที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ ขอบเขตของการศึกษา และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบท

บทที่ 2 อธิบายคุณลักษณะของกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน, การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันและคุณลักษณะของกระบวนการ

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของวิธี CRA ที่ใช้สำหรับออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน

บทที่ 4 กล่าวถึงโครงสร้างระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบ 2 ขั้นอิสระ และการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธี CRA สำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน

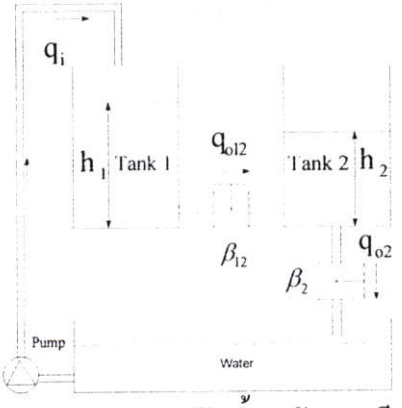
บทที่ 5 กล่าวถึงการนำตัวควบคุมพีไอดี ที่ได้ทำการออกแบบด้วยวิธี CRA ดังขั้นตอนที่กล่าวในบทที่ 4 มาจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB จากนั้นจึงนำตัวควบคุมไปทดลองกับกระบวนการจริง

บทที่ 6 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

และในส่วนสุดท้ายของวิทยานิพนธ์นี้เป็นภาคผนวกแสดง รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง, โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง, ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์และประวัติผู้เขียน

บทที่ 2
กระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน

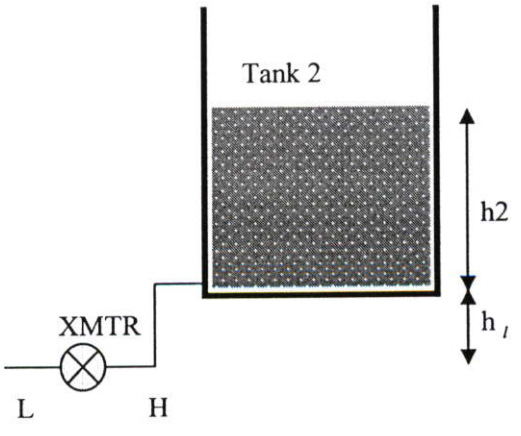
พิจารณากระบวนการระดับน้ำสองถัง แบบมีผลต่อกันในรูปที่ 2.1. โดยเป้าหมายของการควบคุมกระบวนการก็คือระดับน้ำในถังที่ 2 ด้วยปั๊มน้ำที่จ่ายให้กับถังที่ 1 อินพุตของกระบวนการคือ u1 (ค่าแรงดันอินพุตที่จ่ายให้กับปั๊มน้ำ) และเอาต์พุตของกระบวนการคือ h2 (ระดับน้ำในถังที่ 2)



รูปที่ 2.1 กระบวนการระดับน้ำ 2 ถังแบบมีผลต่อกัน

2.1 การวัดระดับโดยการวัดความดันดิฟเฟอเรนเชียล

การวัดระดับโดยวิธีวัดความดันดิฟเฟอเรนเชียล เป็นวิธีที่เลือกใช้ในการวัดระดับของกระบวนการระดับน้ำสองถัง แบบมีผลต่อกัน มีหลักการวัดเบื้องต้น ดังนี้



รูปที่ 2.2 การวัดระดับน้ำถังที่ 2 โดยอุปกรณ์วัดความดันดิฟเฟอเรนเชียล

โดยทั่วไปแล้วการวัดระดับด้วยวิธีการวัดความดันดิฟเฟอเรนเชียลเป็นวิธีที่แพร่หลายในวงการอุตสาหกรรมวิธีหนึ่ง ซึ่งอุปกรณ์วัดความดันดิฟเฟอเรนเชียลจะวัดระดับของของเหลวในถังโดยตรวจจับความดันที่สองจุดคือ ที่จุดความดันสูงในระดับก้นถัง และที่จุดความดันต่ำในระดับสูงสุดของถัง ความดันแตกต่างที่อุปกรณ์วัดความดันดิฟเฟอเรนเชียลตรวจจับได้จะสัมพันธ์กับระดับความสูงของระดับของเหลวในถัง

การวัดระดับของเหลว ควรติดตั้งอุปกรณ์วัดความดันดิฟเฟอเรนเชียลให้อยู่ต่ำกว่าก้นถังเพื่อให้สามารถวัดได้ครอบคลุมตลอดช่วงการวัด ซึ่งในกรณีนี้เป็นการวัดระดับของเหลวในถังเปิดนั้นหมายถึง พื้นผิวเหนือของเหลวถูกเปิดสู่ความดันบรรยากาศ ดังนั้นความดันที่สัมพันธ์กับระดับของเหลวจะมีค่าเท่ากับ Hydrostatic Pressure หรือ Pressure Head ซึ่งเป็นความดันที่เกิดจากน้ำหนักของของเหลวในระดับนั้นๆ นั่นเอง

จากรูปที่ 2.1 เป็นกรณีการวัดระดับของน้ำในถังที่สองโดยใช้อุปกรณ์วัดความดันดิฟเฟอเรนเชียลเป็นตัวตรวจจับ ความสัมพันธ์ของความดันที่อุปกรณ์วัดความดันดิฟเฟอเรนเชียลตรวจจับได้กับ Hydrostatic Pressure หรือ Pressure Head และความดันบรรยากาศแสดงได้ดังสมการ 2.1

$$P_{high} = P_{head}+P_{atm}+P_{line} \quad (2.1)$$

$$P_{low} = P_{atm}+P_{line}$$

เมื่อ

P_{high} คือ ความดันที่ด้านความดันสูงของตัวอุปกรณ์วัดความดันดิฟเฟอเรนเชียล

P_{low} คือ ความดันที่ด้านความดันต่ำของตัวอุปกรณ์วัดความดันดิฟเฟอเรนเชียล

P_{head} คือ Hydrostatic Pressure หรือ Pressure Head ที่เกิดจากน้ำหนักของของเหลวในช่วงการวัด

P_{atm} คือ ความดันบรรยากาศ

P_{line} คือ ความดันที่เกิดจากของเหลวในสายยางจากก้นถังไปยังด้านความดันสูงของตัวอุปกรณ์วัดความดันดิฟเฟอเรนเชียล

ความสัมพันธ์ของ Hydrostatic Pressure หรือ Pressure Head กับความสูงของของเหลวในถังแสดงได้ดังสมการ 2.2

$$\text{Hydrostatic Pressure} = P_{head} = h \times SG_m \quad (2.2)$$

เมื่อ P_{head} คือ ค่าความดัน Head ที่เกิดจากน้ำหนักของของเหลวในช่วงการวัด มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรน้ำ

h คือ ค่าความสูงของของของเหลว มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

SG_m คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของสาร (ไม่มีหน่วย)

พิจารณาสมการที่ 2.2 ค่าความถ่วงจำเพาะของสารเป็นค่าคงที่ซึ่งเป็นคุณสมบัติประจำตัวของสาร เช่น น้ำ มีค่าความถ่วงจำเพาะ เป็น 1 ดังนั้น ความดันที่เกิดขึ้นจึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสูงของของเหลวนั้น ดังสมการ 2.2

$$h = \frac{P}{SGm} \tag{2.3}$$

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากสมการสมดุลมวลและกฎของเบอร์นูลี (Bernoulli's) จะได้สมการทางคณิตศาสตร์สำหรับแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นของกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันดังนี้

$$\frac{dh_1(t)}{dt} = -\frac{\beta_{12}a_{12}}{A_1}\sqrt{2g\left(h_1(t)-h_2(t)\right)} + \frac{k_{p1}}{A_1}u(t) \tag{2.4}$$

$$\frac{dh_2(t)}{dt} = -\frac{\beta_2 a_2}{A_2}\sqrt{2gh_2(t)} + \frac{\beta_{12}a_{12}}{A_2}\sqrt{2g\left(h_1(t)-h_2(t)\right)}$$

โดย

A_i คือพื้นที่หน้าตัดของถัง i (cm^2)

a_2 คือพื้นที่หน้าตัดของรูทางออกของถังที่ 2 (cm^2)

a_{12} คือพื้นที่หน้าตัดของรูที่เชื่อมต่อระหว่างถังที่ 1 และถังที่ 2 (cm^2)

h_i คือระดับน้ำในถังที่ i ;cm.

u1 คือ แรงดันที่จ่ายให้กับปั๊มตัวที่ 1 ;V

β_2 คือค่าตำแหน่งวาล์วที่ต่อทางด้านออกของถังที่ 2

β_{12} คือค่าตำแหน่งวาล์วที่ต่อระหว่างถังที่ 1 และถังที่ 2

g คือแรงโน้มถ่วงของโลก (cm/s^2)

k_{p1} คือค่าอัตราขยายของปั๊มน้ำ $(cm^3/V \cdot s)$

อัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้าถังที่ 1 จะเป็นสัดส่วนกับ k_{p1}, u1 และอัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้าถังที่ 2 จะเป็นสัดส่วนกับ k_{p1}, u1, β_{12} และความแตกต่างระหว่างความสูงของระดับน้ำในถังที่1 กับถังที่ 2 สัญญาณอินพุตหรือสัญญาณควบคุมที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการคือ u1 (ค่าสัญญาณแรงดันที่จ่ายให้กับปั๊มน้ำ) และสัญญาณเอาต์พุตที่วัดจากกระบวนการคือ h_2

2.3 คุณลักษณะของกระบวนการ

จากสมการที่ (2.1) เมื่อจัดให้อยู่ในรูปแบบของอนุกรมเทเลอร์จะได้

$$y_1 = \frac{dh_1(t)}{dt} = f_1(h_1, h_2, u) = -\frac{\beta_{12} a_{12}}{A_1}\sqrt{2g\left(h_1(t) - h_2(t)\right)} + \frac{k_{p1}}{A_1}u(t) \tag{2.2}$$

$$y_1 - \overline{y_1} = K_1(h_1 - \overline{h_1}) + K_2(h_2 - \overline{h_2}) + K_3(u - \overline{u})$$

$$\overline{y_1} = f_1(\overline{h_1}, \overline{h_2}, \overline{u})$$

$$K_1 = \left.\frac{\partial f_1}{\partial h_1}\right|_{h_1 = \overline{h_1}, h_2 = \overline{h_2}, u = \overline{u}}$$

$$K_2 = \left.\frac{\partial f_1}{\partial h_2}\right|_{h_1 = \overline{h_1}, h_2 = \overline{h_2}, u = \overline{u}}$$

$$K_3 = \left.\frac{\partial f_1}{\partial u}\right|_{h_1 = \overline{h_1}, h_2 = \overline{h_2}, u = \overline{u}}$$

และ

$$y_2 = \frac{dh_2(t)}{dt} = f_2(h_1, h_2) = -\frac{\beta_2 a_2}{A_2}\sqrt{2gh_2(t)} + \frac{\beta_{12} a_{12}}{A_2}\sqrt{2g\left(h_1(t) - h_2(t)\right)} \tag{2.3}$$

$$y_2 - \overline{y_2} = K_{21}(h_1 - \overline{h_1}) + K_{22}(h_2 - \overline{h_2})$$

$$\overline{y_2} = f_2(\overline{h_1}, \overline{h_2})$$

$$K_{21} = \left.\frac{\partial f_2}{\partial h_1}\right|_{h_1 = \overline{h_1}, h_2 = \overline{h_2}}$$

$$K_{22} = \left.\frac{\partial f_2}{\partial h_2}\right|_{h_1 = \overline{h_1}, h_2 = \overline{h_2}}$$

เมื่อทำให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น ดังนั้น จะได้ดังสมการที่ (2.4)

$$\frac{dH_1(t)}{dt} = \frac{1}{T_{12}}\left(-H_1(t) + H_2(t)\right) + \frac{k_{p1}}{A_1}U(t) \tag{2.4}$$
$$\frac{dH_2(t)}{dt} = -\frac{1}{T_2}H_2(t) + \frac{1}{T_{12}}\left(H_1(t) - H_2(t)\right)$$

โดย

$$T_{12} = \frac{A_1}{\beta_{12}a_{12}}\sqrt{\frac{2(\overline{h_1} - \overline{h_2})}{g}},\ \text{s}$$
$$T_2 = \frac{A_2}{\beta_2 a_2}\sqrt{\frac{2\overline{h_2}}{g}},\ \text{s}$$

$\overline{h_1}$ และ $\overline{h_2}$ คือระดับน้ำ ณ. จุดทำงานของกระบวนการ, T_{12} คือค่าคงตัวเวลาระหว่างถังที่ 1 และถังที่ 2 และ T_2 คือค่าคงตัวเวลาของถังที่ 2 และจากสมการที่ (2.4) ทำให้อยู่ในรูปแบบจำลองเชิงเส้นจะได้ดังสมการที่ (2.5)

$$\frac{H_2(s)}{U(s)} = G(s) = \frac{K_1}{T_{12}T_2 s^2 + (T_{12} + 2T_2)s + 1} \tag{2.5}$$

โดย

$$K_1 = \frac{k_{p1}T_2}{A_2},\text{cm/V}$$
$$T_{12} = \frac{A_1}{\beta_{12}a_{12}}\sqrt{\frac{2(\overline{h_1} - \overline{h_2})}{g}},\ \text{s}$$
$$T_2 = \frac{A_2}{\beta_2 a_2}\sqrt{\frac{2\overline{h_2}}{g}},\ \text{s}$$

สมการที่ (2.5) นี้เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม ตัวแปรเอาท์พุตคือระดับน้ำในถังที่ 2 ตัวแปรอินพุตคือค่าระดับแรงดันที่จ่ายให้กับปั๊มน้ำ ณ ถังที่ 1 เป็นกระบวนการแบบหนึ่งอินพุต หนึ่งเอาท์พุต

2.4 สรุป

กระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันดังที่ได้อธิบายในบทที่ 2 นี้เป็นกระบวนการที่ถูกเลือกใช้เพื่อนำมาทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมพีไอดีที่ออกแบบด้วยวิธีกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ แม้ว่าจะเป็นกระบวนการที่มีหนึ่งอินพุต หนึ่งเอาท์พุต แต่มีคุณลักษณะของความไม่เป็นเชิงเส้นและความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์สูง จึงถือว่าเป็นกระบวนการที่น่าสนใจที่จะนำมาทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมอีกวิธีหนึ่ง โดยเนื้อหาของการกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะและการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ จะกล่าวไว้ในบทต่อๆ ไป

บทที่ 3
วิธีการกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะสำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน

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 ต้องเปลี่ยนตัวควบคุมและทำการออกแบบใหม่จนกว่าจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ วิธีที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับวิธีนี้ก็มีอาทิเช่น การออกแบบตัวควบคุมโดยตรวจสอบผลตอบสนองทางความถี่ (Frequency Response), การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางเดินราก (Root Locus Method) และเนื่องจากการออกแบบตัวควบคุมด้วยทฤษฎีนี้จะใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนในการออกแบบ ซึ่งในบางครั้งนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนอาจจะไม่เที่ยงตรง อันเนื่องมาจากมีโพลและซีโร่อยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน ทำให้ระบบนั้นไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable) และไม่สามารถสังเกตได้ (Unobservable)

ทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุมแบบใหม่ (Modern Control Theory) จะทำการออกแบบตัวควบคุมแบบลูปปิด(Closed Loop)โดยขั้นแรกจะนำเงื่อนไขที่กำหนดต่างๆมาคำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดก่อนและหาตัวควบคุมจากฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด จากนั้นทำการตรวจสอบระบบควบคุมว่าทำงานภายใต้เงื่อนไขที่ต้องการหรือไม่ ถ้าไม่เป็นไปตามที่ต้องการต้องกลับไปแก้ไขฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดและหาตัวควบคุมใหม่จนกว่าจะได้ตัวควบคุมที่พอใจ วิธีที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับวิธีนี้ก็มีอาทิเช่น การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการวางโพล (Pole Placement Method), การออกแบบตัวควบคุมแบบดีที่สุด (Optimal Control) และในการออกตัวควบคุมด้วยทฤษฎีนี้จะใช้สมการที่อยู่ในรูปแบบของ สเตท-สเปซ (State-Space) แทนระบบซึ่งการแทนระบบให้อยู่ในรูปแบบ สเตท-สเปซ (State-Space) นั้นจะมีความเที่ยงตรงและเหมาะสมในการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์

ทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุมแบบพีชคณิต (Algebraic Approach) วิธีนี้จะกำหนดค่าของพารามิเตอร์บางตัวในฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดและตัวควบคุมก่อน จากนั้นค่าพารามิเตอร์อื่นๆ

ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดและตัวควบคุมจะหาได้จากการออกแบบ 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 α_i ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ และค่าพารามิเตอร์ k ซึ่งพารามิเตอร์ของวิธี CRA นี้จะใช้สำหรับทำการออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะที่ต้องการ วิธี CRA จะใช้สมการพหุนามแสดงแทนระบบ โดยส่วนเศษ (Numerator) และส่วนส่วน (Denominator) ของฟังก์ชันถ่ายโอนจะพิจารณาแยกกัน ในการออกแบบตัวควบคุมนั้นทำได้โดยทำการกำหนดสมการคุณลักษณะหรือสมการพหุนามคุณลักษณะที่ต้องการของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด โดยพิจารณาข้อกำหนดด้านสมรรถนะ (Performance Specification) ของระบบควบคุม และค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะที่ได้จากวิธี CRA จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะที่ได้จากตัวควบคุมและกระบวนการ เพื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมต่อไป

ในบทที่ 3 นี้จะอธิบายถึงแนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธี CRA ซึ่งจะอธิบายเกี่ยวกับหลักการและการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธี CRA, โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับการออกแบบด้วยวิธี CRA, การออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะด้วยวิธี CRA, การปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุม, การปรับอัตราการหน่วงของระบบควบคุมเพื่อให้ได้ผลตอบสนองของระบบควบคุมตามที่ต้องการ

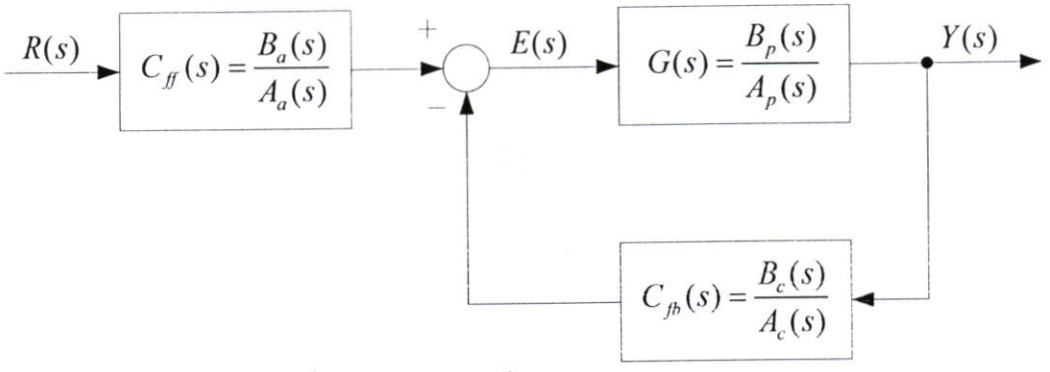
3.1 คุณลักษณะพื้นฐานของวิธี CRA

คุณลักษณะพื้นฐานของวิธี CRA มี 3 ข้อด้วยกัน คือ

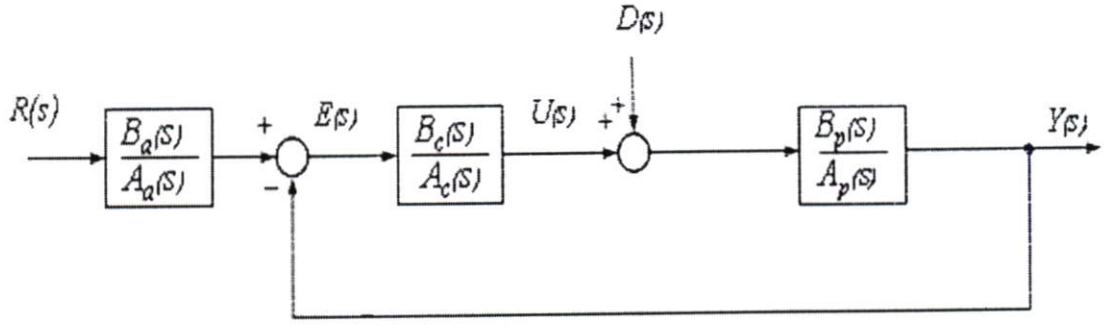
1. ใช้สมการพหุนามแสดงแทนระบบ
2. สมการพหุนามคุณลักษณะและตัวควบคุมสามารถออกแบบได้ทันที

3.2 โครงสร้างของระบบควบคุม

โครงสร้างทั่วๆไปของระบบควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 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 โครงสร้างทั่วๆไปของระบบควบคุม



รูปที่ 3.2 โครงสร้างมาตรฐานของระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี CRA

เพื่อความสะดวกในการนำไปประยุกต์ใช้งาน โครงสร้างระบบควบคุมสามารถทำให้อยู่ในรูปแบบอย่างง่ายได้โดยให้ $A_a(s) = B_c(s)$ แสดงได้ดังรูปที่ 3.2 โครงสร้างของระบบควบคุมแบบนี้เรียกว่าโครงสร้างระบบควบคุมแบบ 2 องศาอิสระ (Two Degree of Freedom : 2DOF) ระบบควบคุมแบบ2 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 $B_a(s), A_a(s)$ คือสมการพหุนามของตัวควบคุม

โดยฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของสมการพหุนามได้ดังนี้

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

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

และสมการพหุนามของตัวควบคุมคือ

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

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

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

โดย $\psi < k$ และ $m < k$

และเอาต์พุตของระบบควบคุมดังรูปที่ 3.2 สามารถแสดงได้ดังนี้

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

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

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

ฟังก์ชันถ่ายโอนในสมการ(3.7) แสดงให้เห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบป้อนกลับ $B_c(s), A_c(s)$ นั้นใช้เพื่อวางโพลและตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้า $B_a(s), A_a(s)$ ใช้เพื่อลดผลกระทบจากซีโร่ของตัวควบคุมพีไอดี ในการออกแบบและจำลองการทำงานของระบบควบคุมต้องคำนึงถึงขนาดของสัญญาณควบคุมด้วย ซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอนของสัญญาณควบคุมสำหรับการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธี CRA คือ

$$\frac{U(s)}{R(s)} = \frac{Y(s)}{R(s)} \cdot \frac{U(s)}{Y(s)} = \frac{G_{cl}(s)}{G(s)} \tag{3.8}$$
$$= \frac{B_a(s)A_p(s)}{A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s)}$$

จากโครงสร้างระบบควบคุมแบบ 2 องศาอิสระ (2-DOF) ตัวควบคุมแบบป้อนกลับจะถูกใช้เพื่อวางโพลของระบบควบคุมหรือกำหนดโหมดการทำงานของระบบควบคุม ซึ่งเป็นตัวพิจารณาถึงผลตอบสนองชั่วครู่และรูปทรงผลตอบสนองของระบบควบคุม ส่วนตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้าจะถูกใช้เพื่อวางซีโร่ของระบบควบคุม ซึ่งเป็นตัวกำหนดถึงผลตอบสนองที่สภาวะชั่วครู่และที่สภาวะคงตัวของระบบควบคุม ดังนั้นปัญหาในการสร้างตัวควบคุมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ข้อหลักๆคือ

1. เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่สภาวะชั่วครู่ และรูปทรงผลตอบสนองของระบบควบคุมตามที่ต้องการ ซึ่งก็คือการวางโพลของระบบควบคุมที่เหมาะสมโดยใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับ
2. เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่สภาวะชั่วครู่ และผลตอบสนองที่สภาวะคงตัวหรือคุณสมบัติในการติดตามสัญญาณตามที่ต้องการ ซึ่งก็คือการวางซีโร่ของระบบควบคุมที่เหมาะสม โดยใช้ตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้า

3.2.1 การวางโพล

การวางโพลเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดของการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CRA เพราะว่าโพลของระบบควบคุมนั้นมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกับสมการคุณลักษณะ ดังนั้นถ้าพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมทั้งหมด $G_{cl}(s) = N_{cl}(s)/D_{cl}(s)$ จะเห็นได้ว่าสมการพหุนามในเทอมส่วน $D_{cl}(s)$ ก็คือสมการคุณลักษณะของระบบควบคุมนั่นเอง จากโครงสร้างของระบบควบคุมในรูปที่ 3.2 สมการคุณลักษณะสามารถเขียนได้ดังนี้

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

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

3.2.2 การวางซีโร่

ในการวางซีโร่เพื่อใช้ในการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงนั้น สามารถแบ่งชนิดของการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงได้เป็น 2 ชนิดคือ การติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบอุดมคติและการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบไม่อุดมคติ โดยการติดตามสัญญาณอินอ้างอิงแบบอุดมคตินั้นสามารถติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงใดๆได้ในทันทีทันใด ซึ่งการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบนี้สามารถใช้ได้ในทางทฤษฎีเท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติแล้วนั้นไม่สามารถทำได้เพราะถูกจำกัดด้วยขนาดของสัญญาณควบคุม ในขณะที่การติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบไม่อุดมคตินั้นจะไม่สามารถติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงได้ในทันทีทันใด แต่จะค่อยๆลู่เข้าสู่สัญญาณอินพุตอ้างอิง ซึ่งการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงชนิดนี้สามารถใช้ได้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นในที่นี้จะอธิบายแต่เพียงการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบไม่อุดมคติเท่านั้น

โดยทั่วไปแล้ว การติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบไม่อุดมคติสำหรับระบบควบคุมนั้นสามารถแบ่งชนิดของสัญญาณอินพุตได้ 3 แบบคือ สัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได (Step), สัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบความเร็ว (Velocity) และสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบอัตราเร่ง (Accelerator) ซึ่งการวางซีโร่เพื่อใช้ในการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงทั้ง 3ชนิดนี้ ทำได้โดยกฎของพีชคณิตง่ายๆ และกฎที่ใช้ในการวางซีโร่จะอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีค่าสุดท้าย (Final Value Theorem) ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

การวางซีโร่เพื่อใช้ติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิง เพื่อความเหมาะสมและมีเสถียรภาพ ฟังก์ชันถ่ายโอน $G_{cl}(s)$ ต้องอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$G_{cl}(s) = \frac{N_{cl}(s)}{D_{cl}(s)} \qquad (3.10)$$
$$= \frac{b_m s^m + b_{m-1}s^{m-1} + \ldots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \ldots + a_1 s + a_0}$$

โดย $n \geq m$ และ $a, b > 0$

เอาต์พุตของระบบควบคุมจะติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบแอสซิมโทตเมื่อ

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 $m, n \geq 2$

3.3 การออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะด้วยวิธี CRA

ในส่วนนี้จะอธิบายถึงการออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะด้วยวิธี CRA โดยสมการพหุนามคุณลักษณะของระบบควบคุมป้อนกลับนั้นจะเป็นสมการเดียวกันกับสมการคุณลักษณะในสมการ (3.9) ซึ่งสามารถเขียนในรูปแบบของสมการพหุนามคุณลักษณะได้ดังนี้

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

โดย $a_n, a_{n-1}, \ldots a_1, a_0$ คือสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะ
ค่าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะ α_i , ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ที่ใช้ในการออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะ

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

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} \tag{3.13}$$

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

$$\begin{aligned} a_i &= \frac{a_0\tau}{\alpha_{i-1}\ldots\alpha_2^{i-2}\alpha_1^{i-1}} \\ &= a_0\tau^i \prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{\left(\alpha_{i-j}\right)^j} \end{aligned} \tag{3.14}$$

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

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

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

3.3.1 การเลือกพารามิเตอร์ของวิธี CRA

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CRA สามารถทำได้โดยทำการกำหนดค่า τ และค่า α_i ตามที่ต้องการ โดยค่า α_i จะเป็นสิ่งที่กำหนดถึงอัตราการหน่วงของระบบควบคุมซึ่งในการกำหนดค่า α_i จะต้องกำหนดตามเงื่อนไขของ Lipatov และ Sokolov [5] แสดงได้ดังนี้

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

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

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

จากสมการ (3.15) จะเห็นได้ว่าสมการพหุนามคุณลักษณะถูกอธิบายอยู่ในรูปกำลังของ τs และสัมประสิทธิ์อธิบายโดย α_i ดังนั้นรูปทรงและความเร็วของผลตอบสนองสามารถพิจาณาได้โดยพารามิเตอร์ α_i และ τ ตามลำดับ

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

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

ดังนั้นผู้ออกแบบสามารถออกแบบตัวควบคุมได้อย่างอิสระ ในบางครั้งอาจจะเลือกให้ค่าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธ์ของสมการคุณลักษณะ α_i มีค่าสูงๆ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านความคงทนของระบบควบคุมต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการ จากเงื่อนไขเสถียรภาพโดย Lipatov ระบบควบคุมจะมีเสถียรภาพเมื่อค่าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธ์ของสมการคุณลักษณะ α_i ทุกค่ามีค่ามากกว่า 1.5 โดย Lipatov ได้พิสูจน์ไว้ใน [5] และถ้าค่าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธ์ของสมการคุณลักษณะ α_i ทุกตัวมีค่ามากกว่า 4 โพลของระบบทั้งหมดจะอยู่

63395

บนแกนจริง ดังนั้นค่าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธ์ของสมการคุณลักษณะ α_i จึงถูกเลือกให้มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5-4 แต่ในบางครั้งเมื่อพิจารณากระบวนการบางกระบวนการแล้วพบว่ามีค่าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธ์ของสมการคุณลักษณะ ที่มากกว่าค่ามาตรฐาน ซึ่งในกรณีนี้ไม่จำเป็นที่จะต้องลดค่าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธ์ของสมการคุณลักษณะ α_i เพื่อให้เป็นค่าเดียวกับค่ามาตรฐาน

3.3.2 การปรับค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมด้วยวิธี CRA

ในการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธี CRA นั้นการเลือกค่าพารามิเตอร์ α_i และ τ นั้นเป็นสิ่งที่สำคัญมาก เนื่องจากค่า α_i จะเป็นตัวกำหนดรูปทรงผลตอบสนองของระบบควบคุม ส่วน τ เป็นตัวกำหนดความเร็วหรือค่าเวลาเข้าที่ของระบบควบคุม โดยส่วนใหญ่แล้วในการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธี CRA เบื้องต้นนั้น จะทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ภายใต้เงื่อนไขของ Lipatov และ Sokolov ซึ่งสามารถให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ดี คือมีไม่มีค่าพุ่งเกินและมีค่าเวลาเข้าที่ตามที่ต้องการ แต่อย่างไรก็ตาม การกำหนดค่าพารามิเตอร์ตามรูปแบบดังกล่าวนั้น ไม่สามารถใช้ได้กับทุกกระบวนการเสมอไป อาจจะต้องมีการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ α_i และ τ เพื่อให้ได้ผลตอบสนองตามที่ต้องการ ซึ่งการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ α_i และ τ จะแบ่งได้เป็น 2 กรณีคือ

1. รูปทรงผลตอบสนองของระบบควบคุมได้ตามที่ต้องการ แต่ค่าเวลาเข้าที่ของระบบไม่ได้ตามที่ต้องการ ซึ่งในกรณีนี้จะทำการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ τ
2. ค่าเวลาเข้าที่ของระบบได้ตามที่ตามที่ต้องการ แต่รูปทรงผลตอบสนองของระบบไม่ได้ตามที่ต้องการ ซึ่งในกรณีนี้จะทำการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ α_i

โดยทั่วไปแล้ว การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ α_i และ τ นั้นจะใช้วิธีการลองผิดลองถูกปรับไปเรื่อยๆจนกว่าจะได้ผลตอบสนองของระบบควบคุมตามที่ต้องการ ซึ่งอาจจะใช้ระยะเวลาที่นานและยุ่งยาก ดังนั้นวิธีในการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ α_i และ τ ที่ง่ายแต่มีประสิทธิภาพจึงจำเป็น ซึ่งในส่วนต่อไปจะอธิบายถึงการปรับแต่งพารามิเตอร์ α_i และ τ สำหรับแต่ละกรณี ดังที่ได้อธิบายมา

3.3.3 การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ τ

เมื่อรูปทรงผลตอบสนองของระบบควบคุมได้ตามที่ต้องการ แต่ค่าเวลาเข้าที่ยังไม่ได้ตามที่ต้องการ จำเป็นที่จะต้องทำการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ τ โดยการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ τ นั้นสามารถอธิบายได้ดังนี้

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

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

สัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะและอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะสามารถเขียนได้ในรูปแบบดังนี้
สัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะ

$$A=\begin{bmatrix}a_n & a_{n-1} & \ldots & a_1 & a_0\end{bmatrix} \tag{3.21}$$

ส่วนกลับของสมการคุณลักษณะ

$$B=\begin{bmatrix}b_{n-1} & b_{n-2} & \ldots & b_1 & b_0\end{bmatrix} \tag{3.22}$$

อัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะ

$$C=\begin{bmatrix}c_{n-2} & c_{n-3} & \ldots & c_1 & c_0\end{bmatrix} \tag{3.23}$$

โดย

$$b_i=\frac{a_i}{a_{i+1}} \qquad \text{สำหรับ } i=0,1,2,\ldots,n-1 \tag{3.24}$$

$$c_i=\frac{b_{i+1}}{b_i} \qquad \text{สำหรับ } i=0,1,2,\ldots,n-2 \tag{3.25}$$

ทำการจัดสมการ (3.20) ใหม่ให้อยู่ในรูปแบบดังนี้

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

จากสมการ (3.26) สามารถเขียนสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะให้อยู่ในรูปแบบของอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะได้ดังนี้

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

ถ้าทำการเพิ่มค่าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะในสัดส่วนที่เท่ากัน คือ k จะได้สัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะดังนี้

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

จากสมการ (3.27) และสมการ (3.28) จะสังเกตได้ว่าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะยังเหมือนเดิม ไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงไป โดยสิ่งที่เปลี่ยนแปลงไปก็คือค่าคงตัวเวลาสมมูล τ จากสมการ (3.28) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังนี้

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

จากสมการ (3.29) จะสังเกตเห็นได้ว่า ค่า τ ของระบบควบคุมเปลี่ยนไปเป็น

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

โดยถ้าทำการเพิ่มค่า k ขึ้นจะทำให้ค่า τ มีค่าน้อยลง ซึ่งก็คือผลตอบสนองของระบบควบคุมเร็วขึ้น และในทางกลับกันถ้าค่า k อยู่ในช่วง $0 < k < 1$ ผลตอบสนองของระบบควบคุมจะช้าลง

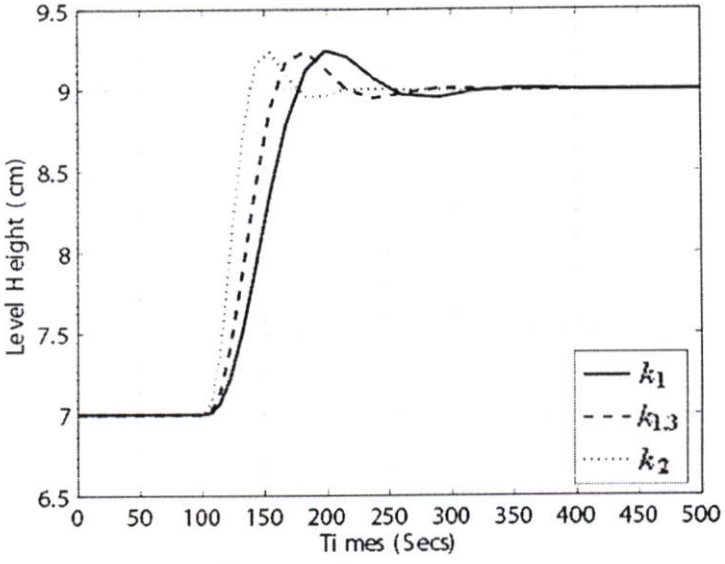
วิธีที่ใช้ในการปรับผลตอบสนองของระบบให้ได้ค่าเวลาเข้าที่ตามที่ต้องการทำได้โดยพิจารณาว่า จากเดิมค่าเวลาเข้าที่ของระบบควบคุมอยู่ที่ค่าเวลาเท่าไหร่ จากนั้นให้เลือกค่าเวลาเข้าที่ที่ต้องการ และทำการหาค่า k โดยใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$k=\frac{t_s old}{t_s new} \tag{3.31}$$

โดย $t_s old$ คือค่าเวลาเข้าที่ของระบบควบคุมเดิม และ $t_s new$ คือค่าเวลาเข้าที่ของระบบควบคุมที่ต้องการ หลังจากที่ได้ค่า k แล้วนำไปแทนในสมการ (3.30) ก็จะได้ค่า τ ของระบบควบคุมค่าใหม่ออกมา

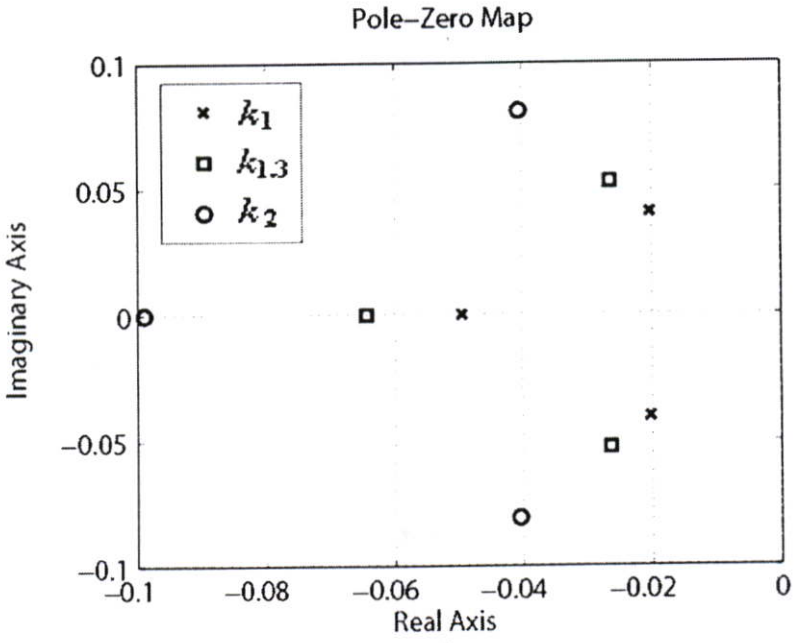
3.3.3.1 ผลของการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ τ ที่มีต่อผลตอบสนองของระบบควบคุม

จากรูปที่ 3.3 แสดงการผลตอบสนองของระบบควบคุมกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันต่อสัญญาณขั้นบันไดที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรม Matlab เมื่อปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ τ เพื่อปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุม โดยการปรับเพิ่มค่า k จาก 1 เป็น 1.3 และ 2 ซึ่งจากความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ k ที่มีต่อค่าพารามิเตอร์ τ หรือความเร็วของผลตอบสนอง ดังที่ได้แสดงในสมการที่ 3.30 และ 3.31 เป็นผลให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมนั้นเร็วขึ้น ตามลำดับ

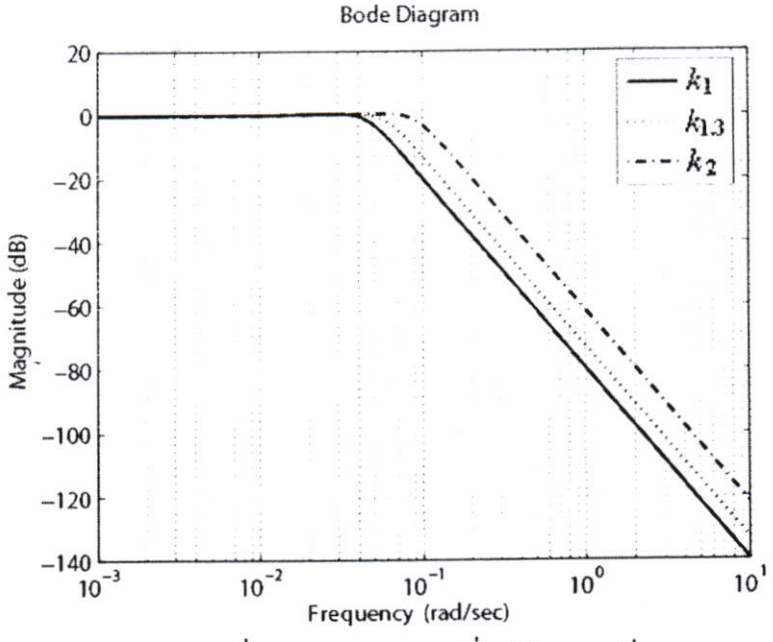


รูปที่ 3.3 ผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันได้เมื่อปรับความเร็ว ผลตอบสนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า k

การปรับค่าพารามิเตอร์ k เป็นผลให้ความเร็วของผลตอบสนองของระบบควบคุมเปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 3.3 นั้น เป็นผลมาจาก ค่าตำแหน่งรากของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบควบคุมเลื่อนไปทางซ้ายของ s-Planeในลักษณะมุมของรากไม่เปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งตำแหน่งของรากของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบควบคุมที่เปลี่ยนแปลงไปในลักษณะนี้ ทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมเร็วขึ้นโดยยังคงรูปทรงไว้ดังเดิม ส่วนรูปที่ 3.5 นั้นแสดงผลตอบสนองทางความถี่ของระบบควบคุมเมื่อปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า k ซึ่งจะเห็นว่าผลตอบสนองของระบบควบคุมมีความถี่เพิ่มขึ้นโดยที่ขนาดยังคงเดิมเมื่อปรับเพิ่มค่าพารามิเตอร์ k



รูปที่ 3.4 ตำแหน่งโพลวงปิดของระบบควบคุมเมื่อปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า k



รูปที่ 3.5 ผลตอบสนองทางความถี่ของระบบควบคุมเมื่อปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า k

3.3.4 การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ α_i

ในกรณีที่ค่าเวลาเข้าที่ของระบบควบคุมได้ตามที่ต้องการ แต่รูปทรงผลตอบสนองของระบบควบคุมไม่ได้ตามที่ต้องการนั้นจำเป็นที่จะต้องปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ α_i โดยการปรับแต่งค่า α_i นั้นสามารถอธิบายได้ดังนี้

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

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

โดยสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะ, ส่วนกลับของสมการคุณลักษณะและอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะจะมีรูปแบบเดียวกับสมการ (3.21), (3.22) และ (3.23)

จัดสมการ (3.32) ใหม่ให้อยู่ในรูปแบบดังนี้

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

จากสมการ (3.33) สามารถเขียนสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะให้อยู่ในรูปแบบของส่วนกลับของสมการพหุนามคุณลักษณะได้ดังนี้

$$A = \left[\frac{1}{\prod_{i=0}^{n-1} b_i} \quad \frac{1}{\prod_{i=0}^{n-2} b_i} \quad \cdots \quad \frac{1}{\prod_{i=0}^{1} b_i} \quad \frac{1}{\prod_{i=0}^{0} b_i} \right] \tag{3.34}$$

จากสมการ (3.34) สามารถเขียนให้อยู่ในอีกรูปแบบหนึ่งได้ดังนี้

$$A = \left[\frac{1}{\left[\prod_{i=0}^{n-2} c_i \prod_{i=0}^{n-3} c_i \cdots \prod_{i=0}^{0} c_i\right] b_0^n} \quad \frac{1}{\left[\prod_{i=0}^{n-3} c_i \prod_{i=0}^{n-4} c_i \cdots \prod_{i=0}^{0} c_i\right] b_0^{n-1}} \quad \cdots \quad \frac{1}{b_0} \quad 1 \right] \tag{3.35}$$

ถ้าทำการเพิ่มค่าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะในสัดส่วนที่เท่ากันคือ k จะได้สัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะใหม่ดังนี้

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

จากสมการ (3.35) และสมการ (3.36) จะสังเกตได้ว่าค่า τ ยังคงเหมือนเดิมไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลง โดยสิ่งที่เปลี่ยนแปลงไปก็คือค่าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะ จากสมการ (3.36) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังนี้

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

ซึ่งจะได้อัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะดังสมการที่ 3.38

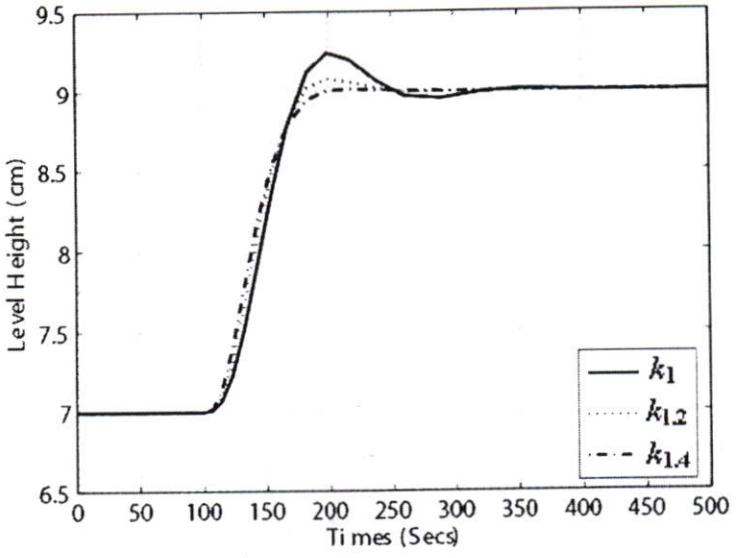
$$\alpha_i=k\frac{a_i^2}{a_{i-1}a_{i+1}} \tag{3.38}$$

วิธีในการปรับผลตอบสนองของระบบควบคุมให้ได้รูปทรงตามที่ต้องการนั้น ไม่มีวิธีที่แน่นอนตายตัวเหมือนกับกรณีของการปรับ τ โดยในกรณีนี้จะต้องค่อยๆลองปรับค่า k จนกว่าจะได้รูปทรงผลตอบสนองที่ต้องการ ถ้าค่า $k>1$ จะทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมช้าลงและค่าพุ่งเกินก็จะลดลง แต่ถ้า $0<k<1$ จะทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมเร็วขึ้นค่าพุ่งเกินก็จะมากขึ้น ถึงแม้ว่าวิธีนี้จะต้องลองผิดลองถูกในการปรับค่า k แต่ก็ยังดีกว่าการปรับค่า α_i โดยตรง เนื่องจากถ้าระบบควบคุมเป็นแบบอันดับสูงๆ ค่า α_i ที่จะทำการปรับก็มากตามไปด้วย

หลังจากที่ได้รูปทรงผลตอบสนองของระบบควบคุมตามที่ต้องการแล้ว ค่าเวลาเข้าที่ของระบบควบคุมอาจจะมีค่าที่ลดลงหรือเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากอัตราการหน่วงของระบบควบคุมได้เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำการปรับค่าเวลาเข้าที่ให้ได้ตามที่ต้องการอีกครั้งหนึ่ง

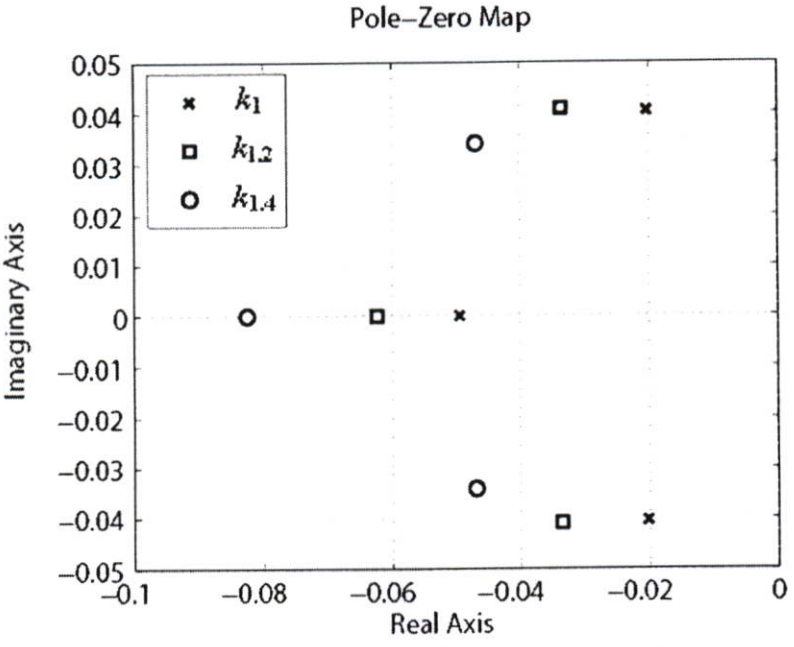
3.3.4.1 ผลของการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ α_i ที่มีต่อผลตอบสนองของระบบควบคุม

จากรูปที่ 3.6 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันต่อสัญญาณขั้นบันไดที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรม Matlab เมื่อปรับอัตราการหน่วงของระบบควบคุม โดยการปรับเพิ่มค่า k จาก 1 เป็น 1.2 และ 1.4 ซึ่งจากความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ k ที่มีต่อค่าอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะ α_i ดังที่ได้แสดงในสมการที่ 3.38 เป็นผลให้อัตราการหน่วงของระบบควบคุมเพิ่มขึ้น ตามลำดับ

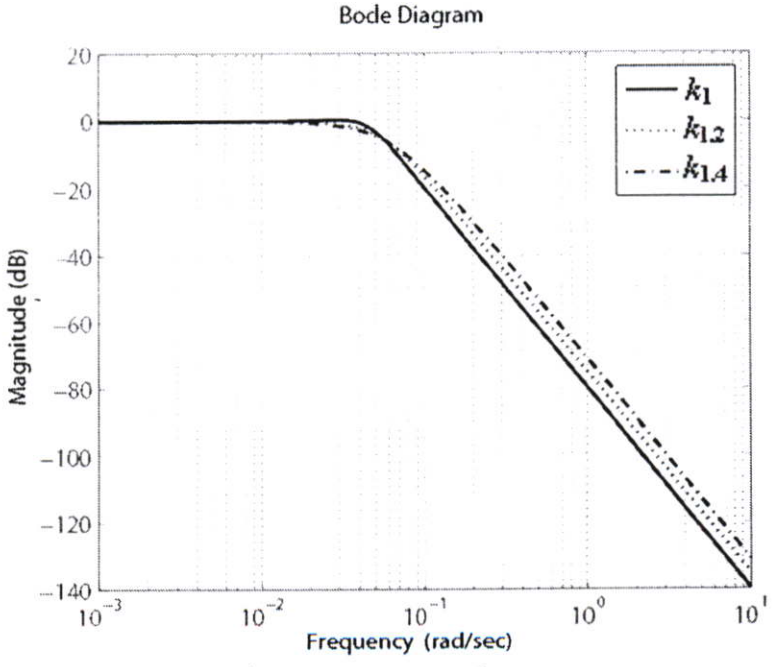


รูปที่ 3.6 ผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันได้เมื่อปรับอัตราการหน่วงของระบบควบคุมโดยการปรับค่า k

การปรับค่าพารามิเตอร์ k เป็นผลอัตราการหน่วงของระบบควบคุมเพิ่มขึ้นทำให้ค่าพุ่งเกินของผลตอบสนองลดลงดังรูปที่ 3.6 นั้น เป็นผลมาจาก ค่าตำแหน่งโพลของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบควบคุมที่เปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยค่าตำแหน่งรากของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบควบคุมเลื่อนไปทางซ้ายของ s-Plane เป็นผลให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมเร็วขึ้น ค่า Cosine มุมของรากเพิ่มขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินลดลง ส่วนรูปที่ 3.8 นั้นแสดงผลตอบสนองทางความถี่ของระบบควบคุมเมื่อปรับอัตราการหน่วงของระบบควบคุมโดยการปรับค่า k



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งโพลวงปิดของระบบควบคุมเมื่อปรับอัตราการหน่วงของระบบควบคุมโดยการปรับค่า k



รูปที่ 3.8 ผลตอบสนองทางความถี่ของระบบควบคุมเมื่อปรับอัตราการหน่วงของระบบควบคุมโดยการปรับค่า k

3.4 สรุป

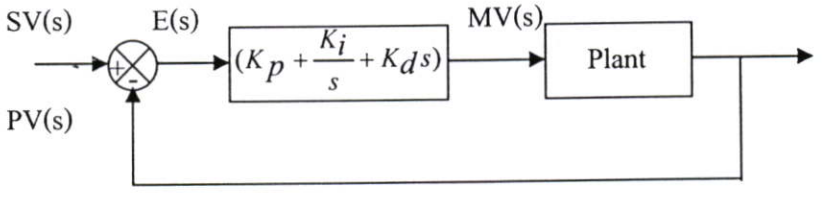
CRA เป็นวิธีการออกแบบระบบควบคุม ซึ่งอยู่บนพื้นฐานขนาดที่สัมพันธ์กันของค่าสัมประสิทธิ์สมการพหุนามคุณลักษณะ (Characteristic Polynomial) เพื่อให้ได้สมการคุณลักษณะ (Characteristic Equation) ที่เหมาะสม โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบด้วยวิธี CRA จะประกอบไปด้วยค่าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะ α_i ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ และค่าพารามิเตอร์ k ซึ่งพารามิเตอร์ของวิธี CRA นี้จะใช้สำหรับทำการออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะที่ต้องการทั้งยังสามารถปรับเปลี่ยนสัมประสิทธิ์สมการพหุนามคุณลักษณะเพื่อให้ความเร็วและรูปทรงของผลตอบสนองเป็นดังต้องการ ได้อย่างสะดวกและมีแบบแผน ในการออกแบบตัวควบคุมนั้นทำได้โดยทำการกำหนดสมการคุณลักษณะหรือสมการพหุนามคุณลักษณะที่ต้องการของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด โดยพิจารณาข้อกำหนดด้านสมรรถนะ (Performance Specification) ของระบบควบคุม และค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะที่ได้จากวิธี CRA จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะที่ได้จากตัวควบคุมและกระบวนการ เพื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมดังที่จะแสดงในบทต่อไป

บทที่ 4
การออกแบบตัวควบคุมพีไอดี ด้วยวิธี CRA

ตัวควบคุมแบบพีไอดีเป็นชนิดของตัวควบคุมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถใช้กับงานประยุกต์ต่างๆได้อย่างเหมาะสม สามารถปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ได้ขณะปฏิบัติงานและมีวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมได้หลายวิธี ในบทที่ 4 นี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติของตัวควบคุมพีไอดีและพฤติกรรมของตัวควบคุมพีไอดีที่มีต่อผลตอบสนองของระบบควบคุม โครงสร้างของระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน วิธีออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธี CRA และการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเมื่อต้องการปรับความเร็วและ อัตราการหน่วงของผลตอบสนองของระบบควบคุม โดยจะอธิบายในหลักการและวิเคราะห์สมการ ที่มาการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทั้งนี้โปรแกรมที่สร้างขึ้นสำหรับหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแสดงรายละเอียดดังภาคผนวก ข.

4.1 ตัวควบคุมแบบ Proportional Integral Derivative (PID)

จากรูปที่ 4.1 นั้นเป็นรูปแบบพื้นฐานที่ใช้ในการทำความเข้าใจการทำงานของตัวควบคุมพีไอดี สมการของตัวควบคุมใน s-Domain แสดงได้ด้วยสมการที่ 4.1



รูปที่ 4.1 รูปแบบของตัวควบคุมแบบพีไอดี

$$MV = \left(Kp + \frac{Ki}{s} + Kds \right) * e(t) \tag{4.1}$$

โดยที่

SV(s) = จุดปรับตั้ง(Set Point หรือ Set Value)

PV(s) = สัญญาณตัวแปรกระบวนการ (Process Variable)

E(s) = ผลต่างระหว่างจุดปรับตั้งและสัญญาณป้อนกลับ มีค่าเท่ากับ SV(s) – PV(s)

MV(s) = สัญญาณตัวแปรปรับกระบวนการ (Manipulated Signal)

Kp = Proportional Gain

Ki = Integral Gain

Kd = Derivative Gain

ในทางการควบคุมงานอุตสาหกรรมนั้น โดยทั่วไปผู้ผลิตตัวควบคุมมักจะไม่ออกแบบให้ปรับ Kp , Ki , Kd โดยตรง แต่จะนิยมใช้ค่าที่ เรียกว่า Proportional band (PB),Integral time, Ti และ Derivative time, Td ดังนั้นสมการ4.1สามารถเขียนในอีกรูปแบบหนึ่งคือ

$$MV = \left(\frac{100}{PB}\right) * \left(1 + \frac{1}{Tis} + Tds\right) * e(t) \qquad (4.2)$$

โดย

Proportional band, PB = 100 / Kp

Integral time, Ti = Kp / Ki

Derivative time, Td = Kd / Kp

4.1.1 ผลของพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PID กับกระบวนการ

4.1.1.1 ผลของ Proportional Band (PB) กับกระบวนการ

ผลของ Proportional Band (PB) กับการควบคุมกระบวนการ Proportional Band จะเป็นสัดส่วนผกผันกับค่าอัตราขยายของกระบวนการ โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราขยายกับค่า Proportional Band สามารถแสดงได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ 4.3

$$GAIN = \frac{100}{PB} \qquad (4.3)$$

สำหรับผลของ Proportional Band ที่ใช้กับการควบคุมแบบ P-Control นั้นค่า Proportional Band จะมีผลกับขนาดของผลตอบสนองรวมไปถึงเรื่องความไว (Sensitivity) และออฟเซต (Offset) หรือค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว (Steady State Error) ผลของ Proportional Band ที่มากเกินไปจะมีผลทำให้เกิดค่าผิดพลาด (Error) ในสถานะคงตัวมากขึ้นและจะทำให้ความ

ไวของผลตอบสนอง ในทางกลับกันค่าของ Proportional Band ที่น้อยเกินไปนั้น จะทำให้กระบวนการเกิดการแกว่งขึ้น หรือเข้าใกล้จุดไร้เสถียรภาพ (Unstable) มากขึ้น

4.1.1.2 ผลของ Integral Time กับกระบวนการ

สำหรับ Integral Action นั้นจะมีผลกับผลตอบสนองของค่าสะสม แต่จะไม่มีผลกับผลตอบสนองในลักษณะทันทีทันใด การลดค่า Integral Time จะมีผลทำให้ออฟเซตหรือค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวของกระบวนการลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเรื่อง Integral Action จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของความผิดพลาดสะสมของผลตอบสนอง แต่ถ้า Integral Time ที่ตั้งให้กระบวนการนั้นมีค่าน้อยเกินไป (Integral Action มากเกินไป) ก็จะทำให้ผลตอบของกระบวนการเกิดการแกว่งมากขึ้น (การพุ่งเกินมากขึ้น) เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัวนานมากขึ้นได้ ในทำนองกลับกันการเพิ่มค่า Integral Time จะมีผลในทางตรงกันข้ามกับที่กล่าวมาแล้ว คือจะเพิ่มค่าผิดพลาดในสถานะคงตัวของผลตอบของกระบวนการ ถ้าผลตอบสนองของกระบวนการนั้นเป็นผลตอบสนองที่มีค่าผิดพลาดในสถานะคงตัวอยู่ แต่ในขณะเดียวกัน ก็จะเป็นการลดการแกว่งหรือค่าพุ่งเกินของการตอบสนองของกระบวนการ ในกรณีที่กระบวนการนั้นมีค่า Integral Time เดิมน้อยเกินไป เมื่อมีการเริ่มเดินเครื่องอย่างอัตโนมัติ (Automatic Starting) ด้านการควบคุมของตัวควบคุม PID Integral Action จะทำให้เกิด Integral Windup เนื่องจากขณะเริ่มเดินเครื่อง ความผิดพลาดจะเกิดขึ้นเป็นเวลานาน ทำให้เทอมของ Integral มีค่าเกิน 100%

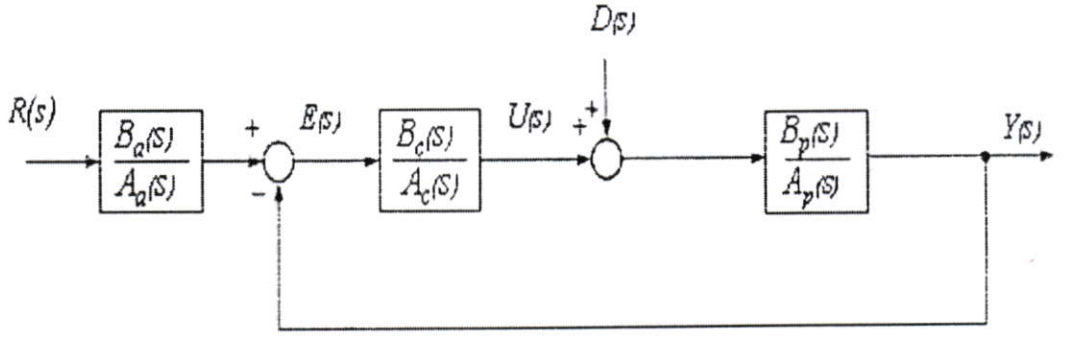
4.1.1.3 ผลของ Derivative Time กับผลตอบสนองของกระบวนการ

ผลของ Derivative Action จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุท ซึ่งมีผลทำให้กระบวนการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงได้เร็วขึ้น สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอดี ที่มีรูปแบบตามสมการที่ 4.1 และ 4.2 นั้นค่าของ Derivative Action จะมีผลกับการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่เกี่ยวกับกระบวนการ โดยจะทำให้กระบวนการมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้นแต่ Derivative Action จะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ Set Point แต่อย่างใด อย่างไรก็ตาม Derivative Action จะมีผลเสียในการควบคุมกระบวนการที่มีสัญญาณรบกวนมาก ทั้งนี้เนื่องจาก Derivative Action จะไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่เข้ามาอย่างมาก ดังนั้น กระบวนการที่มีสัญญาณรบกวน ตัวอย่างเช่น กระบวนการควบคุมอัตราการไหล หรือกระบวนการควบคุมความดัน Derivative Control อาจมีผลทำให้กระบวนการไม่มีเสถียรภาพ (Unstable)

สำหรับผลของค่าพารามิเตอร์ทั้งสามตัวที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น จะเป็นการพิจารณาผลตอบสนองของกระบวนการอย่างไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน หรือใช้เป็นการพิจารณาทางทฤษฎีเท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติจริง ๆ แล้วความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ทั้งสามกับผลตอบสนองของกระบวนการยังเกี่ยวพันกับสิ่งอื่น ๆ อีก เช่น รูปแบบของการควบคุมนั้น จะใช้การควบคุมในลักษณะใด และยังเกี่ยวพันกับสภาพแวดล้อม สัญญาณรบกวนที่กระบวนการได้รับอีกด้วย

4.2 โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CRA

โครงสร้างตัวควบคุมสำหรับการออกแบบด้วยวิธี CRA จะมีลักษณะเป็นระบบควบคุมแบบ 2 องศาอิสระ (Two Degree of Freedom) แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.2 โครงสร้างระบบควบคุม

โดย

$B_p(s)$ และ $A_p(s)$ คือสมการโพลีโนเมียลในส่วนเศษและส่วนของกระบวนการ

$B_c(s), A_c(s)$ และ $B_a(s), A_a(s)$ คือสมการโพลีโนเมียลของตัวควบคุมที่ออกแบบ

จากรูปที่ 4.5 จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมป้อนกลับดังนี้

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{B_a(s)B_p(s)}{A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s)} \tag{4.4}$$

โดยในกรณีของระบบควบคุมกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน

$$B_p(s) = K_1 \tag{4.5}$$

$$A_p(s) = T_{12}s^2 + (T_{12} + 2T_2)s + 1$$

$$B_c(s) = K_d s^2 + K_p s + K_i$$

$$A_c(s) = s$$

$$B_a(s) = K_i$$

$$A_a(s) = K_d s^2 + K_p s + K_i$$

โดย

$$K_1 = \frac{k_{p1} T_2}{A_2}, \text{cm/V}$$

$$T_{12} = \frac{A_1}{\beta_{12} a_1} \sqrt{\frac{2(\overline{h_1} - \overline{h_2})}{g}}, \text{ s}$$

$$T_2 = \frac{A_2}{\beta_2 a_2} \sqrt{\frac{2\overline{h_2}}{g}}, \text{ s}$$

A_i คือพื้นที่หน้าตัดของถัง i (cm^2)

a_2 คือพื้นที่หน้าตัดของรูทางออกของถังที่ 2 (cm^2)

a_{12} คือพื้นที่หน้าตัดของรูที่เชื่อมต่อระหว่างถังที่ 1 และถังที่ 2 (cm^2)

β_2 คือค่าตำแหน่งวาล์วที่ต่อทางด้านออกของถังที่ 2

β_{12} คือค่าตำแหน่งวาล์วที่ต่อระหว่างถังที่ 1 และถังที่ 2

g คือแรงโน้มถ่วงของโลก (cm/s^2)

k_{p1} คือค่าอัตราขยายของปั๊มน้ำ ($\text{cm}^3/\text{V} \cdot \text{s}$)

เมื่อแทนสมการที่ (4.5) ในสมการที่ (4.4) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนและสมการพหุนามคุณลักษณะของระบบควบคุมป้อนกลับดังสมการที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K_1 K_i}{T_{12} T_2 s^3 + (T_{12} + 2T_2 + K_1 K_d) s^2 + (1 + K_1 K_p) s + K_1 K_i} \tag{4.6}$$

$$p(s) = T_{12} T_2 s^3 + (T_{12} + 2T_2 + K_1 K_d) s^2 + (1 + K_1 K_p) s + K_1 K_i \tag{4.7}$$

โดยสมการคุณลักษณะที่ได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมป้อนกลับดังสมการที่ (4.7) เป็นสมการคุณลักษณะของระบบควบคุมที่ใช้สำหรับทำการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธี CRA

4.3 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดี ด้วยวิธี CRA สำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน

ในการออกแบบควบคุมพีไอดี ด้วยวิธี CRA สำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันนั้น จะทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของกระบวนการกับตัวควบคุมพีไอดี จากนั้นจึงนำสมการพหุนามคุณลักษณะไปเปรียบเทียบกับสมการพหุนามคุณลักษณะที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี CRA และทำการแก้สมการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี ซึ่งวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี ด้วยวิธี CRA อธิบายดังต่อไปนี้

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดและสมการคุณลักษณะของระบบควบคุมป้อนกลับจากการออกแบบด้วยวิธี CRA แสดงดังสมการที่ 4.7 และสมการที่ 4.8 ตามลำดับ

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{a_0}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \tag{4.8}$$

$$p(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \ldots + a_1 s + a_0, \ \forall a_i > 0 \tag{4.9}$$

การออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะด้วยวิธี CRA ดังสมการที่ 4.8 สามารถทำได้โดยทำการกำหนดค่า τ และค่า α_i ค่า τ เป็นตัวกำหนดความเร็วของผลตอบสนองและค่า α_i จะกำหนดถึงอัตราการหน่วงของระบบควบคุม โดยการกำหนดค่า α_i จะต้องกำหนดตามเงื่อนไขของ Lipatov และ Sokolov [5] เพื่อความมีเสถียรภาพของระบบควบคุม แสดงได้ดังนี้

$$\sqrt{\alpha_i \alpha_{i+1}} > 1.4656 \qquad \text{สำหรับ } i = 1,2,\ldots,n-2 \tag{4.10}$$

$$\alpha_i \geq 1.12374 \alpha_i^* \qquad \text{สำหรับ } i = 2,3,\ldots,n-2 \tag{4.11}$$

$$\alpha_i^* = \frac{1}{\alpha_{i+1}} + \frac{1}{\alpha_i - 1} \qquad \text{โดย } \alpha_n = \alpha_0 = \infty \tag{4.12}$$

จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะดังต่อไปนี้

$$\alpha_1 = \frac{a_1^2}{a_0 a_2}, \ \alpha_2 = \frac{a_2^2}{a_1 a_3}, \ \ldots, \ \alpha_{n-1} = \frac{a_{n-1}^2}{a_{n-2} a_n} \tag{4.13}$$

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} \tag{4.14}$$

ทำให้สามารถหาอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะในสมการที่ 4.9 ได้จาก

$$\frac{a_3}{a_2} = \frac{\tau}{\alpha_1\alpha_2} \tag{4.15}$$

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

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

เมื่อนำค่าจากสมการ 4.15 ไปแทนในสมการ 4.9 และทำการเทียบสัมประสิทธ์สมการพหุนามคุณลักษณะในสมการที่ 4.9 กับสัมประสิทธ์สมการพหุนามคุณลักษณะในสมการที่ 4.7 แล้วแก้สมการเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี โดย
จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสมการคุณลักษณะ

$$\frac{\tau}{\alpha_1} = \left(\frac{T_{12} + 2T_2 + K_d K_1}{1 + K_p K_1} \right) \tag{4.16}$$

$$\tau = \frac{1 + K_p K_1}{K_i K_1}$$

$$\frac{\tau}{\alpha_1\alpha_2} = \frac{T_{12} T_2}{T_{12} + 2T_2 + K_d K_1}$$

จะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีดังต่อไปนี้

$$K_p = \frac{\alpha_1^{\,2}\alpha_2}{\tau^2 K_1} \times T_{12} T_2 - \frac{1}{K_1} \tag{4.17}$$

$$K_i = \frac{\alpha_1^{\,2}\alpha_2}{\tau^3} \times \frac{T_{12} T_2}{K_1}$$

$$K_d = \left(\frac{T_{12} T_2}{K_1} \times \frac{\alpha_1\alpha_2}{\tau} \right) - \frac{T_{12}}{K_1} - \frac{2T_2}{K_1}$$

4.3.1 การปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุม

ในการปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุม สามารถทำได้โดยการปรับค่า τ โดยวิธี CRA นั้นจะใช้พารามิเตอร์ k ในการปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุม ซึ่งวิธีการปรับค่า τ แสดงได้ดังนี้

จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะและพารามิเตอร์ k ดังต่อไปนี้

$$\tau = \frac{1}{k}\left(\frac{a_1}{a_0}\right) \tag{4.18}$$

โดยเพิ่มค่า k ขึ้นเมื่อต้องการให้ค่า τ มีค่าน้อยลงซึ่งก็คือผลตอบสนองของระบบควบคุมเร็วขึ้นและในทางกลับกัน กำหนดให้ค่า k มีค่าอยู่ในช่วง $0 < k < 1$ เมื่อต้องการให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมจะช้าลง

จากนั้นนำค่า k ที่กำหนดแทนลงในสมการที่ 4.9 ในรูปแบบที่แสดงดังสมการที่ 4.19

$$p(s) = a_n s^n + k a_{n-1} s^{n-1} + \ldots + k^{n-1} a_1 s + k^n a_0 \tag{4.19}$$

ในกรณีสำหรับระบบควบคุมกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน จะได้สมการพหุนามคุณลักษณะดังสมการที่ 4.20

$$p(s) = a_3 s^3 + k a_2 s^2 + k^2 a_1 s + k^3 a_0 \tag{4.20}$$

เทียบสัมประสิทธิ์สมการพหุนามคุณลักษณะในสมการที่ 4.20 กับ สัมประสิทธิ์สมการพหุนามคุณลักษณะในสมการที่ 4.7 แก้สมการเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี โดยจากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสมการคุณลักษณะ

$$\frac{\tau}{k\alpha_1} = \left(\frac{T_{12} + 2T_2 + K_d K_1}{1 + K_p K_1}\right) \tag{4.21}$$

$$\frac{\tau}{k} = \frac{1 + K_p K_1}{K_i K_1}$$

$$\frac{\tau}{k\alpha_1\alpha_2} = \frac{T_{12} T_2}{T_{12} + 2T_2 + K_d K_1}$$

จะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีดังต่อไปนี้

$$K_p_t = \left(\frac{k^2 \alpha_1^{\,2} \alpha_2 T_{12} T_2}{\tau^2} - 1 \right) / K_1 \tag{4.22}$$

$$K_i_t = \frac{T_{12} T_2 \alpha_1^2 \alpha_2 k^3}{K_1 \tau^3}$$

$$K_d_t = \left(\frac{k \alpha_1 \alpha_2 T_{12} T_2}{\tau} - T_{12} - 2T_2 \right) / K_1$$

4.3.2 การปรับอัตราการหน่วงของระบบควบคุม

ในการปรับอัตราการหน่วงของระบบควบคุม สามารถทำได้โดยการปรับค่า α_i โดยถ้าหากระบบควบคุมมีอันดับสูงๆ จะทำให้มีจำนวนพารามิเตอร์ α_i ในการปรับหลายตัว ทำให้ไม่สะดวกและยุ่งยากต่อการปรับค่าพารามิเตอร์ α_i โดยวิธี CRA นั้นจะใช้พารามิเตอร์ k เพียงตัวเดียว ในการปรับอัตราการหน่วงของระบบควบคุม ซึ่งทำให้สะดวกและง่ายต่อการปรับอัตราการหน่วง วิธีการปรับค่า α_i แสดงได้ดังนี้

จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะและพารามิเตอร์ k ดังต่อไปนี้

$$\alpha_1 = k \frac{a_1^2}{a_0 a_2},\ \alpha_2 = k \frac{a_2^2}{a_1 a_3},\ \ldots,\ \alpha_{n-1} = k \frac{a_{n-1}^2}{a_{n-2} a_n} \tag{4.23}$$

วิธีการปรับอัตราการหน่วงของระบบควบคุมนั้น จะต้องค่อยๆปรับค่า k จนกว่าจะได้อัตราหน่วงของระบบควบคุมตามที่ต้องการ โดยถ้ากำหนดให้ $k > 1$ จะทำให้อัตราหน่วงของระบบควบคุมเพิ่มขึ้น แต่ถ้า $0 < k < 1$ จะทำให้อัตราการหน่วงของระบบควบคุมลดลง จากนั้นนำค่า k ที่กำหนดแทนลงในสมการที่ 4.9 ในรูปแบบที่แสดงดังสมการที่ 4.24

$$p(s) = a_n s^n + k^{n-1} a_{n-1} s^{n-1} + \ldots + k^{\frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{2}n} a_1 s + k^{\frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{2}n} a_0 \tag{4.24}$$

ในกรณีสำหรับระบบควบคุมกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน จะได้สมการพหุนามคุณลักษณะดังสมการที่ 4.25

$$p(s) = a_3 s^3 + k^2 a_2 s^2 + k^3 a_1 s + k^3 a_0 \tag{4.25}$$

เทียบสัมประสิทธิ์สมการพหุนามคุณลักษณะในสมการที่ 4.25 กับ สัมประสิทธิ์สมการพหุนามคุณลักษณะในสมการที่ 4.7 แก้สมการเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี โดย จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสมการคุณลักษณะ

$$\frac{\tau}{k\alpha_1} = \left(\frac{T_{12} + 2T_2 + K_d K_1}{1 + K_p K_1} \right) \tag{4.26}$$

$$\tau = \frac{1 + K_p K_1}{K_i K_1}$$

$$\frac{\tau}{k^2 \alpha_1 \alpha_2} = \frac{T_{12} T_2}{T_{12} + 2T_2 + K_d K_1}$$

จะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีดังต่อไปนี้

$$K_p_o = \left(\frac{T_{12} T_2 k^3 \alpha_1^2 \alpha_2}{\tau^2} - 1 \right) / K_1 \tag{4.27}$$

$$K_i_o = \frac{T_{12} T_2 k^3 \alpha_1^2 \alpha_2}{K_1 \tau^3}$$

$$K_d_o = \left(\frac{T_{12} T_2 k^2 \alpha_1 \alpha_2}{\tau} - T_{12} - 2T_2 \right) / K_1$$

4.4 สรุป

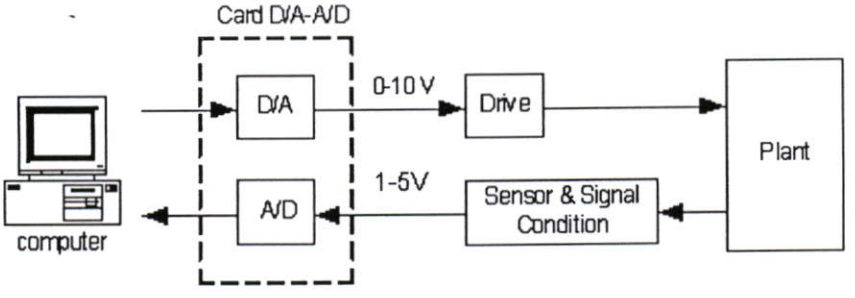
การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีด้วยวิธีกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ CRA ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 นั้น เป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ผู้ทำวิทยานิพนธ์ตั้งใจนำเสนอในจุดประสงค์ ของความสะดวกในการปรับค่าพารามิเตอร์พีไอดี โดยยกตัวอย่างใช้กับกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน ซึ่งด้วยวิธีการปรับแต่งพารามิเตอร์พีไอดีอย่างมีรูปแบบด้วยวิธี CRA ดังที่อธิบายด้วยสมการข้างต้น สามารถปรับความเร็วและรูปทรงของผลตอบสนองของระบบควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังจะแสดงให้เห็นได้จากผลการทดลองในบทต่อไป

บทที่ 5

การจำลองและการทดลองระบบควบคุม

ในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างของระบบควบคุม และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการควบคุมกับกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน รวมถึงการหาค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการ เพื่อนำไปหาฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการซึ่งนำไปสู่การวิเคราะห์กระบวนการและการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดี ด้วยวิธี CRA หลังจากนั้นจะนำตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไปทำการทดสอบโดยจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้ ขั้นตอนแรกทำการทดสอบผลตอบสนองของระบบควบคุม เมื่อกำหนดให้อินพุตอ้างอิงของระบบควบคุมเป็นแบบขั้นบันได ขั้นตอนที่สองทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของการปรับค่าพารามิเตอร์ k ว่ามีผลอย่างไรต่อค่าเวลาเข้าที่ของผลตอบสนองของระบบควบคุม ขั้นตอนที่สามทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของการปรับค่าพารามิเตอร์ k ว่ามีผลอย่างไรต่อเปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินของผลตอบสนองของระบบควบคุม ขั้นตอนที่สี่ทำการศึกษาถึง ความคงทนของระบบควบคุมเมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการ ซึ่งหลังจากที่ได้ทำการศึกษาถึงผลจากการจำลองการทำงานตามขั้นตอนดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จะนำตัวควบคุมที่ได้ออกแบบมาทำการควบคุมกับกระบวนการจริง โดยมีขั้นตอนการทดลองเช่นเดียวกับขั้นตอนการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB

5.1 โครงสร้างระบบควบคุมของกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน



รูปที่ 5.1 โครงสร้างระบบควบคุมของกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน

รูปที่ 5.1 แสดงโครงสร้างระบบควบคุมของกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้ ส่วนแรกคือคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) จะทำหน้าที่ในการรับและส่งข้อมูลจากอินเตอร์เฟสการ์ด(Card D/A-A/D) โดยจะนำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมให้แก่ระบบควบคุม ส่วนที่สองคืออินเตอร์เฟสการ์ดเป็นการ์ดแบบ ISA โดยจะ

ทำหน้าที่ในการรับสัญญาณแบบอนาล็อกจากอุปกรณ์วัดระดับน้ำของถังที่ 2 และทำการแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิตอล เพื่อส่งผลให้คอมพิวเตอร์ทำการประมวลผลในการสร้างสัญญาณควบคุม จากนั้นจะทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณควบคุมซึ่งอยู่ในรูปแบบดิจิตอลให้เป็นแบบอนาล็อกเพื่อส่งให้กับวงจรขับกระแสของปั๊มน้ำ ส่วนที่สามคืออุปกรณ์ขับกระแสของปั๊มน้ำ โดยเป็นวงจรขับกระแสแบบเชิงเส้น (Linear Amplifier) ทำหน้าที่ในการรับสัญญาณควบคุมที่อยู่ในรูปแบบอนาล็อกจากอินเตอร์เฟสการ์ดแล้วขยายขนาดสัญญาณแรงดันให้มากขึ้นเพื่อจ่ายให้กับปั๊มและส่วนสุดท้ายคืออุปกรณ์วัดระดับน้ำของถังที่สองซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดความดันแตกต่าง(Differential Pressure Transmitter) ซึ่งจะทำการวัดระดับน้ำในถังและให้สัญญาณอนาล็อกมาตรฐาน ส่งไปยังอินเตอร์เฟสการ์ดต่อไป รายละเอียดของอุปกรณ์และวงจรที่ใช้ในการทดลองนั้นแสดงในภาคผนวก ก.

5.2 การหาค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน

จากสมการที่ 2.1 พารามิเตอร์ของกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน แสดงดังตารางที่ 5.1 ซึ่งประกอบไปด้วย พารามิเตอร์ที่ทราบค่ามีลักษณะเป็นค่าคงที่ได้แก่ พื้นที่หน้าตัดของถัง A_1, A_2; cm^2 พื้นที่หน้าตัดของรูทางออกของถังที่ 2 รูที่เชื่อมต่อระหว่างถังที่ 1 และถังที่ 2 a_2, a_{12}; cm^2 ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก g ; cm/s^2 พารามิเตอร์ที่ได้จากการกำหนดจุดทำงาน ได้แก่ ระดับน้ำ ณ.จุดทำงานของกระบวนการ $\overline{h_1}$, $\overline{h_2}$;cm แรงดันอินพุตที่จ่ายให้ปั๊มน้ำ $\bar{u}$; V และพารามิเตอร์ที่ได้จากคำนวณค่า ได้แก่ ค่าตำแหน่งวาล์วที่ต่อทางด้านออกของถังที่ $2\ \beta_2$,ค่าตำแหน่งวาล์วที่ต่อระหว่างถังที่ 1 และถังที่ 2 β_{12}

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ของกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน

A_1, A_2; cm^2	66.25
a_2, a_{12}; cm^2	0.1963
β_2	0.47161
β_{12}	0.56238
k_{p1} ; $(cm^3/V \cdot s)$	2.79535
g ; cm/s^2	981
$\overline{h_1}$; cm	13
$\overline{h_2}$; cm	7.7
$\bar{u}$; V	3

โดย

A_i คือพื้นที่หน้าตัดของถัง i (cm^2)

a_2 คือพื้นที่หน้าตัดของรูทางออกของถังที่ 2 (cm^2)

a_{12} คือพื้นที่หน้าตัดของรูที่เชื่อมต่อระหว่างถังที่ 1 และถังที่ 2 (cm^2)

β_2 คือค่าตำแหน่งวาล์วที่ต่อทางด้านออกของถังที่ 2,

β_{12} คือค่าตำแหน่งวาล์วที่ต่อระหว่างถังที่ 1 และถังที่ 2

k_{p1} คือค่าอัตราขยายของปั๊มน้ำ ($cm^3/V \cdot s$)

g คือแรงโน้มถ่วงของโลก (cm/s^2)

$\overline{h_1}$ และ $\overline{h_2}$ คือระดับน้ำ ณ.จุดทำงานของกระบวนการ

จากพารามิเตอร์และจุดการทำงานของกระบวนการ เมื่อนำไปแทนในสมการ (5.1) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการดังสมการ (5.2)

$$\frac{H_2(s)}{U(s)} = G(s) = \frac{K_1}{T_{12}T_2 s^2 + (T_{12} + 2T_2)s + 1} \tag{5.1}$$

โดย

$$K_1 = \frac{k_{p1}T_2}{A_2}, \text{cm/V}$$

$$T_{12} = \frac{A_1}{\beta_{12}a_{12}}\sqrt{\frac{2(\overline{h_1} - \overline{h_2})}{g}}, \text{ s}$$

$$T_2 = \frac{A_2}{\beta_2 a_2}\sqrt{\frac{2\overline{h_2}}{g}}, \text{ s}$$

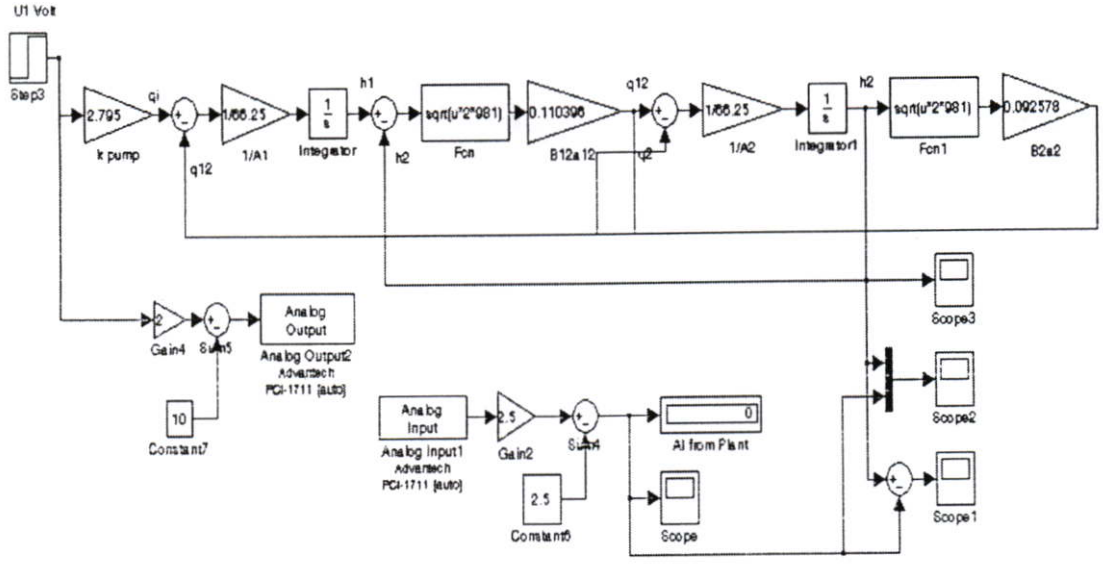
สมการที่ (5.1) นี้เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม

$$G(s) = \frac{2.78810}{3070.63786s^2 + 178.62610s + 1} \tag{5.2}$$

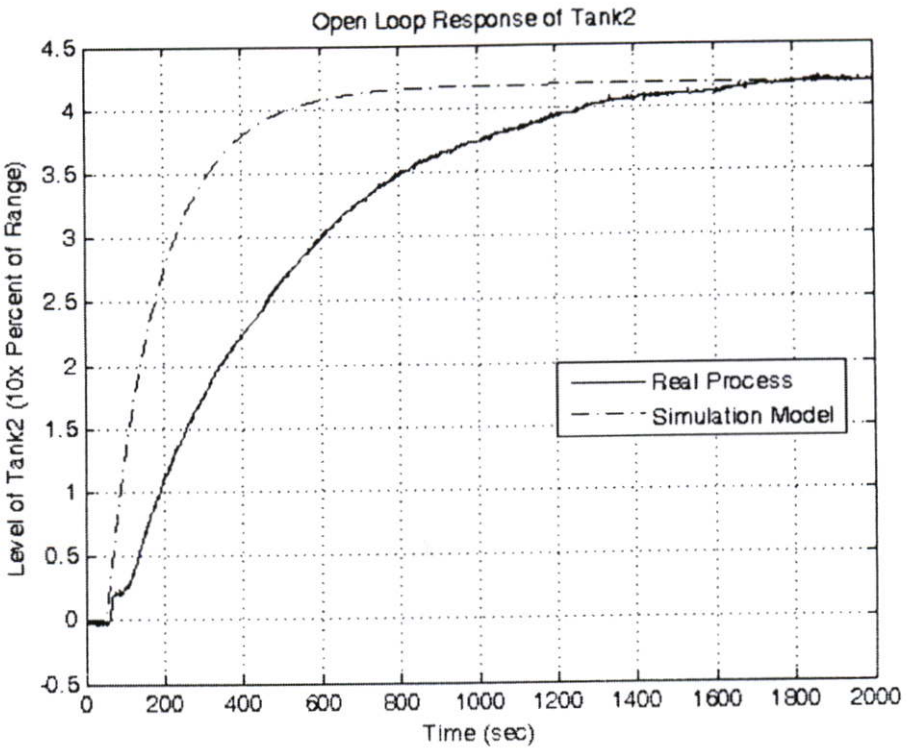
$$= \frac{0.00090799}{(s + 0.0519)(s + 0.0063)}$$

จากสมการ 5.2 จะเห็นได้ว่ากระบวนการมีโพลอยู่ที่ตำแหน่ง $p_1 = -0.0519$ และ $p_2 = -0.0063$

สำหรับการทดสอบความถูกต้องหรือความแม่นยำของแบบจำลอง ว่ามีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จากกระบวนการจริงมากน้อยเพียงใด จะทำการทดสอบโดยใช้แบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (2.4) เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากกระบวนการจริง โดยจะทำการจ่ายแรงดันอินพุตขนาด 3 โวลท์ให้กับอุปกรณ์ขับกระแสของปั๊มน้ำและบันทึกผลตอบสนองที่ได้จากกระบวนการจริงและจากการจำลองโดยโปรแกรม MATLAB ดังรูปที่ 5.2 ซึ่งผลเปรียบเทียบที่ได้จากผลตอบสนองของกระบวนการจริงกับผลแบบจำลอง นั้น แสดงได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.2 โปรแกรม Simulink ที่ใช้เปรียบเทียบผลจากกระบวนการจริงกับผลจากแบบจำลอง



รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบผลตอบสนองวงเปิดของกระบวนการกับแบบจำลอง

จากรูปที่ 5.3 จะสังเกตได้ว่าผลตอบสนองวงเปิดของแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นนั้นจะมีความแตกต่างในช่วง Transient ถือเป็นค่าผิดพลาดแบบไดนามิก ซึ่งเป็นผลมาจากผลตอบสนองที่ได้จากการทดลองของกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันนั้นช้ากว่าแบบจำลองเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของค่าต้านทานการไหลของวาล์วและค่าอัตราขยายของปั๊มน้ำ แต่เมื่อพิจารณาผลเปรียบเทียบของผลตอบสนองที่สภาวะคงตัวถือว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก

5.3 การออกแบบตัวควบคุม

ในส่วนนี้จะทำการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน ด้วยวิธี CRA จากนั้นจะทำการทดสอบผลตอบสนองของระบบควบคุมที่มีต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได

จากฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันในสมการที่ (5.2) จะทำการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธี CRA โดยกำหนด $\alpha_1 = 1.8, \alpha_2 = 2$ และ $\tau = 40$ เพื่อหาสมการคุณลักษณะของฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน ด้วยวิธี CRA ดังแสดงในสมการที่ (5.3)

$$p(s) = a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 \tag{5.3}$$

จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะดังต่อไปนี้

$$\alpha_1 = \frac{a_1^2}{a_0 a_2} = 1.8 \tag{5.4}$$

$$\alpha_2 = \frac{a_2^2}{a_1 a_3} = 2$$

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} = 40$$

สามารถหาอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะในสมการที่ (5.3) ได้จาก

$$\frac{a_3}{a_2} = \frac{\tau}{\alpha_1 \alpha_2} = 11.111 \tag{5.5}$$

$$\frac{a_2}{a_1} = \frac{\tau}{\alpha_1} = 22.222$$

$$\frac{a_1}{a_0} = \tau = 40$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะกับค่า α_1, α_2 และ τ ในสมการที่ (5.5) จะได้สมการคุณลักษณะของฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันด้วยวิธี CRA ดังแสดงในสมการ (5.6)

$$P(s) = 3070.63786s^3 + 276.35740s^2 + 12.43608s + 0.31090 \tag{5.6}$$

จากฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดและสมการพหุนามคุณลักษณะที่ได้จากตัวควบคุมและกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันดังสมการที่ (5.7) และ (5.8) ตามลำดับ

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{0.36036K_i}{888.2794561s^3 + (121.0884857 + 0.36036K_d)s^2 + (1 + 0.36036K_p)s + 0.36036K_i} \tag{5.7}$$

$$p(s) = 888.2794561s^3 + (121.0884857 + 0.36036K_d)s^2 + (1 + 0.36036K_p)s + 0.36036K_i \quad (5.8)$$

จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสมการคุณลักษณะ ในสมการ (5.6) นำมาเปรียบเทียบกับอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะที่ได้จากกระบวนการและตัวควบคุมในสมการที่ (5.8) เพื่อแก้สมการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี ดังสมการที่ (5.9) และ (5.10)

$$\frac{\tau}{\alpha_1} = \left(\frac{121.0884857 + 0.36036K_d}{1 + 0.36036K_p} \right) = 22.222 \quad (5.9)$$

$$\tau = \frac{1 + 0.36036K_p}{0.36036K_i} = 40$$

$$\frac{\tau}{\alpha_1\alpha_2} = \frac{888.2794561}{121.0884857 + 0.36036K_d} = 11.111$$

จะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีดังต่อไปนี้

$$K_p = \frac{\alpha_1^{\,2}\alpha_2}{\tau^2 0.36036} \times 888.2794561 - \frac{1}{0.36036} = 4.10173 \quad (5.10)$$

$$K_i = \frac{\alpha_1^{\,2}\alpha_2}{\tau^3} \times \frac{888.2794561}{0.36036} = 0.11151$$

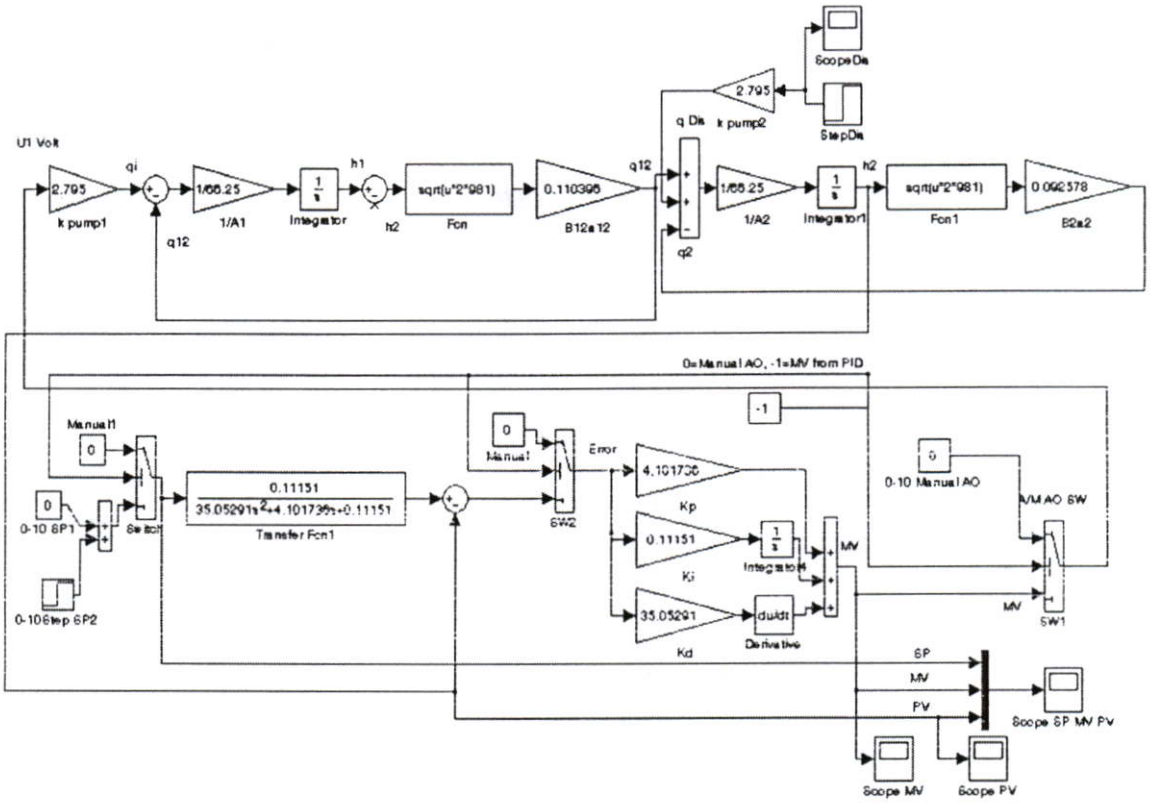
$$K_d = \left(\frac{888.2794561}{0.36036} \times \frac{\alpha_1\alpha_2}{\tau} \right) - \frac{104.0074047}{0.36036} - \frac{17.08108108}{0.36036} = 35.05290$$

5.3.1 การจำลองระบบควบคุม

5.3.1.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได

การจำลองการควบคุมระบบควบคุมกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันด้วยแบบจำลองระบบควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.4 เพื่อดูผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได มีจุดประสงค์เพื่อต้องการทดสอบตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมระบบว่า มีประสิทธิภาพในการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบขั้นบันไดเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่ ก่อนที่จะนำตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไปทดลองกับกระบวนการจริง

โดยการจำลองการทำงานจะกำหนดให้ระดับน้ำในถังที่ 2 มีการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าเดิม 10% คือจากที่ 20% ไปยังที่ค่า 30% โดยการเปลี่ยนแปลงเริ่มที่เวลา 300 วินาที จากนั้นป้อนสัญญาณอินพุตรบกวนขนาด 8% ณ เวลา 1300 วินาที และเก็บผลการทดลองจนถึงวินาทีที่ 2000 กราฟแสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.5 และกราฟแสดงสัญญาณควบคุม แสดงดังรูปที่ 5.6

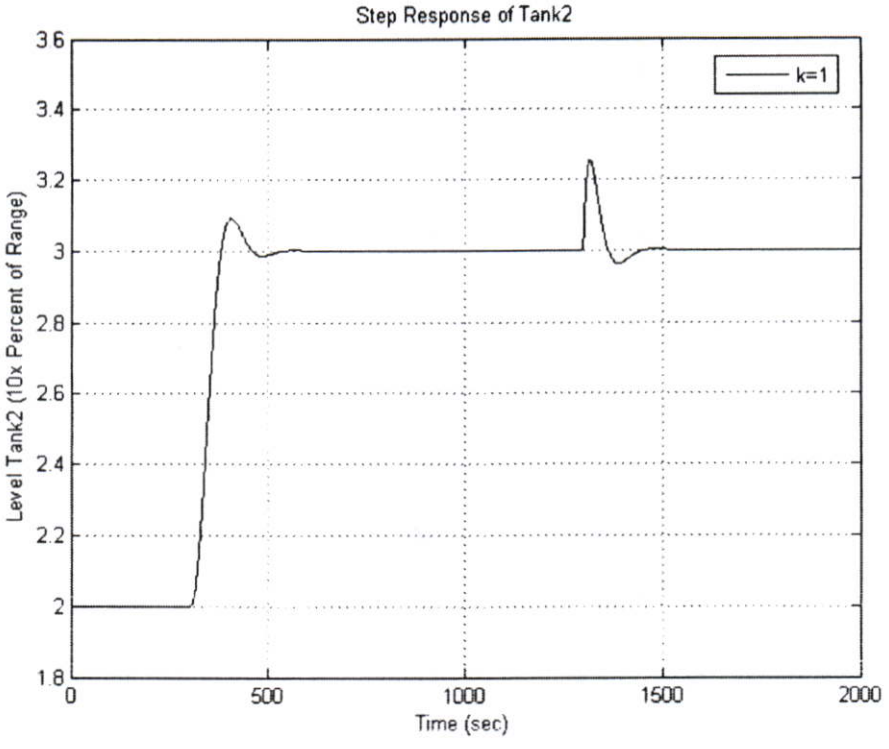


รูปที่ 5.4 โปรแกรม Simulink ที่ใช้จำลองการทำงานของระบบควบคุม

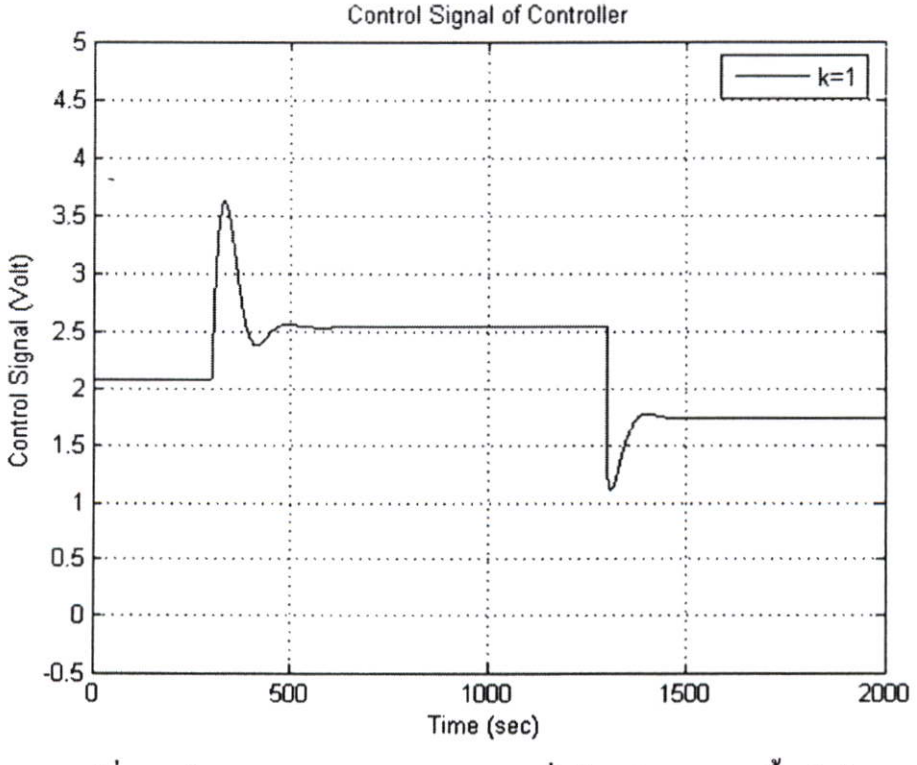
จากรูปผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดของระบบควบคุมกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน ดังรูปที่ 5.5 จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ออกแบบด้วยวิธี CRA นั้น สามารถควบคุมให้ ระบบสามารถติดตามอินพุตอ้างอิงที่เปลี่ยนจากระดับ 20% ไปยังระดับที่ 30% ได้ตามที่ต้องการ แม้ในสภาวะที่มีอินพุตรบกวน ก็ยังคงรักษาระดับให้กลับคงที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผลตอบสนองของระบบควบคุมจะมีค่าเวลาเข้าที่ตามต้องการคือ 127 วินาที และไม่มีค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัว โดยสมรรถนะของระบบควบคุมแสดงได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 สมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได

ค่าเวลาเข้าที่ t_s(sec)	เปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกิน P_o(%)
127	3.067



รูปที่ 5.5 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได



รูปที่ 5.6 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได

5.3.1.2 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ k เมื่อต้องการเปลี่ยนค่าเวลาเข้าที่ของผลตอบสนองของระบบควบคุม

จากการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธี CRA ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 นั้น สมรรถนะของระบบควบคุม สามารถปรับเปลี่ยนให้เป็นตามต้องการได้ ด้วยการปรับค่าพารามิเตอร์ k ดังนั้นจึงได้ศึกษาถึงผลกระทบของการปรับค่าพารามิเตอร์ k ที่มีต่อค่าเวลาเข้าที่ของผลตอบสนองของระบบควบคุม โดยในการศึกษานี้จะทำการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี ด้วยการปรับค่าพารามิเตอร์ k จาก 1 เป็น 1.2 และ 1.42 ตามลำดับ

จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะและพารามิเตอร์ k ที่มีต่อค่าคงที่เวลา τ ดังสมการที่ (5.11)

$$\tau = \frac{1}{k}\left(\frac{a_1}{a_0}\right) \quad \text{เมื่อ} \quad k = 1, 1.2, 1.42 \tag{5.11}$$

จะทำให้สัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะเปลี่ยนไปดังสมการที่ (5.12)

$$p(s) = a_3 s^3 + k a_2 s^2 + k^2 a_1 s + k^3 a_0 \quad \text{เมื่อ} \quad k = 1, 1.2, 1.42 \tag{5.12}$$

เทียบสัมประสิทธิ์สมการพหุนามคุณลักษณะในสมการที่ (5.12) กับ สัมประสิทธิ์สมการพหุนามคุณลักษณะในสมการที่ (5.8) แก้สมการเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี โดย

$$\frac{\tau}{k\alpha_1} = \left(\frac{121.0884857 + 0.36036K_d}{1 + 0.36036K_p}\right) \tag{5.13}$$

$$\frac{\tau}{k} = \frac{1 + 0.36036K_p}{0.36036K_i}$$

$$\frac{\tau}{k\alpha_1\alpha_2} = \frac{888.2794561}{121.0884857 + 0.36036K_d}$$

เมื่อ $k = 1, 1.2, 1.42$

จะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีดังต่อไปนี้

$$K_p_t = \frac{\alpha_1^{\,2}\alpha_2 k^2}{\tau^2 0.36036} \times 888.2794561 - \frac{1}{0.36036} \tag{5.14}$$

$$K_i_t = \frac{\alpha_1^{\,2}\alpha_2}{\tau^3} \times \frac{888.2794561k^3}{0.36036}$$

$$K_d_t = \left(\frac{888.2794561}{0.36036} \times \frac{\alpha_1\alpha_2 k}{\tau}\right) - \frac{104.0074047}{0.36036} - \frac{17.08108108}{0.36036}$$

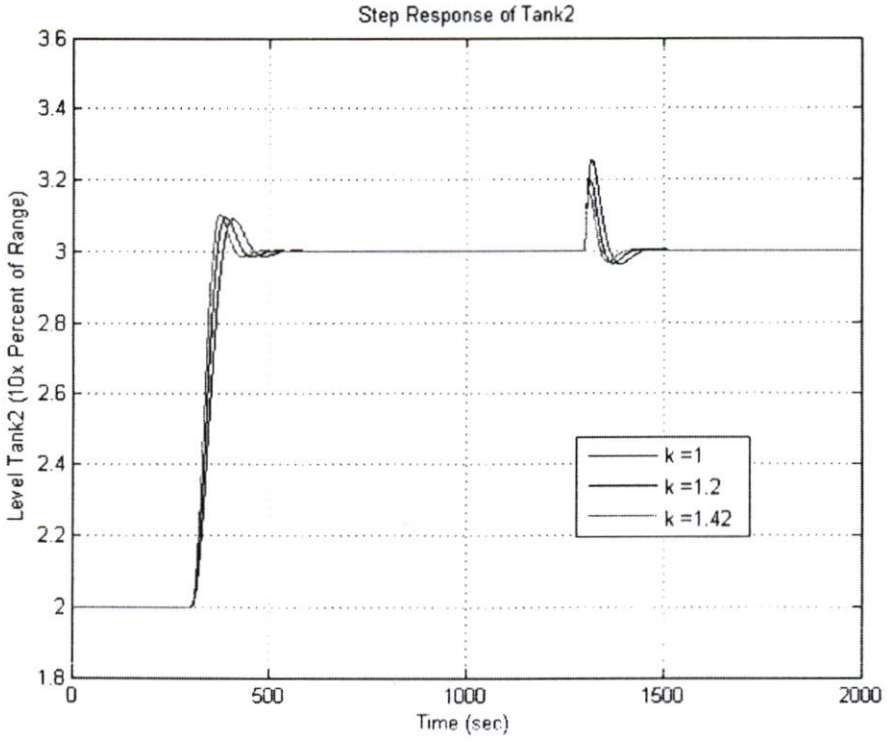
เมื่อ $k = 1, 1.2, 1.42$

จะได้ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดีดังตารางที่ 5.3

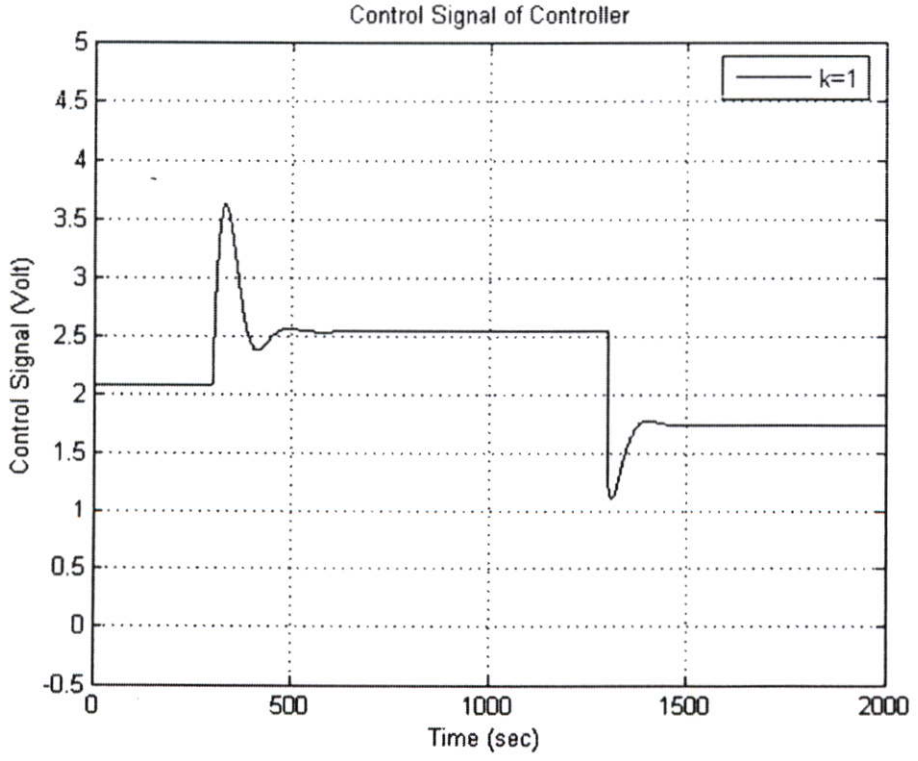
ตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดีเมื่อปรับค่า k เมื่อต้องการเปลี่ยนค่าเวลาเข้าที่ของผลตอบสนองของระบบควบคุม

PID Parameter	$k = 1$	$k = 1.2$	$k = 1.42$
Kp	4.10173	6.06431	8.63528
Ki	0.11151	0.19268	0.31928
Kd	35.0529	54.87691	76.68332

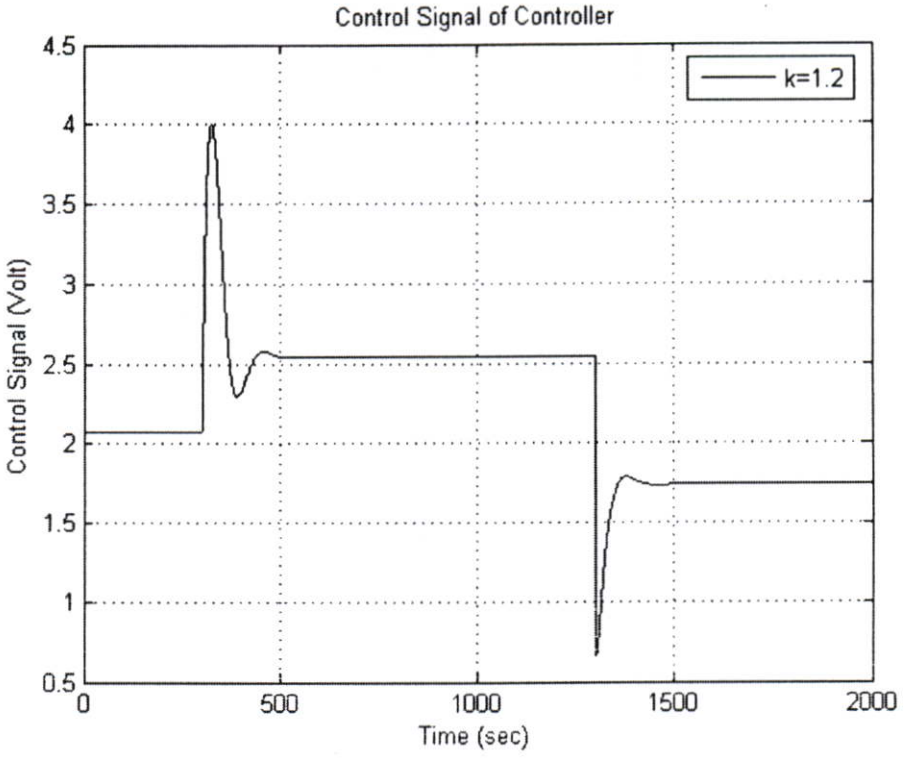
ผลตอบสนองของระบบควบคุมและสัญญาณควบคุมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.8 ถึง 5.10 ตามลำดับ



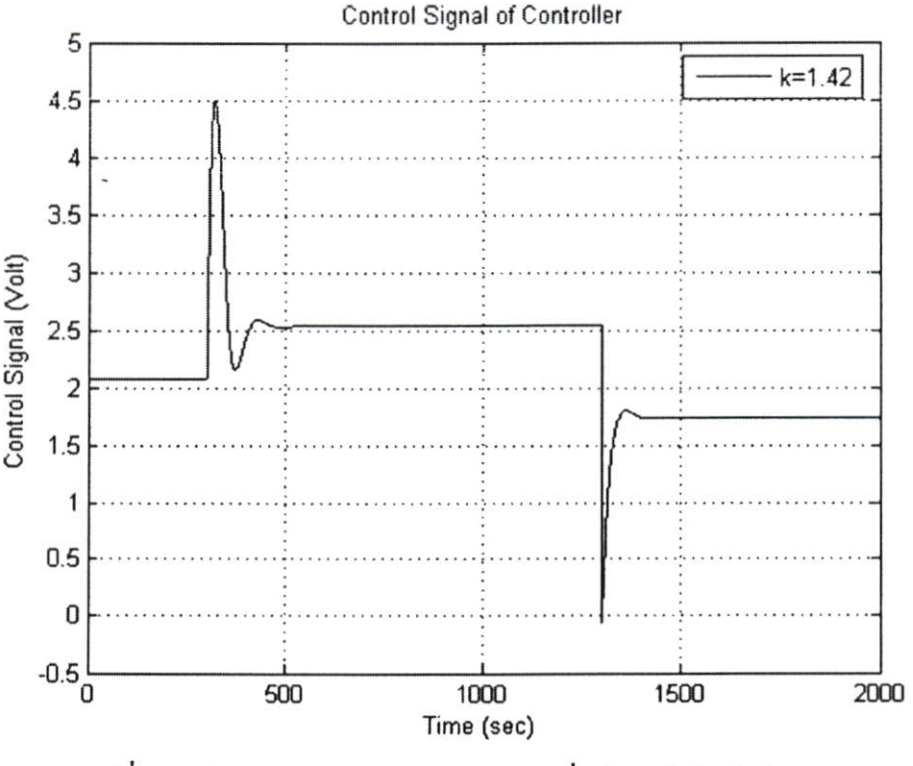
รูปที่ 5.7 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันได้เมื่อปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า k



รูปที่ 5.8 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า k มีค่าเท่ากับ 1



รูปที่ 5.9 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า k มีค่าเท่ากับ 1.2



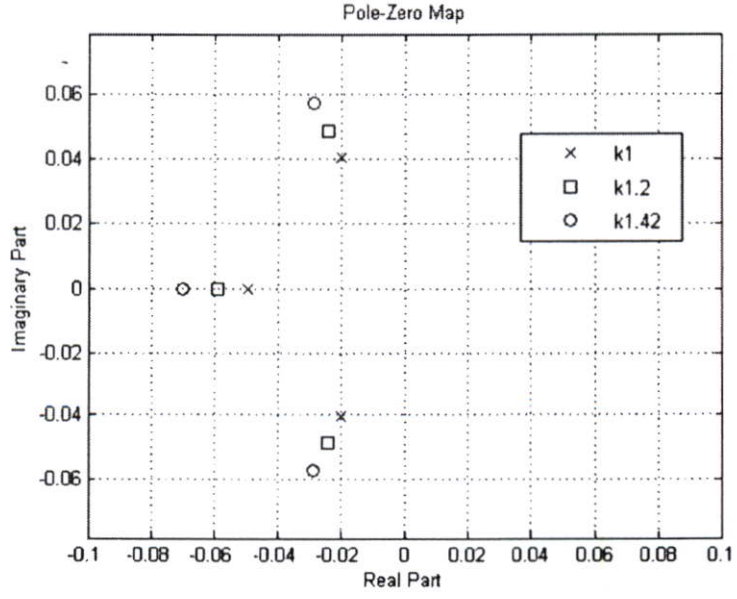
รูปที่ 5.10 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า k มีค่าเท่ากับ 1.42

จากรูปที่ 5.7 แสดงผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับค่า k จากรูปสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อปรับให้ค่า k เพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 1.2 และ 1.42 จะทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมเร็วขึ้นและมีค่าเวลาเข้าที่เป็น 107 วินาที และ 90.7 วินาทีตามลำดับ ในขณะที่ค่าพุ่งเกินและรูปทรงผลตอบสนองของระบบควบคุมยังเหมือนเดิม ในสภาวะที่มีอินพุตรบกวน ก็สามารถรักษาระดับให้กลับสู่ค่าเป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสมรรถนะของระบบควบคุมสามารถแสดงเปรียบเทียบกันได้ ดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า k เปลี่ยนแปลงไป

	Kd	Kp	Ki	*ts* (sec)	Po (%)
k = 1	35.0529	4.10173	0.11151	127	3.067
k = 1.2	54.87691	6.06431	0.19268	107	3.267
k = 1.42	76.68332	8.63528	0.31928	90.7	3.4

การปรับค่าพารามิเตอร์ k เป็นผลให้ความเร็วของผลตอบสนองของระบบควบคุมเปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 5.7 นั้น เป็นผลมาจาก ค่าตำแหน่งรากของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบควบคุมเลื่อนไปทางซ้ายของ s-Plane ในลักษณะมุมของรากไม่เปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 5.11 ซึ่งตำแหน่งของรากของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบควบคุมที่เปลี่ยนแปลงไปในลักษณะนี้ ทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมเร็วขึ้นโดยยังคงรูปทรงไว้ดังเดิม



รูปที่ 5.11 ตำแหน่งโพลวงปิดของระบบควบคุมเมื่อปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า k

5.3.1.3 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ k เมื่อต้องการเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินของผลตอบสนองของระบบควบคุม

จากการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธี CRA ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 นั้น สมรรถนะของระบบควบคุม สามารถปรับเปลี่ยนให้เป็นตามต้องการได้ ด้วยการปรับค่าพารามิเตอร์ k ดังนั้นจึงได้ศึกษาถึงผลกระทบของการปรับค่าพารามิเตอร์ k ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินของผลตอบสนองของระบบควบคุม โดยในการศึกษานี้จะทำการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี ด้วยการปรับค่าพารามิเตอร์ k จาก 1 เป็น 1.1 และ 1.3 ตามลำดับ

จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะและพารามิเตอร์ k ดังสมการที่ (5.15)

$$\alpha_1 = k\frac{a_1^2}{a_0 a_2},\ \alpha_2 = k\frac{a_2^2}{a_1 a_3},\ \ldots,\ \alpha_{n-1} = k\frac{a_{n-1}^2}{a_{n-2}a_n} \tag{5.15}$$

จะทำให้สัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะเปลี่ยนไปดังสมการที่ (5.16)

$$p(s) = a_3 s^3 + k^2 a_2 s^2 + k^3 a_1 s + k^3 a_0 \quad \text{เมื่อ} \quad k = 1, 1.1, 1.3 \tag{5.16}$$

เทียบสัมประสิทธิ์สมการพหุนามคุณลักษณะในสมการที่ (5.16) กับ สัมประสิทธิ์สมการพหุนามคุณลักษณะในสมการที่ (5.8) แก้สมการเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี โดย

$$\frac{\tau}{k\alpha_1} = \left(\frac{121.0884857 + 0.36036K_d}{1 + 0.36036K_p}\right) \tag{5.17}$$

$$\tau = \frac{1 + 0.36036K_p}{0.36036K_i}$$

$$\frac{\tau}{k^2\alpha_1\alpha_2} = \frac{888.2794561}{121.0884857 + 0.36036K_d}$$

เมื่อ $k = 1, 1.1, 1.3$

จะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีดังต่อไปนี้

$$K_{p_o} = \frac{\alpha_1{}^2\alpha_2 k^3}{\tau^2 0.36036} \times 888.2794561 - \frac{1}{0.36036} \tag{5.18}$$

$$K_i_o = \frac{\alpha_1^2 \alpha_2}{\tau^3} \times \frac{888.2794561k^3}{0.36036}$$

$$K_d_o = \left(\frac{888.2794561}{0.36036} \times \frac{\alpha_1 \alpha_2 k^2}{\tau} \right) - \frac{104.0074047}{0.36036} - \frac{17.08108108}{0.36036}$$

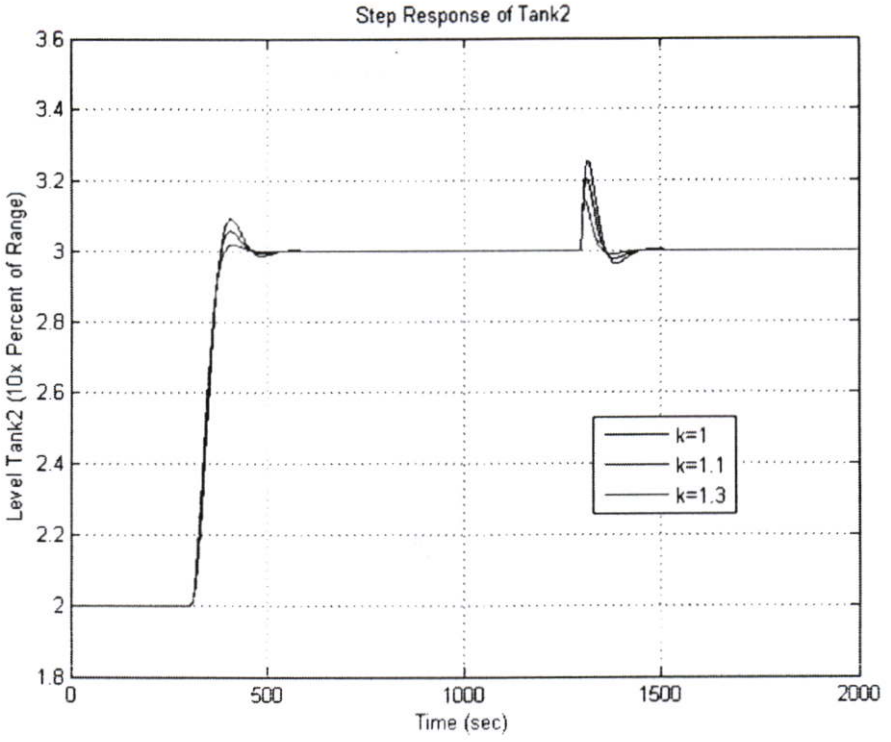
เมื่อ $k = 1, 1.1, 1.3$

ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดีแสดง ดังตารางที่ 5.5

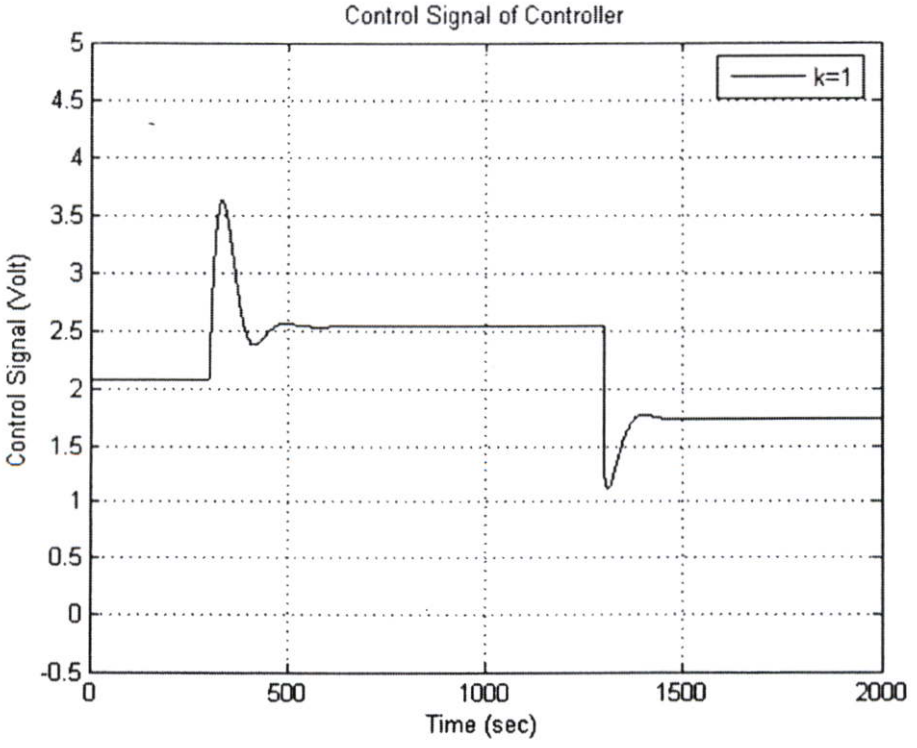
ตารางที่ 5.5 ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดีเมื่อปรับค่า k เมื่อต้องการปรับอัตราการหน่วงของผลตอบสนองของระบบควบคุม

PID Parameter	$k = 1$	$k = 1.1$	$k = 1.3$
Kp	4.10173	5.57812	9.44083
Ki	0.11151	0.14841	0.24498
Kd	35.0529	55.86811	103.44574

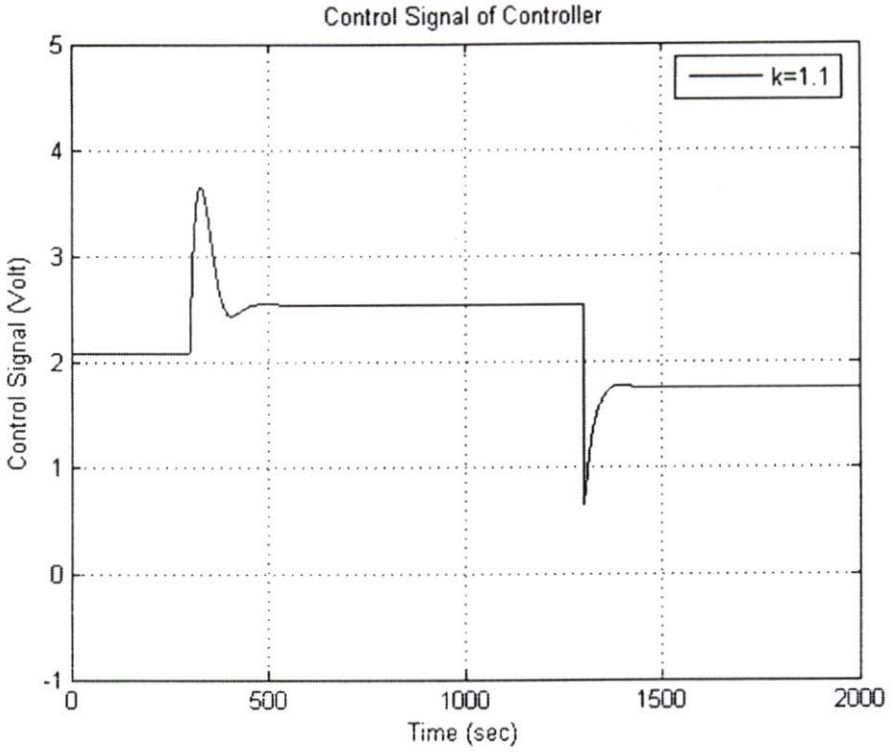
ผลตอบสนองของระบบควบคุมและสัญญาณควบคุมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.12 และรูปที่ 5.13 ถึง 5.15 ตามลำดับ



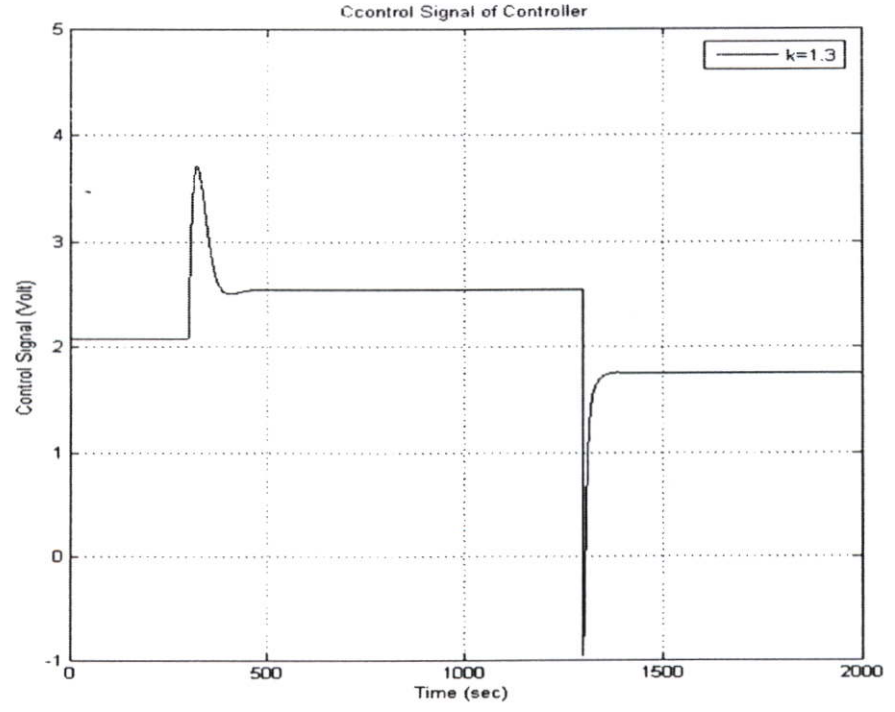
รูปที่ 5.12 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันได้เมื่อปรับอัตราการหน่วง ของระบบควบคุมโดยการปรับค่า k ไป



รูปที่ 5.13 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า k มีค่าเท่ากับ 1



รูปที่ 5.14 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า k มีค่าเท่ากับ 1.1



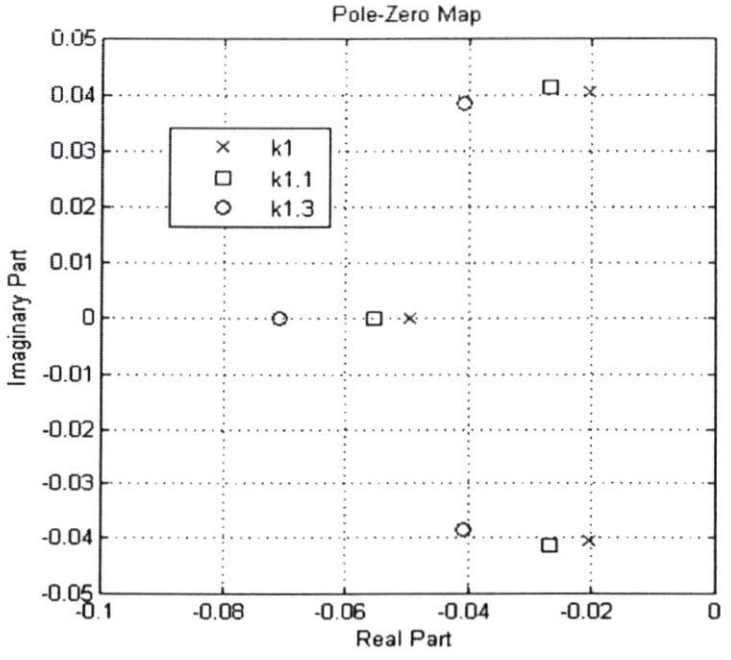
รูปที่ 5.15 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า k มีค่าเท่ากับ 1.3

จากรูปที่ 5.12 แสดงผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับค่า k จากรูปสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อปรับให้ค่า k เพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 1.1 และ 1.3 จะทำให้เปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินของผลตอบสนองของระบบควบคุมลดลงเป็น 1.9% และ 0.56% ตามลำดับในขณะที่ค่าเวลาเข้าที่ของผลตอบสนองของระบบควบคุมก็ลดลงอีกด้วย โดยสมรรถนะของระบบควบคุมสามารถแสดงเปรียบเทียบกันได้ดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า k เปลี่ยนแปลงไป

	Kd	Kp	Ki	*ts* (sec)	Po (%)
k = 1	35.0529	4.10173	0.11151	127	3.067
k = 1.1	55.86811	5.57812	0.14841	73.2	1.9
k = 1.3	103.44574	9.44083	0.24498	75.2	0.56

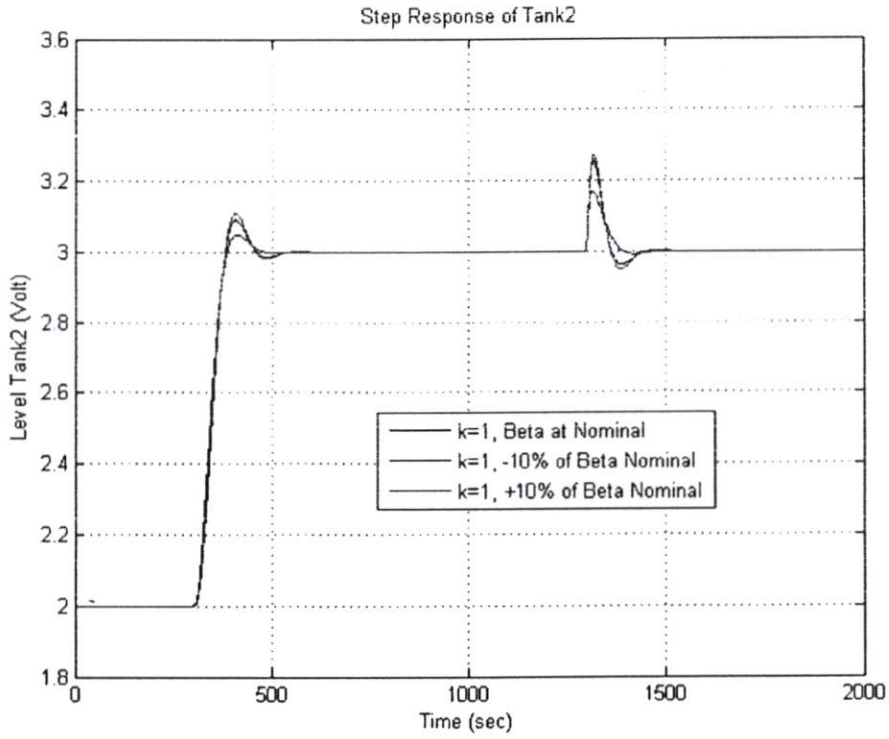
การปรับค่าพารามิเตอร์ k เป็นผลอัตราการหน่วงของผลตอบสนองของระบบควบคุมเพิ่มขึ้นทำให้ค่าพุ่งเกินของผลตอบสนองลดลงดังรูปที่ 5.12 นั้น เป็นผลมาจาก ค่าตำแหน่งรากของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบควบคุมที่เปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 5.16 โดยค่าตำแหน่งรากของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบควบคุมเลื่อนไปทางซ้ายของ s-Plane เป็นผลให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมเร็วขึ้น ค่า Cosine มุมของรากเพิ่มขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินลดลง



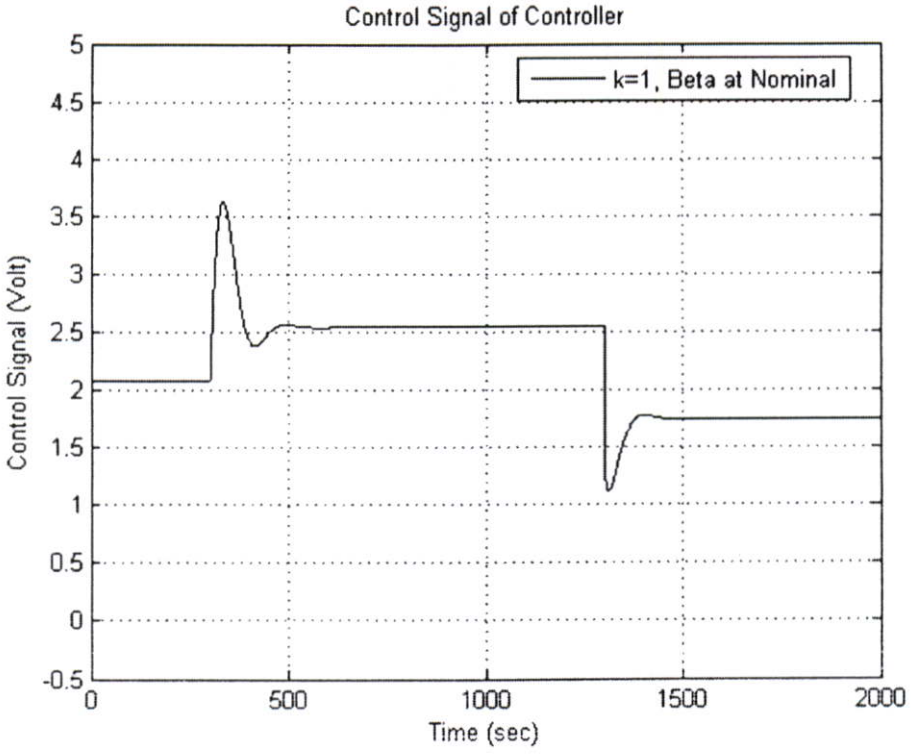
รูปที่ 5.16 ตำแหน่งโพลวงปิดของระบบควบคุมเมื่อปรับอัตราการหน่วงของระบบควบคุมโดยการปรับค่า k

5.3.1.4 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการ (β_2) เพื่อทดสอบความคงทนของระบบควบคุม

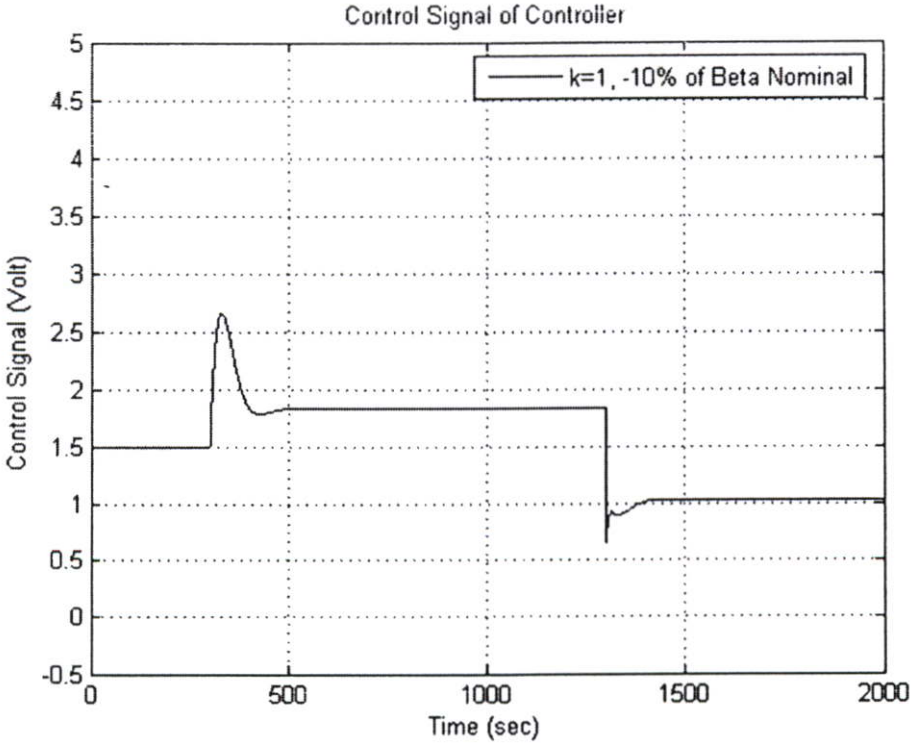
เพื่อทดสอบความคงทน ของระบบควบคุมจากการจำลอง สามารถทำได้โดยปรับค่า β_2 (ค่าตำแหน่งวาล์วที่ต่อทางด้านออกของถังที่ 2) ในแบบจำลองการทำงานของระบบควบคุมในโปรแกรม MATLAB โดยปรับเพิ่มขึ้น 10% และลดลง 10% ของค่าเดิม แล้วควบคุมกระบวนการด้วยค่าพีไอดีพารามิเตอร์ที่ k =1 คือ Kp = 4.10173, Ki = 0.11151, Kd = 35.0529 ผลตอบสนองของระบบควบคุมและสัญญาณควบคุมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.17 และรูปที่ 5.18 ถึง 5.20 ตามลำดับ



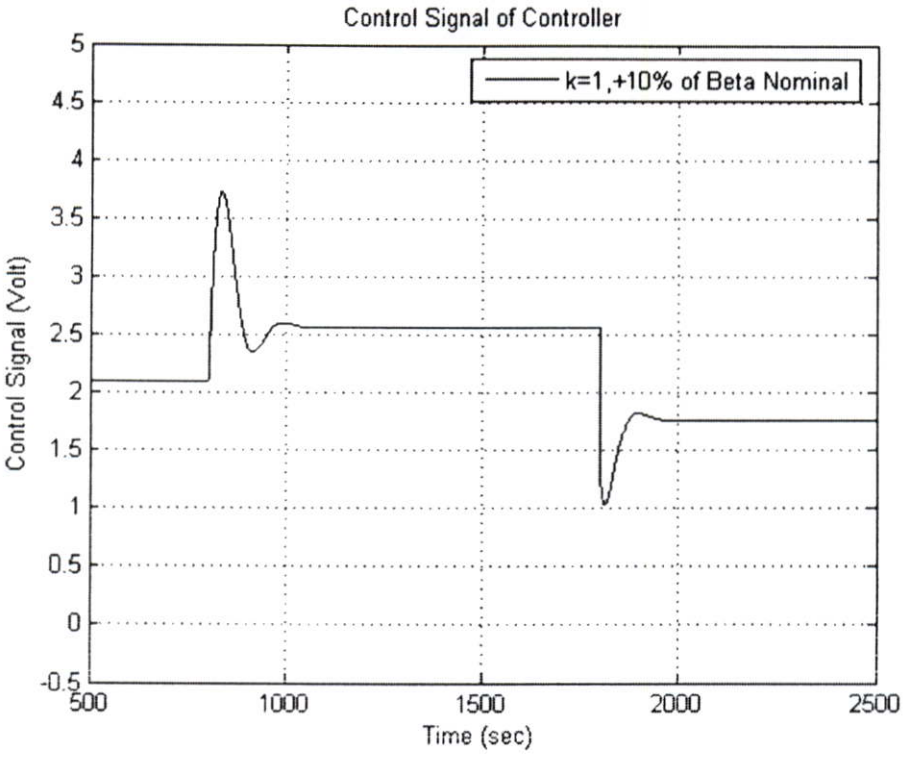
รูปที่ 5.17 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันได้เมื่อปรับพารามิเตอร์ของกระบวนการ



รูปที่ 5.18 สัญญาณควบคุมจากการจำลองที่ β_2 ณ Nominal



รูปที่ 5.19 สัญญาณควบคุมจากการจำลองที่ -10% ของ β_2 Nominal



รูปที่ 5.20 สัญญาณควบคุมจากการจำลองที่ +10% ของ β_2 Nominal

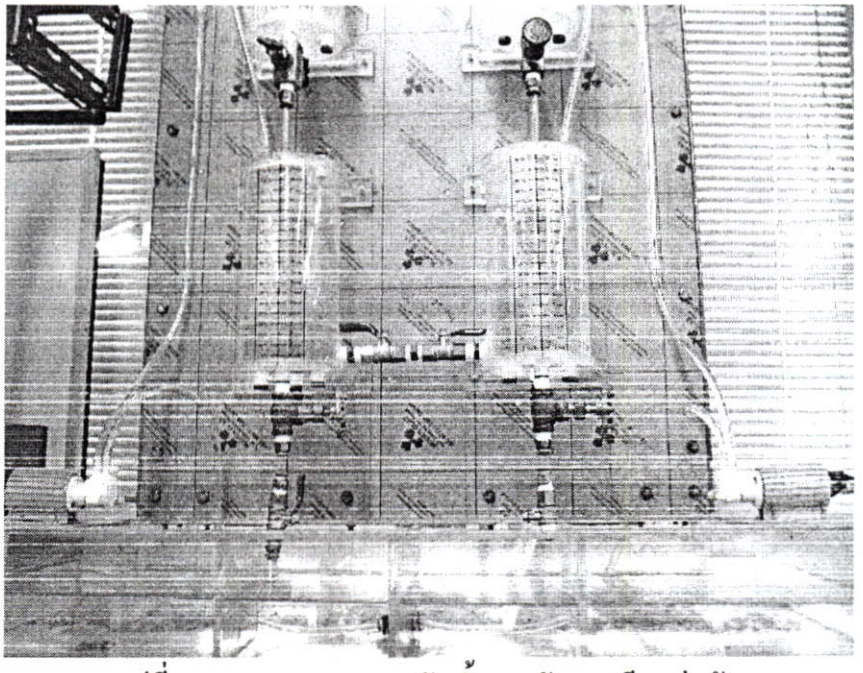
จากรูปที่ 5.17 แสดงผลตอบสนองของกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับค่า β_2 เพิ่มขึ้น 10% และลดลง 10% จากรูปสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อปรับให้ค่า β_2 เพิ่มขึ้น และลดลง 10% ตามลำดับ ด้วยพารามิเตอร์ของด้วยควบคุมพีไอดีเดิม ระบบควบคุมยังสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันได ไม่มีค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัว แม้ในสภาวะที่มีอินพุตรบกวน ก็ยังสามารถรักษาระดับให้กลับสู่ค่าเป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพ และ โดยสมรรถนะของระบบควบคุมสามารถแสดงเปรียบเทียบกันได้ดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 เปรียบเทียบความคงทนของระบบควบคุมจากการจำลองเมื่อค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการเปลี่ยนแปลงไป

	Kd	Kp	Ki	*ts* (sec)	Po (%)
β_2	35.0529	4.10173	0.11151	127	3.067
-10% β_2	35.0529	4.10173	0.11151	74.4	1.667
+10% β_2	35.0529	4.10173	0.11151	131.6	3.633

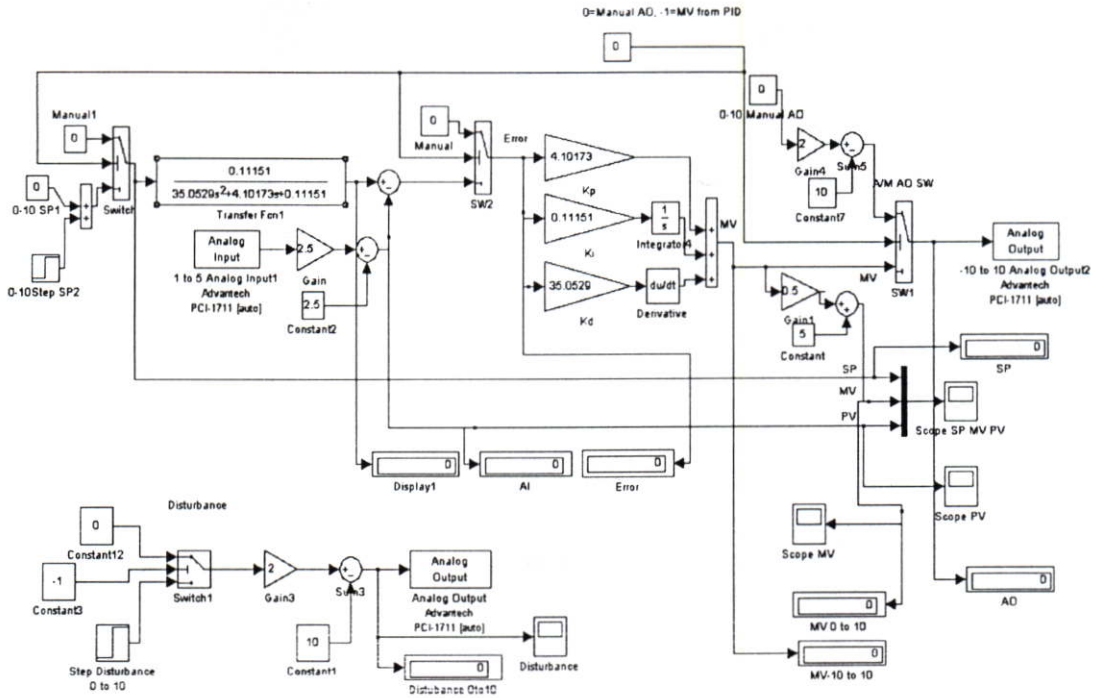
5.3.2 การทดลองกับกระบวนการจริง

หลังจากที่ได้ทำการจำลองการควบคุมกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน ด้วยตัวควบคุมพีไอดี ที่ออกแบบด้วยวิธี CRA แล้ว ต่อไปจะนำตัวควบคุมดังกล่าวที่ได้ออกแบบมาใช้ทำการควบคุมกับกระบวนการจริง โดยจะใช้โปรแกรม MATLAB ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมซึ่งใช้ค่าเวลาชักตัวอย่าง (Sampling Time) เท่ากับ 0.25 วินาที ภาพถ่ายของกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันแสดงดังรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.21 กระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน

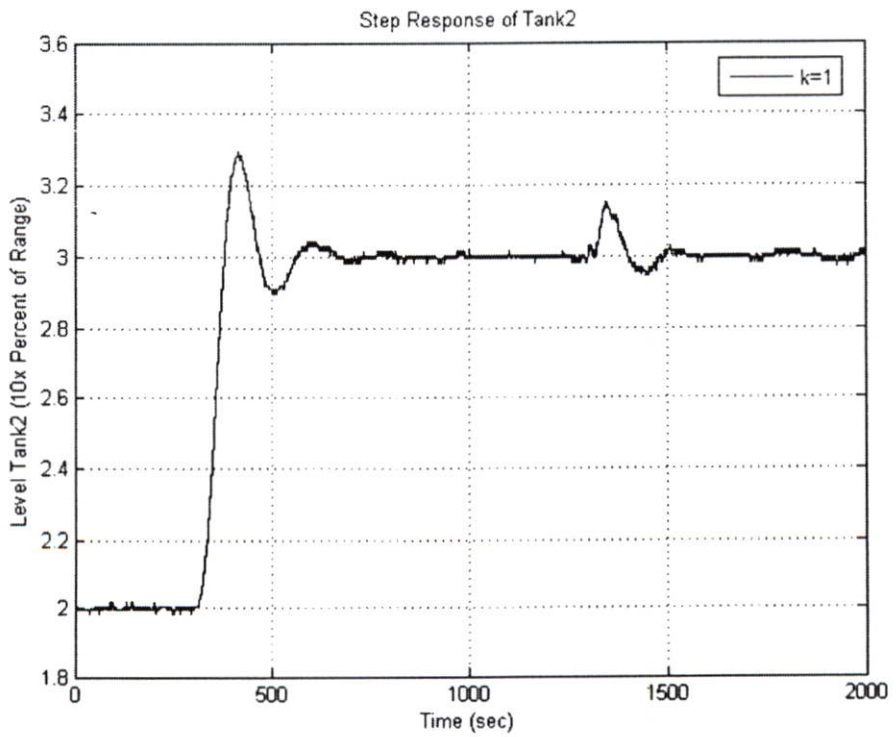
ในการทดลองการควบคุมกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน จะใช้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ขั้นตอนการทดลองและรูปแบบในการทดลองเช่นเดียวกันกับ การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB ที่ได้ทำการจำลองการทำงานในหัวข้อที่ 5.3.1 โปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในการทดลองกับกระบวนการจริง แสดงดังรูปที่ 5.22



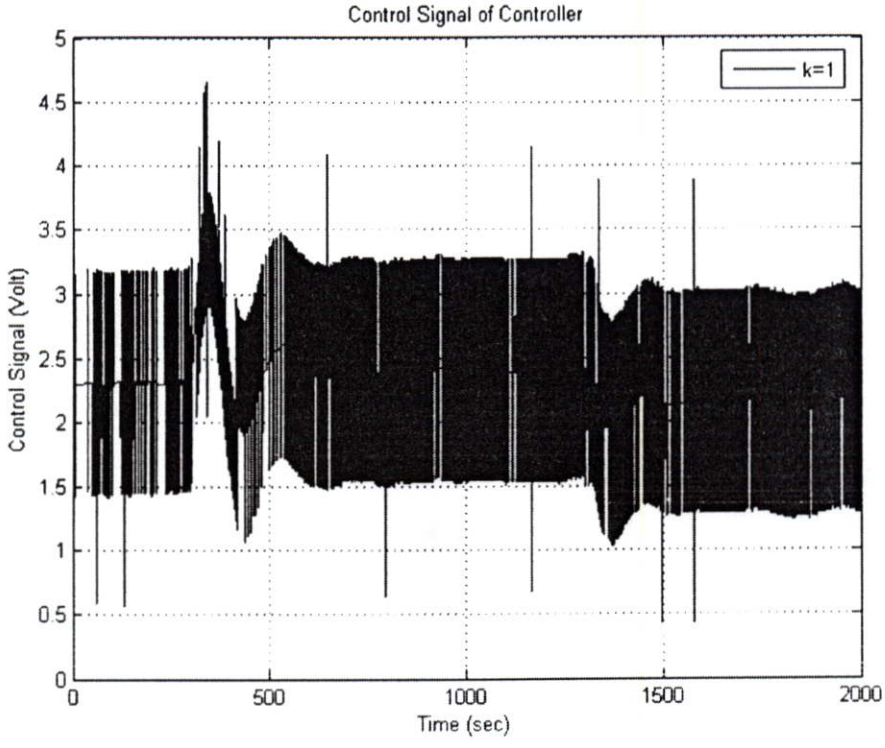
รูปที่ 5.22 โปรแกรม Simulink ที่ใช้ทดลองการทำงานของระบบควบคุม

5.3.2.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได

ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันไดแสดงดังรูปที่ 5.23 และสัญญาณควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.24



รูปที่ 5.23 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได



รูปที่ 5.24 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได

จากรูปที่ 5.24 จะสังเกตเห็นได้ว่าสัญญาณควบคุมในการทดลองกับกระบวนการจริงนั้นมีความไวต่อสัญญาณค่าผิดพลาดอินพุต อันเนื่องมาจากการทำงานของพจน์ Derivative ของตัวควบคุมพีไอดี แต่ยังคงมีทิศทางของสัญญาณไปในลักษณะเดียวกันกับ สัญญาณควบคุมในแบบจำลองที่แสดงดังรูปที่ 5.6

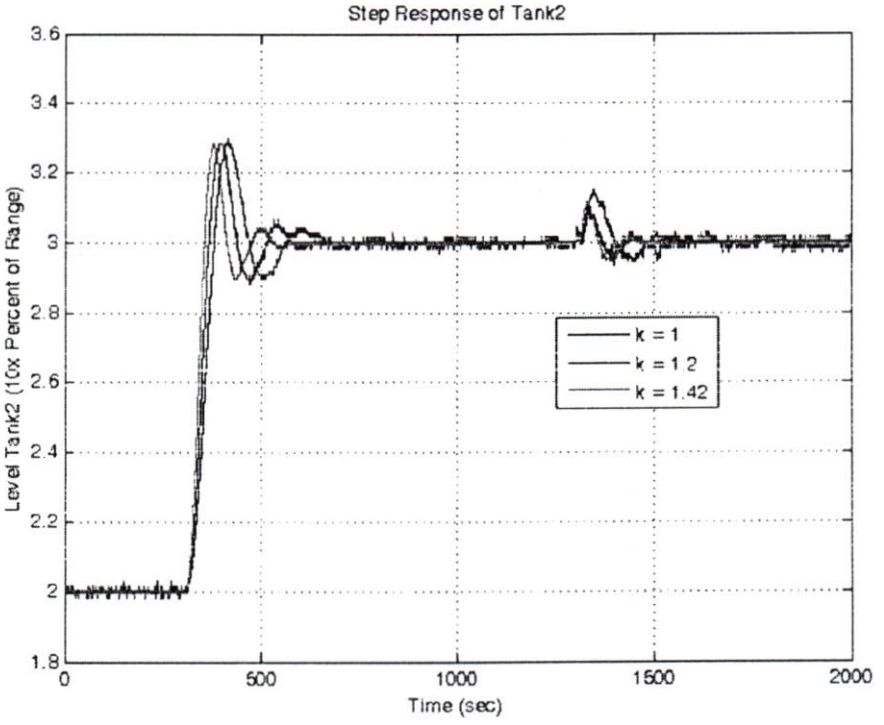
จากผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดของระบบควบคุมกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน ดังรูปที่ 5.23 จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี สามารถควบคุมให้ระดับน้ำเปลี่ยนจากระดับ 20% ไปยังระดับที่ 30% ได้ตามที่ต้องการ โดยผลตอบสนองของระบบควบคุมจะมีค่าเวลาเข้าที่ 236 วินาที ซึ่งจะช้ากว่าผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลอง ทั้งนี้เป็นไปตามผลการทดลองเทียบผลตอบสนองของกระบวนการจริงและแบบจำลองที่แสดงในหัวข้อที่ 5.2 และผลตอบสนองที่ได้จากการทดลองไม่มีค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัว ทั้งยังสามารถกลับสู่ค่าเป้าหมายแม้ในสภาวะที่มีอินพุตรบกวน โดยสมรรถนะของระบบควบคุมแสดงได้ดังตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 สมรรถนะของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันได

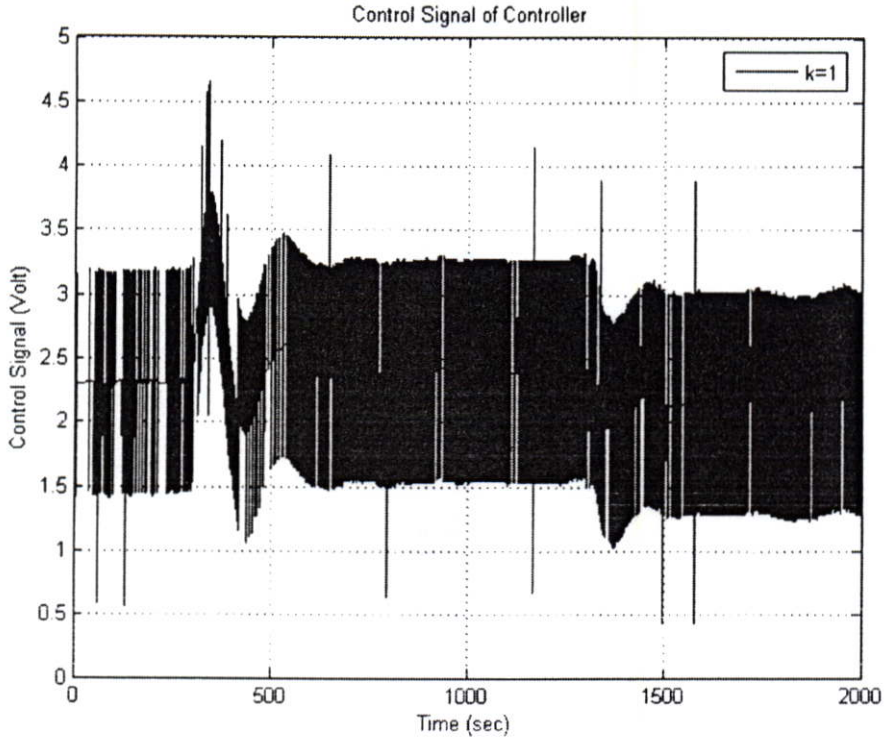
ค่าเวลาเข้าที่ t_s(sec)	เปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกิน P_o(%)
236	9.93

5.3.2.2 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ k เมื่อต้องการเปลี่ยนค่าเวลาเข้าที่ของผลตอบสนองของระบบควบคุม

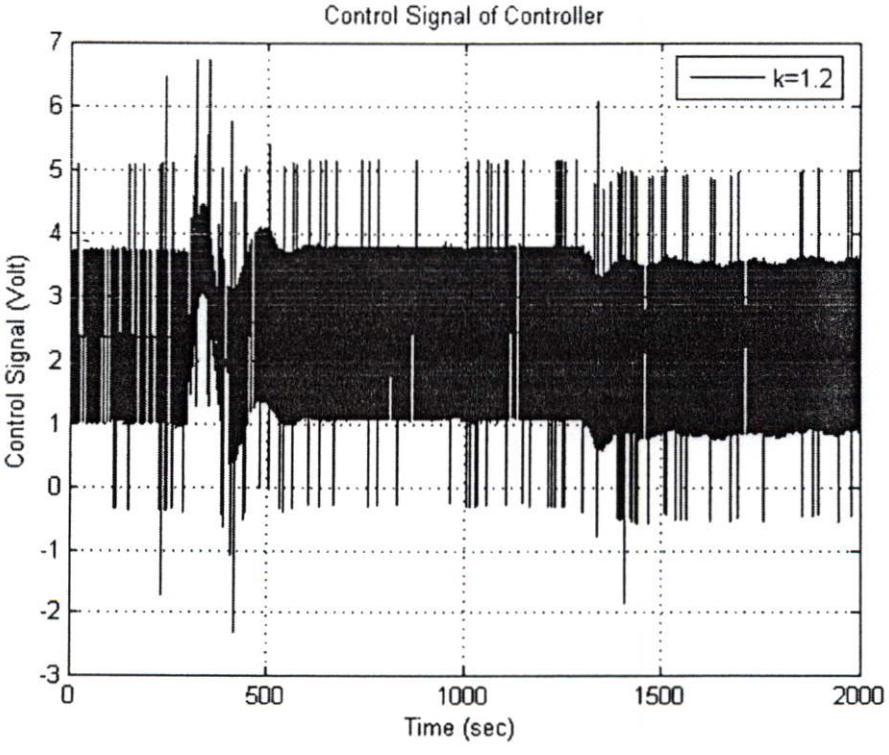
ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อนำตัวควบคุมพีไอดีที่ได้ทำการออกแบบ โดยปรับค่าพารามิเตอร์ k จาก 1 เป็น 1.2 และ 1.42 ตามลำดับ แสดงได้ดังรูปที่ 5.25 และสัญญาณควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.26 ถึง 5.28



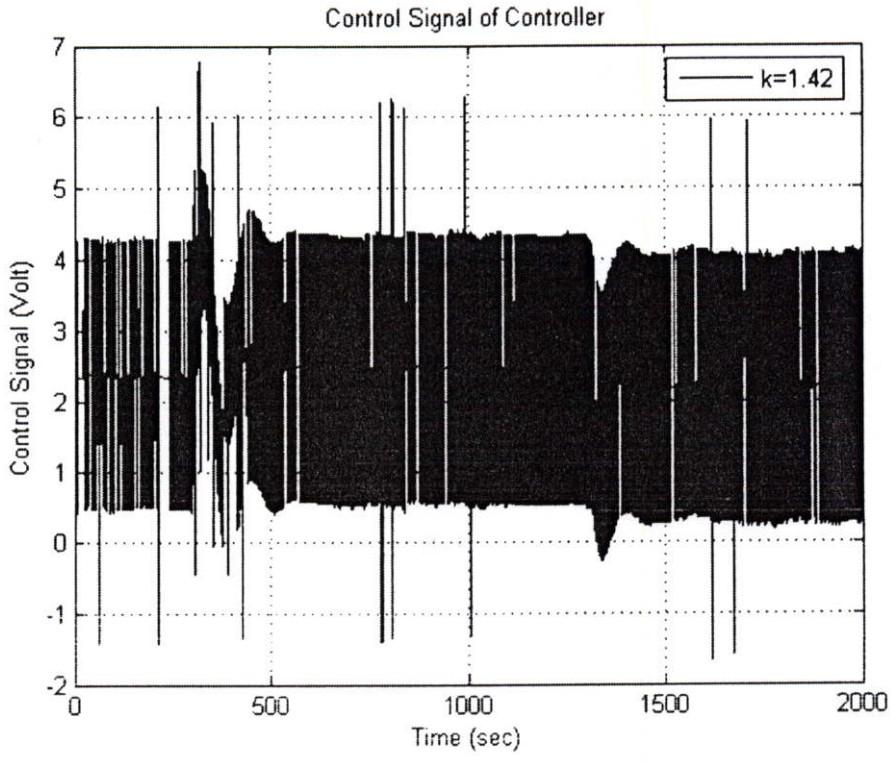
รูปที่ 5.25 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันได้เมื่อปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุมโดยการปรับค่า k



รูปที่ 5.26 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า k มีค่าเท่ากับ 1



รูปที่ 5.27 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า k มีค่าเท่ากับ 1.2



รูปที่ 5.28 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า k มีค่าเท่ากับ 1.42

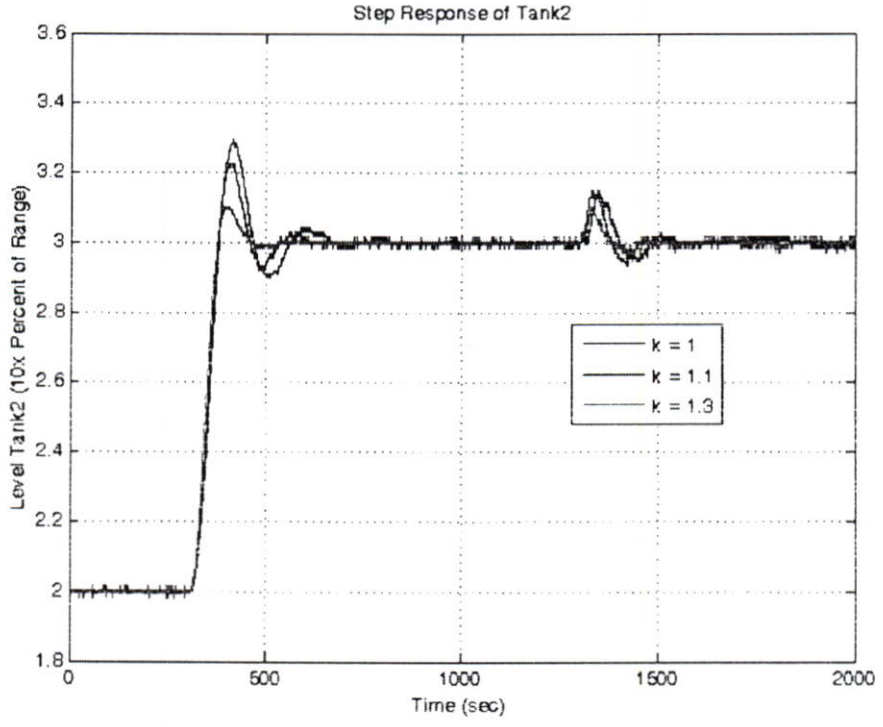
จากรูปที่ 5.25 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับค่า k เพื่อปรับความเร็วของผลตอบสนองของระบบควบคุม จากรูปสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อปรับให้ค่า k เพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 1.2 และ 1.42 จะทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมเร็วขึ้นและมีค่าเวลาเข้าที่เป็น 191.3 วินาที และ 153.3 วินาทีตามลำดับ ในขณะที่ค่าพุ่งเกินและรูปทรงผลตอบสนองของระบบควบคุมยังคงเดิม และ ในสภาวะที่มีอินพุตรบกวน ก็ยังสามารถรักษาระดับให้กลับสู่ค่าเป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสมรรถนะของระบบควบคุมสามารถแสดงเปรียบเทียบกันได้ดังตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อค่า k เปลี่ยนแปลงไป

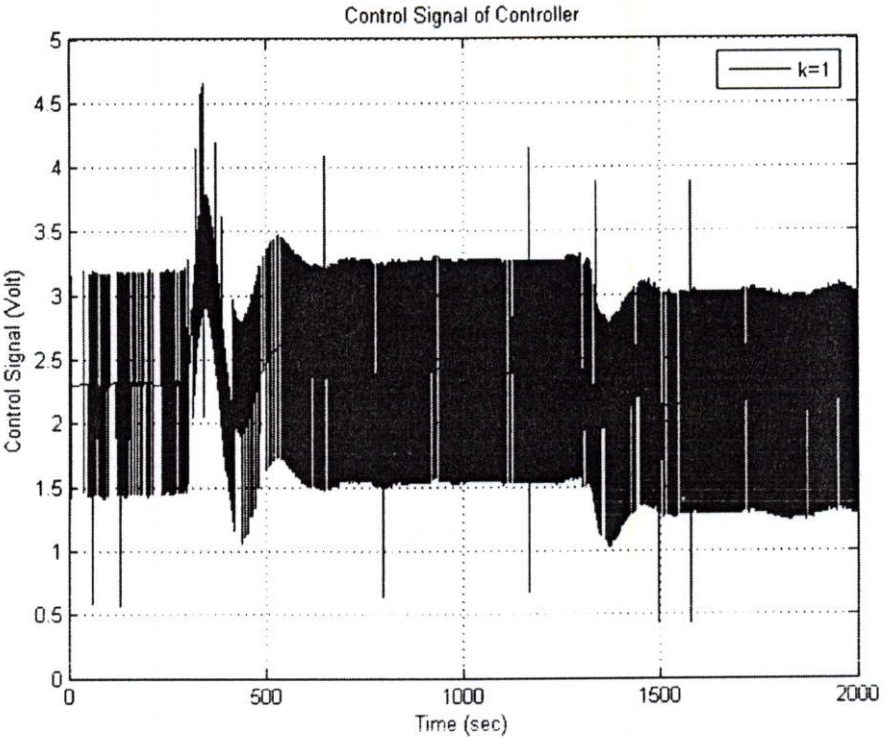
	Kd	Kp	Ki	*ts* (sec)	Po (%)
k = 1	35.0529	4.10173	0.11151	236	9.93
k = 1.2	54.87691	6.06431	0.19268	191.3	9.53
k = 1.42	76.68332	8.63528	0.31928	153.3	9.53

5.3.2.3 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ k เมื่อต้องการเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินของผลตอบสนองของระบบควบคุม

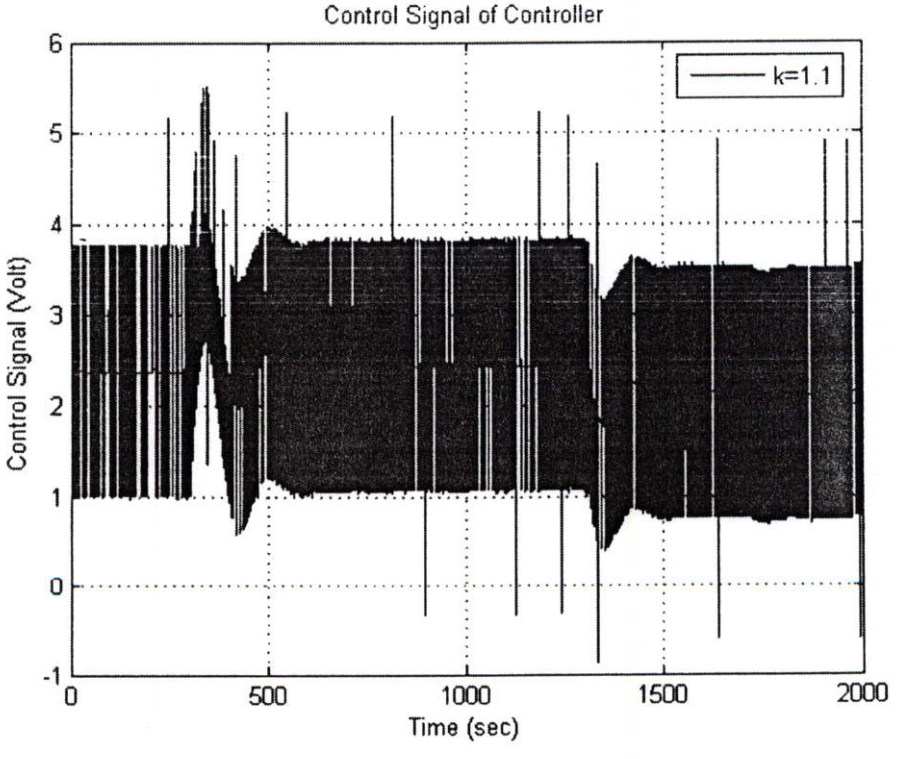
ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อนำตัวควบคุมพีไอดีที่ได้ทำการออกแบบ โดยปรับค่าพารามิเตอร์ k จาก 1 เป็น 1.1 และ 1.3 ตามลำดับ แสดงได้ดังรูปที่ 5.29 และสัญญาณควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.30 ถึง 5.32



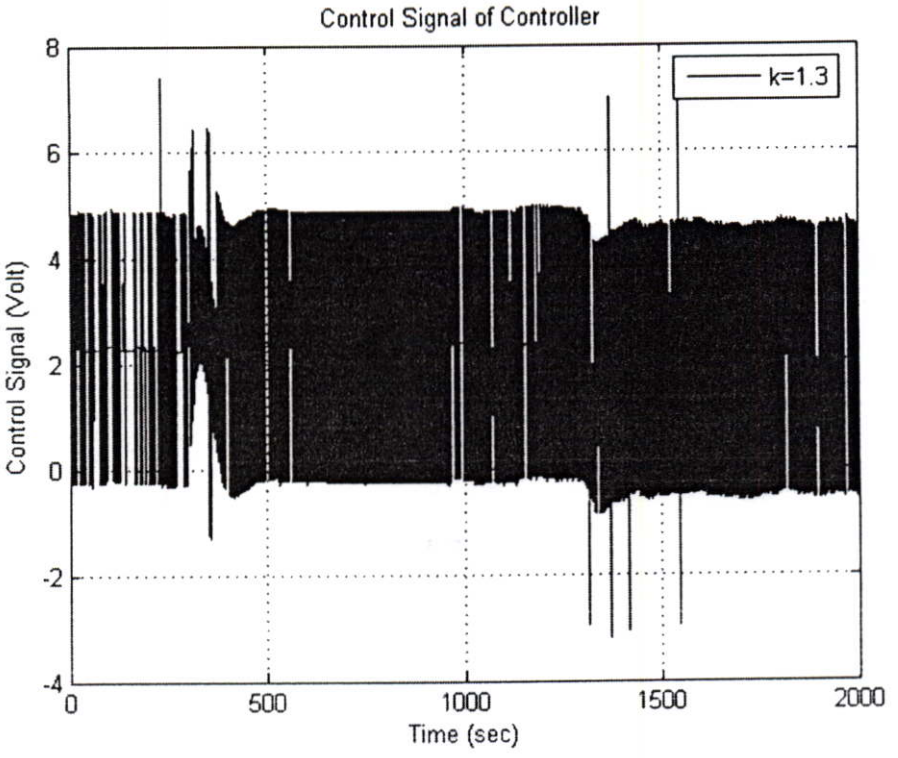
รูปที่ 5.29 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการจำลองต่อสัญญาณขั้นบันได้เมื่อปรับอัตราการหน่วง ของระบบควบคุมโดยการปรับค่า k



รูปที่ 5.30 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า k มีค่าเท่ากับ 1



รูปที่ 5.31 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า k มีค่าเท่ากับ 1.1



รูปที่ 5.32 สัญญาณควบคุมจากการจำลองเมื่อค่า k มีค่าเท่ากับ 1.3

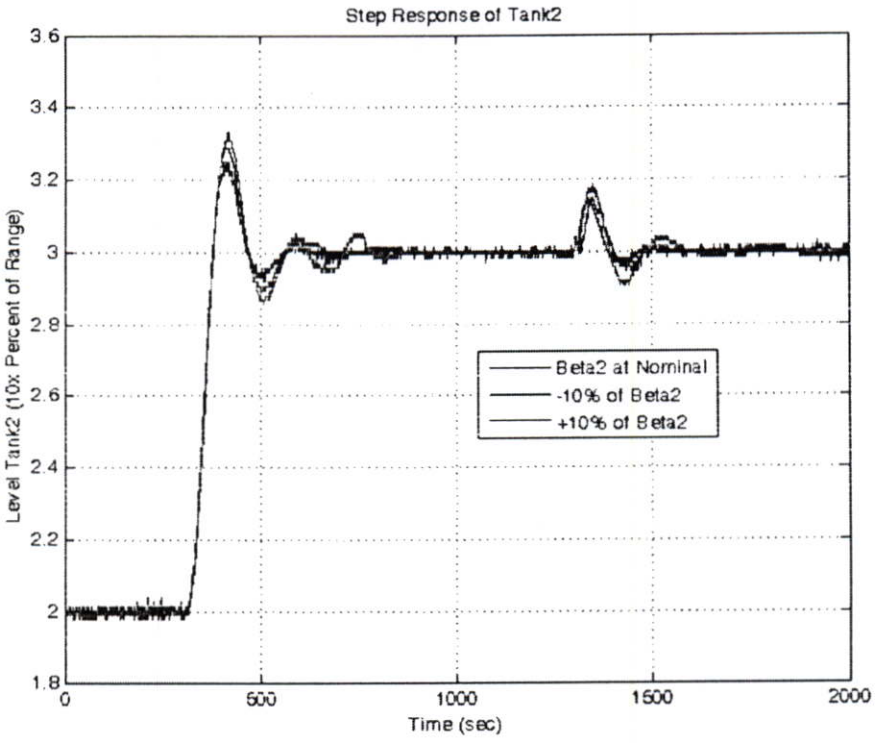
จากรูปที่ 5.29 แสดงผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับค่า k จากรูปสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อปรับให้ค่า k เพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 1.1 และ 1.3 ตามลำดับจะทำให้เปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินของผลตอบสนองของระบบควบคุมลดลงเป็น 7.5% และ 3.43% ตามลำดับและค่าเวลาเข้าที่ของผลตอบสนองของระบบควบคุมยังลดลงอีกด้วย โดยสมรรถนะของระบบควบคุมสามารถแสดงเปรียบเทียบกันได้ดังตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อค่า k เปลี่ยนแปลงไป

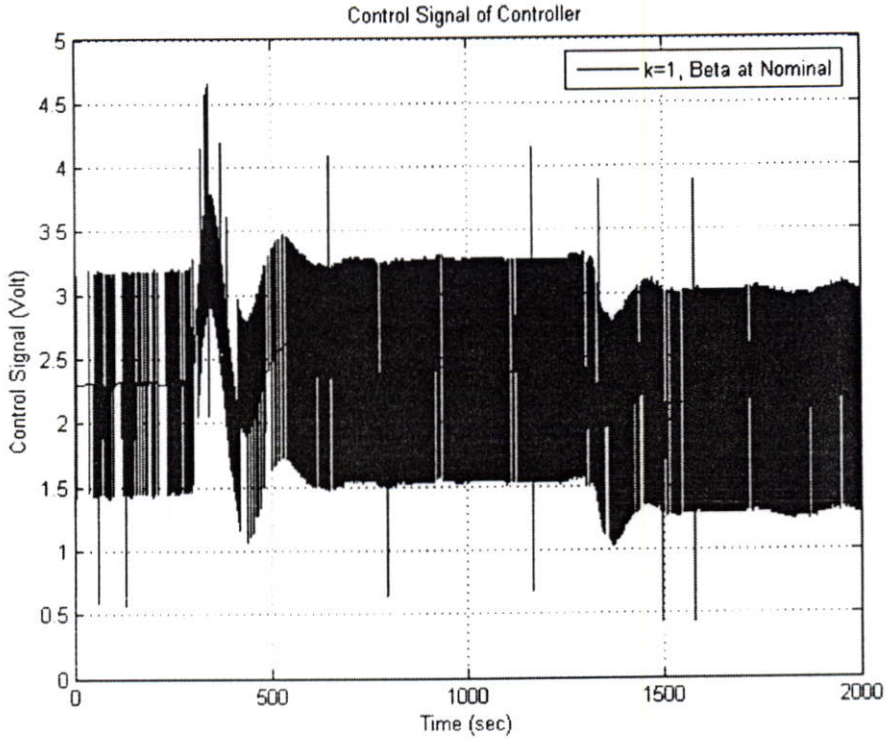
	Kd	Kp	Ki	*ts* (sec)	Po (%)
k = 1	35.0529	4.10173	0.11151	236	9.93
k = 1.1	55.86811	5.57812	0.14841	198.5	7.5
k = 1.3	103.44574	9.44083	0.24498	124.8	3.43

5.3.2.4 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการ (β_2) เพื่อทดสอบ Robustness ของระบบควบคุม

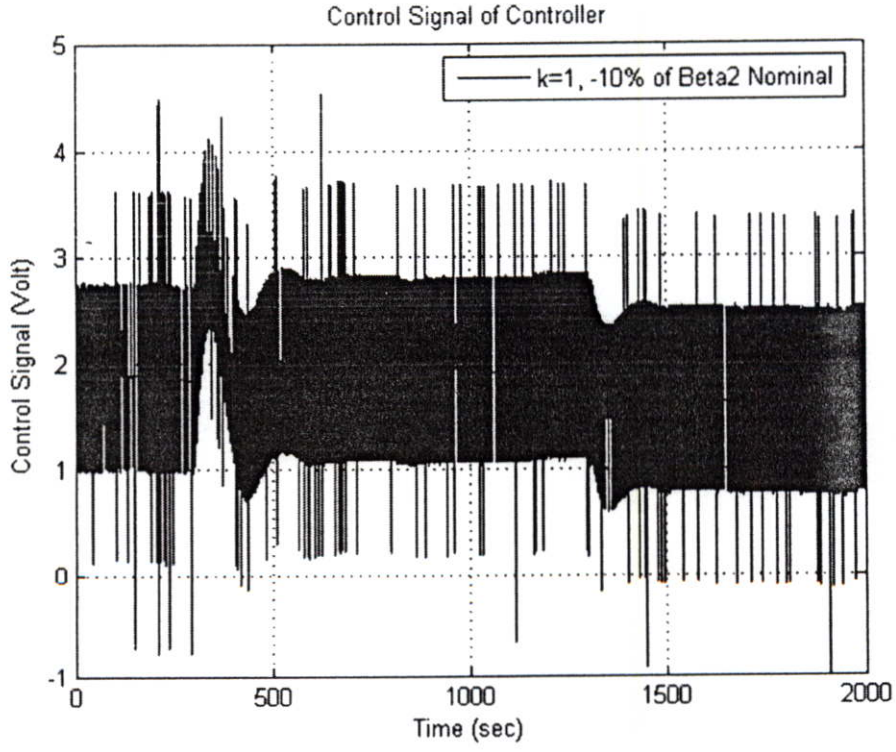
ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อหมุนวาล์วที่ต่อทางด้านออกของถังที่ 2 ในทิศทางทวนเข็มและตามเข็มนาฬิกา และทำการหาค่า β_2 โดยเลือกเก็บผลการทดลองที่ตำแหน่ง $\pm$10% ของค่า β_2 เดิม แล้วควบคุมกระบวนการด้วยค่าพีไอดีพารามิเตอร์ที่ k =1 คือ Kp = 4.10173, Ki = 0.11151, Kd = 35.0529 ผลตอบสนองของระบบควบคุมและสัญญาณควบคุมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.33 และรูปที่ 5.34 ถึง 5.36 ตามลำดับ



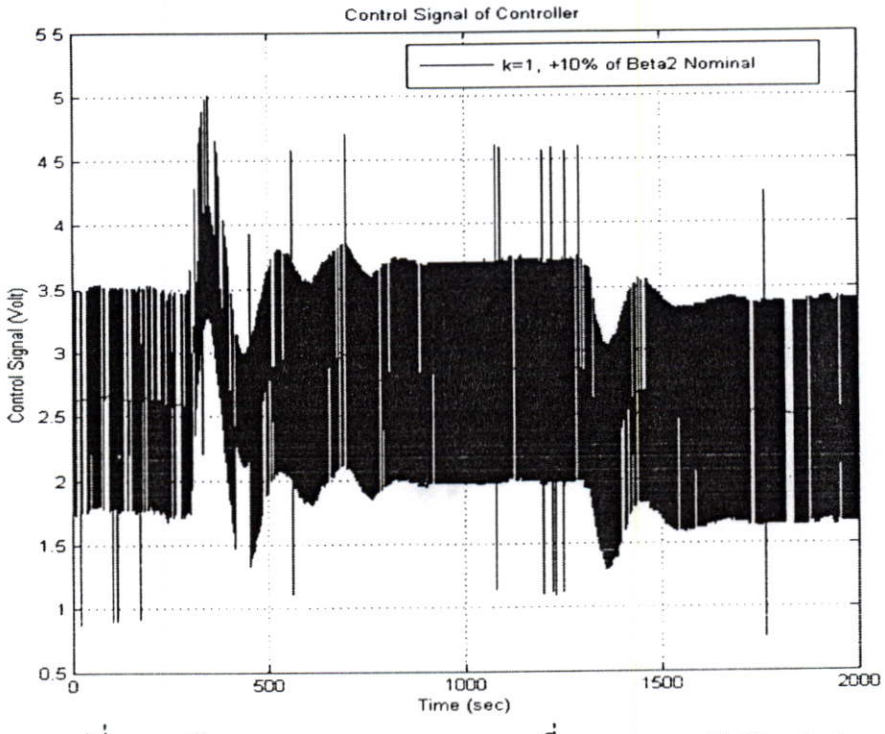
รูปที่ 5.33 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจากการทดลองต่อสัญญาณขั้นบันได้เมื่อปรับพารามิเตอร์ของกระบวนการ



รูปที่ 5.34 สัญญาณควบคุมจากการทดลองที่ β_2 ณ Nominal



รูปที่ 5.35 สัญญาณควบคุมจากการทดลองที่ -10% ของ β_2 Nominal



รูปที่ 5.36 สัญญาณควบคุมจากการทดลองที่ +10% ของ β_2 Nominal

จากรูปที่ 5.33 แสดงผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดเมื่อปรับค่า β_2 จากรูปสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อปรับให้ค่า β_2 เพิ่มขึ้น และลดลง 10% ตามลำดับ ด้วยพารามิเตอร์ของด้วยควบคุมพีไอดีเดิม ระบบควบคุมยังสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันได และสามารถเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้แม้ในสภาวะที่มีอินพุตรบกวน โดยสมรรถนะของระบบควบคุมสามารถแสดงเปรียบเทียบกันได้ดังตารางที่ โดยสมรรถนะของระบบควบคุมสามารถแสดงเปรียบเทียบกันได้ดังตารางที่ 5.11

ตารางที่5.11 เปรียบเทียบความคงทน ของระบบควบคุมจากการทดลองเมื่อค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการเปลี่ยนแปลงไป

	Kd	Kp	Ki	*ts* (sec)	Po (%)
β_2	35.0529	4.10173	0.11151	236	9.93
-10% β_2	35.0529	4.10173	0.11151	211	8.33
+10% β_2	35.0529	4.10173	0.11151	242	11.16

บทที่ 6
สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะสำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน ซึ่งโครงสร้างของระบบควบคุมเป็นแบบ 2 องศาอิสระ โดยเริ่มจากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นของกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน จากนั้นนำแบบจำลองแบบเชิงเส้นนี้ไปออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธี CRA เมื่อได้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี จึงนำไปจำลองการทำงานของระบบควบคุมด้วยโปรแกรม MATLAB และทดลองกับกระบวนการจริง

การจำลองการทำงานของระบบควบคุมด้วยโปรแกรม MATLAB และทดลองกับกระบวนการจริงมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้ ขั้นตอนแรกทำการทดสอบผลตอบสนองของระบบควบคุม เมื่อกำหนดให้อินพุตอ้างอิงของระบบควบคุมเป็นแบบขั้นบันได ขั้นตอนที่สองทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของการปรับค่าพารามิเตอร์ k ว่ามีผลอย่างไรต่อค่าเวลาไต่ของผลตอบสนองของระบบควบคุม ขั้นตอนที่สามทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของการปรับค่าพารามิเตอร์ k ว่ามีผลอย่างไรต่อเปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินของผลตอบสนองของระบบควบคุม ขั้นตอนที่สี่ทำการศึกษาถึงความคงทน ของระบบควบคุมเมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการ

ซึ่งหลังจากที่ได้ทำการศึกษาถึงผลจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB และทดลองกับกระบวนการจริงตามขั้นตอนดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นพบว่า เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดให้กับระบบควบคุมตัวควบคุมพีไอดี สามารถควบคุมระดับน้ำในถังที่ 2 ได้ตามต้องการ โดยมีค่าเวลาไต่ตามต้องการ, มีค่าพุ่งเกินเล็กน้อย, ไม่มีค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัว และระบบควบคุมยังสามารถรักษาระดับที่ต้องการควบคุมได้ แม้ระบบจะถูกกระทบด้วยสัญญาณรบกวน โดยสัญญาณควบคุมที่ใช้ในการทดลองกับกระบวนการจริงจะมีลักษณะที่มีความไวต่อสัญญาณค่าผิดพลาดอินพุต อันเนื่องมาจากการทำงานของพจน์ Derivative ของตัวควบคุมพีไอดี แต่ยังคงมีทิศทางของสัญญาณไปในลักษณะเดียวกันกับ สัญญาณควบคุมในแบบจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB ส่วนผลจากการทดลองในกรณีที่ออกแบบตัวควบคุมโดยทำการปรับค่าเวลาเข้าที่ พบว่าเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ k ให้มีค่ามากขึ้น จะทำให้ผลตอบสนองมีค่าเวลาเข้าที่ลดลง ส่วนผลจากการทดลองในกรณีที่ออกแบบตัวควบคุมโดยทำการปรับค่าอัตราการหน่วง พบว่าเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ k ให้มีค่ามากขึ้น ผลตอบสนองจะมีค่าพุ่งเกินลดลง และจากการทดลองทดสอบความคงทน ของระบบควบคุมเมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการ ด้วย

การหมุนวาล์วด้านรูออกของถัง 2 พบว่าระบบควบคุมยังคงสามารถติดตามอินพุทอ้างอิง และทนต่อสัญญาณรบกวน โดยการควบคุมด้วยพีไอดีพารามิเตอร์เดิม

6.2 ปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางในการแก้ปัญหา

ปัญหาที่พบในการทดลองนั้นพบว่ามีหลายปัญหาด้วยกัน สามารถอธิบายได้ดังนี้

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

2. ในการดูดน้ำของปั๊มน้ำนั้น บ่อยครั้งมักจะมีเศษผงตะกอน ถูกดูดเข้าไป ทำให้เกิดการอุดตันในตัวปั๊มน้ำและเป็นสาเหตุให้อัตราการไหลของปั๊มน้ำลดลง แนวทางในการแก้ปัญหาคือใช้อุปกรณ์ กรองน้ำเพื่อกั้นไม่ให้เศษผงตะกอนสามารถไหลเข้าไปยังปั๊มได้

3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการขับกระแสของปั๊มน้ำนั้นเมื่อใช้เวลาทดลองนานๆ จะเกิดความร้อนสะสมที่ตัวไอซีมาก ถึงแม้จะมีตัวระบายความร้อนติดอยู่ที่ตัวไอซีก็ตาม ทำให้การขับกระแสของปั๊มน้ำนั้นไม่สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ แรงดันและกระแสที่เข้าสู่ปั๊มน้ำจะลดลง แม้ว่าแรงดันที่จ่ายให้กับอุปกรณ์ขับกระแสจะคงที่ จึงเป็นสาเหตุให้อัตราการไหลของปั๊มน้ำลดลง แนวทางการแก้ไขปัญหาคือ ใช้ไอซีที่สามารถทนกระแสได้สูงมากขึ้น หรือเปลี่ยนตัวระบายความร้อนให้มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น

4. การทดลองติดต่อกันเป็นเวลานาน มีผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของปั๊มน้ำต่ำลงเป็นผลให้ อัตราการไหลเข้าของน้ำลดลงอันเนื่องมาจากค่ากำลังของปั๊มตกลงนั้นเอง แนวทางแก้ไขคือ ควรออกแบบการทดลองและการเก็บผลให้ใช้ระยะเวลาเหมาะสมกับความสามารถของตัวอุปกรณ์

6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะสำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน จากผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB และผลการทดลองกับกระบวนการจริงดังแสดงในบทที่ 4 ได้แสดงให้เห็นว่าการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CRA นั้น จะใช้พารามิเตอร์เพียงตัวเดียว ในการปรับปรุงผลตอบสนองทางเวลาของระบบควบคุมเพื่อให้ได้ตามที่ต้องการ จึงทำให้สะดวกและง่ายต่อการปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

วิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์เป็นการนำทฤษฎีการกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะมาพิสูจน์และแสดงให้เห็นจริงในการปรับปรุงสมรรถนะของระบบควบคุม โดยเลือกกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน ซึ่งเป็นระบบควบคุมแบบ 1 อินพุต 1 เอาท์พุต เป็นกรณีศึกษา ยังเป็นที่น่าสนใจศึกษาต่อไป หากนำวิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะไปทดสอบกับกระบวนการที่มีอันดับสูงขึ้นไป หรือมีหลายอินพุตหลายเอาท์พุต

บรรณานุกรม

[1] S. Jayasuriya and J.W. Song. 1990, **On the Synthesis of Compensators for Non Overshooting Step Response.** Proceedings American Control Conference. : 683-684

[2] 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

[3] 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

[4] P. Naslin 1969. **Essentials of optimal control**, London Boston Technical Publishers Inc, Cambridge, MA, pp. 30-51

[5] 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

[6] J. Lo, **"An Algebaric Approach to Control System Design**," Master Thesis, Department of Applied Science, University of Waterloo, Waterloo Canada, 1996.

[7] Katsuhiko Ogata, **Modern Control Engineering**, Third Edition, University Of Minnesota, Prentice Hall Internationnal, Inc. 1997

[8] 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.

[9] Ko, C.C.; Chen, B.M.; Jianping Chen; Zhuang, Y.; Chen Tan, K., **"Development of a web-based laboratory for control experiments on a coupled tank apparatus"**, IEEE Transactions on Volume 44, Issue 1, Feb 2001 Page(s):76 – 86

[10] Wojciech Grega, **"Minimum-Time Liquid Level Control"**, Institute of Automatics Technical University of Mining and Metallurgy, Poland

[11] W.Grega, **"Modelling and Control of a Tank System"**, Proc. Of the 12th IASTED Int. Conf., Acta Press, Zurich, 1993, s.175-178

[12] Remy Irawan, Melvyn Ooi, Gabriel Yeung, Erik Weyer, Dragan Nesic, Iven Mareels, **" A Virtual Laboratory Experience Based On A Double Tank Apparatus"** Proceedinds of the 40th IEEE Conference on Decision and Control Orlando, Florida USA, December 2001

[13] 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.

[14] Anderson , B. D. O.., and J. B. Moore, **"Linear Optimal Control"**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1971.

[15] Brogan, W.L., **"Modern Control Theory"**. Upper Saddle River, NJ: Pentice Hall, 1985.

[16] Cannon, R., **"Dynamics of physical Systems"**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1967.

[17] Cunningham, W J., **"Introduction to Nonlinear Analysis"**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1958.

[18] Dorf, R. C., and R. H. Bishop, **"Modern Control Systems"**, 9th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001.

[19] Evans, W. R., **"The Use of Zeros and Poles for Frequency Response or Transient Response,"** ASME Trans. 76(1954),pp.1135-44.

[20] Friedland, B., **"Control System Design"**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1986.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

รายละเอียดของอุปกรณ์และวงจรที่ใช้ในการทดลอง

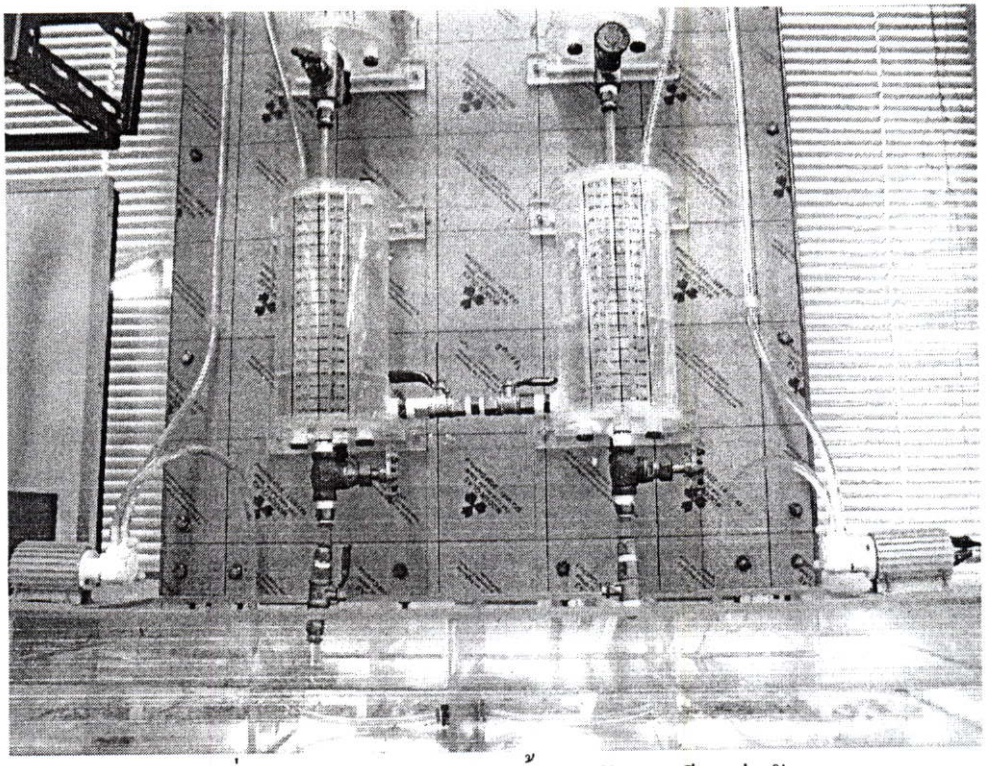
ในการควบคุมการทำงานของกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันเพื่อให้สามารถทำงานได้ตามที่ต้องการนั้นต้องใช้อุปกรณ์ต่างๆมาประกอบเข้าด้วยกัน ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนั้นสามารถแบ่งเป็น 8 ส่วนด้วยกัน ซึ่งประกอบด้วย

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

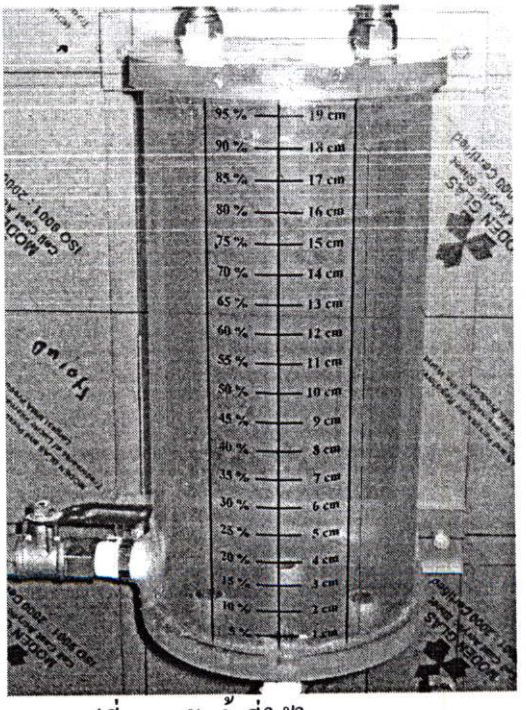
โดยรายละเอียดของอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองนั้นสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

ก.1 กระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน

กระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันจะประกอบไปด้วยถังน้ำ 2 ใบด้วยกัน แสดงได้ดังรูปที่ ก.1 ถังน้ำแต่ละใบจะมีขนาดเพื้นที่หน้าตัด 66.25 cm^2 และสูง 18.5 เซนติเมตร แสดงได้ดังรูปที่ ก.2 โดยถังใบที่ 2 จะมีวาล์วที่ใช้ในการปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำด้านออกจากถัง แสดงได้ดังรูปที่ ก.3 น้ำที่ไหลเข้าสู่ถังน้ำแต่ละใบนั้นจะถูกปั๊มขึ้นมาจากบ่อเก็บน้ำด้านล่าง ซึ่งบ่อเก็บน้ำจะมีขนาดความจุเท่ากับ 40 x 80 x 10 เซนติเมตร โดยปั๊มน้ำทางด้านขวานั้นจะถูกใช้เพื่อจ่ายน้ำให้ถังใบที่ 1 ซึ่งอยู่ทางด้านขวามือ และน้ำจะถูกจ่ายไปยังถังใบที่ 2 ซึ่งอยู่ทางด้านซ้ายมือ โดยผ่านวาล์วที่ใช้ในการปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำด้านออกจากถังที่ 1 ไปยังถังที่ 2 แสดงดังรูป ก.4 สายยางที่ใช่ต่อกับปั๊มน้ำนั้นจะเป็นสายยางอ่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 8 มิลลิเมตร



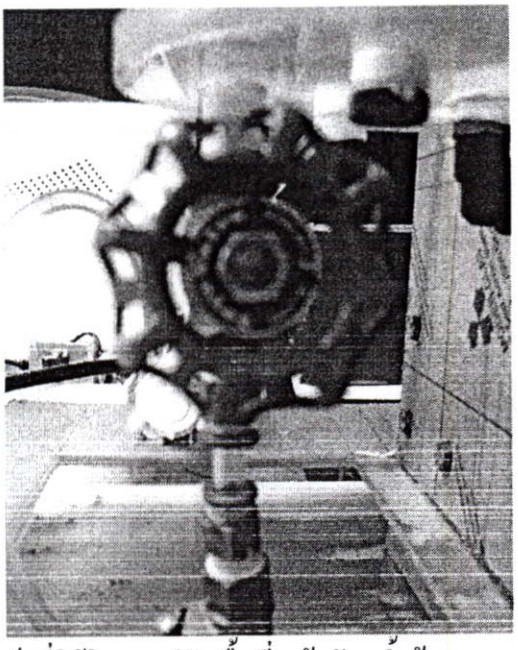
รูปที่ ก.1 กระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน



รูปที่ ก.2 ถังน้ำที่ใช้ในการทดลอง

ก.1.1 วาล์วปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำด้านออก

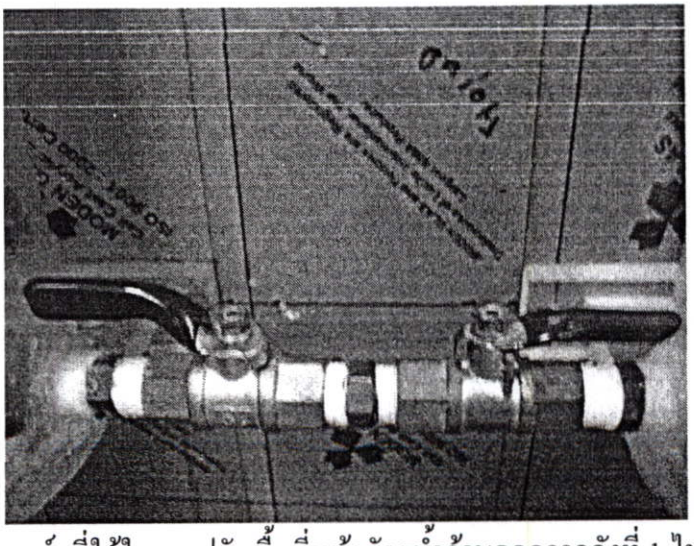
วาล์วที่ใช้ในการปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำทางด้านออกของถังใบที่ 2 แสดงได้ดังรูป ก. 3



รูปที่ ก.3 วาล์วที่ใช้ในการปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำด้านออกจากถังใบที่ 2

ก.1.2 วาล์วที่ใช้ในการปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำด้านออกจากถังที่ 1 ไปยังถังที่ 2

วาล์วที่ใช้ในการปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำทางด้านออกจากถังที่ 1 ไปยังถังที่ 2 แสดงได้ดังรูป ก. 4



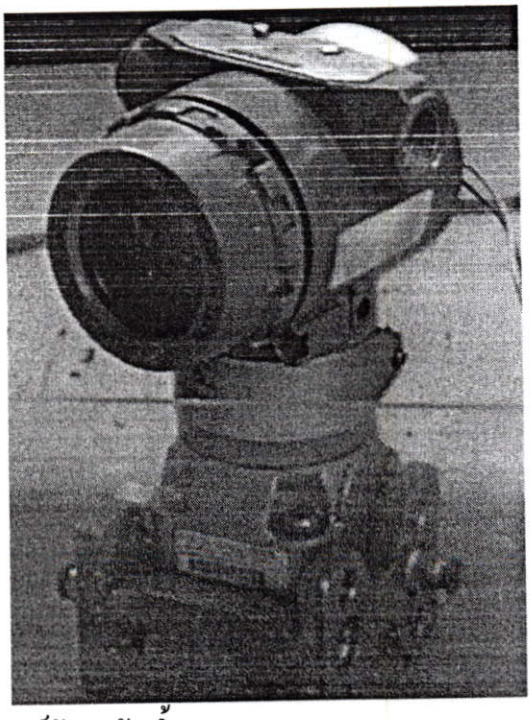
รูปที่ ก. 4 วาล์วที่ใช้ในการปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำด้านออกจากถังที่ 1 ไปยังถังที่ 2

ก.1.3 อุปกรณ์วัดระดับน้ำ (Differential Pressure Transmitter)

อุปกรณ์ที่ใช้วัดระดับน้ำที่เลือกใช้สำหรับกระบวนการนี้จะเลือกใช้ อุปกรณ์วัดแรงดันแบบความดันแตกต่าง (Differential Pressure Transmitter) ของ Rosemount รุ่น 3051CD Range 0-250 inH2O ค่าความแม่นยำคือ ± 0.065% of Span ใช้พาวเวอร์ซัพพลาย 0-24 VDC และ ให้เอาท์พุท 4/20 mA พร้อมกับสัญญาณดิจิตอล 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 inH2O
Sensor Technology	Capacitance (DP)
Communication Protocol	4-20mA & HART, Fieldbus
Rangeability	100 to 1



รูปที่ ก.5 อุปกรณ์วัดระดับน้ำ (Differential Pressure Transmitter)

การวัดระดับน้ำนั้นจะใช้สายยางขนาด 8 มิลลิเมตรที่ต่อมาจากด้านก้นถังของถังน้ำใบที่ 2 ต่อเข้าทางด้านความดันสูงของตัวอุปกรณ์วัดความดันแตกต่าง ส่วนทางด้านความดันต่ำของตัวอุปกรณ์จะเปิดไว้เพื่อรับความดันบรรยากาศ เนื่องจากถังน้ำที่ใช้ในกระบวนการเป็นถังน้ำแบบเปิด ความดันแตกต่างที่วัดโดยอุปกรณ์วัดความดันแตกต่างจึงสัมพันธ์กับระดับน้ำในถังดังต่อไปนี้

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

โดย

ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ 1000 kg/cm^3

g คือ แรงโน้มถ่วงของโลก 9.81 m/s^2

h คือ ระดับน้ำที่วัด m

ΔP คือ ความดันแตกต่าง KPa

ในการทดลองกำหนด ช่วงการวัดอยู่ที่ระยะ 0 เซนติเมตรถึง 18.5 เซนติเมตร

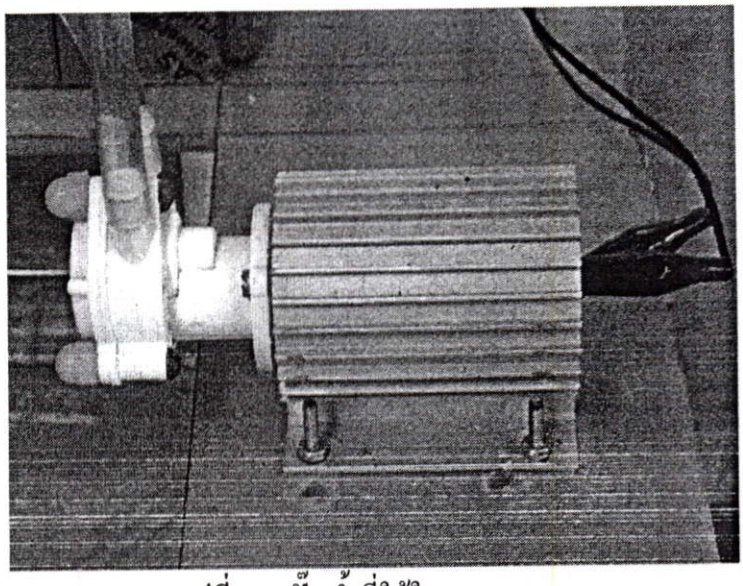
$$\Delta P = (1000 \times 9.81 \times 0.185)/1000$$
$$= 1.814 \text{ KPa}$$

ดังนั้นจะได้ช่วงความดันแตกต่างเท่ากับ

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

เมื่อกำหนดช่วงความดันแตกต่างข้างต้นให้เป็นช่วงการวัดระดับ 0% ถึง 100% ของระดับน้ำในถังที่2 อุปกรณ์วัดแรงดันแบบความดันแตกต่าง (Differential Pressure Transmitter) จะให้เอาท์พุตเป็นค่ากระแสไฟฟ้า 4-20 mA ที่สัมพันธ์กับระดับน้ำในถังที่2 ที่ความสูง 0 ถึง 18.5 เซนติเมตร

ก.1.4 ปั๊มน้ำ



รูปที่ ก.6 ปั๊มน้ำที่ใช้ในการทดลอง

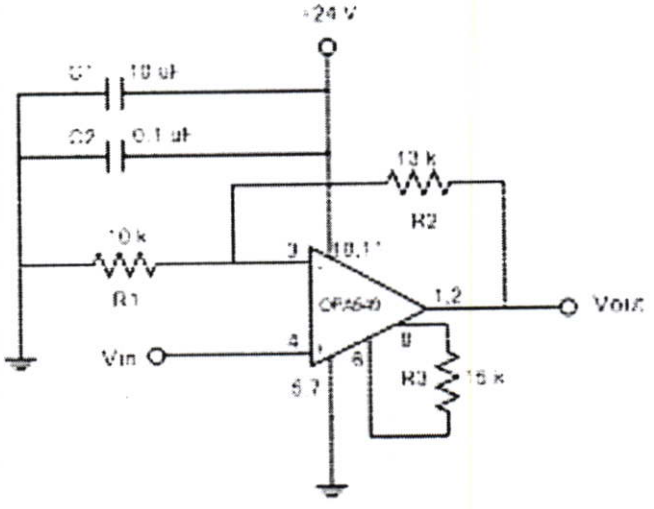
ปั๊มน้ำที่ใช้ในการทดลองนั้นจะใช้ของบริษัท API Instruments รุ่น P6 10.0006 ซึ่งจะเป็นปั๊มน้ำแบบเกียร์ปั๊ม โดยรูปของปั๊มน้ำที่ใช้ในการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ ก.6 ส่วนข้อมูลคุณสมบัติและรายละเอียดของปั๊มน้ำแสดงได้ดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.2 รายละเอียดทางเทคนิคของปั๊มน้ำ

Max Flow rate	2200 ml/min (Vdc)
Max. Suction	10 ft. H_2O wet, 4" dry
Max. Pressure	20 psig (46 ft. H_2O)
Port Size (OD)	4.8 mm (0.18") hose barb
Power Require (Vdc)	24 Vdc (up to 28W)
Max Operating Temp	93^0C (200^0F)
Ambient Fluid Temp	0 to 93^0C (32 to 200^0F)
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.1.5 วงจรออปแอมป์ (Operation Amplifier) ที่ใช้ขับมอเตอร์ (Drive Motor)

ออปแอมป์สามารถนำไปสร้างเป็นวงจรแบบอินเวอร์ทติ้ง (Inverting),แบบนอนอิเวอร์ทติ้ง (Non-inverting) หรือดิฟเฟอเร็นเชียล แอมปลิฟลายเออร์ (Differential Amplifier) ได้โดยใช้การป้อนกลับแบบลบ (Negative Feedback) เพื่อให้ได้อัตราการขยายที่เสถียรและเพิ่มช่วงการใช้งาน (Bandwidth) ของวงจร จากคุณสมบัติทางอุดมคติของออปแอมป์ คือความต้านทานด้านอินพุตสูง ความต้านทานด้านเอาท์พุตต่ำ อัตราการขยายสูงและช่วงใช้งานกว้าง แต่ในการนำวงจรออปแอมป์ไปใช้งานจริงอาจจะได้ผลไม่ตรงกับคุณสมบัติทางอุดมคติ โดยอาจจะมีเอาท์พุตออฟเซทโวลเตท (Output Offset Voltage) คือความต่างศักย์ทางด้านเอาท์พุตเมื่ออินพุตทั้ง 2 ขา (บวกและลบ) ต่อลงกราวด์ ซึ่งเราสามารถใช้วงจรชดเชยเพื่อให้ออปแอมป์มีคุณสมบัติใกล้เคียงอุดมคติ



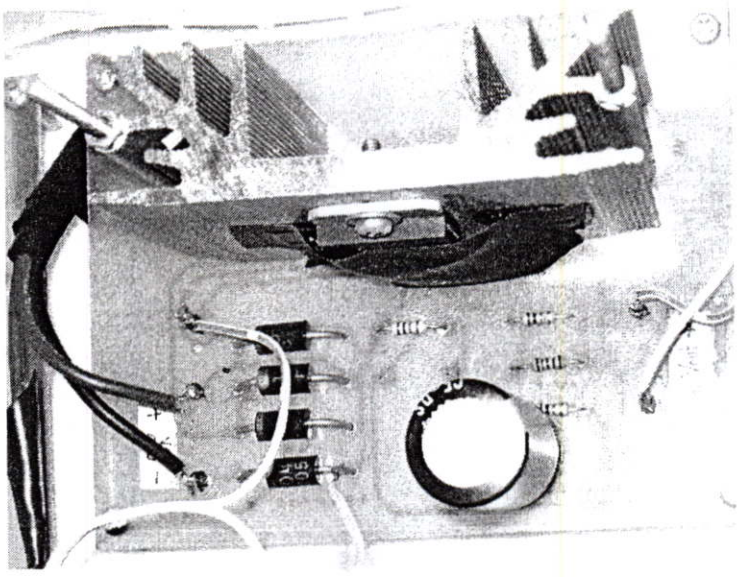
รูปที่ ก.7 วงจรออปแอมป์แบบไม่กลับเฟส (Noninverting) ที่ใช้ขับมอเตอร์

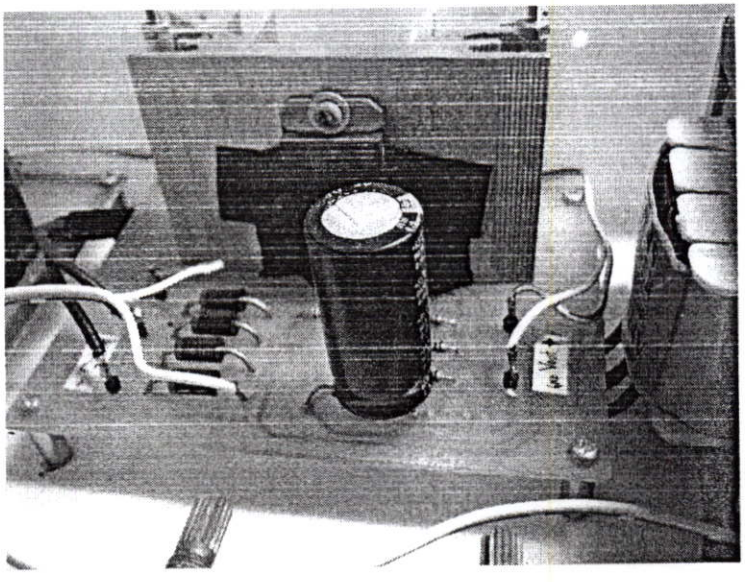
อัตราการขยายของวงจร

$$\frac{Vo}{Vin} = 1+\frac{R2}{R1}$$

$$= 1+\frac{13k}{10k}$$

$$= 2.4 \text{ เท่า}$$

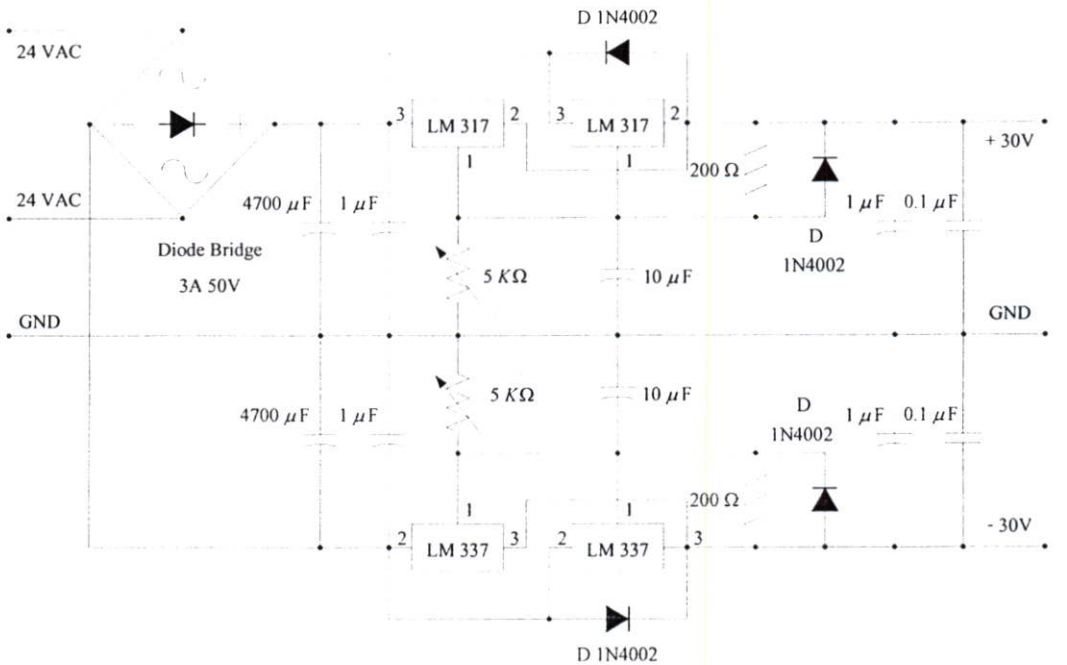




รูปที่ ก.8 อุปกรณ์ขับกระแสของปั๊มน้ำ

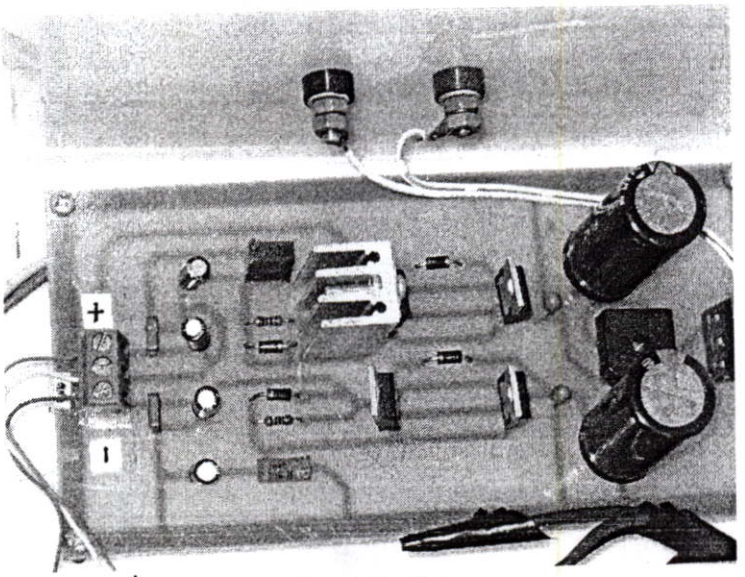
ก.1.6 แหล่งจ่ายไฟสำหรับอุปกรณ์

แหล่งจ่ายไฟสำหรับอุปกรณ์ขับกระแสของปั๊มน้ำนั้นจะใช้แหล่งจ่ายไฟขนาด ± 15 V, 3 A โดยรูปของวงจรแหล่งจ่ายไฟแสดงดังรูปที่2.10และรูปอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟแสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ ก.9 วงจรแหล่งแหล่งจ่ายไฟขนาด ± 15 V, 3 A

เนื่องจากไอซีเรกกูเลเตอร์ที่ใช้ในการรักษาระดับแรงดันอ้างอิงให้คงที่ขนาด ± 30 V นั้นไม่มี ดังนั้นในการทดลองนี้จึงใช้ไอซีเรกกูเลเตอร์เบอร์ LM 317 และ LM 337 ซึ่งเป็นไอซีเรกกูเลเตอร์แบบปรับค่าแรงดันได้ แต่เนื่องจากไอซีนี้สามารถจ่ายกระแสได้สูงสุดเพียง 1.5 A ดังนั้นเพื่อให้เหมาะสมในการใช้งานกับอุปกรณ์ขับกระแสของปั๊มน้ำ จึงนำเอาไอซีเรกกูเลเตอร์นี้มาต่อขนานกัน เพื่อให้สามารถจ่ายกระแสได้มากขึ้นถึง 3 A

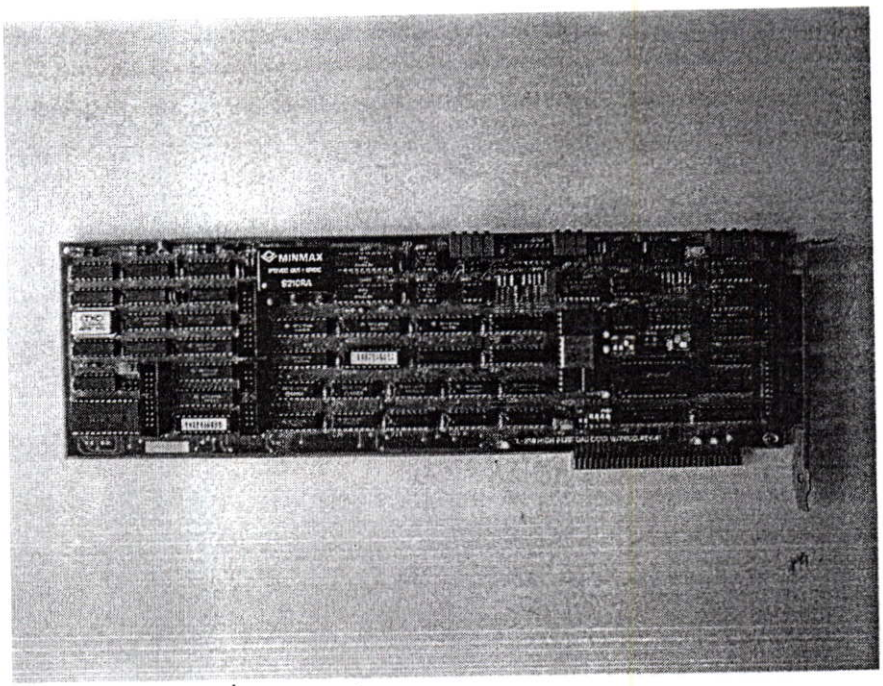


รูปที่ ก.10 อุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟขนาด ± 15 V, 3 A

ก.1.7 การ์ดแปลงสัญญาณ A/D และ D/A

การ์ดแปลงสัญญาณ A/D และ D/A ที่ใช้ในการทดลองนี้จะใช้การ์ดรุ่น PCL-818 ของบริษัท Advantech ซึ่งจะเป็นการ์ดที่มีลักษณะการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์แบบ ISA การ์ดนี้จะทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุม กับอุปกรณ์ขับกระแสของปั๊มน้ำและอุปกรณ์กรองความถี่ต่ำ โดยรูปของการ์ดแปลงสัญญาณ A/D และ D/A แสดงได้ดังรูปที่ 2.12 และการ์ดจะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆดังนี้

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



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

ก.1.7.1 ส่วนแปลงสัญญาณ A/D

ส่วนแปลงสัญญาณ A/Dนี้จะทำหน้าที่ในการรับสัญญาณแรงดันจากอุปกรณ์กรองความถี่ และแปลงให้อยู่ในรูปของสัญญาณดิจิตอล เพื่อส่งให้กับคอมพิวเตอร์หรือตัวควบคุมต่อไป โดยส่วนแปลงสัญญาณ A/D นี้จะมีจำนวนช่องในการรับสัญญาณถึง 16 ช่อง, มีความละเอียดสูงถึง 12 บิท, มีความเที่ยงตรงสูงถึง ± 0.01 % หรือ ± 1บิท, มีความเป็นเชิงเส้นมากถึง ± 1บิท, และมีความเร็วในการแปลงสัญญาณสูงสุดถึง 100 KH_z นอกจากนั้นยังสามารถเลือกช่วงของสัญญาณอินพุตที่จะรับเข้ามาได้หลายแบบ ขึ้นอยู่กับการเลือกที่สวิทช์หรือเลือกทางซอฟต์แวร์

ก.1.7.2 ส่วนแปลงสัญญาณ D/A

ส่วนแปลงสัญญาณ D/Aนี้จะทำหน้าที่ในการรับสัญญาณควบคุมจากคอมพิวเตอร์หรือตัวควบคุม และแปลงให้อยู่ในรูปของสัญญาณอนาล็อกเพื่อส่งให้กับชุดขับกระแสของปั๊มน้ำต่อไป โดยส่วนแปลงสัญญาณ D/A นี้จะมีจำนวนช่องในการส่งสัญญาณ 2 ช่อง, มีความละเอียดสูงถึง 12 บิท, มีความเป็นเชิงเส้นมากถึง ± 0.5 บิท และมีความเร็วในการแปลงสัญญาณสูงถึง $5\,\mu s$ นอกจากนั้นยังสามารถเลือกช่วงของสัญญาณเอาท์พุตที่จะส่งออกไปได้หลายแบบ ขึ้นอยู่กับการเลือกที่สวิทช์หรือเลือกทางซอฟต์แวร์

ภาคผนวก ข.

โปรแกรมที่ใช้ในการหาแบบจำลองกระบวนการ, และออกแบบตัวควบคุม

ข.1 โปรแกรมหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน

```
%************************************************************************
%          Parameter of Process
%************************************************************************
A1=66.25;
A2=66.25;
a12=0.1963;
a2=0.1963;
beta12= 0.562383035;
beta2= 0.471616028;
k1=2.79535865;
g=981;
%
% Find parameter at stationary point by fix level
%h10=7.123;
%h20=4.184;
%
%qo12=beta12*a12*sqrt(2*g*(h10-h20))
%qo2=beta2*a2*sqrt(2*g*h20)
%
%u10=qo12/k1
%


% Find parameter at stationary point by fix voltage input
u10=3;


h20=(k1*u10/(beta2*a2))^2/(2*g);
h10=(k1*u10/(beta12*a12))^2/(2*g)+h20;


t2=A2/(beta2*a2)*sqrt(2*h20/g);
t12=A1/(beta12*a12)*sqrt(2*(h10-h20)/g);
K1=k1*t2/A2;
```

```
num=K1;
den=[t12*t2 (t12+2*t2) 1];
G=tf(num,den);

qo12=beta12*a12*sqrt(2*g*(h10-h20));
qo2=beta2*a2*sqrt(2*g*h20);
% Operating point of Process
u10
h10
h20
% Transfer Function of Process
G
% Pole of Process
roots(den)
% Time Constant of Process
t2
t12
%
[z,p,k]=tf2zp(num,den)
zplane(z,p)
```

ข.2 โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีโดยวิธี CRA กรณีปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุม

```
%*************************************************************************
%                CRA For Coupled-Tank Interaction, tao change
%*************************************************************************

p2=t12*t2;p1=(t12+(2*t2));p0=1;b0=K1;
r1=1.8;r2=2;
tao=40;

syms kd kp ki
eq1=[num2str(tao),'/(',num2str(r1),'*',num2str(r2),')=',num2str(p2),'/(',num2str(p1),'+(kd*',num2
str(b0),'))'];
eq2=[num2str(tao),'/',num2str(r1),'=(',num2str(p1),'+(kd*',num2str(b0),'))/(1+(kp*',num2str(b0),
'))'];
eq3=[num2str(tao),'=(1+(kp*',num2str(b0),'))/(ki*',num2str(b0),')'];
s=solve(eq1,eq2,eq3,kd,kp,ki);

' CRA PID For Coupled-Tank Interaction'
kd=double(s.kd)
kp=double(s.kp)
ki=double(s.ki)
p=[p2 (p1+(b0*kd)) (p0+(b0*kp)) b0*ki];

% Adjust Time Response Case K=1
n0_t1=K1*ki;
d3_t1=p2;d2_t1=(p1+(b0*kd));d1_t1=(p0+(b0*kp));d0_t1=b0*ki;
num_t1=n0_t1;
den_t1=[d3_t1 d2_t1 d1_t1 d0_t1];
tf_t1=tf(num_t1,den_t1);
```

```
% Pole of  Closed loop transfer function
roots(den_t1)
[zt1,pt1,Kt1]=tf2zp(num_t1,den_t1)
zplane(zt1,pt1)

% Adjust Time Response Case K=1.2
g2=1.2;
n0_t2=g2^3*K1*ki;
d3_t2=p2;d2_t2=g2*(p1+(b0*kd));d1_t2=g2^2*(p0+(b0*kp));d0_t2=g2^3*b0*ki;
num_t2=n0_t2;
den_t2=[d3_t2 d2_t2 d1_t2 d0_t2];
tf_t2=tf(num_t2,den_t2);

% Pole of  Closed loop transfer function
roots(den_t2)
[zt2,pt2,Kt2]=tf2zp(num_t2,den_t2)
zplane(zt2,pt2)

%find kd_t2,kp_t2,ki_t2
syms kd_t2 kp_t2 ki_t2
eq1=[num2str(tao),'/(',num2str(r1),'*',num2str(r2),'*',num2str(g2),')=',num2str(p2),'/(',num2str(p
1),'+(kd_t2*',num2str(b0),'))'];
eq2=[num2str(tao),'/(',num2str(r1),'*',num2str(g2),')=(',num2str(p1),'+(kd_t2*',num2str(b0),'))/(
1+(kp_t2*',num2str(b0),'))'];
eq3=[num2str(tao),'/',num2str(g2),'=(1+(kp_t2*',num2str(b0),'))/(ki_t2*',num2str(b0),')'];
s=solve(eq1,eq2,eq3,kd_t2,kp_t2,ki_t2);
' CDM PID For Coupled-Tank Interaction'
kd_t2=double(s.kd_t2)
kp_t2=double(s.kp_t2)
ki_t2=double(s.ki_t2)
```

```
% Adjust Time Response Case K=1.42
g3=1.42;
n0_t3=g3^3*K1*ki;
d3_t3=p2;d2_t3=g3*(p1+(b0*kd));d1_t3=g3^2*(p0+(b0*kp));d0_t3=g3^3*b0*ki;
num_t3=n0_t3;
den_t3=[d3_t3 d2_t3 d1_t3 d0_t3];
tf_t3=tf(num_t3,den_t3);

% Pole of  Closed loop transfer function
roots(den_t3)
[zt3,pt3,Kt3]=tf2zp(num_t3,den_t3)
zplane(zt3,pt3)

%find kd_t3,kp_t3,ki_t3
syms kd_t3 kp_t3 ki_t3
eq1=[num2str(tao),'/(',num2str(r1),'*',num2str(r2),'*',num2str(g3),')=',num2str(p2),'/(',num2str(p
1),'+(kd_t3*',num2str(b0),'))'];
eq2=[num2str(tao),'/(',num2str(r1),'*',num2str(g3),')=(',num2str(p1),'+(kd_t3*',num2str(b0),'))/(
1+(kp_t3*',num2str(b0),'))'];
eq3=[num2str(tao),'/',num2str(g3),'=(1+(kp_t3*',num2str(b0),'))/(ki_t3*',num2str(b0),')'];
s=solve(eq1,eq2,eq3,kd_t3,kp_t3,ki_t3);
' CDM PID For Coupled-Tank Interaction'
kd_t3=double(s.kd_t3)
kp_t3=double(s.kp_t3)
ki_t3=double(s.ki_t3)

% plot pole and zero changing%
zplane(zt1,pt1)
hold
zplane(zt2,pt2)
hold
zplane(zt3,pt3)
```

ข.3 โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีโดยวิธี CRA กรณีปรับอัตราการหน่วงของระบบควบคุม

```
%*************************************************************************
%                CRA For Coupled-Tank Interaction, overshoot change
%*************************************************************************

p2=t12*t2;p1=(t12+(2*t2));p0=1;b0=K1;
r1=1.8;r2=2;
tao=40;

syms kd kp ki
eq1=[num2str(tao),'/(',num2str(r1),'*',num2str(r2),')=',num2str(p2),'/(',num2str(p1),'+(kd*',num2
str(b0),'))'];
eq2=[num2str(tao),'/',num2str(r1),'=(',num2str(p1),'+(kd*',num2str(b0),'))/(1+(kp*',num2str(b0),
'))'];
eq3=[num2str(tao),'=(1+(kp*',num2str(b0),'))/(ki*',num2str(b0),')'];
s=solve(eq1,eq2,eq3,kd,kp,ki);

' CRA PID For Coupled-Tank Interaction'
kd=double(s.kd)
kp=double(s.kp)
ki=double(s.ki)
p=[p2 (p1+(b0*kd)) (p0+(b0*kp)) b0*ki];

%Adjust Overshoot Respoonse Case K=1
n0_o1=K1*ki;
d3_o1=p2;d2_o1=(p1+(b0*kd));d1_o1=(p0+(b0*kp));d0_o1=b0*ki;
num_o1=n0_o1;
den_o1=[d3_o1 d2_o1 d1_o1 d0_o1];
tf_o1=tf(num_o1,den_o1);
```

```
% Pole of  Closed loop transfer function
roots(den_o1)
[zo1,po1,Ko1]=tf2zp(num_o1,den_o1)
zplane(zo1,po1)

%Adjust Overshoot Respoonse Case K=1.1
gg2=1.1;
n0_o2=gg2^3*K1*ki;
d3_o2=p2;d2_o2=gg2^2*(p1+(b0*kd));d1_o2=gg2^3*(p0+(b0*kp));d0_o2=gg2^3*b0*ki;
num_o2=n0_o2;
den_o2=[d3_o2 d2_o2 d1_o2 d0_o2];
tf_o2=tf(num_o2,den_o2);

% Pole of  Closed loop transfer function
roots(den_o2)
[zo2,po2,Ko2]=tf2zp(num_o2,den_o2)
zplane(zo2,po2)

%find kd_o2,kp_o2,ki_o2
syms kd_o2 kp_o2 ki_o2
eq1=[num2str(tao),'/(',num2str(r1),'*',num2str(r2),'*',num2str(gg2^2),')=',num2str(p2),'/(',num2s
tr(p1),'+(kd_o2*',num2str(b0),'))'];
eq2=[num2str(tao),'/(',num2str(r1),'*',num2str(gg2),')=(',num2str(p1),'+(kd_o2*',num2str(b0),'))
/(1+(kp_o2*',num2str(b0),'))'];
eq3=[num2str(tao),'=(1+(kp_o2*',num2str(b0),'))/(ki_o2*',num2str(b0),')'];
s=solve(eq1,eq2,eq3,kd_o2,kp_o2,ki_o2);
' CDM PID For Coupled-Tank Interaction'
kd_o2=double(s.kd_o2)
kp_o2=double(s.kp_o2)
ki_o2=double(s.ki_o2)
```

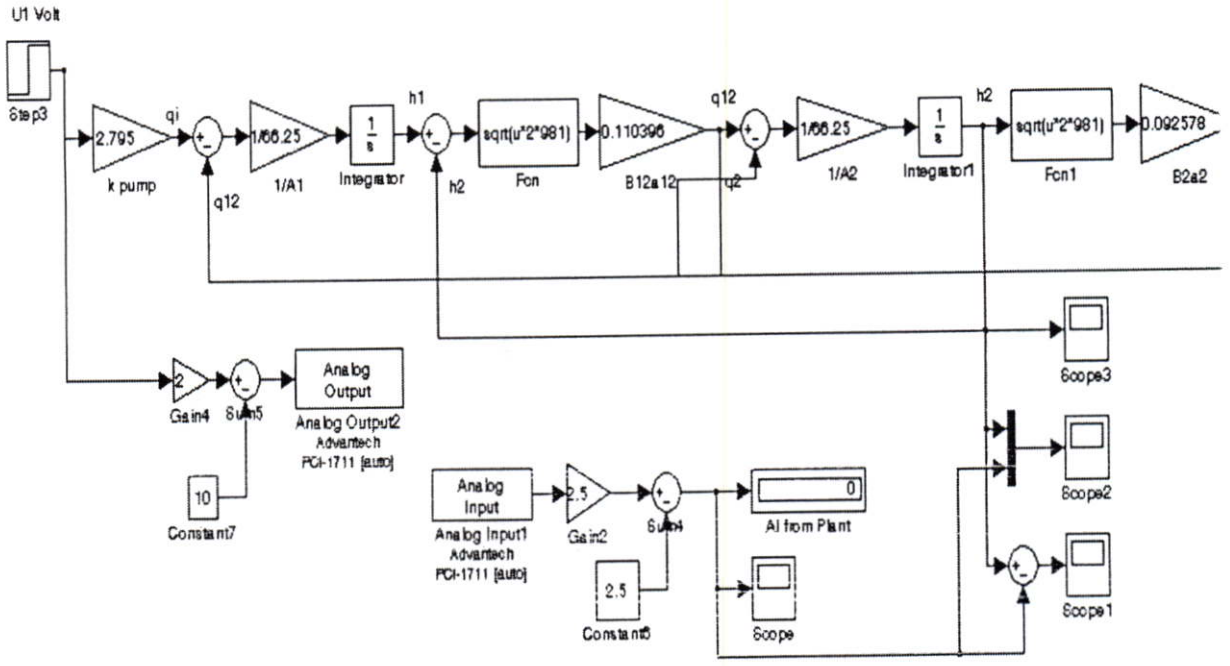
```
%Adjust Overshoot Respoonse Case K=1.3
gg3=1.3;
n0_o3=gg3^3*K1*ki;
d3_o3=p2;d2_o3=gg3^2*(p1+(b0*kd));d1_o3=gg3^3*(p0+(b0*kp));d0_o3=gg3^3*b0*ki;
num_o3=n0_o3;
den_o3=[d3_o3 d2_o3 d1_o3 d0_o3];
tf_o3=tf(num_o3,den_o3);

% Pole of  Closed loop transfer function
roots(den_o3)
[zo3,po3,Ko3]=tf2zp(num_o3,den_o3)
zplane(zo3,po3)

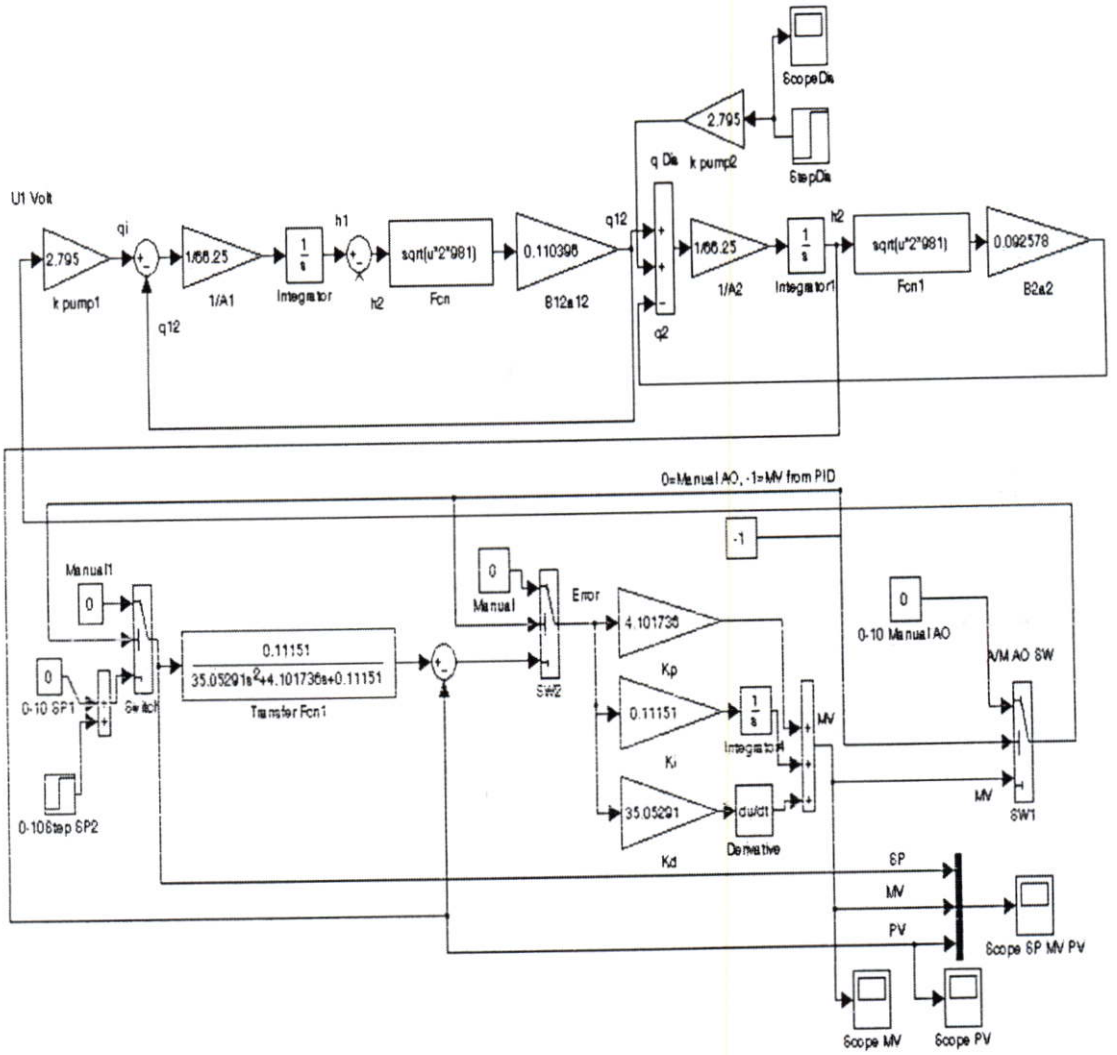
%find kd_o3,kp_o3,ki_o3
syms kd_o3 kp_o3 ki_o3
eq1=[num2str(tao),'/(',num2str(r1),'*',num2str(r2),'*',num2str(gg3^2),')=',num2str(p2),'/(',num2s
tr(p1),'+(kd_o3*',num2str(b0),'))'];
eq2=[num2str(tao),'/(',num2str(r1),'*',num2str(gg3),')=(',num2str(p1),'+(kd_o3*',num2str(b0),'))
/(1+(kp_o3*',num2str(b0),'))'];
eq3=[num2str(tao),'=(1+(kp_o3*',num2str(b0),'))/(ki_o3*',num2str(b0),')'];
s=solve(eq1,eq2,eq3,kd_o3,kp_o3,ki_o3);
' CDM PID For Coupled-Tank Interaction'
kd_o3=double(s.kd_o3)
kp_o3=double(s.kp_o3)
ki_o3=double(s.ki_o3)

% plot pole and zero changing%
zplane(zo1,po1)
hold
zplane(zo2,po2)
hold
zplane(zo3,po3)
```

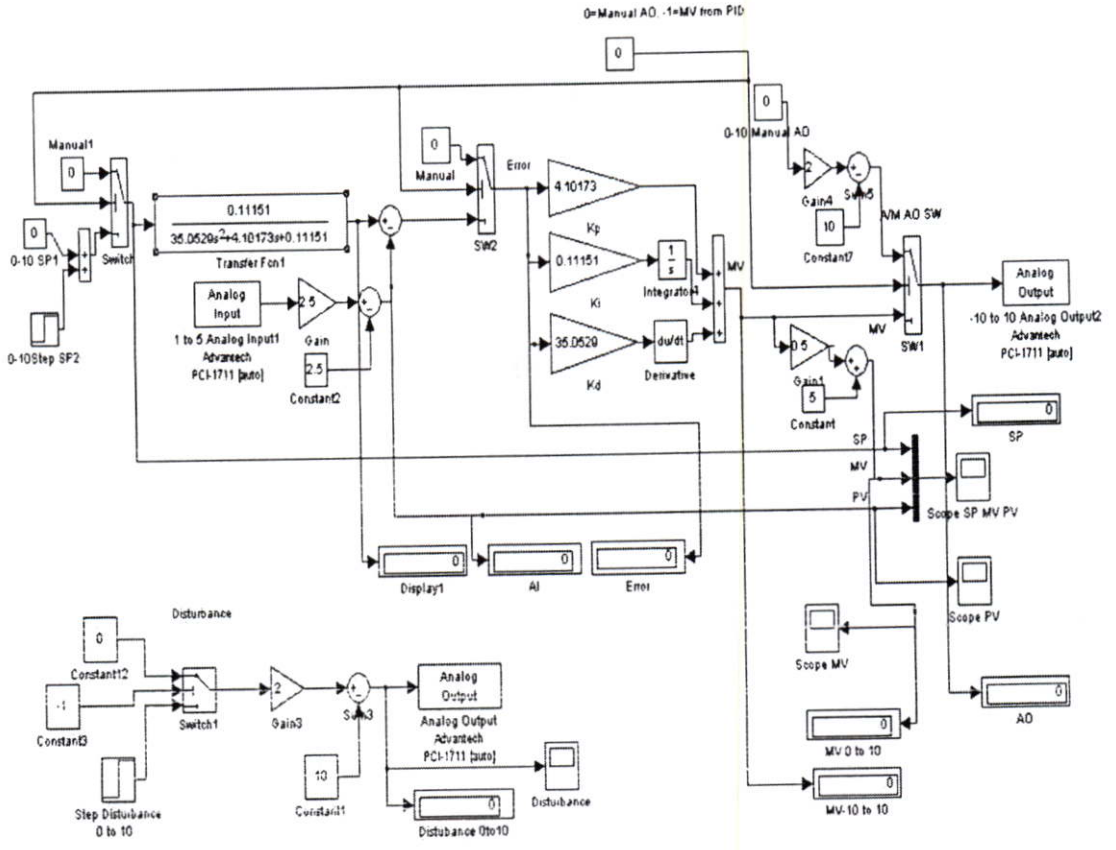
ข.4 โปรแกรม Simulink ที่ใช้เปรียบเทียบผลจากกระบวนการจริงกับผลจากแบบจำลอง



ข.5 โปรแกรม Simulink ที่ใช้จำลองการทำงานของระบบควบคุม

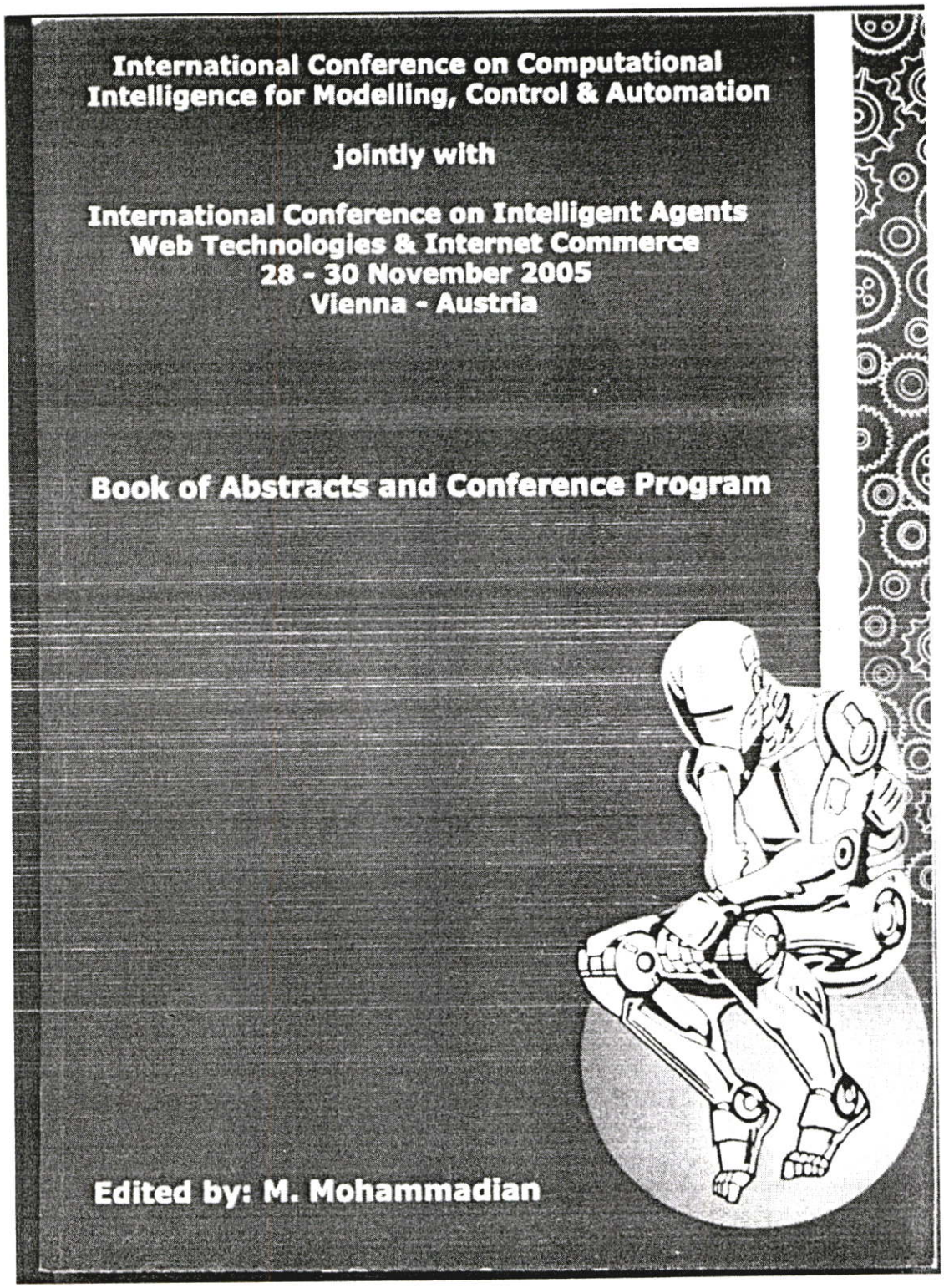


ข.6 โปรแกรม Simulink ที่ใช้ทดลองการทำงานของระบบควบคุม



ภาคผนวก ค.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่


International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control & Automation
jointly with
International Conference on Intelligent Agents Web Technologies & Internet Commerce
28 - 30 November 2005
Vienna - Austria
Book of Abstracts and Conference Program
Edited by: M. Mohammadian

PID Controller Design using Characteristic Ratio Assignment Method for Coupled-Tank Process.

Jutarut Chaorai-ngern, Arjin Numsomran, Taweepol Suesut, Thanit Trisuwannawat and Vittaya Tipsuwanporn.
Faculty of Engineering, King Mongkuts Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.
(Tel: 66-2739-2407: Ext.128; knarjin@kmitl.ac.th)

Abstract— **This paper presents the PID controller design for coupled-tank process using characteristic ratio assignment (CRA). The coupled-tank process is a challenge plant for testing the performance of PID controller because it is a high uncertainty nonlinear model. For this paper, the characteristic ratio assignment (CRA) which is satisfied specification of performance of control system. Furthermore, it is very convenient as a fast adjustment damping ratio as well as a high speed response. Finally, the simulation results can be illustrated the validity of our approach by MATLAB.**

Keywords : PID Controller, CRA, Robust Control.

I. INTRODUCTION

Generally, the performance analysis of control system focuses on time domain response such as percent overshoot, rise time, setting time and steady state error. Although there are many methods to design the controller, it is a few approach can be achieved the satisfied response. The characteristic ratio assignment (CRA) is one techniques based on defined parameter of characteristic equation that is a famous method at present.[1][2].

To design controller by CRA method [3], adjustment of speed response and the damping ratio can be done by only one parameter. Therefore, this technique is convenient and suitable for tuning controller under the requirement of the system.

In this paper, the coupled-tank process, the interactive process is controlled by PID controller based on CRA method. The coefficient of characteristic (α_i) and time constant (τ) are the parameters to determine the characteristic equation of the control system that is necessary to design the time domain system.

II. THE COUPLED-TANK PROCESS

According to fig.1, the input $u(t)$ is the input pressure which is taken to the pump, and the output $h_2(t)$ is the water level in tank1. The nonlinear equation can be obtained by mass balance equation and Bernoullis law is given by.

$$\begin{aligned}\frac{dh_1(t)}{dt} &= -\frac{\beta_{12}a_{12}}{A_1}\sqrt{2g\left(h_1(t)-h_2(t)\right)}+\frac{k}{A_1}u(t)\\ \frac{dh_2(t)}{dt} &= -\frac{\beta_2 a_2}{A_2}\sqrt{2gh_2(t)}+\frac{\beta_{12}a_{12}}{A_2}\sqrt{2g\left(h_1(t)-h_2(t)\right)}\end{aligned} \quad (1)$$

Where A_i is the cross section area of tank i (cm^2), a_2 is the cross section area of outlet of tank2 (cm^2) , β_{12} a the cross section area of jointed pipe between tank1 and tank2 (cm^2) , β_2 the value ratio at the outlet of tank2, is the value ratio between tank1 and tank2, g is the gravity (cm^2/s) and k is the gain of pump ($cm^3/V \bullet s$) according to (1) is linearized as (2).

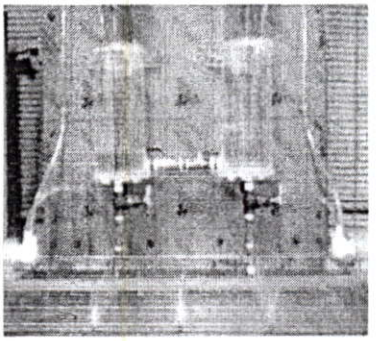


Fig. 1. The Coupled-Tank Process.

$$\begin{aligned}\frac{dH_1(t)}{dt} &= \frac{1}{T_{12}}\left(-H_1(t)+H_2(t)\right)+\frac{k}{A_1}U(t)\\ \frac{dH_2(t)}{dt} &= -\frac{1}{T_2}H_2(t)+\frac{1}{T_{12}}\left(H_1(t)-H_2(t)\right)\end{aligned} \quad (2)$$

Where

$T_{12} = \frac{A_1}{\beta_{12}a_1}\sqrt{\frac{2(\bar{h}_1-\bar{h}_2)}{g}}$, s and $T_2 = \frac{A_2}{\beta_2 a_2}\sqrt{\frac{2\bar{h}_2}{g}}$, s

$\bar{h}_1$ and $\bar{h}_2$ is the water level at operating point of this process, T_{12} is the time constant between tank1 and tank2 ,and T_2 is the time constant of tank2 and k is gain of pump. For the (2) can be modeled as the (3). This is the transfer function for designing this controller.

$$\frac{H_2(s)}{U(s)} = G(s) = \frac{K}{T_{12}T_2s^2+(T_{12}+2T_2)s+1} \quad (3)$$

Where

$K = \frac{kT_2}{A_2}$, cm/V

III. THE CONTROL SYSTEM STRUCTURE.

The control system structure (figure 2) is two-degree of freedom that its parameters are determined by CRA method. Where $B_p(s)$ and $A_p(s)$ is the polynomial equation. The block diagram in fig. 2 can be formulated to transfer

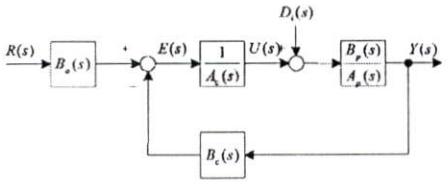


Fig. 2. The block diagram of control system

function as.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{B_a(s)B_p(s)}{A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s)} \tag{4}$$

In this case

$$\begin{aligned} B_p(s) &= K, A_p(s) = T_{12}s^2 + (T_{12} + 2T_2)s + 1 \\ B_c(s) &= K_d s^2 + K_p s + K_i, A_c(s) = s, B_a(s) = K_i \end{aligned} \tag{5}$$

To substitute equation (5) into equation (4) is given a characteristic equation as.

$$P(s) = T_{12}T_2 s^3 + (T_{12} + 2T_2 + KK_d)s^2 + (1 + KK_p)s + KK_i \tag{6}$$

Equation (6) is the characteristic equation to design the PID controller by CRA method.

IV. THE CRA METHOD

Naslin[4] has studied the problems to optimize a damping ratio of control systems, and he found that the damping ration relates with characteristic ratio. The relation of characteristic equation can be illustrated as follow.

$$p(s) = a_n s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \ldots + a_1 s + a_0, \forall a_i > 0 \tag{7}$$

Where, the characteristic ratio is given by.

$$\alpha_1 = \frac{a_1^2}{a_0 a_2}, \alpha_2 = \frac{a_2^2}{a_1 a_3}, \ldots, \alpha_{n-1} = \frac{a_{n-1}^2}{a_{n-2}a_n} \tag{8}$$

And the inverse of characteristic equation is given as.

$$b_0 = \frac{a_0}{a_1}, b_1 = \frac{a_1}{a_2}, \ldots, b_{n-1} = \frac{a_{n-1}}{a_n} \tag{9}$$

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

$$\alpha_1 = \frac{b_1}{b_0}, \alpha_2 = \frac{b_2}{b_1}, \ldots, \alpha_{n-1} = \frac{b_{n-1}}{b_{n-2}} \tag{10}$$

Thus the time constant is given by.

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} \tag{11}$$

Given equation (8)-(10), it is able to describe in another form by the coefficient of characteristic equation.

$$A = \begin{bmatrix} a_n & a_{n-1} & \ldots & a_1 & a_0 \end{bmatrix} \tag{12}$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{n-1} & b_{n-2} & \ldots & b_1 & b_0 \end{bmatrix} \tag{13}$$

$$C = \begin{bmatrix} c_{n-2} & c_{n-3} & \ldots & c_1 & c_0 \end{bmatrix} \tag{14}$$

Where

$$b_i = \frac{a_i}{a_{i+1}}, i = 0,1,2,\ldots,n-1 \tag{15}$$

$$c_i = \frac{b_{i+1}}{b_i}, i = 0,1,2,\ldots,n-2 \tag{16}$$

Design controller by CRA method, assigns value of time constant (τ) and characteristic pulsatances (α_i) up to system requirement. To define the value of α_i , it is under the rule of Lipatov and Sokolov [5] in order to retain the system stability which is given by.

$$\sqrt{\alpha_i \alpha_{i+1}} > 1.4656, i = 1,2,\ldots,n-2 \tag{17}$$

$$\alpha_i \geq 1.12374\alpha_i^*, i = 2,3,\ldots,n-2 \tag{18}$$

$$\alpha_i^* = \frac{1}{\alpha_{i+1}} + \frac{1}{\alpha_i - 1}, \alpha_n = \alpha_0 = \infty \tag{19}$$

A. Adjustment speed response of control system

To 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.

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

Then it is arranged in new format.

$$G(s) = \frac{a_0/a_n}{s^n + \frac{a_{n-1}}{a_n}s + \ldots + \frac{a_1}{a_n}s + \frac{a_0}{a_n}} \tag{21}$$

From equation (21) is able to construct the coefficient as inverse form of characteristic equation.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \prod_{i=n-1}^{n-1} b_i & \ldots & \prod_{i=2}^{n-1} b_i & \prod_{i=1}^{n-1} b_i \end{bmatrix} \tag{22}$$

When increasing a gain with equivalent ratio by k, it is obtained by.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & k\prod_{i=n-1}^{n-1} b_i & \ldots & k^{n-1}\prod_{i=2}^{n-1} b_i & k^n \prod_{i=1}^{n-1} b_i \end{bmatrix} \tag{23}$$

Equation (22) and (23), coefficient ratio is unchanged, but the time constant is able to change as shown in equation (24)(25).

$$G_k(s) = \frac{k^n a_0}{a_n s^n + k a_{n-1}s^{n-1} + \ldots + k^{n-1}a_1 s + k^n a_0} \tag{24}$$

$$\tau = \frac{1}{k}\left(\frac{a_1}{a_0}\right) \tag{25}$$

Where $0 < k < 1$

TABLE I

PARAMETERS OF COUPLED TANK PROCESS

A_1, A_2:cm^2	a_1, a_{12}:cm^2	β_2	β_{12}
66.25	0.1963	0.3	0.56

TABLE II

OPERATING POINT OF COUPLED TANK PROCESS.

$\bar{h}_1$:cm	$\bar{h}_2$:cm	$\bar{u}$:V	k:cm^3/V · s
9	7	3	2.3

B. Adjustment damping ratio of control system

To adjust the damping ratio, if a system is high order then there are many parameters (α_i) to be adjusted. Thus the CRA method is designed for tuning only one parameter that follows as.

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

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{\prod_{i=0}^{n-1} b_i} & \frac{1}{\prod_{i=0}^{n-2} b_i} & \cdots & \frac{1}{\prod_{i=0}^{1} b_i} & \frac{1}{\prod_{i=0}^{0} b_i} \end{bmatrix} \tag{27}$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{\left[\prod_{i=0}^{n-2} c_i \prod_{i=0}^{n-3} c_i \cdots \prod_{i=0}^{0} c_i\right] b_0^n} & & & & \\ & \ddots & & & \\ \frac{1}{\left[\prod_{i=2}^{n-3} c_i \prod_{i=0}^{n-4} c_i \cdots \prod_{i=0}^{0} c_i\right] b_0^{n-1}} & & \cdots & \frac{1}{b_0} & 1 \end{bmatrix} \tag{28}$$

When the coefficient ratio is increased by k then the new characteristic equation is given by.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{k^{\frac{1}{2}n^2-\frac{1}{2}}\left[\prod_{i=0}^{n-2} c_i \prod_{i=0}^{n-3} c_i \cdots \prod_{i=0}^{0} c_i\right] b_0^n} & & & & \\ & \ddots & & & \\ \frac{1}{k^{\frac{1}{2}n^2-\frac{1}{2}} \cdot k^{\frac{1}{2}n^2-\frac{1}{2}n}\left[\prod_{i=0}^{n-3} c_i \prod_{i=0}^{n-4} c_i \cdots \prod_{i=0}^{0} c_i\right] b_0^{n-1}} & & \cdots & \frac{1}{b_0} & 1 \end{bmatrix} \tag{29}$$

Finally, equation (28) and (29) are formulated to the equation (30) When $k > 1$; damping ratio will be increased then $0 < k < 1$; damping ration will be decreased.

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

V. THE SIMULATION RESULTS

In this paper, the simulation results of the coupled-tank, the interactive process is given by MATLAB. The experiment of PID control based on CRA illustrates the adjustment of speed response and damping ratio. Parameters and operating point show detail in Table I and Table II.

From this data formed by equation (31) then it is obtained the transfer function as.

$$G(s) = \frac{4.662}{5177s^2 + 307.2s + 1} \tag{31}$$

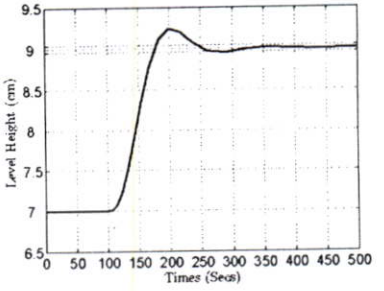


Fig. 3. The step response of nominal parameter.

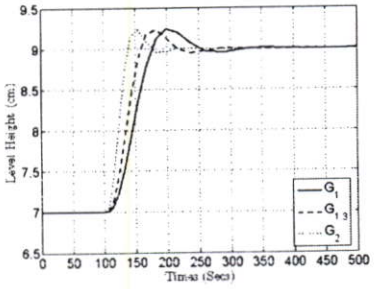


Fig. 4 The result adjustment speed of step response by k.

A. The Step Response of nominal parameter

According to equation (31), design of PID controller based on CRA, is assigned parameter follow as $\alpha_1 = 1.8, \alpha_2 = 2$ and $\tau = 40$then the characteristic equation is,

$$P(s) = 5177s^3 + 465.925s^2 + 20.966s + 0.5242$$

And the parameter of PID controller is given by.

$$K_d = 34.052, K_p = 4.2825, K_i = 0.1124$$

The step response in fig.3, the overshoot is over 12 percent and rise time is at 296 sec.

B. The Adjustment Speed of Response

By using CRA method, the adjustment of speed response can be produced by adjusting value of k according to equation (24).

$$G_k(s) = \frac{k^3 0.5242}{5177s^3 + k465.925s^2 + k^2 20.966s + k^3 0.5242}$$

Then the solution is given as the PID parameter as shown in Table3.

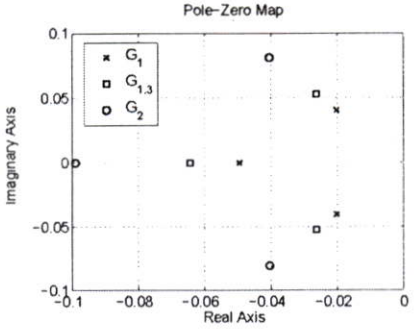


Fig. 5. The position of each closed-loop pole (Table III)

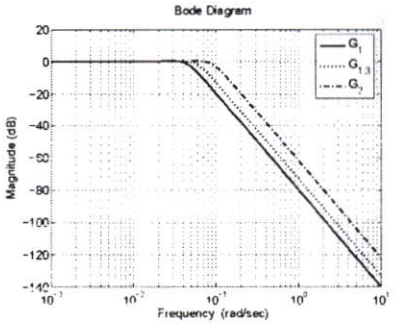


Fig. 6. Frequency response when adjust parameter k (Table III)

When k is adjusted from 1.3 to 2 respectively, setting time is decreased from 148 sec. to 93 sec. therefore; the system response is faster. Fig 6 shows the position of close loop pole and frequency response that changes during adjustment parameter k.

C. *The adjustment of damping ratio*

By using CRA method, the adjustment of damping ratio can be done by formulating the feedback transfer function

TABLE III
OPERATING POINT OF COUPLED-TANK PROCESS.

	K_c	K_p	K_i
$k = 1$	34.052	4.282	0.112
$k = 1.3$	64.031	7.385	0.247
$k = 2$	133.984	17.773	0.899

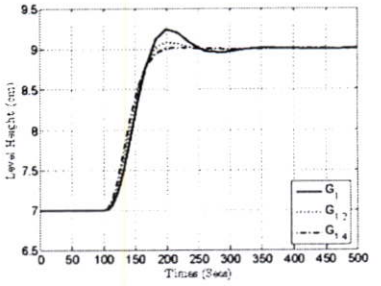


Fig. 7. The response when adjustment Damping Ratio by k. (Table IV)

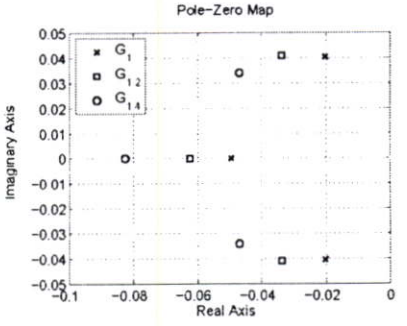


Fig. 8. The position of each closed-loop pole when adjust damping ratio. (Table IV)

(equation 30) is given as.

$$G_k(s) = \frac{k^3 0.5242}{5177s^3 + k^2 465.925s^2 + k^2 20.966s + k^3 0.5242}$$

Fig 7 shows the step response, when k is changed to 1.2 and 1.4 respectively then the damping ratio is also increased but the overshoot is decreased from 4 and 0.5 , and the setting time is faster (118 sec to 97 sec)

TABLE IV
PARAMETERS OF PID CONTROLLER VERSUS K.

	K_d	K_p	K_i
$k = 1$	34.052	4.282	0.112
$k = 1.2$	78.021	7.556	0.1942
$k = 1.4$	129.986	12.125	0.3084

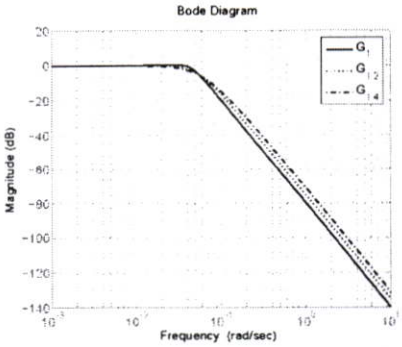


Fig. 9. Frequency response when adjust parameter k (Table IV)

VI. CONCLUSIONS

In this paper, the design of PID controller using CRA is presented. The simulation results from MATLAB are able to illustrate the advantage which only one parameter is to be adjusted. Thus, our scheme is convenient and suitable for designing and tuning the controller.

REFERENCES

[1] S. Jayasuriya and J.W. Song., "On the Synthesis of Compensators for Non Overshooting Step Response", *in Proceedings American Control Conference*, 1988, pp. 683-684.

[2] R.H. Middleton and S.F. Graebe., "Slow Stable Open-Loop Poles: To Cancel or not to Cancel.", *in Automatica*, 1999, Vol. 35: pp. 877-886.

[3] Y.C. Kim, L.H. Keel and S.P. Bhattacharya., "Transient Response Control via Characteristic Ratio Assignment", *IEEE Transactions On Automatic Control*, 2003, Vol. 48, No. 12: pp.2238-2244.

[4] P. NaslinH., *Essentials of optimal control*, London Boston Technical Publishers Inc, Cambridge, MA, 1969.

[5] Sokolov,"Some Sufficient Conditions for Stability and Instability of Continuous Linear Stationary Systems", Translated from Automatika, No. 9: pp.30-37.1978.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวจุฑารัตน์ ชาวไร่เงิน เกิดเมื่อวันที่ 24 มิถุนายน พ.ศ. 2522 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนสตรีมหาพฤฒารามในปี พ.ศ. 2539 จากนั้นได้เข้าศึกษาในระดับปริญญาตรีที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการวัดคุม(เกียรตินิยมอันดับสอง) จากภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2543 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการวัดคุม ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2544 โดยในปี พ.ศ. 2543 ได้เข้าทำงานในตำแหน่งเจ้าหน้าที่ประสานงานฝ่ายขาย (Technical Products and Solution Coordinator & Application Engineer) ที่บริษัท โพลีเทคโนโลยี จำกัด จนถึงปัจจุบัน