

การออกแบบตัวควบคุมพีไอแบบสององศาอิสระด้วยดีคัมปลิง
สำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน

DECOUPLING 2-DOF PI CONTROLLER DESIGN
FOR COUPLED-TANK PROCESS

ไมตรี ธรรมมา
MAITREE THUMMA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-EN-M-060-079

การออกแบบตัวควบคุมพีไอแบบสององศาอิสระด้วยดีคัปปลิง
สำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน

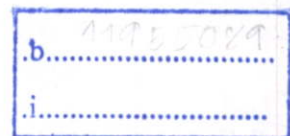
DECOUPLING 2-DOF PI CONTROLLER DESIGN
FOR COUPLED-TANK PROCESS



ไมตรี ชรรรมา

MAITREE THUMMA

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน...82839
วัน,เดือน,ปี...25 0.ถ. 2551



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2551

KMITL-2008-EN-M-060-079

**DECOUPLING 2-DOF PI CONTROLLER DESIGN
FOR COUPLED-TANK PROCESS**

MAITREE THUMMA

**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**

2008

KMITL-2008-EN-M-060-079

COPYRIGHT 2008

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบตัวควบคุมพีไอแบบสององศาอิสระด้วยดีคัมปลิ่ง สำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน
นักศึกษา	นายไมตรี ธรรมมา
รหัสนักศึกษา	48060857
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2551
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.อาจินต์ น่วมสำราญ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมพีไอแบบสององศาอิสระ (Two Degree of Freedom: 2-DOF PI) ด้วยดีคัมปลิ่งสำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน ซึ่งกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันแบบสองอินพุตสองเอาต์พุตที่นำมาวิเคราะห์นี้มีคุณลักษณะของความไม่เป็นเชิงเส้นและความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์สูง ทั้งนี้เพราะการมีผลต่อกันของระดับน้ำทั้งสองถัง วิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกันในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ส่วนของตัวดีคัมปลิ่งจะสร้างกระบวนการแบบหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุตขึ้นมาใหม่สองกระบวนการ ทำให้สามารถออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับแต่ละกระบวนการด้วยเทคนิคทางเดินราก (Root Locus Technique) โดยดีคัมปลิ่งนี้ทำให้สามารถลดผลกระทบที่มีต่อกันระหว่างถังน้ำทั้งสองและทำให้สามารถออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอได้ง่ายขึ้น

Thesis Title	Decoupling 2-DOF PI Controller Design for Coupled-Tank Process
Student	Mr. Maitree Thumma
Student ID.	48060857
Degree	Master of Engineering
Program	Instrumentation Engineering
Year	2008
Thesis Advisor	Asst. Prof. Arjin Numsomran

ABSTRACT

This thesis presents the design of 2-DOF PI Controller with decoupling for coupled-tank process. The Analyzed coupled-tank process which is TITO plant has nonlinear characteristic and high uncertainty of parameters because of interaction between both tanks water level. The design method of PI Controller for coupled-Tank process in this thesis. The decoupling part creates two new of SISO plants then we can design PI controller for each SISO plant by root locus technique. By this decoupling method, we can decrease the effects of interaction and make it is easier in PI controller design

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำ คำปรึกษา และอนุเคราะห์อุปกรณ์เครื่องมือในการทำงานวิจัยจาก ผศ.อาจินต์ น่วมสำราญ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ และเป็นผู้ที่ปรับวิธีคิดและทัศนคติเกี่ยวกับงานวิจัยและการดำเนินชีวิตให้กับข้าพเจ้าด้วยดีเสมอมา ข้าพเจ้ารู้สึกทราบบ้างซึ่งในความอนุเคราะห์จากท่าน และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รศ. วิทยา ทิพย์สุวรรณพร รศ. วิริยะ กองรัตน์ และ รศ. สุพรรณ กุลพานิช ที่ให้คำแนะนำและสอบถามความคืบหน้าของการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีเสมอมา

ขอกราบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมทุกคนที่เป็นกำลังใจ

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์และบัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ เกี่ยวกับการศึกษาตลอดมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้านทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ไมตรี ธรรมมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....	3
1.6 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.7 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
บทที่ 2 กระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน.....	5
2.1 กล่าวนำ.....	5
2.2 องค์ประกอบของกระบวนการ.....	5
2.3 การหาสมการคุณลักษณะของกระบวนการ.....	14
2.4 โปรแกรมที่ใช้ในการทดลองวิจัย.....	18
2.5 บทสรุป.....	33
บทที่ 3 วิธีการออกแบบตัวควบคุม.....	34
3.1 กล่าวนำ.....	34
3.2 การออกแบบดิคัปปลิง.....	34
3.3 การออกแบบตัวควบคุมพีไอ.....	39
3.4 การออกแบบระบบควบคุมแบบสององศาอิสระ (Two Degree of Freedom:2-DOF).....	54
3.5 บทสรุป.....	59

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การจำลองและการทดลอง.....	60
4.1 กล่าวนำ.....	60
4.2 การหาสมการคุณลักษณะของกระบวนการ.....	60
4.3 การจำลองกระบวนการ.....	64
4.4 สรุปผลการทดลอง.....	80
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	81
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	81
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	81
บรรณานุกรม.....	82
ภาคผนวก.....	83
ภาคผนวก ก.....	84
ภาคผนวก ข.....	88
ประวัติผู้เขียน.....	96

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของป้มน้ำ	13
3.1 กฎการหาค่าพารามิเตอร์ของ Ziegler-Nichols โดยวิธีการหาผลตอบสนอง ของอินพุทแบบขั้นบันได	47
3.2 กฎการหาค่าพารามิเตอร์ของ Ziegler-Nichols โดยวิธีการหาอัตราขยายวิกฤติ K_c และคาบเวลาวิกฤติ P_c	48
3.3 MATLAB Program	51
4.1 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาค่าสมการคุณลักษณะของกระบวนการ	63
4.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจากการออกแบบด้วยวิธีต่างๆ	79
4.3 แสดงสมรรถนะของระบบเมื่อทำการเปลี่ยนระดับน้ำจาก 2 cm ไป 4 cm.....	80

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลกระทบต่อกัน	6
2.2 การ์ดแปลงสัญญาณ A/D และ D/A รุ่น PCI-1711	7
2.3 รายละเอียดสัญญาณของแต่ละขา	10
2.4 ลักษณะของอุปกรณ์วัดความดันแตกต่างกัน	10
2.5 ลักษณะการใช้งานของอุปกรณ์วัดความดันแตกต่างกับถังน้ำ	11
2.6 แสดงวงจรขับกระแส	12
2.7 แสดงลักษณะของปั้มน้ำ	13
2.8 เครื่องมือในการวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมแบบหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุต	19
2.9 แสดง Dialog box เกี่ยวกับนำเข้าและออก โมเดล	20
2.10 แสดงเมนูเกี่ยวกับ EDIT	20
2.11 แสดงเมนู VIEW และ dialog box ของโพลวงรอบปิดของระบบควบคุม	21
2.12 เมนูย่อยของการวิเคราะห์และกราฟแสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม	21
2.13 แสดงโครงสร้างทั้งสามรูปแบบในการชดเชยระบบควบคุม	22
2.14 เมนูที่เกิดจากการคลิกขวา	22
2.15 ลักษณะของโปรแกรม Simulink	24
2.16 ตัวอย่างการเขียนโปรแกรมด้วย Simulink	24
2.17 แสดงแบบจำลองของระบบทางกล	25
2.18 แบบจำลองระบบทางกลในรูปแบบของสมการ Differential Equation	26
2.19 ไดอะล็อกบ็อกใส่ค่าพารามิเตอร์ของบล็อก Transfer Fcn	26
2.20 แบบจำลองระบบทางกลในรูปแบบของ Transfer Function	27
2.21 ไดอะล็อกบ็อกใส่ค่าพารามิเตอร์ของบล็อก State-Space	27
2.22 แบบจำลองระบบทางกลในรูปแบบ State-Space	28
2.23 แสดงลักษณะของหน้าต่างพานελ	29
2.24 Numerical Control and Indicator	29
2.25 Boolean Control and Indicator	30
2.26 แสดงการกำหนดอุปกรณ์	31
2.27 แสดงหน้าต่างของไดอะแกรม	31
2.28 การเชื่อมต่อสายสัญญาณ	33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 แสดงโครงสร้างของกระบวนการเมื่อต่อร่วมกับตัวควบคุม.....	35
3.2 ลักษณะทางเดินของรากที่ผ่านจุด s_d	41
3.3 ผลตอบสนองของระบบควบคุม	42
3.4 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมป้อนกลับ	43
3.5 การวางโพลและซีโรของตัวควบคุมพีไอบนทางเดินราก.....	44
3.6 ระบบควบคุมป้อนกลับเมื่อตัวควบคุมเป็นแบบพีไอดี.....	45
3.7 ผลตอบสนองของระบบที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้ง s	46
3.8 ระบบควบคุมลูปิด โดยตัวควบคุมแบบสัดส่วน	48
3.9 การแกว่งอย่างต่อเนื่องด้วยคาบเวลา P_c	48
3.10 ระบบควบคุมแบบพีไอดี	49
3.11 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีไอดีซึ่งออกแบบโดยวิธี Ziegler-Nichols	51
3.12 ผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบพีไอดีต่ออินพุทแบบขั้นบันได	52
3.13 ผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบพีไอดีต่ออินพุทแบบขั้นบันไดเมื่อ $K_p = 18, T_i = 3.077, T_d = 0.7692$	52
3.14 ผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบพีไอดีต่ออินพุทแบบขั้นบันไดเมื่อ $K_p = 39.42, T_i = 3.077, T_d = 0.7692$	53
3.15 แสดงระบบควบคุมป้อนกลับแบบ 2-DOF	54
3.16 แสดงระบบควบคุมป้อนกลับแบบ 2-DOF แบบ Feedforward.....	54
3.17 แสดงระบบควบคุมป้อนกลับแบบ 2-DOF	55
3.18 แสดงโครงสร้างระบบควบคุมป้อนกลับแบบ 2-DOF	56
3.19 แสดงระบบควบคุมป้อนกลับแบบ 2-DOF โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ	56
3.20 แสดงระบบควบคุมป้อนกลับแบบ 2-DOF โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ	57
3.21 แสดงทางเดินของรากของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ	58
3.22 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุม 1-DOF กับ 2-DOF สำหรับ กระบวนการอันดับหนึ่งชนิดศูนย์ ตัวควบคุมเป็นแบบพีไอ	58
3.21 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม 2-DOF เมื่อเพิ่มอัตราขยายของตัวควบคุม.....	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 รูปประกอบการพิจารณาเพื่อหาค่า β_1, β_x	61
4.2 รูปประกอบการพิจารณาเพื่อหาค่า β_2, β_x	62
4.3 โปรแกรมจำลองกระบวนการแบบไม่เป็นเชิงเส้น	64
4.4 ผลตอบสนองของกระบวนการแบบ Open Loop ของถังน้ำใบที่ 1	65
4.5 ผลตอบสนองของกระบวนการแบบ Open Loop ของถังน้ำใบที่ 2	65
4.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างสมการ 4.21 กับ 4.23	69
4.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างสมการ 4.22 กับ 4.24	69
4.8 แสดงทางเดินรากของ $G_{n1}(s)$	71
4.9 แสดงทางเดินรากของ $G_{n2}(s)$	71
4.10 ผลตอบสนองทางด้านเอาต์พุตเมื่อออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางเดินราก (s_d)	72
4.11 ค่า MV เมื่อออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางเดินราก (s_d) โดยมีดีคัปปลิ่ง	73
4.12 ค่า MV เมื่อออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางเดินราก (s_d) โดยไม่มีดีคัปปลิ่ง	73
4.13 แสดงทางเดินรากของ $G_{n1}(s)$	74
4.14 แสดงทางเดินรากของ $G_{n2}(s)$	75
4.15 ผลตอบสนองทางด้านเอาต์พุตเมื่อออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางเดินราก ($z_c = 1/T_i$)	75
4.16 ค่า MV เมื่อออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางเดินราก ($z_c = 1/T_i$) โดยมีดีคัปปลิ่ง	76
4.17 ค่า MV เมื่อออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางเดินราก ($z_c = 1/T_i$) โดยไม่มีดีคัปปลิ่ง	76
4.18 แสดงวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมของโดยโปรแกรม Matlab	77
4.19 ผลตอบสนองทางด้านเอาต์พุตเมื่อออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี Ziegler-Nichols	78
4.20 ค่า MV เมื่อออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี Ziegler-Nichols โดยมีดีคัปปลิ่ง	78
4.21 ค่า MV เมื่อออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี Ziegler-Nichols โดยไม่มีดีคัปปลิ่ง	79

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการศึกษาเกี่ยวกับระบบควบคุมนั้นสิ่งสำคัญก็คือ การศึกษาวิเคราะห์ระบบควบคุมและออกแบบตัวควบคุมเพื่อควบคุมกระบวนการและทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมที่ออกแบบว่าจะสามารถใช้ควบคุมกระบวนการได้ดีเพียงใด กระบวนการโดยทั่วไปแล้วมีมากมายหลายแบบด้วยกัน เช่นระบบที่มีอินพุตและเอาต์พุตเท่ากับหนึ่ง (SISO) ระบบที่มีอินพุตและเอาต์พุตมากกว่าหนึ่ง (MIMO) เป็นต้น สำหรับกระบวนการที่เป็นแบบหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุต (SISO) นั้นก็จะมีวิธีการออกแบบตัวควบคุมที่ง่ายไม่ซับซ้อน ส่วนมากแล้วการออกแบบตัวควบคุมสำหรับควบคุมกระบวนการแบบนี้จะไม่ค่อยมีปัญหามากนัก แต่สำหรับกระบวนการที่เป็นแบบหลายอินพุตหลายเอาต์พุต (MIMO) จะมีความซับซ้อนในการออกแบบตัวควบคุมมากกว่ากระบวนการที่เป็นแบบหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุต (SISO) ซึ่งวิธีการที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการแบบหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุต (SISO) นั้นไม่สามารถนำมาใช้ออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการแบบหลายอินพุตหลายเอาต์พุต (MIMO) ได้เนื่องจากไม่สามารถออกแบบให้ตัวควบคุมทำงานครอบคลุมได้ทั้งย่านการทำงาน กระบวนการ การออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการแบบหลายอินพุตหลายเอาต์พุต (MIMO) นั้นก็จะมีวิธีการต่างๆ ที่นำมาช่วยในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับควบคุมกระบวนการ ซึ่งในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะนำเสนอวิธีการที่ช่วยให้สามารถออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน (Coupled-Tank) ซึ่งเป็นกระบวนการแบบสองอินพุตสองเอาต์พุต (TITO) ได้โดยใช้วิธีตัดปลิง (Decoupling) เข้ามาช่วย

กระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกันเป็นกระบวนการที่มีสองอินพุตสองเอาต์พุต ซึ่งกระบวนการนี้มีความยากในการออกแบบตัวควบคุมเนื่องจากมีวาล์ว (R_1) เชื่อมต่อทั้งสองถังเข้าด้วยกันทำให้ระดับน้ำทั้งสองถังมีผลต่อกัน โดยที่ค่าของผลกระทบที่มีผลต่อกันของระดับน้ำของทั้งสองถังขึ้นอยู่กับ อัตราการไหลเข้า (Q_1), ระดับน้ำในถังที่ 1 และ 2 (h_1, h_2) และค่าสัมประสิทธิ์การเปิดวาล์ว (R_2)

Decoupling เป็นวิธีการที่จะนำมาช่วยในการออกแบบตัวควบคุมเพื่อลดผลการกระทบของระดับน้ำทั้งสองถังสำหรับกระบวนการนี้ เนื่องจากกระบวนการนี้เป็นกระบวนการแบบสองอินพุตสองเอาต์พุตและมีผลต่อกัน โดยปกติแล้วถ้าเป็นกระบวนการแบบสองอินพุตสองเอาต์พุตที่ไม่มีผลต่อกันซึ่งสามารถแยกออกแบบตัวควบคุมแต่ละตัวได้เลย แต่เมื่อกระบวนการมีผลต่อกัน ทำให้ไม่สามารถที่จะแยกกระบวนการออกจากกันเพื่อออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการดังกล่าวได้ จึงจำเป็นที่จะต้องแยก

กระบวนการออกจากกันเพื่อออกแบบตัวควบคุมซึ่งวิธีการที่จะนำเสนอในบทความนี้คือวิธี Decoupling ซึ่งจะช่วยให้สามารถแยกกระบวนการออกเป็นสองส่วน โดยที่ยังคงคุณสมบัติของกระบวนการดังกล่าวไว้เช่นเดิม แล้วจึงทำการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบแต่ละส่วน (ซึ่งเป็นกระบวนการแบบ SISO) สำหรับควบคุมระดับน้ำในแต่ละถังให้ได้ค่าเป้าหมายตามที่ต้องการ โดยมีผลต่อกันน้อยที่สุดหรือไม่มีเลย ดีคัปปลิงยังช่วยลดความซับซ้อนในการออกแบบตัวควบคุมอีกด้วย

วิธีการและทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมนั้น สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีเทคนิคทางเดินของราก (Root Locus Technique) และโครงสร้างของตัวควบคุมที่จะใช้เป็นโครงสร้างของตัวควบคุมพีไอแบบสององศาอิสระ (Two Degree of Freedom PI : 2-DOF PI) ซึ่งสามารถออกแบบและจำลองกระบวนการทั้งหมดโดยใช้โปรแกรม MatLab และโปรแกรม LabVIEW

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

สำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน (Couple-Tank Process) เป็นกระบวนการที่มีการรบกวนกัน (Disturbance) ระหว่างระดับน้ำทั้งสองถังอยู่ตลอดเวลา ยิ่งระดับน้ำของทั้งสองถังมีระดับที่แตกต่างกันมากๆ การรบกวนกันของระดับน้ำก็จะยิ่งมีมากขึ้น ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้สามารถลดผลกระทบการรบกวนกันของระดับน้ำทั้งสองถัง ซึ่งลักษณะและโครงสร้างของตัวควบคุมจะเป็นแบบสององศาอิสระ (Two Degree of Freedom PI : 2-DOF PI) โดยใช้ทฤษฎีของดีคัปปลิงมาช่วยในการออกแบบตัวควบคุม วิธีการออกแบบตัวควบคุมที่นำเสนอมี 3 วิธีด้วยกันคือ (1) ทฤษฎีทางเดินของราก (วางซีโรให้ทางเดินของรากผ่านจุด s_d) (2) ทฤษฎีทางเดินของราก (วางซีโรที่ตำแหน่ง $1/T_i$) และ (3) ทฤษฎีของ Ziegler-Nichole ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบของทั้งสามวิธีจะถูกนำไปทดลองทั้งในขณะที่กระบวนการมีดีคัปปลิงและไม่มีดีคัปปลิง และเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้เพื่อหาวิธีการที่เหมาะสมที่สุดกับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกันโดยการนำสมการคุณลักษณะของกระบวนการที่ได้ไปออกแบบตัวควบคุมโดยตรงเลยก็สามารถทำได้แต่ปัญหาก็คือตัวแปรของกระบวนการที่เพิ่มขึ้น อันดับของกระบวนการที่เพิ่มขึ้นล้วนแล้วแต่ทำให้การออกแบบตัวควบคุมเป็นไปได้ยาก บางครั้งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้อาจจะไม่สามารถควบคุมกระบวนการให้ค่าเป้าหมายเป็นไปตามที่ต้องการได้ เพราะฉะนั้นวิธีการที่น่าจะดีที่สุดในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกันคือการใช้คณิตศาสตร์เข้ามาช่วยในการแยกผลกระทบ

ของสมการคุณลักษณะที่ได้ให้หมดไปเพื่อให้ได้สมการคุณลักษณะของกระบวนการใหม่ขึ้นมาสองกระบวนการ (แยกอิสระจากกัน) แล้วจึงนำสมการที่ได้ไปออกแบบตัวควบคุม

จากแนวคิดดังกล่าวจึงได้นำเอาทฤษฎี Decoupling ซึ่งเป็นวิธีการในการแยกหรือลดผลกระทบของกระบวนการออกจากกันมาช่วย ถ้ามองในมุมมองของคณิตศาสตร์ก็คือการเพิ่มตัวแปรเข้ามาในสมการแล้วสามารถตัดกับตัวแปรในสมการคุณลักษณะของกระบวนการที่ต้องการกำจัดทิ้งไปแล้วทำให้ได้สมการใหม่ขึ้นมาสองสมการซึ่งเป็นสมการของกระบวนการที่แยกอิสระต่อกัน 2 กระบวนการแต่ก็ยังคงคุณสมบัติของกระบวนการเดิมไว้ ข้อดีก็คือทำให้สามารถนำกระบวนการทั้งสองไปออกแบบตัวควบคุมได้ง่ายขึ้นเนื่องจากตัวแปรน้อย อันดับของกระบวนการก็น้อย ยิ่งถ้าสมการที่ได้มีตำแหน่งรากของโพลและซีโรสามารถตัดกัน ได้ก็ยิ่งจะทำให้อันดับของกระบวนการลดลงไปอีกการออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการก็จะทำได้ง่ายขึ้น

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้จะนำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยดีคัปปลิง ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาส่วนใหญ่แล้วการออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการที่มีสองอินพุตสองเอาต์พุตก็จะนำทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการนั้นไปออกแบบตัวควบคุมซึ่งวิธีการออกก็ค่อนข้างที่จะยุ่งยากสำหรับวิธีที่จะนำเสนอเป็นวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยดีคัปปลิงซึ่งสำหรับการนำวิธีการนี้มาใช้ร่วมกับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกันยังไม่แพร่หลายมากนัก หลักการทำงานของวิธีการดังกล่าวจะเป็นการนำดีคัปปลิงมาต่อร่วมกับกระบวนการเพื่อลดผลกระทบระหว่างระดับน้ำของทั้งสองถัง ถ้ากระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกันคือ ทรานส์เฟอร์เมทริกซ์ $G(s)$ และดีคัปปลิงคือ ทรานส์เฟอร์เมทริกซ์ $D(s)$ วิธีการก็นำดีคัปปลิงไปคูณกับกระบวนการแล้วจะได้กระบวนการใหม่ขึ้นมาซึ่งกำหนดให้เป็นทรานส์เฟอร์เมทริกซ์ $T(s)$ ซึ่งจะต้องเป็นเมทริกซ์ทแยงมุม[1] แสดงได้ดังสมการ

$$D(s)G(s) = T(s)$$

$$\begin{bmatrix} D_{11}(s) & D_{12}(s) \\ D_{21}(s) & D_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11}(s) & 0 \\ 0 & T_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

สำหรับหลักการเดิมที่ผู้วิจัยได้ค้นคว้ามาแล้วนั้นปรากฏว่าวิธีการดีคัปปลิงจะถูกนำไปใช้กับกระบวนการแบบหลายอินพุตหลายเอาต์พุต (MIMO) เป็นส่วนใหญ่แต่สำหรับการนำดีคัปปลิงมาใช้ร่วมกับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลกระทบต่อกันนั้นยังไม่มีใครระบุลงมาชัดเจน ดังนั้นการ

เปรียบเทียบวิธีการที่ผู้วิจัยนำเสนอเกี่ยวกับหลักการเดิมจึงเป็นการนำหลักการและวิธีการออกแบบดีคัปปลิ่งสำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลกระทบต่อกัน ไปเปรียบเทียบกับวิธีการออกแบบดีคัปปลิ่งสำหรับกระบวนการแบบหลายอินพุทหลายเอาต์พุท (MIMO) เช่น กระบวนการระดับน้ำสี่ถัง (Quadruple-Tank Process)

1.6 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอแบบสององศาอิสระด้วยดีคัปปลิ่งสำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลกระทบต่อกัน ซึ่งจะใช้ทฤษฎีของ Decoupling มาช่วยในการออกแบบตัวควบคุมเพื่อที่จะลดผลกระทบต่อกันของระดับน้ำทั้งสองถัง โครงสร้างของตัวควบคุมที่ใช้จะเป็นพีไอแบบสององศาอิสระ (2-DOF PI) ซึ่งจะมี Pre-filter เพิ่มเข้ามาเพื่อช่วยลดค่าพุ่งเกิน (Over Shoot) ของกระบวนการ วิธีการออกแบบตัวควบคุมที่จะนำเสนอมีทั้งหมด 3 วิธีด้วยกันคือ

- (1) ทฤษฎีทางเดินของราก (วางซีโรให้ทางเดินรากผ่านจุด s_d)
- (2) ทฤษฎีทางเดินของราก (วางซีโรที่ตำแหน่ง $1/T_i$)
- (3) ทฤษฎีของ Ziegler-Nichole

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน (Coupled-Tank Process) ซึ่งจะกล่าวถึงองค์ประกอบทั้งหมดของกระบวนการ วิธีการหาสมการคุณลักษณะของกระบวนการ และโปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง

บทที่ 3 วิธีการออกแบบตัวควบคุม กล่าวถึงทฤษฎีทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ไม่ว่าจะเป็นทฤษฎีของดีคัปปลิ่ง ทฤษฎีสององศาอิสระ (Two Degree of Freedom: 2-DOF) ทฤษฎีและวิธีการออกแบบตัวควบคุมทั้งสามแบบ

บทที่ 4 การทดลอง กล่าวถึงขั้นตอนและวิธีการทดลองและนำเสนอผลการทดลองที่ได้ทั้งหมด

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

กระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน

2.1 กล่าวนำ

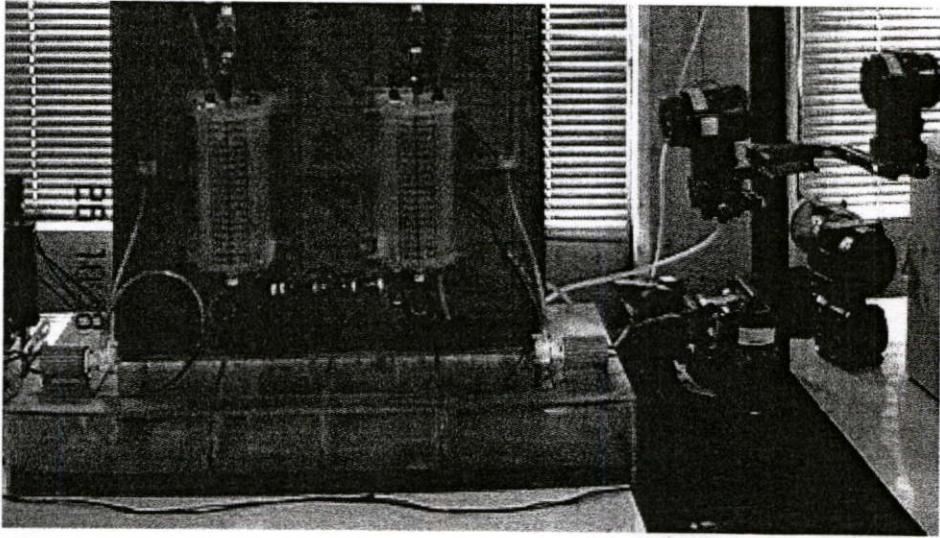
ในบทนี้กล่าวถึงองค์ประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน ไม่ว่าจะเป็นตัวกระบวนการระดับน้ำสองถัง การ์ดแปลงสัญญาณ Analog to Digital และ Digital to Analog ที่ใช้ติดต่อกันระหว่างคอมพิวเตอร์กับกระบวนการ อุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำ อุปกรณ์แปลงสัญญาณ และชุดควบคุมปั๊ม นอกจากนี้แล้วยังจะได้กล่าวถึงวิธีการหาสมการคุณลักษณะของกระบวนการ และโปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะเป็พื้นฐานในการเรียนรู้เกี่ยวกับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกันรวมถึงการติดตั้งอุปกรณ์อีกด้วย

2.2 องค์ประกอบของกระบวนการ

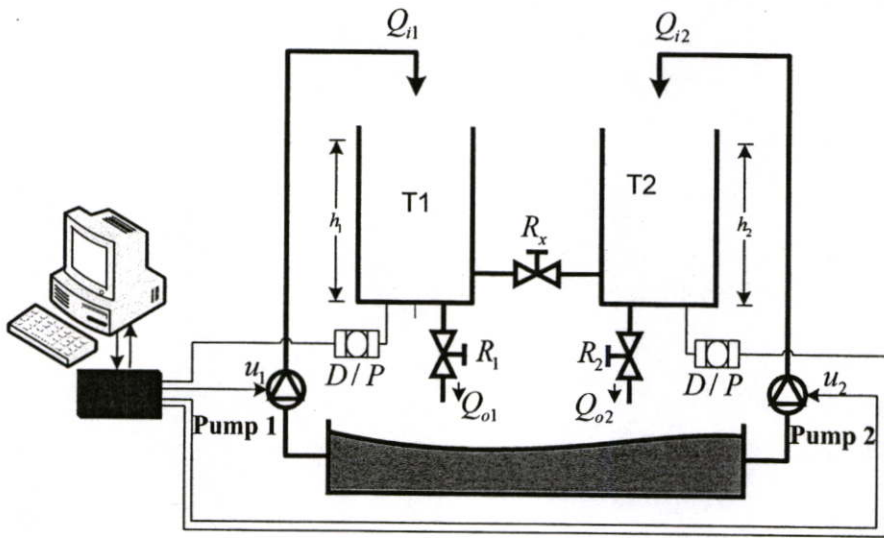
สำหรับโครงสร้างของกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกันนั้นไม่ได้หมายความว่าเพียงแค่อ่างบรรจุน้ำ อินพุท เอาท์พุท และวาล์วเท่านั้น แต่หมายความว่าส่วนประกอบอื่นๆ ที่นำมาประกอบรวมกันแล้วทำให้กระบวนการทำงานตามที่เราร้องการได้ ซึ่งอุปกรณ์ที่นำมาประกอบกันจนกลายเป็นกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกันประกอบไปด้วย โครงสร้างของกระบวนการระดับน้ำ การ์ดแปลงสัญญาณ Analog to Digital และ Digital to Analog อุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำ อุปกรณ์แปลงสัญญาณ ปั๊มน้ำและชุดควบคุมปั๊ม ซึ่งรายละเอียดขององค์ประกอบแต่ละส่วนจะได้อธิบายดังต่อไปนี้

2.2.1 โครงสร้างของกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน

พิจารณากระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันในรูปที่ 2.1 ถ้ามองเฉพาะในส่วนของถังน้ำซึ่งจะประกอบไปด้วยถังน้ำสองใบติดตั้งในลักษณะวางคู่กัน โดยที่ถังน้ำทั้งสองมีขนาดเท่ากันในเชิงปริมาตร คือมีขนาดความจุ 66.25 ลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^3) ถังน้ำแต่ละใบจะมีอินพุทและเอาท์พุทของแต่ละถังซึ่งขนาดของท่อสำหรับน้ำไหลเข้าและไหลออกของถังทั้งสองใบมีขนาดเท่ากันคือ 0.1963 (cm^2) และส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดของกระบวนการก็คือท่อที่ต่อในลักษณะค้ำเปิดกันระหว่างถังน้ำทั้งสองซึ่งจะมีวาล์วกันตรงกลางซึ่งการกวนกันของระดับน้ำของทั้งสองถังจะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการคือ ความแตกต่างกันระหว่างระดับน้ำของถังสองถังยิ่งแตกต่างกันมากผลของการกวนกันก็จะมากตามไปด้วย และอีกหนึ่งปัจจัยก็คือค่าสัมประสิทธิ์การเปิดปิดวาล์ว คือถ้าวาล์วเปิดสูงสุด (ค่าสัมประสิทธิ์ในการเปิดมีค่าเท่ากับ 1) การกวนกันของระดับน้ำก็จะมาก แต่ถ้าวาล์วปิดสุด (ค่าสัมประสิทธิ์ในการเปิดมีค่าเท่ากับ 0) การกวนกันของระดับน้ำก็จะไม่เกิดขึ้น



(ก) กระบวนการจริง



(ข) ไดอะแกรมของกระบวนการ

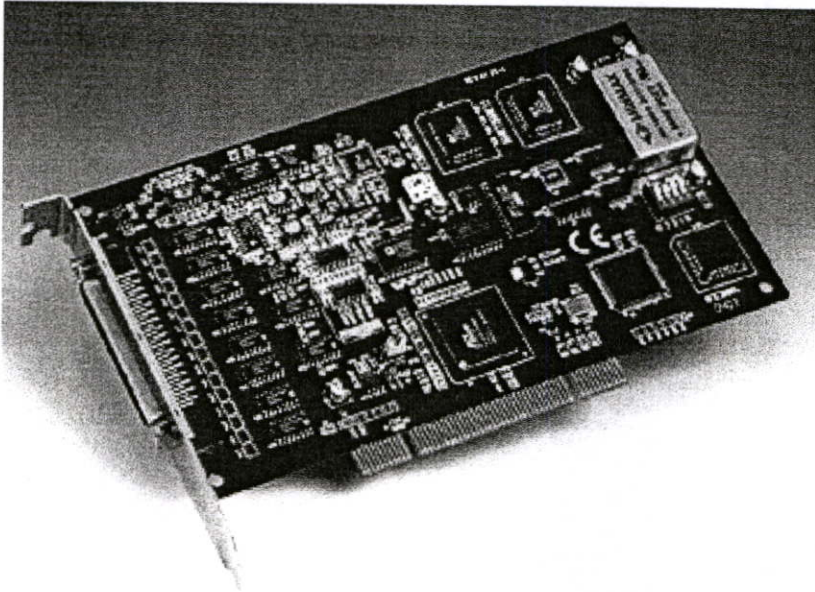
รูปที่ 2.1 กระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน

จากรูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน (Coupled-Tank Process) ซึ่งเป็นกระบวนการแบบสองอินพุตสองเอาพุต (TITO) โดยที่อัตราการไหลเข้าของน้ำถังที่ 1 และถังที่ 2 คือ Q_1 และ Q_2 ตามลำดับ ระดับความสูงของน้ำถังที่ 1 คือ H_1 และถังที่ 2 คือ H_2 อัตราการไหลออกของน้ำถังที่ 1 และถังที่ 2 คือ Q_{o1} และ Q_{o2} อัตราการไหลเข้าของน้ำทั้งสองถังขึ้นอยู่กับอินพุต (แรงดันไฟฟ้า) ที่ป้อนให้กับปั๊มทั้งสองตัว ส่วนอัตราการไหลออกขึ้นอยู่กับวาล์ว R_1 และวาล์ว R_2 และผลกระทบที่มีต่อกันของระดับน้ำทั้งสองถังขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การเปิดวาล์ว R_x ด้วยถ้าค่าสัมประสิทธิ์ในการเปิดวาล์ว R_x มีค่าเป็น 0 (ปิดวาล์ว) เราจะได้กระบวนการแบบ SISO สองกระบวนการซึ่งเราสามารถออกแบบตัวควบคุมได้ง่าย ซึ่งเราจะนำเหตุผลดังกล่าวมาช่วยออกแบบตัว

ควบคุมสำหรับกระบวนการนี้ แต่การที่จะแยกจุดเชื่อมต่อออกจากกันก็ต้องการชดเชยกระบวนการด้วย เพื่อที่จะทำให้การออกแบบตัวควบคุมถูกต้อง

2.2.2 การ์ดแปลงสัญญาณ Analog to Digital และ Digital to Analog

เป็นที่รู้กันดีว่าในการติดต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์อาร์ดแวร์ภายนอกจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ในการแปลงสัญญาณดิจิทัลไปเป็นสัญญาณอะนาล็อก (Digital to Analog: D/A) และแปลงจากสัญญาณอะนาล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital: A/D) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้การ์ดของบริษัท Advantech รุ่น PCI-1711 ซึ่งเป็นการ์ดที่สามารถต่อกับสล็อต PCI ของเครื่องคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะได้ สาเหตุที่ใช้การรุ่นนี้เนื่องจากราคาไม่สูงมากนัก ติดตั้งและกำหนดค่าง่ายและที่สำคัญคือสามารถทำงานร่วมกับโปรแกรม MatLab คุณสมบัติเด่นๆ ของการ์ดรุ่นนี้อธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 2.2 การ์ดแปลงสัญญาณ A/D และ D/A รุ่น PCI-1711

คุณสมบัติของการ์ดแปลงสัญญาณ PCI-1711

Analog Input

Channels:	16 single-ended
Resolution:	12-bit
On-board FIFO :	1K samples
Conversion Time:	10 μ s
Input Range :	$\pm 10V, \pm 5V, \pm 2.5V, \pm 1.25V, \pm 0.625V$
Maximum Input Over Voltage :	$\pm 15V$
Maximum Sampling Rate:	100 kHz

DC Accuracy:

INLE:	± 0.5 LSB
Monotonicity:	12 bits
Offset error:	Adjustable to zero
Gain error:	0.005% FSR (Gain = 1)

AC Accuracy:

SNR:	68 dB
ENOB:	11 bits
Input Protect:	30 Vp-p
Input Impedance:	2M ohm, 5pF
Trigger Mode:	Software, on-board programmable pacer or external

Analog Output

Channels:	2
Resolution:	12-bit
Accuracy:	$\pm 1/2$ LSB
Gain error:	Adjustable to zero
Throughput:	38 kHz (min.)
Slew Rate:	11 V/ μ s
Drift:	40 ppm/ $^{\circ}$ C
Output Impedance:	0.81 ohms
Settling Time:	26 μ s (to $\pm 1/2$ LSB of FSR)
Output Range:	Software programmable
Internal reference:	0 ~ 5 V and 0 ~ 10 V
External reference:	0 ~ +x V @ -x V ($-10 \leq x \leq 10$)
Driving Capability:	3 mA

Digital Input

Channels:	16
Input voltage: Low:	0.8 V max.
High:	2.0 V min.

Digital Output

Channels:	16
Output Voltage:	Low: 0.8 V max. @ 8.0 mA (sink)
High:	2.0 V min. @ -0.4 mA (source)

Programmable Timer/Counter

Channels:	1
Counters:	16 bits
Compatibility:	TTL level
Base Clock:	10 MHz
Max. Input Frequency:	10 MHz

General

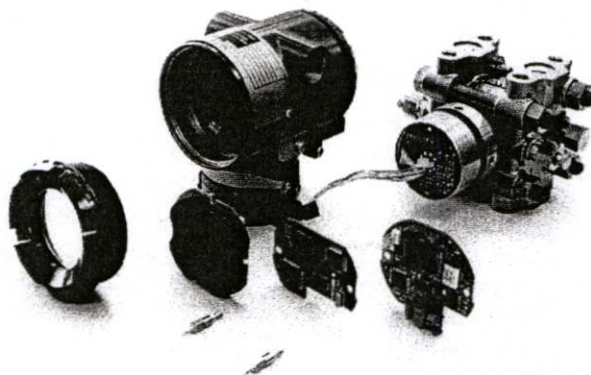
I/O Connector:	68-pin SCSI-II female connector
Operating Temperature:	32 to 140 °F (0 to 60 °C)
Storage Temperature:	-4 to 158 °F (-20 to 70 °C)
Humidity:	5 to 95% (RH non-condensing)
Power:	5 V @ 850 mA (typical) 5 V @ 1 A (max.)
Dimensions:	6.9 x 3.9 in (17.5 x 10 cm)
Compliances:	CE

A10	68	34	A11
A12	67	33	A13
A14	66	32	A15
A16	65	31	A17
A18	64	30	A19
A110	63	29	A111
A112	62	28	A113
A114	61	27	A115
AIGND	60	26	AIGND
AO0_REF	59	25	AOI_REF
AO0_OUT	58	24	AOI_OUT
ADGND	57	23	AOGND
DI0	56	22	DI1
DI2	55	21	DI3
DI4	54	20	DI5
DI6	53	19	DI7
DI8	52	18	DI9
DI10	51	17	DI11
DI12	50	16	DI13
DI14	49	15	DI15
DGND	48	14	DGND
DO0	47	13	DO1
DO2	46	12	DO3
DO4	45	11	DO5
DO6	44	10	DO7
DO8	43	9	DO9
DO10	42	8	DO11
DO12	41	7	DO13
DO14	40	6	DO15
DGND	39	5	DGND
CNT0_CLK	38	4	PACER_OUT
CNT0_OUT	37	3	TRG_GATE
CNT0_GATE	36	2	EXT_TRG
+12V	35	1	+5V

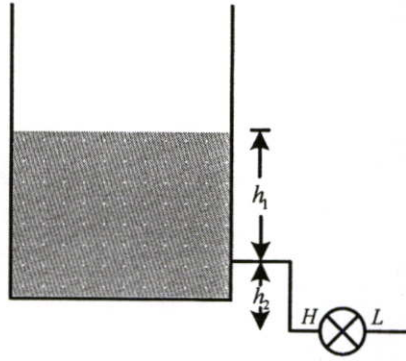
รูปที่ 2.3 รายละเอียดสัญญาณของแต่ละขา

2.2.3 อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณ (Sensor and Transducer)

การวัดระดับโดยวิธีวัดความดันแตกต่างกัน เป็นวิธีที่เลือกใช้ในการวัดระดับของกระบวนการระดับน้ำสองถึงที่มีผลต่อกัน มีหลักการวัดเบื้องต้น ดังนี้



รูปที่ 2.4 ลักษณะของอุปกรณ์วัดความดันแตกต่างกัน



รูปที่ 2.5 ลักษณะการต่อใช้งานของอุปกรณ์วัดความดันแตกต่างกับถังน้ำ

โดยทั่วไปแล้วการวัดระดับด้วยวิธีการวัดความดันแตกต่างเป็นวิธีที่แพร่หลายในวงการอุตสาหกรรมวิธีหนึ่ง ซึ่งอุปกรณ์วัดความดันแตกต่าง จะวัดระดับของของเหลวในถังโดยตรวจจับความดันที่สองจุดคือ ที่จุดความดันสูงในระดับก้นถัง และที่จุดความดันต่ำในระดับสูงสุดของถัง ความดันแตกต่างที่อุปกรณ์วัดความดันแตกต่างตรวจจับได้จะสัมพันธ์กับระดับความสูงของระดับของน้ำในถัง

การวัดระดับของเหลว ควรติดตั้งอุปกรณ์วัดความดันแตกต่างให้อยู่ต่ำกว่าก้นถัง เพื่อให้สามารถวัดได้ครอบคลุมตลอดช่วงการวัด ซึ่งในกรณีนี้เป็นการวัดระดับของน้ำในถังเปิด นั้นหมายถึงพื้นผิวเหนือของเหลวถูกเปิดสู่ความดันบรรยากาศ ดังนั้นความดันที่สัมพันธ์กับระดับของเหลวจะมีค่าเท่ากับ Hydrostatic Pressure หรือ Pressure Head ซึ่งเป็นความดันที่เกิดจากน้ำหนักของของเหลวในระดับนั้นๆ นั่นเอง

จากรูปที่ 2.5 เป็นกรณีการวัดระดับของน้ำในถังโดยใช้อุปกรณ์วัดความแตกต่างเป็นตัวตรวจจับความสัมพันธ์ของความดันที่อุปกรณ์วัดความดันดิฟเฟอเรนเชียลตรวจจับได้กับ Hydrostatic Pressure หรือ Pressure Head และความดันบรรยากาศแสดงได้ดังสมการ 2.1 และสมการ 2.2

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

$$P_{low} = P_{atm} + P_{line} \quad (2.2)$$

โดยกำหนดให้

P_{high}	คือ	ความดันที่ด้านความดันสูงของตัวอุปกรณ์วัดความดันแตกต่าง
P_{low}	คือ	ความดันที่ด้านความดันต่ำของตัวอุปกรณ์วัดความดันแตกต่าง
P_{head}	คือ	Hydrostatic Pressure หรือ Pressure Head ที่เกิดจากน้ำหนักของของเหลวในช่วงการวัด
P_{atm}	คือ	ความดันบรรยากาศ
P_{line}	คือ	ความดันที่เกิดจากของเหลวในสายขางจากก้นถังไปยังด้านความดันสูงของตัวอุปกรณ์วัดความดันแตกต่าง

ความสัมพันธ์ของ Hydrostatic Pressure หรือ Pressure Head กับความสูงของของเหลวในถัง แสดงได้ดังสมการ 2.2

$$\text{Hydrostatic Pressure} = P_{head} = h \times SG_m \quad (2.3)$$

โดยกำหนดให้

P_{head} คือ ค่าความดัน Head ที่เกิดจากน้ำหนักของของเหลวในช่วงการวัด มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรน้ำ

h คือ ค่าความสูงของของเหลว มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

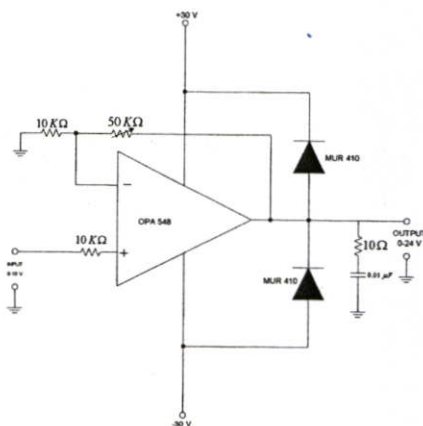
SG_m คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของสาร (ไม่มีหน่วย)

พิจารณาสมการที่ 2.3 ค่าความถ่วงจำเพาะของสารเป็นค่าคงที่ซึ่งเป็นคุณสมบัติประจำตัวของสาร เช่น น้ำ มีค่าความถ่วงจำเพาะ เป็น 1 ดังนั้น ความดันที่เกิดขึ้นจึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสูงของของเหลวในถัง ดังสมการที่ 2.3

$$h = \frac{P}{SG_m} \quad (2.4)$$

2.2.4 อุปกรณ์ควบคุมปั๊มน้ำ

วงจรขับเคลื่อนเป็นวงจรที่ถูกนำมาใช้ในการควบคุมการทำงานของปั๊มน้ำในงานวิจัยชิ้นนี้ เพื่อให้ปั๊มน้ำสามารถจ่ายน้ำตามสัญญาณควบคุมที่ได้รับมาจากตัวควบคุม ซึ่งวงจรขับเคลื่อนแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



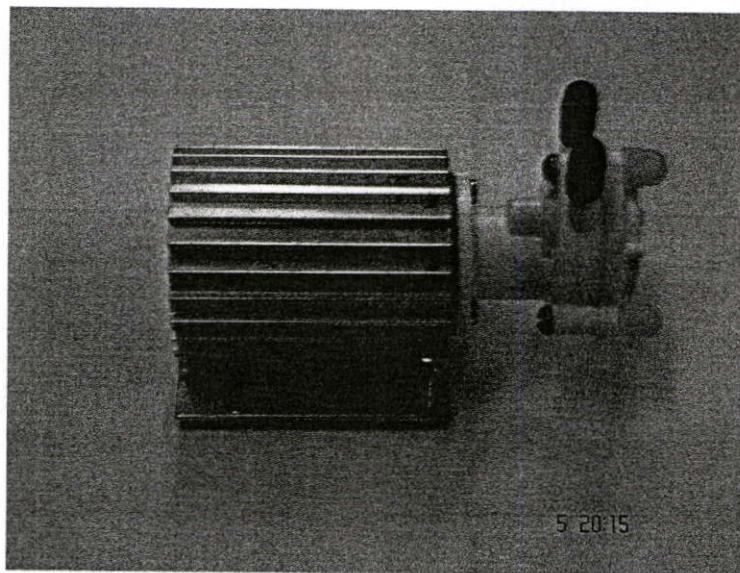
รูปที่ 2.6 แสดงวงจรขับเคลื่อน

จากรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าวงจรขับเคลื่อนจะใช้ Op-Amp เพียงอย่างเดียวเท่านั้น โดย Op-Amp ที่ใช้เป็นเบอร์ OPA-548 ของบริษัท Burr-Brown ซึ่งเป็น Power Op-Amp ที่สามารถจ่ายกระแสได้สูงสุดถึง 3 A และสามารถทำงานภายในช่วงแรงดัน +60V หรือ ±30V ลักษณะของวงจรขับเคลื่อนเป็นวงจร

แบบเชิงเส้น โดยรับอินพุตขนาด 0-10 V จากการ์ด D/A และขยายสัญญาณแรงดันเอาต์พุตให้มีขนาด 0-24 V เพื่อจ่ายให้กับปั้มน้ำ วงจรขับเคลื่อนที่ใช้ในวงจรนี้มี 2 ชุด เนื่องจากปั้มน้ำที่ใช้มี 2 ตัว

2.2.5 ปั้มน้ำ

ปั้มน้ำที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 ตัวสำหรับควบคุมระดับน้ำของถังทั้ง 2 ใบ ซึ่งเป็นปั้มน้ำของบริษัท API Instrument รุ่น P6 10.0006 เป็นปั้มแบบเกียร์ปั้ม ลักษณะของปั้มน้ำแสดงดังรูปที่ 2.7 และข้อมูลคุณสมบัติของปั้มแสดงดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะของปั้มน้ำ

ตาราง 2.1 คุณสมบัติของปั้มน้ำ

รายละเอียด	คุณสมบัติ
Max. Flow rate	2200 ml/min (Vdc)
Max. Suction	10 ft. H ₂ O wet, 4" dry
Max. Pressure	20 psig (46 ft. H ₂ O)
Port Size (OD)	4.8 mm (0.18") hose barb
Power Require (Vdc)	24 Vdc (up to 28 W)
Max. Operating Temp	93 °C (200 °F)
Ambient Fluid Temp	0 to 93 °C (32 to 200 °F)
Max. Viscosity	200 cps
Dimensions	88 x 81 x 92 mm (4 x 1.75 x 2.63)
Weight	1.4 kg (3 lb)

2.3 การหาสมการคุณลักษณะของกระบวนการ

จากรูปที่ 2.1 เป็นรูปของกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกันซึ่งการจะออกแบบตัวควบคุมสำหรับควบคุมกระบวนการนั้นจำเป็นต้องหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการให้ได้ก่อนถึงจะนำแบบจำลองที่ได้นั้นไปออกแบบตัวควบคุมโดยทฤษฎีต่างๆ ต่อไป ซึ่งวิธีการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการหาสมการคุณลักษณะของกระบวนการนั้นสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน สำหรับในการวิจัยจะใช้การทฤษฎีกฎทรงมวลของเบอร์นูลลี (Bernoulli's Law) ซึ่งสามารถพิจารณาวิธีการหาสมการคุณลักษณะของกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกันจากพฤติกรรมการทำงานของแต่ละส่วน ดังจะอธิบายต่อไปนี้

สมการพื้นฐานที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของระบบถังน้ำได้เป็นอย่างดีคือ สมการสมดุลมวล หรือ Mass Balance

$$\frac{dV(t)}{dt} = a \cdot \frac{dh(t)}{dt} = q_{in} - q_{out} \quad (2.5)$$

โดย V คือ ปริมาตรของน้ำในถัง

h คือ ระดับน้ำในถัง

q_{in} คือ อัตราการไหลเข้า

q_{out} คือ อัตราการไหลออก

และจากกฎของเบอร์นูลลี (Bernoulli's Law) บอกว่า

$$p + \frac{1}{2} \rho v_w^2 + \rho gh = const \quad (2.6)$$

ณ ตำแหน่งผิวน้ำ ($v_w = 0$) และ ณ ตำแหน่งก้นถัง ($h = 0$) เราทราบว่าอัตราการไหลออกของน้ำในแต่ละถัง ณ ตำแหน่งวาล์วด้านออก จะมีค่าเท่ากับ

$$q_{out} = \beta_i \cdot a_i \cdot v_w = \beta_i \cdot a_i \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{h_i(t)} \quad (2.7)$$

โดย a_i คือ พื้นที่หน้าตัดของวาล์วด้านออกของถังน้ำ

β_i คือ ค่าความต้านทานการไหลของวาล์วด้านออกของถัง

v_w คือ ความเร็วการเคลื่อนที่ของน้ำ ณ ด้านออกของถังน้ำ

$h_i(t)$ คือ ระดับน้ำในถัง

g คือ ค่าอัตราการเร่งอันเกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก

และปั๊มน้ำในกระบวนการสามารถจ่ายอัตราการไหลที่ค่าต่างๆ สัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้าอินพุทที่

$$q_{pump,j} = k_p \cdot u_j \quad (2.8)$$

โดย k_p อัตราขยายของบิมน้ำ $\left(\frac{m^3}{\text{volt} \cdot \text{sec}}\right)$
 u_j แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)

การวิเคราะห์พฤติกรรมของกระบวนการเพื่อหาความสัมพันธ์ของระดับน้ำ เอาท์พุทของระบบ $h_1(t)$, $h_2(t)$ และแรงดันไฟฟ้าอินพุทของระบบ $u_1(t)$, $u_2(t)$ ในรูปของ Transfer Matrix ของระบบ ดังต่อไปนี้

ใช้สมการสมมูลมวล กฎของเบอร์นูลลี (Bernoulli's Law) พิจารณาหาสมการดิฟเฟอเรนเชียลแบบไม่เป็นเชิงเส้นของกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน ดังนี้

พิจารณาจากถังที่ 1

$$\frac{dh_1(t)}{dt} = -\frac{\beta_1 a_1}{A} \sqrt{2gh_1(t)} - \frac{\beta_x a_x}{A} \text{sgn}(h_1(t) - h_2(t)) \sqrt{2g|h_1(t) - h_2(t)|} + \frac{k_1}{A} u_1(t) \quad (2.9)$$

พิจารณาจากถังที่ 2

$$\frac{dh_2(t)}{dt} = -\frac{\beta_2 a_2}{A} \sqrt{2gh_2(t)} + \frac{\beta_x a_x}{A} \text{sgn}(h_1(t) - h_2(t)) \sqrt{2g|h_1(t) - h_2(t)|} + \frac{k_2}{A} u_2(t) \quad (2.10)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่หน้าตัดของถัง (cm^2)

a_1, a_2 คือ พื้นที่หน้าตัดของรูทางออกของถังที่ 1 และ 2 (cm^2)

a_x คือ พื้นที่หน้าตัดของรูทางออกระหว่างถังที่ 1 และ ถังที่ 2 (cm^2)

h_1, h_2 คือ ระดับน้ำในถังที่ 1 และ 2 (cm)

u_1, u_2 คือ แรงดันที่จ่ายให้กับบิมน้ำที่ 1 และ 2; (Volt)

β_1, β_2 คือ ค่าความต้านทานการไหลของวาล์วที่ตำแหน่งทางออกของถังที่ 1 และ 2

β_x คือ ค่าความต้านทานการไหลของวาล์วที่ตำแหน่งเชื่อมต่อระหว่างถังที่ 1 และ 2

g คือ ค่าอัตราเร่งอันเกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก (cm/s^2)

k_1, k_2 คือ ค่าอัตราขยายของบิมน้ำ ($cm^3/V \cdot s$)

อัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้าถังที่ 1 จะเป็นสัดส่วนกับ $k_{p1}, u_1(t)$ อัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้าถังที่ 2 จะเป็นสัดส่วนกับ $k_{p2}, u_2(t)$ โดยการรบกวนกันของระบบอันเกิดจากความแตกต่างของระดับระหว่างถังทั้งสอง ส่งผลต่อระดับน้ำในถังและการควบคุมระดับน้ำในถัง สัญญาณอินพุทหรือสัญญาณควบคุมที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการคือ $u_1(t), u_2(t)$ (ค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับบิมน้ำ) และสัญญาณเอาต์พุทที่วัดจากกระบวนการคือระดับน้ำในถังที่ 1 และถังที่ 2 $h_1(t), h_2(t)$

เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุทและเอาต์พุทของกระบวนการในรูปของ Transfer Matrix $G_y(s)$ โดยที่อินพุทของกระบวนการแทนด้วยเวกเตอร์ $U = [U_1(s) \ U_2(s)]^T$ และ

เอาที่พู่ของกระบวนการแทนด้วยเวกเตอร์ $H = [H_1(s) \ H_2(s)]^T$ จากสมการ 2.9 และสมการ 2.10 แสดงกระบวนการในรูปของฟังก์ชัน $\dot{h} = f(h, u)$ โดยฟังก์ชัน f เป็นฟังก์ชันของตัวแปรระดับน้ำ h และค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับปั๊มน้ำ u ซึ่งจะเห็นได้ว่าสมการประกอบไปด้วยพจน์รากลำดับสองของตัวแปร $h_i(t)$ ดังนั้นฟังก์ชัน $f(h, u)$ จึงเป็นฟังก์ชันแบบไม่เป็นเชิงเส้น

$$\begin{bmatrix} H_1(s) \\ H_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

ในกรณีที่เรากำลังวิเคราะห์สมการของกระบวนการด้วยวิธีทางพีชคณิตแบบเชิงเส้น จำเป็นจะต้องทำการปรับความเป็นเชิงเส้นของฟังก์ชันดังกล่าวให้อยู่ในสภาวะคงตัว Steady State (\bar{h}, \bar{u}) ซึ่งในสภาวะ Steady State ค่าของฟังก์ชันมีค่าเท่ากับศูนย์ $\dot{h} = f(\bar{h}, \bar{u}) = 0$ โดยจะทำการจัดรูปฟังก์ชัน $\dot{h} = f(h, u)$ ให้อยู่ในรูปแบบของอนุกรมเทเลอร์ ดังนี้

$$\begin{aligned} y_1 = \frac{dh_1(t)}{dt} \approx & f(\bar{h}_1, \bar{h}_2, \bar{u}_1) + \left. \frac{\partial f(h_1, h_2, u_1)}{\partial h_1} \right|_{h_1=\bar{h}_1} \cdot (h_1(t) - \bar{h}_1) + \left. \frac{\partial f(h_1, h_2, u_1)}{\partial h_2} \right|_{h_2=\bar{h}_2} \cdot (h_2(t) - \bar{h}_2) \\ & + \left. \frac{\partial f(h_1, h_2, u_1)}{\partial u_1} \right|_{u_1=\bar{u}_1} \cdot (u_1(t) - \bar{u}_1) \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} y_2 = \frac{dh_2(t)}{dt} \approx & f(\bar{h}_1, \bar{h}_2, \bar{u}_2) + \left. \frac{\partial f(h_1, h_2, u_2)}{\partial h_1} \right|_{h_1=\bar{h}_1} \cdot (h_1(t) - \bar{h}_1) + \left. \frac{\partial f(h_1, h_2, u_2)}{\partial h_2} \right|_{h_2=\bar{h}_2} \cdot (h_2(t) - \bar{h}_2) \\ & + \left. \frac{\partial f(h_1, h_2, u_2)}{\partial u_2} \right|_{u_2=\bar{u}_2} \cdot (u_2(t) - \bar{u}_2) \end{aligned} \quad (2.13)$$

จากการกระจายสมการในรูปของอนุกรมเทเลอร์ในสมการที่ 2.7 จะได้ตั้งสมการของกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันแบบเชิงเส้นดังสมการที่ 2.14 และสมการ 2.15

$$\frac{dH_1(t)}{dt} = -\frac{1}{T_1} H_1(t) - \frac{1}{T_x} [H_1(t) - H_2(t)] + \frac{k_{p1}}{A} U_1(t) \quad (2.14)$$

$$\frac{dH_2(t)}{dt} = -\frac{1}{T_2} H_2(t) + \frac{1}{T_x} [H_1(t) - H_2(t)] + \frac{k_{p2}}{A} U_2(t) \quad (2.15)$$

โดยที่ $H_i(t) = h_i(t) - \bar{h}_i$ คือ ตัวแปรแสดงความเบี่ยงเบนของระดับน้ำจากค่าที่สภาวะ Steady State

$U_j(t) = u_j(t) - \bar{u}_j$ คือ เป็นตัวแปรแสดงความเบี่ยงเบนของแรงดันไฟฟ้าอินพุตจากค่าที่สภาวะ Steady State

เมื่อกำหนดให้

$$T_1 = \frac{A}{\beta_1 a_1} \sqrt{\frac{2\bar{h}_1}{g}} \quad T_2 = \frac{A}{\beta_2 a_2} \sqrt{\frac{2\bar{h}_2}{g}} \quad T_x = \frac{A}{\beta_x a_x} \sqrt{\frac{2|\bar{h}_1 - \bar{h}_2|}{g}} \quad (2.16)$$

\bar{h}_1 และ \bar{h}_2 คือระดับน้ำ ณ จุดทำงานของกระบวนการ, T_1 คือค่าคงตัวของเวลาที่ 1, T_2 คือค่าคงตัวของเวลาที่ 2, T_x คือค่าคงตัวเวลาระหว่างครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2

เมื่อทำการแปลงลาปลาซและจัดรูประบบสมการเชิงเส้นของกระบวนการระดับน้ำที่ถึงจะสามารถแสดงกระบวนการในรูปของทรานเฟอร์เมทริกซ์ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} H_1(s) \\ H_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

เมื่อสมาชิกของเมทริกซ์ $G_{ij}(s)$ มีค่าดังต่อไปนี้

$$G_{11}(s) = \frac{\frac{k_1}{A} \left(s + \frac{(T_x + T_2)}{T_2 T_x} \right)}{s^2 + \left(\frac{T_1 T_x + T_2 T_x + 2T_1 T_2}{T_1 T_2 T_x} \right) s + \left(\frac{1}{T_1 T_2} + \frac{1}{T_1 T_x} + \frac{1}{T_2 T_x} \right)} \quad (2.18)$$

$$G_{12}(s) = \frac{\frac{k_2}{A} \cdot \frac{1}{T_x}}{s^2 + \left(\frac{T_1 T_x + T_2 T_x + 2T_1 T_2}{T_1 T_2 T_x} \right) s + \left(\frac{1}{T_1 T_2} + \frac{1}{T_1 T_x} + \frac{1}{T_2 T_x} \right)} \quad (2.19)$$

$$G_{21}(s) = \frac{\frac{k_1}{A} \cdot \frac{1}{T_x}}{s^2 + \left(\frac{T_1 T_x + T_2 T_x + 2T_1 T_2}{T_1 T_2 T_x} \right) s + \left(\frac{1}{T_1 T_2} + \frac{1}{T_1 T_x} + \frac{1}{T_2 T_x} \right)} \quad (2.20)$$

$$G_{22}(s) = \frac{\frac{k_2}{A} \left(s + \frac{(T_x + T_1)}{T_1 T_x} \right)}{s^2 + \left(\frac{T_1 T_x + T_2 T_x + 2T_1 T_2}{T_1 T_2 T_x} \right) s + \left(\frac{1}{T_1 T_2} + \frac{1}{T_1 T_x} + \frac{1}{T_2 T_x} \right)} \quad (2.21)$$

แทนค่าสมาชิกของเมทริกซ์ $G_{ij}(s)$ ลงในสมการ 2.22 จะได้

$$\begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\frac{k_1}{A} \left(s + \frac{(T_x + T_2)}{T_2 T_x} \right)}{s^2 + \left(\frac{T_1 T_x + T_2 T_x + 2T_1 T_2}{T_1 T_2 T_x} \right) s + \left(\frac{1}{T_1 T_2} + \frac{1}{T_1 T_x} + \frac{1}{T_2 T_x} \right)} & \frac{\frac{k_2}{A} \cdot \frac{1}{T_x}}{s^2 + \left(\frac{T_1 T_x + T_2 T_x + 2T_1 T_2}{T_1 T_2 T_x} \right) s + \left(\frac{1}{T_1 T_2} + \frac{1}{T_1 T_x} + \frac{1}{T_2 T_x} \right)} \\ \frac{\frac{k_1}{A} \cdot \frac{1}{T_x}}{s^2 + \left(\frac{T_1 T_x + T_2 T_x + 2T_1 T_2}{T_1 T_2 T_x} \right) s + \left(\frac{1}{T_1 T_2} + \frac{1}{T_1 T_x} + \frac{1}{T_2 T_x} \right)} & \frac{\frac{k_2}{A} \left(s + \frac{(T_x + T_1)}{T_1 T_x} \right)}{s^2 + \left(\frac{T_1 T_x + T_2 T_x + 2T_1 T_2}{T_1 T_2 T_x} \right) s + \left(\frac{1}{T_1 T_2} + \frac{1}{T_1 T_x} + \frac{1}{T_2 T_x} \right)} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

โดยกำหนดให้

A คือ พื้นที่หน้าตัดของถัง (cm^2)

a_1, a_2 คือ พื้นที่หน้าตัดของรูทางออกของถังที่ 1 และถังที่ 2 (cm^2)

- a_x คือ พื้นที่หน้าตัดของรูที่เชื่อมต่อระหว่างถังที่ 1 และถังที่ 2 (cm^2)
- β_1, β_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเปิดวาล์วที่ต่อทางด้านออกของถังที่ 1 และถังที่ 2
- β_x คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเปิดวาล์วที่ต่อระหว่างถังที่ 1 และถังที่ 2
- g คือ แรงโน้มถ่วงของโลก (cm/s^2)
- k_1, k_2 คือ ค่าอัตราขยายของปั๊มน้ำ ($cm^3/V \cdot s$)

สมการที่ 2.17 นี้เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม ตัวแปรเอาต์พุตคือระดับน้ำในถังที่ 1 และ 2 $h_1(t), h_2(t)$ ตัวแปรอินพุตคือค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับปั๊มน้ำ ณ ถังที่ 1 และถังที่ 2 เป็นกระบวนการแบบสองอินพุต สองเอาต์พุต $u_1(t), u_2(t)$ และมีการ Cross Coupling กันระหว่างอินพุตและเอาต์พุตทั้งสอง

2.4 โปรแกรมที่ใช้ในการทดลองวิจัย

สำหรับโปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีอยู่ 2 แกรมด้วยกันคือ โปรแกรม MatLab และ โปรแกรม LabVIEW ซึ่งโปรแกรมทั้งสองสามารถใช้ออกแบบและควบคุมได้เป็นอย่างดีอีกทั้งยังสามารถทำงานร่วมกับการ์ด A/D และ D/A ของบริษัท Advantech รุ่น PCI-1711 ได้ทั้งสองโปรแกรม โดยโปรแกรม MatLab ที่ใช้เป็นเวอร์ชัน 6.5 และ 2006a ส่วน โปรแกรม LabVIEW จะเป็นเวอร์ชัน 8.2

โปรแกรม Matlab จะถูกใช้ในการออกแบบตัวควบคุมและใช้จำลองกระบวนการ ส่วนโปรแกรม LabVIEW นั้นในวิทยานิพนธ์เล่มนี้นำมาใช้สำหรับควบคุมกระบวนการจริงซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถจำลองกระบวนการระดับน้ำไปแสดงผลในโปรแกรมได้ซึ่งจะแสดงผลในรูปกราฟฟิกส์ที่สวยงาม แต่เนื่องจากว่าอุปกรณ์แสดงผลตอบสนองทางด้านเอาต์พุตนั้น เส้นกราฟที่ได้นั้นยากต่อการวิเคราะห์หาสมรรถนะ เช่น ค่าพุงเกิน ค่าเวลาเข้าที่ เป็นต้น จึงทำการบันทึกค่าผลการทดลองที่ได้ลงในโปรแกรม LabVIEW ซึ่งในโปรแกรมมีฟังก์ชันในการบันทึกค่าที่ได้จากการทดลอง แล้วจึงนำไปพล็อตกราฟในโปรแกรม Matlab เพื่อให้สามารถดูกราฟได้ง่ายและสามารถที่จะนำไปวิเคราะห์หาสมรรถนะของระบบต่อไปได้

สำหรับเครื่องมือหรือโปรแกรมย่อยของโปรแกรมทั้งสองนั้นมีอยู่มาก ผู้วิจัยจึงขออธิบายถึงส่วนประกอบของโปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัยนี้เท่านั้น ซึ่งรายละเอียดแสดงได้ดังต่อไปนี้

2.4.1 โปรแกรม MatLab

ในส่วนของโปรแกรม MatLab ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะขอกล่าวเครื่องมือ (Tool) ที่มีอยู่ในโปรแกรม 2 ตัว คือ SISOTOOL และ Simulink สำหรับ SISOTOOL จะเป็นเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมแบบหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุตในโดเมนเวลา ส่วน Simulink สามารถใช้ใน

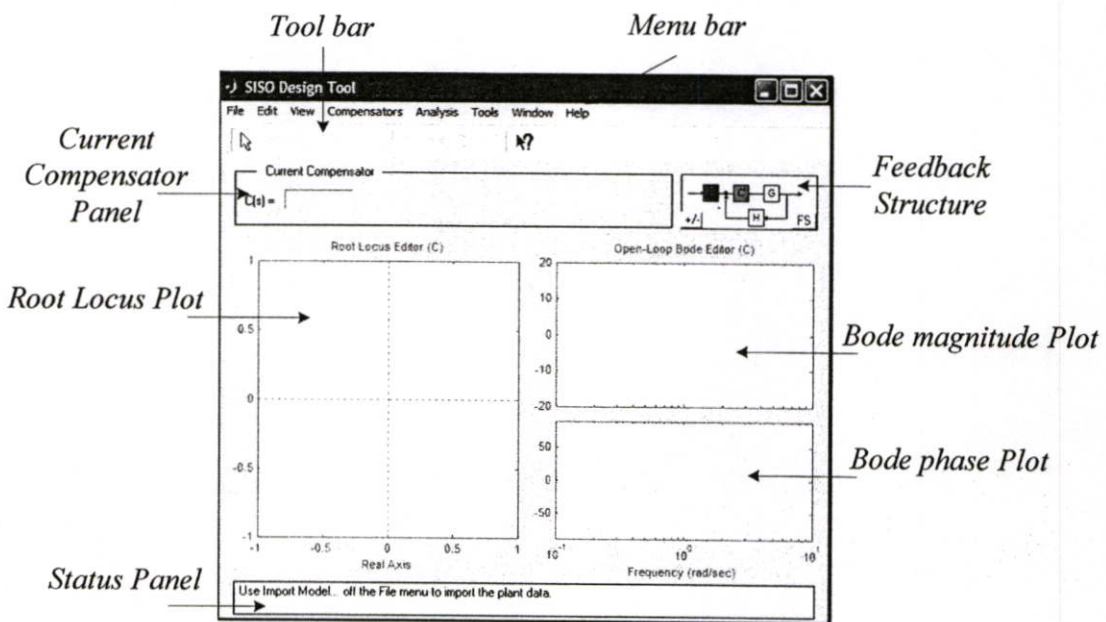
การสร้างแบบจำลองทางกายภาพของระบบต่างๆ ให้อยู่ในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ ใช้ในการจำลองการทำงาน และ วิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบ

- SISOTOOL

SISOTOOL เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมแบบหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุตซึ่งสามารถเรียกใช้งานได้ในโปรแกรม MatLab โดยการพิมพ์คำสั่งดังนี้

```
>>sisotool
```

หลังจากพิมพ์คำสั่ง sisotool ในโปรแกรม MatLab แล้วจะปรากฏหน้าต่างของ ส่วนประกอบที่สำคัญในหน้าต่างนี้อยู่ 3 ส่วน ได้แก่ เมนูบาร์ ทูลบาร์ และ เมนูที่เกิดจากการคลิกขวา ในส่วนของเครื่องมือในการวิเคราะห์ระบบควบคุมมี แผนภาพทางเดินราก แผนภาพโบด และแผนภาพแบบอื่น ซึ่งในการวิเคราะห์ระบบควบคุมนั้นสามารถเปลี่ยนแปลงอัตราขยายของระบบควบคุมหรือเปลี่ยนตำแหน่งโพลซีโรของตัวชดเชยหรือตัวควบคุม ซึ่งสามารถที่จะเห็นผลการเปลี่ยนแปลงของการวิเคราะห์ในทันที และยังสามารถดูผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ต้องการออกแบบว่าเป็นไปตามข้อกำหนดที่ต้องการหรือไม่



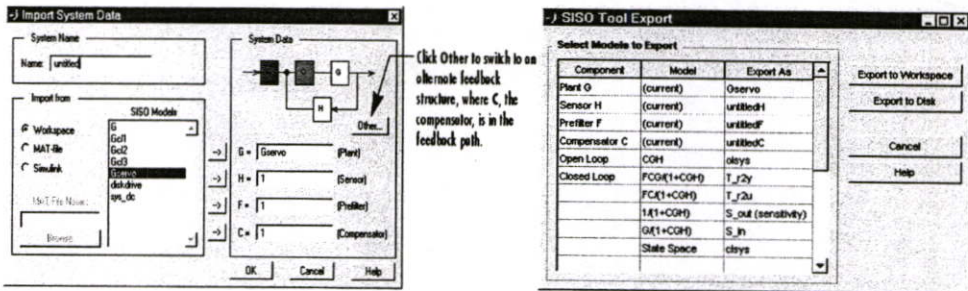
รูปที่ 2.8 เครื่องมือในการวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมแบบหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุต

เนื่องจากชุดคำสั่งในหน้าต่าง SISO Design Tool มีคำสั่งค่อนข้างมาก ในที่นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะคำสั่งที่ใช้บ่อยๆ เท่านั้น เพื่อให้เนื้อหากระชับและเข้าใจง่าย สำหรับคำสั่งที่จำเป็นในงานวิจัยนี้สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

- เมนูบาร์ (MENUBAR)

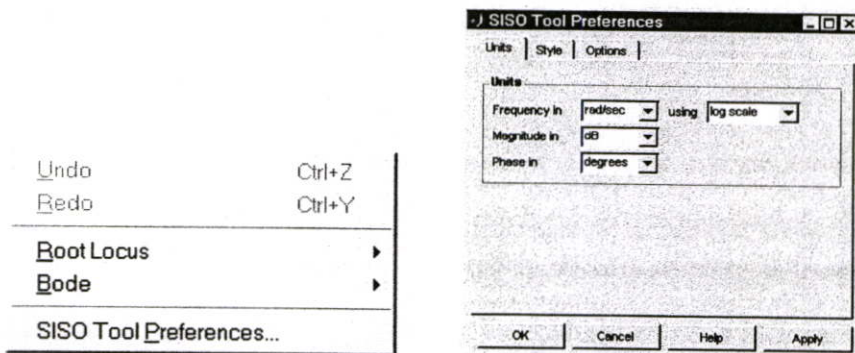
ในเมนูบาร์ประกอบไปด้วยกลุ่มคำสั่งต่างๆ หลายคำสั่งแต่จะของกล่าวถึงเฉพาะชุดคำสั่ง File, View และ Analysis เท่านั้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

- **File** เป็นคำกลุ่มสั่งเกี่ยวกับการจัดการ ไฟล์ ซึ่งคำสั่งย่อยที่อยู่ภายในมีดังนี้
 - Import and export models คำสั่งนำเข้าและส่งออกโมเดลระบบควบคุม
 - Save and reload sessions คำสั่งการเรียกและเก็บขั้นตอนการออกแบบ
 - Set toolbox preferences คำสั่งในการกำหนดค่าอ้างอิงในทุลบล็อก
 - Print and print to figure คำสั่งในการพิมพ์ออกเครื่องพิมพ์และพิมพ์รูป
 - Close the SISO Design Tool คำสั่งปิดหน้าต่างทุลบล็อก



รูปที่ 2.9 แสดง Dialog box เกี่ยวกับการนำเข้าและออกโมเดล

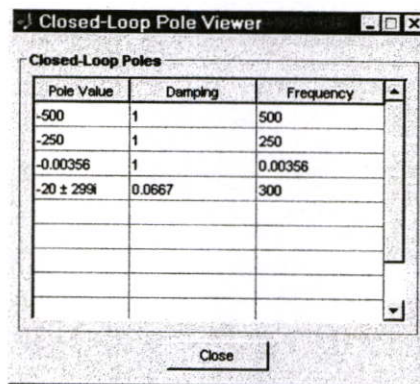
- **Edit** เป็นกลุ่มคำสั่งเกี่ยวกับการแก้ไขค่าต่างในระบบควบคุม
 - Change units คำสั่งเปลี่ยนหน่วยของระบบเช่น ความถี่ rad/sec เป็น Hz
 - Add plot grids, change font styles for titles, labels, etc., and change axes foreground colors คำสั่งในการเปลี่ยนรูปแบบเส้น สีเส้น และลักษณะตัวอักษร
 - Change the compensator format คำสั่งเปลี่ยนฟอร์มของตัวชดเชย
 - Show or hide system poles and zeros in Bode diagrams คำสั่งแสดงหรือไม่แสดงสัญลักษณ์ซีโรและโพลในแผนภาพโบด



รูปที่ 2.10 แสดงเมนูเกี่ยวกับ EDIT

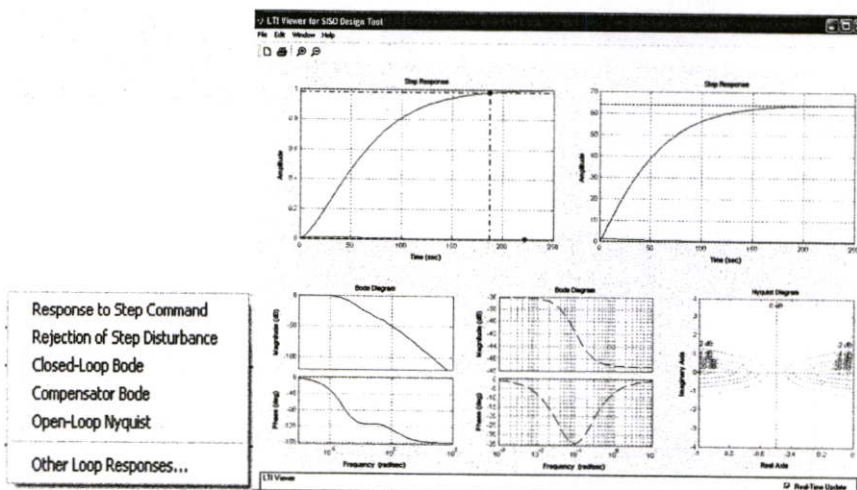
- **VIEW** เป็นกลุ่มคำสั่งเกี่ยวกับการดูข้อมูลของระบบควบคุม
 - Root Locus and Bode Diagrams คือ คำสั่งในการแสดงแผนภาพทางเดินรากและแผนภาพแบบโบด
 - Open-Loop Nichols คือคำสั่งในการแสดงแผนภาพนิโคล
 - Pre-filter Bode คือคำสั่งในการแสดงกราฟโบดร่วมกับ Pre-filter
 - System Data คือคำสั่งในการแสดงข้อมูลของระบบเช่น ข้อมูลตัวชดเชย ข้อมูลระบบควบคุม เป็นต้น
 - Closed-Loop Poles คือคำสั่งแสดงตำแหน่งโพลวงรอบปิดของระบบควบคุม
 - Design History คือคำสั่งแสดงข้อมูลที่เรากะทำกับระบบควบคุมตั้งแต่นั้น

- ✓ Root Locus
 - ✓ Open-Loop Bode
 - Open-Loop Nichols
 - Pre-filter Bode
-
- System Data
 - Closed-Loop Poles
 - Design History



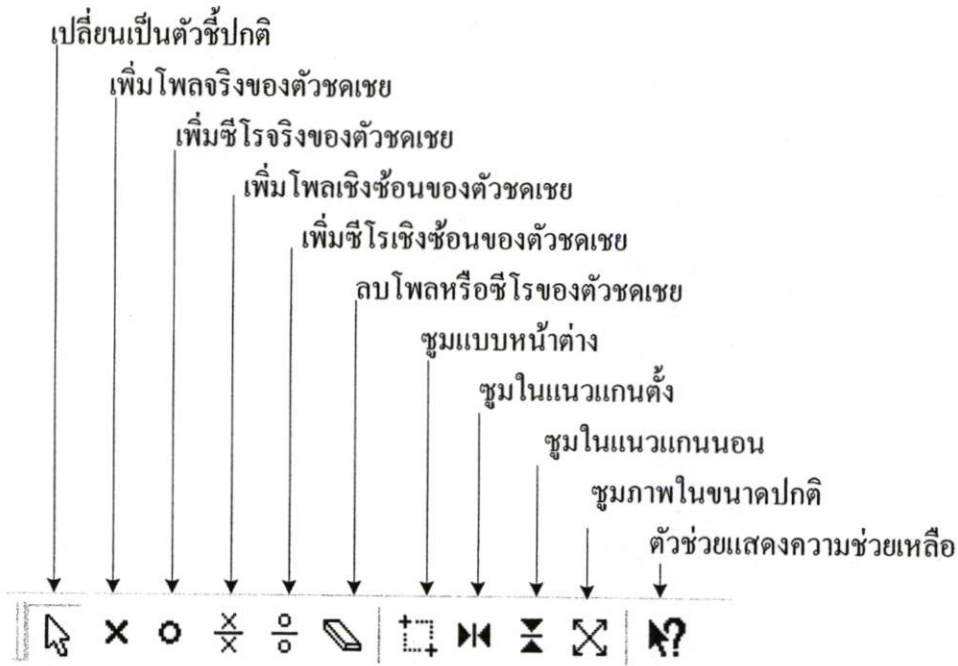
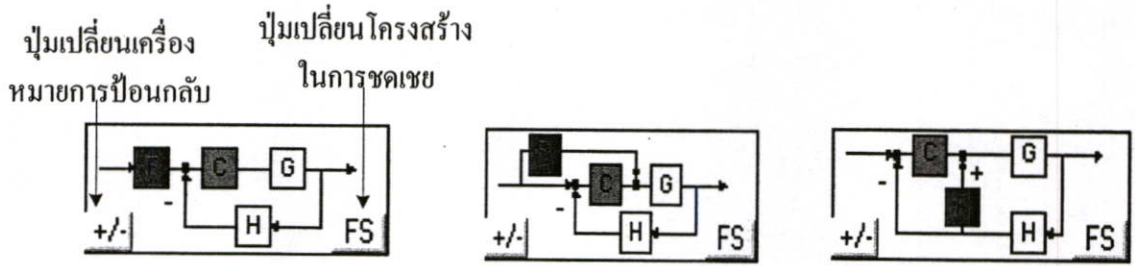
รูปที่ 2.11 แสดงเมนู VIEW และ dialog box ของโพลวงรอบปิดของระบบควบคุม

- Analysis กลุ่มคำสั่งในการแสดงการวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบควบคุมและตัวชดเชยในรูปแบบกราฟในโดเมนเวลา



รูปที่ 2.12 เมนูย่อยของการวิเคราะห์และกราฟแสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม

- ทูลบาร์ (Tool Bar) อุปกรณ์และเครื่องมือในการใช้งาน Tool bar อธิบายในได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงโครงสร้างทั้งสามรูปแบบในการชดเชยระบบควบคุม

- เมนูที่เกิดจากการคลิกขวา (Right-Click Menu)

ในการออกแบบและวิเคราะห์ระบบควบคุมเมนูที่เกิดจากการคลิกขวาดูว่าเป็นเมนูที่ช่วยให้เราสะดวกในการใช้งาน SISO Design Tool เป็นอย่างมาก ซึ่งคำสั่งย่อยที่เกิดจากเมนูคลิกขวาสามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 2.14 เมนูที่เกิดจากการคลิกขวา

ADD คือคำสั่งในการเพิ่มโพลหรือซีโรของตัวชดเชย

Delete คือคำสั่งในการลดโพลหรือซีโรของตัวชดเชย

EDIT Compensator คือคำสั่งในการแก้ไขตัวชดเชย

Show คือ คำสั่งในการแสดงค่าข้อกำหนดในโดเมนความถี่


Design Constrain คือคำสั่งในการกำหนดเงื่อนไขข้อกำหนดในการออกแบบแบ่งเป็น ๒ ส่วน คือ โดเมนเวลาและโดเมนความถี่

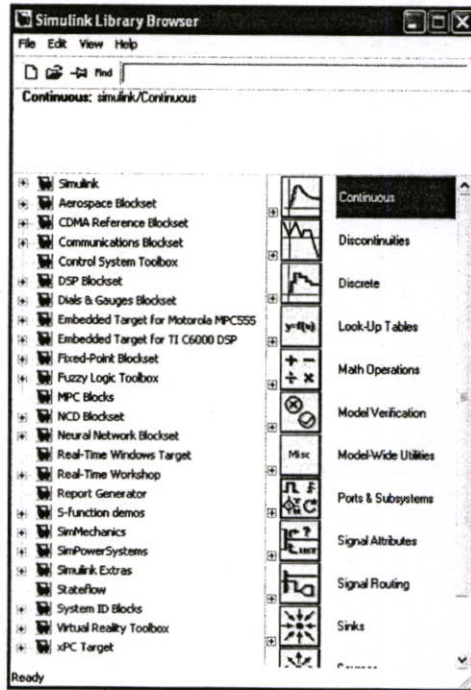
- ข้อกำหนดโดเมนเวลา ได้แก่ Settling Time, Percent Overshoot, Damping Ratio, Natural Frequency
- ข้อกำหนดโดเมนความถี่ ได้แก่ Phase margin, Gain Margin, Close-loop Peak Gain

Grid คือคำสั่งในการแสดงกริด

Properties คือคำสั่งในการกำหนดรูปแบบในกราฟ เช่น ชื่อแกน หน่วย เป็นต้น

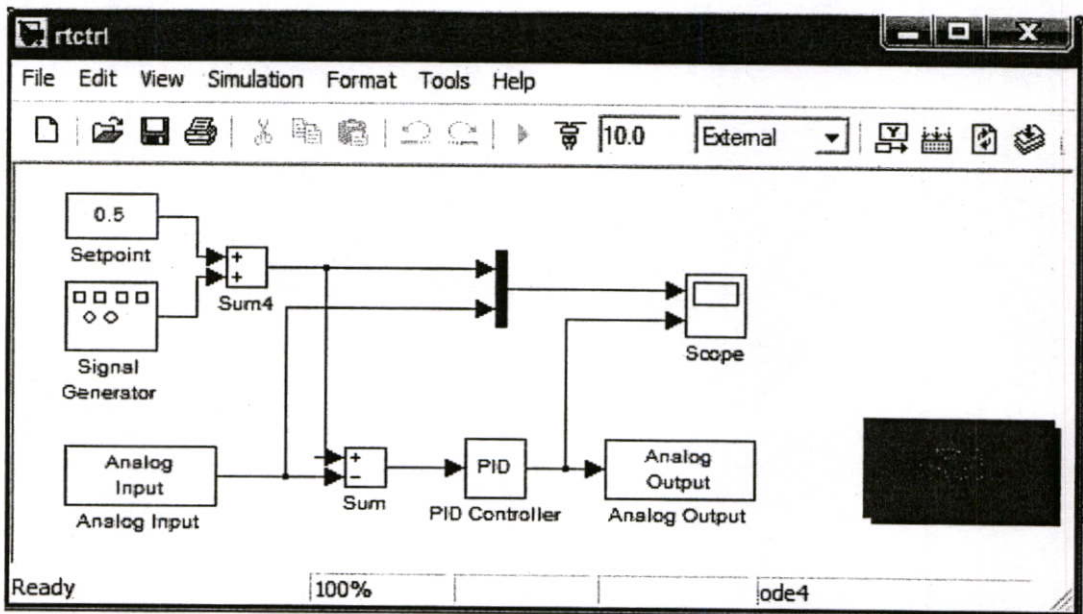
- SIMULINK

สำหรับโปรแกรม MatLab จะมีโปรแกรมย่อยภายในสำหรับให้ใช้งานซึ่งโปรแกรมย่อยที่ผู้วิจัยนำมาใช้ในการวิจัยเรียกว่าโปรแกรม Simulink ซึ่งเป็น โปรแกรมหนึ่งที่อยู่ในโปรแกรม MATLAB เป็นโปรแกรมที่มีความสำคัญมาก โดยโปรแกรม Simulink นี้สามารถใช้ในการสร้างแบบจำลองทางกายภาพของระบบต่างๆ ให้อยู่ในรูปแบบทางคณิตศาสตร์, ใช้ในการจำลองการทำงาน และ วิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบ ซึ่งระบบต่างๆเหล่านั้นก็คือระบบทางพลศาสตร์นั่นเอง โปรแกรม Simulink สามารถใช้วิเคราะห์พฤติกรรมของระบบทางพลศาสตร์ต่างๆ ได้อย่างมากมาย เช่น ระบบไฟฟ้า, ระบบทางกล ระบบของกระบวนการ ฯลฯ การจำลองการทำงานของระบบทางพลศาสตร์โดยใช้ Simulink สามารถแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนด้วยกันคือ ขั้นแรก ทำการสร้างแบบจำลองของระบบโดยแบบจำลองของระบบนั้นจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่าง อินพุต, เอาท์พุต และสแตทของระบบ ขั้นที่สอง จำลองการทำงานของระบบเพื่อดูพฤติกรรมการตอบสนองของระบบภายในช่วงเวลาที่กำหนด ซึ่งในการเริ่มใช้งาน โปรแกรม Simulink ให้ทำการพิมพ์คำว่า Simulink ในส่วน command window ของโปรแกรม MATLAB หรือ คลิกที่ปุ่ม  โปรแกรม Simulink จะแสดงขึ้นมาดังรูปที่ 2.4 ซึ่งจะแนะนำลักษณะองค์ประกอบที่สำคัญในหน้าต่างการใช้งานในแต่ละส่วนดังนี้



รูปที่ 2.15 .ลักษณะของโปรแกรม Simulink

ลักษณะการเขียนโปรแกรมด้วย Simulink จะเป็นลักษณะการเขียนโปรแกรมโดยใช้บล็อกไดอะแกรมของฟังก์ชันต่างๆ ซึ่งสิ่งสำคัญที่ควรระวังสำหรับการเขียนโปรแกรมในลักษณะนี้คือการกำหนดคุณสมบัติให้กับแต่ละบล็อกนั้นจะต้องถูกต้องไม่เช่นนั้นจะไม่สามารถรันโปรแกรมได้ซึ่งตัวอย่างการเขียนโปรแกรมด้วย Simulink แสดงดังรูปที่ 2.16



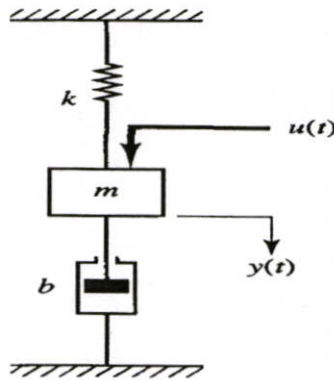
รูปที่ 2.16 ตัวอย่างการเขียนโปรแกรมด้วย Simulink

เพื่อให้เข้าใจหลักการทํางานและวิธีการสร้างโปรแกรมด้วย Simulink จะขอแสดงถึงวิธีการสร้างแบบจำลองของระบบควบคุมใน Simulink โดยการสร้างแบบจำลองของกระบวนการใน Simulink นั้นสามารถแบ่งเป็น 3 วิธีด้วยกัน คือ

1. การสร้างแบบจำลองกระบวนการจากสมการ Differential Equation
2. การสร้างแบบจำลองกระบวนการจากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน
3. การสร้างแบบจำลองระบบควบคุมจากสมการ State-Space

ซึ่งตัวอย่างในการสร้างแบบจำลองของกระบวนการในแต่ละแบบนี้สามารถแสดงได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่าง การสร้างแบบจำลองของระบบทางกล โดยกำหนดให้ $m = 1, b = 0.5$ และ $k = 0.8$

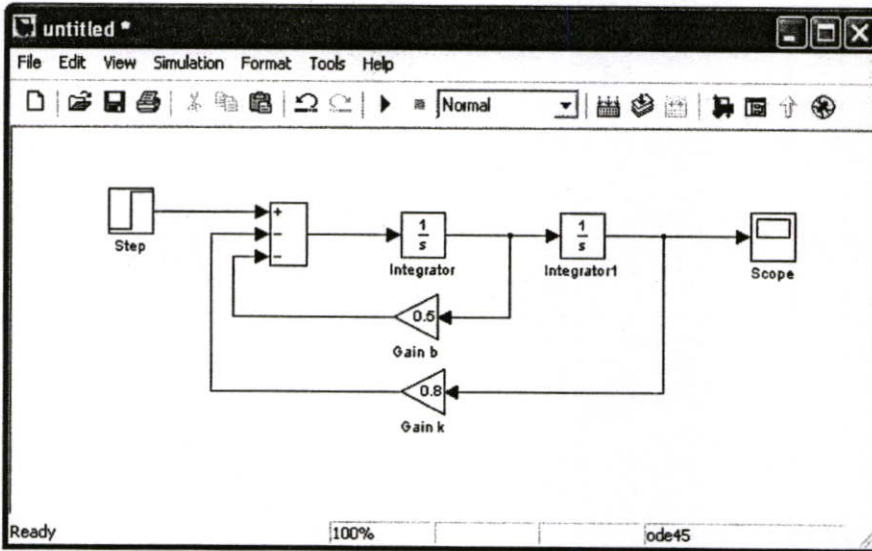


รูปที่ 2.17 แสดงแบบจำลองของระบบทางกล

- สมการ Differential Equation ของระบบ

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + b \frac{dy}{dt} + ky = u \qquad \frac{d^2 y}{dt^2} + 0.5 \frac{dy}{dt} + 0.8y = u$$

การสร้างแบบจำลองของระบบทางกลจากสมการ Differential Equation นั้นจะใช้บล็อก Integrator และ บล็อก Gain แทนระบบ โดยการใส่ค่าลงไปในบล็อก Gain นั้นสามารถทำได้โดยดับเบิลคลิกที่บล็อกแล้วก็ทำการใส่ค่าลงไป แบบจำลองระบบทางกลสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.18 ซึ่งจะสังเกตจากรูปได้ว่า การสร้างแบบจำลองของระบบจากสมการ Differential Equation นั้นค่อนข้างที่จะยุ่งยากแต่มีข้อดีคือสามารถวัดสัญญาณผลตอบสนองในแต่ละสเตจ ได้โดยตรง

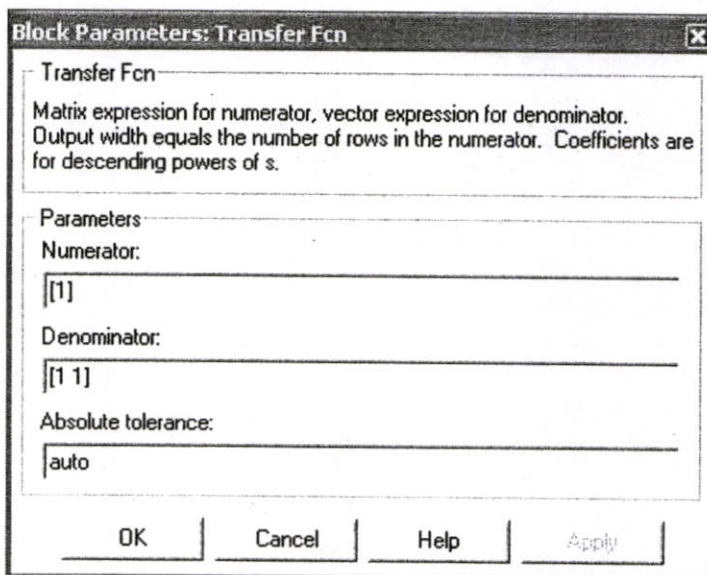


รูปที่ 2.18 แบบจำลองระบบทางกลในรูปแบบของสมการ Differential Equation

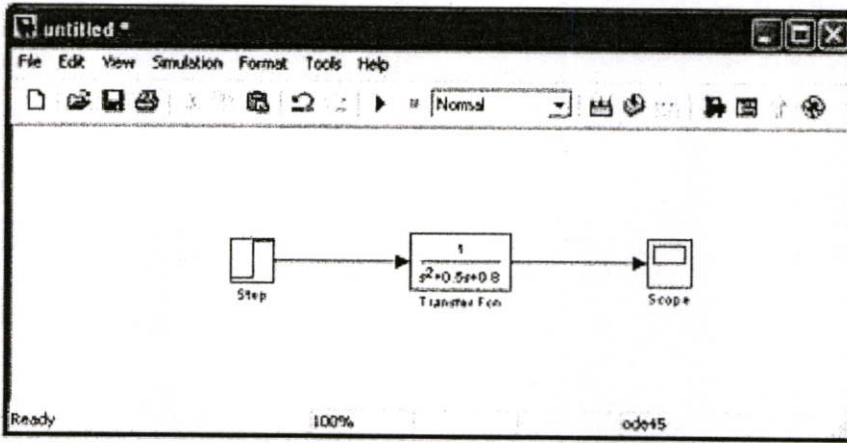
สมการ Laplace Transform ของระบบ

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{ms^2 + bs + k} \quad \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{s^2 + 0.5s + 0.8}$$

การสร้างแบบจำลองของระบบที่แสดงอยู่ในรูป Transfer Function นั้นจะใช้บล็อก Transfer Fcn แสดงแทนระบบ การใส่ค่าโพลีโนเมียลในส่วนของ numerator และ denominator นั้นทำได้โดยดับเบิลคลิกที่บล็อกซึ่งจะปรากฏไดอะล็อกที่ให้ใส่ค่าขึ้นมาแสดงได้ดังรูปที่ 2.19 โดยการใส่ค่าลงไปนั้นมีเงื่อนไขอยู่ว่าส่วน numerator นั้นต้องมีอันดับน้อยกว่า ส่วน denominator ซึ่งสังเกตได้ว่าการสร้างแบบจำลองของระบบจาก Transfer Function นั้นจะทำการวัดผลตอบสนองได้ที่ส่วนเอาต์พุทของระบบเท่านั้น



รูปที่ 2.19 ไดอะล็อกใส่ค่าพารามิเตอร์ของบล็อก Transfer Fcn



รูปที่ 2.20. แบบจำลองระบบทางกลในรูปแบบของ Transfer Function

สมการ State Space ของระบบ

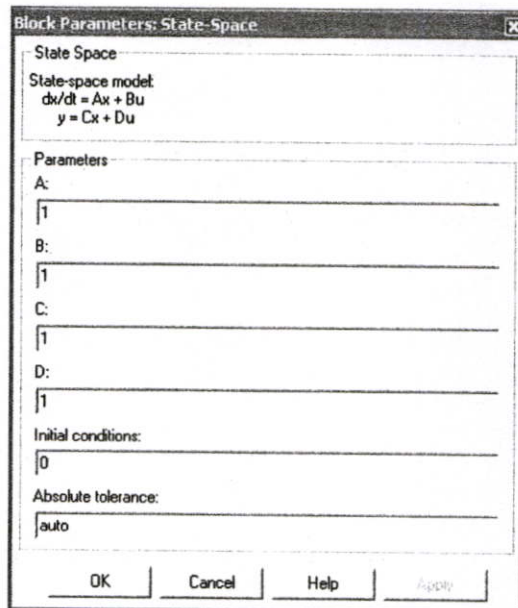
$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{b}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} u$$

$$y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \end{bmatrix}$$

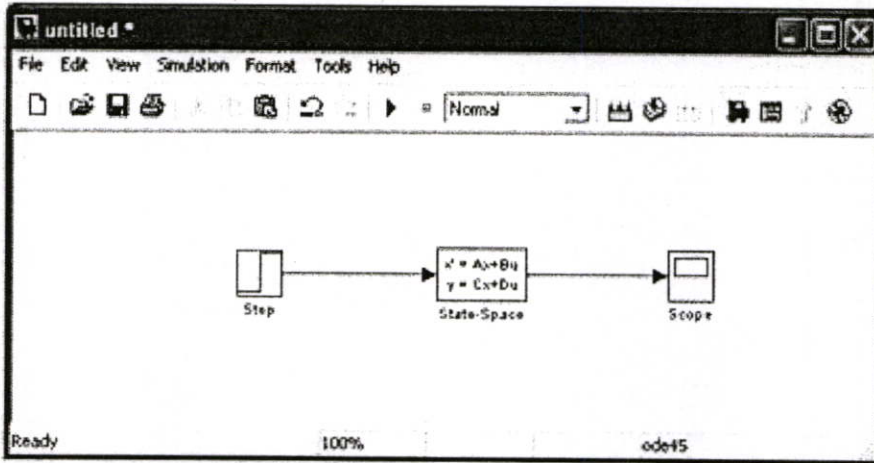
$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.8 & -0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u$$

$$y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \end{bmatrix}$$

การสร้างแบบจำลองของระบบที่แสดงอยู่ในรูป State-Space นั้นจะใช้บล็อก State-Space แสดงแทนระบบ การใส่ค่าพารามิเตอร์ทำได้โดยดับเบิลคลิกที่บล็อก ซึ่งจะปรากฏไดอะล็อกที่ให้ใส่ค่าขึ้นมาแสดงได้ดังรูปที่ 2.21 โดยการใส่ค่านั้นจะใส่ค่าตามรูปแบบสมการของ State-Space เช่นเดียวกับการสร้างแบบจำลองของระบบจากสมการ Laplace Transform คือแบบจำลองของระบบที่สร้างจากสมการ State-Space สามารถวัดผลตอบสนองได้ทีละส่วนเอาที่ทุกของระบบเท่านั้น



รูปที่ 2.21 ไดอะล็อกใส่ค่าพารามิเตอร์ของบล็อก State-Space



รูปที่ 2.22 แบบจำลองระบบทางกลในรูปแบบ State-Space

จากตัวอย่างที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า การสร้างแบบจำลองของกระบวนการสามารถสร้างได้หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีนั้นก็จะมีข้อดีและความเหมาะสมในการทำแบบจำลองที่แตกต่างกันไป ดังนั้นจึงขึ้นอยู่กับการนำไปประยุกต์ใช้งานว่าต้องการวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบที่จุดไหนบ้าง เช่นต้องการวิเคราะห์ผลตอบสนองที่เอาท์พุทหรือต้องการวิเคราะห์ผลตอบสนองที่สเตทอื่นๆ ด้วย

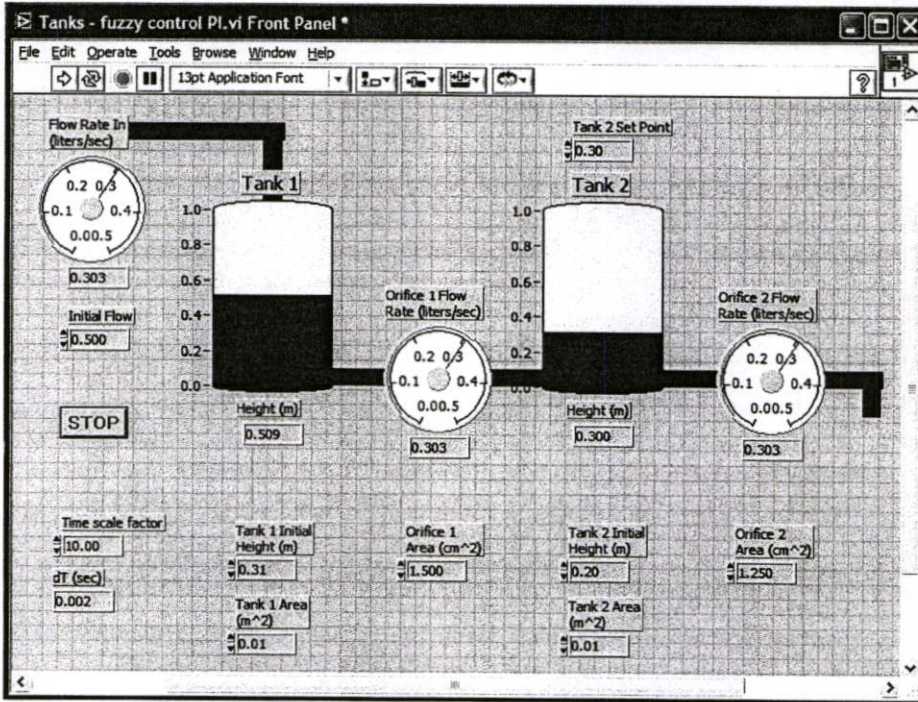
2.4.2 โปรแกรม LabVIEW

โปรแกรม LabVIEW เป็นโปรแกรมภาษารูปภาพ การเขียนโปรแกรมจะเขียนในลักษณะบล็อกไดอะแกรม ซึ่งแต่ละบล็อกก็จะมีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป การทำงานโดยการเชื่อมโยงสายสัญญาณแต่ละบล็อกเข้าด้วยกันเพื่อที่จะให้ทำงานตามที่ต้องการ สิ่งสำคัญในการเขียนโปรแกรมแบบนี้คือการกำหนดคุณสมบัติให้กับบล็อกแต่ละบล็อก ลักษณะของการเขียนโปรแกรม LabVIEW จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน เรียกว่า หน้าต่างพร้อมพาเนลและหน้าต่างบล็อกไดอะแกรม หน้าต่างพร้อมพาเนลจะเป็นหน้าต่างสำหรับแสดงผลการทำงานของโปรแกรม ส่วนหน้าต่างบล็อกไดอะแกรมจะใช้สำหรับกำหนดเงื่อนไขหรือกำหนดให้โปรแกรมทำงานตามต้องการ โดยสามารถอธิบายการทำงานและคุณสมบัติเบื้องต้นได้ดังนี้

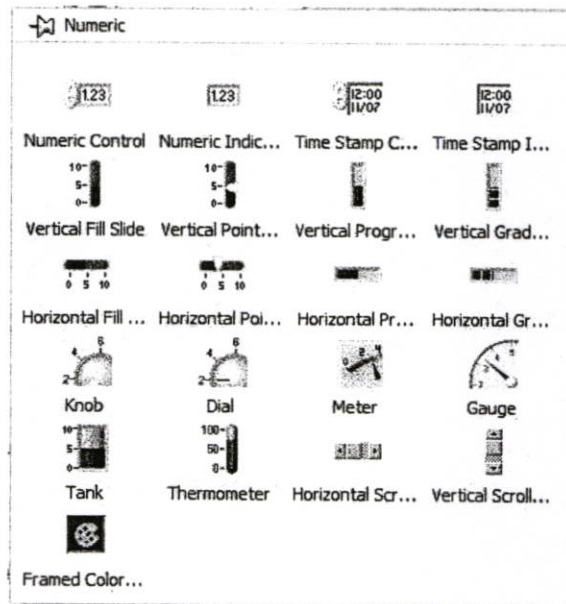
- หน้าต่างพร้อมพาเนล

พาเนลเป็นหน้าต่างที่ใช้แสดงผลการทำงานของโปรแกรม ผู้ใช้สามารถสร้างรูปแบบขึ้นเองได้อย่างรวดเร็วเพราะ LabVIEW มีส่วนประกอบต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับออกแบบหน้าต่างพาเนลซึ่งในหน้าต่างพาเนลก็จะมีส่วนประกอบหลัก ๆ ด้วยกัน 3 ส่วนคือ พื้นที่สำหรับเขียน โปรแกรม เมนูบาร์ และทูลบาร์ สำหรับหน้าต่างพาเนล จะแสดงตัวควบคุมการทำงาน (Controls) และตัวแสดงผล (Indicator) ส่วนลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมนั้นจะแสดงในส่วนของหน้าต่างไดอะแกรม โดยในโปรแกรม LabVIEW จะถือว่าตัวควบคุมเป็นอุปกรณ์ “อินพุท” และตัวแสดงผลเป็นอุปกรณ์ “เอาท์พุท” การวางตัวควบคุมและตัวแสดงผลลงในหน้าต่างพาเนลทำได้โดยคลิกเมาส์ทางด้านขวา

บนหน้าต่างพาดู จะปรากฏลือกทูลพาเลทขึ้นมาซึ่งภายในทูลพาเลทจะประกอบด้วยตัวควบคุมและตัวแสดงผลแบบต่าง ๆ การวางอุปกรณ์ทำได้โดยการใช้เมาส์คลิกค้างไว้ที่อุปกรณ์ที่ต้องการจากนั้นลากไปวางในหน้าต่างพาดูก็จะได้ภาพดังตัวอย่างในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.23 แสดงลักษณะของหน้าต่างพาดู



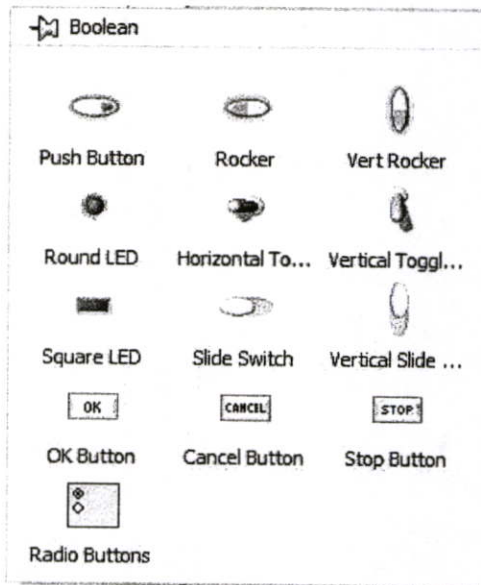
รูปที่ 2.24 Numerical Control and Indicator

1. Numerical Controls and Indicator

สำหรับตัวควบคุมและตัวแสดงผลที่มีลักษณะเป็นตัวเลขนั้นสามารถเรียกใช้ในส่วนของ หน้าต่างพร้อมท์พาเนล โดยเลือกจาก Control » Modern » Numeric บน Control Palette

2. Boolean Control and Indicator

สำหรับตัวควบคุมและตัวแสดงผลที่มีลักษณะบูลีนนั้นจะแสดงการทำงานในลักษณะของ ความถูกหรือผิด (True /False) สามารถเรียกใช้ในส่วนของ All Function หรือ Button and LED บน Tool Palette



รูปที่ 2.25 Boolean Control and Indicator

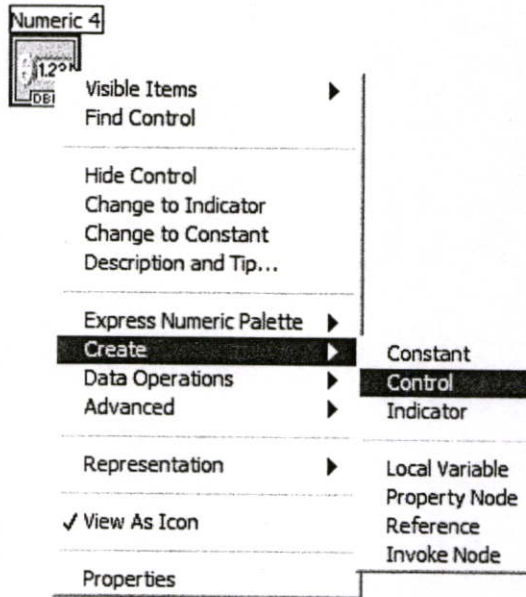
3. การกำหนดอุปกรณ์

โดยปกติแล้วอุปกรณ์หนึ่งตัวก็จะทำงานหรือมีสถานะได้หนึ่งอย่าง ไม่ว่าจะ มีสถานะเป็น ค่าคงที่ ตัวควบคุมหรือตัวแสดงผล ซึ่งเราสามารถกำหนดได้ว่าจะให้อุปกรณ์ตัวนั้นแสดงสถานะเป็น แบบใด การกำหนดทำได้โดยการคลิกขวาที่อุปกรณ์แล้วเลือกคำสั่ง Create ซึ่งในคำสั่ง Create นี้จะมี คำสั่งย่อยอยู่ 3 คำสั่งคือ Constant, Control และ Indicator ซึ่งเราสามารถเลือกได้ว่าจะกำหนดสถานะ ของอุปกรณ์นั้นได้

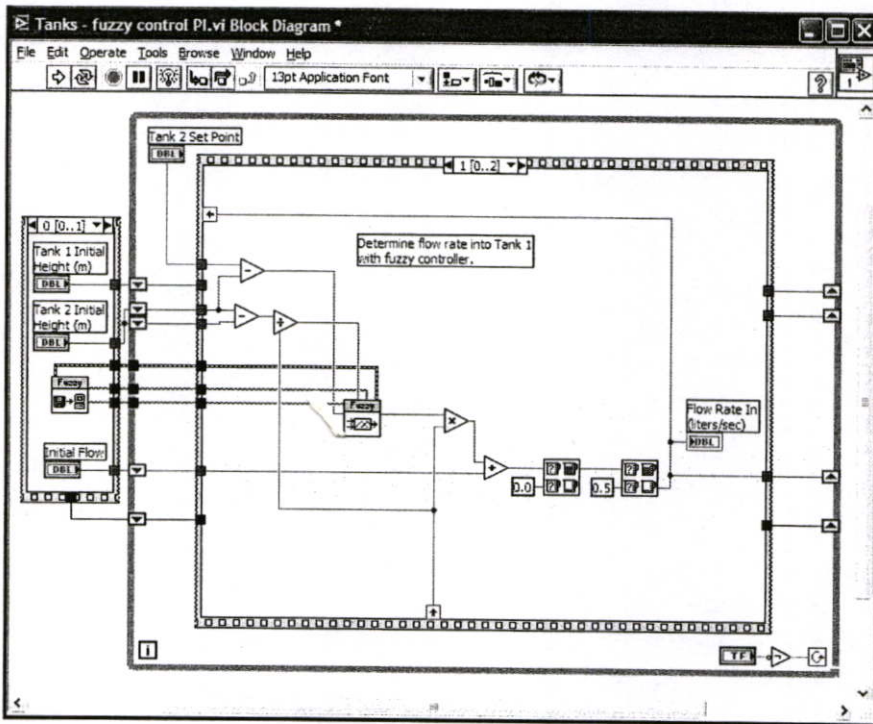
- หน้าต่างบล็อกไดอะแกรม

ในส่วนหน้าต่าง Block Diagram จะเป็นส่วนที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมและแสดงการทำงาน ของโปรแกรมทั้งหมด แสดงการเชื่อมโยงระหว่างบล็อกคำสั่งแต่ละบล็อกเข้าด้วยกัน โดยการ เขียนโปรแกรมด้วยภาพลักษณะนี้ในโปรแกรม LabVIEW เรียกว่าการเขียนโปรแกรมด้วยภาษากราฟ

ฟิกส์ (G-Languages) การเขียนโปรแกรมด้วยภาพนั้นจะอาศัยหลักการการทำงานของเครื่องมือวัดหรือการวัดคุม ทำให้ผู้ใช้สามารถออกแบบรูปแบบโปรแกรมตามต้องการ



รูปที่ 2.26 แสดงการกำหนดอุปกรณ์



รูปที่ 2.27 แสดงหน้าต่างของไดอะแกรม

ซึ่งในการเขียนโปรแกรมในหน้าต่างไดอะแกรมมีส่วนประกอบที่สำคัญ ๆ อยู่ 3 ส่วน คือ

- **Nodes** มีความคล้ายคลึงกับการเขียนโปรแกรมแบบสแตคเม้นท์และการเขียนแบบฟังก์ชันในการเขียนโปรแกรมแบบทั่ว ๆ ไป ประกอบด้วย
- **Function** คิดตั้งมาพร้อมกับ LabVIEW
- **Sub VI Node** คือ VI ที่สร้างขึ้นเองและถูกนำมาใช้เป็น SubVI ในภายหลัง
- **Structure** เช่น Case, loop, and Sequence ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของโปรแกรม
- **Code Interface Node (CIN)** ใช้ติดต่อกันระหว่าง LabVIEW และ User Supplied Code ของภาษา C
- **Terminal** เป็นจุดเชื่อมต่อเพื่อส่งผ่านข้อมูลระหว่างหน้าต่างไดอะแกรมกับหน้าต่างพาเนลและระหว่างโหนดแต่ละโหนดในหน้าต่างไดอะแกรม มีความคล้ายคลึงกันกับการกำหนดพารามิเตอร์และค่าคงที่ในการเขียนโปรแกรมทั่ว ๆ ไป Terminal มีอยู่หลายชนิด เช่น Control and Indicator Terminal, Node Terminal, Constants
- **Wiring** เป็นการเชื่อมต่อทางเดินของข้อมูลระหว่าง Terminal ซึ่งเป็นแบบส่งทางเดียว สีและรูปแบบ ของ Wires จะบอกถึงชนิดของข้อมูลที่ส่งผ่านโดยใช้ Wiring Tool (รูปหลอดด้าย) ใน Tool Palette โดยที่

สีของ Control หรือ Indicator

1. สีน้ำเงิน แทนตัวเลขที่เป็นจำนวนเต็ม
2. สีส้ม แทนตัวเลขที่มีค่าทศนิยม
3. สีเขียว แทน Logic หรือ Boolean
4. สีชมพู แทนค่าของ String

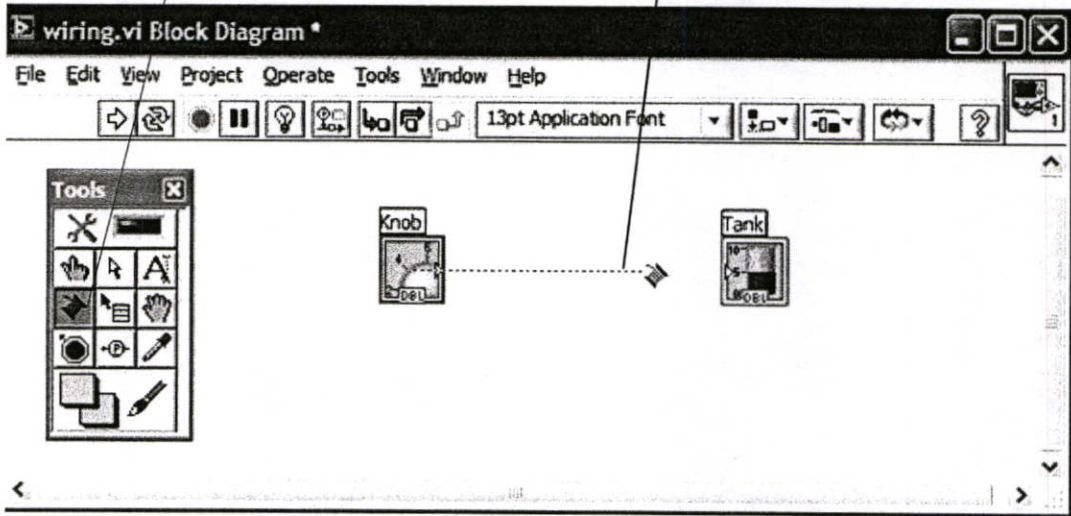
รูปแบบของ Wiring

1. เส้นบางแทนค่าจำนวนเดียว
2. เส้นหนาแทนค่าของอาร์เรย์ ขนาด 1 มิติ
3. เส้นทึบแทนค่าของอาร์เรย์ ขนาด 2 มิติ

การ Wiring ทำโดยใช้ Wiring Tool เลื่อนไปให้ตรง Terminals แรกที่ต้องการเชื่อมต่อ สังเกตให้ Terminals กระทบแล้วคลิกเมาส์ จากนั้นให้ลากไปยัง Terminals ที่ต้องการเชื่อมต่อโดยจะเกิดเส้นประสีดำลากตาม cursor ให้คลิกเมาส์บน Terminals ที่สองในขณะที่ Terminals นั้นกำลังกระทบ ข้อแตกต่างระหว่าง Control กับ Indicator บน Block Diagram คือ Control จะมีขอบเป็นเส้นหนา ส่วน Indicator จะมีขอบเป็นเส้นบาง

เลือกเครื่องมือสำหรับการลากสาย
ในหน้าต่าง Tools Palette

ลากสายสัญญาณจากอินพุท
ไปยังเอาต์พุท



รูปที่ 2.28 การเชื่อมต่อสายสัญญาณ

2.5 บทสรุป

สำหรับเนื้อหาหลักๆ ในบทนี้ได้กล่าวถึงองค์ประกอบโดยรวมของกระบวนการระดับน้ำสองถึงที่มีผลต่อกัน ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วการเรียนรู้หรือทำความเข้าใจกระบวนการนั้นถือว่าสำคัญเนื่องจากว่าเป็นเงื่อนไขแรกๆ ที่ต้องนำไปพิจารณาในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับควบคุมกระบวนการ ซึ่งถ้าเราไม่เข้าใจองค์ประกอบทั้งหมดของกระบวนการแล้วนั้นคงจะเป็นการยากที่เราจะสามารถออกแบบตัวควบคุมได้ ส่วนในเรื่องของโปรแกรมที่ใช้ในการทดลองก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่จะต้องคำนึงถึงเช่นกัน การที่เรานำโปรแกรมมาช่วยในการวิเคราะห์ ออกแบบ หรือควบคุมระบบนั้นถ้าเราเรียนรู้และเข้าใจการทำงานและฟังก์ชันการใช้งานต่างๆ ของโปรแกรมก็จะทำให้เราง่ายและสะดวกในการทำงาน แต่ทางตรงกันข้ามถ้าเราไม่เข้าใจการทำงานของโปรแกรมหรือใช้งานโปรแกรมไม่เป็นแล้วก็จะเป็นการสร้างอุปสรรคเช่นกัน โดยสรุปแล้วคือเราต้องการที่จะหาสมการคุณลักษณะหรือหาโมเดลของกระบวนการนั่นเอง เพื่อที่จะนำโมเดลที่ได้ไว้วิเคราะห์และออกแบบต่อไป องค์ประกอบทั้งหมดโปรแกรมที่กล่าวมาในบทนี้จะเป็นส่วนที่ช่วยให้เราหาแบบจำลองกระบวนการได้นั่นเอง

บทที่ 3

วิธีการออกแบบตัวควบคุม

สำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน

3.1 กล่าวนำ

ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับควบคุมกระบวนการนั้นเราต้องใช้ทฤษฎีและวิธีการต่างๆ เข้ามาช่วยเพื่อให้ได้ผลลัพธ์เป็นไปตามที่เราต้องการและถูกต้องตามหลักวิชาการด้วย สำหรับในบทนี้ กล่าวถึงทฤษฎีและวิธีการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยซึ่งจะประกอบไปด้วย การออกแบบดีคัปลิ่ง การออกแบบสององศาอิสระ (Two Degree of Freedom: 2-DOF) การออกแบบตัวควบคุมพีไอ (ทั้ง 3 วิธี ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1) โดยเนื้อหาสำคัญหลักๆ จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการในการออกแบบตัว ควบคุม และจะเน้นการนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน การ นำเอาทฤษฎีต่างๆ มาใช้และกล่าวถึงในบทนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะนำไปออกแบบหาค่าพารามิเตอร์ ของตัวควบคุมสำหรับควบคุม ซึ่งการแทนค่าพารามิเตอร์หรือค่าคงที่ในสมการต่างๆ จะได้กล่าวในบท ต่อไป

3.2 การออกแบบดีคัปลิ่ง

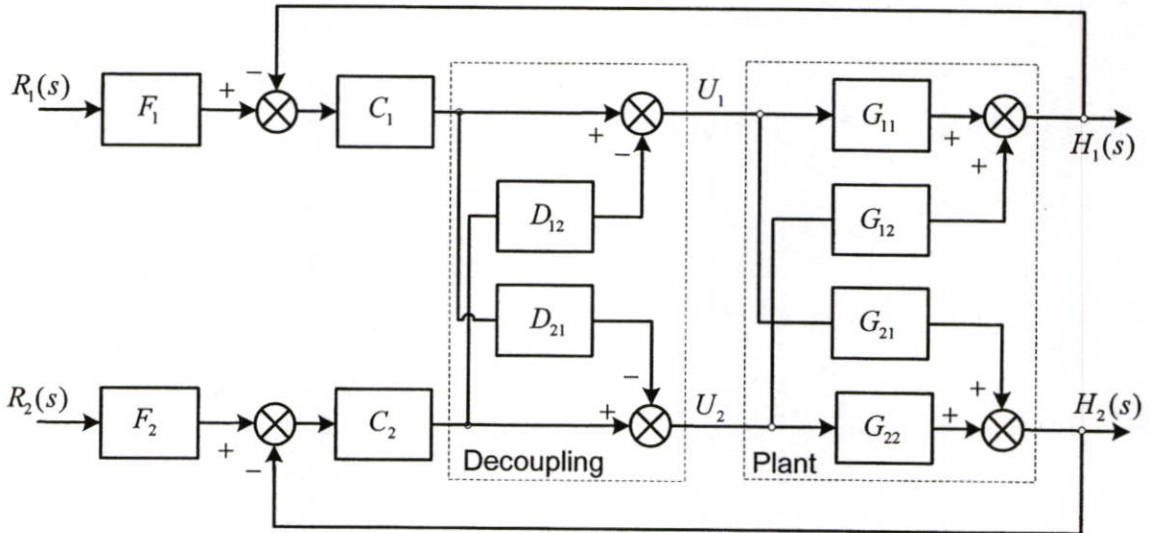
ดีคัปลิ่งไม่ใช่วิธีการออกแบบตัวควบคุมอย่างที่หลายคนเข้าใจแต่อย่างใด แต่จะเป็นวิธีการที่ ช่วยให้การออกแบบหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมสำหรับกระบวนการที่มีความซับซ้อนให้สามารถ ออกแบบได้ง่ายขึ้นซึ่งจะเหมาะกับกระบวนการที่มีสองอินพุตสองเอาต์พุตขึ้นไป สำหรับกระบวนการ ระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกันเป็นอีกหนึ่งกระบวนการที่มีสองอินพุตสองเอาต์พุตและระบบมีการ คับเป็ลกันทำให้เกิดการกวนกันของระบบ วิธีดีคัปลิ่งจึงเหมาะกับวิธีการนี้เป็นอย่างมากเนื่องจาก วิธีการดังกล่าวจะช่วยลดผลกระทบระหว่างถังน้ำทั้งสอง

หลักการทำงานของวิธีการดังกล่าวจะเป็นการนำดีคัปลิ่งมาต่อร่วมกับกระบวนการเพื่อลด ผลกระทบที่มีต่อกันระหว่างระดับน้ำของทั้งสองถัง ถ้ากำหนดให้ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการ ระดับน้ำสองถังที่มีผลกระทบต่อกันคือ $G(s)$ และทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของดีคัปลิ่งคือ $D(s)$ วิธีการก็ คือนำดีคัปลิ่งไปคูณกับกระบวนการแล้วจะได้ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการใหม่ขึ้นมาคือ $G_n(s)$ ซึ่งทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการใหม่ที่เกิดขึ้นถ้าเขียนให้อยู่ในรูปของ ทรานส์ เฟอร์เมทริกซ์แล้วจะต้องเป็นเมทริกซ์ทแยงมุม [1] แสดงได้ดังสมการที่ 3.2

$$D(s)G(s) = G_n(s) \tag{3.1}$$

จากสมการที่ 3.1 เขียนให้อยู่ในรูปทรานส์เฟอร์เมทริกซ์จะได้

$$\begin{bmatrix} D_{11}(s) & D_{12}(s) \\ D_{21}(s) & D_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{n_{11}}(s) & 0 \\ 0 & G_{n_{22}}(s) \end{bmatrix} \quad (3.2)$$



รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างของกระบวนการเมื่อค่อร่วมกับตัวควบคุม

จากรูปที่ 3.1 เป็นโครงสร้างของกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน (Coupled-Tank Process) ที่ค่อร่วมกับโครงสร้างของดีคัปปลิง โดยที่ R_1 และ R_2 คือค่าเป้าหมาย (Set Point) ของกระบวนการ, c_1 และ c_2 คือตัวควบคุม (Controller) ของกระบวนการ, u_1 และ u_2 คือ Manipulate Variable :MV, h_1 และ h_2 คือค่าเอาต์พุต (Process Variable) ของกระบวนการ เราสามารถหาสมการของตัวควบคุมในรูปของเมทริกซ์ที่แยงมุม (Diagonal Matrix) ได้ดังสมการที่ 3.3

$$C(s) = \begin{bmatrix} C_1(s) & 0 \\ 0 & C_2(s) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

แทนสมการที่ 3.2 ลงในสมการที่ 3.1 จะได้

$$\begin{aligned} D(s) &= G(s)^{-1} G_n(s) \\ &= \frac{1}{G_{11}(s)G_{22}(s) - G_{12}(s)G_{21}(s)} \begin{bmatrix} G_{22}(s)G_{n_{11}}(s) & -G_{12}(s)G_{n_{22}}(s) \\ -G_{21}(s)G_{n_{11}}(s) & G_{11}(s)G_{n_{22}}(s) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.4)$$

เมื่อค่าสมาชิก $G_{11}(s)$, $G_{12}(s)$, $G_{21}(s)$ และ $G_{22}(s)$ ในสมการที่ 3.4 เป็นค่าตัวแปรที่รู้ค่า เนื่องจากเป็นค่าของตัวแปรที่จากกระบวนการ แต่ค่าที่เราไม่รู้ค่าก็คือค่าสมาชิกของ $G_{n_{11}}(s)$ และ $G_{n_{22}}(s)$ ซึ่งจะต้องออกแบบดีคัปปลิงเพื่อหาค่าของค่าตัวแปรดังกล่าว

3.2.1 ดีคัปปลิงในทางอุดมคติ (Ideal Decoupling)

กฎข้อแรกในการพิจารณาการออกแบบดีคัปปลิงที่สำหรับกระบวนการที่ประกอบไปด้วยทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของ $G_{n_1}(s)$ และ $G_{n_2}(s)$ เมื่อทรานส์เฟอร์เมทริกซ์ของดีคัปปลิงคือ $D(s)$ โดยพิจารณาจากสมการที่ 3.4 ค่าสมาชิกของตัวควบคุม $C_1(s)$ และ $C_2(s)$ จะต้องแยกอิสระจากกันและจะถูกนำไปควบคุมกระบวนการ $G_{n_1}(s)$ และ $G_{n_2}(s)$ ตามลำดับ ส่วนเงื่อนไขในการเลือก $G_n(s)$ ก็คือเลือกค่า $G_{n_1}(s) = G_{11}(s)$ และ $G_{n_2}(s) = G_{22}(s)$ ซึ่งวิธีการเลือกแบบนี้จะทำให้ตัวควบคุมที่ออกแบบสามารถควบคุมกระบวนการได้ทั้งสองรูปถ้าหากว่ารูปใดรูปหนึ่งถูกปรับให้อยู่ในโหมดปกติ (Manual Mode) เทคนิคนี้ถูกเรียกว่า “ดีคัปปลิงในทางอุดมคติ (ideal decoupling)” ถูกคิดขึ้นโดยลูเบน (Luyben) [1] อย่างไรก็ตามการนำเทคนิคดังกล่าวไปใช้งานจริงหลายครั้งมักจะเกิดปัญหาตามมา

3.2.2 ดีคัปปลิงแบบง่าย (Simplified decoupling)

กฎข้อที่ 2 สำหรับการออกแบบดีคัปปลิงของ ลูเบน (Luyben) [1] เรียกว่า “ดีคัปปลิงแบบง่าย (Simplified decoupling)” ซึ่งมีวิธีการเลือกดีคัปปลิงสามารถทำได้ตามสมการด้านล่าง

$$D_{11}(s) = D_{22}(s) = 1 \quad (3.5)$$

$$D_{12}(s) = -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} \quad (3.6)$$

$$D_{21}(s) = -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} \quad (3.7)$$

จากสมการที่ 3.5, 3.6 และสมการที่ 3.7 เขียนให้อยู่ในรูปของทรานส์เฟอร์เมทริกซ์จะได้

$$D(s) = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} \\ -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

หลังจากที่เราเพิ่มดีคัปปลิงเข้าไปในกระบวนการจะทำให้กระบวนการมีลักษณะเหมือนกับระบบแบบ SISO สองกระบวนการแยกจากกันคือ

$$H_1(s) = C_1(s)G_{n_1}(s)E_1(s) \quad (3.9)$$

$$H_2(s) = C_2(s)G_{n_2}(s)E_2(s) \quad (3.10)$$

จากสมการที่ 3.8 ทำให้เราได้ค่าดีคัปปลิงและทำให้เราสามารถนำค่าของดีคัปปลิงไปคำนวณหาค่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการใหม่ได้ดังนี้

$$G_{n_{11}}(s) = G_{11}(s) + D_{21}(s)G_{12}(s) = G_{11}(s) - \frac{G_{21}}{G_{22}}G_{12}(s) \quad (3.11)$$

$$G_{n_{22}}(s) = G_{22}(s) + D_{12}(s)G_{21}(s) = G_{22}(s) - \frac{G_{12}}{G_{11}}G_{21}(s) \quad (3.12)$$

จากสมการที่ 3.11 และสมการที่ 3.12 เขียนให้อยู่ในรูปของทรานส์เฟอร์เมทริกซ์จะได้

$$G_n(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) - \frac{G_{12}(s)G_{21}(s)}{G_{22}(s)} & 0 \\ 0 & G_{22}(s) - \frac{G_{12}(s)G_{21}(s)}{G_{11}(s)} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

จากสมการที่ 3.13 เราจะได้กระบวนการใหม่ขึ้นมาสองกระบวนการคือ $G_{n_{11}}(s)$ และ $G_{n_{22}}(s)$ ซึ่งกระบวนการทั้งสองแยกอิสระต่อกัน ทำให้เราสามารถนำสมการที่ได้ไปออกแบบตัวควบคุมได้

สำหรับกฎข้อที่ 2 สำหรับการออกแบบดีคัมปลิ่งของ ลูเบน (Luyben) นี้ทำให้สามารถหาค่าของดีคัมปลิ่งได้ง่าย แต่สมการของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันใหม่ที่ได้มาจะมีความซับซ้อนพอสมควรเนื่องจากการบวกกันของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน [2] แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับวิธีการแรกแล้วการคำนวณหาค่าดีคัมปลิ่งนั้นง่ายกว่าและสามารถนำไปใช้งานจริงได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงได้นำเอากฎในการออกแบบดีคัมปลิ่งข้อที่ 2 ของ ลูเบน (Luyben) มาใช้

3.2.3 ตัวอย่างการออกแบบดีคัมปลิ่ง

สำหรับในหัวข้อนี้จะยกตัวอย่างการหาค่าดีคัมปลิ่งสมมุติให้ค่าทรานส์เฟอร์เมทริกซ์ของฟังก์ชันหนึ่งเป็น

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{4}{1+10s} & \frac{3}{1+10s} \\ \frac{3}{1+10s} & \frac{4}{1+10s} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

จากทรานส์เฟอร์เมทริกซ์จะเห็นได้ว่ากระบวนการเป็นกระบวนการแบบอันดับหนึ่งโดยสมาชิกทุกตัวของทรานส์เมทริกซ์ไม่มีซีโรและมีโพลวงรอบเปิด (Open-Loop Pole) อยู่ที่ตำแหน่งเดียวกันคือ $s = -0.1$ สามารถหาค่าดีคัมปลิ่งได้จากสมการที่ 3.5 สมการที่ 3.6 และสมการที่ 3.7 จะได้ว่า

$$D_{11}(s) = D_{22}(s) = 1 \quad (3.15)$$

หาค่า $D_{12}(s)$ จากสมการที่ 3.6 จะได้ว่า

$$D_{12}(s) = -\frac{G_{12}}{G_{11}} = -\left(\frac{3}{1+10s} \cdot \frac{1+10s}{4}\right) = -\frac{3}{4} \quad (3.16)$$

หาค่า $D_{21}(s)$ จากสมการที่ 3.7 จะได้

$$D_{21}(s) = -\frac{G_{21}}{G_{22}} = -\left(\frac{3}{1+10s} \cdot \frac{1+10s}{4}\right) = -\frac{3}{4} \quad (3.17)$$

เขียนให้อยู่ในรูปของทรานส์เฟอร์เมทริกซ์จะได้

$$D(s) = \begin{bmatrix} 1 & -3/4 \\ -3/4 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

หาทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันใหม่ที่เกิดขึ้นหลังจากที่เพิ่มดีคัปปลิ่งเข้าไปได้จากสมการที่ 3.11 และสมการที่ 3.12 ซึ่งจะหา $G_{n1}(s)$ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} G_{n1}(s) &= G_{11} - \frac{G_{12}G_{21}}{G_{22}} \\ &= \frac{3}{1+10s} - \left(\frac{4}{1+10s} \cdot \frac{4}{1+10s}\right) \left(\frac{1+10s}{3}\right) \\ &= -\frac{7}{3(1+10s)} \end{aligned} \quad (3.19)$$

และหา $G_{n2}(s)$ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} G_{n2}(s) &= G_{22} - \frac{G_{12}G_{21}}{G_{22}} \\ &= \frac{3}{1+10s} - \left(\frac{4}{1+10s} \cdot \frac{4}{1+10s}\right) \left(\frac{1+10s}{3}\right) \\ &= -\frac{7}{3(1+10s)} \end{aligned} \quad (3.20)$$

เขียนสมการใหม่ให้อยู่ในรูปแบบของทรานส์เฟอร์เมทริกซ์ได้ดังนี้

$$G_n(s) = \begin{bmatrix} -\frac{7}{3(1+10s)} & 0 \\ 0 & -\frac{7}{3(1+10s)} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

ค่า $G_n(s)$ ใหม่ที่ได้นี้สามารถนำไปออกแบบตัวควบคุมสำหรับควบคุมต่อไป

3.3 การออกแบบตัวควบคุมพีไอ

ขั้นตอนสำหรับการออกแบบตัวควบคุมนั้นก็คือวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ซึ่งในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงทฤษฎีที่นำมาใช้หาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโดยจะกล่าวถึงทั้งหมด 3 วิธี คือ 1) ทฤษฎี Root Locus โดยวางซีโรให้ทางผ่านจุด s_d 2) ทฤษฎี Root Locus โดยวางซีโรที่ตำแหน่ง $1/T_i$ และ 3) วิธีการของ Ziegler-Nichols ซึ่งแต่ละวิธีสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

3.3.1 ด้วยวิธีการ Root Locus (โดยวางซีโรให้ทางเดินรากผ่านจุด s_d)

การตรวจสอบสมรรถนะของระบบควบคุม เมื่อพารามิเตอร์ของระบบหนึ่งตัวหรือมากกว่านั้นแปรค่าไปเกินกว่าขอบเขตที่กำหนดให้ เป็นสิ่งจำเป็นอย่างหนึ่งในการพิจารณาออกแบบระบบควบคุม ดังที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าสมการคุณลักษณะ (characteristic equation) ของระบบมีบทบาทที่สำคัญในการวิเคราะห์พฤติกรรมทางพลศาสตร์ (dynamic behavior) ของระบบเชิงเส้น วิธี root locus ซึ่งเป็นวิธีที่ศึกษาถึงทางเดินรากของสมการคุณลักษณะของระบบ เมื่อพารามิเตอร์แปรค่าไปจึงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่งในการศึกษาระบบควบคุม นอกจากนี้เรายังสามารถจะนำวิธี root locus นี้ไปประยุกต์เพื่อหารากของสมการทางพีชคณิตที่มีอันดับสูงๆ ได้อีกด้วยโดยทั่วไปวิธีของ root locus จะใช้สำหรับพิจารณาทางเดินของรากเมื่อพารามิเตอร์ตัวใดตัวหนึ่งแปรค่าไป แต่ในกรณีที่พารามิเตอร์มากกว่าหนึ่งตัว แปรค่าไปนั้น ก็จะสามารถใช้วิธีของ root locus ได้เช่นกัน

วิธี root locus เป็นวิธีทางกราฟที่ใช้สำหรับหาดำแหน่งของ closed-loop poles จากตำแหน่งของ open-loop poles และ open-loop zeros ที่รู้ๆกัน โดยพารามิเตอร์ซึ่งโดยทั่วไปคือ gain ของระบบแปรค่าอยู่ในช่วง ศูนย์ถึงอินฟินิตี้ วิธีนี้จะแสดงให้เห็นชัดถึงผลของการปรับค่าพารามิเตอร์ของระบบ ข้อดีของวิธี root locus ก็คือเราสามารถจะหาข้อมูลเกี่ยวกับผลตอบสนองชั่วคราวของระบบจาก graph ในระนาบ s นี้ได้เลย

Transfer function ของตัวชดเชยที่เพิ่มเข้าไปจะประกอบด้วย poles และ zeros ผลของ poles และ zeros ที่เพิ่มเข้าไปนี้จะทำให้รูปร่างของ root locus เปลี่ยนไป นั่นคือตำแหน่งที่เหมาะสมของ poles และ zeros ของตัวชดเชยนี้จะทำให้รูปร่างของ root locus เป็นไปตามต้องการได้

1. ผลของการเพิ่ม poles : การเพิ่ม poles ให้กับ open-loop transfer function จะทำให้ root loci เคลื่อนไปทางขวามากขึ้น ดังนั้นเสถียรภาพสัมพัทธ์ของระบบจะต่ำลง

2. ผลของการเพิ่ม zeros : การเพิ่ม zeros ให้กับ open-loop transfer function จะมีผลทำให้ root locus เคลื่อนไปทางซ้ายมากขึ้น นั่นคือเสถียรภาพสัมพัทธ์ของระบบจะเพิ่มขึ้น และผลตอบสนองของระบบจะเข้าสู่ค่าที่ภาวะคงที่ได้เร็วขึ้นด้วย ผลของการเพิ่ม zeros ให้กับ open-loop transfer function นั้น จะเหมือนกับผลของการควบคุมแบบดิริเวทิฟ

จากข้อกำหนดของผลตอบสนองในสภาวะชั่วขณะ คือ ค่าพุงเกินและเวลาเข้าที่ที่ต้องการนั้น จะใช้การคำนวณหาค่าอัตราการหน่วง (Damping ratio: ζ) ความถี่ธรรมชาติที่ไม่มีการหน่วง (Undamped natural frequency : ω_n) และตำแหน่งขั้วของรากที่สำคัญ (Dominant close-loop poles : s_d) ของระบบควบคุมวงรอบปิด จากสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} P.O. &= 100e^{\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}} \% \\ t_s &= \frac{4}{\zeta\omega_n} \\ s_d &= -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \end{aligned} \quad (3.22)$$

ค่าของ ζ , ω_n และ s_d ที่หาได้จากสมการที่ 3.22 จะใช้ในการออกแบบตัวควบคุม และเงื่อนไขของมุมในวิธีทางเดินราก รากของสมการคุณลักษณะจะอยู่ที่จุด s_d ได้จะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขของมุม คือ

$$\angle G_c(s_d)G_p(s_d) = \pm(2k+1)\pi ; k = 0, 1, 2, \dots \quad (3.23)$$

รูปแบบทั่วไปของกระบวนการที่สามารถที่จะกำหนดได้ดังสมการที่ 3.24

$$G_p(s) = \frac{K_{pl}}{\prod_{i=1}^n (s + p_i)} \quad (3.24)$$

และรูปแบบทั่วไปของตัวควบคุมสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบโดยทั่วไปได้เช่นกัน โดยการละทิ้งโพลที่ไม่สำคัญในขั้นตอนของการออกแบบสามารถจัดสมการได้ดังนี้

$$G_c(s) = \frac{K_c \prod_{i=1}^n (s + z_i)}{s} \quad (3.25)$$

รูปแบบของตัวควบคุมสามารถกำหนดจากจำนวนซีโรของตัวควบคุมเท่ากับอันดับของกระบวนการ ตัวอย่างการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางเดินราก โดยให้ทางเดินของรากผ่านจุด s_d โดยออกแบบให้ซีโรของตัวควบคุมทั้งหมดเป็นค่าจริงและอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน จากข้อกำหนดของสมการดังสมการที่ 3.26 สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงจรมีเปิดได้ดังนี้

$$G_c(s)G_p(s) = \frac{K_c K_{pl} \prod_{i=1}^n (s + z_i)}{s(s + p_d) \prod_{i=1}^n (s + p_i)} \quad (3.26)$$

จากทฤษฎีทางเดินของรากโดยใช้เงื่อนไขของมุม รากจะอยู่ที่ตำแหน่ง s_d เมื่อทำตามสมการที่ 3.23 เป็นจริงจะได้ว่า

$$n \times \angle(s_d + z_c) - \left[\angle s_d + \angle(s_d + p_d) + \sum_{i=1}^{n-1} \angle(s_d + p_i) \right] = \pm(2k+1)\pi ; k = 0, 1, 2, \dots \quad (3.27)$$

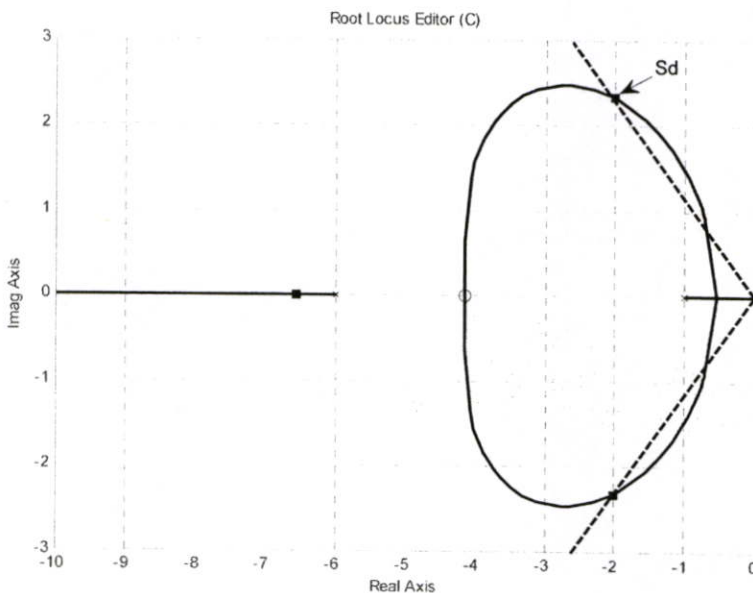
เมื่อหาค่ามุมของ $\angle(s_d + z_c)$ ได้แล้ว สามารถหาค่าแ่งซีโรของตัวควบคุมได้และจากทฤษฎีทางเดินรากโดยใช้เงื่อนไขของขนาดรากจะอยู่ที่ตำแหน่ง s_d เมื่อแก้สมการที่ 3.27 หาค่าอัตราขยาย K ได้ดังนี้

$$K = \frac{|s_d| |(s_d + p_d)| \prod_{i=1}^{n-1} |(s_d + p_i)|}{|(s_d + z_c)|^n} \quad (3.28)$$

ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบปิดคือ

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K(s + z_c)^n}{(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2) \prod_{i=1}^{n-1} (s + p_{ci})} \quad (3.29)$$

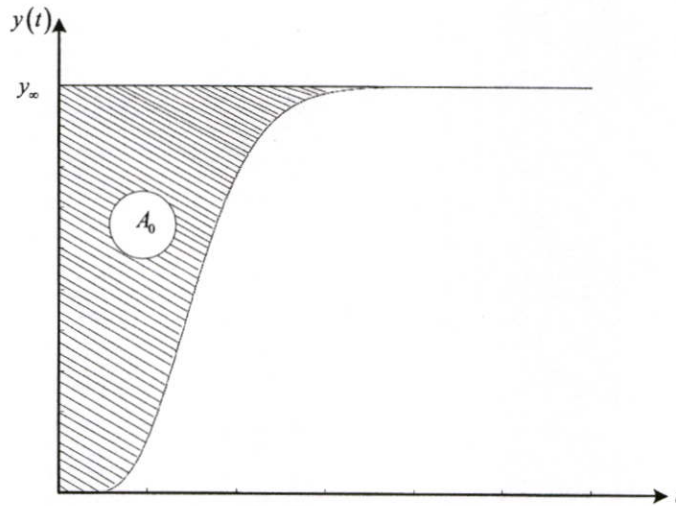
โดยที่ $(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)$ เป็นรากของสมการคุณลักษณะที่อยู่จุด s_d และรากของสมการคุณลักษณะที่เหลืออีก $n-1$ ตัวคือ $s = -p_{c1}, s = -p_{c2}, \dots, s = -p_{c_{n-1}}$ ตามรูป 3.2 แสดงถึงทางเดินรากในกรณีนี้ จากทฤษฎีระบบควบคุมทำให้ทราบว่าผลของซีโรที่มีอยู่ทำให้ค่าพุงเกินมีค่าสูงกว่าที่ต้องการ แต่เนื่องจากทางเดินรากอยู่ในรูปแบบที่ใกล้เคียงกับวงกลมบนครึ่งซ้ายของระนาบ s จึงเห็นได้ชัดว่าระบบควบคุมนี้จะมีเสถียรภาพตลอดเวลาและเมื่อปรับอัตราขยายให้สูงขึ้น ค่าอัตราหน่วงจะลดลง ซึ่งจะส่งผลให้ค่าพุงเกินมีค่าลดลงจนเข้าสู่ค่าที่ต้องการ



รูปที่ 3.2 ลักษณะทางเดินของรากที่ผ่านจุด s_d

3.3.2 ด้วยวิธีการ Root Locus (โดยวางซีโรที่ตำแหน่ง $1/T_i$)

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยทฤษฎีทางเดินรากในหัวข้อที่ 3.3.1 เป็นการวางซีโรของตัวควบคุม ณ ตำแหน่งที่ทำให้เส้นทางเดินของรากล้นผ่านจุด s_d ซึ่งข้อดีของวิธีนี้คือสามารถกำหนดเงื่อนไขให้กับกระบวนการได้ เช่น เวลาเข้าที่ ค่าพุ่งเกิน เป็นต้น สำหรับในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางเดินรากเช่นเดียวกัน แต่ตำแหน่งซีโรของตัวควบคุมจะถูกวางตรงตำแหน่งเดียวกันกับตำแหน่งโพลของระบบซึ่งระบบจะต้องเป็นระบบแบบโมโนโทนิก [3] ข้อดีของการออกแบบตัวควบคุมแบบนี้คือจะทำให้ผลตอบสนองของระบบไม่มีค่าพุ่งเกิน (No Over Shoot) [3] พิจารณาผลตอบสนองของระบบในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ผลตอบสนองของระบบควบคุม

1. ป้อนอินพุตแบบขั้นบันไดให้กับระบบด้วยแอมพลิจูดขนาดเท่ากับ A และบันทึกผลตอบสนองดังรูป 3.3 และคำนวณหาค่าสมการของกราฟผลตอบสนอง $y(t)$ จาก

$$y(t) = KA \left(1 - \frac{1}{\tau} t e^{-\frac{t}{\tau}} - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), t \geq 0 \quad (3.30)$$

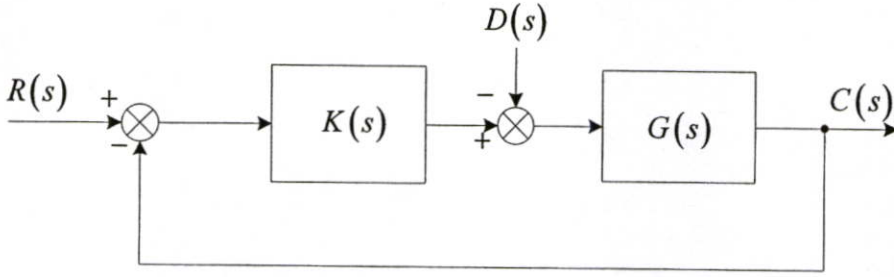
2. คำนวณหาพื้นที่ A_0 และค่าคงตัว y_∞ ของ $y(t)$

$$A_0 = \int_0^{\infty} [KA - y(t)] dt = KA \int_0^{\infty} \left(\frac{1}{\tau} t e^{-\frac{t}{\tau}} + e^{-\frac{t}{\tau}} \right) dt \quad (3.31)$$

โดยที่ $y_\infty = KA$

3. คำนวณหาค่าคงตัว (Time Constant) โดยกำหนดให้ $A_0 = 2KA\tau$ จะได้ว่า

$$\tau = \frac{A_0}{2y_\infty} \quad (3.32)$$



รูปที่ 3.4 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมป้อนกลับ

พิจารณาระบบควบคุมป้อนกลับดังรูป 3.34 โดยที่สมการของ $G(s)$ อยู่ในรูปแบบตามสมการที่ 3.33 คำนวณเป็นแบบพีไอ

$$G(s) = \frac{K}{(\tau s + 1)^n}; n = 0, 1, 2, \dots \quad (3.33)$$

สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอเราสมมติให้เป็น

$$K(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (3.34)$$

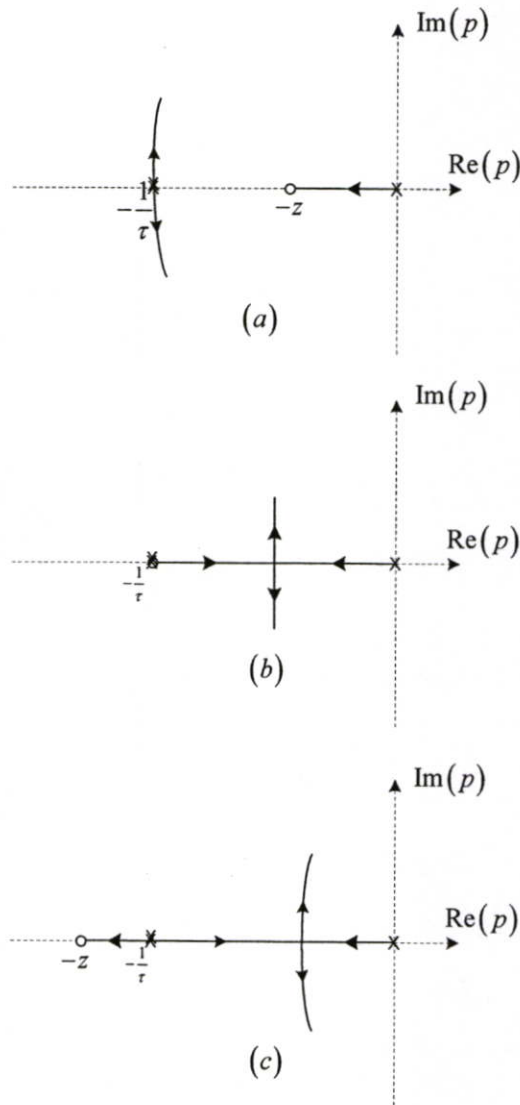
หรือเขียนให้อยู่ในรูปของสมการที่ 3.35

$$K(s) = K_p \frac{s + 1/T_i}{s} = K_p \frac{s + z}{s} \quad (3.35)$$

เมื่อ $z = 1/T_i$ การแก้ปัญหาเพื่อที่จะหาค่าพารามิเตอร์ของระบบคือการหาค่า K_p และการวางซีโรของตัวควบคุมที่ตำแหน่ง $-1/T_i$ ซึ่งหาได้จากการใช้ทฤษฎีของทางเดินรากเข้ามาช่วยโดยพิจารณาจากรูปที่ 3.35

1. เมื่อวางซีโรของตัวควบคุม $(-1/T_i)$ ระหว่างจุดกำเนิดกับตำแหน่งโพลของกระบวนการ ($T_i > \tau$) ดังรูปที่ 3.5(a) ผลตอบสนองของระบบวงรอบปิดจะอยู่ในโหมด Under damped เนื่องจากมีค่าพุงเกินของระบบ
2. เมื่อวางซีโรของตัวควบคุม $(-1/T_i)$ ที่ตำแหน่งเดียวกันกับตำแหน่งโพลของกระบวนการ ($T_i = \tau$) ดังรูปที่ 3.5(b) ผลตอบสนองของระบบวงรอบปิดจะอยู่ในโหมด Critical damped เมื่อปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุม K_p เพิ่มขึ้นก็จะยังคงทำให้ผลตอบสนองของระบบวงรอบปิดไม่เกิดค่าพุงเกิน
3. เมื่อวางซีโรของตัวควบคุม $(-1/T_i)$ ให้อยู่ทางซ้ายของตำแหน่งโพลของระบบ ดังรูปที่ 3.5(c) ผลตอบสนองของระบบวงรอบปิดจะอยู่ในโหมด Critical damped เมื่อปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุม K_p ผลตอบสนองของระบบวงรอบปิดไม่เกิดค่าพุงเกิน แต่เมื่อพิจารณาจากทางเดินของรากในรูปที่ 3.5(c) เมื่อปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุม K_p ไปโพลวงรอบปิดของระบบมีโอกาสเคลื่อนที่เข้าใกล้แกนจินตภาพ (Imagine) ซึ่งมีโอกาสที่

จะทำให้ระบบไร้เสถียรภาพได้และจะทำให้ระบบมีค่าคงที่เวลา (Time Constant) สูงซึ่งจะทำให้ระบบช้าด้วย



รูปที่ 3.5 การวางโพลและซีโรของตัวควบคุมพีไอบนทางเดินราก

หลังจากที่วางโพลและซีโรของตัวควบคุมเข้าไปในระบบแล้วจะได้ทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันของระบบคือ

$$T(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.36)$$

เมื่อ $\omega_n = \sqrt{KK_p}/\tau$ และ $\zeta = 1/(2\sqrt{KK_p})$ การหาค่าของ K_p ที่ทำให้ระบบยังอยู่ในโหมดของ Critical damped นั้นหาได้จาก $K_p = 1/(4K)$ แต่ถ้าปรับค่า K_p ให้มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า $1/(4K)$ จะทำให้ระบบอยู่ในโหมด Underdamped หรือ Overdamped ซึ่งจะทำให้ผลตอบสนองของระบบเกิดค่าพุ่งเกิน (Over Shoot) ค่าของ ζ จึงถูกนำมาใช้ในการหาค่าพุ่งเกินได้ดังสมการที่ 3.37

$$P.O.(%) = \exp\left(\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right) \times 100\% \quad (3.37)$$

จากสมการที่ 3.37 ทำให้เราหาความสัมพันธ์ระหว่าง K กับ δ ซึ่งค่า $\delta = P.O.(%)/100$ และจะทำให้ค่าสามารถหาค่า K_p ได้จากสมการ 3.38

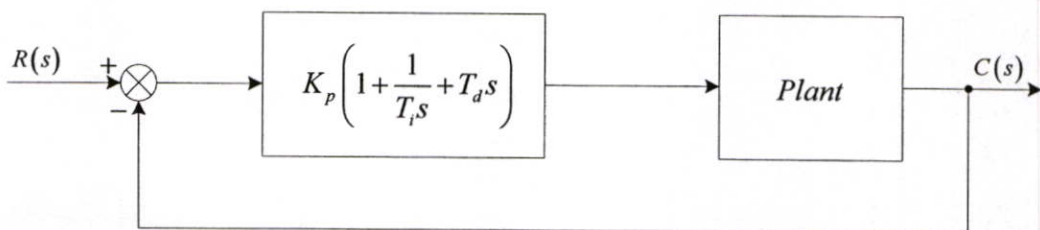
$$K_p = \frac{1}{4K} \left[1 + \left(\frac{\pi}{\ln \delta} \right)^2 \right] \quad (3.38)$$

จากที่ได้กล่าวถึงรายละเอียดของการพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการวางซีโรของตัวควบคุมที่ตำแหน่ง $1/T_i$ โดยใช้ทฤษฎีทางเดินรากเข้ามาช่วย สามารถสรุปขั้นตอนวิธีการหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมได้ดังนี้

1. ป้อนอินพุตแบบขั้นบันไดให้กับระบบด้วยแอมพลิจูดขนาดเท่ากับ A และบันทึกผลตอบสนองเอาต์พุต $y(t)$
2. กำหนดหาค่า y_∞ (ที่สภาวะคงตัวของ $y(t)$) และหาพื้นที่ A_0 ของรูปที่ 3.3
3. กำหนดค่า integral time จากสมการ $T_i = A_0/(2y_\infty)$
4. กำหนดค่าเริ่มต้นของค่าอัตราขยายตัวควบคุมโดยที่ 1) $K_p = A/(4y_\infty)$ สำหรับผลตอบสนองของระบบไม่มีค่าพุงเกิน และ 2) $K_p = A[1 + (\pi/\ln \delta)^2]/(4y_\infty)$ สำหรับผลตอบสนองของกระบวนการที่มีค่าพุงเกิน $\delta \times 100\%$

3.3.3 ทฤษฎีของ Ziegler-Nichols

กระบวนการและการควบคุมแบบพีไอดี ดังรูปที่ 3.6 แสดงให้เห็นภาพบล็อกไดอะแกรมของกระบวนการและตัวควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งหากโมเดลทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการสามารถวิเคราะห์ได้ ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะใช้เทคนิควิธีการออกแบบต่างๆ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่สามารถให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมมีคุณสมบัติดังต้องการทั้งในช่วงสภาวะชั่วคราว และสภาวะอยู่ตัว อย่างไรก็ตามในกรณีของกระบวนการที่มีความซับซ้อน ทำให้การหาโมเดลทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการทำได้ยาก จึงส่งผลให้ไม่สามารถใช้วิธีการวิเคราะห์โมเดลทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการเพื่อการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีได้ เราจึงต้องหันไปพึ่งวิธีการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมดังที่จะกล่าวดังต่อไปนี้



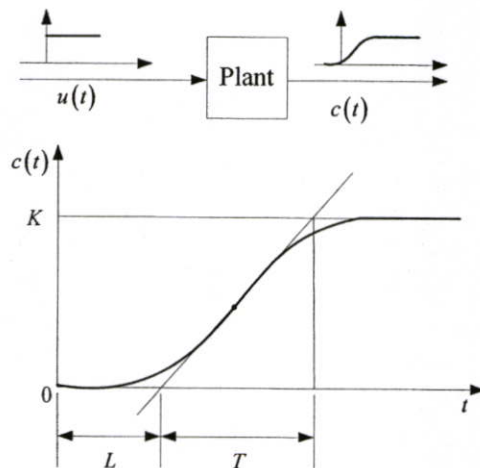
รูปที่ 3.6 ระบบควบคุมป้อนกลับเมื่อตัวควบคุมเป็นแบบพีไอดี

กระบวนการของการเลือกพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเพื่อให้คุณสมบัติของผลตอบสนองเป็นไปตามต้องการนั้น เรียกว่า การปรับค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุม (Tuning Controller) โดย Ziegler และ Nichols ได้นำเสนอกฎในการปรับค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุม แบบพีไอดี (หมายถึงกฎในการหาค่า K_p , T_i , T_d) ซึ่งเป็นวิธีการทดลองที่นำค่าผลตอบสนองของระบบต่อสัญญาณอินพุทแบบขั้นบันได (Unit Step) หรือค่าของ K_p มาใช้ในการคำนวณหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี วิธีของ Ziegler-Nichols เป็นวิธีที่มีประโยชน์อย่างมากโดยเฉพาะในกรณีที่ โมเดลทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการไม่สามารถหาได้ โดยที่ค่าของพารามิเตอร์ (K_p , T_i , T_d) ที่ได้จากวิธีของ Ziegler-Nichols นี้สามารถให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตาม ผลตอบสนองของระบบอาจจะมีค่าพุ่งเกินมากกว่าค่าที่ยอมรับได้ ดังนั้นค่าของพารามิเตอร์ (K_p , T_i , T_d) ที่ได้จากวิธีของ Ziegler-Nichols จำเป็นต้องมีการปรับแต่งภายหลังเพื่อให้ได้ผลตอบสนองดังต้องการ สำหรับงานวิจัยจะใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ เพราะฉะนั้นเราสามารถที่จะประยุกต์ใช้ทฤษฎีของ Ziegler-Nichols ได้โดยที่ไม่ได้หาค่า T_d

- กฎของ Ziegler-Nichols ในการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี

การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี โดยใช้กฎของ Ziegler-Nichols มี 2 วิธีด้วยกัน

วิธีแรก เราจะทำการทดลองหาผลตอบสนองของกระบวนการที่มีต่ออินพุทแบบขั้นบันได ดังที่แสดงในรูปที่ 3.7 ถ้ากระบวนการไม่มีส่วนประกอบของตัวอินทิเกรทและรากเชิงซ้อน (complex conjugate poles) แล้วผลตอบสนองจะเป็นเส้นโค้งตัว s ดังรูป 3.7 โดยขั้นตอนการทดลองเพื่อหาเส้นโค้งตัว s นี้สามารถหาได้จากการทดลองป้อนอินพุทขั้นบันไดให้กับกระบวนการจริงหรือจากการจำลองกระบวนการ



รูปที่ 3.7 ผลตอบสนองของระบบที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้ง s

คุณลักษณะของเส้นโค้งรูปตัว s นี้สามารถกำหนดคุณลักษณะ โดยค่าคงที่ 2 ตัวด้วยกัน คือ ค่าหน่วงเวลา L (Delay time) และค่าเวลาคงตัว T (Time constant) ซึ่งค่าคงที่ทั้งสองสามารถหาได้โดยการลากเส้น Tangent line z ผ่านจุดสัมผัสส่วนโค้ง s และหาค่าจุดตัดของ Tangent line กับแกนเวลาและเส้นตรง $c(t) = K$ ดังแสดงในรูป 3.7 ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการ $C(s)/U(s)$ สามารถประมาณให้อยู่ในรูปของระบบอันดับหนึ่งที่มีพจน์ของการหน่วงเวลา ดังนี้

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts+1} \quad (3.39)$$

Ziegler-Nichols ได้นำเสนอค่าของชุดพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี (K_p, T_i, T_d) ไว้ดังแสดงในตาราง 3.1

ตารางที่ 3.1 กฎการหาค่าพารามิเตอร์ของ Ziegler-Nichols โดยวิธีการหาผลตอบสนองของอินพุทแบบขั้นบันได (วิธีแรก)

ชนิดของตัวควบคุม	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2\frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

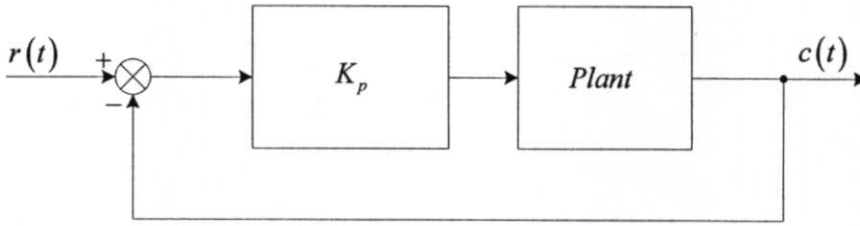
ด้วยวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีโดยวิธีแรกนี้จะให้ ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของตัวควบคุม ดังนี้

$$\begin{aligned} G_c(s) &= K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \\ &= 1.2 \frac{T}{L} \left(1 + \frac{1}{2Ls} + 0.5Ls \right) \\ &= 0.6T \frac{\left(s + \frac{1}{L} \right)^2}{s} \end{aligned} \quad (3.40)$$

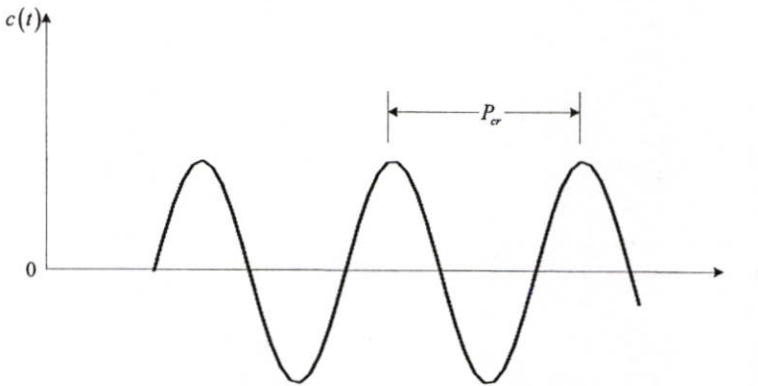
ซึ่งจะเห็นได้ว่าตัวควบคุมพีไอดีที่ออกแบบมีโพลอยู่ที่จุดกำเนิดและมีซีโรซ้ำกันสองตัวที่ $s = -1/L$

วิธีที่สอง เราจะกำหนดให้ $T_i = \infty$ และ $T_d = 0$ จากนั้นทำการควบคุมระบบด้วยพฤติกรรมของตัวควบคุมแบบสัดส่วนเพียงอย่างเดียวดังรูป 3.8 และทำการเพิ่มค่า K_p จากค่า 0 จนถึงค่าวิกฤติ K_u ซึ่ง

เป็นค่าอัตราขยายที่ทำให้ผลตอบสนองของระบบเริ่มแสดงการแกว่งแบบต่อเนื่อง ดังรูป 3.9 (หากผลตอบสนองของระบบไม่สามารถแสดงการแกว่งแบบต่อเนื่อง แม้จะทำการแปรค่า K_p ไปเท่าใดก็ตาม ระบบนั้นจะไม่สามารถทำการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีได้โดยวิธีนี้)



รูปที่ 3.8 ระบบควบคุมลูปปิด โดยตัวควบคุมแบบสัดส่วน



รูปที่ 3.9 การแกว่งอย่างต่อเนื่องด้วยคาบเวลา P_{cr}

จากค่าของอัตราขยายวิกฤติ K_{cr} และค่าคาบเวลาวิกฤติ P_{cr} Ziegler-Nichols ได้นำเสนอวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี (K_p, T_i, T_d) ไว้ดังแสดงในตาราง 3.2

ตารางที่ 3.2 กฎการหาค่าพารามิเตอร์ของ Ziegler-Nichols โดยวิธีการหาอัตราขยายวิกฤติ K_{cr} และคาบเวลาวิกฤติ P_{cr} (วิธีที่ 2)

ชนิดของตัวควบคุม	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2}P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

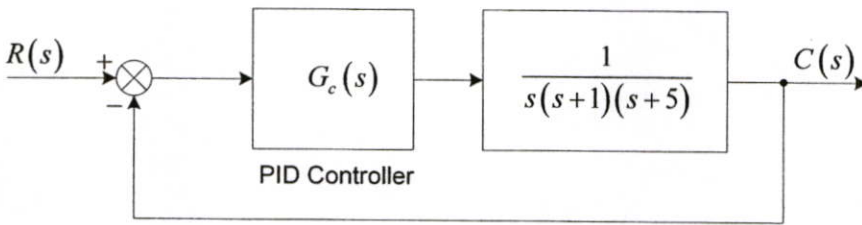
ด้วยวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีโดยวิธีที่ 2 นี้จะให้ ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของตัวควบคุม ดังนี้

$$\begin{aligned} G_c(s) &= K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \\ &= 0.6 K_{cr} \left(1 + \frac{1}{0.5 P_{cr} s} + 0.125 P_{cr} s \right) \\ &= 0.075 K_{cr} P_{cr} \frac{\left(s + \frac{4}{P_{cr}} \right)^2}{s} \end{aligned} \quad (3.41)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าตัวควบคุมพีไอดีที่ออกแบบมีโพลอยู่ที่จุดกำเนิดและมีซีโรซ้ำกันสองตัวที่ $s = -4/P_{cr}$

ตัวอย่างที่ 3.1 พิจารณาระบบควบคุมที่แสดงดังรูป 3.10 ตัวควบคุมพีไอดีในระบบควบคุม $G_c(s)$ มี ทรานเฟอร์ฟังก์ชันดังนี้

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3.42)$$



รูปที่ 3.10 ระบบควบคุมแบบพีไอดี

ในที่นี้เราจะทำการหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุม (K_p , T_i , T_d) โดยวิธีการของ Ziegler-Nichols จากนั้นจะทำการตรวจสอบผลตอบสนองของระบบควบคุมว่ามีค่าพุงเกินมากกว่า 25% หรือไม่ หากมากกว่าจะทำการปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีจนกว่าจะได้ผลตอบสนองที่มีค่าพุงเกินตามต้องการ

จากทรานเฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการเราจะเห็นได้ว่ากระบวนการประกอบด้วยพจน์ อินทิเกรต จึงเลือกใช้การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีโดยวิธีการของ Ziegler-Nichols ในแบบที่ 2

เริ่มจาก กำหนดให้ $T_i = \infty$ และ $T_d = 0$ เราจะได้ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของระบบควบคุมวงปิด ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K_p}{s(s+1)(s+5) + K_p} \quad (3.43)$$

ค่าของ K_p ที่ขอบเขตของความมีเสถียรภาพของระบบ ซึ่งเป็นค่าที่ค่าอัตราขยายที่ทำให้ผลตอบสนองของระบบเริ่มแสดงการแกว่งแบบต่อเนื่อง สามารถหาได้โดยเกณฑ์เสถียรภาพของเรีท์ (Routh stability criterion) สมการคุณลักษณะของระบบควบคุมวงปิด มีค่าเท่ากับ

$$s^3 + 6s^2 + 5s + K_p = 0 \quad (3.44)$$

จากนั้นเราสามารถนำสมการที่ 3.44 ไปสร้างเป็นตารางเรีท์ ได้ดังนี้

$$\begin{array}{r|rr} s^3 & 1 & 5 \\ s^2 & 6 & K_p \\ s^1 & \frac{30 - K_p}{6} & \\ s^0 & K_p & \end{array} \quad (3.45)$$

จากหลักแรกของตารางเรีท์ จะพบว่าค่า $K_p = 30$ เป็นค่าอัตราขยายวิกฤติที่ทำให้ระบบเริ่มเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นค่า $K_{cr} = 30$ เมื่อแทนค่า $K_{cr} = 30$ ลงในสมการคุณลักษณะของระบบควบคุมวงปิด จะได้

$$s^3 + 6s^2 + 5s + 30 = 0 \quad (3.46)$$

จากนั้นทำการหาค่า ความถี่ของการแกว่งอย่างต่อเนื่อง โดยการแทนค่าตัวแปร s ในสมการคุณลักษณะของระบบควบคุมวงปิดด้วย $j\omega$ จะได้

$$(j\omega)^3 + 6(j\omega)^2 + 5(j\omega) + 30 = 0 \quad (3.47)$$

หรือ

$$6(5 - \omega^2) + j\omega(5 - \omega^2) = 0 \quad (3.48)$$

เมื่อแก้สมการได้ค่าความถี่ของการแกว่งอย่างต่อเนื่อง $\omega = \sqrt{5}$ ดังนั้นค่าคาบเวลาวิกฤติ จึงมีค่าเท่ากับ

$$P_{cr} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{5}} = 2.8099 \quad (3.49)$$

จากตารางที่ 3.2 สามารถหาค่าพารามิเตอร์ K_p , T_i , T_d ได้ดังนี้

$$\begin{array}{l} K_p = 0.6K_{cr} = 18 \\ T_i = 0.5P_{cr} = 1.405 \\ T_d = 0.125P_{cr} = 0.35124 \end{array} \quad (3.50)$$

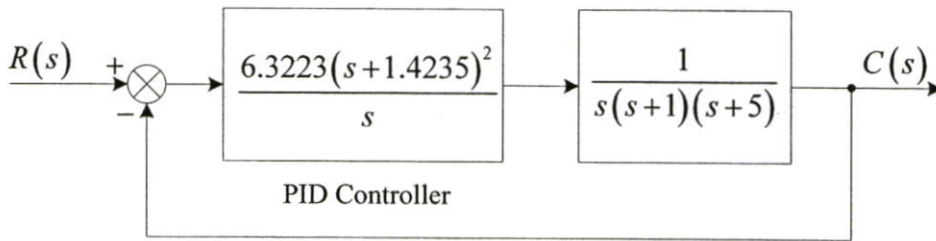
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของตัวควบคุมพีไอดี มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} G_c(s) &= K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \\ &= 18 \left(1 + \frac{1}{1.405s} + 0.35124s \right) \\ &= \frac{6.3223(s+1.4235)^2}{s} \end{aligned} \quad (3.51)$$

จะสังเกตเห็นได้ว่าตัวควบคุมมีโพลที่จุดกำเนิดและมีซีโรซ้ำกันสองค่าอยู่ที่ $s = -1.4235$ บล็อกไดอะแกรมของระบบแสดงดังรูป 3.11

ขั้นต่อไปเราจะทำการหาผลตอบสนองของระบบ ในกรณีที่ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของระบบควบคุมวงปิด มีค่าเท่ากับ

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{6.3223s^2 + 18s + 12.811}{s^4 + 6s^3 + 11.3223s^2 + 18s + 12.811} \quad (3.52)$$



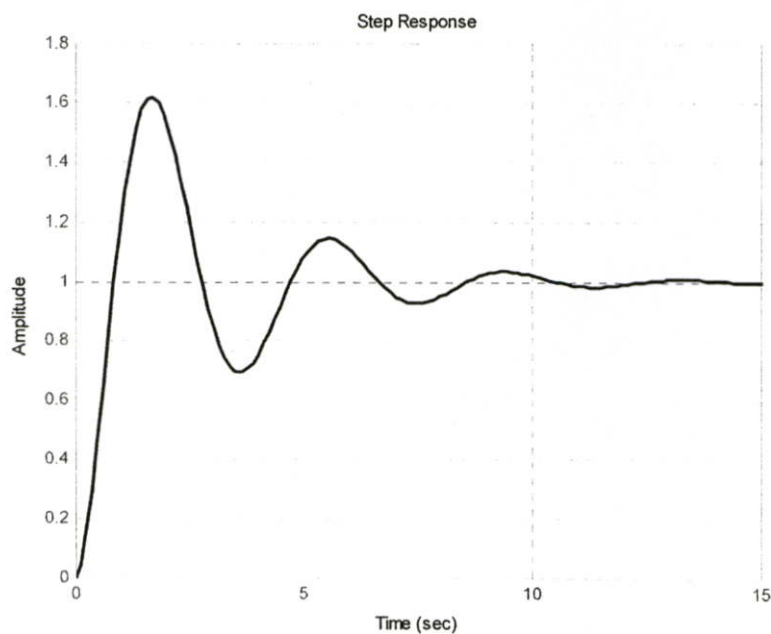
รูปที่ 3.11 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีไอดีซึ่งออกแบบโดยวิธี Ziegler-Nichols (แบบที่ 2)

นอกจากการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโดยวิธีการคำนวณด้วยมือแล้วเรายังสามารถใช้โปรแกรม MATLAB มาช่วยในการคำนวณได้อีกด้วย ซึ่งช่วยให้เราสามารถหาค่าพารามิเตอร์ได้ง่ายขึ้น เร็วขึ้น และยังมีความแม่นยำกว่าการที่เราคำนวณด้วยมือ โดยโปรแกรม MATLAB เราสามารถหาผลตอบสนองของระบบควบคุมวงปิดได้จากโค้ดโปรแกรมตารางที่ 3.3

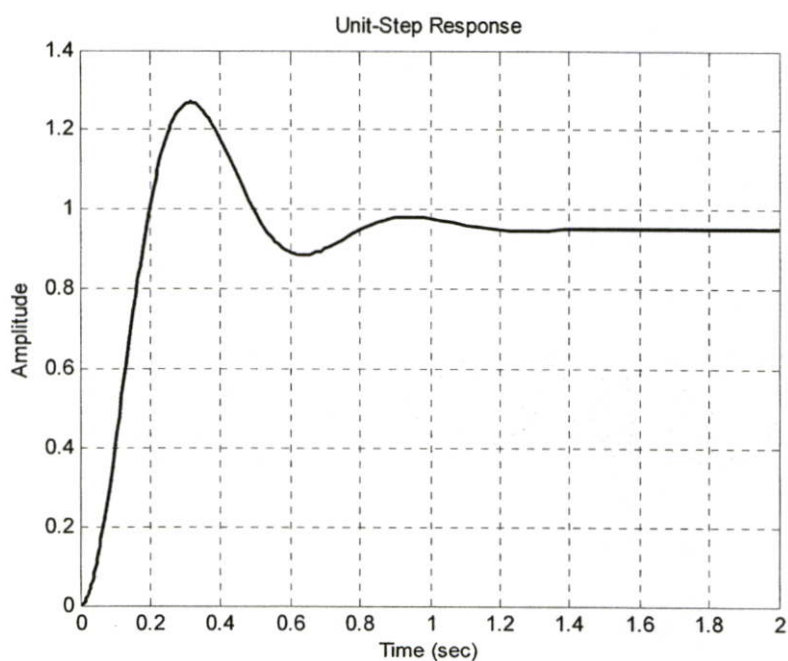
ตาราง 3.3 MATLAB Program

```
% ----- Unit-step response -----
num= [0 0 6.3223 18 12.811];
den= [1 6 11.3223 18 12.811];
Step(num,den)
Grid title('Unit-Step Response')
```

ผลตอบสนองของระบบควบคุมจะเป็นดังรูป 3.12 ซึ่งจากค่าพุงเกิน 62% ทำให้เราต้องทำการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี เพื่อลดค่าพุงเกินดังกล่าว



รูปที่ 3.12 ผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบพีไอดีต่ออินพุทแบบขั้นบันได



รูปที่ 3.13 ผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบพีไอดีต่ออินพุทแบบขั้นบันไดเมื่อ

$$K_p = 18, T_i = 3.077, T_d = 0.7692$$

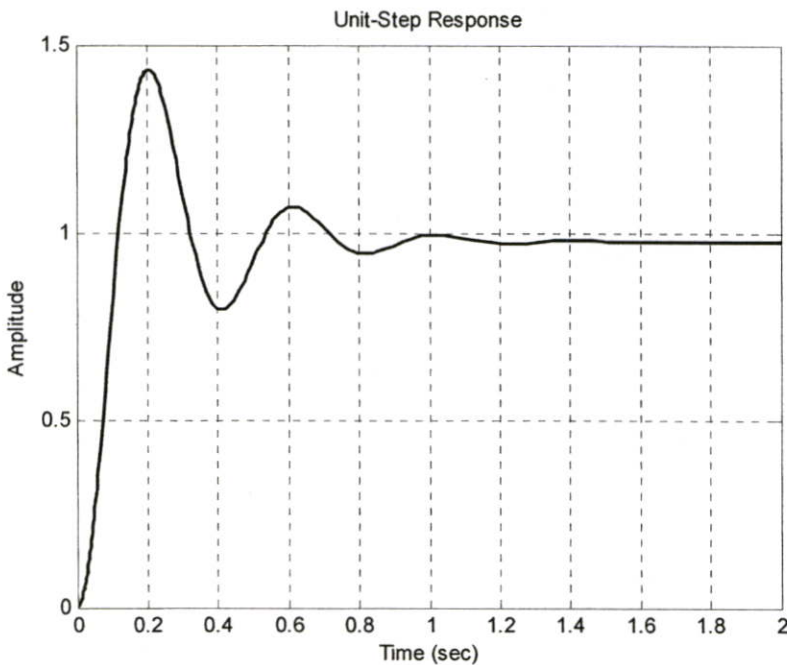
การปรับแต่ง ครั้งที่ 1 : คงค่าอัตราขยายค่าเดิมไว้ที่ $K_p = 18$ และปรับตำแหน่งของซีโรของตัวควบคุมไปที่ $s = -0.65$ จะได้ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของตัวควบคุมดังนี้

$$G_c(s) = 18 \left(1 + \frac{1}{3.077s} + 0.7692s \right) = 13.846 \frac{(s+0.65)^2}{s} \quad (3.53)$$

ด้วยวิธีนี้ จากรูป 3.13 ผลตอบสนองของระบบจะมีค่าพุ่งเกินลดลงอยู่ที่ 18% โดยประมาณ

การปรับแต่ง ครั้งที่ 2 : ปรับค่าอัตราขยายค่าเดิมไว้ที่ $K_p = 39.42$ โดยคงตำแหน่งของซีโรของตัวควบคุมที่ $s = -0.65$ จะได้ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของตัวควบคุมดังนี้

$$G_c(s) = 39.42 \left(1 + \frac{1}{3.077s} + 0.7692s \right) = 30.322 \frac{(s+0.65)^2}{s} \quad (3.54)$$



รูปที่ 3.14 ผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบพีไอดีต่ออินพุทแบบขั้นบันไดเมื่อ

$$K_p = 39.42, T_i = 3.077, T_d = 0.7692$$

ด้วยวิธีนี้ จากรูป 3.14 ความเร็วของผลตอบสนองของระบบจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าพุ่งเกินก็ขยับสูงขึ้น ที่ 28% แต่เนื่องจากค่าพุ่งเกินไม่ห่างจากค่าที่กำหนดมากนัก จึงสามารถยอมรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่

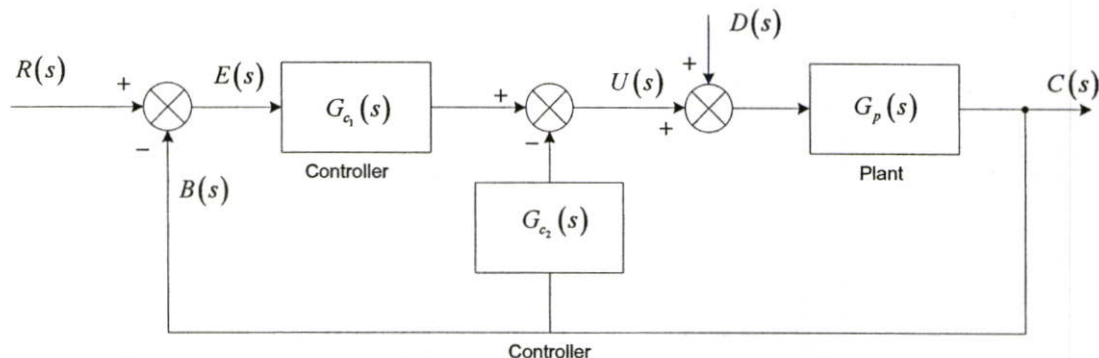
$$K_p = 39.42, T_i = 3.077, T_d = 0.7692 \quad (3.55)$$

จากการสังเกตระหว่างค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี ที่เกิดจากการคำนวณครั้งแรก กับค่าที่นำไปใช้นั้น ต่างกันถึงสองเท่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่า วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีโดยวิธี Ziegler-Nichols นั้นเป็นวิธีที่ช่วยเป็นแนวทางในการหาค่าเบื้องต้นซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่สามารถ

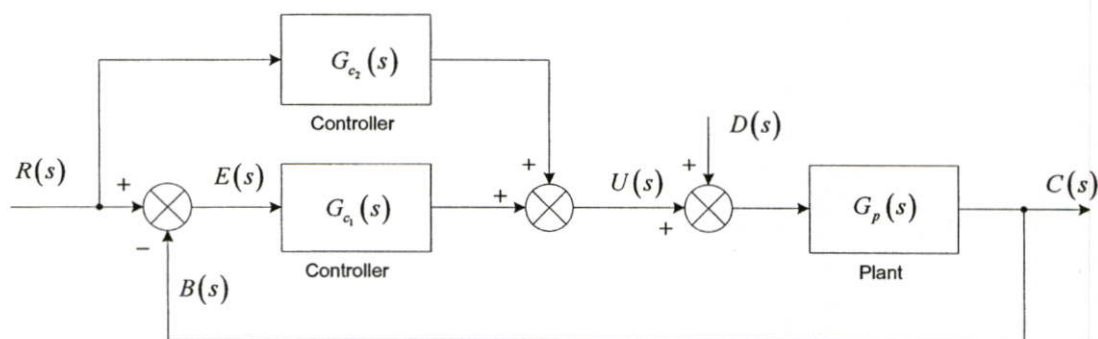
นำไปใช้ได้จริงนั้น ยังต้องอาศัยการปรับแต่งเพื่อให้ได้ผลตอบสนองดังที่ต้องการ ข้อสังเกตอีกอย่างหนึ่งในการปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี การปรับค่าอัตราขยาย K_p ให้มีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมนั้นเร็วขึ้น ในขณะที่เดียวกันในการปรับแต่งค่าพุงเกินของผลตอบสนองให้มีค่าลดลงนั้นค่าที่ส่งผลมากกว่าคือค่าตำแหน่งของซีโรของตัวควบคุม ที่สามารถทำให้ค่าอัตราการหน่วงของโพลเด่นของระบบควบคุมวงปิดนั้นสามารถเปลี่ยนค่าไป ซึ่งส่งผลต่อค่าพุงเกินของระบบโดยตรง

3.4 การออกแบบระบบควบคุมแบบสององศาอิสระ (Two Degree of Freedom: 2-DOF)

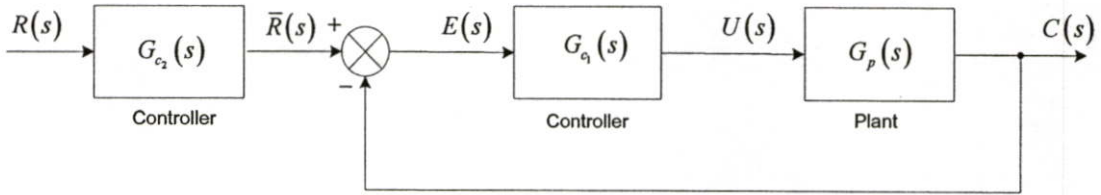
ระบบควบคุมแบบสององศาอิสระ (Two Degree of Freedom: 2-DOF) เป็นระบบที่มีตัวควบคุม 2 ตัวที่สามารถปรับปรุงระบบควบคุมให้ผลตอบสนองของระบบเป็นไปตามข้อกำหนดที่ต้องการ ซึ่งจะแตกต่างจากระบบควบคุมจากระบบหนึ่งองศาอิสระ (One Degree of Freedom: 1-DOF) ที่ตัวควบคุมสามารถปรับปรุงผลตอบสนองของระบบได้ด้วยตัวควบคุมเพียงตัวเดียว หลังจากการออกแบบแล้วถ้าผลตอบสนองไม่เป็นไปตามที่กำหนด อาจจะปรับอัตราขยายให้มากขึ้นไม่ได้ดังนั้นระบบควบคุม 2-DOF ที่สามารถปรับตัวควบคุมตัวที่สองซึ่งอิสระจากตัวควบคุมตัวแรก ซึ่งอาจทำให้ข้อจำกัดของระบบ 1-DOF นี้ลดลงไปได้



รูปที่ 3.15 แสดงระบบควบคุมป้อนกลับแบบ 2-DOF



รูปที่ 3.16 แสดงระบบควบคุมป้อนกลับแบบ 2-DOF แบบ Feedforward



รูปที่ 3.17 แสดงระบบควบคุมป้อนกลับแบบ 2-DOF

จากโครงสร้างของระบบควบคุม 2-DOF ในรูปที่ 3.15 ถึงรูปที่ 3.17 จะแสดงให้เห็นรูปแบบโครงสร้างของระบบ 2-DOF ในรูปแบบต่างๆ แต่รูปแบบที่ผู้วิจัยจะได้นำเสนอในงานวิจัยชิ้นนี้คือรูปแบบของระบบควบคุม 2-DOF ในรูปที่ 3.17 เนื่องจากจะนำมาช่วยลดปัญหาการพุ่งเกินของระบบที่ไม่เป็นไปตามที่ต้องการ

จากข้อกำหนดของระบบจะเห็นได้ว่าถ้าต้องการให้ผลตอบสนองของระบบเป็นไปตามข้อกำหนดของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงรอบปิดของระบบจะต้องมีรูปแบบที่ใกล้เคียงกับสมการที่ 3.56

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (3.56)$$

ซึ่งในการออกแบบระบบควบคุม 1-DOF ในบทนี้แล้วในการออกแบบด้วยวิธีทางเดินรากโดยอาศัยการวางซีโรของตัวควบคุมให้ลดผลกระทบแล้ววางซีโรของตัวควบคุมตัวที่เหลือเพื่อให้เงื่อนไขของมูมเป็นจริง ซึ่งทำให้ทางเดินรากผ่านจุด s_d ซึ่งเป็นรากโพลเด่นของกระบวนการแต่ผลตอบสนองของระบบก็ยังไม่สามารถได้ตามข้อกำหนดได้เนื่องจากฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงรอบปิดของระบบหลังจากการประมาณแล้วสมการที่ 3.57 ซึ่งไม่เทียบเท่ากับสมการที่ 3.58

$$\frac{C(s)}{R(s)} \approx \frac{K(s+z_c)}{(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (3.57)$$

จากสมการที่ 3.57 จัดใหม่จะได้

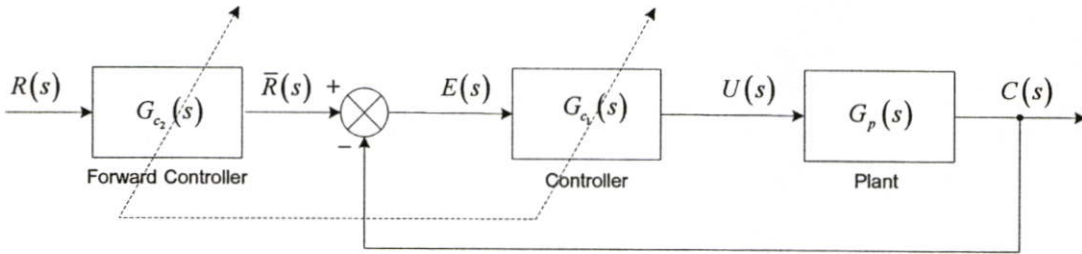
$$T(s) = \frac{C(s)}{\bar{R}(s)} = \frac{K}{(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \cdot (s+z_c) \quad (3.58)$$

จากสมการที่ 3.58 ถ้าเราสามารถที่จะลดผลกระทบได้ ซีโรของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงรอบปิดนี้ได้นำจะทำให้ผลตอบสนองของระบบเป็นไปตามข้อกำหนดได้ ดังนั้นจึงเลือกระบบควบคุมแบบ 2-DOF เพื่อนำเอาตัวควบคุมตัวแรกมาออกแบบด้วยวิธีทางเดินรากซึ่งเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายและเอาตัวควบคุมตัวที่สองมาลดผลกระทบซีโรของระบบควบคุมแบบวงรอบปิดลง ดังนั้นจากสมการที่ 3.58 เมื่อตอบแบบสืบเนื่อง (Cascade) กับระบบเดิม 1-DOF จึงกลายเป็นระบบ 2-DOF ซึ่งกำหนดให้รูปแบบของตัวควบคุมตัวที่สองเป็นแบบกระบวนการอันดับหนึ่ง (First order) ที่มีเสถียรภาพตลอด แสดงดังสมการที่ 3.59

$$G_f(s) = \frac{\bar{R}(s)}{R(s)} = \frac{z_c}{(s+z_c)} \quad (3.59)$$

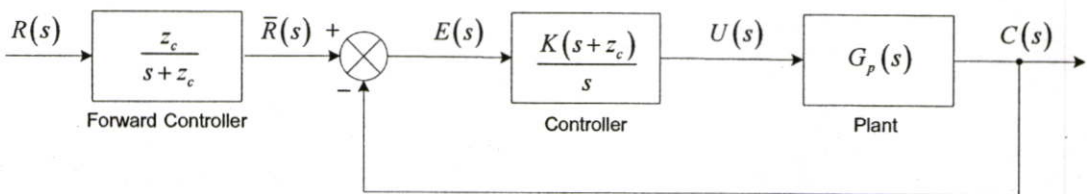
ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงรอบปิดของระบบใหม่จะมีลักษณะใกล้เคียงกันกับฟังก์ชันถ่ายโอนวงรอบปิดที่ต้องการ ซึ่งแสดงว่าระบบประมาณใกล้เคียงเป็นอันดับสองตามต้องการได้ แสดงดังสมการที่ 3.60

$$G_f(s)T(s) = \frac{\bar{R}(s)}{R(s)} \cdot \frac{C(s)}{\bar{R}(s)} = \frac{z_c}{(s+z_c)} \cdot \frac{K(s+z_c)}{(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (3.60)$$



รูปที่ 3.18 แสดงโครงสร้างระบบควบคุมป้อนกลับแบบ 2-DOF

จากสมการที่ 3.60 แสดงว่าถ้าเราออกแบบให้ตัวควบคุม Forward แปรตามตำแหน่งของซีโรตัวที่เหลือของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงรอบปิดผลตอบสนองของระบบจะได้ตามข้อกำหนดโดยไม่ต้องปรับแต่งค่าอัตราขยายของตัวควบคุมอีก ซึ่งสามารถแสดงโครงสร้างระบบควบคุม 2-DOF ได้ตามรูปที่ 3.18 การออกแบบระบบควบคุม 2-DOF สำหรับตัวควบคุมพีไอแสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 แสดงระบบควบคุมป้อนกลับแบบ 2-DOF โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ

3.4.1 ขั้นตอนการออกแบบระบบควบคุม 2-DOF

ในการออกแบบระบบควบคุมแบบ 2-DOF มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 หาจุด s_d จากข้อกำหนดที่ต้องการออกแบบ

ขั้นตอนที่ 2 วางซีโรของตัวควบคุมตามโครงสร้างของตัวควบคุมและหามุมตามเงื่อนไขของมุมจากทฤษฎีทางเดินของราก

ขั้นตอนที่ 3 หาค่าตำแหน่งซีโรของตัวควบคุมโดยใช้ทฤษฎีตรีโกณมิติ

ขั้นตอนที่ 4 หอ้ตราขยขงตัวควคุมตมเงื่อนไซของขนาดจกทฤษฎีทงเดินขงรอก

ขั้นตอนที่ 5 วดทงเดินรอกขงระบบ

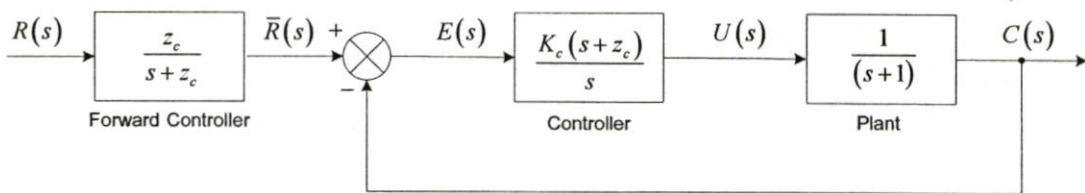
ขั้นตอนที่ 6 ออกเบบตัวควคุม Forward Path โดยโครงสร้างขงตัวควคุมแสดงคังสมการ

ที่ 3.51 ให้ค้ตำแหน่งขงโพลขงตัวควคุม Forward Path อยู่ค้ตำแหน่งเดียวกับซีโรขงตัวควคุมที่ท้ให้เงื่อนไซขงมมเป็นจริง

ขั้นตอนที่ 7 ป้อนอินพุทเบบข้ันบันได (Unit Step) วดผลตบสนองขงระบบ ถ้ผลตบสนองขงระบบไม่เป็นไปตมข้อก้หนดสามารถปรับค้หอ้ตราขยขงตัวควคุมจนกว้ผลตบสนองขงระบบจะเป็นไปตมข้อก้หนด

3.4.2 ตัวอย่างการออกแบบระบบควบคุม 2-DOF โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ

เมื่อกระบวนการเป็นกระบวนการอันดับหนึ่ง (ชนิด 0) และใช้ตัวควบคุมพีไอในการควบคุมดังรูป 3.20 โดยข้อก้หนดขงกระบวนการคือ $t_s \leq 2 \text{ sec} (\pm 2\%)$ $P.O. \leq 5\%$ $e_{ss} = 0$



รูปที่ 3.20 แสดงระบบควบคุมป้อนกลับแบบ 2-DOF โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ

ขั้นตอนที่ 1 หาจุดตัด s_d จกสมการที่ 3.22 จะได้ $s_d = -2.118 \pm j2.221$

ขั้นตอนที่ 2 หามุมเหลือจกเงื่อนไซขงมมจกทฤษฎีทงเดินรอกคังสมการที่ 3.27 เมื่อ $n=1$ ดังนั้นจะได้ $\angle(s_d + z_c) = 70.35^\circ$

ขั้นตอนที่ 3 หาค้ตำแหน่งซีโรขงตัวควคุมโดยใช้ทฤษฎีตรีโกณมิติจะได้

$$z_c = |\text{Re}(s_d)| - \frac{|\text{Im}(s_d)|}{\tan(\angle s_d + z_c)} = 2.911$$

ขั้นตอนที่ 4 หอ้ตราการขยขงตัวควคุมพีไอจกเงื่อนไซขงขนาดจกทฤษฎีทงเดินรอกจกสมการที่ 3.28 เมื่อกระบวนการเป็นกระบวนการอันดับหนึ่งคังนั้น $n=1$

$$K_c = \frac{|s_d||s_d + p_1|}{|s_d + z_c|} = \frac{|s_d||s_d + 1|}{|s_d + 2.911|} = 3.235$$

จะได้ตัวควคุมพีไอเป็น

$$G_c(s) = \frac{K_c(s + z_c)}{s} = \frac{3.235(s + 2.911)}{s}$$

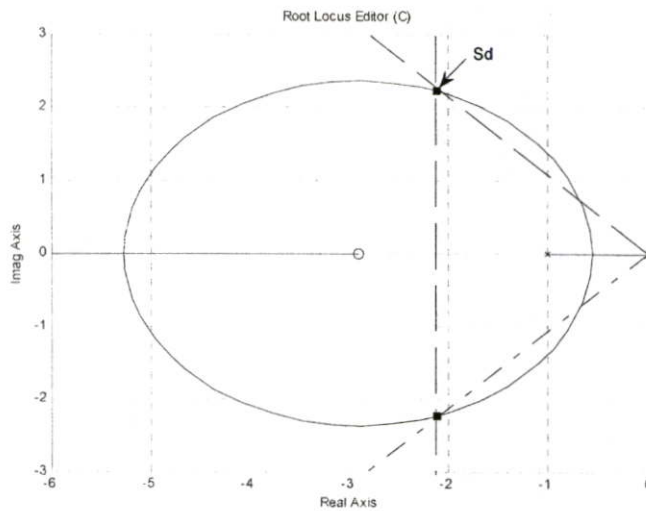
ดังนี้

ขั้นตอนที่ 5 หาคำแหน่งของตัวควบคุม Forward เปรียบตามตำแหน่งซีโรของตัวควบคุมพีไอได้

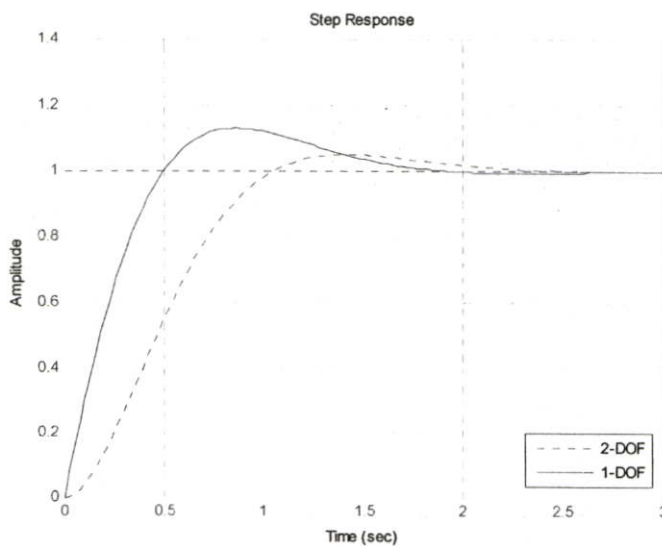
$$G_f(s) = \frac{z_c}{(s+z_c)} = \frac{2.911}{s+2.911}$$

ขั้นตอนที่ 6 วาดทางเดินรากของระบบจะต้องผ่านจุด s_d แสดงดังรูป 3.21

ขั้นตอนที่ 7 ป้อนอินพุตแบบขั้นบันได $R(s) = \text{Unit Step}$ และพล็อตผลตอบสนองของระบบ ถ้าผลตอบสนองของระบบไม่เป็นไปตามข้อกำหนดสามารถปรับค่าอัตราขยายจนกว่าผลตอบสนองของระบบจะเป็นไปตามข้อกำหนด

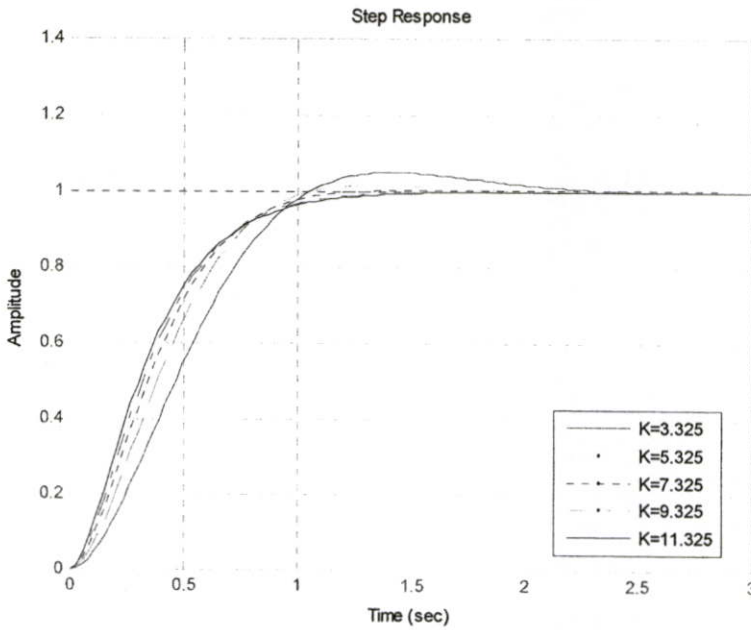


รูปที่ 3.21 แสดงทางเดินของรากของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ



รูปที่ 3.22 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุม 1-DOF กับ 2-DOF

สำหรับกระบวนการอันดับหนึ่งชนิดศูนย์ ตัวควบคุมเป็นแบบพีไอ



รูปที่ 3.23 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม 2-DOF เมื่อเพิ่มอัตราขยายของตัวควบคุม

3.5 บทสรุป

การใช้หลักการหรือทฤษฎีต่างๆ มาช่วยสำหรับการออกแบบตัวควบคุมนั้น จะต้องทำการศึกษาทฤษฎีนั้นเป็นอย่างดี ไม่ว่าจะเป็นข้อดี ข้อเสีย ข้อยกเว้นต่างๆ หรือเรียกสั้นๆ ว่า “กฎ” นั้นเอง เนื่องจากว่าถ้าเราไม่เข้าใจกฎของแต่ละทฤษฎีแล้วนั้นจะทำให้เราไม่สามารถนำทฤษฎีต่างๆ ไปใช้งานได้เลย เนื่องจากทฤษฎีบางอย่างก็ไม่สามารถใช้กับกระบวนการได้ทุกกระบวนการเพราะฉะนั้นแล้วเราจะต้องพิจารณาถึงความเป็นไปได้ด้วย สำหรับในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีต่างๆ ที่ถูกนำมาใช้ในงานวิจัย โดยได้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของแต่ละวิธีไว้ละเอียดพอสมควร อีกทั้งได้ยกตัวอย่างวิธีการคำนวณอีกด้วย ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าเนื้อหาในบทนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากในงานวิจัย

บทที่ 4

การจำลองและการทดลอง

4.1 กล่าวนำ

ในเนื้อหาทั้งสามบทที่ผ่านมาได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องทั้งหมดรวมไปถึงการยกตัวอย่างการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยวิธีการต่างๆ ซึ่งสมการที่นำมาใช้จะถูกยกตัวอย่างขึ้นมาเพื่อช่วยอธิบายถึงทฤษฎีต่างๆ ให้เข้าใจมากยิ่งขึ้น สำหรับในบทนี้จะได้นำเอาทฤษฎีในบทที่ 2 ซึ่งว่าด้วยเรื่องเกี่ยวกับกระบวนการทั้งหมดทั้งเรื่องฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์มาช่วยในการหาจุดทำงานและหาสมการคุณลักษณะหรือโมเดลของกระบวนการ หลังจากได้สมการคุณลักษณะหรือโมเดลของกระบวนการมาแล้ว จะนำเอาทฤษฎีการออกแบบระบบควบคุม และออกแบบตัวควบคุมในบทที่ 3 มาใช้ การทดลองแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อใหญ่ๆ คือ การหาสมการคุณลักษณะของกระบวนการ การจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม MATLAB และการทดลองควบคุมกระบวนการจริง ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวไว้ในแต่ละหัวข้อ

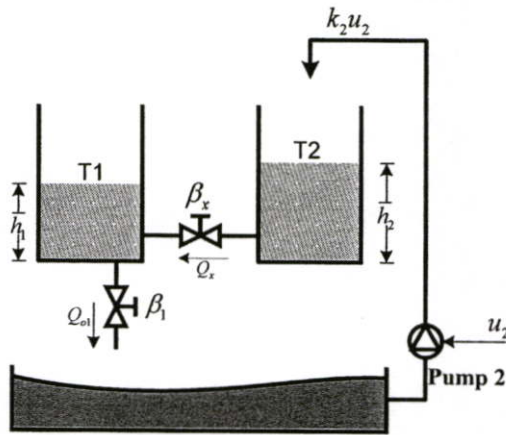
4.2 การหาสมการคุณลักษณะของกระบวนการ

การกำหนดจุดทำงานเพื่อหาสมการคุณลักษณะของกระบวนการนั้นสำคัญมากในการทดลองนี้ เนื่องจากว่าสมการที่ได้จะถูกนำไปออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแล้วจะนำค่าพารามิเตอร์ที่ออกแบบได้ไปควบคุมกระบวนการจริง ถ้าค่าสมการคุณลักษณะที่หามาได้ใกล้เคียงกับกระบวนการจริง โอกาสที่นำค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมไปใช้ควบคุมกระบวนการจริงก็มีโอกาสเป็นไปได้สูง แต่ถ้าสมการคุณลักษณะที่หามาได้ไม่ใกล้เคียงกับกระบวนการจริงแล้วนั้น โอกาสที่จะนำค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมไปควบคุมกระบวนการจริงก็มีโอกาสเป็นไปได้น้อยหรืออาจจะควบคุมไม่ได้เลย เพราะฉะนั้นการหาสมการคุณลักษณะของกระบวนการจึงถือว่าสำคัญ ซึ่งหลักการหาจุดทำงานของกระบวนการมีอยู่ว่า ป้อนแรงดันที่เหมาะสมค่าหนึ่งให้กับปั๊มทั้ง 2 ตัวเพื่อปั๊มน้ำนิ่งให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม จากนั้นทำการเพิ่มระดับแรงดันให้กับปั๊มทั้ง 2 ซึ่งค่าแรงดันที่จะต้องไม่ทำให้น้ำในถังล้น ณ จุดนั้นจะเป็นจุดทำงานของกระบวนการซึ่งจะทำให้เรารู้ค่าพารามิเตอร์บางตัวเช่น u_1, u_2 (แรงดันที่จ่ายให้กับปั๊มตัวที่ 1 และ 2) \bar{h}_1, \bar{h}_2 (ตำแหน่งที่ระดับน้ำในถังทั้ง 2 คงที่) ส่วนค่าพารามิเตอร์อื่นๆ สามารถหาได้จากกราฟวัดหรือดูได้จากคู่มือของอุปกรณ์นั้น เช่น ขนาดพื้นที่ของถังทั้ง 2 พื้นที่หน้าตัดของท่อทางออกเอาท์พุท (a_1, a_2, a_x) อัตราการขยายของปั๊ม เป็นต้น ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่เราหาได้ทั้งหมดจะนำไปแทนค่าลงในสมการที่ 2.22 ซึ่งเป็นสมการคุณลักษณะของกระบวนการที่เขียนอยู่ในรูปของทรานส์เฟอร์เมทริกซ์ แต่อย่างไรก็ตามยังมีค่าตัวแปรที่เราไม่ทราบค่าอยู่ 3 ตัวแปรคือค่า T_1, T_2 และ T_x

(T_1 คือค่าคงตัวของถังที่ 1, T_2 คือค่าคงตัวของถังที่ 2, T_x คือค่าคงตัวของระหว่างถังที่ 1 และถังที่ 2) ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.16 แต่สมการที่ 2.16 ก็ยังไม่สามารถหาค่า T_1, T_2 และ T_x ได้เนื่องจากเรามีค่าตัวแปรที่ไม่รู้ค่าอยู่อีก 3 ตัวแปรคือ β_1, β_2 และ β_x (β_1, β_2 คือค่าสัมประสิทธิ์การเปิดวาล์วที่ต่อทางด้านเอาท์พุทของถังที่ 1 และถังที่ 2, β_x คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเปิดวาล์วที่ต่อระหว่างถังที่ 1 และถังที่ 2) เพราะฉะนั้นแล้วเราจึงจำเป็นต้องหาค่า β_1, β_2 และ β_x ก่อน ซึ่งพิจารณาได้จากสมการที่ 2.9 และสมการที่ 2.10

ขั้นตอนการหาพารามิเตอร์ของค่า β_1, β_2 และ β_x พิจารณาตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. กำหนดให้แรงดันที่จ่ายให้ปั๊มตัวที่ 1 เป็นศูนย์และปิดเอาท์พุทของถังน้ำไปที่ 2 พิจารณาจากรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 รูปประกอบการพิจารณาเพื่อหาค่า β_1, β_x

จากรูปที่ 4.1 เมื่อ $k_2 = 4.8$, $u_2 = 2V$, และ $a_x = 0.1963 \text{ cm}^2$ ทำการป้อนแรงดันอินพุทให้กับปั๊มรองกว่าระดับน้ำในถังทั้งสองเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วทำการบันทึกค่าระดับน้ำทั้งสองซึ่งได้ $\bar{h}_1 = 0.67 \text{ cm}$, $\bar{h}_2 = 3.45 \text{ cm}$

พิจารณาจากถังที่ 1

$$\frac{dh_1(t)}{dt} = -\frac{\beta_1 a_1}{A} \sqrt{2g\bar{h}_1(t)} + \frac{\beta_x a_x}{A} \text{sgn}(h_1(t) - h_2(t)) \sqrt{2g|\bar{h}_1(t) - \bar{h}_2(t)|} \quad (4.1)$$

พิจารณาจากถังที่ 2

$$\frac{dh_2(t)}{dt} = -\frac{\beta_x a_x}{A} \text{sgn}(h_1(t) - h_2(t)) \sqrt{2g|\bar{h}_1(t) - \bar{h}_2(t)|} + \frac{k_2}{A} u_2(t) \quad (4.2)$$

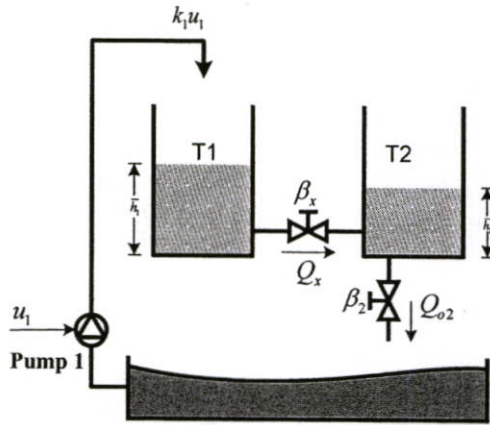
จากสมการที่ 4.2 คำนวณหาค่า β_x จะได้ว่า

$$\beta_x = \frac{k_2 u_2}{a_x \sqrt{2g(\bar{h}_2 - \bar{h}_1)}} = \frac{4.8 \times 2}{0.1963 \times \sqrt{2 \times 981 \times (3.45 - 0.67)}} = 0.357 \quad (4.3)$$

จากสมการที่ 4.1 คำนวณหาค่า β_1 จะได้ว่า

$$\beta_1 = \frac{\beta_x \sqrt{2g(\bar{h}_2 - \bar{h}_1)}}{\sqrt{2g\bar{h}}} = \frac{0.357 \times \sqrt{2 \times 981 \times (3.45 - 0.67)}}{\sqrt{2 \times 981 \times 0.67}} = 0.7273 \quad (4.4)$$

2. กำหนดให้แรงดันที่จ่ายให้ปั๊มตัวที่ 2 เป็นศูนย์และปิดเอาท์พุทของถังน้ำใบที่ 1 พิจารณาจากรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 รูปประกอบการพิจารณาหาค่า β_2, β_x

จากรูปที่ 4.2 เมื่อ $k_1 = 5.4$, $u_1 = 2.5V$, และ $a_x = 0.1963 \text{ cm}^2$ ทำการป้อนแรงดันอินพุทให้กับปั๊มจนกว่าระดับน้ำในถังทั้งสองเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วทำการบันทึกค่าระดับน้ำทั้งสองซึ่งได้ $\bar{h}_1 = 6.75 \text{ cm}$, $\bar{h}_2 = 2.35 \text{ cm}$

พิจารณาจากถังที่ 1

$$\frac{dh_1(t)}{dt} = -\frac{\beta_x a_x}{A} \text{sgn}(h_1(t) - h_2(t)) \sqrt{2g|h_1(t) - \bar{h}_2(t)|} + \frac{k_1}{A} u_1(t) \quad (4.5)$$

พิจารณาจากถังที่ 2

$$\frac{dh_2(t)}{dt} = -\frac{\beta_2 a_2}{A} \sqrt{2g\bar{h}_2(t)} + \frac{\beta_x a_x}{A} \text{sgn}(h_1(t) - h_2(t)) \sqrt{2g|h_1(t) - \bar{h}_2(t)|} \quad (4.6)$$

จากสมการที่ 4.5 คำนวณหาค่า β_x จะได้ว่า

$$\beta_x = \frac{k_1 u_1}{a_x \sqrt{2g(\bar{h}_1 - \bar{h}_2)}} = \frac{5.4 \times 2.5}{0.1963 \times \sqrt{2 \times 981 \times (6.75 - 2.35)}} = 0.3948 \quad (4.7)$$

จากสมการที่ 4.6 คำนวณหาค่า β_2 จะได้ว่า

$$\beta_2 = \frac{\beta_x \sqrt{2g(\bar{h}_2 - \bar{h}_1)}}{\sqrt{2g\bar{h}}} = \frac{0.3948 \times \sqrt{2 \times 981 \times (6.75 - 2.35)}}{\sqrt{2 \times 981 \times 2.35}} = 0.5402 \quad (4.8)$$

เนื่องจากค่า β_x มี 2 ค่า ดังนั้นเราจะเลือกเอาค่าที่มากที่สุดคือค่า β_x จากสมการที่ 4.7 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.3948 หลังจากที่เราหาค่าพารามิเตอร์ของ β_1, β_2 และ β_x ได้แล้วก็จะทำให้เราสามารถหาค่าตัวแปร T_1, T_2 และ T_x จากสมการที่ 2.16 ได้ดังนี้

$$T_1 = \frac{A}{\beta_1 a_1} \sqrt{\frac{2\bar{h}_1}{g}} = \frac{66.25}{0.7273 \times 0.1963} \times \sqrt{\frac{2 \times 6.75}{981}} = 6.3858 \quad (4.9)$$

$$T_2 = \frac{A}{\beta_2 a_2} \sqrt{\frac{2\bar{h}_2}{g}} = \frac{66.25}{0.5402 \times 0.1963} \times \sqrt{\frac{2 \times 2.35}{981}} = 2.9932 \quad (4.10)$$

$$T_x = \frac{A}{\beta_x a_x} \sqrt{\frac{2|\bar{h}_1 - \bar{h}_2|}{g}} = \frac{66.25}{0.3948 \times 0.1963} \times \sqrt{\frac{2|6.75 - 2.35|}{981}} = 7.6685 \quad (4.11)$$

จากนั้นแทนค่า T_1, T_2 และ T_x ลงในสมการ 2.22 จะได้ทรานส์เฟอร์เมทริกซ์ดังสมการ 4.12

$$\begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{0.04347s + 0.001542}{(s^2 + 0.0662s + 0.0009373)} & \frac{4.825 \times 10^{-4}}{(s^2 + 0.0662s + 0.0009373)} \\ \frac{5.369 \times 10^{-4}}{(s^2 + 0.0662s + 0.0009373)} & \frac{0.03906s + 0.0012}{(s^2 + 0.0662s + 0.0009373)} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

ในหัวข้อนี้ได้กล่าวถึงการหาค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดของกระบวนการที่จะนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมต่อไป ซึ่งพอจะสรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่หาได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาค่าสมการคุณลักษณะของกระบวนการ

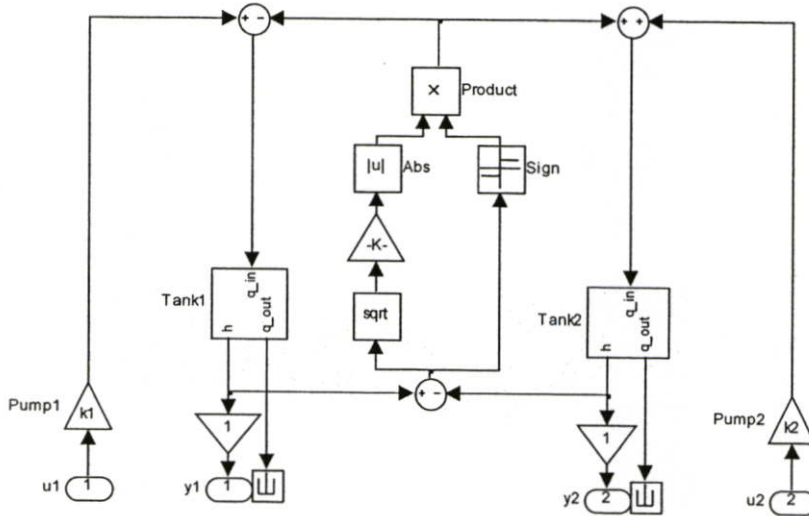
สัญลักษณ์	รายละเอียด	ปริมาณ	หน่วย
k_1, k_2	อัตราขยายของบีม 1 และบีม 2	5.4 และ 4.8	$cm^3/v \cdot s$
u_1, u_2	แรงดันที่จ่ายให้กับบีมตัวที่ 1 และ 2	2.5 และ 2	Volt
a_1, a_2, a_x	พื้นที่หน้าตัดของเอ้าท์พุทถังที่ 1, 2 และระหว่างถังทั้งสอง	0.1963	cm^2
A_1, A_2	ปริมาตรของถังที่ 1 และถังที่ 2 ตามลำดับ	66.25	cm^3
D_1, D_2	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของถังที่ 1 และถังที่ 2	9.4	cm
\bar{h}_1, \bar{h}_2	ความสูงของถังที่ 1 และถังที่ 2	6.75, 2.35	cm
g	แรงโน้มถ่วงของโลก	981	cm/s^2
β_1, β_2	ค่าสัมประสิทธิ์การเปิดวาล์วที่ต่อทางด้านออกของถังที่ 1 และถังที่ 2	0.7273 0.5402	- -
β_x	ค่าสัมประสิทธิ์การเปิดวาล์วที่ต่อระหว่างถังที่ 1 และถังที่ 2	0.3948	-

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

T_1, T_2	ค่าคงตัวของถังที่ 1 และ 2 ตามลำดับ	6.3858	Sec
		2.9932	Sec
T_x	ค่าคงตัวเวลาระหว่างถังที่ 1 กับ 2	7.6685	Sec

4.3 การจำลองกระบวนการ

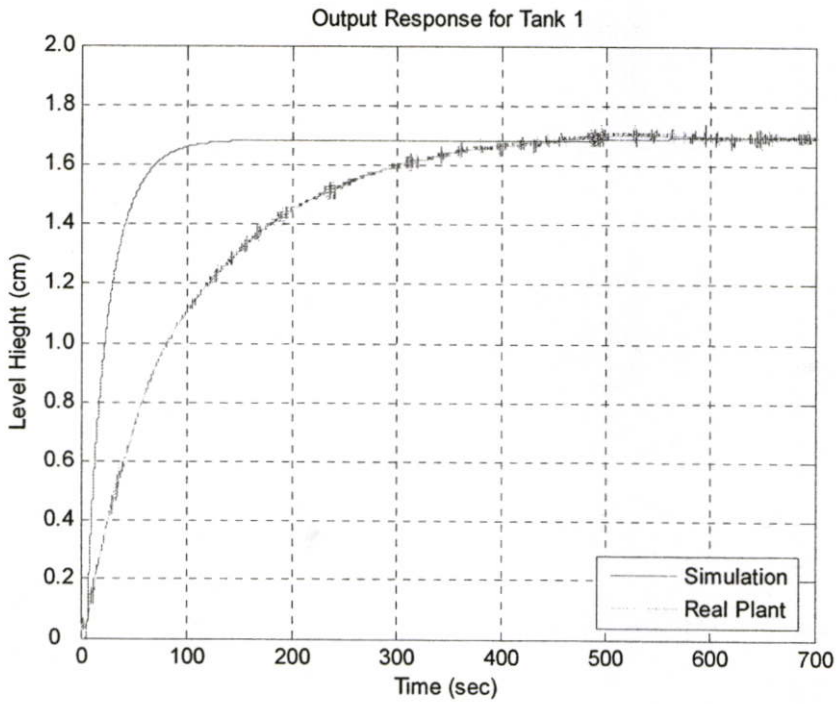
หลังจากที่เราหาสมการคุณลักษณะของกระบวนการได้ดังสมการที่ 4.12 ก่อนที่เราจะดำเนินการทดลองในขั้นตอนต่อไปนั้นสิ่งหนึ่งที่เราไม่ควรละเลยหรือข้ามขั้นตอนนี้ไปคือขั้นตอนนี้คือการทดสอบว่าสมการคุณลักษณะที่หาได้กับกระบวนการจริงนั้นถูกต้องหรือไม่ สามารถทำได้โดยการทดสอบกระบวนการจริงเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สถานะ Open-Loop ถ้าสมการที่เราหามาได้ถูกต้องผลตอบสนองของกระบวนการจริงกับผลตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะต้องมีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน ซึ่งสมการที่จะนำไปเปรียบเทียบกับกระบวนการจริงแล้วใกล้เคียงและถูกต้องที่สุดคือสมการที่ยังไม่ได้ปรับความเป็นเชิงเส้นนั่นก็คือสมการที่ 2.9 และสมการที่ 2.10 นั่นเอง โดยในการทดลองจะใช้โปรแกรม MATLAB ในการจำลองซึ่งโปรแกรมที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3 สำหรับจำลองกระบวนการตามรูปที่ 2.1



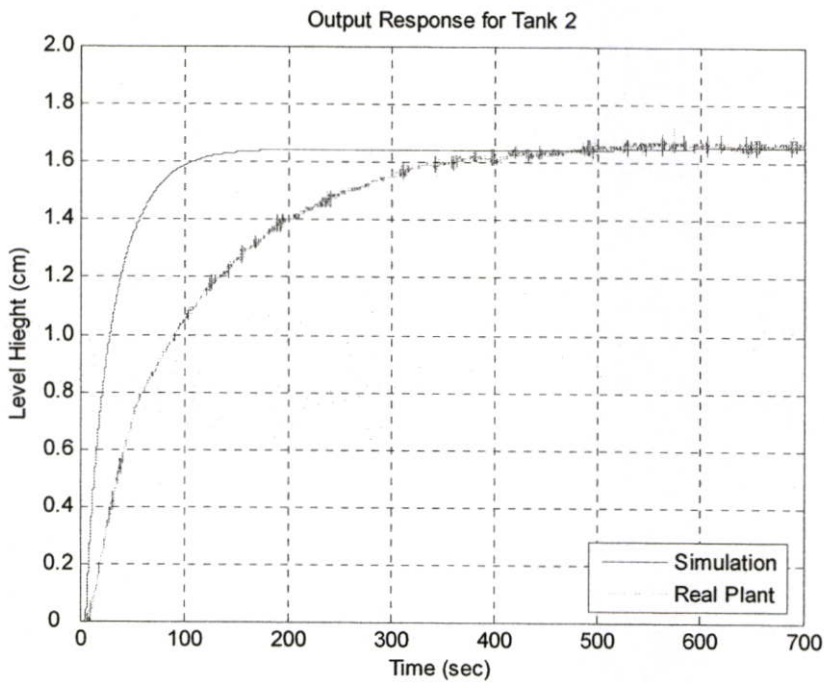
รูปที่ 4.3 โปรแกรมจำลองกระบวนการแบบไม่เป็นเชิงเส้น

จากรูปที่ 4.3 เป็นโปรแกรมสำหรับจำลองกระบวนการด้วยสมการแบบไม่เป็นเชิงเส้น การทดลองคือป้อนแรงดันอินพุต $u_1 = 2.5V$ และ $u_2 = 2V$ ให้กับกระบวนการจากนั้นวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ y_1 และ y_2 ซึ่งเป็นเอาต์พุตของระดับน้ำในถังที่ 1 และถังที่ 2 ตามลำดับ ซึ่งจะได้อผลตอบสนองของ

กระบวนการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการจริงซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองของกระบวนการแบบ Open Loop ของถังน้ำใบที่ 1



รูปที่ 4.5 ผลตอบสนองของกระบวนการแบบ Open Loop ของถังน้ำใบที่ 2

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณเอาต์พุตของกระบวนการจริงกับเอาต์พุตของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เป็นไปตามตารางที่ 4.1 ซึ่งสามารถอธิบายผลตอบสนองของกระบวนการได้ดังนี้ เส้นกราฟสีน้ำเงินคือกราฟเอาต์พุตของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ส่วนเส้นกราฟสีเขียวเป็นกราฟเอาต์พุตของกระบวนการจริง จะเห็นได้ว่าเอาต์พุตระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับกระบวนการจริงของถั่งน้ำทั้งสอง มีค่าผิดพลาดช่วงเริ่มต้นจนถึงเวลาประมาณ 400 วินาที เรียกว่า ค่าผิดพลาดไดนามิก (Dynamic Error) แต่เมื่อเวลาตั้งแต่ 400 วินาทีขึ้นไป ค่าผิดพลาดจะหมดไปสถานะตรงนี้เรียกว่าค่าผิดพลาดสแตติกส์ (Statics Error) ซึ่งมีค่าเป็นศูนย์ แต่ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นยังทำให้เราพอยอมรับได้ นั่นหมายถึงสมการคุณลักษณะที่ได้สามารถที่จะนำไปออกแบบตัวควบคุมเพื่อควบคุมกระบวนการซึ่งโอกาสที่ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยสมการคุณลักษณะนี้มีโอกาสสูงที่จะนำไปควบคุมกระบวนการจริงได้

เนื่องจากการที่จะนำเอาสมการคุณลักษณะที่ได้ในสมการที่ 4.12 ไปออกแบบตัวควบคุมนั้น เป็นเรื่องที่ยากอยู่พอสมควรเนื่องจากกระบวนการมีหลายตัวแปรอีกทั้งมีการค้ำปลั่งกันอีกด้วย ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมด้วยดีค้ำปลั่งในงานวิจัยนี้ ดีค้ำปลั่งจะถูกนำมาใช้สำหรับแยกการค้ำปลั่งของระบบออกจากกันเพื่อลดความยุ่งยากในการออกแบบตัวควบคุมซึ่งโครงสร้างของดีค้ำปลั่งที่ต่อร่วมกับกระบวนการแสดงดังรูปที่ 3.1 เมื่อสมการคุณลักษณะของกระบวนการเขียนอยู่ในรูปทรานส์เฟอร์เมทริกซ์ดังสมการที่ 4.12 ซึ่งเมื่อต่อดีค้ำปลั่งเข้าไปกับสมการดังกล่าวทำให้เราสามารถหาค่าพารามิเตอร์ของดีค้ำปลั่งได้จากสมการที่ 3.5 สมการที่ 3.6 และสมการที่ 3.7 ซึ่งหาได้ดังนี้ จากสมการที่ 4.12 เราจะได้ว่า

$$G_{11}(s) = \frac{0.04347s + 0.001542}{(s^2 + 0.0662s + 0.0009373)} \quad (4.13)$$

$$G_{12}(s) = \frac{4.825 \times 10^{-4}}{(s^2 + 0.0662s + 0.0009373)} \quad (4.14)$$

$$G_{21}(s) = \frac{5.369 \times 10^{-4}}{(s^2 + 0.0662s + 0.0009373)} \quad (4.15)$$

$$G_{22}(s) = \frac{0.03906s + 0.0012}{(s^2 + 0.0662s + 0.0009373)} \quad (4.16)$$

จากสมการที่ 3.5 ช่วยให้เราสามารถหาค่า $D_{11}(s), D_{22}(s)$ ได้ดังนี้

$$D_{11}(s) = D_{22}(s) = 1 \quad (4.17)$$

จากนั้นหาค่า $D_{12}(s)$ จากสมการที่ 3.6 ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 D_{12}(s) &= -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} \\
 &= -\left(\frac{4.825 \times 10^{-4}}{(s^2 + 0.0662s + 0.0009373)} \times \frac{(s^2 + 0.0662s + 0.0009373)}{0.04347s + 0.001542} \right) \\
 &= -\frac{4.825 \times 10^{-4}}{0.04347s + 0.001542}
 \end{aligned} \tag{4.18}$$

ต่อจากนั้นทำการหาค่า $D_{21}(s)$ จากสมการที่ 3.7 ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 D_{21}(s) &= -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} \\
 &= -\left(\frac{5.369 \times 10^{-4}}{(s^2 + 0.0662s + 0.0009373)} \times \frac{(s^2 + 0.0662s + 0.0009373)}{0.03906s + 0.0012} \right) \\
 &= -\frac{5.369 \times 10^{-4}}{0.03906s + 0.0012}
 \end{aligned} \tag{4.19}$$

จากสมการที่ 4.17, 4.18 และ 4.19 เขียนให้อยู่ในรูปของทรานส์เฟอร์เมทริกซ์จะได้

$$D(s) = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{4.825 \times 10^{-4}}{0.04347s + 0.001542} \\ -\frac{5.369 \times 10^{-4}}{0.03906s + 0.0012} & 1 \end{bmatrix} \tag{4.20}$$

หลังจากที่ต่อคิปลิ่งเข้ากับกระบวนการจะทำให้เราได้สมการที่แยกอิสระจากกันจากกัน โดยหาได้จากสมการที่ 3.11 และสมการที่ 3.12 ซึ่งหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 G_{n_1}(s) &= G_{11}(s) - \frac{G_{21}}{G_{22}} G_{12}(s) = G_{11}(s) - D_{21}(s) G_{12}(s) \\
 &= \frac{0.04347s + 0.001542}{(s^2 + 0.0662s + 0.0009373)} - \left(\frac{5.369 \times 10^{-4}}{0.03906s + 0.0012} \times \frac{4.825 \times 10^{-4}}{(s^2 + 0.0662s + 0.0009373)} \right) \dots(4.21) \\
 &= \frac{0.04347s^4 + 0.005755s^3 + 0.000272s^2 + (5.395 \times 10^{-6})s + 3.819 \times 10^{-8}}{s^5 + 0.1631s^4 + 0.01032s^3 + 0.0003163s^2 + (4.691 \times 10^{-6})s + 2.699 \times 10^{-8}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 G_{n_2}(s) &= G_{22}(s) - \frac{G_{12}}{G_{11}} G_{21}(s) = G_{22}(s) - D_{12}(s) G_{21}(s) \\
 &= \frac{0.03906s + 0.0012}{(s^2 + 0.0662s + 0.0009373)} - \left(\frac{4.825 \times 10^{-4}}{0.04347s + 0.001542} \times \frac{5.369 \times 10^{-4}}{(s^2 + 0.0662s + 0.0009373)} \right) \dots(4.22) \\
 &= \frac{0.03906s^4 + 0.005172s^3 + 0.0002444s^2 + (4.848 \times 10^{-6})s + 3.432 \times 10^{-8}}{s^5 + 0.1679s^4 + 0.01095s^3 + 0.0003461s^2 + (5.281 \times 10^{-6})s + 3.117 \times 10^{-8}}
 \end{aligned}$$

จะเห็นได้ว่าค่าของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน $G_{n_1}(s)$ และ $G_{n_2}(s)$ ก็คือค่าสมการคุณลักษณะของกระบวนการที่แยกอิสระจากกันแล้วและสามารถนำไปออกแบบตัวควบคุมได้ แต่จะสังเกตได้ว่าค่า

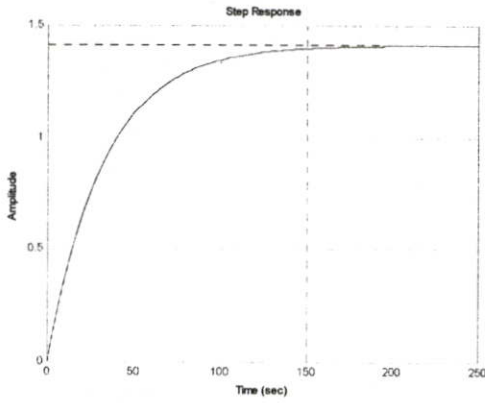
ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันที่ได้ทั้งสองสมการมีอันดับเท่ากับ 5 โดยมีซีโร 4 ตัวและโพล 5 ตัว ซึ่งเป็นอันดับที่สูง นั่นหมายความว่าสิ่งที่เราจะนำทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันนี้ไปออกแบบตัวควบคุม อาจจะทำให้เกิดความยุ่งยากแก่ผู้ที่ทำการออกแบบ แต่ถ้าสังเกตให้ดีจะเห็นว่าสิ่งที่ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันมีซีโร 4 ตัวและโพล 5 ตัว ซึ่งถ้าเราหารากของสมการได้และจัดรูปแบบที่ดีแล้ว โอกาสที่สมการของซีโรและสมการของโพลจะสามารถหักล้างกันได้ก็มีเช่นกัน การคำนวณด้วยมือ โดยการแยกตัวประกอบของสมการทำให้ช้าและเสียเวลามากยิ่งถ้าอันดับของกระบวนการสูงขึ้นยิ่งจะทำให้การคำนวณด้วยมือลำบากมากยิ่งขึ้น ซึ่งในโปรแกรม MatLab จะมีคำสั่ง อยู่คำสั่งหนึ่งที่สามารถทำงานตามหลักการข้างต้น (แยกตัวประกอบ) ได้คือคำสั่ง $min\ real$ ซึ่งเป็นคำสั่งที่ช่วยในการแยกตัวประกอบเพื่อคำนวณหาตำแหน่งซีโรและโพลที่อยู่ในตำแหน่งที่สามารถหักล้างกันได้ (ถ้ามี) และจะช่วยกำจัดตำแหน่งของซีโรและโพลนั้นออกไปให้เหลือเพียงซีโรและโพลที่ไม่ซ้ำกัน สำหรับสมการคุณลักษณะของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน $G_{n_1}(s)$ และ $G_{n_2}(s)$ ที่เราหาได้นั้นสามารถที่จะลดอันดับของกระบวนการได้ซึ่งจะทำให้การนำไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ทำได้ง่ายขึ้น จากสมการที่ 4.21 และสมการที่ 4.22 หลังจากที่ผ่านมาขั้นตอนการทำงานของคำสั่ง $min\ real$ และจะได้สมการใหม่คือสมการที่ 4.23 และสมการที่ 4.24 ตามลำดับ

$$G_{n_1}(s) = \frac{0.04347}{s + 0.03072} \quad (4.23)$$

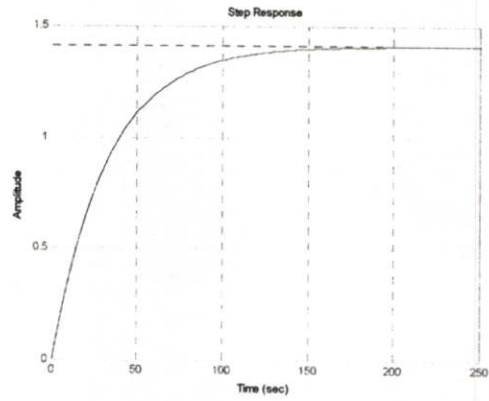
และ

$$G_{n_2}(s) = \frac{0.03906}{s + 0.03548} \quad (4.24)$$

จากสมการที่ 4.23 และสมการที่ 4.24 เป็นการนำคำสั่ง $min\ real$ ในโปรแกรม Matlab มาช่วยในการลดจำนวนซีโรและจำนวนโพลของสมการที่ 4.21 และสมการที่ 4.22 ซึ่งจะสังเกตได้ว่าจากสมการอันดับ 5 หลังจากที่ใช้คำสั่ง $min\ real$ ในโปรแกรม MatLab แล้วจะได้สมการอันดับหนึ่งทั้ง 2 สมการนั้นแสดงให้เห็นว่าในสมการที่ 4.21 และสมการที่ 4.22 มีตำแหน่งของซีโรและตำแหน่งของโพลที่ซ้ำกันอยู่ถึง 4 คู่ ซึ่งในทางคณิตศาสตร์แล้วสามารถที่จะทำการหักล้างตำแหน่งของซีโรและตำแหน่งของโพลที่ซ้ำกันออกไปได้เพื่อลดความยุ่งยากในการคำนวณ เพื่อแสดงให้เห็นว่าสมการที่ 4.21 กับสมการที่ 4.23 และสมการที่ 4.22 กับสมการที่ 4.24 มีค่าเท่ากัน ในที่นี้ผู้วิจัยจะขอเสนอสมการที่ 4.21 กับสมการที่ 4.23 และสมการที่ 4.22 กับสมการที่ 4.24 ไปพล็อตกราฟคู่ผลตอบสนองทางด้านเอาท์พุทเพื่อเปรียบเทียบดังนี้

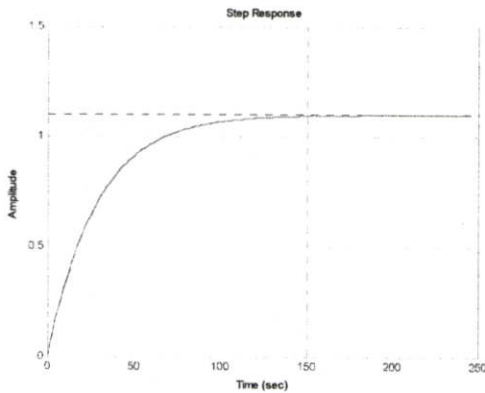


(a) กราฟของสมการที่ 4.21

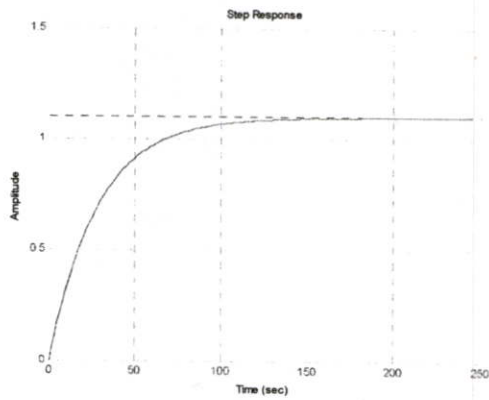


(b) กราฟของสมการที่ 4.23

รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างสมการที่ 4.21 กับสมการที่ 4.23



(a) กราฟของสมการที่ 4.22



(b) กราฟของสมการที่ 4.24

รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างสมการที่ 4.22 กับสมการที่ 4.24

จากกราฟรูปที่ 4.6 และสมการที่ 4.7 เป็นกราฟแสดงผลตอบสนองทางด้านเอาต์พุตของกระบวนการที่ยังไม่ได้ทำการลดรูปสมการกับกระบวนการหลังจากที่ลดรูปสมการแล้วด้วยคำสั่ง *min real* จะสังเกตเห็นได้ว่าสมการทั้ง 2 เส้นมีลักษณะที่เหมือนกัน นั่นแสดงให้เห็นว่าสมการทั้งสองสามารถใช้แทนกันได้

สมการที่ 4.23 กับสมการที่ 4.24 เป็นสมการคุณลักษณะของกระบวนการที่มีดีคัปปลิง ซึ่งในการออกแบบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมหรือการทดลองใดๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ ผู้วิจัยจะได้นำเอาสมการดังกล่าวมาใช้ในการทดลองต่อไป

การทดลองคือ ช่วงเวลา 0-150 วินาที ทำการเลี้ยงน้ำทั้งสองถังไว้ที่ระดับ 2 เซนติเมตร เพื่อเป็นการเริ่มต้น และจากช่วงเวลา 150-300 วินาที จะควบคุมระดับน้ำในถังที่ 1 ไว้ที่ระดับ 4 เซนติเมตร และควบคุมระดับน้ำในถังที่ 2 ไว้ที่ 2 เซนติเมตร และที่ช่วงเวลา 300-450 วินาที จะควบคุมระดับน้ำในถังที่

1 วั้ที่ระดับ 4 เซนติเมตร และควบคุมระดับน้ำในถังที่ 2 วั้ที่ 4 เซนติเมตร สิ่งที่ต้องการทดสอบคือ ต้องการทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมในการควบคุมกระบวนการที่ระดับน้ำที่แตกต่างกัน และทำการทดลองซ้ำทั้งแบบมีดีคัปลิ่งและไม่มีดีคัปลิ่ง

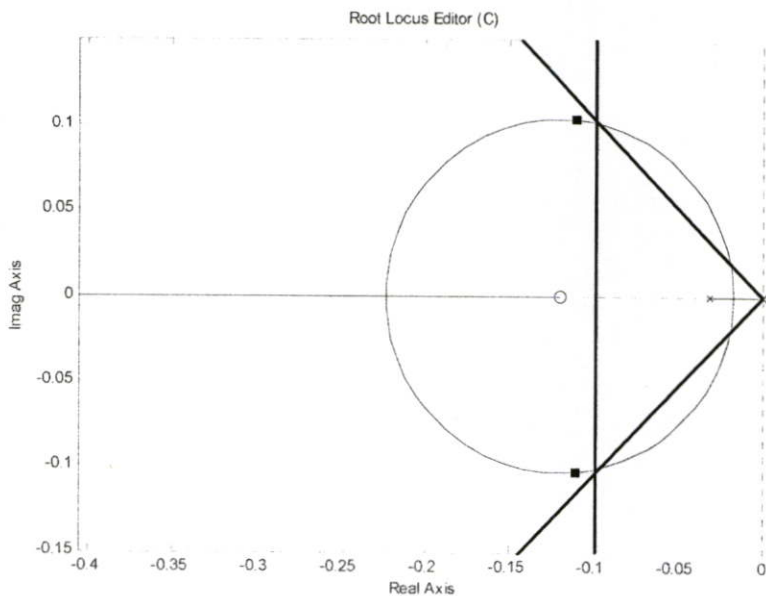
หลังจากที่ลดอันดับของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันและจะได้ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันอันดับ 1 ดังสมการที่ 4.23 กับสมการที่ 4.24 จากนั้นจึงนำทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันดังกล่าวไปออกแบบตัวควบคุม ซึ่งวิธีการออกแบบตัวควบคุมที่จะนำเสนอมีทั้งหมด 3 วิธี ดังนี้

ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน

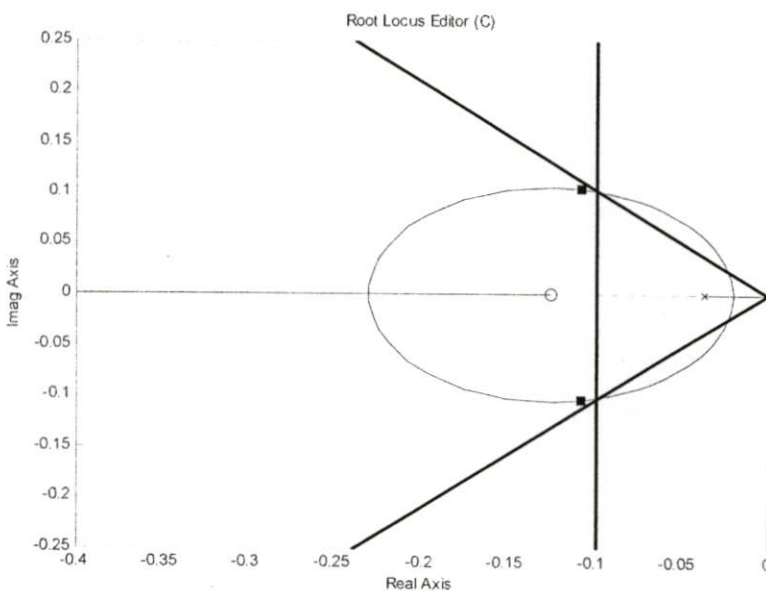
1. Root Locus (s_d)
2. Root Locus ($1/T_i$)
3. Ziegler-Nichole

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมทั้ง 3 วิธี จะใช้โปรแกรม MatLab เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับช่วยในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

1. Root Locus (s_d) สำหรับวิธีแรกนี้เป็นการกำหนดตำแหน่งโพลและซีโรของตัวควบคุมที่ทำให้เส้นทางเดินของรากผ่านจุด s_d โดยใช้ SISOTOOL เป็นเครื่องมือในโปรแกรม MatLab มาช่วยในการหาตำแหน่งของโพลและซีโรของตัวควบคุมที่ทำให้เส้นทางเดินของรากผ่านจุด s_d เมื่อสมการคุณลักษณะของกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลกระทบต่อกัน (Couple-Tank Process) ที่จะนำมาคำนวณคือ $G_{n1}(s) = \frac{0.04347}{s + 0.03072}$ และ $G_{n2}(s) = \frac{0.03906}{s + 0.03548}$ ส่วนจุด s_d นั้นจะเกิดขึ้นจากข้อกำหนด (Specification) ที่เราต้องการ จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 เป็นกราฟแสดงผลตอบสนองทางด้านเอาต์พุตของกระบวนการในสภาวะวงรอบเปิด (Open Loop) ซึ่งจะเห็นได้ว่าเวลาเข้าที่อยู่ประมาณ 150 วินาทีแต่เราต้องการให้เวลาเข้า $t_s \leq 40$ sec, $P.O. \leq 5\%$ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอจะได้ทางเดินของรากบน SISOTOOL ในโปรแกรม MatLab ดังนี้



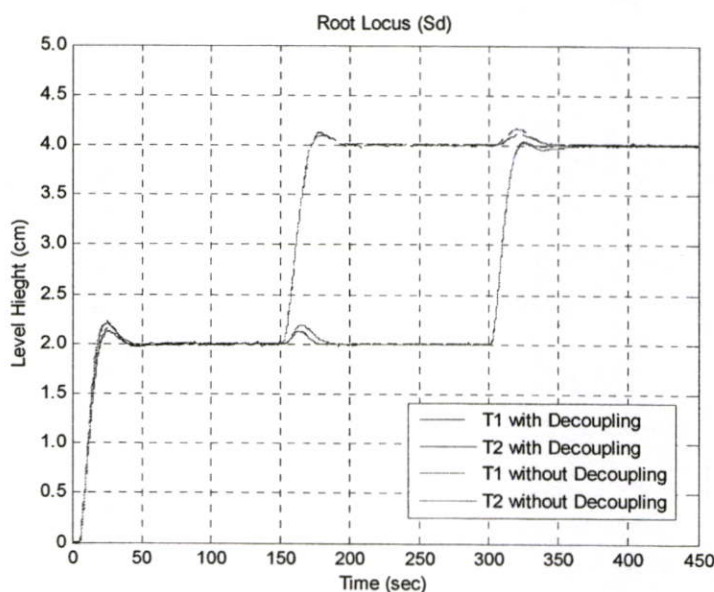
รูปที่ 4.8 แสดงทางเดินรากของ $G_{n1}(s)$



รูปที่ 4.9 แสดงทางเดินรากของ $G_{n2}(s)$

การใช้ SISOTOOL ในโปรแกรม MatLab เข้ามาช่วยในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางเดินรานั้น สิ่งที่ได้จากโปรแกรมก็คือลักษณะทางเดินของรากของระบบและโครงสร้างของตัวควบคุมโดยที่โครงสร้างของตัวควบคุมจะเปลี่ยนแปลงตามจำของโพลและซีโรที่วางลงไป ในโปรแกรมและค่าของตัวควบคุมจะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งของโพลและซีโร สำหรับงานวิจัยนี้เราจะใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ โดยโครงสร้างตัวควบคุมแบบพีไอ คือ $\frac{K_c(s+z_c)}{s} = \frac{K_p s + K_i}{s}$ ซึ่งโครงสร้างของตัวควบคุมแบบพีไอจะประกอบไปด้วย K_c ซึ่งเป็นค่าอัตราขยายของตัวควบคุม z_c ตำแหน่งของซีโร p_c ตำแหน่งของโพล (เนื่องจากว่าโครงสร้างของตัวควบคุมแบบพีไอนั้นตำแหน่งของโพลจะอยู่ที่จุดกำเนิดจึงมีค่าเป็นศูนย์

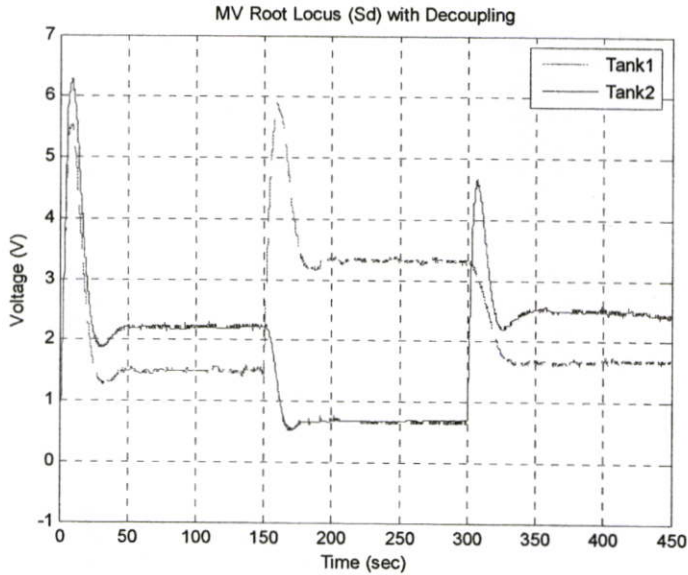
เวลาเขียนโครงสร้างของตัวควบคุมแบบพีไอพจน์ของ p_c จึงไม่ปรากฏ) จากการพล็อตทางเดินของราก เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมสำหรับกระบวนการ $G_{n1}(s)$ มีค่าเท่ากับ $\frac{4.34(s+0.12)}{s}$ และ ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมสำหรับกระบวนการ $G_{n2}(s)$ มีค่าเท่ากับ $\frac{4.56(s+0.125)}{s}$ ทำการเทียบค่า สัมประสิทธิ์เพื่อหาค่า K_p และ K_i จะทำให้ได้ค่า $K_{p1}=4.34$, $K_{i1}=0.5208$ สำหรับกระบวนการ $G_{n1}(s)$ และ $K_{p2}=4.56$, $K_{i2}=0.57$ สำหรับกระบวนการ $G_{n2}(s)$ ค่า Pre-filter เท่ากับ $F_1(s) = \frac{z_{c1}}{s+z_{c1}} = \frac{0.12}{(s+0.12)}$ และ $F_2(s) = \frac{z_{c2}}{s+z_{c2}} = \frac{0.125}{(s+0.125)}$ นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ทั้งหมดแทนลงใน โปรแกรมจากนั้นทำการทดลองควบคุมกระบวนการ จะได้ผลตอบสนองของกระบวนการดังรูป 4.10



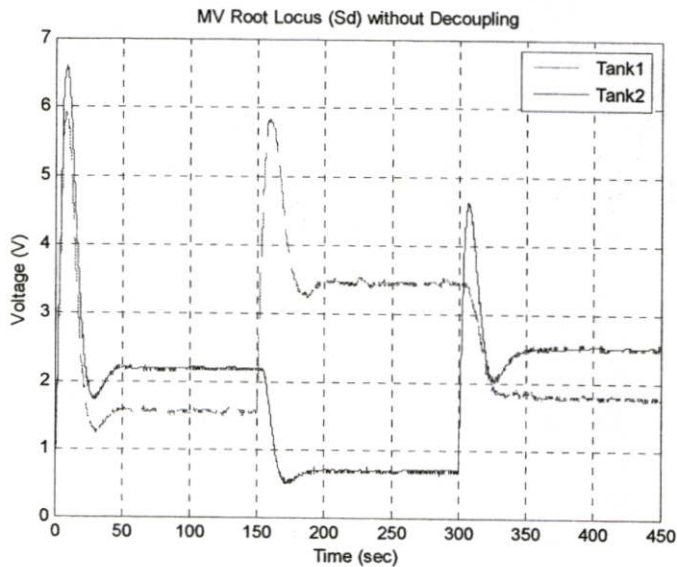
รูปที่ 4.10 ผลตอบสนองทางด้านเอาต์พุตเมื่อออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางเดินราก (s_d)

ผลของการทดลองในรูปที่ 4.10 อธิบายได้ดังนี้ เส้นกราฟที่เป็นเส้นประจะเป็นสัญญาณของถัง น้ำใบที่ 1 (T_1) เส้นกราฟที่เป็นเส้นทึบจะเป็นสัญญาณของถังน้ำใบที่ 2 (T_2) เส้นกราฟสีแดงหมายถึง การทำงานของโปรแกรมร่วมกับดีคัปปลิ่ง เส้นกราฟสีน้ำเงินหมายถึงการทำงานของโปรแกรม โดยไม่มี ดีคัปปลิ่ง ลำดับการทำงานของโปรแกรมคือที่เวลา 0-150 วินาที เป็นช่วงเวลาที่กำหนดค่าเริ่มต้นให้กับ กระบวนการ โดยกำหนดให้โปรแกรมเลี้ยงน้ำให้มีระดับความสูงอยู่ที่ 2 cm โดยที่ค่าต่างๆ ที่เกิดขึ้นใน ช่วงเวลานี้เราจะยังไม่สนใจ เมื่อเวลาเดินมาถึงที่ 150 วินาที ทำการเพิ่มอินพุตแบบ Unit Step ให้กับ โปรแกรมเพื่อให้ระดับน้ำในถังใบที่ 1 เพิ่มขึ้นไปอยู่ที่ระดับ 4 cm ในช่วงเวลา 150-300 วินาทีจะเป็น ช่วงเวลาที่โปรแกรมทำงานเพื่อรักษาระดับน้ำในถังใบที่ 1 อยู่ที่ระดับ 4 cm และระดับน้ำในถังใบที่ 2 ให้อยู่ที่ระดับ 2 cm เมื่อเวลาเดินมาถึงที่ 300 วินาที ทำการเพิ่มอินพุตแบบ Unit Step ให้กับ โปรแกรม เพื่อให้ระดับน้ำในถังใบที่ 2 เพิ่มขึ้นไปอยู่ที่ระดับ 4 cm เช่นเดียวกันกับระดับน้ำในถังใบที่ 1 ในช่วง เวลา 300-450 วินาทีจะเป็นช่วงเวลาที่โปรแกรมทำงานเพื่อรักษาระดับน้ำในถังใบที่ 1 และระดับน้ำใน

ถังใบที่ 2 ให้อยู่ที่ระดับ 4 cm เท่ากัน ระหว่างการเปลี่ยนระดับของน้ำในถังใบที่ 1 และถังน้ำใบที่ 2 ถึงใดถังหนึ่งเป็นเวลา 150 และ 300 วินาทีตามลำดับ ก็จะเกิดผลกระทบต่ออีกถังหนึ่งอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ในกราฟแสดงผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการให้โปรแกรมทำงานร่วมกับดีคัปปลิ่งและไม่ใช้ดีคัปปลิ่งจะให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันซึ่งดูได้จากกราฟ ถ้าไม่ใช้ดีคัปปลิ่งผลกระทบที่มีต่อกันก็จะมาก (สังเกตจากเส้นกราฟสีน้ำเงิน) แต่เมื่อให้โปรแกรมทำงานร่วมกับดีคัปปลิ่งผลกระทบที่มีต่อกันจะลดลง (สังเกตจากเส้นกราฟสีน้ำแดง) อย่างไรก็ตามผลกระทบที่มีต่อกันของระดับน้ำทั้งสองถังถึงไม่สามารถที่จะกำจัดให้หมดไปได้แต่สามารถที่จะลดมันได้



รูปที่ 4.11 ค่า MV เมื่อออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางเดินราก (s_d) โดยมีดีคัปปลิ่ง



รูปที่ 4.12 ค่า MV เมื่อออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางเดินราก (s_d) โดยไม่มีดีคัปปลิ่ง

2. Root Locus โดยวางซีโรที่ตำแหน่ง $1/T_i$ วิธีการนี้เป็นวิธีการเดียวกันกับวิธีการแรกแต่วิธีการแรกจะวางซีโรของตัวควบคุมไว้ที่ตำแหน่งที่ทำให้ทางเดินรากผ่านจุด s_d แต่วิธีนี้จะวางซีโรของตัวควบคุมไว้ที่ตำแหน่ง $-1/z$ หรือกระบวนการที่เราจะออกแบบตัวควบคุมคือ $G_{n1}(s) = \frac{0.04347}{s + 0.03072}$ และ $G_{n2}(s) = \frac{0.03906}{s + 0.03548}$ พิจารณาจากกระบวนการเพื่อออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ โดยโครงสร้างของตัวควบคุมคือ

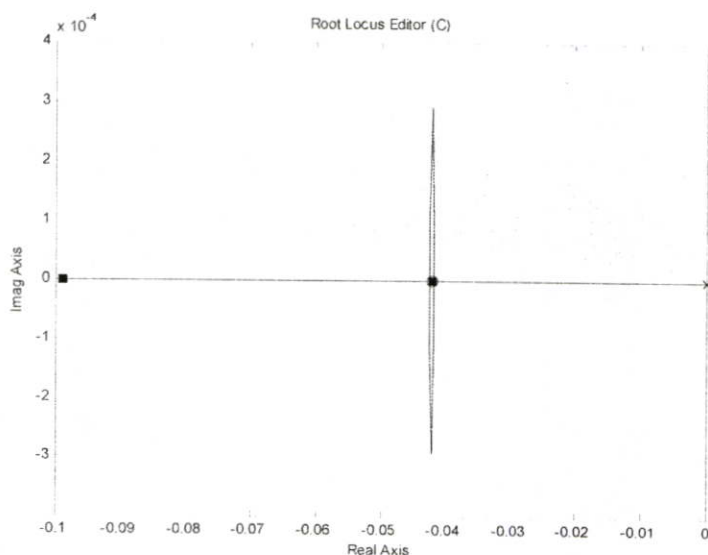
$$K(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

หรือมีค่าเท่ากับ

$$K(s) = K_p \frac{s + 1/T_i}{s} = K_p \frac{s + z}{s}$$

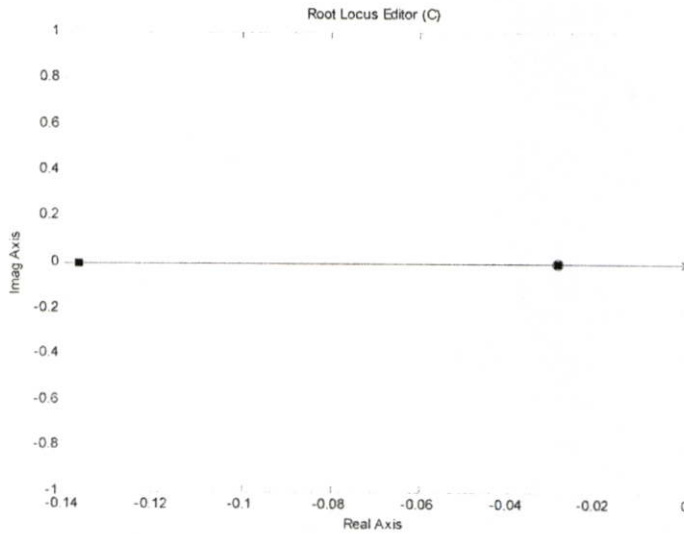
โดยที่ $z = 1/T_i$ เพราะฉะนั้นจะได้ค่า $T_i = 1/z$

การวางตำแหน่งของโพลและซีโรของตัวควบคุมจะอ้างถึงหลักการในหัวข้อที่ 3.3.2 ซึ่งในรูปที่ 3.5 จะมีรูปแบบในการวางโพลและซีโรอยู่ 3 วิธี โดยวิธีที่จะนำมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับงานวิจัยนี้จะใช้รูปแบบการวางโพลและซีโรเป็นรูปแบบที่ 2 คือวางซีโรของตัวควบคุม ($-1/T_i$) ที่ตำแหน่งเดียวกันกับตำแหน่งโพลของกระบวนการ ($T_i = \tau$) และวางโพลที่จุดกำเนิด เนื่องจากการวางตำแหน่งโพลและซีโรด้วยวิธีนี้จะทำให้ผลตอบสนองของระบบวงรอบปิดจะอยู่ในโหมด Critical damped เมื่อปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุม K_p เพิ่มขึ้นก็จะยังคงทำให้ผลตอบสนองของระบบวงรอบปิดไม่เกิดค่าพุ่งเกิน ซึ่งจะได้รูปแบบของทางเดินของรากดังนี้



รูปที่ 4.13 แสดงทางเดินรากของ $G_{n1}(s)$

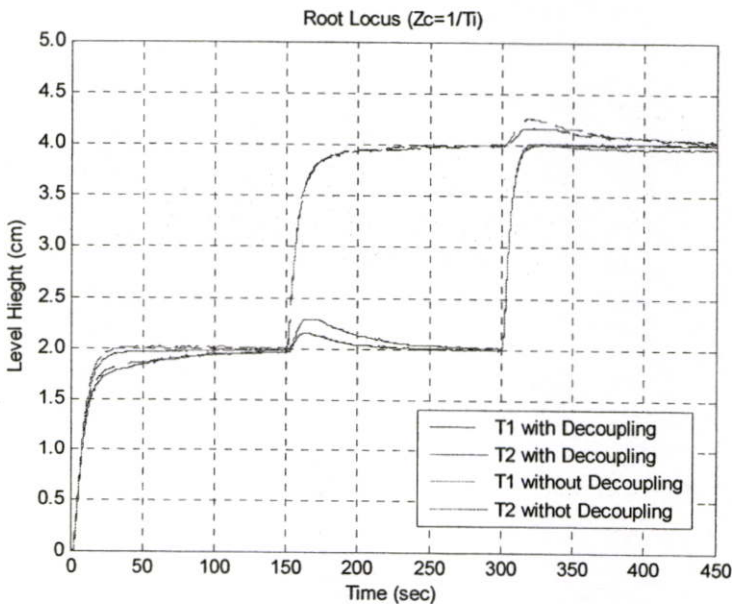
จากการนำค่า $g_{n_1}(s)$ ไปออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีทางเดินรากดังแสดงดังรูปด้านบนจะได้ค่าพารามิเตอร์ $K_p \frac{s+1/T_i}{s}$ จะทำให้ได้ค่า $K_{p1} = 2.38$ และได้ค่า $T_{i1} = 1/z = 1/0.0422 = 23.6967$



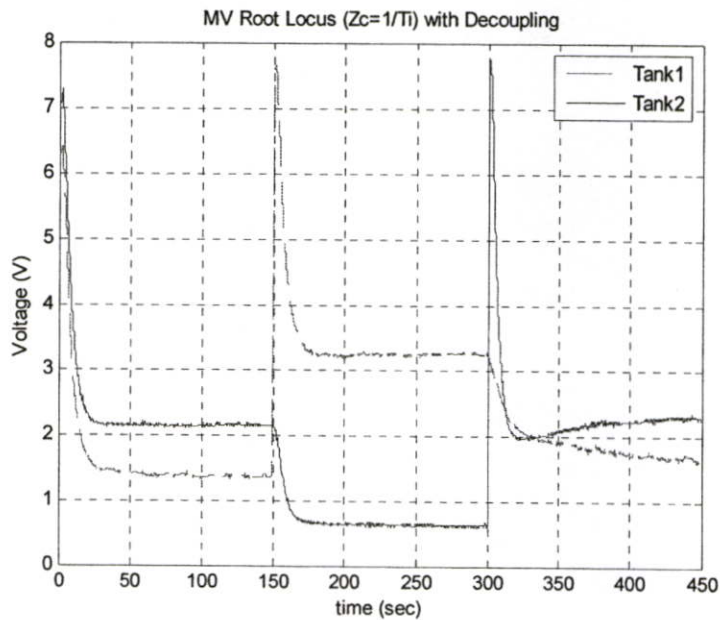
รูปที่ 4.14 แสดงทางเดินรากของ $G_{n_{22}}(s)$

นำค่า $g_{n_2}(s)$ ไปออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีทางเดินรากดังแสดงดังรูป 4.14 จะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม $K_p \frac{s+1/T_i}{s}$ ดังนี้ $K_{p2} = 2.65$ และได้ค่า $T_{i2} = 1/z = 1/0.0514 = 19.4553$

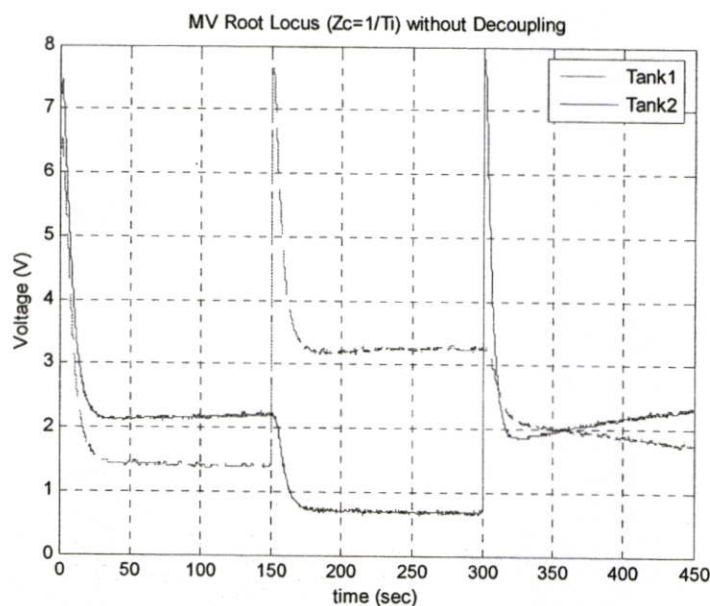
จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ทั้งหมดแทนลงในโปรแกรมแล้วทำการทดลองโดยที่ขั้นตอนการทดลองทั้งหมดจะเหมือนกับขั้นตอนในการทดลองแรก การอ่านค่าของเส้นกราฟก็เช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.15 ผลตอบสนองทางด้านเอาต์พุตเมื่อออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางเดินราก ($z_c = 1/T_i$)



รูปที่ 4.16 ค่า MV เมื่อออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางเดินราก ($z_c = 1/T_i$) โดยมีคัตออฟปลั่ง

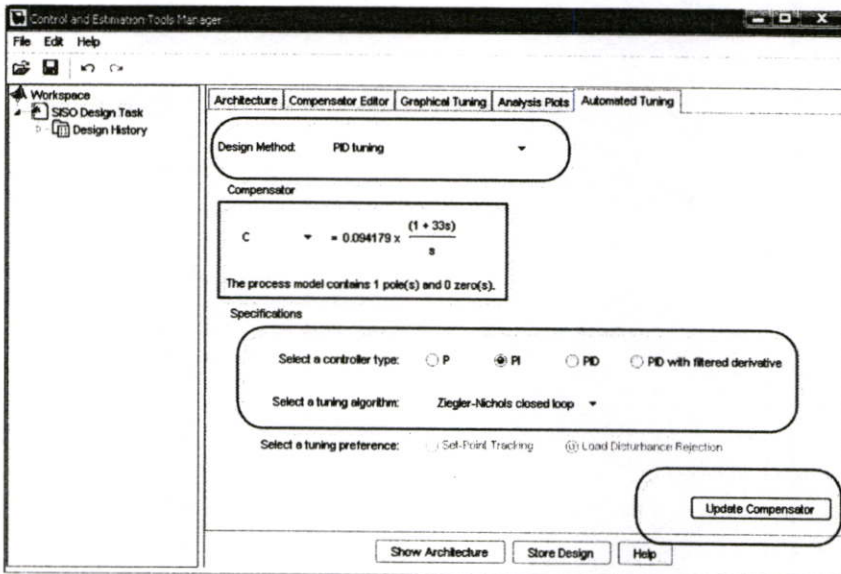


รูปที่ 4.17 ค่า MV เมื่อออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางเดินราก ($z_c = 1/T_i$) โดยไม่มีคัตออฟปลั่ง

สำหรับผลตอบสนองของกระบวนการเมื่อตัวควบคุมที่ได้ออกแบบด้วยวิธีทางเดินราก โดยวางซีโรที่ตำแหน่ง $1/T_i$ นั้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.15 ซึ่งจากกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่าข้อดีของการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีนี้ก็คือผลตอบสนองทางเอาต์พุตจะไม่มีค่าพุ่งเกิน (Overshoot) และสามารถลดผลกระทบที่มีต่อกับของกระบวนการได้ดี แต่จะใช้เวลาในการเข้าที่นานและถ้าสังเกตในรูปที่ 4.16 กับรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่าการนำค่าตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีนี้ไปควบคุมกระบวนการจะทำให้กระบวนการใช้พลังงานในการควบคุมสูง

3. **Ziegler Nichole** เป็นอีกหนึ่งวิธีที่เป็นที่รู้จักและถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการออกแบบตัวควบคุมซึ่งหลักการการออกแบบและทฤษฎีได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.3.3 สำหรับการค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยวิธีของ Ziegler Nichole ในงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม MatLab เข้ามาช่วยในการหา เนื่องจากว่าโปรแกรม MatLab ตั้งแต่เวอร์ชัน 2006a ขึ้นไปจะมีฟังก์ชันในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยวิธีของ Ziegler Nichole อยู่ด้วย ซึ่งโปรแกรมได้นำเอาทฤษฎีและหลักการของ Ziegler Nichole มาเขียนเป็นโปรแกรมให้เราใช้งานได้สะดวกมากยิ่งขึ้นแต่เงื่อนไขที่สำคัญในการใช้ทฤษฎีของ Ziegler Nichole มาใช้หาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยโปรแกรม MatLab นั้นจะต้องมีสมการคุณลักษณะของกระบวนการเพื่อให้โปรแกรมคำนวณ

$$\text{ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการ } G_{n1}(s) = \frac{0.04347}{s + 0.03072}, G_{n2}(s) = \frac{0.03906}{s + 0.03548}$$



รูปที่ 4.18 แสดงวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมของโดยโปรแกรม Matlab

การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทำได้ดังนี้ เริ่มจากป้อนทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันให้กับระบบ จากนั้นใช้คำสั่ง SISOTOOL ในโปรแกรม MatLab จะปรากฏหน้าต่าง Control Estimation Tools Manager ดังแสดงในรูปที่ 4.18 แล้วเลือกไปที่แท็บ Automated Tuning ซึ่งจะมีรายละเอียดต่างๆ ให้กำหนดดังต่อไปนี้

Design Method	เลือกเป็น	PID Tuning
Select a controller type	เลือกเป็น	PI
Select a tuning algorithm	เลือกเป็น	Ziegler-Nichols close-loop

หลังจากเลือกเซ็ทค่าต่างๆ เสร็จเรียบร้อยแล้วคลิกเมาส์ที่ปุ่ม Update Compensator แล้วจะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โดยสังเกตได้ที่ช่องของ Compensator และจากการทดลองจะได้ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมดังต่อไปนี้

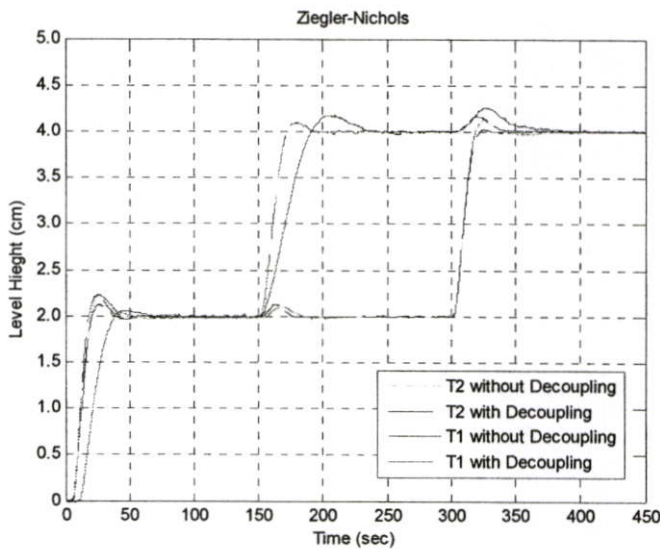
การหาค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมสำหรับกระบวนการ G_{n1}

$$K_{p1} = 1.1146, K_{i1} = 0.0629 \text{ และ Pre-filter คือ } F_1(s) = \frac{0.0629}{1.1146s + 0.0629}$$

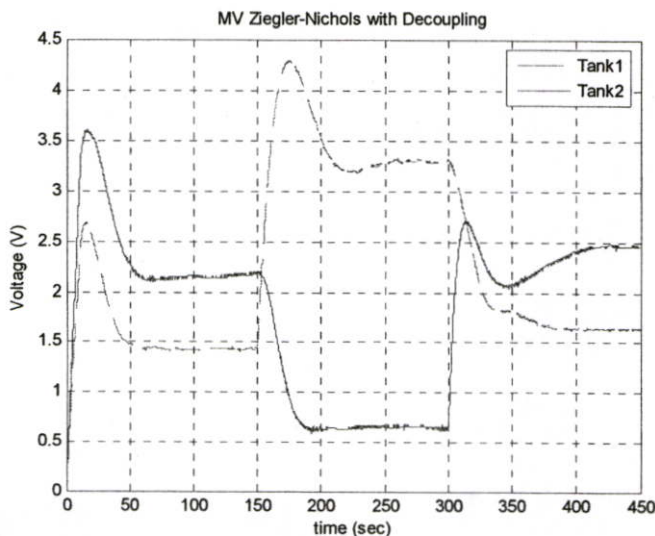
การหาค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมสำหรับกระบวนการ G_{n2}

$$K_{p2} = 1.4323, K_{i2} = 0.0934 \text{ และ Pre-filter คือ } F_2(s) = \frac{0.0934}{1.4323s + 0.0934}$$

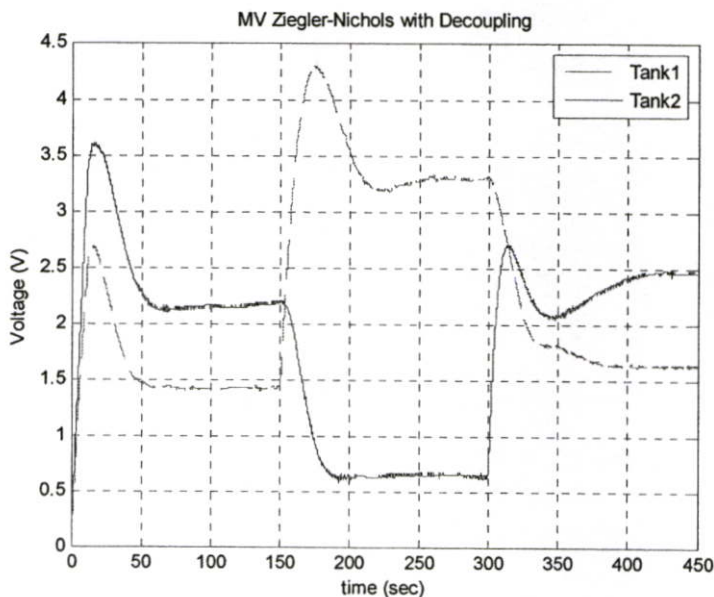
จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปทดลองควบคุมกระบวนการซึ่งจะทำให้ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.19 และค่าพลังงานที่ใช้ในการควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 4.20 และ 4.21



รูปที่ 4.19 ผลตอบสนองทางด้านเอาต์พุตเมื่อออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี Ziegler-Nichols



รูปที่ 4.20 ค่า MV เมื่อออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี Ziegler-Nichols โดยมีคิตับปลั่ง



รูปที่ 4.21 ค่า MV เมื่อออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี Ziegler-Nichols โดยไม่มีดีคัปปลิ่ง

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดพอจะสรุปค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ใช้สำหรับวิธีการออกแบบด้วยวิธีต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.2 และสมรรถนะของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมด้วยวิธีการออกแบบด้วยวิธีต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม จากการออกแบบด้วยวิธีการต่างๆ

Design Methods		Parameter Controller			
		K_{p1}	K_{i1}	K_{p2}	K_{i2}
Root Locus (S_d)	with Decoupling	4.34	0.5208	4.56	0.57
	without Decoupling	4.34	0.5208	4.56	0.57
Root Locus ($1/T_i$)	with Decoupling	2.38	0.1004	2.65	0.1362
	without Decoupling	2.38	0.1004	2.65	0.1362
Ziegler- Nichols	with Decoupling	1.1146	0.0629	1.4323	0.0934
	without Decoupling	1.1146	0.0629	1.4323	0.0934

ตารางที่ 4.3 แสดงสมรรถนะของระบบเมื่อทำการเปลี่ยนระดับน้ำ จาก 2 cm ไป 4 cm

Design Methods		Tank 1				Tank 2			
		t_r (sec)	t_s (sec)	t_p (sec)	P.O. (%)	t_r (sec)	t_s (%)	t_p (sec)	P.O. (sec)
Root Locus (S_d)	with Decoupling	13	40	27	5	20	30	25	3
	without Decoupling	13	40	27	5	20	30	25	5
Root Locus ($1/T_i$)	with Decoupling	18	50	-	-	15	19	-	-
	without Decoupling	18	50	-	-	15	19	-	-
Ziegler- Nichols	with Decoupling	13	41	30	5	19	25	22	2
	without Decoupling	27	80	55	10	19	33	25	6

4.4 สรุปผลการทดลอง

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบตัวควบคุมด้วยทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุม 3 วิธีคือ ทฤษฎีทางเดินของราก (วางซีโรให้ทางเดินรากลผ่านจุด s_d) ทฤษฎีทางเดินของราก (วางซีโรที่ตำแหน่ง $1/T_i$) และ ทฤษฎีของ Ziegler-Nichole ซึ่งจากการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบของแต่ละวิธีไปควบคุมผลตอบสนองที่ได้ก็จะมีค่าที่แตกต่างกับออกไป ซึ่งผลจากการทดลองจะเห็นได้ว่าทฤษฎีแรกที่ใช้ในการออกแบบจะดีที่สุด ส่วนวิธีที่สองมีข้อดีคือผลตอบสนองของระบบจะไม่มีค่าพุ่งเกินแต่จะใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวนานกว่าวิธีแรก ส่วนวิธีสุดท้ายซึ่งเป็นวิธี Ziegler-Nichole ผลตอบสนองทางด้านเอาต์พุตค่อนข้างที่จะมีค่าพุ่งเกินสูง

ในกราฟแสดงผลการทดลองได้นำกราฟผลตอบสนองทางเอาต์พุตของระบบเมื่อต่อร่วมกับคิ คับปลิ่งและไม่ต่อร่วมกับคิ คับปลิ่งมาเปรียบเทียบกันเพื่อแสดงให้เห็นว่าระหว่างการต่อคิ คับปลิ่งกับ ไม่ต่อคิ คับปลิ่งเข้ากับระบบนั้นผลตอบสนองแตกต่างกันอย่างไรซึ่งจากกราฟผลตอบสนองทางเอาต์พุต แสดงให้เห็นว่าขณะที่ไม่มีคิ คับปลิ่งผลกระทบที่มีต่อกันของระบบจะมีมากแต่เมื่อต่อคิ คับปลิ่งเข้ากับระบบจะทำให้ผลกระทบที่มีต่อกันของระบบลดลงซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของคิ คับปลิ่งที่ได้กล่าวไว้ตั้งแต่ตอนเริ่มต้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

กระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลกระทบต่อกันเป็นกระบวนการที่นำมาใช้เป็นแบบจำลองกระบวนการแบบสองอินพุทสองเอาต์พุทได้เป็นอย่างดี และเหมาะสำหรับที่จะนำมาใช้เป็นแบบจำลองในการศึกษาในวิชาระบบควบคุม เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สามารถทำให้เข้าใจระบบควบคุมแบบสองอินพุทสองเอาต์พุทได้ดี ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมประกอบไปด้วยทฤษฎีคัลบ์ปลิ่ง ทฤษฎีทางเดินของรากลและทฤษฎีของ Ziegler-Nichole

จากผลการทดลองจะเห็นได้ชัดเจนว่าทฤษฎีคัลบ์ปลิ่งมีประโยชน์อย่างมากกับกระบวนการที่มีผลต่อกันเนื่องจากว่าทฤษฎีดังกล่าวช่วยลดผลกระทบที่มีต่อกันได้จริงซึ่งพิสูจน์ได้จากผลการทดลอง ในงานวิจัยได้นำทฤษฎีต่างๆ มาช่วยในการออกแบบตัวควบคุมเพื่อเปรียบเทียบให้เห็นว่าแต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน ซึ่งวิธีการของทางเดินรากลโดยวงจรีโให้ทางเดินของรากลผ่านจุด S_r จะให้ผลตอบสนองและสมรรถนะที่ดีกว่าวิธีอื่น การนำเอาทฤษฎี 2-DOF มาใช้เพื่อช่วยในการปรับแต่งระบบควบคุมให้มีสมรรถนะได้ตามที่ต้องการ เนื่องจากว่าการวิธีการออกแบบตัวควบคุมที่ได้กล่าวมาทั้งหมดยังไม่สามารถทำให้ควบคุมระบบเป็นไปตามที่ต้องการได้จึงต้องนำเอาทฤษฎีของ 2-DOF มาช่วยปรับแต่งสมรรถนะ

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. ปัญหาที่พบจากการทดลองก็คือการหาจุดทำงานที่เหมาะสมที่จะทำให้สามารถทำให้เห็นถึงความแตกต่างกันระหว่างการต่อคัลบ์ปลิ่งกับไม่ต่อคัลบ์ปลิ่งซึ่งต้องทดลองหาจุดที่เหมาะสมถ้าไม่อย่างนั้นแล้วอาจจะไม่เห็นความแตกต่าง

2. การทดลองหนึ่งครั้งจะใช้เวลาค่อนข้างนานเมื่อใช้เวลานานจะทำให้ชุดขับปั้มน้ำร้อน ซึ่งจะส่งผลทำให้แรงดันในการขับปั้มน้ำลดลงและทำให้ปั้มน้ำทำงานผิดปกติไม่เป็นไปตามที่ต้องการ วิธีการแก้ปัญหาก็คือปรับแอร์ในห้องให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าปกติหรืออาจจะใช้พัดลมช่วยเป่าระบายความร้อนให้กับชุดขับปั้มน้ำ

3. ในการทดลองแต่ละครั้งควรเก็บผลการทดลองให้ครบทุกกรณีที่จะทำการทดลอง เพราะถ้าหากว่าทดลองไม่เสร็จแล้วปล่อยทิ้งไว้แล้วกลับมาทดลองใหม่จำเป็นที่จะต้อง Setup กระบวนการทดลองใหม่ด้วย ถ้าไม่ Setup กระบวนการใหม่ผลการทดลองที่ได้อาจจะคลาดเคลื่อนได้

บรรณานุกรม

- [1] Luyben, W.L. “*Distillation decoupling.*” *AIChE Journal*, 1970, 16(2), 198-203.
- [2] Gagnon E., Pomerleau A. and Desbiens A. “*Simplified, Ideal or Inverted Decoupling.*”
Department of electrical and Computer engineering, Laval University, Quebec, Canada
- [3] J.C. Bacilio and S.R. Matos “*Design of PI and PID Controllers With Transient Performance Specification*” *IEEE Transactions on Education*, vol. 45, No. 4, November 2002
- [4] Åström, K. J., and T. Hägglund (1995). *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning.* *Instrument Society of America*, 2nd edition.
- [5] S. Menani and H.N. Koivo, Relay tuning of multivariable PI controllers, in: *Proc. IFAC 13th Triennial World Congress*, San Francisco, Vol. K, pp. 139-144 (1996).
- [6] Z. J. Palmor, Y. Halevi and N. Krasney, “Automatic tuning of decentralized PID controllers for TITO processes”, *Automatica*, Vol.31No.7, pp. 1001-1010, 1995
- [7] Q.C. Wang, B. Zou, T.H. Lee and Q. Bi “Auto tuning of multivariable PID controllers from decentralized relay feedback”, *Automatica*, Vol.33, No.3, pp. 319-330, 1997
- [8] Damir Vrančić, “Tuning of Decoupling Controller by using MIMO Method”
- [9] S. Skogestad, and I. Postlethwaite., *Multivariable Feedback Control Analysis and Design*, John Wiley & Sons, Chichester, 1996
- [10] J.M. Maciejowski, *Multivariable Feedback Design*, Addison-Wesley, 1989
- [11] M. Zhuang, and D.P. Atherton, “PID controller design for a TITO system”, *IEE Proc.-Control Theory Appl.*, Vol.141, No.2, pp.111-120, 1994
- [12] S. Majhi, “SISO controller for TITO systems”, presented at the Int.Conf. on Energy. *Automation and information Tech.*, 2001
- [13] N.K.Poulsen, B.Kouvaritakis and M.Cannon. “Nonlinear constrained predictive control applied to a coupled-tanks apparatus” *IEE Proc.-Control Theory Appb*, Vol. 148, No. I, January 2000

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.
โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง

```

clear all;

clc all;

%*****

%*****

%    Parameter of Process To Open Loop Transfer Function

%*****

A=66.25;

a=0.1963;

k1=2.88;

k2=2.588;

g=981;

beta1=0.7273;

beta2=0.5402;

betaX=0.3948;

h1=6.75;

h2=2.35;

dH=h1-h2;

%*****

%    To calculate T1, T2, T12

%*****

T1=A/(beta1*a)*sqrt(2*h1/g);

T2=A/(beta2*a)*sqrt(2*h2/g);

T=A/(betaX*a)*sqrt(2*dH/g);

%*****

%    To find G11(s) G12(s) G21(s) G22(s)

%*****

num1=k1/A*[1 (T+T2)/(T2*T)];

den=[1 (T1*T+T2*T+2*T1*T2)/(T1*T2*T) (1/(T1*T2)+1/(T1*T)+1/(T2*T))];

G11=tf(num1,den)

[z1,p1,k1]=tf2zp(num1,den)

```

$$\text{num2}=[k2/A/T];$$

$$G12=\text{tf}(\text{num2},\text{den})$$

$$[z2,p2,k2]=\text{tf2zp}(\text{num2},\text{den})$$

$$\text{num3}=[k1/A/T];$$

$$G21=\text{tf}(\text{num3},\text{den})$$

$$[z3,p3,k3]=\text{tf2zp}(\text{num3},\text{den})$$

$$\text{num4}=k2/A*[1 (T+T1)/(T1*T)];$$

$$G22=\text{tf}(\text{num4},\text{den})$$

$$[z4,p4,k4]=\text{tf2zp}(\text{num4},\text{den})$$

$$D1=G21/G22;$$

$$D2=G12/G11;$$

% To find g1(s) and g2(s) by decoupling method;

% To find g1(s)

$$w=(T1*T+T2*T+2*T1*T2)/(T1*T2*T);$$

$$x=(T+T2+T1)/(T1*T2*T);$$

$$y=(T+T2)/(T2*T);$$

$$z=(T+T1)/(T1*T);$$

$$p4=(k1/A)*1;$$

$$p3=(k1/A)*(w+z+y);$$

$$p2=(k1/A)*(x+w*z+w*y+z*y-1/(T^2));$$

$$p1=(k1/A)*(x*z+x*y+w*z*y-w/(T^2));$$

$$p0=(k1/A)*(x*z*y-x/(T^2));$$

$$q5=1;$$

$$q4=(2*w+z);$$

$$q3=(2*x+2*w*z+w^2);$$

$$q2=(2*x*z+2*w*x+z*w^2);$$

$$q1=(2*w*x*z+x^2);$$

$$q0=(x^2*z);$$

$$\text{num5}=[p4 \ p3 \ p2 \ p1 \ p0];$$

$$\text{den5}=[q5 \ q4 \ q3 \ q2 \ q1 \ q0];$$

$$g1=\text{tf}(\text{num5},\text{den5})$$

$$[z_g1,p_g1,k_g1]=\text{tf2zp}(\text{num5},\text{den5});$$

$$e=(T1*T+T2*T+2*T1*T2)/(T1*T2*T);$$

$$f=(T+T2+T1)/(T1*T2*T);$$

$$g=(T+T1)/(T1*T);$$

$$h=(T+T2)/(T2*T);$$

$$m4=(k2/A)*1;$$

$$m3=(k2/A)*(e+h+g);$$

$$m2=(k2/A)*(f+h*e+g*e+g*h-1/(T^2));$$

$$m1=(k2/A)*(h*f+g*f+g*h*e-e/(T^2));$$

$$m0=(k2/A)*(g*h*f-f/(T^2));$$

$$n5=1;$$

$$n4=(2*e+h);$$

$$n3=(2*f+2*h*e+e^2);$$

$$n2=(2*h*f+2*e*f+h*e^2);$$

$$n1=(2*e*h*f+f^2);$$

$$n0=(h*f^2);$$

$$\text{num6}=[m4 \ m3 \ m2 \ m1 \ m0];$$

$$\text{den6}=[n5 \ n4 \ n3 \ n2 \ n1 \ n0];$$

$$g2=\text{tf}(\text{num6},\text{den6})$$

$$[z_g2,p_g2,k_g2]=\text{tf2zp}(\text{num6},\text{den6});$$

$$g1_m=\text{minreal}(g1)$$

$$g2_m=\text{minreal}(g2)$$

ภาคผนวก ข.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. Arjin Numsomran, Tianchai Suksri, and Maitree Thumma, “**Design of 2-DOF PI Controller with Decoupling for Coupled-Tank Process**” International Conference on Control, Automation and Systems 2007, pp 339-344, Oct. 17-20, 2007 in COEX, Seoul, Korea

ICCAS 2007

International Conference on Control, Automation and Systems 2007

• PROCEEDINGS



- Welcome Message
- Conference Organization
- Conference Information
- Plenary Talks, Invited Talks & Special Session
- Table of Contents
- Author Index
- Financial Contribution
- E-proceeding Search
- EXIT

October 17-20, 2007
COEX, Seoul, Korea

IEEE Catalog Number: 07EX1874 ISBN: 978-89-950038-6-2-98560

in conjunction with KRC 2007



Design of 2-DOF PI Controller with Decoupling for Coupled-Tank Process

Arjin Numsomran², Tianchai Suksri¹, and Maitree Thumma²

¹ Faculty of Engineering, Department of Instrumentation Engineering,
Pathumwan Institute of Technology, Bangkok, Thailand

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

Abstract: This paper presents the approach to design the 2-DOF PI controller with Decoupling for a Coupled-Tank two-input two-output process. The structure of controller design can minimize several undesirable influences from an interaction in TITO Process. The decoupling controllers transform TITO plant transfer function models into SISO form so that 2-DOF PI controller for each SISO model can be designed by Root Locus Technique easily and efficiently. The results from decoupling and controller design can be illustrated by experiments.

Keywords: 2-DOF PI Controller, Root Locus, Coupled-Tank Process.

1. INTRODUCTION

Many systems in chemical and process industry are two-input two-output (TITO) process which have cross coupling between process inputs and outputs. To compare with single-input single-output (SISO) counterparts, TITO processes are more difficult to control due to the existence of interactions between input and output variables. Generally controller design for TITO process applies from two theory methods. First method is modern controller design which uses centralized controller to satisfy response specification but it still has some difficulty in starting control system. Second method is classical controller design which uses decentralized controller such as simple PID controllers but controllers' parameters is still complicate for evaluation. In this paper, we experiment a classical controller design on coupled-tank interacting (TITO) process that has several undesirable influences from an interaction between two tanks. Our method performance is extended to the decoupling controllers which transform TITO plant transfer function model into SISO form so that 2-DOF PI controller for each SISO model can be designed by Root Locus Technique. Prefilter is used for a performance adjustment. The advantage of using decoupling controller for coupled-tank interacting process (TITO) is transforming TITO transfer function to SISO form and ability in minimizing the influences of interacting. Therefore, the calculation of PI controller parameters becomes easier and more efficient.

The paper is organized as follows. The next section gives details about coupled-tank process. Section 3 explains a control design method. Section 4 explains an implementation controller. Section 5 shows experiment process and results. Finally, conclusions are given in section 6

2. COUPLED-TANK PROCESS

Consider the coupled-tank two-input two-output process in fig.1. The target is to control the level in two tanks by the inlet water flow from two pumps. The process inputs are $u_1(t)$, $u_2(t)$ (input voltage to pumps)

and the outputs are $h_1(t)$, $h_2(t)$ water level in tank 1 and tank 2 respectively.

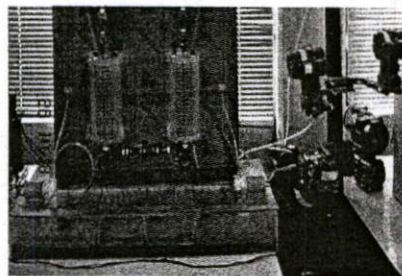
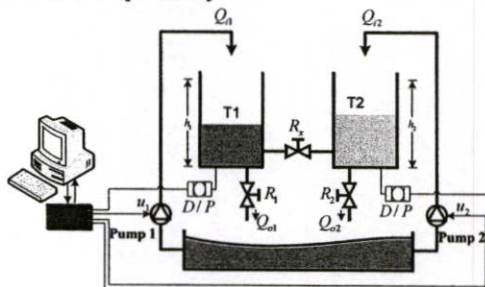


Fig.1 The Coupled-Tank Process.

The nonlinear plant equations can be obtained by mass balance equation and Bernoulli's law. After linearization process, we obtain the linearized plant equations as (1)

$$\begin{aligned}
 \frac{dh_1(t)}{dt} &= \frac{k_1}{A} U_1(t) - \frac{\beta_1 a}{A} \sqrt{\frac{g}{2h_1}} H_1(t) \\
 &\quad + \frac{\beta_x a}{A} \sqrt{\frac{g}{2|h_2 - \bar{h}_1|}} [H_2(t) - H_1(t)] \\
 \frac{dh_2(t)}{dt} &= \frac{k_2}{A} U_2(t) - \frac{\beta_2 a}{A} \sqrt{\frac{g}{2h_2}} H_2(t) \\
 &\quad - \frac{\beta_x a}{A} \sqrt{\frac{g}{2|h_2 - \bar{h}_1|}} [H_2(t) - H_1(t)]
 \end{aligned} \tag{1}$$

Where A is the cross section area of tank 1 and tank 2 (cm^2), a is the cross section area of outlet hole of tank 1, tank 2 and cross section area of jointed pipe between tank 1 and tank 2 (cm^2), β_1 is the valve ratio at the outlet of tank 1, β_2 is the valve ratio at the outlet of tank 2, β_x is the valve ratio between tank 1 and tank 2, \bar{h}_1, \bar{h}_2 are the steady-state water level of tank 1 and tank 2, g is the gravity (cm^2/s) and k_1, k_2 are the gain of pump 1 and pump 2 ($cm^3/V \cdot s$)

From the linearized plant equations (1) can be transformed to the equation as (2)

$$\begin{bmatrix} h_1(s) \\ h_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Where transfer matrix $G_{ij}(s)$ has the value as following

$$G_{11}(s) = \frac{\frac{k_1}{A} \left(s + \frac{(T_x + T_2)}{T_2 T_x} \right)}{s^2 + \left(\frac{T_1 T_x + T_2 T_x + 2T_1 T_2}{T_1 T_2 T_x} \right) s + \left(\frac{1}{T_1 T_2} + \frac{1}{T_1 T_x} + \frac{1}{T_2 T_x} \right)}$$

$$G_{12}(s) = \frac{\frac{k_2}{A} \cdot \frac{1}{T_x}}{s^2 + \left(\frac{T_1 T_x + T_2 T_x + 2T_1 T_2}{T_1 T_2 T_x} \right) s + \left(\frac{1}{T_1 T_2} + \frac{1}{T_1 T_x} + \frac{1}{T_2 T_x} \right)}$$

$$G_{21}(s) = \frac{\frac{k_1}{A} \cdot \frac{1}{T_x}}{s^2 + \left(\frac{T_1 T_x + T_2 T_x + 2T_1 T_2}{T_1 T_2 T_x} \right) s + \left(\frac{1}{T_1 T_2} + \frac{1}{T_1 T_x} + \frac{1}{T_2 T_x} \right)}$$

$$G_{22}(s) = \frac{\frac{k_2}{A} \left(s + \frac{(T_x + T_1)}{T_1 T_x} \right)}{s^2 + \left(\frac{T_1 T_x + T_2 T_x + 2T_1 T_2}{T_1 T_2 T_x} \right) s + \left(\frac{1}{T_1 T_2} + \frac{1}{T_1 T_x} + \frac{1}{T_2 T_x} \right)} \quad (3)$$

$$T_1 = \frac{A}{\beta_1 a} \sqrt{\frac{2\bar{h}_1}{g}}, \quad T_2 = \frac{A}{\beta_2 a} \sqrt{\frac{2\bar{h}_2}{g}}, \quad T_x = \frac{A}{\beta_x a} \sqrt{\frac{2|\bar{h}_1 - \bar{h}_2|}{g}}$$

\bar{h}_1, \bar{h}_2 are the steady-state water level of tank 1 and tank 2, T_1 is the time constant of tank 1, T_2 is the time constant of tank 2 and T_x is the time constant between tank 1 and tank 2.

According to transfer matrix $G_{ij}(s)$ in (2), (3), the transfer functions of coupled-tank process are second order form which have the cross coupling between process inputs and outputs. The decoupling controllers are required for minimize the effects from cross coupling and transform TITO plant transfer function model into SISO form.

3. CONTROLLER DESIGN METHOD

In this section, the controller design is divided by 2 parts. The first part is Decoupling Controller Design. The second part is 2-DOF PI Controller Design which have the details as following.

3.1 Decoupling Design

In Fig.2 shows the plant transfer matrix $G_{ij}(s)$ that has the cross coupling between process inputs and outputs. Because of the interaction between processes, the control design needs the decoupling controllers to minimize the cross coupling effects.

The decoupling controllers consist of two decouples (d_1 and d_2). The purpose of using decouples (d_1 and d_2) is to decouple the multivariable system. This can be done by choosing the following transfer functions for decouplers:

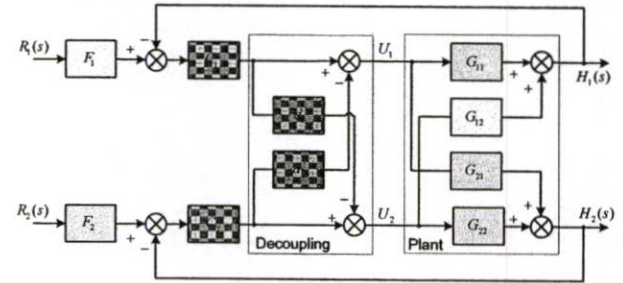


Fig. 2 (TITO) process with decoupling controllers

$$d_1(s) = \frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)}, \quad d_2(s) = \frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} \quad (4)$$

If expression (4) holds, cross-interactions between inputs u_1 and u_2 and outputs h_1 and h_2 do not exist. In this case the process outputs are:

$$h_1(s) = C_1(s)g_1(s)e_1(s)$$

$$h_2(s) = C_2(s)g_2(s)e_2(s)$$

where

$$g_1(s) = G_{11}(s) - d_1(s)G_{12}(s)$$

$$g_2(s) = G_{22}(s) - d_2(s)G_{21}(s) \quad (5)$$

After the decoupling design, we get 2 SISO transfer functions of plant g_1 and g_2 which are used for PI controller design C_1 and C_2 respectively.

3.2 Two Degree of Freedom PI Controller Design

The control system structure fig.3 is 2-DOF PI controllers in form which consists of PI controllers (C_1, C_2) and prefilers (F_1, F_2)

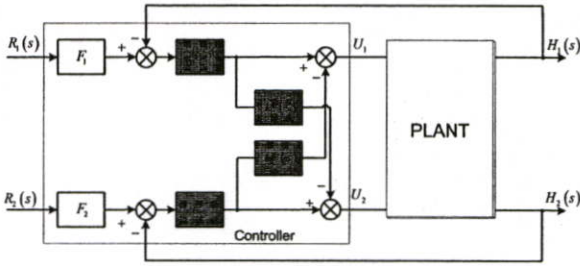


Fig.3 The block diagram of control system

The 2-DOF PI controllers are designed by Root Locus Technique which can be applied as following step.

After defining the characteristic of transient response (Percent Overshoot P.O.) and steady state response (Settling Time) we start with step1

Step 1 Finding the damping ratio: ζ and under damped natural frequency ω_n by considering the characteristic of transient response and steady state response from the equation (6)

$$P.O. = 100 \cdot e^{-\zeta\pi / \sqrt{1-\zeta^2}} \% \approx 4 / \zeta\omega_n \quad (6)$$

$$s_d = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$$

Step 2 Finding the summation of angle at s_d of the open loop system $G_c(s)G_p(s)$ by graphical method or arithmetical method and then consider the essential angle of $\angle(s_d + z_c)$ in order to the summation of angle will be being according to the system condition (7)

$$\sum(\theta_z + \theta_{zc}) + \sum\theta_p = -(2k+1)\pi, \quad k = 0, 1, \dots, n \quad (7)$$

Step 3. Finding the gain K_c of the controller by using the root locus technique.

$$K_c = K_{sd} = \frac{1}{|G(s_d)H(s_d)|} \quad (8)$$

Step 4. Substitution all of the parameters in the equation of controller.

Step 5. Plot the root locus of $G_c(s)G_p(s)$ in order to confirm that the root locus passes the defined point s_d

Step 6. To obtain the satisfying response and minimizing overshoot by inputting step signal therefore, adding the prefilter controller as shown in equation (9)

$$G_f(s) = \frac{z_c}{s + z_c} \quad (9)$$

4. IMPLEMENTATION CONTROLLER

In this section, the implementation controller consists of coupled-tank process, experimental controller hardware and software which have the details as following.

4.1 Coupled-Tank Process Apparatus

Coupled-Tanks Process in Fig.1 consist of two 66.25 (cm^2) cross section area 18.5 (cm) height tanks which have their own 0.1963 (cm^2) cross section area of outlet valve and interconnected valve between two tanks, Each tank has gear pump which gives 2200 ml/min (Vdc). For a level measurement apparatus, we use two DP Transmitters which their output 4-20 mA varies by 0-100% of level range.

4.2 Controller Design

According to Fig.1, The water level signals from DP transmitters are sent to computer via interface card. The controllers which run by Simulink software compare the measurement signals to the set-point and calculate the control signals to pump drive circuit via interface card for succeeding in water level height control.

4.2.1 Hardware

Fig.4 Interface card is PCI-1711 Advantech which has 16 Analog Input, 16 Digital I/O for A/D and D/A transference with the sampling speed 100 kHz

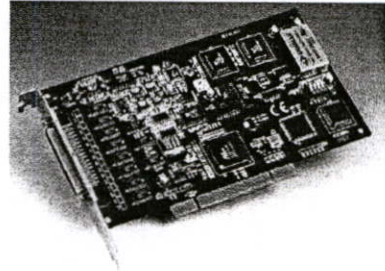


Fig.4 PCI-1711 Interface card

4.2.2 Software

A Design of simulation and experimental controller software done by MATLAB version 7.0. The Simulink experimental software is shown in Fig.5.

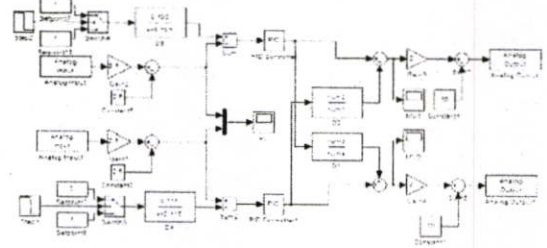


Fig.5 Experimental Software

5. THE EXPERIMENT RESULTS

In this section, the experiment done by following step.

Step 1. To find plant transfer matrix $G_{ij}(s)$

Step 2. To design decoupling controller model $d_1(s)$, $d_2(s)$ and calculate the SISO plant transfer function $g_1(s)$, $g_2(s)$

Step 3. To design 2-DOF PI controller

Step 4. To test controller performance and study plant's behavior.

The details of each step are described as following.

Step 1 To find plant transfer matrix $G_{ij}(s)$

From Fig.1 we obtained plant parameter as a following table 1

Table 1. The parameters of process

$A(\text{cm}^2)$	66.25
$a(\text{cm}^2)$	0.1963
β_1	0.35903
β_2	0.45848
β_x	0.38705

Table 2. The operating point of process

$u_1(V)$	2.5
$u_2(V)$	2
\bar{h}_1 (x10 % Range)	2.749
\bar{h}_2 (x10 % Range)	3.262
$k_1(\text{cm}^3 / V \cdot s)$	2.88
$k_2(\text{cm}^3 / V \cdot s)$	2.588

According to the parameters and the operating points of process in table 1 and table 2, this process can be placed into the equation (3). It will be obtained the plant transfer function as in equation (10)

$$\begin{aligned}
 G_{11}(s) &= \frac{0.04347s + 0.00124}{(s^2 + 0.05461s + 0.0006032)} \\
 G_{12}(s) &= \frac{0.0004638}{(s^2 + 0.05461s + 0.0006032)} \\
 G_{21}(s) &= \frac{0.0005161}{(s^2 + 0.05461s + 0.0006032)} \\
 G_{22}(s) &= \frac{0.03906s + 0.001019}{(s^2 + 0.05461s + 0.0006032)}
 \end{aligned} \quad (10)$$

According to equation (10), the transfer functions of interactive coupled-tank process are able to illustrate in the second order form which have two poles and zero for $G_{11}(s)$, $G_{22}(s)$ without zero for $G_{12}(s)$, $G_{21}(s)$.

We used plant transfer functions as $G_{21}(s)$, $G_{22}(s)$, $G_{11}(s)$, $G_{12}(s)$ for designing the decouple models in the next step.

Step 2. To design decoupling model $d_1(s)$, $d_2(s)$

From (4) and (10) we designed decoupling controllers $d_1(s)$ and $d_2(s)$ for decoupling the interaction in couple-tank process as equation (11).

$$\begin{aligned}
 d_1(s) &= \frac{G_{21}}{G_{22}} = \frac{0.0005161}{0.03906s + 0.001019} \\
 d_2(s) &= \frac{G_{12}}{G_{11}} = \frac{0.0004638}{0.04347s + 0.00124}
 \end{aligned} \quad (11)$$

From decoupling models (11), it obtained new plant transfer functions as equation (12)

$$\begin{aligned}
 g_1(s) &= G_{11}(s) - d_1(s)G_{12}(s) \\
 &= \frac{0.043s^4 + 0.0047s^3 + 1.82e-4s^2 + 2.86e-6s + 1.58e-8}{s^5 + 0.14s^4 + 7.04e-3s^3 + 1.75e-4s^2 + 2.08e-6s + 9.49e-9} \\
 g_2(s) &= G_{22}(s) - d_2(s)G_{21}(s) \\
 &= \frac{0.039s^4 + 0.0043s^3 + 1.64e-4s^2 + 2.57e-6s + 1.42e-8}{s^5 + 0.14s^4 + 7.3e-3s^3 + 1.85e-4s^2 + 2.24e-6s + 1.04e-8}
 \end{aligned} \quad (12)$$

According to equation (12) we produced equivalent models of $g_1(s)$, $g_2(s)$ where all cancelling pole/zero pairs or non minimal state dynamics are eliminated then we got $g_1(s)$, $g_2(s)$ in a form of 1st order transfer function as equation (13).

$$g_1(s) = \frac{0.04347}{s + 0.02608}, \quad g_2(s) = \frac{0.03906}{s + 0.02853} \quad (13)$$

Step 3. To design 2-DOF PI Controller

In this step, the 2-DOF PI controllers which are designed by root locus technique will be explained. The process models which achieved by decoupling structure as equation (13) are employed to design the controller under this condition.

$$P.O. \leq 5\%, \quad t_s^{\pm 2\%} \leq 40 \text{ sec}, \quad e_{ss}(t) = 0 \quad (14)$$

From the condition requirement, closed loop pole is in the position as

$$\text{Control loop } g_1(s) : s_{d1} = -0.1174 \pm j0.085$$

$$\text{Control loop } g_2(s) : s_{d2} = -0.108 \pm j0.0995$$

And then it is obtained

$$\text{Control loop } g_1(s) : z_{c1} = 0.103, \quad K_c = 4.8$$

$$\text{Control loop } g_2(s) : z_{c2} = 0.115, \quad K_c = 4.8$$

Therefore, the feedback controller and prefilter controller are able to be shown as following.

$$\begin{aligned}
 C_1(s) &= \frac{4.8s + 0.4944}{s}, \quad F_1(s) = \frac{0.103}{s + 0.103} \\
 C_2(s) &= \frac{4.8s + 0.552}{s}, \quad F_2(s) = \frac{0.115}{s + 0.115}
 \end{aligned} \quad (15)$$

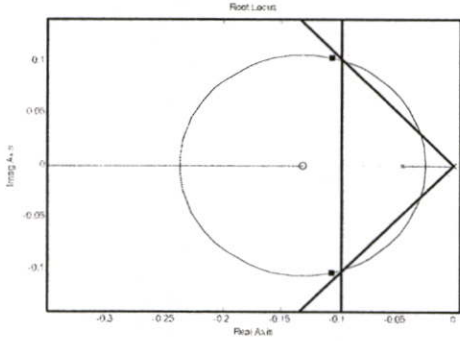


Fig.6 The Root Locus of Control System $g_1(s)$

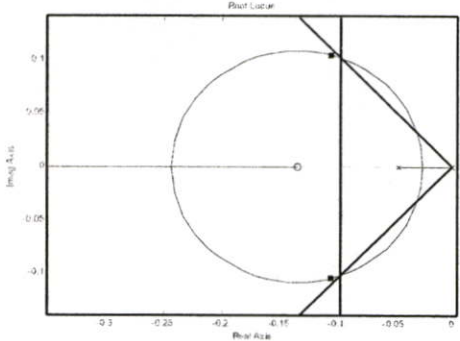


Fig.7 The Root Locus of Control System $g_2(s)$

Step 4. To test controller performance and study plant's behavior.

The test done by control the response of control system $g_1(s)$ and $g_2(s)$ at the set-point as the details in table 3.

Table 3. Set-Point of Control System $g_1(s)$ and $g_2(s)$

	$t=0s$	$t=100s$	$t=200s$	$t=300s$	$t=400s$
$g_1(s)$	2	3	-	4	-
$g_2(s)$	4	-	5		6

First, we tested the performance of PI controller and 2 DOF PI controller in control system without the decoupling. The response results are obtained as Fig.8

And then, we tested the performance of PI controller and 2-DOF PI controller in control system with the decoupling. The response results are obtained as Fig.10

The results in Fig.10, Response of Control system with decoupling, it is shown that the decoupling controllers can minimize the overshoot influences from interacting between two processes. The prefilters $F_1(s), F_2(s)$ are able to minimize overshoot of response from step input and interacting influence.

The transient response of the 2-DOF PI controller with Decoupling has the percent overshoot not more than 5 percent and the setting time is not more than 40 sec. that is under the condition of control system design.

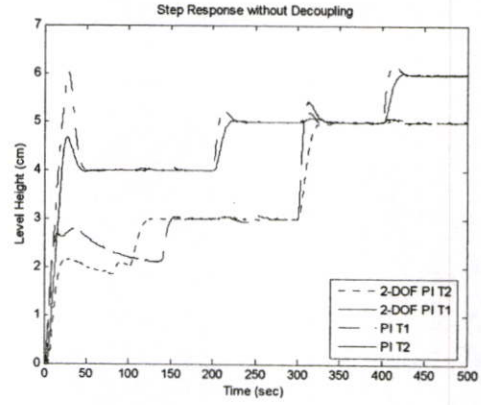


Fig.8 Step Response of PI and 2-DOF PI Controller without Decoupling

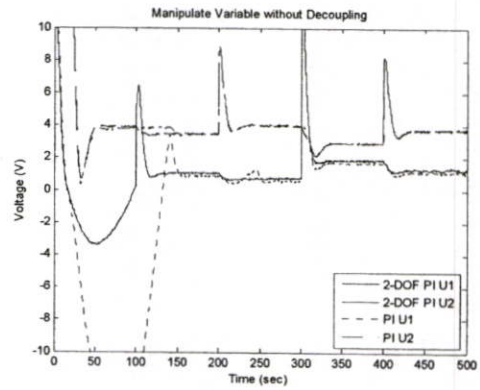


Fig.9 MV of PI and 2-DOF PI Controller without Decoupling

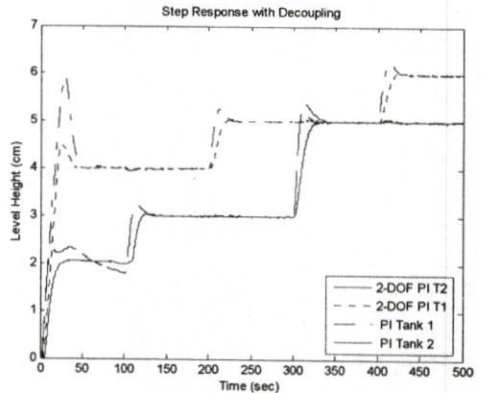


Fig.10 Step Response of PI and 2-DOF PI Controller with Decoupling

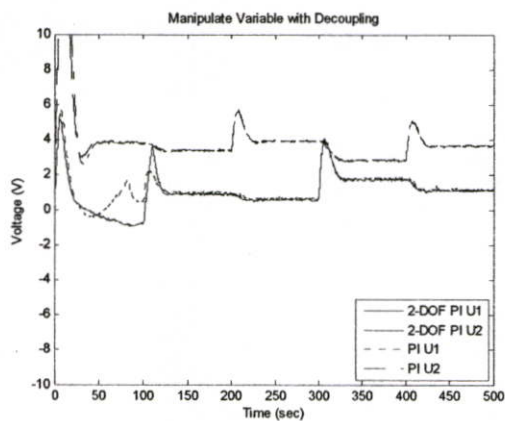


Fig.11 MV of PI and 2-DOF PI Controller with Decoupling

To compare the results from Fig.8 and Fig.10 it is able to explain that the control systems without decoupling structure have the influence of interaction between inputs and outputs of tank 1 and tank 2. The transient response of control systems without decoupling is over the condition of control system design at some set-point

The Percent Overshoot (P.O.) and Settling time (t_s) of transient responses are shown as table 4.

Table 4. Transient Response of Control System at 300 s

	t_s (sec)	P.O.
2-DOF PI without Decoupling	38	7
2-DOF PI with Decoupling	35	2
PI without Decoupling	38	20
PI with Decoupling	35	10

6. CONCLUSION

The total in this paper, Design of 2-DOF PI controller with Decoupling for Coupled-Tank Process is presented. The experiment results are able to illustrate that the decoupling can minimize the influences of interacting in TITO process. Therefore the controller design which can be done from SISO plant model becomes easier and more efficient.

REFERENCES

- [1] Astrom K.J., and T. Haggund (1995). "PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. Instrument." Society of America, 2nd edition.
- [2] Q.C. Wang, B. Zou, T.H. Lee and Q. Bi "Auto tuning of multivariable PID controllers from decentralized relay feedback", Automatica, Vol. 33, No.3, pp. 319-330, 1997
- [3] Damir Vrancic, "Tuning of Decoupling Controller by using MIMO Method"
- [4] J.M. Maciejowski, *Multivariable Feedback Design*, Addison-Wesley, 1989

- [5] M. Zhuang, and D.P. Atherton, "PID controller design for a TITO system", IEE Proc.- Control Theory Appl., Vol.141, No.2, pp.111-120, 1994
- [6] C.C. Ko, Ben M. Chen, Jianping Chen; Yuan Zhuang, Key Chen Tan, "Development of a web-based laboratory for control experiments on a coupled tank apparatus". IEEE Transactions on Education, vol. 44, No. 1, February 2001
- [7] S. Majhi, "SISO controller for TITO systems", presented at the Int. Conf. on Energy. Automation and information Tech., 2001
- [8] N.K. Paulsen, B.Kouvaritakis and M.Cannon. "Non-linear constrained predictive control applied to a coupled-tanks apparatus" IEE Proc.- Control Theory Appl., Vol. 148, No. 1, January 2001
- [9] S.E.Hamamci and M.Koksal. "Robust Controller Design for TITO Processes with Coefficient Diagram Method" Proceedings of IEEE Conference on Vol.2, 23-25 June 2003 Page(s):1431 - 1436 vol.2
- [10] Astrom, K.J. and B. Witten mark. "Computer Controlled Systems - Theory and Design" 1990, Prentice-Hall
- [11] Application Examples of the KRi Coupled-Tank Apparatus Model PP-100, Application Note Ref: CT-101. November 1, 1995

ประวัติผู้เขียน

นายไมตรี ธรรมมา เกิดเมื่อวันที่ 29 สิงหาคม พ.ศ.2524 ที่จังหวัดขอนแก่น สำเร็จ การศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) และระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาวิชาช่างอิเล็กทรอนิกส์ ที่วิทยาลัยเทคนิคขอนแก่น ในปีการศึกษา 2542 และ 2544 ตามลำดับ และสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการวัดคุม จาก ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตร มหาลัยบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการวัดคุม จากภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2548