สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบตัวควบคุมพีไอโดยใช้เทคนิคโมเดลอ้างอิงแบบปรับตัวเองได้สำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน

DESIGN OF PI CONTROLLER USING MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL FOR COUPLED-TANK PROCESS

T117919

ศุภฤกษ์ กังวาลรัตน์

SUPAROEK KANGWANRAT

วพ.
ศ718ก
เลขหมู่ 2554
เลขทะเบียน 117919
วัน,เดือน,ปี 22 ส.ค. 2554

b 12348351
i

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2554

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

KMITL 2011-EN-M-060-002

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN OF PI CONTROLLER USING MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL FOR COUPLED-TANK PROCESS

SUPAROEK KANGWANRAT

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2011

KMITL 2011-EN-M-060-002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2011

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบตัวควบคุมพีไอโดยใช้เทคนิคโมเดลอ้างอิงแบบปรับตัวเองได้สำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน

นักศึกษา นายศุภฤกษ์ กังวาลรัตน์

รหัสนักศึกษา 51060806

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม

พ.ศ. 2554

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.อาจินต์ น่วมสำราญ

บทคัดย่อ

กระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลกระทบต่อกัน (Couple-Tank Process) ซึ่งเป็นกระบวนการแบบสองอินพุทสองเอาท์พุท (TITO) นั้นมีความยุ่งยากในการออกแบบตัวควบคุมเนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงทางไดนามิกและมีการรบกวนกันภายในกระบวนการ วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอแบบปรับตัวเองได้โดยใช้เทคนิคโมเดลอ้างอิง Model Reference Adaptive Control (MRAC) ซึ่งวิธีที่นำเสนอนี้สามารถปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมให้เหมาะสมตามการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการและสนองต่อสิ่งรบกวนแบบ เวลาจริง โดยใช้การอ้างอิงกับโมเดลอ้างอิงซึ่งเป็นตัวกำหนดค่าคุณสมบัติทางสมรรถนะที่ต้องการของระบบควบคุม การจำลองและทดลองระบบควบคุมกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลกระทบต่อกันทำด้วยโปรแกรม Simulink

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Design of PI Controller Using Model Reference Adaptive Control for Coupled-Tank Process
Student	Mr. Suparoek Kangwanrat
Student ID.	51060806
Degree	Master of Engineering
Program	Instrumentation Engineering
Year	2011
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Arjin Numsomran

ABSTRACT

The typical coupled-tanks process that is TITO plant has the difficulty in controller design because changing of system dynamics and interacting of process. This paper presents design methodology of auto-adjustable PI controller using Model Reference Adaptive Control (MRAC) technique. The proposed method can adjust the controller parameters in response to changes in plant and disturbance real time by referring to the reference model that specifies properties of the desired control system. The simulation and experiment of coupled-tanks control system was performed by Simulink program.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำ คำปรึกษา และอนุเคราะห์อุปกรณ์เครื่องมือในการทำงานวิจัยจาก รศ.อาจินต์ น่วมสำราญ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ และเป็นผู้ที่ปรับวิธีคิดและทัศนคติเกี่ยวกับงานวิจัยและการดำเนินชีวิตให้กับข้าพเจ้าด้วยดีเสมอมาข้าพเจ้ารู้สึกทราบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่าน และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมทุกคนที่เป็นกำลังใจ

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์และบัณฑิตศึกษา ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ เกี่ยวกับการศึกษาตลอดมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้านทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II
กิตติกรรมประกาศ III
สารบัญ IV
สารบัญตาราง VII
สารบัญรูป VIII
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา 2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา 2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย 3
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน 4
1.6 ขอบเขตการวิจัย 4
1.7 ขั้นตอนการศึกษา 4
บทที่ 2 กระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน 5
2.1 กล่าวนำ 5
2.2 องค์ประกอบของกระบวนการ 5
2.2.1 โครงสร้างของกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกับ 5
2.2.2 การ์ดแปลงสัญญาณ Analog to Digital และ Digital to Analog 7
2.2.3 อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณ (Sensor and Transducer) 10
2.2.4 อุปกรณ์ควบคุมปั๊มน้ำ 11
2.2.5 ปั๊มน้ำ 13
2.3 การหาสมการคุณลักษณะของกระบวนการ 15
2.4 โปรแกรมที่ใช้ในการทดลองวิจัย 19
2.5 บทสรุป 31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย 32
3.1 กล่าวนำ 32
3.2 การควบคุมแบบ พีไอดี 32
3.2.1 การควบคุมแบบป้อนกลับด้วยตัวควบคุมพีไอดี 32
3.2.2 กริยาการควบคุมแบบป้อนกลับ 34
3.3 ทฤษฎีของดีคับปลิ้ง 40
3.3.1 ดีคับปลิ้งในทางอุดมคติ (Ideal Decoupling) 41
3.3.2 ดีคับปลิ้งแบบง่าย (Simplified Decoupling) 41
3.3.3 ตัวอย่างการออกแบบดีคับปลิ้ง 43
3.3.4 ดีคับปลิ้งแบบอินเวอรส์ (Inverse Decoupling) 44
3.4 ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control System) 45
3.5 Model Reference Adaptive Control 46
3.6 บทสรุป 54

บทที่ 4 วิธีการออกแบบตัวควบคุม 55
4.1 กล่าวนำ 55
4.2 การหาสมการคุณลักษณะของกระบวนการ 55
4.3 การออกแบบดีคับปลิ้ง 59
4.4 การออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วย MRAC 60
4.5 บทสรุป 61

บทที่ 5 การจำลองและการทดลอง 62
5.1 กล่าวนำ 62
5.2 การหาสมการคุณลักษณะของกระบวนการ 62
5.3 การทดลองกระบวนการ 70
5.5 สรุปผลการทดลอง 75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 76

6.1 สรุปผลการวิจัย 76

6.2 ปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางการแก้ปัญหา 77

6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา 77

บรรณานุกรม 78

ภาคผนวก 79

ภาคผนวก ก. 80

ภาคผนวก ข. 84

ประวัติผู้เขียน 91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของปั๊มน้ำ	14
4.1 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาค่าสมการคุณลักษณะของกระบวนการ	58
5.1 แสดงสมรรถณะของระบบเมื่อทำการเปลี่ยนระดับน้ำ จาก 2 cm ไป 3 cm	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 กระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลกระทบต่อกัน 6
2.2 การ์ดแปลงสัญญาณ A/D และ D/A รุ่น PCI-1711 7
2.3 รายละเอียดสัญญาณของจุดเชื่อมต่อการ์ด 10
2.4 ลักษณะของอุปกรณ์วัดความดันแตกต่าง 10
2.5 ลักษณะการต่อใช้งานของอุปกรณ์วัดความดันแตกต่างกับถังน้ำ 11
2.6 ลักษณะของวงจรขับกระแส 13
2.7 ลักษณะของปั๊มน้ำ 14
2.8 ลักษณะของโปรแกรม Simulink 21
2.9 แสดงตัวอย่างการเชื่อมต่อกันของบล็อค 22
2.10 แสดงบล็อคต่างๆ ของแหล่งกำเนิดสัญญาณ (Sources) และแหล่งสัญญาณ (Sinks) 23
2.11 แสดงบล็อคต่างๆ ภายในกลุ่มบล็อคของระบบต่อเนื่อง (Continuous System) และระบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete System) 23
2.12 แสดงบล็อคต่างๆ ภายในกลุ่มบล็อคการดำเนินการทางคณิตศาสตร์ (Math Operations) 24
2.13 แสดงกลุ่มบล็อค Discontinuities และกลุ่ม Signal Routing 25
2.14 แสดงหน้าต่างที่ใช้ในการกำหนดค่าคงที่ในการจำลองปัญหา (Configuration Parameters) 26
2.15 หน้าต่างสำหรับสร้างแบบจำลอง 27
2.16 การเลือกบล็อกที่ต้องการจาก Simulink Library Browser 28
2.17 บล็อกของระบบตัวอย่าง 28
2.18 การเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างบล็อค 29
2.19 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของบล็อค 29
2.20 ไดอะล็อกใส่ค่าพารามิเตอร์ของบล็อก Transfer Fcn 30
2.21 แบบจำลองระบบทางกลในรูปแบบของ Transfer Function 31
3.1 แสดงโครงสร้างของระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยทั่วไป 33
3.2 แสดงกริยาการควบคุมแบบ ON-OFF 34
3.3 แสดงคุณสมบัติของกริยาการควบคุมแบบ Proportional 36
3.4 แสดงผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ Integral 37
3.5 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ Derivative 37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.6	แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ PI	38
3.7	แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ PD	39
3.8	แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ PI	39
3.9	แสดงโครงสร้างของกระบวนการเมื่อต่อร่วมกับตัวควบคุม	40
3.10	โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำแบบ 4 ถัง ที่ประกอบด้วยชุดอินเวอร์สดีคับปลิ้ง	44
3.11	Adaptive Algorithm	46
3.12	โครงสร้างทั่วไปของ MRAC	47
3.13	โครงสร้างทั่วไปของ MRAC	48
3.14	บล็อกไดอะแกรม MRAC	49
3.15	โครงสร้างของระบบควบคุม	52
3.16	โครงสร้างของระบบควบคุมสำหรับ Couple-Tank Process	53
4.1	รูปประกอบการพิจารณาเพื่อหาค่า β_1, β_x	56
4.2	รูปประกอบการพิจารณาหาค่า β_2, β_x	57
5.1	แสดงโปรแกรมในการจำลองกระบวนการ	63
5.2	ผลตอบสนองทางเอาท์พุท y_p เทียบกับ y_m ของถังน้ำใบที่ 1	64
5.3	สัญญาณควบคุมกระบวนการของถังน้ำใบที่ 1	64
5.4	สัญญาณตัวควบคุม K_p สำหรับควบคุมถังน้ำใบที่ 1	65
5.5	สัญญาณตัวควบคุม K_i สำหรับควบคุมถังน้ำใบที่ 1	66
5.6	ผลตอบสนองทางเอาท์พุท y_p เทียบกับ y_m ของถังน้ำใบที่ 2	66
5.7	สัญญาณควบคุมกระบวนการของถังน้ำใบที่ 2	67
5.8	สัญญาณตัวควบคุม K_p สำหรับควบคุมถังน้ำใบที่ 2	68
5.9	สัญญาณตัวควบคุม K_i สำหรับควบคุมถังน้ำใบที่ 2	69
5.10	ผลตอบสนองทางด้านเอาท์พุทของกระบวนการ	69
5.11	แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองด้านเอาท์พุทระหว่างกระบวนการ กับแบบจำลองของ Tank 1	70
5.12	แสดงสัญญาณควบคุมกระบวนการของ Tank 1	71
5.13	สัญญาณตัวควบคุม K_p สำหรับควบคุมถังน้ำใบที่ 1	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.14 สัญญาณตัวควบคุม K_i สำหรับควบคุมถังน้ำใบที่ 1 72

5.15 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองด้านเอาท์พุทระหว่างกระบวนการ
กับแบบจำลองของ Tank 2 72

5.16 แสดงสัญญาณควบคุมกระบวนการของ Tank 2 73

5.17 สัญญาณตัวควบคุม K_p สำหรับควบคุมถังน้ำใบที่ 2 73

5.18 สัญญาณตัวควบคุม K_i สำหรับควบคุมถังน้ำใบที่ 2 74

5.19 แสดงผลตอบสนองด้านเอาท์พุทของกระบวนการ 74

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีกระบวนการทางอุตสาหกรรมเกิดขึ้นมากมาย วิศวกรจึงมีหน้าที่ออกแบบตัวควบคุมให้เหมาะสมกับกระบวนการนั้นๆ และสามารถทำงานได้ตามเป้าหมายที่ต้องการ โดยในโรงงานอุตสาหกรรมกว่าร้อยละ 90 นิยมใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งมีวิธีการออกแบบหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยทฤษฎีต่างๆ ตามความเหมาะสม เช่น ทฤษฎีของ Ziegler-Nichole, ทฤษฎีทางเดินของราก (Root Locus) เป็นต้น ซึ่งวิธีการดังกล่าวก็เหมาะกับกระบวนการบางกระบวนการเท่านั้น การปรับพารามิเตอร์ตัวควบคุมบางครั้งก็อาศัยความชำนาญของผู้ดูแลระบบ

กระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกันเป็นกระบวนการที่มีสองอินพุตสองเอาท์พุท ซึ่งกระบวนการนี้มีความยากในการออกแบบตัวควบคุมเนื่องจากมีวาล์ว (R_x) เชื่อมต่อทั้งสองถังเข้าด้วยกันทำให้ระดับน้ำทั้งสองถังมีผลต่อกัน โดยที่ค่าของผลกระทบที่มีผลต่อกันของระดับน้ำของทั้งสองถังขึ้นอยู่กับ อัตราการไหลเข้า (Q_i), ระดับน้ำในถังที่ 1 และ 2 (h_1, h_2) และค่าสัมประสิทธิ์การเปิดวาล์ว (R_x)

Decoupling เป็นวิธีการที่จะนำมาช่วยในการออกแบบตัวควบคุมเพื่อลดผลการกระทบของระดับน้ำทั้งสองถังสำหรับกระบวนการนี้ เนื่องจากกระบวนการนี้เป็นกระบวนการแบบสองอินพุตสองเอาท์พุทและมีผลต่อกัน โดยปกติแล้วถ้าเป็นกระบวนการแบบสองอินพุตสองเอาท์พุทที่ไม่มีผลต่อกันซึ่งสามารถแยกออกแบบตัวควบคุมแต่ละตัวได้เลย แต่เมื่อกระบวนการมีผลต่อกัน ทำให้ไม่สามารถที่จะแยกกระบวนการออกจากกันเพื่อออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการดังกล่าวได้ จึงจำเป็นที่จะต้องแยกกระบวนการออกจากกันเพื่อออกแบบตัวควบคุม วิธีการที่นำเสนอในบทความนี้คือวิธี Decoupling จะช่วยให้สามารถแยกกระบวนการออกเป็นสองส่วนโดยที่ยังคงคุณสมบัติของกระบวนการดังกล่าวไว้เช่นเดิม แล้วจึงทำการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบแต่ละส่วน (ซึ่งเป็นกระบวนการแบบ SISO) สำหรับควบคุมระดับน้ำในแต่ละถังให้ได้ค่าเป้าหมายตามที่ต้องการโดยมีผลต่อกันน้อยที่สุดหรือไม่มีเลย ดีคับปลิ้งยังช่วยลดความซับซ้อนในการออกแบบตัวควบคุมอีกด้วย

Model Reference Adaptive Control เป็นทฤษฎีที่แนวใหม่ที่สามารถปรับตัวเองให้สามารถควบคุมกระบวนการได้ แม้ว่าการปรับตัวเองของตัวควบคุมจะแก้ไขผลตอบสนองของระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นให้ดีขึ้น สัญญาณถูกปรับปรุงให้เหมาะสมกับกระบวนการที่มีความเร็ว แต่สัญญาณที่เกิดขึ้นจะมีความถี่ในการแกว่งที่สูง ดังนั้นการปรับปรุงสัญญาณให้กับระบบแบบอะนาล็อกจึงมีความเป็นไปได้มากกว่าระบบที่เป็นดิจิตอลในพารามิเตอร์ของโมเดลอ้างอิง ซึ่งปัญหานี้จะหมดไปเนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเดลอ้างอิงจะมีการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมมากกว่า ซึ่งแนวคิดพื้นฐานของโมเดลอ้างอิง คือ การประมาณกระบวนการ (Plant) ให้มีค่าเท่ากับโมเดลอ้างอิง ตัวควบคุมจะทำหน้าที่ลดค่าผิดพลาดระหว่างกระบวนการจริงกับโมเดลอ้างอิงให้เป็นศูนย์ เมื่อค่าผิดพลาดเป็นศูนย์นั่นหมายความว่าค่าโมเดลอ้างอิงกับกระบวนการมีค่าเท่ากัน ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้ออกแบบสำหรับโมเดลอ้างอิงก็จะสามารถควบคุมกระบวนการจริงได้เช่นกัน ค่าของพารามิเตอร์ตัวควบคุมจะถูกปรับไปตามโมเดลอ้างอิง ซึ่งจะให้ผลการควบคุมได้ดีกว่าวิธีอื่นๆ เนื่องจากว่าการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีอื่น เช่น วิธีทางเดินของราก หรือ Ziegler-Nichole นั้น จะออกแบบหาค่าพารามิเตอร์เพียงครั้งเดียวและนำไปควบคุมกระบวนการตลอดช่วงเวลาการทำงาน ซึ่งระหว่างการทำงานพารามิเตอร์ของกระบวนการอาจมีการเปลี่ยนแปลงแต่วิธีการของทางเดินของราก หรือ Ziegler-Nichole ยังใช้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมค่าเดิม แต่วิธี MRAC จะทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมใหม่ให้เหมาะสมกับกับกระบวนการ ณ. ขณะนั้นแบบ Real Time

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาถึงโครงสร้างและคุณลักษณะของกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลกระทบต่อกัน
2. เพื่อศึกษาถึงวิธีการออกแบบชุดดีคับปลิ้งสำหรับไปออกแบบระบบควบคุมแบบกระจายส่วนสำหรับกระบวนการแบบกับ TITO
3. ศึกษาวิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบ MRAC ให้เหมาะสมกับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลกระทบต่อกัน โดยใช้วิธีของ MIT

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

กระบวนการใดๆ ในอุตสาหกรรมล้วนแล้วแต่สามารถเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการได้ตลอดเวลาอันเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆ เช่น สิ่งรบกวนภายนอก ความร้อน ความสั่นสะเทือน เป็นต้น เหล่านี้ล้วนแต่มีผลทำให้ค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการเปลี่ยนไป เพราะฉนั้นค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจึงจำเป็นที่จะต้องปรับค่าให้เหมาะสมกับค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการที่เปลี่ยนแปลงด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้จึงมีสมมุติฐานว่าถ้าสามารถออกแบบตัวควบคุมให้สามารถปรับตัวเองได้ตามการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการได้ จะเป็นผลดีกับระบบควบคุมอย่างมากเนื่องจากจะทำให้สามารถควบคุมค่าเป็นหมายให้เป็นไปตามที่เราต้องการมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำเสนอทฤษฎีของ Model Reference Adaptive Control :MRAC ซึ่งเป็นระบบที่ประกอบด้วยการป้อนกลับปฐมภูมิ (primary feedback) ซึ่งคอยดูการเปลี่ยนแปลงสัญญาณของกระบวนการ และ การป้อนกลับทุติยภูมิ (secondary feedback) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของส่วนควบคุมจากนิยามนี้การป้อนกลับปฐมภูมิเป็นเช่นดั่งการควบคุมที่ไม่สามารถปรับตัวได้โดยทั่วไป ในขณะที่การป้อนกลับทุติยภูมิจะทำให้เกิดสภาพที่สามารถปรับตัวได้ การควบคุมที่ปรับตัวได้ดังที่ได้นิยามข้างต้นต่างจากเทคนิค gain scheduling ตรงที่ gain scheduling ไม่ได้ใช้การป้อนกลับทุติยภูมิเป็นกลไกในการปรับพารามิเตอร์ แต่ใช้กลไกของการวัดสภาพแวดล้อมภายนอก ดังนั้น เทคนิค gain scheduling อาจไม่นับว่าเป็นการควบคุมที่ปรับตัวได้ จุดประสงค์ของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ในการป้อนกลับทุติยภูมิคือต้องการรักษาสมรรถภาพ (performance) ให้สูงแม้ว่าพารามิเตอร์ของกระบวนการอาจไม่ทราบค่าหรือมีค่าที่เปลี่ยนแปลง

การควบคุมแบบปรับตัวเองตามโมเดลอ้างอิง หรือ Model Reference Adaptive Control: MRAC ถูกคิดขึ้นโดย Whitaker เมื่อปี ค.ศ. 1958 โดยการสร้างลูปการควบคุมเพิ่มขึ้นมาเพื่อปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ทำให้ผลตอบสนองของระบบเปลี่ยนตามโมเดลอ้างอิง

สิ่งสำคัญในการออกแบบ MRAC คือ กฎการปรับตัวและการพิสูจน์กฎการปรับตัวซึ่งในที่นี้จะใช้วิธีของ MIT โดยสมมุติว่ากระบวนการเป็นเชิงเส้นที่มีพารามิเตอร์ไม่ทราบค่าหรือแปรค่าตามเวลาและกระบวนการมีหนึ่งอินพุต หนึ่งเอาท์พุท และการควบคุมเป็นสเตทป้อนกลับและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่จะปรับคือเกณฑ์ป้อนกลับ (feedback gain)

สำหรับงานวิจัยนี้จะออกแบบ MRAC ด้วยกฎของ MIT (MIT Rule) ซึ่งเริ่มจากการการคำนวณหาความแตกต่างของสัญญาณเอาท์พุทของกระบวนการจริงกับโมเดลอ้างอิง

$$e = y_p - y_m \tag{1.1}$$

การปรับพารามิเตอร์ตัวควบคุมเพื่อลดความแตกต่างของสัญญาณเอาท์พุทของกระบวนการจริงกับโมเดลอ้างอิงด้วย Adjustment mechanism เป็นกฎของ MIT ซึ่งมีสมการพื้นฐานคือ

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma\varepsilon\frac{\partial\varepsilon}{\partial\theta} \tag{1.2}$$

เมื่อ θ คือพารามิเตอร์ของตัวควบคุม $\partial\varepsilon/\partial\theta$ ความไวของค่าผิดพลาดเมื่อเทียบกับ θ และ γ ค่าเกณฑ์ในการปรับความเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

ในการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลกระทบต่อกัน (Couple-Tank) นั้นได้มีนักวิจัยหลายท่านที่ให้ความสนใจศึกษาและออกแบบตัวควบคุมเพื่อควบคุมกระบวนการดังกล่าว ซึ่งการวิจัยนี้จะนำไปเปรียบเทียบกับ งานวิจัยเรื่อง Design of 2-DOF PI Controller with Decoupling for Coupled-Tank Process ของ Arjin Numsomran Tianchai Suksri และ Maitree Thumma ซึ่งตีพิมพ์ใน International Conference on Control, Automation and Systems 2007, Oct. 17-20, 2007 in COEX, Seoul, Korea ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวได้ใช้ทฤษฎีของดีคับปลิ้งและเทคนิคการออกแบบตัวควบคุมด้วยทฤษฎีทางเดินของราก

1.6 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยเทคนิคของ Model Reference Adaptive และวิธีการคำนวณหาโมเดลอ้างอิงด้วยกฎของ MIT สำหรับควบคุมกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลกระทบต่อกัน และจะใช้ทฤษฎีของ Decoupling มาช่วยในการออกแบบตัวควบคุมเพื่อที่จะลดผลกระทบต่อกันของระดับน้ำทั้งสองถัง และเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างวิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยเทคนิค MRAC กับวิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยเทคนิคทางเดินของราก

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 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย กล่าวถึงทฤษีทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ไม่ว่าจะเป็นทฤษฎีของดีคับปิ้ง ทฤษฎีตัวควบคุมแบบพีไอดี และทฤษฎีของโมเดลอ้างอิง

บทที่ 4 วิธีการออกแบบตัวควบคุม กล่าวถึงขั้นตอนและวิธีการออกแบบดีคับปลิ้งและการออกแบบโมเดลอ้างอิง

บทที่ 5 การจำลองและการทดลอง กล่าวถึงขั้นตอนจำลองกระบวนการและวิธีการทดลองทั้งหมดและนำเสนอผลการทดลองที่ได้ทั้งหมด

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ สรุปปัญหาที่พบในงานวิจัยพร้อมทั้งเสนอแนะแนวทางแก้ปัญหาและแนวทางการพัฒนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
กระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน

2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้กล่าวถึงองค์ประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกันไม่ว่าจะเป็นตัวกระบวนการระดับน้ำสองถัง การ์ดแปลงสัญญาณ Analog to Digital และ Digital to Analog ที่ใช้ติดต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับกระบวนการ อุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำ อุปกรณ์แปลงสัญญาณ และชุดควบคุมปั๊ม นอกจากนี้แล้วยังจะได้กล่าวถึงวิธีการหาสมการคุณลักษณะของกระบวนการ และโปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะเป็นพื้นฐานในการเรียนรู้เกี่ยวกับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกันรวมถึงการติดตั้งอุปกรณ์อีกด้วย

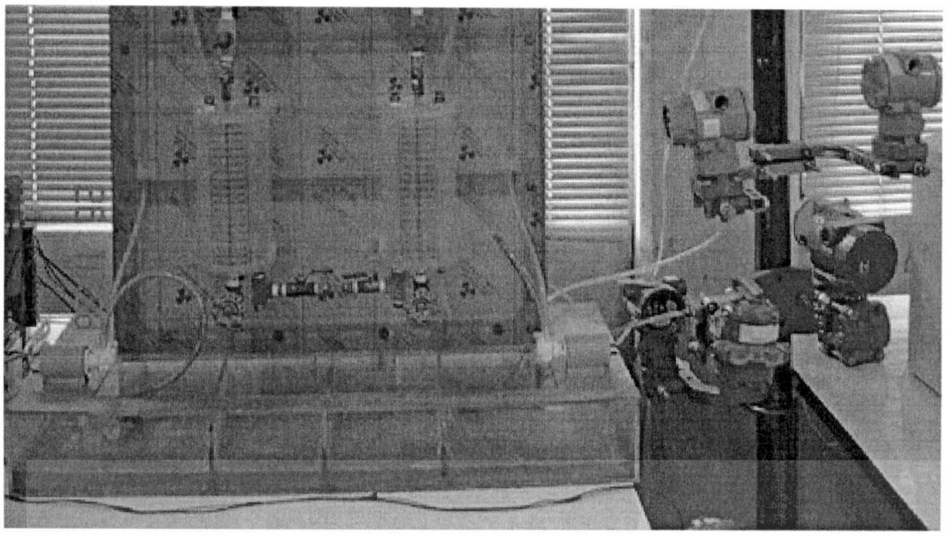
2.2 องค์ประกอบของกระบวนการ

สำหรับโครงสร้างของกระบวนระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกันนั้นไม่ได้หมายความเพียงแค่ถังบรรจุน้ำ อินพุต เอาต์พุต และวาล์วเท่านั้น แต่หมายความถึงส่วนประกอบอื่นๆ ที่นำมาประกอบรวมกันแล้วทำให้กระบวนการทำงานตามที่เราต้องการได้ ซึ่งอุปกรณ์ที่นำมาประกอบกันจนกลายเป็นกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกันประกอบไปด้วย โครงสร้างของกระบวนการระดับน้ำ การ์ดแปลงสัญญาณ Analog to Digital และ Digital to Analog อุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำ อุปกรณ์แปลงสัญญาณ ปั๊มน้ำและชุดควบคุมปั๊ม ซึ่งรายละเอียดขององค์ประกอบแต่ละส่วนจะได้อธิบายดังต่อไปนี้

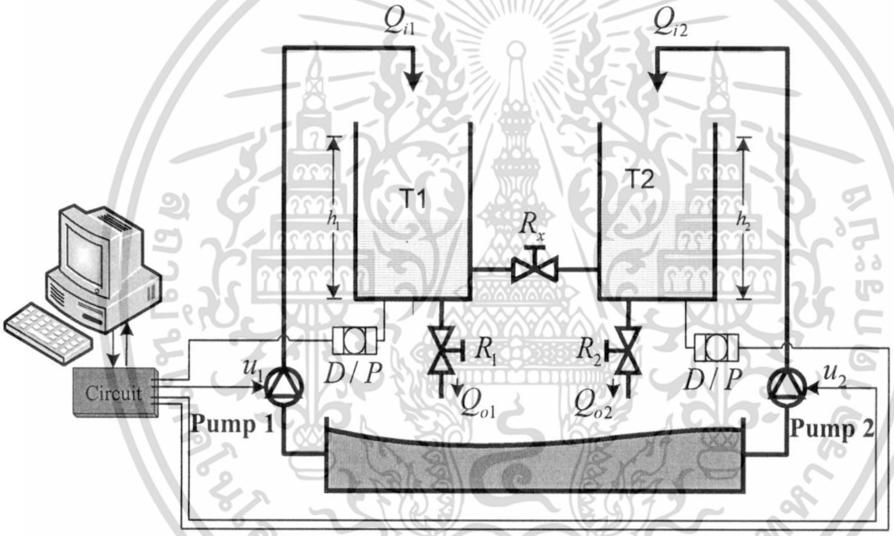
2.2.1 โครงสร้างของกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกับ

พิจารณากระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันในรูปที่ 2.1 ถ้ามองเฉพาะในส่วนของถังน้ำซึ่งจะประกอบไปด้วยถังน้ำสองใบติดตั้งในลักษณะวางคู่กัน โดยที่ถังน้ำทั้งสองมีขนาดเท่ากันในเชิงปริมาตร คือมีขนาดความจุ 66.25 ลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^3) ถังน้ำแต่ละใบจะมีอินพุตและเอาต์พุตของแต่ละถังซึ่งขนาดของท่อสำหรับน้ำไหลเข้าและไหลออกของถังทั้งสองใบมีขนาดเท่ากันคือ 0.1963 (cm^2) และส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดของกระบวนการก็คือท่อน้ำที่ต่อในลักษณะคับเปิ้ลกันระหว่างถังน้ำทั้งสองซึ่งจะมีวาล์วกั้นตรงกลางซึ่งการกวนกันของระดับน้ำของทั้งสองถังจะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่ปัจจัย 2 ประการคือ ความแตกต่างกันระหว่างระดับน้ำของถั้งสองถังยิ่งแตกต่างกันมากผลของการกวนกันก็จะมากตามไปด้วย และอีกหนึ่งปัจจัยก็คือค่าสัมประสิทธิ์การเปิดปิดวาล์ว คือถ้าวาล์วเปิดสูงสุด (ค่าสัมประสิทธิ์ในการเปิดมีค่าเท่ากับ 1) การกวนกันของระดับน้ำก็จะมาก แต่ถ้าวาล์วปิดสุด (ค่าสัมประสิทธิ์ในการเปิดมีค่าเท่ากับ 0) การกวนกันของระดับน้ำก็จะไม่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) กระบวนการจริง



(ข) ไดอะแกรมของกระบวนการ

รูปที่ 2.1 กระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน

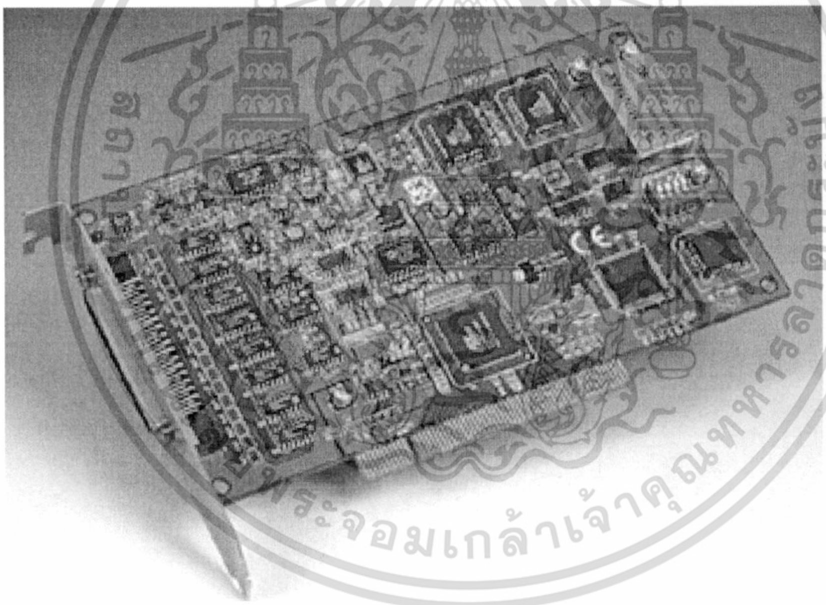
จากรูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน (Coupled-Tank Process) ซึ่งเป็นกระบวนการแบบสองอินพุตสองเอาพุท (TITO) โดยที่อัตราการไหลเข้าของน้ำถังที่ 1 และถังที่ 2 คือ Q_{i1} และ Q_{i2} ตามลำดับ ระดับความสูงของน้ำถังที่ 1 คือ H_1 และถังที่ 2 คือ H_2 อัตราการไหลออกของน้ำถังที่ 1 และถังที่ 2 คือ Q_{o1} และ Q_{o2} อัตราการไหลเข้าของน้ำทั้งสองถังขึ้นอยู่กับอินพุต (แรงดันไฟฟ้า) ที่ป้อนให้กับปั๊มน้ำทั้งสองตัว ส่วนอัตราการไหลออกขึ้นอยู่กับวาล์ว R_1 และวาล์ว R_2 และผลกระทบที่มีต่อกันของระดับน้ำทั้งสองถังขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การเปิดวาล์ว R_x ด้วยถ้าค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์ในการเปิดวาล์ว R_x มีค่าเป็น 0 (ปิดวาล์ว) เราจะได้กระบวนการแบบ SISO สองกระบวนการซึ่งเราสามารถออกแบบตัวควบคุมได้ง่าย ซึ่งเราจะนำเหตุผลดังกล่าวมาช่วยออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการนี้ แต่การที่จะแยกจุดเชื่อมต่อออกจากกันก็ต้องมีการชดเชยกระบวนการด้วยเพื่อที่จะทำให้การออกแบบตัวควบคุมถูกต้อง

2.2.2 การ์ดแปลงสัญญาณ Analog to Digital และ Digital to Analog

เป็นที่รู้กันดีว่าในการติดต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์อาร์ดแวร์ภายนอกจำเป็นจะต้องมีอุปกรณ์ในการแปลงสัญญาณดิจิตอลไปเป็นสัญญาณอะนาล็อก (Digital to Analog: D/A) และแปลงจากสัญญาณอะนาล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิตอล (Analog to Digital: A/D) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้การ์ดของบริษัท Advantech รุ่น PCI-1711 ซึ่งเป็นการ์ดที่สามารถต่อกับสล็อต PCI ของเครื่องค้อมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะได้ สาเหตุที่ใช้การรุ่นนี้เนื่องจากราคาไม่สูงมากนัก ติดตั้งและกำหนดค่าง่ายและที่สำคัญคือสามารถทำงานร่วมกับโปรแกรม MatLab คุณสมบัติเด่นๆ ของการ์ดรุ่นนี้อธิบายได้ดังนี้



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของการ์ดแปลงสัญญาณ PCI-1711

Analog Input

Channels:	16 Single-Ended
Resolution:	12-bit
On-board FIFO :	1K Samples
Conversion Time:	$10\mu s$
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 $V/\mu s$
Drift:	40 ppm/°C
Output Impedance:	0.81 Ohms

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Settling Time:	26 μs (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 ($-10 \le x \le 10$)
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)

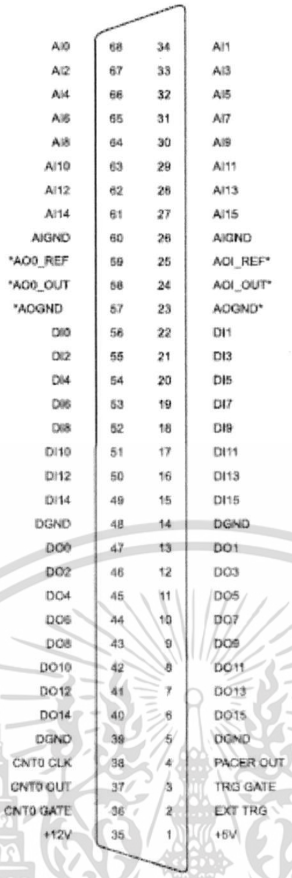
Programmable Timer/Counter

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

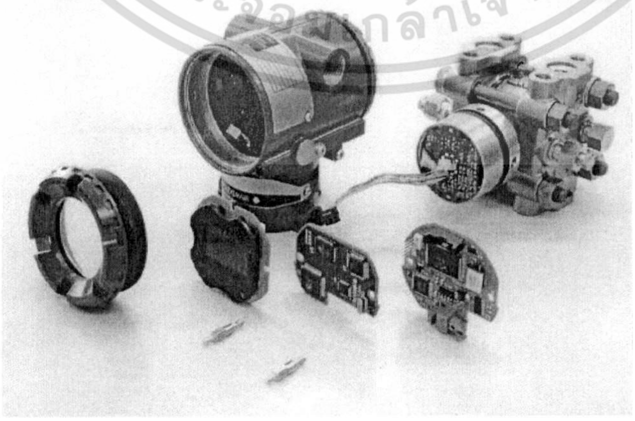
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 รายละเอียดสัญญาณของแต่ละขา

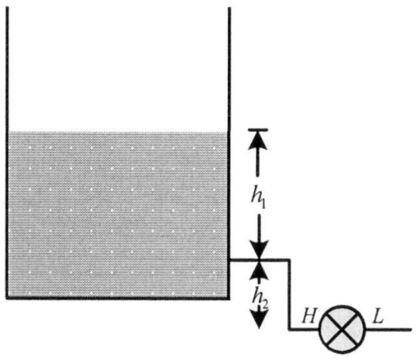
2.2.3 อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณ (Sensor and Transducer)

การวัดระดับโดยวิธีวัดความดันแตกต่าง เป็นวิธีที่เลือกใช้ในการวัดระดับของกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน มีหลักการวัดเบื้องต้น ดังนี้



รูปที่ 2.4 ลักษณะของอุปกรณ์วัดความดันแตกต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ลักษณะการต่อใช้งานของอุปกรณ์วัดความดันแตกต่างกับถังน้ำ

โดยทั่วไปแล้วการวัดระดับด้วยวิธีการวัดความดันแตกต่างเป็นวิธีที่แพร่หลายในวงการอุตสาหกรรมวิธีหนึ่ง ซึ่งอุปกรณ์วัดความดันแตกต่าง จะวัดระดับของของเหลวในถังโดยตรวจจับความดันที่สองจุดคือ ที่จุดความดันสูงในระดับก้นถัง และที่จุดความดันต่ำในระดับสูงสุดของถัง ความดันแตกต่างที่อุปกรณ์วัดความดันแตกต่างตรวจจับได้จะสัมพันธ์กับระดับความสูงของระดับของน้ำในถัง

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

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

$$P_{high} = P_{head} + P_{atm} + P_{line} \tag{2.1}$$

$$P_{low} = P_{atm} + P_{line} \tag{2.2}$$

โดยกำหนดให้

P_{high} คือ ความดันที่ด้านความดันสูงของตัวอุปกรณ์วัดความดันแตกต่าง

P_{low} คือ ความดันที่ด้านความดันต่ำของตัวอุปกรณ์วัดความดันแตกต่าง

P_{head} คือ Hydrostatic Pressure หรือ Pressure Head ที่เกิดจากน้ำหนักของของเหลวในช่วงการวัด

P_{atm} คือ ความดันบรรยากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P_{line} คือ ความดันที่เกิดจากของเหลวในสายยางจากก้นถังไปยังด้านความดันสูงของตัวอุปกรณ์วัดความดันแตกต่าง

ความสัมพันธ์ของ Hydrostatic Pressure หรือ Pressure Head กับความสูงของของเหลวในถังแสดงได้ดังสมการ 2.2

$$Hydrostatic\ Pressure = P_{head} = h \times SG_m \tag{2.3}$$

โดยกำหนดให้

P_{head} คือ ค่าความดัน Head ที่เกิดจากน้ำหนักของของเหลวในช่วงการวัด มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรน้ำ

h คือ ค่าความสูงของของของเหลว มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

SG_m คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของสาร (ไม่มีหน่วย)

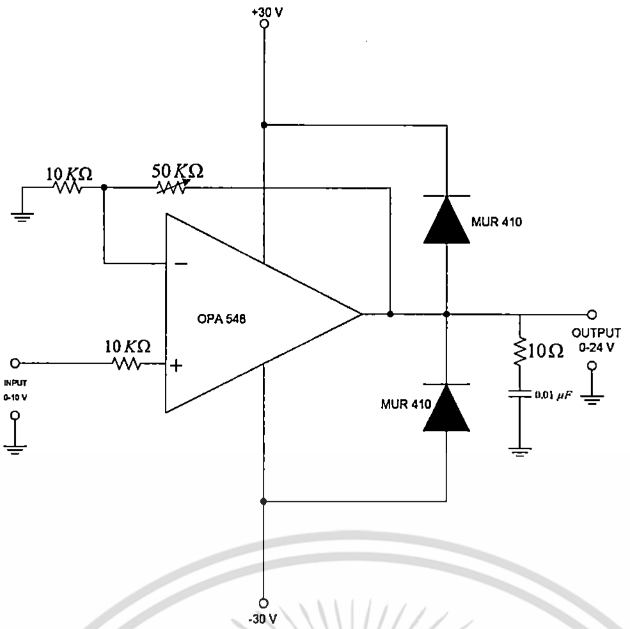
พิจารณาสมการที่ 2.3 ค่าความถ่วงจำเพาะของสารเป็นค่าคงที่ซึ่งเป็นคุณสมบัติประจำตัวของสาร เช่น น้ำ มีค่าความถ่วงจำเพาะ เป็น 1 ดังนั้น ความดันที่เกิดขึ้นจึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสูงของของเหลวนั้น ดังสมการที่ 2.3

$$h = \frac{P}{SG_m} \tag{2.4}$$

2.2.4 อุปกรณ์ควบคุมปั๊มน้ำ

วงจรขับกระแสเป็นวงจรที่ถูกนำมาใช้ในการควบคุมการทำงานของปั๊มน้ำในงานวิจัยชิ้นนี้ เพื่อให้ปั๊มน้ำสามารถจ่ายน้ำตามสัญญาณควบคุมที่ได้รับมาจากตัวควบคุม ซึ่งวงจรขับกระแสแสดงได้ดังรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



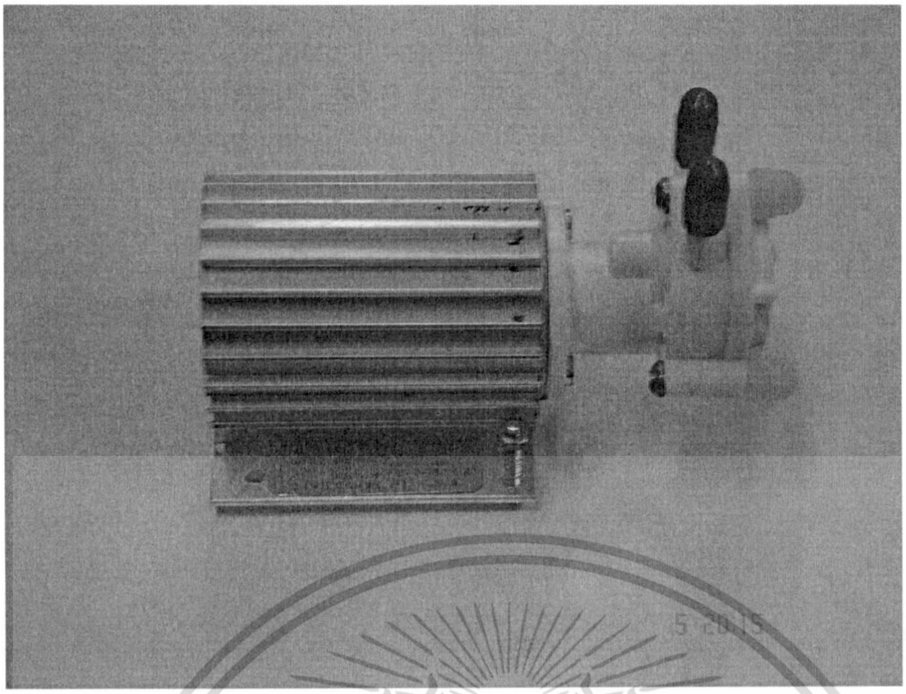
รูปที่ 2.6 ลักษณะของวงจรขับกระแส

จากรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าวงจรขับกระแสจะใช้ Op-Amp เพียงอย่างเดียวเท่านั้น โดย Op-Amp ที่ใช้เป็นเบอร์ OPA-548 ของบริษัท Burr-Brown ซึ่งเป็น Power Op-Amp ที่สามารถจ่ายกระแสได้สูงสุดถึง 10 A และสามารถทำงานภายในช่วงแรงดัน $+60V$ หรือ $\pm30V$ ลักษณะของวงจรขับกระแสเป็นวงจรแบบเชิงเส้น โดยรับอินพุตขนาด 0-10 V จากการ์ด D/A และขยายสัญญาณแรงดันเอาต์พุตให้มีขนาด 0-24 V เพื่อจ่ายให้กับปั๊มน้ำ วงจรขับกระแสที่ใช้ในวงจรนี้มี 2 ชุด เนื่องจากปั๊มน้ำที่ใช้มี 2 ตัว

2.2.5 ปั๊มน้ำ

ปั๊มน้ำที่ใช้ในงายวิจัยนี้มี 2 ตัวสำหรับควบคุมระดับน้ำของถังทั้ง 2 ใบ ซึ่งเป็นปั๊มน้ำของบริษัท API Instrument รุ่น P6 10.0006 เป็นปั๊มแบบเกียร์ปั๊ม ลักษณะของปั๊มน้ำแสดงดังรูปที่ 2.7 และข้อมูลคุณสมบัติของปั๊มแสดงดังตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะของปั๊มน้ำ

ตาราง 2.1 คุณสมบัติของปั๊มน้ำ

รายละเอียด	คุณสมบัติ
Max. Flow rate	2200 ml/min (Vdc)
Max. Suction	10 ft. H2O wet, 4" dry
Max. Pressure	20 psig (46 ft. H2O)
Port Size (OD)	4.8 mm (0.18") hose barb
Power Require (Vdc)	24 Vdc (up to 28 W)
Max. Operating Temp	93 oC (200 oF)
Ambient Fluid Temp	0 to 93 oC (32 to 200 oF)
Max. Viscosity	200 cps
Dimensions	88 x 81 x 92 mm (4 x 1.75 x 2.63)
Weight	1.4 kg (3 lb)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การหาสมการคุณลักษณะของกระบวนการ

จากรูปที่ 2.1 เป็นรูปของกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกันซึ่งการจะออกแบบตัวควบคุมสำหรับควบคุมกระบวนการนั้นจำเป็นที่จะต้องหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการให้ได้ก่อนถึงจะนำแบบจำลองที่ได้นั้นไปออกแบบตัวควบคุมโดยทฤษฎีต่างๆ ต่อไป ซึ่งวิธีการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการหาสมการคุณลักษณะของกระบวนการนั้นสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน สำหรับในการวิจัยจะใช้การทฤษฎีกฎทรงมวลของเบอร์นูลี (Bernoulli's Law) ซึ่งสามารถพิจารณาวิธีการหาสมการคุณลักษณะของกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกันจากพฤติกรรมการทำงานของแต่ละส่วน ดังจะอธิบายต่อไปนี้

สมการพื้นฐานที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของระบบถังน้ำได้เป็นอย่างดี คือ สมการสมดุลมวล หรือ Mass Balance

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

โดย V คือ ปริมาตรของน้ำในถัง

h คือ ระดับน้ำในถัง

q_{in} คือ อัตราการไหลเข้า

q_{out} คือ อัตราการไหลออก

และจากกฎของเบอร์นูลี (Bernoulli's Law) บอกว่า

$$p + \frac{1}{2}\rho v_w^2 + \rho g h = const \qquad (2.6)$$

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

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

โดย a_i คือ พื้นที่หน้าตัดของวาล์วด้านออกของถังน้ำ

β_i คือ ค่าความต้านทานการไหลของวาล์วด้านออกของถัง

v_w คือ ความเร็วการเคลื่อนที่ของน้ำ ณ ด้านออกของถังน้ำ

$h_i(t)$ คือ ระดับน้ำในถัง

g คือ ค่าอัตราการเร่งอันเกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และปั๊มน้ำในกระบวนการสามารถจ่ายอัตราการไหลที่ค่าต่างๆ สัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้าอินพุตที่

$$q_{pump,j} = k_p \cdot u_j \tag{2.8}$$

โดย k_p อัตราขยายของปั๊มน้ำ $\left(\frac{m^3}{volt \cdot \sec}\right)$

u_j แรงดันไฟฟ้า (โวลท์)

การวิเคราะห์พฤติกรรมของกระบวนการเพื่อหาความสัมพันธ์ของระดับน้ำ เอาต์พุตของระบบ $h_1(t)$, $h_2(t)$ และแรงดันไฟฟ้าอินพุตของระบบ $u_1(t)$, $u_2(t)$ ในรูปของ Transfer Matrix ของระบบดังต่อไปนี้

ใช้สมการสมดุลมวล กฎของเบอร์นูลี (Bernoulli's Law) พิจารณาหาสมการดิฟเฟอร์เรนเชียลแบบไม่เป็นเชิงเส้นของกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน ดังนี้

พิจารณาจากถังที่ 1

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

พิจารณาจากถังที่ 2

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

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 แรงดันที่จ่ายให้กับปั๊มตัวที่ 1 และ 2; (Volt)

β_1, β_2 คือ ค่าความต้านทานการไหลของวาล์วที่ตำแหน่งทางออกของถังที่ 1 และ 2

β_x คือ ค่าความต้านทานการไหลของวาล์วที่ตำแหน่งเชื่อมต่อระหว่างถังที่ 1 และ 2

g คือ ค่าอัตราการเร่งอันเกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก (cm/s^2)

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

อัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้าถังที่ 1 จะเป็นสัดส่วนกับ k_{p1}, $u_1(t)$ อัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้าถังที่ 2 จะเป็นสัดส่วนกับ k_{p2}, $u_2(t)$ โดยการรบกวนกันของระบบอันเกิดจากความแตกต่างของระดับระหว่างถังทั้งสอง ส่งผลต่อระดับน้ำในถังและการควบคุมระดับน้ำในถัง สัญญาณอินพุตหรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สัญญาณควบคุมที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการคือ $u_1(t), u_2(t)$ (ค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับปั๊มน้ำ) และสัญญาณเอาต์พุทที่วัดจากกระบวนการคือระดับน้ำในถังที่ 1 และถังที่ 2 $h_1(t), h_2(t)$

เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของกระบวนการในรูปของ Transfer Matrix $G_{ij}(s)$ โดยที่อินพุตของกระบวนการแทนด้วยเวกเตอร์ $U=\left[U_1(s) \quad U_2(s)\right]^T$ และเอาต์พุตของกระบวนการแทนด้วยเวกเตอร์ $H=\left[H_1(s) \quad H_2(s)\right]^T$ จากสมการ 2.9 และสมการ 2.10 แสดงกระบวนการในรูปของฟังก์ชัน $\dot{h}=f(h,u)$ โดยฟังก์ชัน f เป็นฟังก์ชันของตัวแปรระดับน้ำ h และค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับปั๊มน้ำ u ซึ่งจะเห็นได้ว่าสมการประกอบไปด้วยพจน์รากกำลังสองของตัวแปร $h_i(t)$ ดังนั้นฟังก์ชัน $f(h,u)$ จึงเป็นฟังก์ชันแบบไม่เป็นเชิงเส้น

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

ในกรณีที่เราต้องการวิเคราะห์สมการของกระบวนการด้วยวิธีทางพีชคณิตแบบเชิงเส้น 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

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

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

จากการกระจายสมการในรูปของอนุกรมเทเลอร์ในสมการที่ 2.7 จะได้ดังสมการของกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันแบบเชิงเส้นดังสมการที่ 2.14 และสมการ 2.15

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
117919

$U_j(t) = u_j(t) - \overline{u_j}$ คือ เป็นตัวแปรแสดงความเบี่ยงเบนของแรงดันไฟฟ้าอินพุตจากค่าที่สภาวะ Steady State

เมื่อกำหนดให้

$$T_1 = \frac{A}{\beta_1 a_1}\sqrt{\frac{2\overline{h_1}}{g}} \quad T_2 = \frac{A}{\beta_2 a_2}\sqrt{\frac{2\overline{h_2}}{g}} \quad T_x = \frac{A}{\beta_x a_x}\sqrt{\frac{2\left|\overline{h_1} - \overline{h_2}\right|}{g}} \tag{2.16}$$

$\overline{h_1}$ และ $\overline{h_2}$ คือระดับน้ำ ณ. จุดทำงานของกระบวนการ, T_1 คือค่าคงตัวเวลาของถังที่ 1, T_2 คือค่าคงตัวเวลาของถังที่ 2, T_x คือค่าคงตัวเวลาระหว่างถังที่ 1 และถังที่ 2

เมื่อทำการแปลงลาปลาซและจัดรูประบบสมการเชิงเส้นของกระบวนการระดับน้ำสี่ถังจะสามารถแสดงกระบวนการในรูปของทรานเฟอร์เมทริกซ์ ดังนี้

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

เมื่อสมาชิกของเมทริกซ์ $G_{ij}(s)$ มีค่าดังต่อไปนี้

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

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$
\begin{bmatrix}
\dfrac{\dfrac{k_1}{A}\left(s+\dfrac{(T_x+T_2)}{T_2T_x}\right)}{s^2+\left(\dfrac{T_1T_x+T_2T_x+2T_1T_2}{T_1T_2T_x}\right)s+\left(\dfrac{1}{T_1T_2}+\dfrac{1}{T_1T_x}+\dfrac{1}{T_2T_x}\right)} & \dfrac{\dfrac{k_2}{A}\cdot\dfrac{1}{T_x}}{s^2+\left(\dfrac{T_1T_x+T_2T_x+2T_1T_2}{T_1T_2T_x}\right)s+\left(\dfrac{1}{T_1T_2}+\dfrac{1}{T_1T_x}+\dfrac{1}{T_2T_x}\right)} \\
\dfrac{\dfrac{k_1}{A}\cdot\dfrac{1}{T_x}}{s^2+\left(\dfrac{T_1T_x+T_2T_x+2T_1T_2}{T_1T_2T_x}\right)s+\left(\dfrac{1}{T_1T_2}+\dfrac{1}{T_1T_x}+\dfrac{1}{T_2T_x}\right)} & \dfrac{\dfrac{k_2}{A}\left(s+\dfrac{(T_x+T_1)}{T_1T_x}\right)}{s^2+\left(\dfrac{T_1T_x+T_2T_x+2T_1T_2}{T_1T_2T_x}\right)s+\left(\dfrac{1}{T_1T_2}+\dfrac{1}{T_1T_x}+\dfrac{1}{T_2T_x}\right)}
\end{bmatrix}
\quad (2.22)
$$

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

สำหรับโปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ โปรแกรม MatLab ซึ่งสามารถใช้ควบคุมได้เป็นกระบวนการได้อย่างดี อีกทั้งยังสามารถทำงานร่วมกับการ์ด A/D และ D/A ของบริษัท Advantech รุ่น PCI-1711 ได้ โปรแกรม Matlab จะถูกใช้ในการจำลองกระบวนการ สำหรับเครื่องมือหรือโปรแกรมย่อยของโปรแกรม MatLab นั้นมีอยู่มาก ผู้วิจัยจึงขออธิบายถึงส่วนประกอบของโปรแกรมที่ใช้เฉพาะในงานวิจัยนี้เท่านั้น ซึ่งรายละเอียดแสดงได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 โปรแกรม Simulink

Simulink เป็นโปรแกรมที่เป็นส่วนที่เพิ่มเติมเข้ามาในโปรแกรม MATLAB ซึ่งเป็นโปรแกรมที่พัฒนาโดยบริษัท Mathworks โดยเป็นโปรแกรมที่มีความสามารถในการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพสูง ในส่วนของ Simulink นั้นเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมเพื่อหาคำตอบของสมการทางคณิตศาสตร์โดยใช้ลักษณะการโปรแกรมในรูปแบบของ Block Diagram เป็นหลัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบสมการเชิงอนุพันธ์ซึ่งมักจะพบปัญหาในการหา Closed Form Solution หรือการหาคำตอบเมื่อเทียบกับเวลาในช่วงเวลาใดๆ และเนื่องจากระบบทางวิศวกรรมโดยส่วนใหญ่จะสามารถอธิบายด้วยระบบสมการเชิงอนุพันธ์ เช่นกันดังนั้น Simulink จะเข้ามามีบทบาทในการทำให้การจำลองการตอบสนองของระบบมีความสะดวกมากยิ่งขึ้น

สำหรับองค์ประกอบของโปรแกรมนั้นไม่ว่าจะเป็นวงจรทางตรรกศาสตร์ไปจนถึง ระบบควบคุมสำหรับระบบพลศาสตร์ที่ซับซ้อนจะสามารถสร้างแบบจำลองได้โดยอาศัยเพียง Building Blocks พื้นฐานที่มีมาให้จาก Simulink Libraries นอกเหนือจากนั้นยังมีเครื่องมือใน ส่วนอื่นๆ ที่ในปัจจุบันได้เพิ่มเติมเข้ามาเพื่อให้การใช้งานมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เช่น Fuzzy Logic Toolbox, Neural Network Toolbox, Digital Signal Processing (DSP) Toolbox หรือ อื่นๆ ซึ่งในปัจจุบันพบว่าเครื่องมือต่างๆ ที่มีให้ สามารถทำให้การจำลองหรือวิเคราะห์การทำงานของ ระบบสามารถทำได้ตั้งแต่ระบบที่มีความง่าย จนถึงระบบที่มีความซับซ้อนอย่างมากโดยไม่ต้อง มีการเขียนโปรแกรมเพิ่มเติมแต่อย่างใด

2.4.2 การจำลองระบบพลศาสตร์ (Dynamic System Simulation) ด้วยโปรแกรม Simulink

ในปัจจุบันคอมพิวเตอร์ได้เข้ามามีส่วนช่วยทำให้การแก้ปัญหาทางวิศวกรรมได้ใช้ประโยชน์จากคณิตศาสตร์อย่างเต็มรูปแบบในการจำลองระบบทางพลศาสตร์ใดๆ โดยไม่ต้องอาศัยการศึกษาหรือทดลองจากระบบทางกายภาพจริงโดยการจำลองการทำงานของระบบพลศาสตร์(Dynamic System Simulation) ดังกล่าวนั้นได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามีประโยชน์อย่างมหาศาลในการทำงานทางวิศวกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานทางด้านการออกแบบระบบ (System Design) และงานการออกแบบระบบควบคุม (Controller System Design) ทั้งนี้เนื่องจากการจำลองปัญหาช่วยประหยัดทั้งงบประมาณและเวลา (Prototype) ของระบบทางกายภาพที่สนใจซึ่งในอดีตจะต้องสูญเสียให้กับการสร้างระบบต้นแบบ

2.4.3 หลักการของสัญญาณและการไหลของตรรก (Signal and Logic Flow)

ในโปรแกรม Simulink นั้นการจำลองปัญหาจะอาศัยการสร้างแผนภูมิ (Simulation Diagram) เพื่อการกำเนิด การรับ หรือส่งผ่านสัญญาณ หรือข้อมูลที่ต้องการทราบ ในแผนภูมิที่ถูกสร้างขึ้นข้อมูลจากบล็อคประเภทต่างๆ จะถูกส่งผ่านไปสู่บล็อคอื่นๆ โดยเส้นสัญญาณที่เชื่อมต่อระหว่าง บล็อคนั้นๆ สัญญาณสามารถที่จะถูกสร้างและส่งไปสู่บล็อคอื่นๆ ทั้งแบบสถิตย์และแบบแปรผันข้อมูลสามารถป้อนให้แก่ฟังก์ชั่นเพื่อการกระทำทางตรรกศาสตร์หรือทางคณิตศาสตร์ ข้อมูลสามารถที่จะถูกส่งไปสู้แหล่งทิ้งข้อมูล (Sink) ซึ่งสามารถที่จะแสดงให้เห็นในลักษณะของ Oscilloscope หรือ Display หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม้กระทั่งเก็บในรูปของไฟล์ (Save to Files) สิ่งที่ต้องพึงระวังในการจำลองปัญหานั้น ข้อมูลต่างๆ จะถูก ดำเนินการ รับและส่ง ในลักษณะเป็นช่วงเวลา (Discrete Times) เท่านั้น ดังนั้น Step Time หรือ Simulation Time Step หรือ Integration Time Step ที่กำหนดเพื่อการจำลองปัญหานั้นจะเป็น ส่วนที่สำคัญอย่างยิ่งโดยการเลือกใช้ Step Time ที่เหมาะสมจะถูกกำหนดโดยระบบย่อยที่มีการ ตอบสนองเร็วที่สุดในแผนภูมิที่กำหนดขึ้น

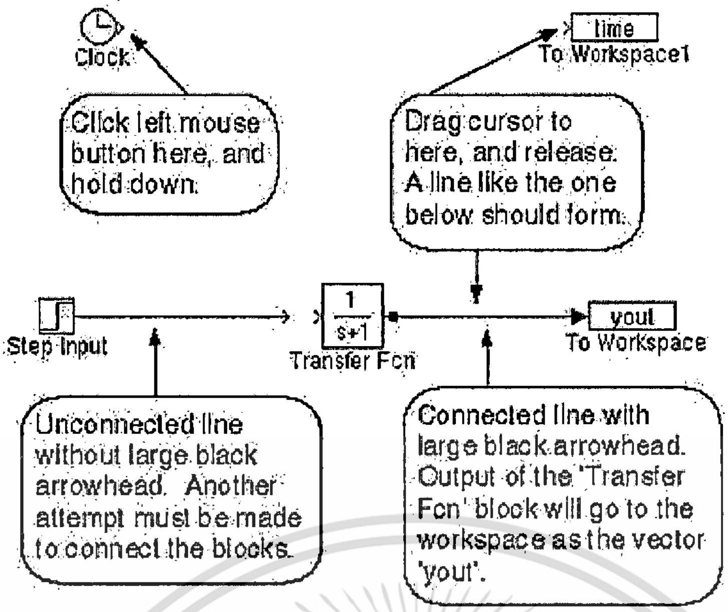
รูปที่ 2.8 .ลักษณะของโปรแกรม Simulink

ลักษณะการเขียนโปรแกรมด้วย Simulink จะเป็นลักษณะการเขียนโปรแกรมโดยใช้บล็อคไดอะแกรมของฟังก์ชั่นต่างๆ ซึ่งสิ่งสำคัญที่ควรระวังสำหรับการเขียนโปรแกรมในลักษณะนี้คือการกำหนดคุณสมบัติให้กับแต่ละบล็อคนั้นจะต้องถูกต้องไม่เช่นนั้นจะไม่สามารถรันโปรแกรมได้

2.4.4 การเชื่อมต่อบล็อค

ในการเชื่อมต่อบล็อคบน Simulation Diagram นั้น ให้กดเมาส์ปุ่มซ้ายที่ Output ของ บล็อคหนึ่งแล้วค้างปุ่มเอาไว้โดยเคอร์เซอร์ของเมาส์จะเปลี่ยนรูปเป็นเครื่องหมายบวก หลังจาก นั้นลาก (Drag) เมาส์ (จะเห็นเส้นประเกิดขึ้นและวิ่งตามเครื่องหมายบวกดังกล่าว) จากบล็อคหนึ่ง ไปสู่ Input ของบล็อคที่ต้องการจะเชื่อมต่อ เมื่อปล่อยเมาส์ปุ่มซ้ายที่ Input ของอีกบล็อคหนึ่งแล้วเส้นประจะเปลี่ยนเป็นเส้นทึบแสดงถึงการเชื่อมต่อกันของบล็อคทั้งสอง รูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างการ เชื่อมต่อกันของบล็อค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



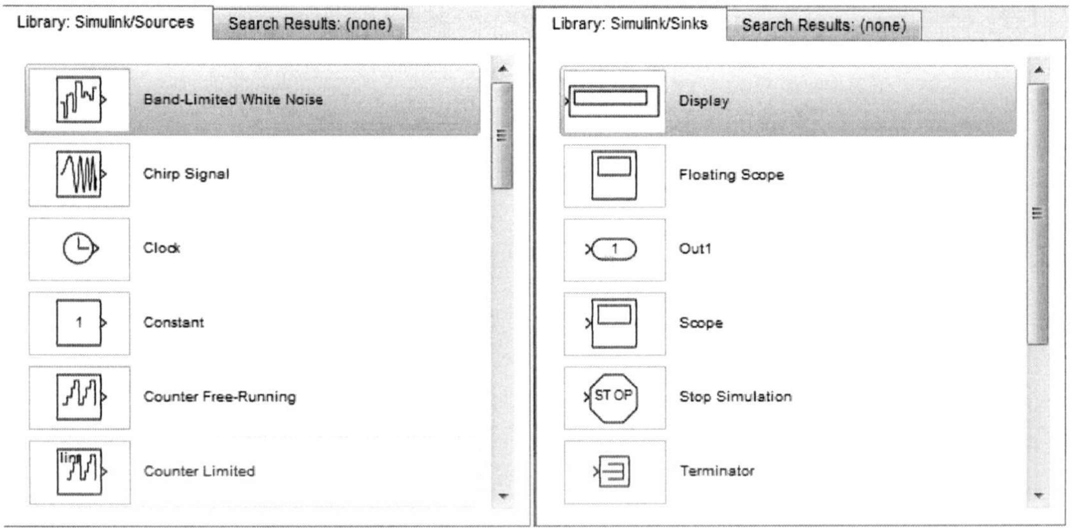
รูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างการเชื่อมต่อกันของบล็อค

2.4.5 กลุ่มของบล็อคที่ใช้งานบ่อยในเบื้องต้น

- **แหล่งกำเนิดสัญญาณ (Sources) และแหล่งทิ้งสัญญาณ (Sinks)**

กลุ่มบล็อคแหล่งกำเนิดสัญญาณ (Sources) ที่กำหนดมาให้ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดข้อมูลหรือสัญญาณ ที่มักใช้บ่อยในการวิเคราะห์ระบบทางพลศาสตร์ เช่น แหล่งกำเนิดค่าคงที่ (Constant) แหล่งกำเนิดสัญญาณคลื่นซายน์ (Sinusoidal Wave) แหล่งกำเนิดสัญญาณแบบ Step หรืออื่นๆ นอกจากนี้ยังมีแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ทำหน้าที่เสมือน Signal Generator รูปที่ใช้ในการทดลองทางวิศวกรรมอื่นๆ หรือแหล่งกำเนิดสัญญาณนาฬิกา (Clock) ที่มักจะใช้บ่อยเพื่อ จับเวลาของการจำลองปัญหา หรืออื่นๆ กลุ่มบล็อคแหล่งทิ้งสัญญาณ (Sinks) เป็นกลุ่มบล็อคที่มักจะใช้ในการเก็บสัญญาณที่ต้องการมากกว่าการทิ้งสัญญาณอย่างที่ชื่อกำหนด โดยทั่วไปแล้วบล็อคที่จะใช้บ่อยคือบล็อคของ Scope ประเภทต่างๆ เพื่อตรวจสอบลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในจุดใดๆ ของระบบที่กำลังถูกจำลองในขณะที่กำลังทำการจำลอง หรือบล็อคที่เก็บสัญญาณ (To Workspace) เพื่อใช้ในการดำเนินการอื่นๆ ที่พื้นที่ทำงานของ MATLAB รูปที่ 2.10 แสดงบล็อคต่างๆ ของทั้งแหล่งกำเนิด และแหล่งสัญญาณของ Simulink V.7.6

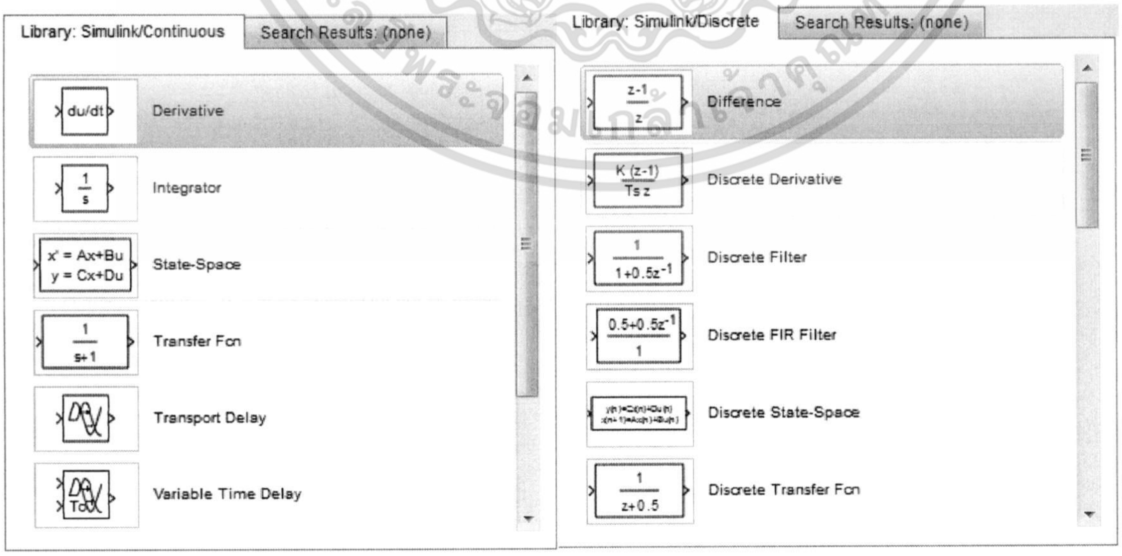
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แสดงบล็อคต่างๆ ของแหล่งกำเนิดสัญญาณ (Sources) และแหล่งสัญญาณ (Sinks)

- **ระบบต่อเนื่อง (Continuous) และระบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete)**

กลุ่มบล็อคของระบบต่อเนื่อง (Continuous System) หรือระบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete System) เป็นอีกกลุ่มหนึ่งที่มีการใช้ในการจำลองปัญหาบ่อย ระบบพลศาสตร์ทุกระบบ สามารถที่จะถูกวิเคราะห์ในลักษณะของระบบต่อเนื่อง (Continuous System) หรือระบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete System) ซึ่งไม่ว่าระบบจะถูกจำลองในลักษณะใด โปรแกรม Simulink นั้นสามารถ ตอบสนองต่อลักษณะรูปแบบของระบบได้ในหลายลักษณะ เช่น Transfer Function หรือ Integration Blocks หรือ Delay Blocks หรืออื่นๆ รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะบล็อคที่ใช้ในการกำหนด ระบบในลักษณะต่างๆ ของทั้งระบบต่อเนื่อง (Continuous System) หรือระบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete System) ของ Simulink V. 7.6

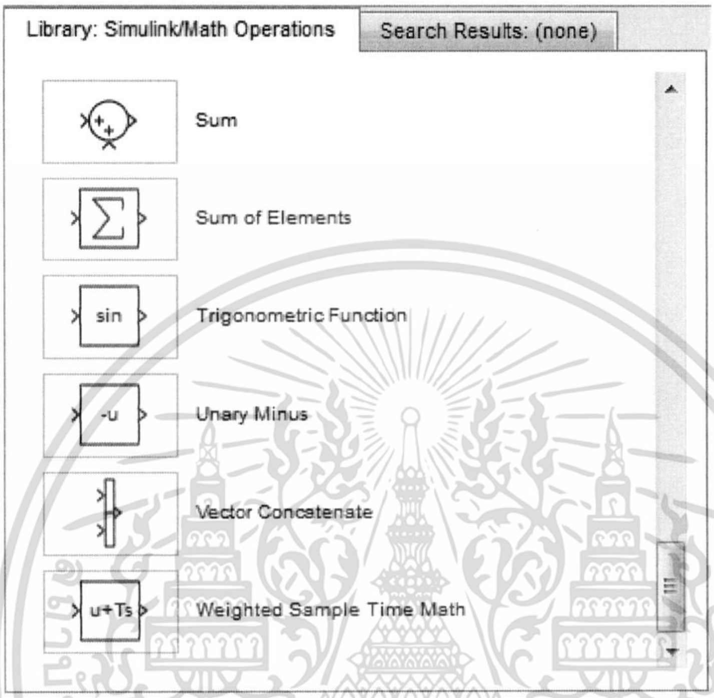


รูปที่ 2.11 แสดงบล็อคต่างๆ ภายในกลุ่มบล็อคของระบบต่อเนื่อง (Continuous System) และระบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete System)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **การดำเนินการทางคณิตศาสตร์ (Math Operations)**

กลุ่มบล็อคการดำเนินการทางคณิตศาสตร์เป็นอีกกลุ่มหนึ่งที่มีการใช้ในการจำลองปัญหาบ่อยกลุ่มบล็อคนี้จะประกอบไปด้วยบล็อคย่อยๆ ที่มีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินการต่างๆ ทางคณิตศาสตร์ เช่น การนำสัญญาณมาบวกกัน (Sum) การคูณสัญญาณด้วยค่าคงที่ (Gain) หรืออื่นๆ รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะบล็อคย่อยในกลุ่มบล็อคการดำเนินการทางคณิตศาสตร์ ของ Simulink V. 7.6



รูปที่ 2.12 แสดงบล็อคต่างๆ ภายในกลุ่มบล็อคการดำเนินการทางคณิตศาสตร์ (Math Operations)

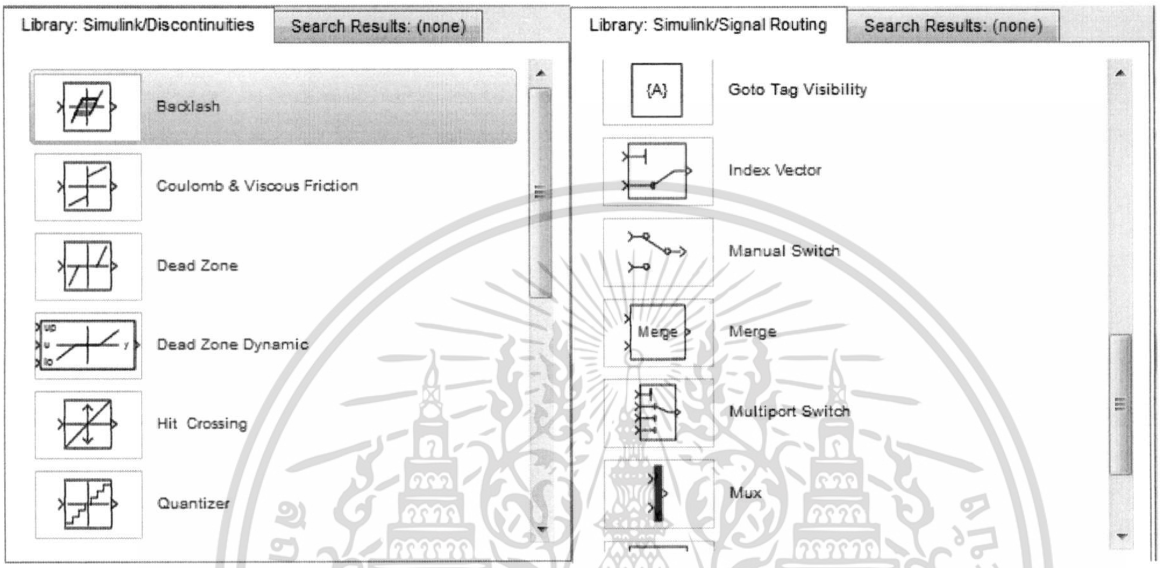
- **ความไม่ต่อเนื่อง (Discontinuities)**

ข้อได้เปรียบข้อหนึ่งของโปรแกรม Simulink คือความสามารถในการจำลองระบบแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear System Simulation) ซึ่งในการหาคำตอบด้วยมือ หรือการหา Closed Form Solutionโดยทั่วไปจะเป็นการยากฟังก์ชั่นหรือลักษณะของค์วามไม่เป็นเชิงเส้นที่พบบ่อยคือ Saturation, Signum, Limited Slew Rate หรืออื่นๆ รูปที่ 2.13 แสดงกลุ่มบล็อค Discontinuities ซึ่ง แสดงความไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งสามารถใช้ในการจำลองปรากฏการณ์ทางวิศวกรรมได้หลายเหตุการณ์ เช่นการใช้ Saturation บล็อคมักจะใช้แทนข้อจำกัดทางกายภาพเช่นขีดจำกัดของแรงดันทางเข้ามอเตอร์ไฟฟ้าหรือระดังแรงดันสูงสุดในระบบไอดรอลิกส์ บล็อค Switches เป็นอีก บล็อคหนึ่งที่ใช้บ่อย เป็นบล็อคที่ใช้ในการจำลองปัญหา IF-THEN เช่นเดียวกับที่พบในการเขียน โปรแกรมโดยทั่วไป บล็อค Slew Rates ใช้ในการจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าทางกายภาพ เช่น ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **ทางเดินสัญญาณ (Signal Routing)**

ในการจำลองระบบที่มีความซับซ้อน บางครั้งมีความจำเป็นที่จะต้องมีการรับ/ส่งสัญญาณจากส่วนหนึ่งของระบบ ไปสู่อีกส่วนหนึ่งของระบบ ซึ่งการใช้เส้นเชื่อมอาจจะไม่สะดวกในการทำงานซึ่งบล็อคในชุดนี้เป็นประเภท GOTO บล็อคหรือ FROM บล็อคบล็อคประเภท Multiplexing จะมีประโยชน์ในการจัดระเบียบของแผนภูมิให้มีความเป็นระเบียบมากขึ้นรูปที่ 2.13 แสดงกลุ่มบล็อค Signal Routing



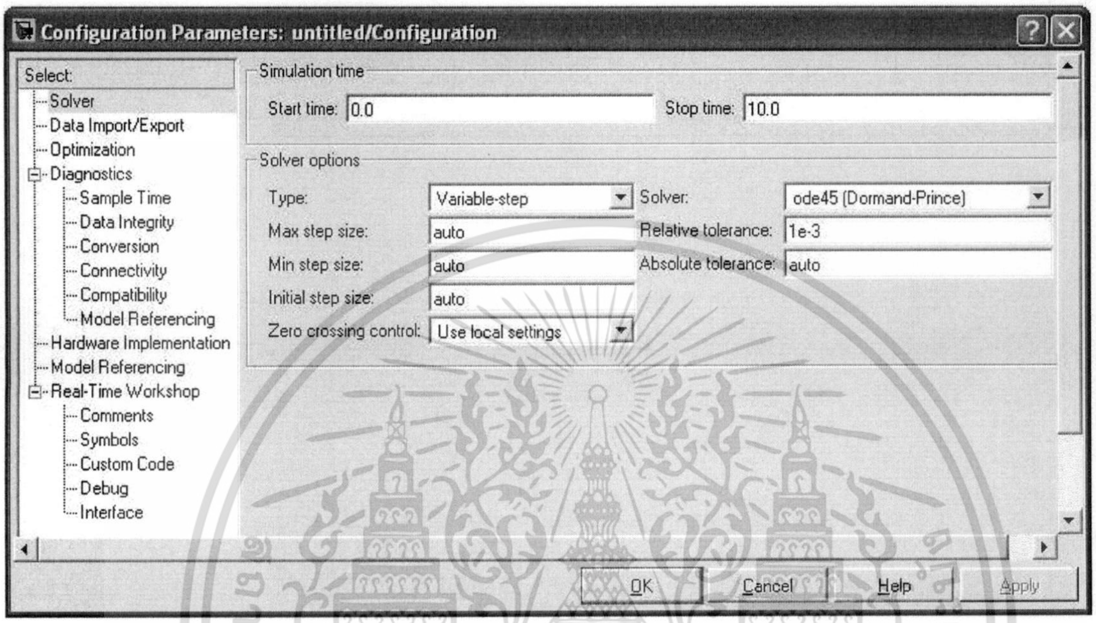
รูปที่ 2.13 แสดงกลุ่มบล็อค Discontinuities และกลุ่ม Signal Routing

- **การกำหนดค่าคงที่ในการจำลองปัญหา (Parameters Configuration)**

การจำลองปัญหาบนคอมพิวเตอร์จะต้องอาศัยเทคนิคของระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) ในการแก้ปัญหาและหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ สำหรับโปรแกรม Simulink นั้น ระบบในรูปแบบต่างๆ สามารถที่จะจำลองทั้งในแบบของระบบต่อเนื่อง (Continuous System) หรือระบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete System) ขึ้นอยู่กับลักษณะองค์ประกอบของระบบย่อย การจำลองสามารถที่จะถูกกำหนดให้เริ่ม หรือหยุดที่ช่วงเวลา หรือส่วนหนึ่งของเวลาได้ตามกำหนด ข้อสังเกตุที่ต้องพึงระวังคือระยะเวลาที่สนใจในการจำลองปัญหา กับระยะเวลาที่ใช้ ในการจำลอง ปัญหา หรือระยะเวลาที่คอมพิวเตอร์ใช้ในการหาคำตอบของปัญหาที่สนใจจะไม่ตรงกัน เช่นคอมพิวเตอร์อาจจะใช้ระยะเวลาในการจำลองการตอบสนองในช่วง 10 นาที ของระบบที่สนใจ เพียง 1 วินาที เป็นต้น ในการจำลองแบบปัญหาโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขประเภทที่ Step Size มีค่าไม่คงที่นั้น (Variable Step Size) Step Size ที่มากที่สุดและน้อยที่สุดสามารถกำหนดได้ อย่างไรก็ตามระเบียบวิธีเชิงตัวเลขประเภท Step Size คงที่ (Fixed Step Size) เป็นวิธีที่มักจะนิยมใช้ในการจำลองปัญหา ทั้งนี้เนื่องจากสามารถระบุช่วงเวลา หรือจุดของเวลาที่สนใจได้อย่างแม่นยำ Step Size ที่ใช้ในการจำลองปัญหาจะต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการกำหนดและจะมีค่าขึ้นอยู่กับลักษณะของระบบพลศาสตร์ที่สนใจ เช่น ในระบบทางความร้อน Step Size อาจจะอยู่ประมาณ 2-3 วินาที ในขณะที่ระบบคอบคุมมอเตอร์อาจจำเป็นที่จะต้องใช้ Step Size ที่มีค่าน้อยถึง 0.002 – 0.003 วินาที โดยทั่วไป กฎที่ใช้ใน การเลือก Step Size จะอยู่ที่ประมาณอย่างน้อย 4 – 20 เท่า ของระบบที่มีการตอบสนองที่เร็วที่สุด



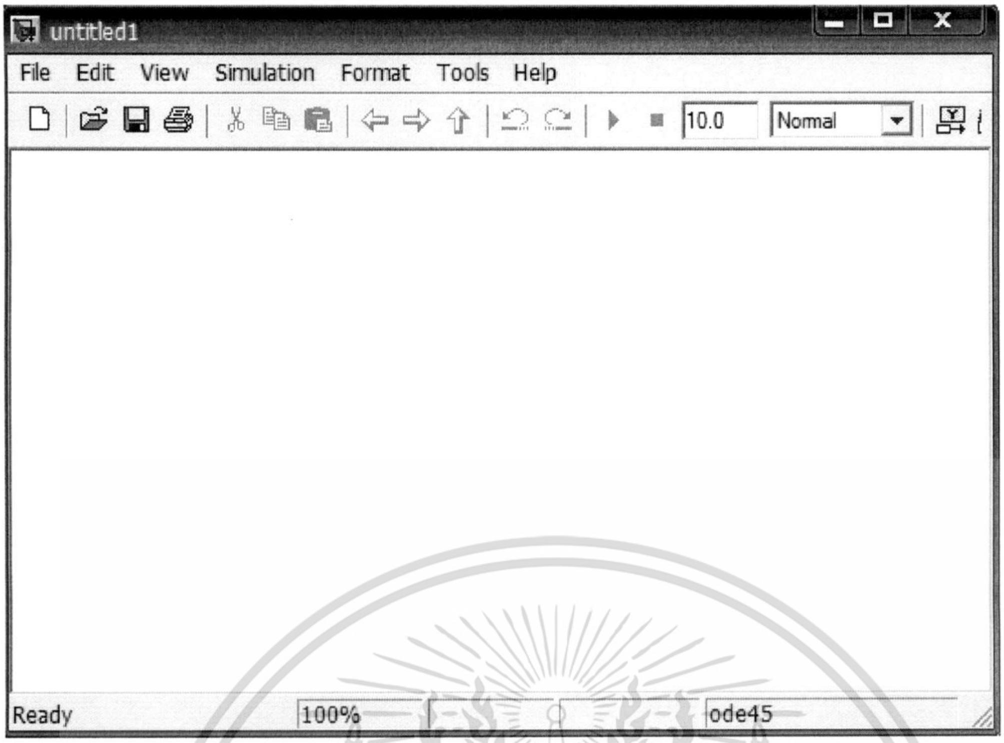
รูปที่ 2.14 แสดงหน้าต่างที่ใช้ในการกำหนดค่าคงที่ในการจำลองปัญหา (Configuration Parameters)

2.4.6 การสร้างแบบจำลองระบบควบคุม

การสร้างแบบจำลองของระบบควบคุมใน Simulink นั้นต้องทำการสร้างหน้าต่างสำหรับสร้างแบบจำลองขึ้นมาก่อนซึ่งขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองระบบควบคุมทำได้ดังนี้

- เลือก เมนู File --> New --> Model จากนั้นจะปรากฏหน้าต่างขึ้นมาแสดงได้ดังรูปที่ 2.15 ซึ่งหน้าต่างนี้จะใช้สำหรับการวางบล็อคที่เลือกมาจาก Simulink Library Browser

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



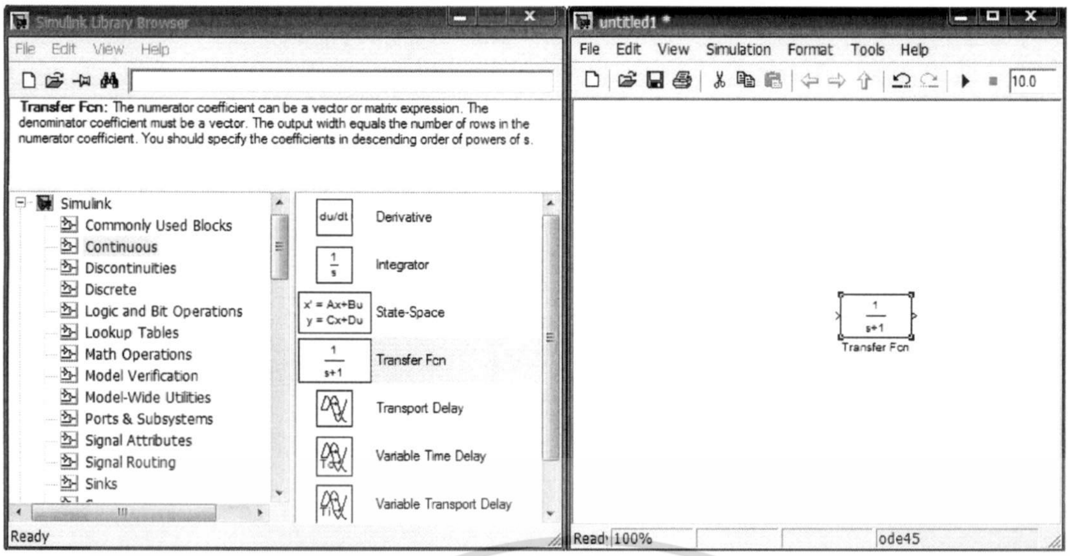
รูปที่ 2.15 หน้าต่างสำหรับสร้างแบบจำลอง

ในส่วนบนของหน้าต่างสำหรับสร้างแบบจำลองจะเป็นเมนูบาร์สำหรับคำสั่งต่างๆ ดังนี้

1. เมนู File เป็นคำสั่งเกี่ยวกับการจัดการทางด้วนแฟ้มข้อมูลทั้งหมด เช่น การเปิดไฟล์ การบันทึกไฟล์ และการกำหนดคุณลักษณะของโปรแกร Simulink เมนู Edit เป็นคำสั่งเกี่ยวกับการแก้ไขแบบจำลองที่สร้างขึ้นมา
2. เมนู Edit เป็นคำสั่งเกี่ยวกับการแก้ไขแบบจำลองที่สร้างขึ้นมา
3. เมนู View เป็นคำสั่งเกี่ยวกับการแสดงเครื่องมืออุปกรณ์บนหน้าจอแบบจำลอง
4. เมนู Simulation เป็นคำสั่งเกี่ยวกับการจัดการการจำลองการทำงานของระบบควบคุมที่ทำการสร้างขึ้นมา
5. เมนู Format เป็นคำสั่งเกี่ยวกันรูปแบบการแสดงผมบนหน้าจอจำลอง
6. เมนู Tools เป็นคำสั่งเกี่ยวกับการเลือกใช้เครื่องมือต่างๆ
7. เมนู Help เป็นคำสั่งเกี่ยวกับการขอความช่วยเหลือ

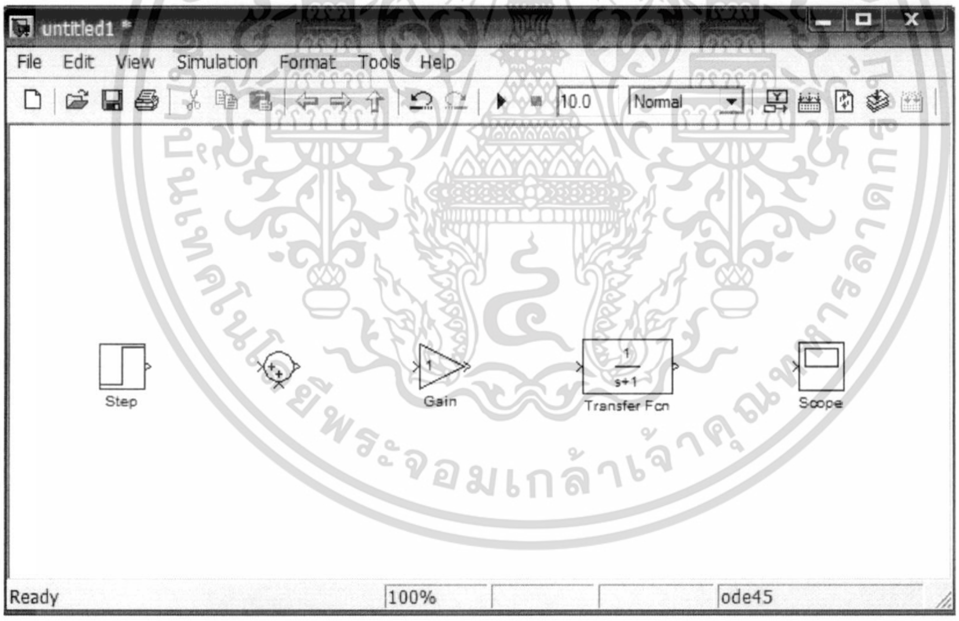
- เมื่อทำการสร้างหน้าต่างสำหรับสร้างแบบจำลองแล้วทำบล็อคใน Simulink Library Browserมาวางในหน้าต่างสำหรับสร้างแบบจำลองได้โดยทำการคลิ๊กบล็อคที่ต้องการค้างไว้จากนั้นทำการลากมาไว้ในหน้าต่างสำหรับสร้างแบบจำลองจากนั้นปล่อยปุ่มจะปรากฏบล็อคที่ต้องการบน หน้าต่างสำหรับสร้างแบบจำลองแสดงได้ดังรูปที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 การเลือกบล็อคที่ต้องการจาก Simulink Library Browser

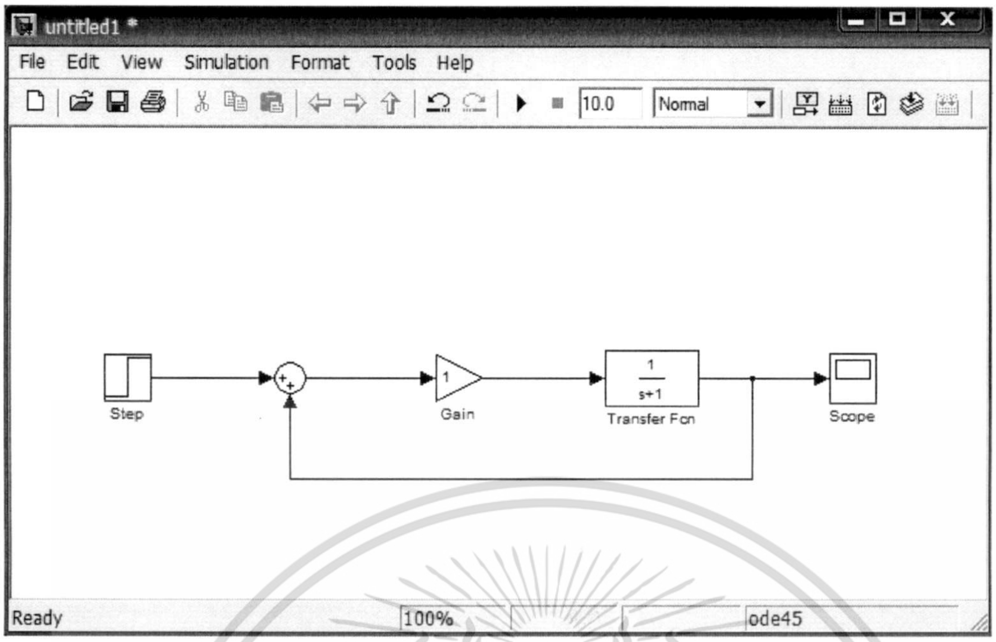
- เมื่อได้บล็อคที่ต้องการแล้วเราสามารถนำบล็อคอื่นๆ มาวางบนหน้าต่างสำหรับ สร้างแบบจำลองได้เช่นกัน ต่อไปจะแสดงบล็อคของระบบตัวอย่าง



รูปที่ 2.17 บล็อคของระบบตัวอย่าง

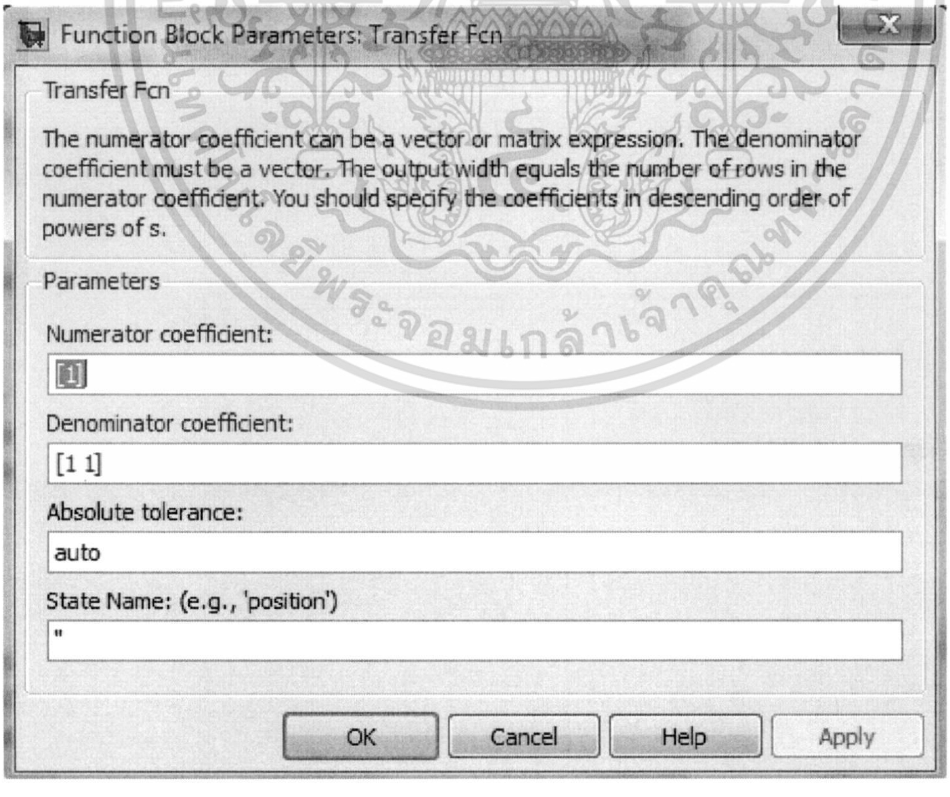
- รูปที่ 2.17 สังเกตได้ว่าแต่ละบล็อคจะมีช่องสัญญาณเข้าและสัญญาณออก ไว้สำหรับลากเส้นสัญญาณเชื่อมต่อระหว่างบล็อคต่างๆ เข้าด้วยกัน การลากเส้นเชื่อมต่อระหว่างบล็อคต่างๆ นั้น ทำได้โดยเลื่อนเมาส์ให้ไปชี้ที่จุดต่อสัญญาณของบล็อคที่ต้องการ ตัวชี้ของเมาส์จะเปลี่ยนเป็นเครื่องหมายกากบาท จากนั้นคลิ๊กค้างไว้แล้วลากตัวชี้ไปที่จุดต่อสัญญาณของบล็อคที่ต้องการ แสดงได้ดังรูปที่ 2.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 การเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างบล็อค

- การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของบล็อคสามารถทำได้โดยดับเบิ้ลคลิ๊กที่บล็อคซึ่งจะปรากฏ ไดอะล็อกสำหรับให้ใส่ค่าพารามิเตอร์ของบล็อค



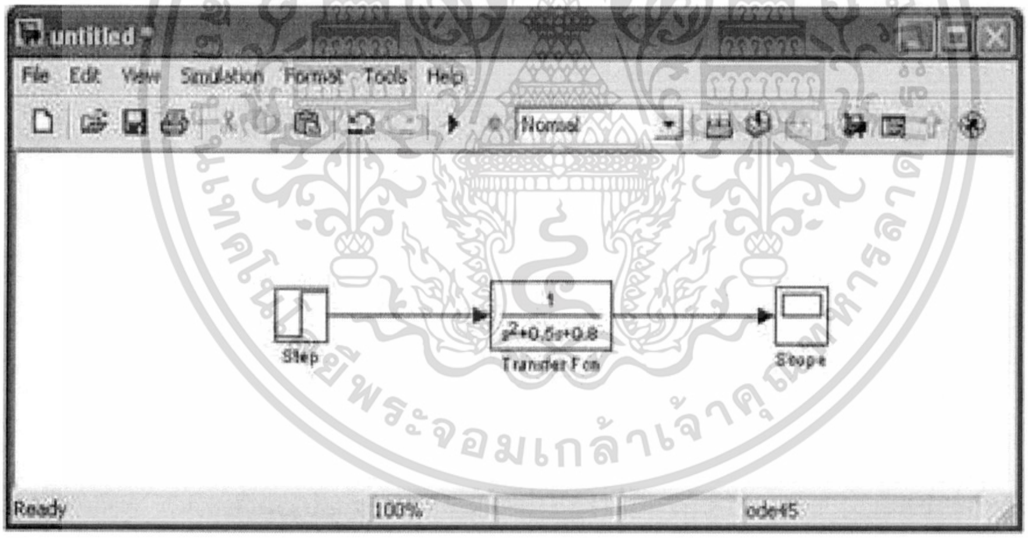
รูปที่ 2.19 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของบล็อค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้เข้าใจหลักการทำงานและวิธีการสร้างโปรแกรมด้วย Simulink จะขอแสดงถึงวิธีการสร้างแบบจำลองของระบบควบคุมใน Simulink โดยการสร้างแบบจำลองของกระบวนการใน Simulink นั้นสามารถแบ่งเป็น 3 วิธีด้วยกัน คือ

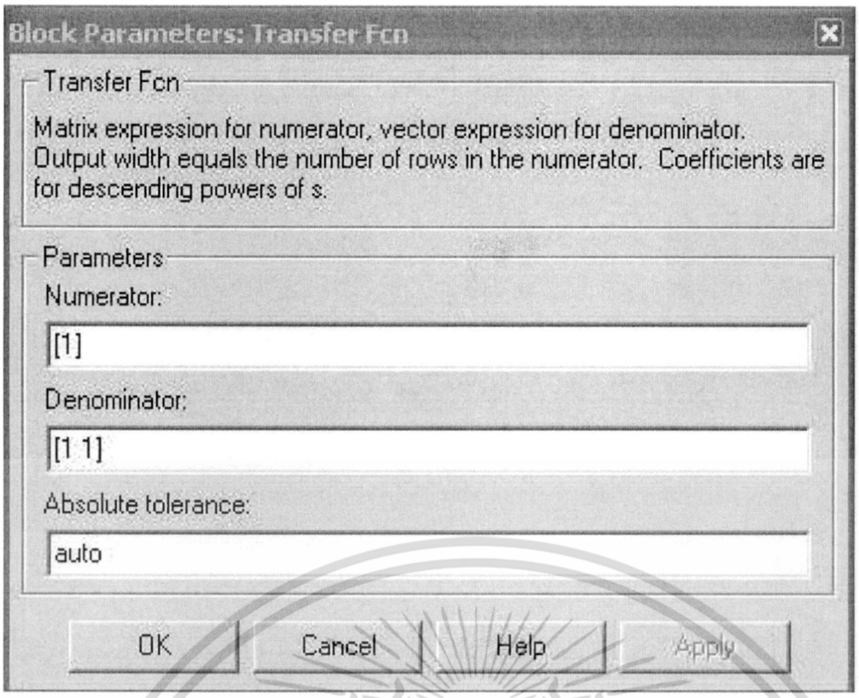
1. การสร้างแบบจำลองกระบวนการจากสมการ Differential Equation
2. การสร้างแบบจำลองกระบวนการจากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน
3. การสร้างแบบจำลองระบบควบคุมจากสมการ State-Space

ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการสร้างแบบจำลองกระบวนการจากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชั่น การสร้างแบบจำลองของระบบที่แสดงอยู่ในรูป 2.20 Transfer Function นั้นจะใช้บล็อค Transfer Fcn แสดงแทนระบบ การใส่ค่าโพลีโนเมียลในส่วนของ Numerator และ Denominator นั้นทำได้โดยดับเบิ้ลคลิ๊กที่บล็อคซึ่งจะปรากฏไดอะล็อกที่ให้ใส่ค่าขึ้นมาแสดงได้ดังรูปที่ 2.21 โดยการใส่ค่าลงไปนั้นมีเงื่อนไขอยู่ว่าส่วน Numerator นั้นต้องมีอันดับน้อยกว่า ส่วน Denominator ซึ่งสังเกตได้ว่าการสร้างแบบจำลองของระบบจาก Transfer Function นั้นจะทำการวัดผลตอบสนองได้ที่ส่วนเอาต์พุตของระบบเท่านั้น



รูปที่ 2.20 ไดอะล็อกใส่ค่าพารามิเตอร์ของบล็อค Transfer Fcn

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 แบบจำลองระบบทางกลในรูปแบบของ Transfer Function

2.5 บทสรุป

สำหรับเนื้อหาหลักๆ ในบทนี้ได้กล่าวถึงองค์ประกอบโดยรวมของกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วการเรียนรู้หรือทำความเข้าใจกระบวนการนั้นถือว่าสำคัญเนื่องจากว่าเป็นเงื่อนไขแรกๆ ที่ต้องนำไปพิจารณาในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับควบคุมกระบวนการซึ่งถ้าเราไม่เข้าใจองค์ประกอบทั้งหมดของกระบวนการแล้วนั้น คงจะเป็นการยากที่เราจะสามารถออกแบบตัวควบคุมได้ ส่วนในเรื่องของโปรแกรมที่ใช้ในการทดลองก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่จะต้องคำนึงถึงเช่นกัน การที่เรานำโปรแกรมมาช่วยในการวิเคราะห์ ออกแบบ หรือควบคุมกระบวนการนั้นถ้าเราเรียนรู้และเข้าใจการทำงานและฟังก์ชั่นการใช้งานต่างๆ ของโปรแกรมก็จะทำให้ง่ายและสะดวกในการทำงาน แต่ในทางตรงกันข้างถ้าเราไม่เข้าใจการทำงานของโปรแกรมหรือใช้งานโปรแกรมไม่เป็นแล้วก็จะเป็นการสร้างอุปสรรคเช่นกัน โดยสรุปแล้วคือเราต้องการที่จะหาสมการคุณลักษณะหรือหาโมเดลของกระบวนการนั่นเอง เพื่อที่จะนำโมเดลที่ได้ได้วิเคาระห์และออกแบบต่อไป องค์ประกอบทั้งหมดโปรแกรมที่กล่าวถึงในบทนี้จะเป็นส่วนที่ช่วยให้เราหาแบบจำลองกระบวนการได้นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

3.1 กล่าวนำ

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีทั้งหมดที่นำมาใช้กับงานวิจัยนี้ เพื่อให้รู้ถึงที่มาของหลักการคิดและสมการแต่ละสมการ รวมไปถึงการนำทฤษฎีไปออกแบบตัวควบคุม ซึ่งในเนื้อหาจะประกอบไปด้วย ทฤษฎีของตัวควบคุมพีไอดี ทฤษฎีดีคับปลิ้ง ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ การควบคุมแบบปรับตัวโดยใช้โมเดลอ้างอิง และบทสรุป ซึ่งรายละเอียดทั้งหมดได้ถูกอธิบายไว้ดังต่อไปนี้

3.2 ทฤษฎีของตัวควบคุมพีไอดี

ตัวควบคุม เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ การควบคุมอัตโนมัติก็คือ การใช้ตัวควบคุม (Controller) ทำหน้าที่เปรียบเทียบตัดสินและปรับแทนมนุษย์ให้มีผลตอบสนองเป็นไปตามต้องการ ซึ่งสัญญาณดังกล่าวจะเป็นไปตามกฎ และรูปแบบของการควบคุมที่ผู้ควบคุมได้เลือก และกำหนดไว้ล่วงหน้า การควบคุมไม่ว่าจะเป็นการควบคุมด้วยมือหรืออัตโนมัติ ผลการควบคุมจะถูกวัดและป้อนกลับไปยังตัวควบคุมเพื่อทำการเปรียบเทียบ ตัดสิน และออกคำสั่ง ปรับใหม่ การกระทำจะดำเนินไปซ้ำๆ กันเช่นนี้ตามลำดับ ปัจจุบันเครื่องควบคุมสามารถแบ่งตามโครงสร้างการทำงานได้ 3 ชนิด คือเครื่องควบคุมแบบนิวเมตริกส์ที่ทำงานโดยใช้สัญญาณลม เครื่องควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานโดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์เชิงเส้น (Linear Circuit) ในการสร้างสัญญาณควบคุม และเครื่องควบคุมแบบดิจิตอลทำงานโดยใช้วงจรตรรกะ (Logic Circuit) หรือไมโครโปรเซสเซอร์สร้างสัญญาณควบคุม โดยตัวควบคุมที่ถูกนำมาใช้และเป็นที่รู้จักกันดีมากที่สุดในวงการอุตสาหกรรมการผลิตก็คือ ตัวควบคุมแบบ PID

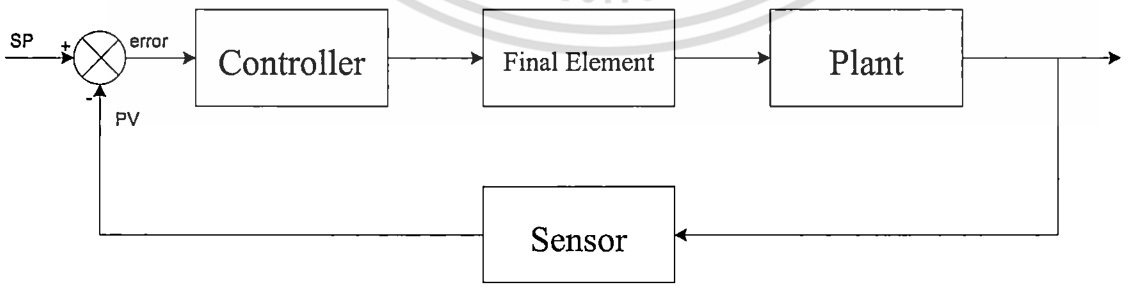
3.2.1 การควบคุมแบบป้อนกลับด้วยตัวควบคุมพีไอดี

ระบบควบคุมแบบ Closed-Loop เป็นระบบควบคุมแบบหนึ่งซึ่งสัญญาณเอาต์พุตจะมีผลโดยตรงต่อการควบคุมดังนั้นระบบควบคุมแบบ Closed-Loop ก็คือระบบควบคุมป้อนกลับนั่นเอง สัญญาณค่าความคลาดเคลื่อนซึ่งเป็นสัญญาณแตกต่างระหว่างสัญญาณอินพุตกับสัญญาณป้อนกลับจะถูกป้อนให้ตัวควบคุม เพื่อที่จะได้ลดความคลาดเคลื่อนให้น้อยลงและทำให้เอาต์พุตของระบบมีค่าตามที่ต้องการ สัญญาณป้อนกลับนี้อาจเป็นสัญญาณเอาต์พุตโดยตรงหรือเป็นสัญญาณที่เป็นฟังก์ชั่นของสัญญาณเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบควบคุมป้อนกลับโดยทั่วไปประกอบด้วยอุปกรณ์ ดังนี้

1. ตัวควบคุม (Controller) คือ ตัวรับสัญญาณวัดเพื่อนำมาเปรียบเทียบเป็นค่าเป้าหมายแล้วคำนวณหาค่าที่เหมาะสมเพื่อส่งเป็นสัญญาณควบคุมออกไปควบคุมกระบวนการ ซึ่งเราสามารถตั้งเป้าหมายให้กับตัวควบคุมนี้ได้ แบบการควบคุมมีหลายแบบ เช่น ON-OFF Control, P Control, PI Control, PID Control เป็นต้น
2. อุปกรณ์วัด (Measuring Instruments) หมายถึง อุปกรณ์ได้แก่ Sensor, Transducer หรืออุปกรณ์แปลงสัญญาณ (Converter) หรือวัดสัญญาณอื่นๆที่มีเอาต์พุตตามสัญญาณมาตรฐานเอาต์พุต
3. อุปกรณ์ปรับกระบวนการ (Final Control Element) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ปรับสภาวะของกระบวนการด้วยสภาวะของกระบวนการเปลี่ยนแปลงตามค่าสัญญาณควบคุม (Manipulated Variable) ของกฎการควบคุมอุปกรณ์พวกนี้ได้แก่ วาล์วควบคุม (Control Valve), Inverter, Actuator ต่างๆ เป็นต้น
4. กระบวนการ (Plant or Process) คือ กระบวนการที่ถูกควบคุมหรือกระบวนการทางฟิสิกส์ที่เราต้องการควบคุมให้มีสภาวะตามต้องการ ขณะที่สภาวะการทำงานหรือสรูปแวดล้อมอาจเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา กระบวนการได้แก่ อุณหภูมิ, ความดัน, อัตราการไหล, ระดับความเป็นกรดด่าง เป็นต้น
5. สัญญาณมาตรฐาน (Standard Signal) ในการที่ต้องการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในระบบควบคุมอัตโนมัติให้ทำงานได้ตามต้องการนั้นจำเป็นต้องมีมาตรฐานรองรับซึ่งวิวัฒนาการตั้งแต่เริ่มมีระบบควบคุมอัตโนมัติมานั้นก็มีการเปลี่ยนแปลงระบบ ตัวอุปกรณ์เครื่องมือวัดมาตั้งแต่ยุคลม (Pneumatic), ไฟฟ้า (Electrical) แล้วปัจจุบันเริ่มมีการใช้สัญญาณดิจิตอลกันแล้ว สัญญาณลม 3-15 PSI, สัญญาณไฟฟ้า 1-5 Vdc หรือ 4-20 mA



รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างของระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรม โดยทั่วไปนิยมใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID) เพราะรูปแบบของตัวควบคุมเป็นตัวควบคุมที่สามารถควบคุมกระบวนการต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีโครงสร้างการทำงานที่ไม่ซับซ้อน สามารถเข้าใจได้ง่าย การใช้งานตัวควบคุมพีไอดีนี้ขึ้นอยู่กับการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ให้เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลตอบสนองของกระบวนการตามต้องการ

ตัวควบคุม PID ประกอบด้วยตัวควบคุมแบบ Proportional (P) ตัวควบคุมแบบ Integral (I) ตัวควบคุมแบบDerivative (D) ซึ่งมีฟังก์ชั่นถ่ายโอน (Transfer Function) ดังนี้

$$m(t) = K_P\left(e(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t e(t)dt + T_d\frac{de(t)}{dt}\right) \tag{3.1}$$

โดยที่ K_P = ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบ P (Proportional Gain)

T_i = ค่าเวลา Integral (Integral Time)

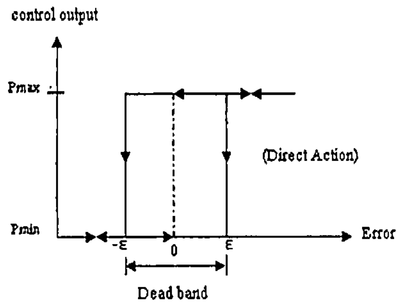
T_d = ค่าเวลา Derivative (Derivative Time)

จากรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าสัญญาณควบคุม หรือตัวแปรปรับกระบวนการ (*mv*) ที่ได้จากตัวควบคุม PID จะถูกกำหนดด้วยความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณขาเข้าตัวควบคุมกับตัวแปรกระบวนการ (*pv*) กับสัญญาณอ้างอิงหรือค่าเป้าหมาย (*sp*) โดยที่ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับกฎเกณฑ์การควบคุมที่ผู้ควบคุมปรับแต่งไว้ล่วงหน้า ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจะเป็นไปตามกริยาควบคุมแบบต่างๆ ดังที่กล่าวต่อไปนี้

3.2.2 กริยาการควบคุมแบบป้อนกลับ

- **กริยาการควบคุมแบบ ON-OFF**

การควบคุมแบบ ON-OFF เป็นการควบคุมที่ง่ายที่สุด และนิยมใช้ในการควบคุมกระบวนการที่ไม่ต้องการความเที่ยงตรงสูง โดยการควบคุมจะทำงานเพียง 2 สถานะ คือ เปิด (100%) กับปิด (0%) กริยาการควบคุมแบบ ON-OFF ดังแสดง รูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงกริยาการควบคุมแบบ ON-OFF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.2 จะเห็นว่าถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่าค่าวิกฤต $(+\varepsilon)$ ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมจะเปลี่ยนจาก 0% เป็น 100% เมื่อค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าค่าวิกฤต $(-\varepsilon)$ ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมจะเปลี่ยนจาก 100% เป็น 0% ค่าเอาต์พุตที่อยู่ในช่วงเดทแบนด์ (Dead Band) จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใดซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการเสียดทานที่ไม่ได้คาดไว้ก่อน หรือบางครั้งก็จำเป็นต้องทำให้เกิดช่วงเดทแบนด์ขึ้น เพื่อป้องกัน ON-OFF บ่อยเกินไปอันจะทำให้อุปกรณ์ควบคุมหรือกระบวนการได้รับความเสียหาย แต่ช่วงเดทแบนด์นี้ต้องไม่กว้างนัก เพราะจะทำให้ค่าความเที่ยงตรงของการควบคุมลดลง กริยาการควบคุมแบบ ON-OFF สามารถเขียนเป็นสมการ (3.2) ได้ดังนี้

$$m(t)=\begin{cases}0\% & ,e<-\varepsilon \\ 100\% & ,e>+\varepsilon\end{cases} \tag{3.2}$$

เมื่อ $m(t)$ = สัญญาณควบคุมหรือเอาต์พุตของตัวควบคุม

$e(t)$ = ค่าความคลาดเคลื่อน

ε = $\frac{1}{2}$ ของค่าเดทแบนด์

- **กริยาการควบคุมแบบ Proportional (P)**

กริยาการควบคุม P นั้น ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมจะแปรผันตรงกับค่าความคลาดเคลื่อน กล่าวคือ ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่ามากขึ้น ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมก็จะมีค่ามากขึ้นตาม และถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยลง ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมก็จะมีค่าน้อยลงตามกริยาการควบคุมแบบ P สามารถเขียนสมการ (3.3) ได้ดังนี้

$$m_p(t)=K_p e(t)+\overline{m} \tag{3.3}$$

$m_p(t)$ = ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ Proportional

K_p = อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ Proportional

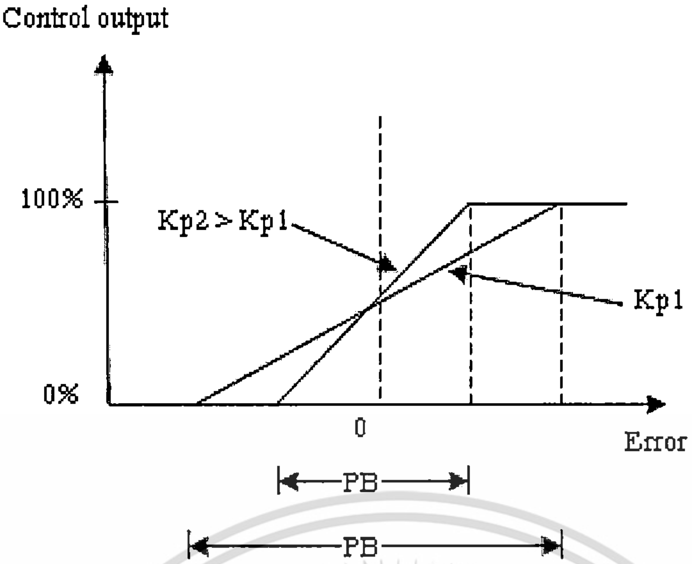
$\overline{m}$ = ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมที่ค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับศูนย์

ตัวควบคุมแบบ P บางตัวอาจจะใช้ค่า Proportional Band (PB) แทนการใช้ค่า K_p ซึ่ง PB คือช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างที่เอาต์พุตของตัวควบคุมมีค่า 0-100% ดังสมการ

$$PB=\frac{100\%}{K_p} \tag{3.4}$$

ข้อเสียของกริยาการควบคุมแบบ Proportional คือ ไม่สามารถกำจัดค่าออฟเซ็ตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงคุณสมบัติของกริยาการควบคุมแบบ Proportional

- **กริยาการควบคุมแบบ Integral (I)**

กริยาการควบคุมแบบ I หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การควบคุมแบบรีเซ็ต (Reset Control) โดยค่าเอาต์พุตของตัวควบคุม หาได้จากค่าพื้นที่ทั้งหมดภายใต้กราฟของค่าความคลาดเคลื่อนต่อเวลาคูณกับค่าคงที่ที่เรียกว่า อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ I (Integral Gain) ดังสมการ (3.5) ต่อไปนี้

$$m_I(t) = K_I \int_0^t e(t)dt + \bar{m}_I(0) \qquad (3.5)$$

เมื่อ $m_I(t)$ = ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ Integral

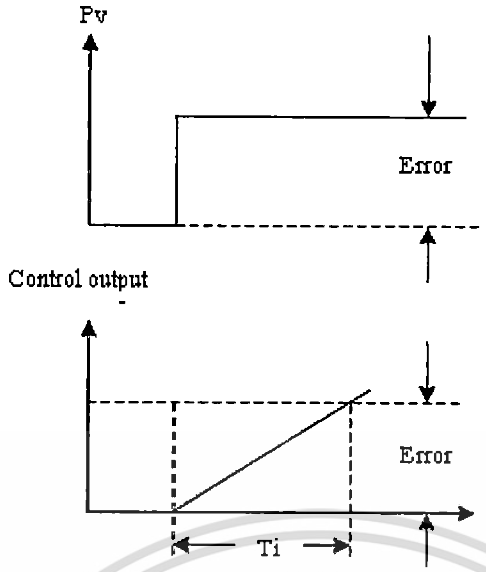
K_I = อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ Integral

$\int_0^t e(t)dt$ = พื้นที่ทั้งหมดของค่าความคลาดเคลื่อน

$\overline{m}_{I(0)}$ = ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมที่เวลา t เท่ากับศูนย์

ผลของกริยาการควบคุมแบบ I นี้จะทำให้ไม่เกิดออฟเซ็ตขึ้นในระบบ และลดค่าพุ่งเกิน (Overshoot) ของระบบลงได้ แต่ถ้ากริยาการควบคุมมีค่าสูงเกินไป จะทำให้ผลตอบสนองของกระบวนการช้าลง ผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ I ดังแสดงในรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ที่ 3.4 แสดงผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ Integral

- **กริยาการควบคุมแบบ Derivative (D)**

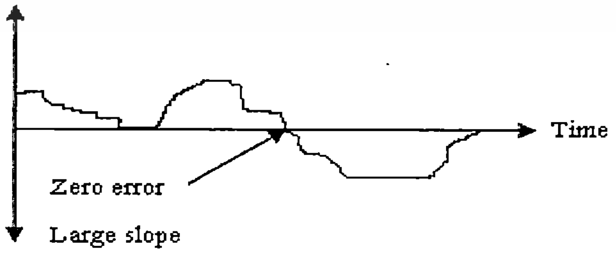
กริยาการควบคุมแบบ D ยกอีกชื่อหนึ่งว่า การควบคุมแบบอัตราส่วน (Rate Action) โดยสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมจะขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความคลาดเคลื่อนต่อเวลา จะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนนี้มีโอกาสเป็นศูนย์ได้ และค่าเอาต์พุตก็สามารถเปลี่ยนแปลงให้มีค่าสูงขึ้น เมื่อความคลาดเคลื่อนเปลี่ยนแปลง ซึ่งเรียกการกระทำดังกล่าวว่า อัตราการกระทำ (Rate Action) ดังสมการ (3.6) ต่อไปนี้

$$m_D(t) = K_D \frac{de(t)}{dt} \tag{3.6}$$

เมื่อ $m_D(t)$ = ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ Derivative

K_D = อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ Derivative

$\frac{de}{dt}$ = ค่าความคลาดเคลื่อนที่เวลา t



รูปที่ 3.5 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ Derivative

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **กริยาการควบคุมแบบ Proportional- Integral (PI)**

ตามที่กล่าวมาแล้วว่ากริยาการควบคุมแบบ P นั้น จะมีออฟเซ็ทเกิดขึ้น ซึ่งการกำจัดค่าออฟเซ็ทนี้ สามารถทำได้โดยการเพิ่มกริยาการควบคุมแบบ I เข้าไป ดังสมการต่อไปนี้

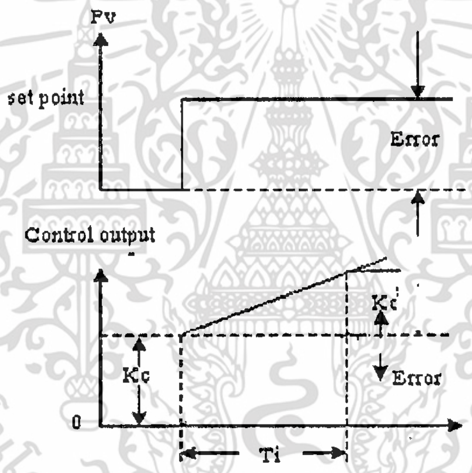
$$m_{PI}(t) = \overline{m} + K_P e(t) + K_P K_I \int_0^t e(t)dt \tag{3.7}$$

หรือ

$$m_{PI}\left(t\right) = \overline{m} + K_c e(t) + \frac{K_c}{T_i}\int_0^t e(t)dt \tag{3.8}$$

เมื่อ $K_C = K_P$ และ $K_I = \frac{1}{T_i}$

T_i = ค่าเวลา Integral



รูปที่ 3.6 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ *PI* (Direct action)

- **กริยาการควบคุมแบบ Proportional-Derivative (PD)**

การประยุกต์ใช้กริยาการควบคุมแบบ P ร่วมกับกริยาการควบคุมแบบ D เพื่อทำให้ผลตอบสนองของระบบรวดเร็วขึ้น แต่จะไม่มีผลโดยตรงต่อผลตอบสนองของระบบที่สภาวะคงที่ซึ่งสมการเอาท์พุตของกริยาการควบคุมแบบ PD แสดงดังสมการ (3.9) ต่อไปนี้

$$m_{PD}(t) = \overline{m} + K_P e(t) + K_p K_D \frac{de(t)}{dt} \tag{3.9}$$

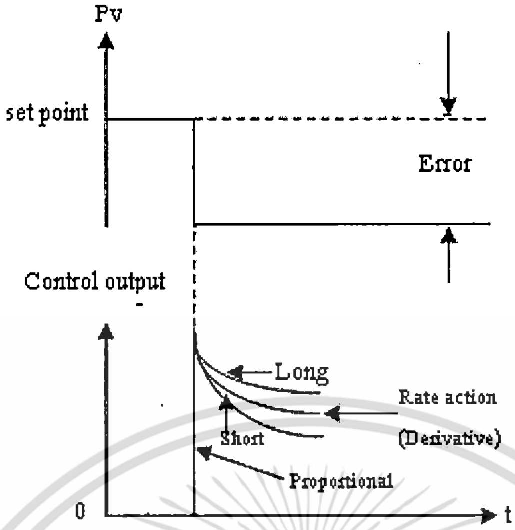
หรือ

$$m_{PD}(t) = \overline{m} + K_c e(t) + K_c T_d \frac{de(t)}{dt} \tag{3.10}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $K_D = T_d$

T_d = ค่าเวลา Derivative



รูปที่ 3.7 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ PD

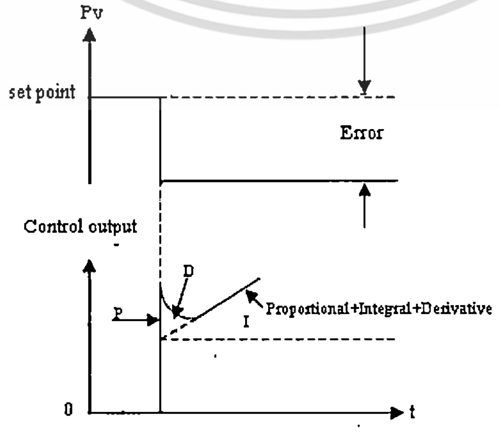
- **กริยาการควบคุมแบบ Proportional – Integral- Derivative (PID)**

เพื่อให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมมีสมรรถนะเป็นไปตามต้องการ จึงใช้กริยาการควบคุมทั้ง 3 แบบ ร่วมกัน ซึ่งจะทำให้ได้กริยาการควบคุมแบบ PID ที่มีสมการดัง (3.11) ต่อไปนี้

$$m_{PID}(t) = \overline{m} + K_P e(t) + K_P K_I \int_0^t e(t)dt + K_P K_D \frac{de(t)}{dt} \qquad (3.11)$$

หรือ

$$m_{PID}(t) = \overline{m} + K_c e(t) + \frac{K_c}{T_i}\int_0^t e(t)dt + K_c T_d \frac{de(t)}{dt} \qquad (3.12)$$



รูปที่ 3.8 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ PI (Direct action)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ทฤษฎีของดีคับปลิ้ง

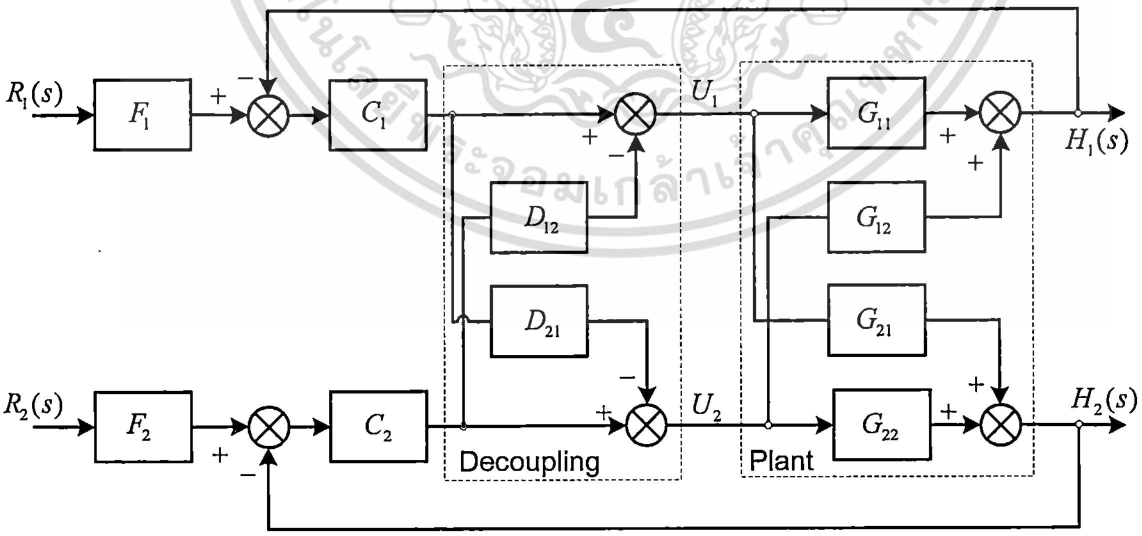
ดีคับปลิ้งไม่ใช่วิธีการออกแบบตัวควบคุมอย่างที่หลายคนเข้าใจแต่อย่างใด แต่จะเป็นวิธีการที่ช่วยให้การออกแบบหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมสำหรับกระบวนการที่มีความซับซ้อนให้สามารถออกแบบได้ง่ายขึ้นซึ่งจะเหมาะกับกระบวนการที่มีสองอินพุตสองเอาต์พุตขึ้นไป สำหรับกระบวนระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกันเป็นอีกหนึ่งกระบวนการที่มีสองอินพุตสองเอาต์พุตและระบบมีการคับเปิ้ลกันทำให้เกิดการกวนกันของระบบ วิธีดีคับปลิ้งจึงเหมาะกับวิธีการนี้เป็นอย่างมากเนื่องจากวิธีการดังกล่าวจะช่วยลดผลกระทบระหว่างถังน้ำทั้งสอง

หลักการทำงานของวิธีการดังกล่าวจะเป็นการนำดีคับปลิ้งมาต่อร่วมกับกระบวนการเพื่อลดผลกระทบที่มีต่อกันระหว่างระดับน้ำของทั้งสองถัง ถ้ากำหนดให้ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลกระทบต่อกันคือ $G(s)$ และทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของดีคับปลิ้งคือ $D(s)$ วิธีการก็คือนำดีคับปลิ้งไปคูณกับกระบวนการแล้วจะได้ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการใหม่ขึ้นมาคือ $G_n(s)$ ซึ่งทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการใหม่ที่เกิดขึ้นถ้าเขียนให้อยู่ในรูปของ ทรานส์เฟอร์เมทริกซ์แล้วจะต้องเป็นเมทริกซ์ทแยงมุท [1] แสดงได้ดังสมการที่ 3.14

$$D(s)G(s) = G_n(s) \tag{3.13}$$

จากสมการที่ 3.13 เขียนให้อยู่ในรูปทรานส์เฟอร์เมทริกซ์จะได้

$$\begin{bmatrix} D_{11}(s) & D_{12}(s) \\ D_{21}(s) & D_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{n_{11}}(s) & 0 \\ 0 & G_{n_{22}}(s) \end{bmatrix} \tag{3.14}$$



รูปที่ 3.9 แสดงโครงสร้างของกระบวนการเมื่อต่อร่วมกับตัวควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.9 เป็นโครงสร้างของกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน (Coupled-Tank Process) ที่ต่อร่วมกับโครงสร้างของดีคับปลิ้ง 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 เราสามารถหาสมการของตัวควบคุมในรูปของเมทริกซ์ทะแยงมุม (Diagonal Matrix) ได้ดังสมการที่ 3.15

$$C(s)=\begin{bmatrix} C_1(s) & 0 \\ 0 & C_2(s) \end{bmatrix} \tag{3.15}$$

แทนสมการที่ 3.14 ลงในสมการที่ 3.13 จะได้

$$\begin{aligned} D(s) &= G(s)^{-1}G_n(s) \\ &= \frac{1}{G_{11}(s)G_{22}(s)-G_{12}(s)G_{21}(s)}\begin{bmatrix} G_{22}(s)G_{n_{11}}(s) & -G_{12}(s)G_{n_{22}}(s) \\ -G_{21}(s)G_{n_{11}}(s) & G_{11}(s)G_{n_{22}}(s) \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{3.16}$$

เมื่อค่าสมาชิก $G_{11}(s), G_{12}(s)$, $G_{21}(s)$ และ $G_{22}(s)$ ในสมการที่ 3.16 เป็นค่าตัวแปรที่รู้ค่า เนื่องจากเป็นค่าของตัวแปรที่ได้จากกระบวนการ แต่ค่าที่เราไม่รู้ค่าก็คือค่าสมาชิกของ $G_{n_{11}}(s)$ และ $G_{n_{22}}(s)$ ซึ่งจะต้องออกแบบดีคับปลิ้งเพื่อหาค่าของค่าตัวแปรดังกล่าว

3.3.1 ดีคับปลิ้งในทางอุดมคติ *(Ideal Decoupling)*

กฎข้อแรกในการพิจารณาการออกแบบดีคับปลิ้งที่สำหรับกระบวนการที่ประกอบไปด้วยทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของ $G_{n_{11}}(s)$ และ $G_{n_{22}}(s)$ เมื่อทรานส์เฟอร์เมทริกซ์ของดีคับปลิ้งคือ $D(s)$ โดยพิจารณาจากสมการที่ 3.16 ค่าสมาชิกของตัวควบคุม $C_1(s)$ และ $C_2(s)$ จะต้องแยกอิสระจากกันและจะถูกนำไปควบคุมกระบวนการ $G_{n_{11}}(s)$ และ $G_{n_{22}}(s)$ ตามลำดับ ส่วนเงื่อนไขในการเลือก $G_n(s)$ ก็คือเลือกค่า $G_{n_{11}}(s)=G_{11}(s)$ และ $G_{n_{22}}(s)=G_{22}(s)$ ซึ่งวิธีการเลือกแบบนี้จะทำให้ตัวควบคุมที่ออกแบบสามารถควบคุมกระบวนการได้ทั้งสองลูปถ้าหากว่าลูปใดลูปหนึ่งถูกปรับให้อยู่ในโหมดปกติ (Manual Mode) เทคนิคนี้ถูกเรียกว่า "ดีคับปลิ้งในทางอุดมคติ *(Ideal Decoupling)*" ถูกคิดขึ้นโดย Luyben [1] อย่างไรก็ตามการนำเทคนิคดังกล่าวไปใช้งานจริงหลายครั้งมักจะเกิดปัญหาตามมา

3.3.2 ดีคับปลิ้งแบบง่าย *(Simplified Decoupling)*

กฎข้อที่ 2 สำหรับการออกแบบดีคับปลิ้งของ ลูเบน (Luyben) [1] เรียกว่า "ดีคับปลิ้งแบบง่าย *(Simplified Decoupling)*" ซึ่งมีวิธีการเลือกดีคับปลิ้งสามารถทำได้ตามสมการด้านล่าง

$$D_{11}(s)=D_{22}(s)=1 \tag{3.17}$$

$$D_{12}(s)=-\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} \tag{3.18}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D_{21}(s) = -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} \tag{3.19}$$

จากสมการที่ 3.17, 3.18 และสมการที่ 3.19 เขียนให้อยู่ในรูปของทรานส์เฟอร์เมทริกซ์จะได้

$$D(s) = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} \\ -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} & 1 \end{bmatrix} \tag{3.20}$$

หลังจากที่เราเพิ่มดีคับปลิ้งเข้าไปในกระบวนการจะทำให้กระบวนการมีลักษณะเหมือนกับระบบแบบ SISO สองกระบวนการแยกจากกันคือ

$$H_1(s) = C_1(s)G_{n_{11}}(s)E_1(s) \tag{3.21}$$

$$H_2(s) = C_2(s)G_{n_{22}}(s)E_2(s) \tag{3.22}$$

จากสมการที่ 3.20 ทำให้เราได้ค่าดีคับปลิ้งและทำให้เราสามารถนำค่าของดีคับปลิ้งไปคำนวณหาค่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการใหม่ได้ดังนี้

$$G_{n_{11}}(s) = G_{11}(s) + D_{21}(s)G_{12}(s) = G_{11}(s) - \frac{G_{21}}{G_{22}}G_{12}(s) \tag{3.23}$$

$$G_{n_{22}}(s) = G_{22}(s) + D_{12}(s)G_{21}(s) = G_{22}(s) - \frac{G_{12}}{G_{11}}G_{21}(s) \tag{3.24}$$

จากสมการที่ 3.23 และสมการที่ 3.24 เขียนให้อยู่ในรูปของทรานส์เฟอร์เมทริกซ์จะได้

$$G_n(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) - \frac{G_{12}(s)G_{21}(s)}{G_{22}(s)} & 0 \\ 0 & G_{22}(s) - \frac{G_{12}(s)G_{21}(s)}{G_{11}(s)} \end{bmatrix} \tag{3.25}$$

จากสมการที่ 3.25 เราจะได้กระบวนการใหม่ขึ้นมาสองกระบวนการคือ $G_{n_{11}}(s)$ และ $G_{n_{22}}(s)$ ซึ่งกระบวนการทั้งสองแยกอิสระต่อกัน ทำให้เราสามารถนำสมการที่ได้ไปออกแบบตัวควบคุมได้

สำหรับกฎข้อที่ 2 สำหรับการออกแบบดีคับปลิ้งของ ลูเบน (Luyben) นี้ทำให้สามารถหาค่าของดีคับปลิ้งได้ง่าย แต่สมการของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันใหม่ที่ได้มาจะมีความซับซ้อนพอสมควรเนื่องจากมีการบวกกันของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน [2] แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับวิธีการแรกแล้วการคำนวณหาค่าดีคับปลิ้งนั้นง่ายกว่าและสามารถนำไปใช้งานจริงได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงได้นำเอากฎในการออกแบบดีคับปลิ้งข้อที่ 2 ของ ลูเบน (Luyben) มาใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 ตัวอย่างการออกแบบดีคับปลิ้ง

สำหรับในหัวข้อนี้จะยกตัวอย่างการหาค่าดีคับปลิ้งสมมุติให้ค่าทรานส์เฟอร์เมทริกซ์ของฟังก์ชันหนึ่งเป็น

$$G(s)=\begin{bmatrix}\frac{4}{1+10s} & \frac{3}{1+10s}\\ \frac{3}{1+10s} & \frac{4}{1+10s}\end{bmatrix} \tag{3.26}$$

จากทรานส์เฟอร์เมทริกซ์จะเห็นได้ว่ากระบวนการเป็นกระบวนการแบบอันดับหนึ่งโดยสมาชิกทุกตัวของทรานส์เมทริกซ์ไม่มีซีโร่และมีโพลวงรอบเปิด (Open-Loop Pole) อยู่ที่ตำแหน่งเดียวกันคือ $s=-0.1$ สามารถหาค่าดีคับปลิ้งได้จากสมการที่ 3.17 สมการที่ 3.18 และสมการที่ 3.19 จะได้ว่า

$$D_{11}(s)=D_{22}(s)=1 \tag{3.27}$$

หาค่า $D_{12}(s)$ จากสมการที่ 3.18 จะได้

$$D_{12}(s)=-\frac{G_{12}}{G_{11}}=-\left(\frac{3}{1+10s}\cdot\frac{1+10s}{4}\right)=-\frac{3}{4} \tag{3.28}$$

หาค่า $D_{21}(s)$ จากสมการที่ 3.19 จะได้

$$D_{21}(s)=-\frac{G_{21}}{G_{22}}=-\left(\frac{3}{1+10s}\cdot\frac{1+10s}{4}\right)=-\frac{3}{4} \tag{3.29}$$

เขียนให้อยู่ในรูปของทรานส์เฟอร์เมทริกซ์จะได้

$$D(s)=\begin{bmatrix}1 & -3/4\\ -3/4 & 1\end{bmatrix} \tag{3.30}$$

หาทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันใหม่ที่เกิดขึ้นหลังจากที่เพิ่มดีคับปลิ้งเข้าไปได้จากสมการที่ 3.23 และสมการที่ 3.24 ซึ่งจะหา $G_{n_{11}}(s)$ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}G_{n_{11}}(s)&=G_{11}-\frac{G_{12}G_{21}}{G_{22}}\\&=\frac{3}{1+10s}-\left(\frac{4}{1+10s}\cdot\frac{4}{1+10s}\right)\left(\frac{1+10s}{3}\right)\\&=-\frac{7}{3(1+10s)}\end{aligned} \tag{3.31}$$

และหา $G_{n_{22}}(s)$ ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_{n_{22}}(s) = G_{22} - \frac{G_{12}G_{21}}{G_{22}}$$
$$= \frac{3}{1+10s} - \left(\frac{4}{1+10s}\cdot\frac{4}{1+10s}\right)\left(\frac{1+10s}{3}\right) \quad (3.32)$$
$$= -\frac{7}{3(1+10s)}$$

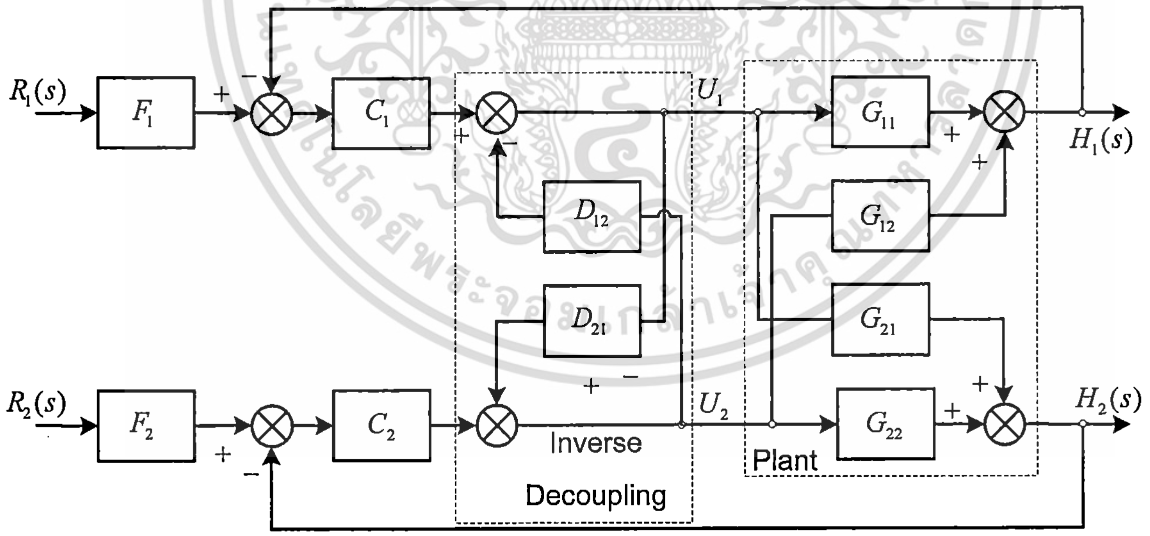
เขียนสมการใหม่ให้อยู่ในรูปแบบของทรานส์เฟอร์เมทริกซ์ได้ดังนี้

$$G_n(s) = \begin{bmatrix} -\frac{7}{3(1+10s)} & 0 \\ 0 & -\frac{7}{3(1+10s)} \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

ค่า $G_n(s)$ ใหม่ที่ได้นี้สามารถนำไปออกแบบตัวควบคุมสำหรับควบคุมต่อไป

3.3.4 ดีคับปลิ้งแบบอินเวอรส์ *(Inverse Decoupling)*

หลักการออกแบบชุดดีคับปลิ้งแบบอินเวอรส์นั้นการหาค่าพารามิเตอร์ของชุดดีคับปลิ้งมีหลักการเช่นเดียวกับการออกแบบดีคับปลิ้งแบบพื้นฐานแต่การเชื่อมต่อเข้ากับกระบวนการ TITO นั้นจะมีลักษณะการเชื่อมต่อดังแสดงได้ในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำแบบ 4 ถัง ที่ประกอบด้วยชุดอินเวอร์สดีคับปลิ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ระบบควบคุมแบบปรับตัวเอง (Adaptive Control System)

ตัวควบคุมแบบ Adaptive หมายถึงตัวควบคุมที่สามารถปรับตัวเองได้ในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงที่พลศาสตร์ของกระบวนการและคุณสมบัติของสิ่งรบกวน

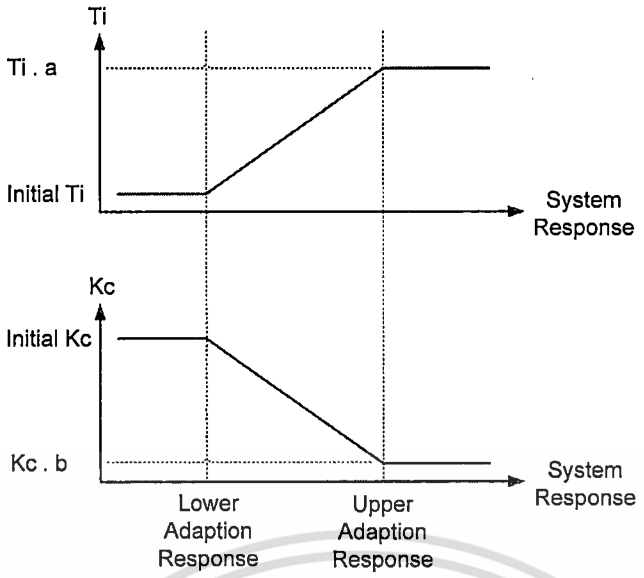
วิธีการของ Ziegler Nichols คือการกำหนดปฏิกิริยาค่าคงที่ให้กับพารามิเตอร์ตัวควบคุมแบบพีไอดีคือ K_c, T_i และ T_d แต่บางระบบผลตอบสนองไม่สามารถบอกได้จึงทำให้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีเหล่านี้ไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิรูป แต่ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองได้ (Adaptive Controller) สามารถช่วยให้ทั้งเสถียรรูปและการตอบสนองของระบบมีผลที่ดี.การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์และอัลกอริทึมของการควบคุมแบบ Real time เพื่อชดเชยการเปลี่ยนแปลงในระบบด้วยตัวของมันเอง. โดยทั่วไปตัวควบคุมจะตรวจสอบการทำงานของระบบเป็นระยะๆ จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชั่นของระบบและปรับเปลี่ยนอัลกอริทึมการควบคุม. โดยมันสามารถเรียนรู้เกี่ยวกับพฤติกรรมของกระบวนการในขณะที่กำลังทำการควบคุมไปพร้อมๆ กันได้

3.4.1 อัลกอริทึมการปรับตัวเองสำหรับพารามิเตอร์ (K_c) และ (T_i) ของตัวควบคุมพีไอดี

เกณฑ์ (K_c) และ (T_i) ของตัวควบคุมพีไอดีมีผลโดยตรงต่อผลตอบสนองของระบบ เทอมของ Ti มีผลต่อความสัมพันธ์กับความผิดพลาดของระบบที่แตกต่างกันระหว่างระบบอ้างอิงกับเอาต์พุตของระบบและเกณฑ์ (K_c) มีผลโดยตรงต่อค่าคงที่เวลา (Time Constant) และค่าพุ่งเกิน (Overshoot) ของระบบ บางครั้งก็ไม่ได้กล่าวถึง (T_d) เนื่องจากตัวควบคุม PI ก็เพียงพอแล้วสำหรับระบบในอุตสาหกรรม ซึ่งตรงกันข้าม เกณฑ์ (K_c) และเทอมของ (T_i) ที่ใช้ในการปรับตัวเองของพีไอดี เนื่องจากว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีจะกลายเป็นตัวควบคุมแบบ PI-Adaptive Self Tune Based และ D-Self Tune Based (PI-D) อัลกอริทึมของเทอมพีไอกำหนดไว้ดังรูปที่ 3.11 และสมการของพีไอกำหนดไว้ดังสมการ 3.34

$$Ti_{ADAPT} = \frac{Ti_{(S.TUNE)}(a-1)}{U_{ADAPT} - L_{ADAPT}}\left(R_{ESPONSE} - L_{ADAPT}\right) + Ti_{(S.TUNE)} \qquad a > 1$$
$$Tc_{ADAPT} = \frac{Kc_{(S.TUNE)}(b-1)}{U_{ADAPT} - L_{ADAPT}}\left(R_{ESPONSE} - L_{ADAPT}\right) + Kc_{(S.TUNE)} \qquad 1 > b \geq 0 \qquad (3.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 อัลกอริทึมในการปรับตัวเอง

ในรูปที่ 3.11 ค่าเริ่มต้นของ (K_c) และค่าเริ่มต้นของ Ti เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่พบในวิธีการหาปฏิกิริยาของกระบวนการของ Ziegler-Nichols "a" คือสัมประสิทธิ์ของเทอม (T_i) เหนือเส้นกราฟ และ "b" คือสัมประสิทธิ์ของเทอม (K_c) ได้เส้นกราฟซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า a มีค่ามากกว่า 1 และ b มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ผลตอบสนองของระบบแทนด้วยสัญลักษณ์ทางเอาต์พุต (Voltage, Degrees, Speed, Moment etc.) ตัวอย่างเช่น ผลตอบสนองเอาต์พุตของความเร็วมอเตอร์, Lower Adaption Response คือ ค่าที่ต่ำกว่าความเร็วมอเตอร์ (rpm) และ Upper Adaption Response คือค่าที่สูงกว่าความเร็วมอเตอร์ (rpm) ซึ่งอัลกอริทึมของ Adaptive จะทำงานอยู่ในช่วงนี้

จากเส้น lower adaption อัลกอริทึมจะเริ่มทำงานโดยเพิ่มค่า (T_i) และลดค่า (K_c) ซึ่งเหตุผลในการเพิ่มค่า T_i เพื่อทำให้ค่าผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุดก่อนเข้าสภาวะคงตัวและเหตุผลในการลดค่า (K_c) เพื่อไม่ทำให้มีค่าพุ่งเกินหรือไม่ให้ผลตอบสนองของระบบมีค่าพุ่งเกินที่สูงเกินไป

3.5 Model Reference Adaptive Control

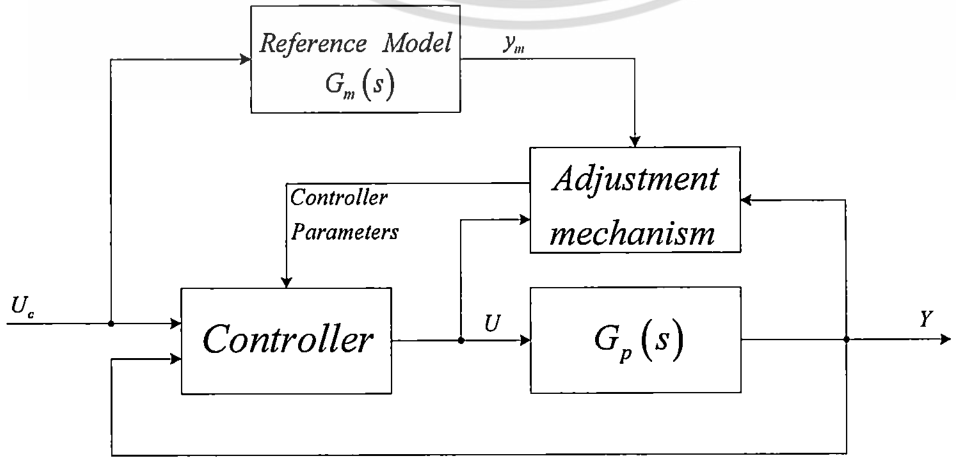
การควบคุมที่ปรับตัวได้ ในระหว่างการพัฒนาทฤษฎีการควบคุมแนวใหม่ จะพบว่าการควบคุมที่ถูกสังเคราะห์โดยการประมาณระบบที่ต้องการควบคุมให้อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์เชิงเส้นไม่แปรตามเวลา และออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีสเตทป้อนกลับ มีคุณสมบัติที่ถูกกำหนดค่าตายตัว (ซึ่งต่อไปจะเรียกตัวควบคุมชนิดนี้ว่า การควบคุมคงที่ หรือ Fixed Controller) การควบคุมคงที่ดังกล่าวไม่สามารถควบคุมพฤติกรรมของระบบให้เป็นไปตามความต้องการ ได้ทุกสถานการณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้ากระบวนการที่ถูกควบคุมมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่า หรือ แปรค่าไปตามเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วงหลังของยุค 1950 ได้มีความสนใจในเรื่องการควบคุมที่ปรับตัวได้มากขึ้น โดยเริ่มจาก gain scheduling technique ซึ่งเป็นการควบคุมที่ปรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุมไปตามสรูปแวดล้อมที่สังเกตได้ (คล้ายกับเป็นการสังเกตสรูปแวดล้อมจากนั้นเปิดตารางเพื่อหาค่าพารามิเตอร์หรือเกณฑ์ที่เหมาะสม) การจะอกแบบตัวควบคุมแบบนี้สามารถทำได้เมื่อเรารู้ความสัมพันธ์ที่แน่นอนระหว่างพฤติกรรมของกระบวนการกับสภาวะภายนอกซึ่งสามารถวัดได้ เช่น ปฏิกิริยาของเครื่องบินจากำสั่งของนักบินนี้โดยตรงกับระดับความสูงของเครื่องบิน เนื่องจากพฤติกรรมของเครื่องบินเป็นที่ทราบกันว่าเป็นฟังก์ชั่นอย่างไรกับความสูง ดังนั้นจึงสามารถออกแบบตัวควบคุมที่สามารถปรับตัวไปตามระดับความสูงต่างๆ

คำนิยามของ ระบบควบคุมที่ปรับตัวได้ มีอยู่หลายนิยาม ยกตัวอย่างเช่น ระบบที่มีการควบคุมซึ่งสามารถปรับตัวเองให้เหมาะสมตามการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการ แต่นิยามที่ใช้กันมากก็คือ ระบบที่ประกอบด้วยการป้อนกลับปฐมภูมิ (Primary Feedback) ซึ่งคอยดูการเปลี่ยนแปลงสัญญาณของกระบวนการ และ การป้อนกลับทุติยภูมิ (Secondary Feedback) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของส่วนควบคุม จากนิยามนี้การป้อนกลับปฐมภูมิเป็นเช่นดั่งการควบคุมที่ไม่สามารถปรับตัวได้โดยทั่วไป ในขณะที่การป้อนกลับทุติยภูมิจะทำให้เกิดสรูปที่สามารถปรับตัวได้ การควบคุมที่ปรับตัวได้ดังที่ได้นิยามข้างต้นต่างจากเทคนิค Gain Scheduling ตรงที่ Gain Scheduling ไม่ได้ใช้การป้อนกลับทุติยภูมิเป็นกลไกในการปรับพารามิเตอร์ แต่ใช้กลไกของการวัดสรูปแวดล้อมภายนอก ดังนั้น เทคนิค Gain Scheduling อาจไม่นับว่าเป็นการควบคุมที่ปรับตัวได้ จุดประสงค์ของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ในการป้อนกลับทุติยภูมิคือต้องการรักษาสมรรถรูป (Performance) ให้สูงแม้ว่าพารามิเตอร์ของกระบวนการอาจไม่ทราบค่าหรือมีค่าที่เปลี่ยนแปลง

การควบคุมแบบปรับตัวเองตามโมเดลอ้างอิง หรือ Model Reference Adaptive Control: MRAC ถูกคิดขึ้นโดย Whitaker เมื่อปี ค.ศ. 1958 โดยการสร้างลูปการควบคุมเพิ่มขึ้นมาเพื่อปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ทำให้ผลตอบสนองของระบบเปลี่ยนตามโมเดลอ้างอิง โครงสร้างของ MRAC แสดงดังรูปที่ 3.12



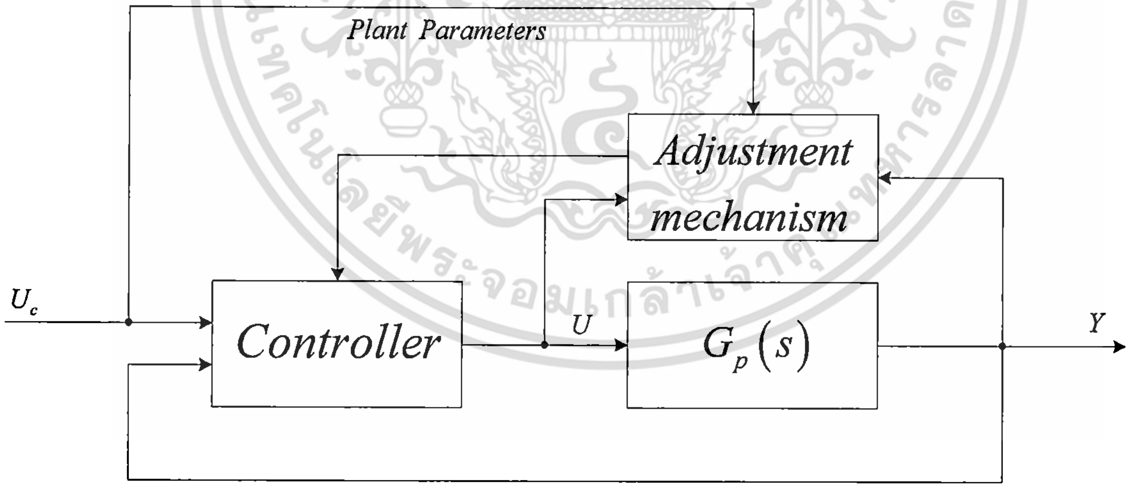
รูปที่ 3.12 โครงสร้างทั่วไปของ MRAC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.12 มีการแบ่งลูปควบคุมออกเป็นสองลูป โดยที่ลูปป้อนกลับเดิมของระบบเรียกว่าลูปภายในและลูปการปรับพารามิเตอร์ตัวควบคุมเรียวว่าลูปภายนอก การหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณได้จากค่าความแตกต่างของสัญญาณเอาต์พุตของกระบวนการจริง y_p กับสัญญาณเอาต์พุตโมเดลอ้างอิง y_m เพื่อปรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ให้เหมาะสม เพื่อลดค่าความแตกต่างของสัญญาณเอาต์พุตทั้งสองให้น้อยลง หรือเป็นศูนย์ สำหรับงานวิจัยนี้จะออกแบบ MRAC ด้วยกฎของ MIT (MIT Rule) ซึ่งเริ่มจากการการคำนวณหาความแตกต่างของสัญญาณเอาต์พุตของกระบวนการจริงกับโมเดลอ้างอิง

ความสามารถในการปรับตัวได้ของระบบปรับตัวทางอ้อมในรูปที่ 3.12 เกิดจากการป้อนกลับทุติยภูมิโดยส่วนประมาณจะประมาณพารามิเตอร์ของกระบวนการและส่งต่อให้กับส่วนออกแบบเพื่อออกแบบพารามิเตอร์ให้กับส่วนควบคุม เมื่อกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ ส่วนออกแบบจะออกแบบพารามิเตอร์ของส่วนควบคุมให้เหมาะสมกับกระบวนการที่เปลี่ยนไป ส่วนควบคุมที่ได้รับการปรับพารามิเตอร์ตามกระบวนการนี้ จะควบคุมพฤติกรรมของกระบวนการ ด้วยกลไกของลูปปฐมภูมิต่อไป

โครงสร้างระบบปรับตัวเองโดยตรงมีรูปแบบคล้ายกับระบบปรับตัวเองโดยอ้อมในรูปที่ 3.12 เพียงแต่ลบส่วนออกแบบทิ้ง และเปลี่ยนส่วนประมาณเป็นส่วนปรับพารามิเตอร์ของส่วนควบคุมดังในรูปที่ 3.13

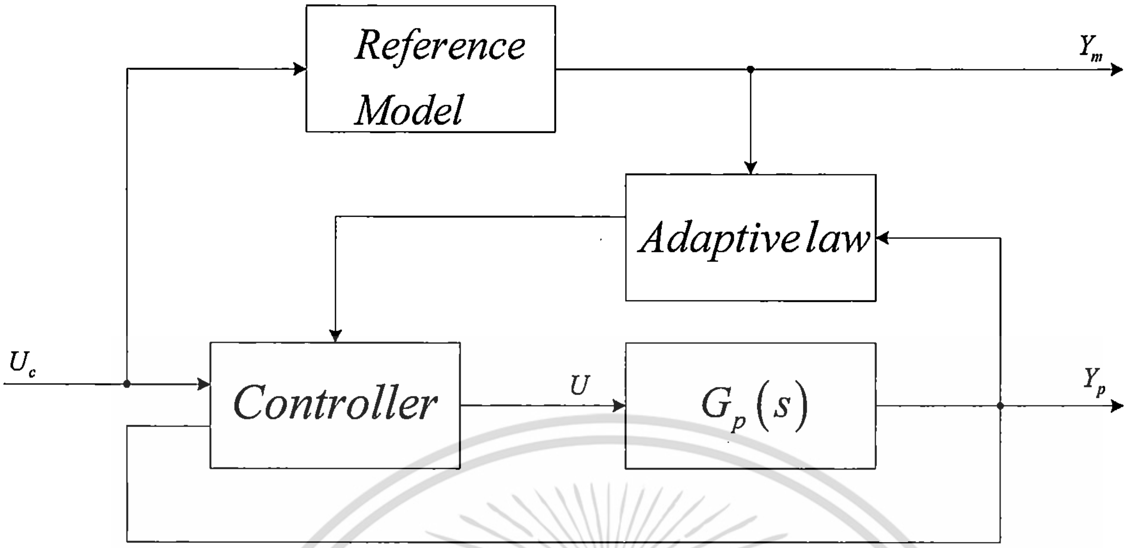


รูปที่ 3.13 โครงสร้างระบบปรับตัวเองโดยตรง

ทั้งโครงสร้างของ การปรับตัวโดยตรง และโดยอ้อม มีข้อดีและข้อเสีย ข้อดีแบบทางอ้อมคือความอิสระที่จะเลือกรูปแบบของส่วนออกแบบ ข้อดีที่สองของแบบทางอ้อมคือ การมีส่วนประมาณพารามิเตอร์ จะทำให้ผู้ปฏิบัติการได้รู้ถึงสถานะปัจจุบันของกระบวนการและข้อผิดพลาดต่างๆ ของกระบวนการ อย่างไรก็ตามการปรับตัวเองโดยอ้อมไม่สะดวกต่อการวิเคราะห์ทางทฤษฎี เพราะว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบจะซับซ้อน โครงสร้างการปรับตัวเองโดยตรงมักจะซับซ้อนน้อยกว่า ดังนั้นเราสามารถพิสูจน์เสถียรรูปของระบบโดยรวมได้ง่ายกว่า



รูปที่ 3.14 บล็อกไดอะแกรม MRAC

ในรูปที่ 3.14 แสดงให้เห็นว่าส่วนควบคุมปฐมภูมิจะทำหน้าที่ควบคุมพฤติกรรมของระบบลูปปิดในลัษณะเดียวกันกับระบบที่ปรับตัวเองโดยทั่วไป อย่างไรก็ตามสถานการณ์ที่เราไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ของระบบ หรือ พารามิเตอร์ของระบบแปลค่าไปตามเวลา การตั้งค่าพารามิเตอร์ของส่วนควบคุมปฐมภูมิให้ตายตัว จะไม่สามารถควบคุมพฤติกรรมของระบบลูปปิดให้เป็นไปตามต้องการได้ทุกสถานการณ์

โดยเทคนิคของ MRAC ผลตอลสนองหรือพฤติกรรมของระบบต่ออินพุต U_c ตามที่เราต้องการสามารถกำหนดโดยรูปแบบอ้างอิง หรือ Reference Model ซึ่งแสดงด้วย y_m องค์ประกอบในการปรับตัวจะติดตามเปรียบเทียบผลตอบสนองของกระบวนการ y_p กับ y_m และ ตั้งค่าพารามิเตอร์ให้กับส่วนควบคุมปฐมภูมิเพื่อที่จะนำผลตอบสนองของกระบวนการให้เข้าสู่ผลตอบสนองของโมเดลอ้างอิง ในองค์ประกอบของส่วนปรับตัวเอง นอกจากใช้ผลตอบสนองของกระบวนการ y_p แล้วยังอาจใช้ สเตท (State) ของกระบวนการ x_p และอินพุตของกระบวนการ U_c ลัษณะของ MRAC ส่วนใหญ่มักจะเป็นการปรับตัวเองโดยตรง เพราะไม่มีส่วนของการประมาณพารามิเตอร์ของกระบวนการอย่างชัดเจน

จากรูปที่ 3.14 แสดงระบบ MRAC ซึ่งประกอบด้วยลูปป้อนกลับสองลูป ซึ่งได้กล่าวไว้ในรูปที่ 3.12 และ 3.13 ลูปในประกอบด้วยลูปปป้อนกลับปฐมภูมิ ลูปนอกประกอบด้วยส่วนที่ทำหน้าที่ปรับตัวเองโดยทั่วไป ลูปป้อนกลับปฐมภูมิจะทำงานที่ความเร็วสูงกว่าลูปปรับตัวเอง ดังนั้นพารามิเตอร์ของกระบวนการจะถูกสมมุติว่า เปลี่ยนแปลงช้ากว่าสเตทของกระบวนการ

ในกรณีรูปที่ 3.14 แสดงว่าโมเอลอ้างอิงจะขนานกับกระบวนการ แต่ไม่จำเป็นว่าระบบปรับตัวเอง MRAC จำเป็นต้องมีโมเดลอ้างอิงที่ขนานกับกระบวนการเสมอไป ระบบ MRAC

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บางครั้งจะนำโมเดลอ้างอิงต่ออนุกรมกับกระบวนการ ในการต่ออนุกรมนี้ โมเดลอ้างอิงจะทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดอินพุตอ้างอิง และให้ประโยชน์ต่อการควบคุมตรงที่ระบบโดยทั่วไปจะไม่สามารถตอบสนองต่ออินพุตที่เป็นขั้นบันไดได้ ดังนั้นตัวกำเนิดอินพุตอ้างอิงจะกรองสัญญาณอินพุตให้เรียบขึ้น และตอบสนองต่อกระบวนการจะเป็นไปตามอินพุตได้ดีขึ้น ในลักษณะนี้มีผลต่อการอิ่มตัวของระบบด้วย (Saturation) นอกจากโมเดลอ้างอิงจะต่อขนาน และต่ออนุกรมกับกระบวนการแล้วยังสามารถนำทั้งสองแบบมารวมกันเป็น MRAC แบบ อนุกรม-ขนานได้อีก ซึ่งมีข้อดีข้อเสียต่างกัน ในงานวิจัยนี้จะศึกษาเฉพาะ MRAC แบบที่มีรูปแบบอ้างอิงที่ต่อขนานกับกระบวนการ (Parallel MRAC) ส่วนสำคัญที่สุดใน MRAC ได้แก่ การออกแบบกฎการปรับตัวเอง ซึ่งมีหลายวิธี ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษา และทดลองเฉพาะวิธีของ MIT

3.5.1 องค์ประกอบของ MRAC

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงส่วนประกอบที่สำคัญของระบบ MRAC อันได้แก่ กระบวนการ (Process) ตัวควบคุมปฐมภูมิ (Process) ตัวควบคุมปฐมภูมิ (Primary Controller) รูปแบบอ้างอิง (Reference Model) และที่มาของกฎการปรับตัว

- กระบวนการ

แม้ว่ากระบวนการจะไม่อยู่ในส่วนของการออกแบบตัวควบคุมที่ปรับตัวเองได้ แต่เนื่องจากกระบวนการเป็นส่วนที่ตัวควบคุมจะต้องเกี่ยวข้องด้วย จึงจำเป็นที่จะได้พิจารณาในส่วนนี้ ในการออกแบบตัวควบคุมนั้นต้องสมมุติกระบวนการให้เป็นไปในทิศทางบางอย่างที่อาจไม่เป็นจริงในธรรมชาติ ยกตัวอย่างเช่นทฤษฎีการปรับตัวที่จะพิจารณาต่อไปจะต้องสมมุติว่ากระบวนการควรจะเป็นเชิงเส้น ควรทราบอันดับของทรานเฟอร์ฟังก์ชั่น และควรรู้ถึงเครื่องหมายของ DC Gain รวมทั้งทรานส์เฟอร์ฟังก์ชั่นควรเป็นแบบเฟสต่ำสุด และ กระบวนการควรจะปราศจากการรบกวน (Disturbance)

ดังที่กล่าวไว้แล้วว่ากระบวนการจะไม่มีทางสอดคล้องกับเงื่อนไขทั้งหมดนี้ ยกตัวอย่างเช่นอันดับของกระบวนการที่แน่นอนเราไม่สามารถรู้ได้ ซึ่งโดยมากอันดับของกระบวนการที่นำมาใช้จะมาจากการวิเคราะห์ถึงส่วนประกอบของระบบ หรือ ดูผลตอบสนองทั้งในโดเมนของเวลา หรือโดเมนความถี่ และเป็นที่แน่นอนว่าไม่มีกระบวนการที่เป็นเชิงเส้นอย่างแท้จริง หรือปราศจากการรบกวน

อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าคุณสมบัติของกระบวนการจะไม่สามารถเป็นไปตามที่สมมุติได้ทั้งหมดก็ไม่ได้หมายความว่าการควบคุมที่สามารถปรับตัวได้จะไม่สามารถเป็นไปได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญในอันดับต่อมาก็คือจะทำอย่างไรให้ตัวควบคุมที่ปรับตัวได้สามารถทำงานได้ในสภาวะที่ไม่สมบูรณ์ นั่นคือสามารถทำงานได้ในกระบวนการจริงๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ส่วนควบคุมปฐมภูมิ (Primary Controller)

ส่วนควบคุมปฐมภูมิดังรูปที่ 3.12 โดยหลักการสามารถมีโครงสร้างใด ๆ ก็ได้ตามการออกแบบตัวควบคุมเชิงเส้น อย่างไรก็ตามควรจะสอดคล้องกับคุณสมบัติบางประการ

ประการแรกจะต้องสอดคล้องกับสภาวะ Perfect Model-Matching ซึ่งหมายถึงการตั้งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจะต้องทำให้พฤติกรรมของลูปวงปิดเท่ากับรูปแบบอ้างอิงได้

ประการที่สองสำหรับการใช้การควบคุมโดยตรง สัญญาณควบคุม U_c จะต้องมีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้นต่อพารามิเตอร์ โดยทั่วไปส่วนควบคุมปฐมภูมิที่ใช้ใน MRAC ประกอบด้วยส่วนที่ทำหน้าที่กำเนิดเวคเตอร์ของสัญญาณ (Signal Vector)

- รูปแบบอ้างอิง (The Reference Model)

รูปแบบอ้างอิงจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงผลตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิง U_c ที่เราต้องการ รูปแบบอ้างอิงมักจะได้จากการทดลองภายในคอมพิวเตอร์ การกำหนดรูปแบบอ้างอิงจะต้องกระทำให้สมเหตุสมผลคือระบบในความเป็นจริงสามารถเป็นไปตามรูปแบบนั้นๆ ได้ เพราะหากกำหนดรูปแบบอ้างอิงที่มีผลตอบสนองเร็วเกินไปจะทำให้เกิดสภาวะอิ่มตัว (Saturation) ในส่วนหนึ่งส่วนใดของระบบได้ และจะนำมาซึ่งความไม่เสถียรของระบบดังจะได้แสดงถึงผลของการอิ่มตัวต่อการเสถียรรูปของระบบต่อไปในการทดลอง

- กฎการปรับตัว (Adaptive Laws)

กุญแจสำคัญในการออกแบบ MRAC คือ กฎการปรับตัวและการพิสูจน์กฎการปรับตัวซึ่งในที่นี้จะใช้วิธีของ MIT โดยสมมุติว่ากระบวนการเป็นเชิงเส้นที่มีพารามิเตอร์ไม่ทราบค่าหรือแปรค่าตามเวลา และกระบวนการมีหนึ่งอินพุต หนึ่งเอาต์พุต และการควบคุมเป็นสเตทป้อนกลับและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่จะปรับคือเกนป้อนกลับ (Feedback Gain)

สำหรับงานวิจัยนี้จะออกแบบ MRAC ด้วยกฎของ MIT (MIT Rule) ซึ่งเริ่มจากการการคำนวณหาความแตกต่างของสัญญาณเอาต์พุตของกระบวนการจริงกับโมเดลอ้างอิง

$$e = y_p - y_m \tag{3.35}$$

การปรับพารามิเตอร์ตัวควบคุมเพื่อลดความแตกต่างของสัญญาณเอาต์พุตของกระบวนการจริงกับโมเดลอ้างอิงด้วย *Adjustment Mechanism* เป็นกฎของ MIT ซึ่งมีสมการพื้นฐานคือ

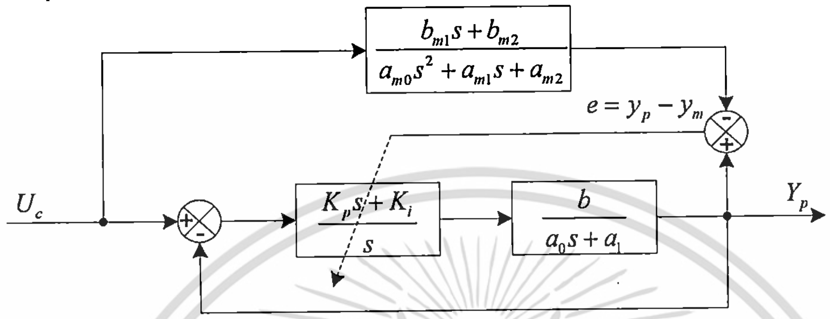
$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma\varepsilon\frac{\partial\varepsilon}{\partial\theta} \tag{3.36}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ θ คือพารามิเตอร์ของตัวควบคุม, $\partial\varepsilon/\partial\theta$ ความไวของค่าผิดพลาดเมื่อเทียบกับ θ และ γ ค่าเกณฑ์ในการปรับความเหมาะสม

3.5.2 เทคนิคการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วย MRAC

ในส่วนนี้จะนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วย MRAC เมื่อพิจารณาระบบควบคุมอันดับหนึ่ง $\frac{b}{a_0 s + a_1}$ จะได้โครงสร้างของระบบควบคุมดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 โครงสร้างของระบบควบคุม

จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.15 หาทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันได้ตามสมการที่ (3.37)

$$\frac{Y_p(s)}{U_c(s)} = \frac{b(K_p s + K_i)}{a_0 s^2 + (a_1 + bK_p)s + bK_i} \tag{3.37}$$

และ

$$Y_p(s) = \frac{b(K_p s + K_i)}{a_0 s^2 + (a_1 + bK_p)s + bK_i} \cdot U_c(s) \tag{3.38}$$

จากสมการที่ (3.37) จะได้จะได้ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของโมเดลอ้างอิงดังสมการที่ (3.39)

$$\frac{Y_m(s)}{U_m(s)} = \frac{b_{m1}s + b_{m2}}{a_{m0}s^2 + a_{m1}s + a_{m2}} \tag{3.39}$$

จากสมการที่ (3.37) มีค่าตัวแปรที่ไม่รู้ค่าคือ K_p และ K_i ซึ่งหาได้จากสมการที่ (3.40)

$$\begin{aligned} \frac{dK_p}{dt} &= -\gamma_p \frac{\partial J}{\partial K_p} = -\gamma_p \left(\frac{\partial J}{\partial \varepsilon}\right)\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right)\left(\frac{\partial y}{\partial K_p}\right) \\ \frac{dK_i}{dt} &= -\gamma_i \frac{\partial J}{\partial K_i} = -\gamma_i \left(\frac{\partial J}{\partial \varepsilon}\right)\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right)\left(\frac{\partial y}{\partial K_i}\right) \end{aligned} \tag{3.40}$$

เมื่อ $\partial J/\partial\varepsilon = \varepsilon$, $\partial\varepsilon/\partial y = 1$ และ $\partial y/\partial K_p, \partial y/\partial K_i$ สามารถหาได้จากสมการที่ (3.41, 3.42) ตามลำดับ

$$\frac{\partial Y_p}{\partial K_p} = \frac{bs}{a_0 s^2 + (a_1 + bK_p)s + bK_i} \cdot \left[-Y_p\right] \tag{3.41}$$

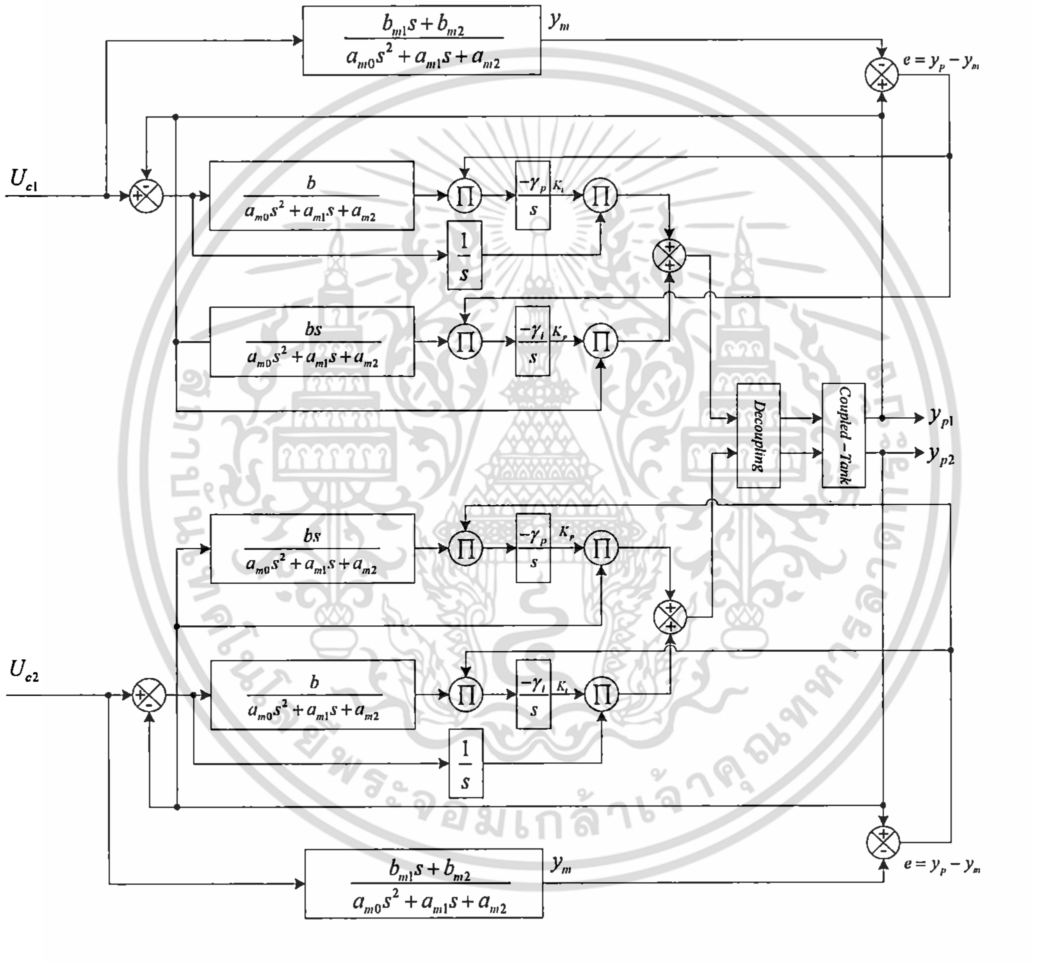
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial Y_p}{\partial K_i} = \frac{b}{a_0 s^2 + \left(a_1 + bK_p\right)s + bK_i} \cdot \left[U_c - Y_p\right] \tag{3.42}$$

แทนสมการที่ (3.41, 3.42) ลงในสมการ (3.40) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{dK_p}{dt} &= -\gamma_p \frac{\partial J}{\partial K_p} = -\gamma_p \varepsilon \frac{bs}{a_0 s^2 + \left(a_1 + bK_p\right)s + bK_i} \cdot \left[-Y_p\right] \\ \frac{dK_i}{dt} &= -\gamma_i \frac{\partial J}{\partial K_i} = -\gamma_i \varepsilon \frac{b}{a_0 s^2 + \left(a_1 + bK_p\right)s + bK_i} \cdot \left[U_c - Y_p\right] \end{aligned} \tag{3.43}$$

สมการที่ (3.43) เป็นอัลกอลิทึมของ MRAC สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 โครงสร้างของระบบควบคุมสำหรับ Couple-Tank Process

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 บทสรุป

การใช้หลักการหรือทฤษฎีต่างๆ มาช่วยสำหรับการออกแบบตัวควบคุมนั้น จะต้องทำการศึกษาทฤษฎีนั้นเป็นอย่างดี ไม่ว่าจะเป็นข้อดี ข้อเสีย ข้อยกเว้นต่างๆ หรือเรียกสั้นๆ ว่า “กฎ” นั่นเอง เนื่องจากว่าถ้าเราไม่เข้าใจกฎของแต่ละทฤษฎีแล้วนั้นจะทำให้เราไม่สามารถนำทฤษฎีต่างๆ ไปประยุกต์ใช้งานได้เลย เนื่องจากทฤษฎีบางอย่างก็ไม่สามารถใช้กับกระบวนการได้ทุกกระบวนการ เพราะฉนั้นแล้วเราจะต้องพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานจริง สำหรับในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีต่างๆ ที่ถูกนำมาใช้ในงานวิจัย โดยได้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของแต่ละวิธีไว้ละเอียดพอสมควร ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าเนื้อหาในบทนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากในงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
วิธีการออกแบบตัวควบคุม

4.1 กล่าวนำ

การออกแบบตัวควบคุมหมายถึงการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเพื่อให้เป็นไปตามเงื่อนไขหรือข้อกำหนดทำเราต้องการซึ่งเราจำเป็นจะต้องออกแบบตัวควบคุมให้เรียบร้อยก่อนที่จะทำการทดลองจริง สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะประกอบไปด้วย วิธีการหาสมการคุณลักษณะของกระบวนการ การออกแบบดีคับปลิ้ง การออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วย MRAC โดยวิธีการออกแบบตัวควบคุมดังที่กล่าวมานั้นจะอ้างอิงทฤษฎีในบทที่ 3 เป็นหลัก ซึ่งขั้นตอนการออกแบบมีขั้นตอนดังนี้

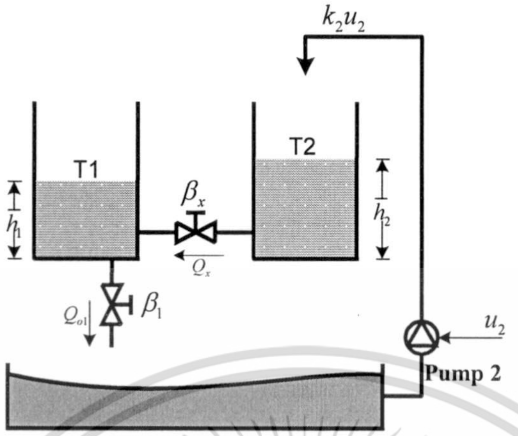
4.2 การหาสมการคุณลักษณะของกระบวนการ

การกำหนดจุดทำงานเพื่อหาสมการคุณลักษณะหรือแบบจำลองของกระบวนการนั้นสำคัญมาก เนื่องจากสมการที่ได้จะถูกนำไปออกแบบหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแล้วจะนำค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ออกแบบได้ไปควบคุมกระบวนการจริง ถ้าค่าสมการคุณลักษณะที่หามาได้ใกล้เคียงกับกระบวนการจริงโอกาสที่ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจะควบคุมกระบวนการก็มีโอกาสเป็นไปได้สูง แต่ถ้าสมการคุณลักษณะที่หามาได้ไม่ใกล้เคียงกับกระบวนการจริง โอกาสที่ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจะควบคุมกระบวนการก็มีโอกาสเป็นไปได้น้อยหรืออาจจะควบคุมไม่ได้เลย เพราะฉนั้นการหาสมการคุณลักษณะของกระบวนการจึงถือว่าสำคัญ ซึ่งหลักการหาจุดทำงานของกระบวนการคือ 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 สามารถหาได้จากการวัดหรือดูได้จากคู่มือของอุปกรณ์นั้น เช่น ขนาดพื้นที่ของถังทั้ง 2 (A_1, A_2) พื้นที่หน้าตัดของท่อทางออกเอาต์พุต (a_1, a_2, a_x) อัตราการขยายของปั๊ม (k_1, k_2) เป็นต้น ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่เราหาได้ทั้งหมดจะนำไปแทนค่าลงในสมการที่ 2.22 ซึ่งเป็นสมการคุณลักษณะของกระบวนการที่เขียนอยู่ในรูปของ ทรานส์เฟอร์เมทริกซ์ แต่อย่างไรก็ตามยังมีค่าตัวแปรที่เราไม่ทราค่าอยู่ 3 ตัวแปรคือค่า T_1, T_2 และ T_x (T_1 คือค่าคงตัวเวลาของถังที่ 1, T_2 คือค่าคงตัวเวลาของถังที่ 2, T_x คือค่าคงตัวเวลาระหว่างถังที่ 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 คือค่าสัมประสิทธิ์การเปิดวาล์วที่ต่อทางด้านเอาต์พุตของถังที่ 1 และถังที่ 2, β_x คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเปิดวาล์วที่ต่อระหว่างถังที่ 1 และถังที่ 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉนั้นแล้วเราจึงจำเป็นจะต้องหาค่า 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 เป็นศูนย์และปิดเอาต์พุตของถังน้ำใบที่ 2 พิจารณาจากรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 รูปประกอบการพิจารณาเพื่อหาค่า β_1, β_x

จากรูปที่ 4.1 เมื่อ $k_2 = 4.8$, $u_2 = 2V$, และ $a_x = 0.1963cm^2$ ทำการป้อนแรงดันอินพุตให้กับปั๊มรอจนกว่าระดับน้ำในถังทั้งสองเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วทำการบันทึกค่าระดับน้ำทั้งสองซึ่งได้ $\bar{h}_1 = 1.5\ cm$, $\bar{h}_2 = 4.4\ cm$

พิจารณาจากถังที่ 1

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

พิจารณาจากถังที่ 2

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

จากสมการที่ 4.2 คำนวณหาค่า β_x จะได้ว่า

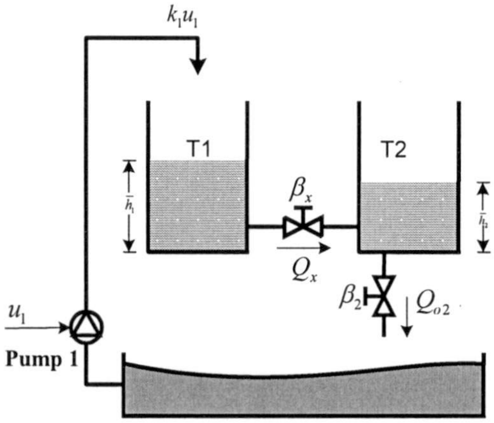
$$\beta_x = \frac{k_2 u_2}{a_x\sqrt{2g\left(\bar{h}_2 - \bar{h}_1\right)}} = \frac{4.8 \times 2}{0.1963 \times \sqrt{2 \times 981 \times (4.4 - 1.5)}} = 0.6483 \tag{4.3}$$

จากสมการที่ 4.1 คำนวณหาค่า β_1 จะได้ว่า

$$\beta_1 = \frac{\beta_x\sqrt{2g\left(\bar{h}_2 - \bar{h}_1\right)}}{\sqrt{2g\bar{h}}} = \frac{0.6483 \times \sqrt{2 \times 981 \times (4.4 - 1.5)}}{\sqrt{2 \times 981 \times 1.5}} = 0.9015 \tag{4.4}$$

2. กำหนดให้แรงดันที่จ่ายให้ปั๊มตัวที่ 2 เป็นศูนย์และปิดเอาต์พุตของถังน้ำใบที่ 1 พิจารณาจากรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 รูปประกอบการพิจารณาหาค่า β_2, β_x

จากรูปที่ 4.2 เมื่อ $k_1 = 5.4$, $u_1 = 2.5V$, และ $a_x = 0.1963 cm^2$ ทำการป้อนแรงดันอินพุตให้กับปั๊มรอจนกว่าระดับน้ำในถังทั้งสองเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วทำการบันทึกค่าระดับน้ำทั้งสองซึ่งได้ $\bar{h}_1 = 5.25\ cm$, $\bar{h}_2 = 2.45\ cm$

พิจารณาจากถังที่ 1

$$\frac{dh_1(t)}{dt} = -\frac{\beta_x a_x}{A}\operatorname{sgn}\left(h_1(t) - h_2(t)\right)\sqrt{2g\left|\bar{h}_1(t) - \bar{h}_2(t)\right|} + \frac{k_1}{A}u_1(t) \tag{4.5}$$

พิจารณาจากถังที่ 2

$$\frac{dh_1(t)}{dt} = -\frac{\beta_2 a_2}{A}\sqrt{2g\bar{h}_2(t)} + \frac{\beta_x a_x}{A}\operatorname{sgn}\left(h_1(t) - h_2(t)\right)\sqrt{2g\left|\bar{h}_1(t) - \bar{h}_2(t)\right|} \tag{4.6}$$

จากสมการที่ 4.5 คำนวณหาค่า β_x จะได้ว่า

$$\beta_x = \frac{k_1 u_1}{a_x\sqrt{2g\left(\bar{h}_1 - \bar{h}_2\right)}} = \frac{5.4\times 2.5}{0.1963\times\sqrt{2\times 981\times(5.25-2.45)}} = 0.9279 \tag{4.7}$$

จากสมการที่ 4.6 คำนวณหาค่า β_2 จะได้ว่า

$$\beta_2 = \frac{\beta_x\sqrt{2g\left(\bar{h}_2 - \bar{h}_1\right)}}{\sqrt{2g\bar{h}}} = \frac{0.9279\times\sqrt{2\times 981\times(5.25-2.45)}}{\sqrt{2\times 981\times 2.45}} = 0.9915 \tag{4.8}$$

เนื่องจากค่า β_x มี 2 ค่า ดังนั้นเราจะเลือกเอาค่าที่มากที่สุดคือค่า β_x จากสมการที่ 4.7 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.9279 หลังจากที่หาค่าพารามิเตอร์ของ β_1, β_2 และ β_x ได้แล้วก็จะทำให้สามารถหาค่าตัวแปร T_1, T_2 และ T_x จากสมการที่ 2.16 ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_1 = \frac{A}{\beta_1 a_1}\sqrt{\frac{2\overline{h_1}}{g}} = \frac{66.25}{0.9015\times 0.1963}\times\sqrt{\frac{2\times 5.25}{981}} = 38.7311 \tag{4.9}$$

$$T_2 = \frac{A}{\beta_2 a_2}\sqrt{\frac{2\overline{h_2}}{g}} = \frac{66.25}{0.9919\times 0.1963}\times\sqrt{\frac{2\times 2.45}{981}} = 24.047 \tag{4.10}$$

$$T_x = \frac{A}{\beta_x a_x}\sqrt{\frac{2\left|\overline{h_1}-\overline{h_2}\right|}{g}} = \frac{66.25}{0.9279\times 0.1963}\times\sqrt{\frac{2\left|5.25-2.45\right|}{981}} = 27.4805 \tag{4.11}$$

จากนั้นแทนค่า T_1, T_2 และ T_x ลงในสมการ 2.22 จะได้ทรานส์เฟอร์เมทริกซ์ดังสมการ 4.12

$$\begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{0.08151s+0.006356}{\left(s^2+0.1402\,s+0.003526\right)} & \dfrac{2.637\times 10^{-3}}{\left(s^2+0.1402\,s+0.003526\right)} \\ \dfrac{2.966\times 10^{-3}}{\left(s^2+0.1402\,s+0.003526\right)} & \dfrac{0.07245s+0.004507}{\left(s^2+0.1402\,s+0.003526\right)} \end{bmatrix} \tag{4.12}$$

ในหัวข้อนี้ได้กล่าวถึงการหาค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดของกระบวนการที่จะนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมต่อไป ซึ่งพอจะสรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่หาได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาค่าสมการคุณลักษณะของกระบวนการ

สัญลักษณ์	รายละเอียด	ปริมาตร	หน่วย
k_1, k_2	อัตราการขยายของปั๊ม 1 และปั๊ม 2	4.4 และ 4.8	$cm^3/v\cdot s$
u_1, u_2	แรงดันที่จ่ายให้กับปั๊มตัวที่ 1 และ 2	2.5 และ 2	Volt
a_1, a_2, a_x	พื้นที่หน้าตัดของเอาต์พุตถังที่ 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
$\overline{h}_1, \overline{h}_2$	ความสูงของถังที่ 1 และถังที่ 2	6.75, 2.35	cm
g	แรงโน้มถ่วงของโลก	981	cm/s^2
β_1, β_2	ค่าสัมประสิทธิ์การเปิดวาล์วที่ต่อทางด้านออกของถังที่ และถังที่ 2 1	0.7273 0.5402	-
β_x	ค่าสัมประสิทธิ์การเปิดวาล์วที่ต่อระหว่างถังที่ 1 และถังที่ 2	0.3948	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การออกแบบดีคับปลิ้ง

เนื่องจากสมการที่ 4.12 เป็นทรานส์เฟอร์เมทริกซ์ของกระบวนการที่ยังไม่สามารถนำไปออกแบบตัวควบคุมได้ จึงจำเป็นต้องทำให้ทรานส์เฟอร์เมทริกซ์เป็นเมทริกซ์แทยงมุท (Diagonal Matrix) ก่อน ซึ่งจะใช้วิธีการของ Decoupling เข้ามาช่วย โดยวิธีการหาค่า Decoupling สามารถทำได้ดังนี้

$$D_{11}(s) = D_{22}(s) = 1 \tag{4.13}$$

จากนั้นทำการหาค่า $D_{12}(s)$ ตามสมการที่ 4.14

$$\begin{aligned} D_{12}(s) &= -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} \\ &= -\left(\frac{2.637\times10^{-4}}{(s^2+0.1402\,s+0.003526)}\times\frac{(s^2+0.1402\,s+0.003526)}{0.08151s+0.006356}\right) \\ &= -\frac{2.637\times10^{-4}}{0.08151s+0.006356} \end{aligned} \tag{4.14}$$

จากนั้นทำการหาค่า $D_{21}(s)$ ตามสมการที่ 4.15

$$\begin{aligned} D_{21}(s) &= -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} \\ &= -\left(\frac{2.966\times10^{-4}}{(s^2+0.1402s+0.003526)}\times\frac{(s^2+0.1402s+0.003526)}{0.07245s+0.004507}\right) \\ &= -\frac{2.966\times10^{-4}}{0.07245s+0.004507} \end{aligned} \tag{4.15}$$

จากสมการที่ 4.13, 4.14 และ 4.15 เขียนให้อยู่ในรูปของทรานส์เฟอร์เมทริกซ์จะได้

$$D(s) = \begin{bmatrix} 1 & -\dfrac{2.637\times10^{-4}}{0.08151s+0.006356} \\ -\dfrac{2.966\times10^{-4}}{0.07245s+0.004507} & 1 \end{bmatrix} \tag{4.16}$$

หลังจากที่คำนวณหาค่าของดีคับปลิ้งได้แล้ว นำดีคับปลิ้งไปต่อเข้ากับกระบวนการผลของดีคับปลิ้งจะทำให้ได้สมการที่แยกอิสระจากกันซึ่งในการทดลองขอกำหนดให้เป็น $G_{n_{11}}(s)$ และ $G_{n_{22}}(s)$ โดยสามารถหาได้ตามสมการ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$=\frac{0.08151s+0.006356}{\left(s^2+0.1402s+0.003526\right)}-\left(\frac{2.966\times10^{-3}}{\left(0.07245s+0.004507\right)}\times\frac{2.637\times10^{-3}}{\left(s^2+0.1402s+0.003526\right)}\right)$$

$$=\frac{0.08151\,s^4+0.02285s^3+\left(2.177\times10^{-3}\right)s^2+\left(8.059\times10^{-5}\right)s+1.014\times10^{-6}}{s^5+0.3426s^4+0.04415s^3+\left(2.65\times10^{-3}\right)s^2+\left(7.394\times10^{-5}\right)s+7.736\times10^{-7}} \tag{4.17}$$

$$=\frac{0.08151}{s+0.06221}$$

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

$$=\frac{0.07245s+0.004507}{\left(s^2+0.1402s+0.003526\right)}-\left(\frac{2.637\times10^{-3}}{\left(0.08151s+0.006356\right)}\times\frac{2.966\times10^{-3}}{\left(s^2+0.1402s+0.003526\right)}\right)$$

$$=\frac{0.07245s^4+0.02031s^3+\left(1.935\times10^{-3}\right)s^2+\left(7.163\times10^{-5}\right)s+9.01\times10^{-7}}{s^5+0.3583s^4+0.04857s^3+\left(3.071\times10^{-3}\right)s^2+\left(8.953\times10^{-5}\right)s+9.697\times10^{-7}} \tag{4.18}$$

$$=\frac{0.07245}{s+0.07797}$$

จากสมการที่ 4.17 และ 4.18 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของทรานส์เฟอร์เมทริกซ์ได้ดังสมการที่ 4.19

$$G_n(s)=\begin{bmatrix}\dfrac{0.08151}{s+0.06221} & 0\\ 0 & \dfrac{0.07245}{s+0.07797}\end{bmatrix} \tag{4.19}$$

4.4 การออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วย MRAC

หลังจากที่หาคุณลักษณะของกระบวนการและออกแบบดีคับปลิ้งแล้วต่อไปเราจะทำการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยเทคนิคของ MRA C ซึ่งในบทที่ 3 ได้กล่าวถึงทฤษฎีในการออกแบบไว้แล้วเบื้องต้น การออกแบบจะพิจารณาเป็นสองลูปตามสมการที่ 4.19 โดยทรานส์เฟอร์ฟังก์ชั่นของลูปแรกคือ $\frac{0.08151}{s+0.06221}$ ซึ่งข้อกำหนดในการออกแบบตัวควบคุมพีไอของลูปนี้คือ $P.O.=10\%$, $t_s=150s$ จากสมการที่ 3.41 และ 3.42 จะได้สมการของตัวควบคุม K_p และ K_i ดังนี้

$$K_p=\frac{0.08151s}{s^2+0.04s+0.0011},\ K_i=\frac{0.08151}{s^2+0.04s+0.0011} \tag{4.20}$$

จากสมการที่ 3.39 จะได้จะได้ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของโมเดลอ้างอิงดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{Y_m(s)}{U_m(s)}=\frac{0.0011}{s^2+0.04s+0.0011} \tag{4.21}$$

จากนั้นพิจารณาลูปที่สองคือ $\frac{0.07245}{s+0.07797}$ ซึ่งข้อกำหนดในการออกแบบตัวควบคุมพีไอของลูปนี้คือ $P.O.=10\%$, $t_s=100s$ จากสมการที่ 3.41 และ 3.42 จะได้สมการของตัวควบคุม K_p และ K_i ดังนี้

$$K_p=\frac{0.07245s}{s^2+0.06s+0.0026},\ K_i=\frac{0.07245}{s^2+0.06s+0.0026} \tag{4.22}$$

และจากสมการที่ 3.39 จะได้จะได้ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของโมเดลอ้างอิงดังนี้

$$\frac{Y_m(s)}{U_m(s)}=\frac{0.0026}{s^2+0.04s+0.0026} \tag{4.23}$$

4.5 สรุปผลการทดลอง

หลังจากที่ได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของตัวควบคุมรวมทั้งพารามิเตอร์ของกระบวนการแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็จะนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปจำลองและทดลองซึ่งรายละเอียดจะกล่าวถึงในบทที่ 5 สำหรับการออกแบบตัวควบคุมนั้นจะต้องให้แน่ใจว่าค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่คำนวณได้นั้นถูกต้องเพราะไม่เช่นนั้นแล้วอาจส่งผลต่อการทดลองด้วย ซึ่งขั้นตอนในการออกแบบจึงถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากขั้นตอนหนึ่งที่จะต้องละเอียดและให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
การจำลองและการทดลอง

5.1 กล่าวนำ

สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะว่าด้วยเรื่องเกี่ยวกับการจำลองและการทดลองกระบวนการซึ่งจะนำเอาทฤษฎีทั้งหมดที่ได้กล่าวมาแล้วรวมทั้งเรื่องฮาร์ดแวร์และซอฟท์แวร์มาช่วยในการหาจุดทำงานและหาสมการคุณลักษณะหรือโมเดลของกระบวนการ หลังจากได้สมการคุณลักษณะหรือโมเดลของกระบวนการมาแล้ว การทดลองแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อใหญ่ๆ คือ การหาสมการคุณลักษณะของกระบวนการ การจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม MATLAB และการทดลองควบคุมกระบวนการจริง ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวไว้ดังนี้

5.2 การจำลองกระบวนการ

การจำลองกระบวนการคือการนำเอาสมการคุณลักษณะของกระบวนการที่คำนวณได้ไปจำลองการทำงานในเครื่องคอมพิวเตอร์โดยในการทดลองนี้ใช้โปรแกรม Matlab เป็นโปรแกรมสำหรับจำลองการทำงานของกระบวนการเพื่อทดสอบความเป็นไปได้ก่อนนำไปทดลองจริง โดยการจำลองกระบวนการทำได้ดังนี้

5.2.1 พิจารณาลูปที่หนึ่ง

จากการเพิ่มดีคับปลิ้งเข้าไปในกระบวนการจะทำให้ได้สมการคุณลักษณะของกระบวนการตามสมการที่ 4.8 ซึ่งเขียนอยู่ในรูปของทรานส์เฟอร์เมทริกซ์ จากนั้นทำการพิจารณาลูปที่ 1 โดยโครงสร้างของกระบวนการลูปที่ 1 คือ $G_p(s) = \dfrac{0.08151}{s + 0.06221}$ ต้องการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอตามโครงสร้างในรูปที่ 2 จากสมการของโมเดลอ้างอิงในสมการที่ 3.39 โดยกำหนดให้ $P.O. = 10\ \%$ และ $t_s = 150$ วินาที จะได้ทรานส์ฟังก์ชันของโมเดลอ้างอิงดังสมการที่ (5.20)

$$\frac{Y_m(s)}{U_m(s)} = \frac{s + 0.0011}{s^2 + 0.04s + 0.0011} \tag{5.20}$$

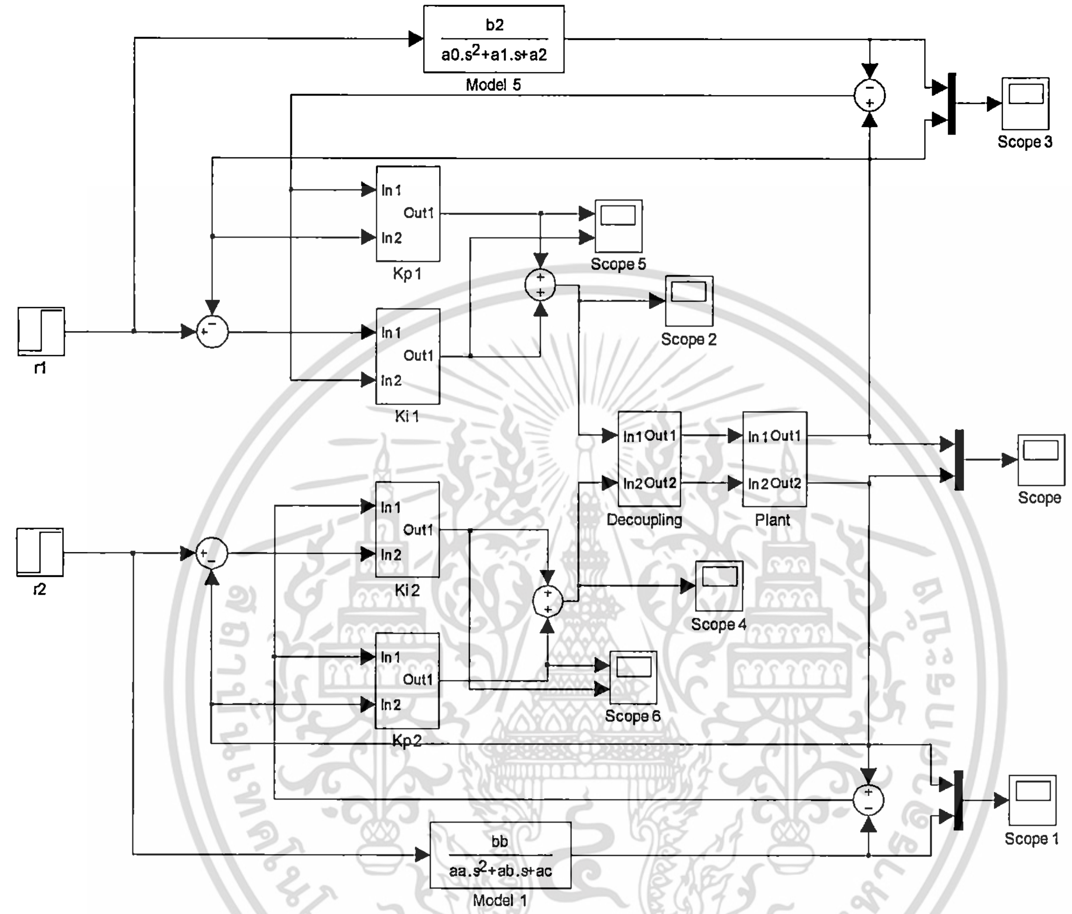
5.2.2 พิจารณาลูปที่สอง

พิจารณาโครงสร้างของกระบวนการลูปที่ 2 คือ $G_p(s) = \dfrac{0.07245}{s + 0.07797}$ ต้องการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอตามโครงสร้างในรูปที่ 3.12 จากสมการของโมเดลอ้างอิงในสมการที่ 3.39 โดยกำหนดให้ $P.O. = 10\ \%$ และ $t_s = 100$ วินาที จะได้ทรานส์ฟังก์ชันของโมเดลอ้างอิงดังสมการที่ (5.21)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{Y_m(s)}{U_m(s)} = \frac{s+0.0026}{s^2+0.06s+0.0026} \tag{5.21}$$

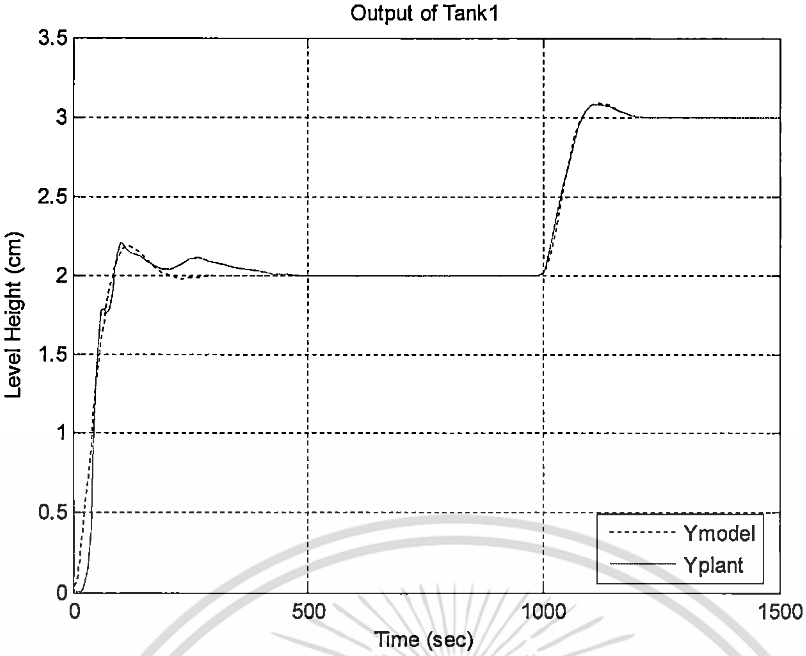
สำหรับโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองกระบวนการคือโปรแกรม Simulink ใน Matlab โดยโครงสร้างของโปรแกรมประกอบไปด้วยกระบวนการ ดีคับปลิ้ง ตัวควบคุมพีไอ และโมเดลอ้างอิง



รูปที่ 5.1 แสดงโปรแกรมในการจำลองกระบวนการ

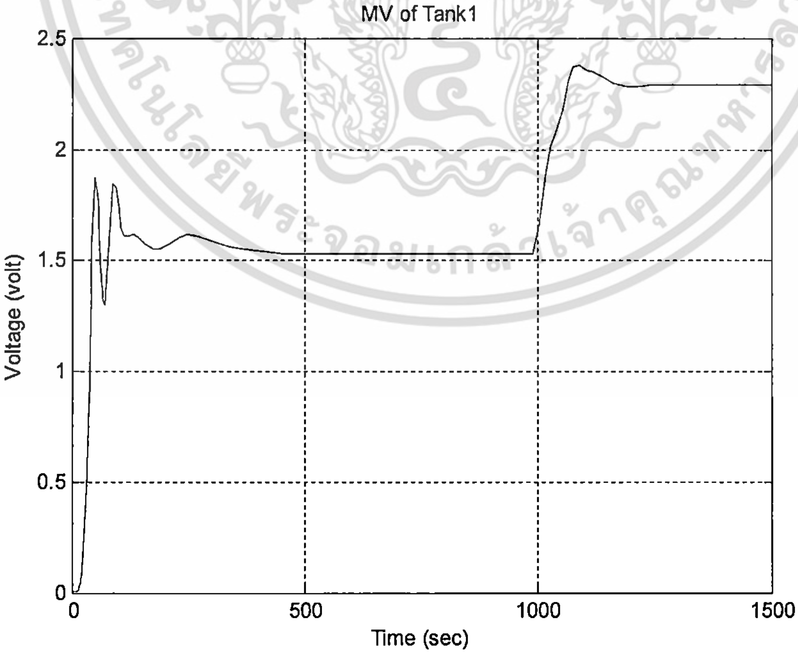
โดยขั้นตอนในการจำลองควบคุมกระบวนการคือเมื่อเริ่มการจำลองทำการป้อนอินพุตแบบขั้นบันไดให้กับลูปทั้งสองไปที่ระดับความสูง 2 เซนติเมตร เมื่อเวลาผ่านไป 500 วินาที เพิ่มอินพุตแบบขั้นบันไดให้กับลูปที่ 2 ไปที่ระดับความสูง 3 เซนติเมตร ในขณะที่ลูปที่ 1 อยู่ที่ระดับเดิม และเมื่อเวลาผ่านไป 1000 วินาที เพิ่มอินพุตแบบขั้นบันไดให้กับลูปที่ 1 ไปที่ระดับความสูง 3 เซนติเมตร การทดลองนี้จะใช้เวลาทั้งหมด 1500 วินาที กำหนดให้ค่า gramma ของตัวควบคุมแบบพีและไอในลูปที่ 1 เท่ากับ -0.1 และ -0.0003 ตามลำดับ และกำหนดให้ค่า gramma ของตัวควบคุมแบบพีและไอในลูปที่ 2 เท่ากับ -0.1 และ -0.0005 ตามลำดับ ซึ่งผลการจำลองแสดงได้ดังรูปกราฟต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 ผลตอบสนองทางเอาต์พุต y_p เทียบกับ y_m ของถังน้ำใบที่ 1

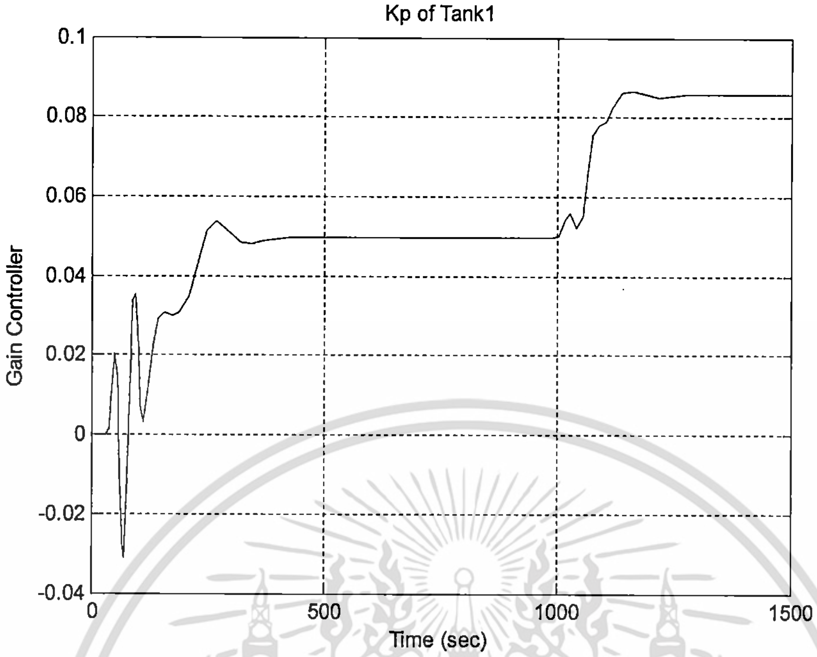
กราฟในรูปที่ 5.2 แสดงผลตอบสนองทางเอาต์พุตของกระบวนการเทียบกับโมเดลอ้างอิงของถังน้ำใบที่ 1 โดยกราฟเส้นหนาแทนกระบวนการส่วนกราฟเส้นประแทนโมเดลอ้างอิง ซึ่งจากการจำลองแสดงให้เห็นว่าเส้นกราฟทั้งสองเส้นมีค่าใกล้เคียงกันมากบางช่วงเวลากราฟทั้งสองเส้นทับกันสนิทแสดงให้เห็นว่าโมเดลของกระบวนการกับโมเดลอ้างอิงมีค่าใกล้เคียงกันมาก



รูปที่ 5.3 สัญญาณควบคุมกระบวนการของถังน้ำใบที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟในรูปที่ 5.3 เป็นกราฟแสดงสัญญาณควบคุมกระบวนการของถังน้ำใบที่ 1 โดยจะปรับค่าตามช่วงเวลาที่กำหนดจากอินพุต

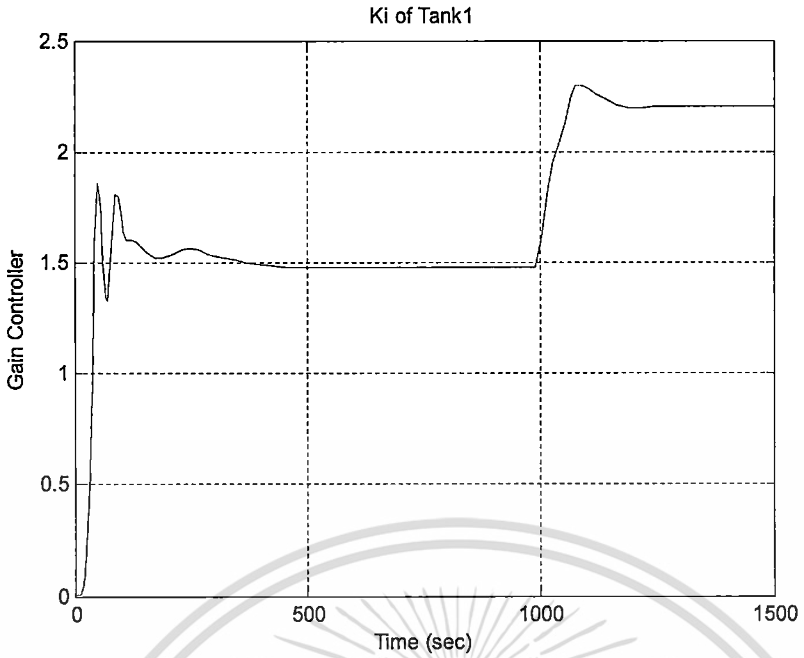


รูปที่ 5.4 สัญญาณตัวควบคุม K_p สำหรับควบคุมถังน้ำใบที่ 1

กราฟในรูปที่ 5.4 เป็นกราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม K_p สำหรับควบคุมระดับน้ำในถังใบที่ 1 โดยค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ในช่วงเวลา 0-400 วินาที ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีจะมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมากเพื่อปรับกระบวนการไปยังค่าเป้าหมาย ส่วนช่วงเวลา 400 - 1000 วินาที ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีจะพยายามปรับตัวให้คงที่เพื่อรักษาระดับน้ำให้คงที่อยู่ที่ค่าเป้าหมาย และจะปรับตัวเองอีกครั้งหลังจากช่วงเวลาที่ 1000 วินาทีเป็นต้นไป เนื่องจากค่าเป้าหมายของระดับน้ำมีค่าเปลี่ยนไป โดยที่เมื่อค่าป้าหมายอยู่ที่ระดับ 2 เซนติเมตร ค่าเกณฑ์พารามิเตอร์ของ K_p จะมีค่าประมาณ 0.05 และเมื่อค่าป้าหมายอยู่ที่ระดับ 3 เซนติเมตร ค่าเกณฑ์พารามิเตอร์ของ K_p จะมีค่าประมาณ 0.085

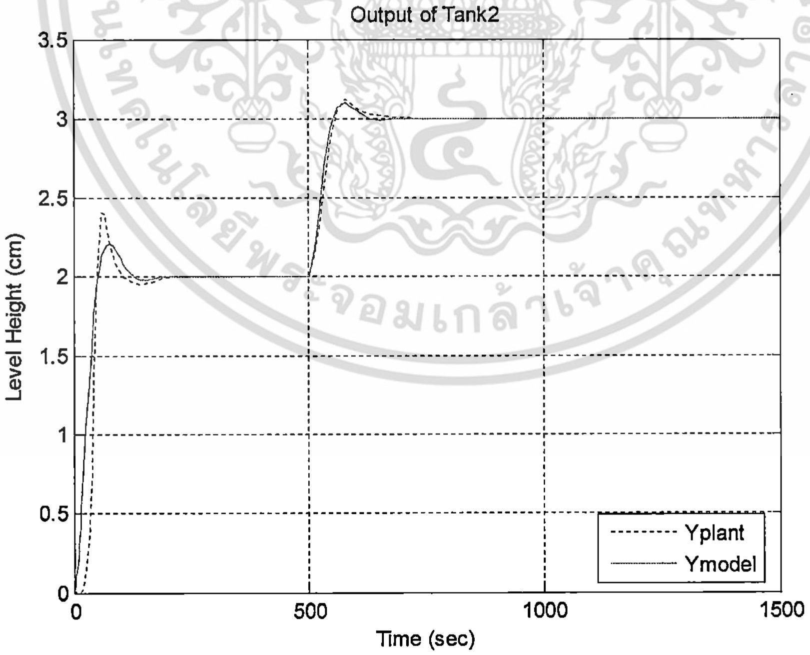
ในทำนองเดียวกันกราฟในรูปที่ 5.5 เป็นกราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม K_i สำหรับควบคุมระดับน้ำในถังใบที่ 1 โดยค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบไอจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ในช่วงเวลา 0-400 วินาที ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบไอจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพื่อปรับกระบวนการไปยังค่าเป้าหมาย ส่วนช่วงเวลา 400 - 1000 วินาที ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบไอจะพยายามปรับตัวให้คงที่เพื่อรักษาระดับน้ำให้คงที่อยู่ที่ค่าเป้าหมาย และจะปรับตัวเองอีกครั้งหลังจากช่วงเวลาที่ 1000 วินาทีเป็นต้นไป เนื่องจากค่าเป้าหมายของระดับน้ำมีค่าเปลี่ยนไป โดยที่เมื่อค่าป้าหมายอยู่ที่ระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 สัญญาณตัวควบคุม K_i สำหรับควบคุมถังน้ำใบที่ 1

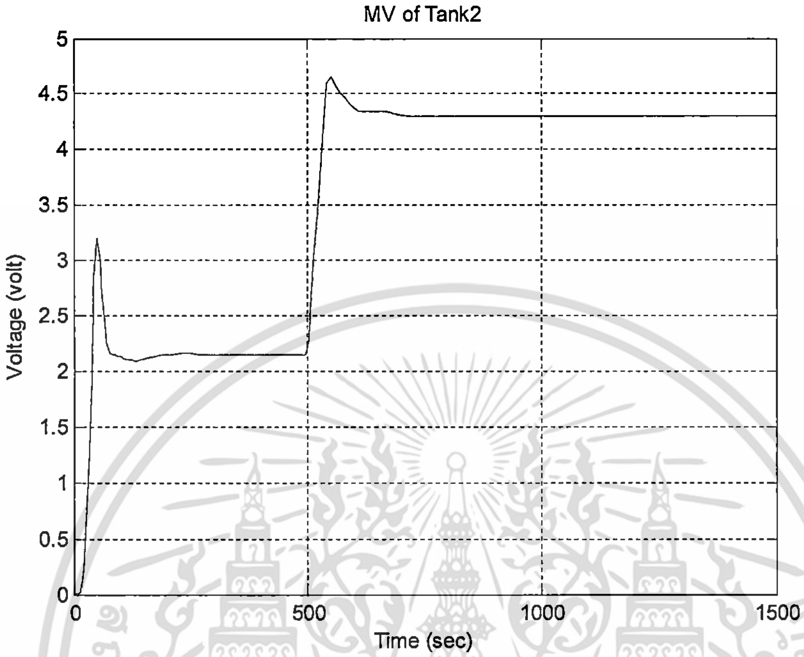
2 เซนติเมตร ค่าเกณฑ์พารามิเตอร์ของ K_i จะมีค่าประมาณ 1.5 และเมื่อค่าเป้าหมายอยู่ที่ระดับ 3 เซนติเมตร ค่าเกณฑ์พารามิเตอร์ของ K_i จะมีค่าประมาณ 2.25



รูปที่ 5.6 ผลตอบสนองทางเอาต์พุต y_p เทียบกับ y_m ของถังน้ำใบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟในรูปที่ 5.6 แสดงผลตอบสนองทางเอาต์พุตของกระบวนการเทียบกับโมเดลอ้างอิงของถังน้ำใบที่ 2 โดยกราฟเส้นประแทนกระบวนการส่วนกราฟเส้นหนาแทนโมเดลอ้างอิง ซึ่งจากการจำลองแสดงให้เห็นว่าเส้นกราฟทั้งสองเส้นมีค่าใกล้เคียงกันมากบางช่วงเวลากราฟทั้งสองเส้นทับกันสนิทแสดงให้เห็นว่าโมเดลของกระบวนการกับโมเดลอ้างอิงมีค่าใกล้เคียงกันเช่นเดียวกับถังน้ำใบที่ 1

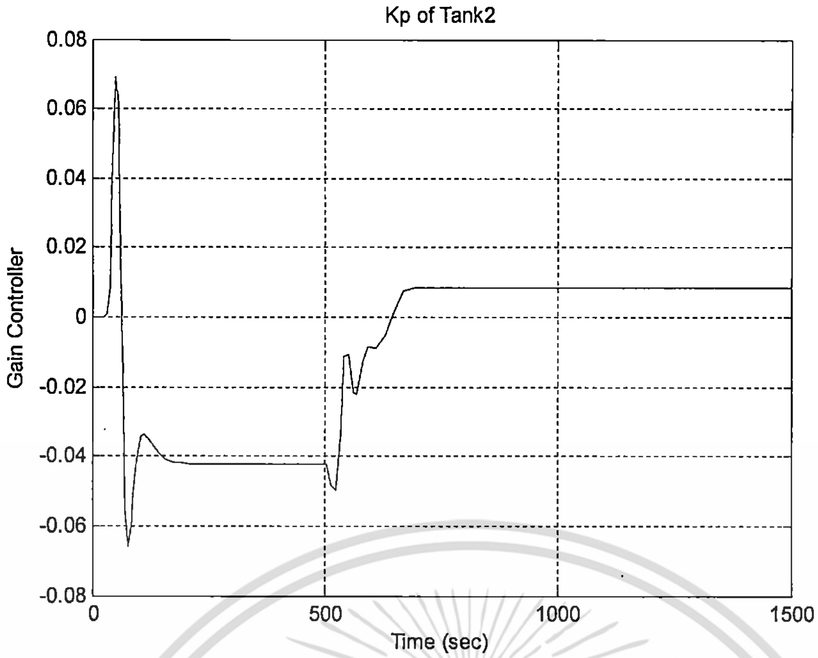


รูปที่ 5.7 สัญญาณควบคุมกระบวนการของถังน้ำใบที่ 2

กราฟในรูปที่ 5.7 เป็นกราฟแสดงสัญญาณควบคุมกระบวนการของถังน้ำใบที่ 2 โดยจะปรับค่าตามช่วงเวลาที่กำหนดจากอินพุต มีค่าประมาณ 2.2 V ที่ระดับน้ำ 2 เซนติเมตร และมีค่าประมาณ 4.3 V ที่ระดับน้ำ 3 เซนติเมตร

กราฟในรูปที่ 5.8 เป็นกราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม K_p สำหรับควบคุมระดับน้ำในถังใบที่ 2 โดยค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ในช่วงเวลา 0-200 วินาที ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีจะมีการเปลี่ยนแปลงมากเพื่อปรับกระบวนการไปยังค่าเป้าหมาย ส่วนช่วงเวลา 200 - 500 วินาที ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีจะพยายามปรับตัวให้คงที่เพื่อรักษาระดับน้ำให้คงที่อยู่ที่ค่าเป้าหมาย และจะปรับตัวเองอีกครั้งหลังจากช่วงเวลาที่ 500 วินาทีเป็นต้นไป เนื่องจากค่าเป้าหมายของระดับน้ำมีค่าเปลี่ยนไป โดยที่เมื่อค่าป้าหมายอยู่ที่ระดับ 2 เซนติเมตร ค่าเกณฑ์พารามิเตอร์ของ K_p จะมีค่าประมาณ -0.04 และเมื่อค่าป้าหมายอยู่ที่ระดับ 3 เซนติเมตร ค่าเกณฑ์พารามิเตอร์ของ K_p จะมีค่าประมาณ 0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

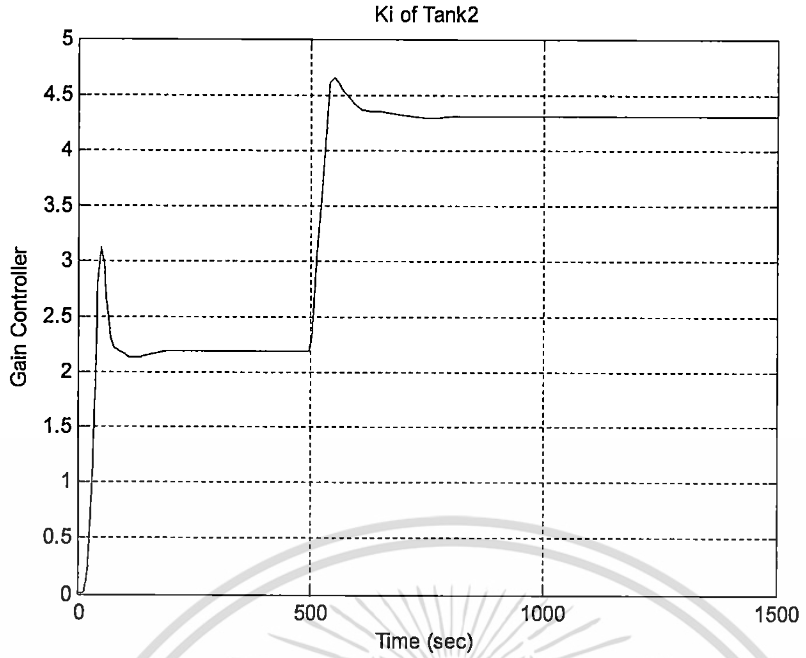


รูปที่ 5.8 สัญญาณตัวควบคุม K_p สำหรับควบคุมถังน้ำใบที่ 2

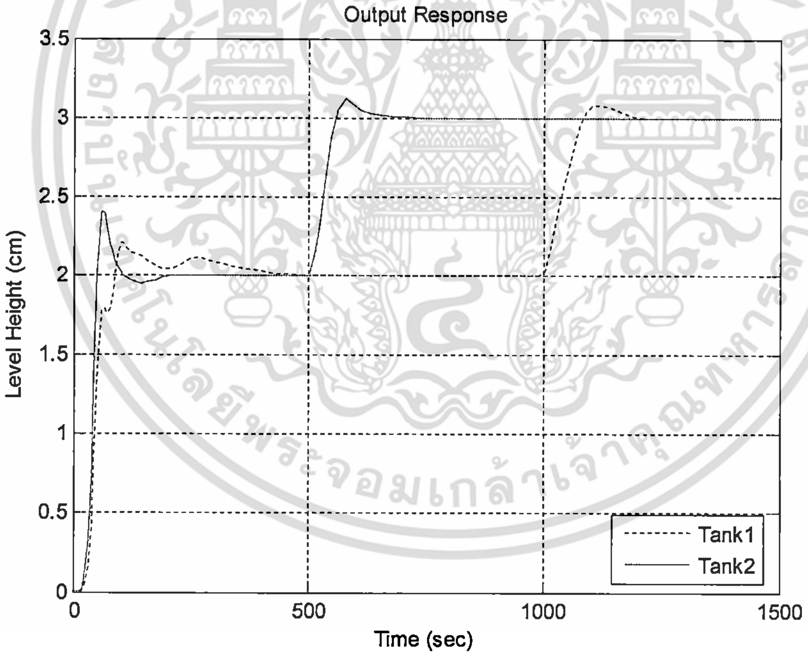
กราฟในรูปที่ 5.9 เป็นกราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม K_i สำหรับควบคุมระดับน้ำในถังใบที่ 2 โดยค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบไอจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ในช่วงเวลา 0-200 วินาที ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบไอจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเพื่อปรับกระบวนการไปยังค่าเป้าหมาย ส่วนช่วงเวลา 200 - 500 วินาที ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบไอจะพยายามปรับตัวให้คงที่เพื่อรักษาระดับน้ำให้คงที่อยู่ที่ค่าเป้าหมาย และจะปรับตัวเองอีกครั้งหลังจากช่วงเวลาที่ 500 วินาทีเป็นต้นไป เนื่องจากค่าเป้าหมายของระดับน้ำมีค่าเปลี่ยนไป โดยที่เมื่อค่าป้าหมายอยู่ที่ระดับ 2 เซนติเมตร ค่าเกณฑ์พารามิเตอร์ของ K_i จะมีค่าประมาณ 2.3 และเมื่อค่าป้าหมายอยู่ที่ระดับ 3 เซนติเมตร ค่าเกณฑ์พารามิเตอร์ของ K_i จะมีค่าประมาณ 4.3

กราฟในรูปที่ 5.10 แสดงผลตอบสนองทางเอาต์พุตของถังน้ำทั้งสองเปรียบเทียบกันโดยการจำลองจะกำหนดให้แต่ละช่วงเวลาระดับน้ำมีระดับที่ต่างกันเพื่อแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมสามารถลดผลกระทบต่อกันของระดับน้ำทั้งสองได้ โดยที่กราฟเส้นประเป็นผลตอบสนองของระดับน้ำถังที่ 1 และกราฟเส้นหนาเป็นผลตอบสนองของระดับน้ำถังที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 สัญญาณตัวควบคุม K_i สำหรับควบคุมถังน้ำใบที่ 2



รูปที่ 5.10 ผลตอบสนองทางด้านเอาต์พุตของกระบวนการ

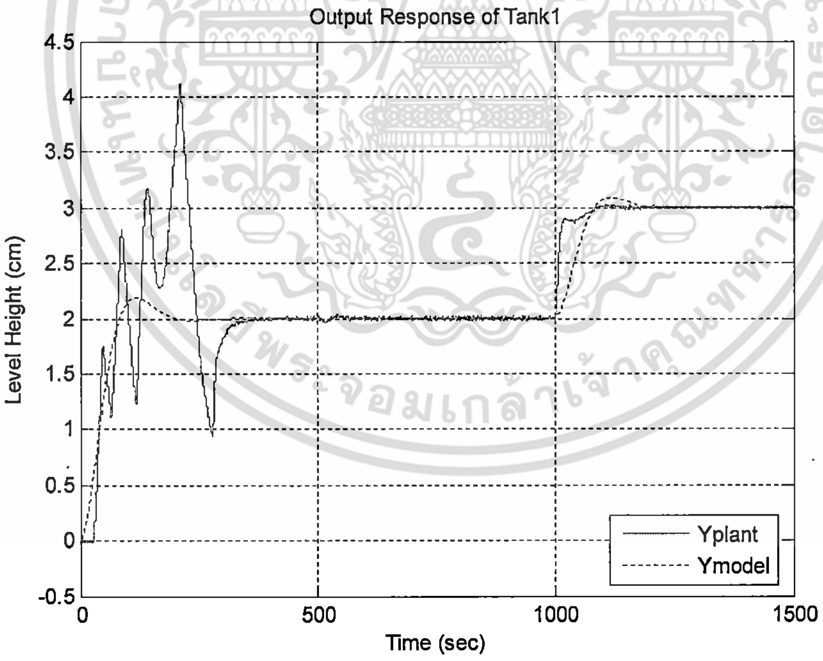
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การทดลองกระบวนการ

หลังจากที่ทำการจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม Simulink เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะทำการนำค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ออกแบบได้ไปทำการทดลองกับกระบวนการจริง โดยที่ยังใช้โปรแกรม Simulink เป็นโปรแกรมสำหรับทำลองกระบวนการ แตกต่างกันที่เปลี่ยนจากโมเดลทางคณิตศาสตร์เป็นกระบวนการจริงแทน โดยกำหนดให้ $P.O. = 10\,\%$ และ $t_s = 150$ วินาที ขั้นตอนดำเนินการทดลองทำได้ดังนี้คือ

1. ช่วงเวลา 0 – 500 วินาที ควบคุมระดับน้ำในถังทั้ง 2 ใบ ให้อยู่ที่ระดับ 2 เซนติเมตร
2. ช่วงเวลา 500 – 1000 วินาที เปลี่ยนระดับน้ำในถังใบที่ 2 ไปที่ระดับ 3 เซนติเมตร ส่วนระดับน้ำในถังใบที่ 1 ยังคงอยู่ที่ระดับ 2 เซนติเมตรเช่นเดิม
3. ช่วงเวลา 1000 – 1500 วินาที เปลี่ยนระดับน้ำในถังใบที่ 1 ไปที่ระดับ 3 เซนติเมตร ส่วนระดับน้ำในถังใบที่ 2 ยังคงอยู่ที่ระดับ 3 เซนติเมตรเช่นเดิม

การทดลองเพื่อพิสูจน์ว่าตัวควบคุมที่ออกแบบสามารถทำงานได้ตามข้อกำหนดที่ได้กำหนดไว้ และเพื่อทดสอบว่าสามารถลดผลกระทบต่อกันของระดับน้ำทั้งสองได้ ซึ่งผลการทดลองสามารถอธิบายได้ดังนี้

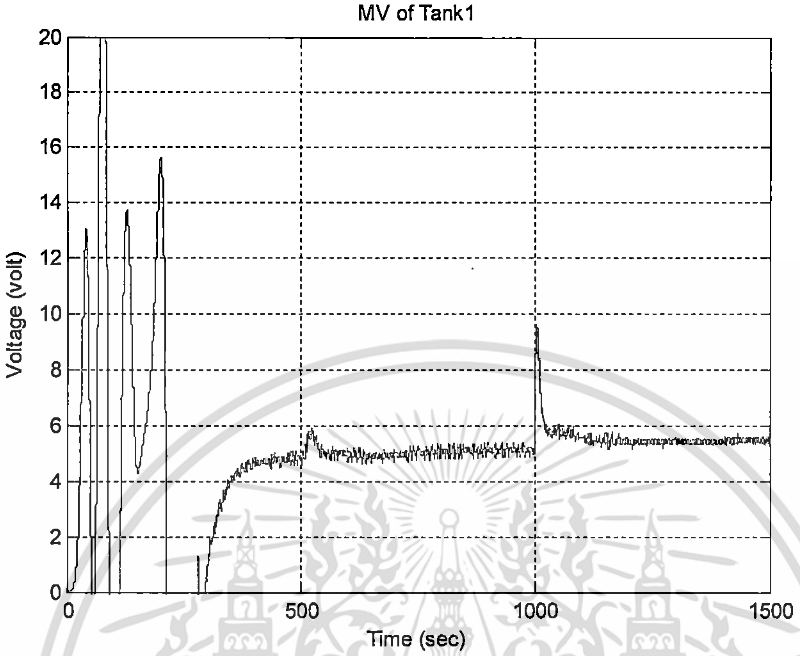


รูปที่ 5.11 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองด้านเอาต์พุต ระหว่างกระบวนการกับแบบจำลองของ Tank 1

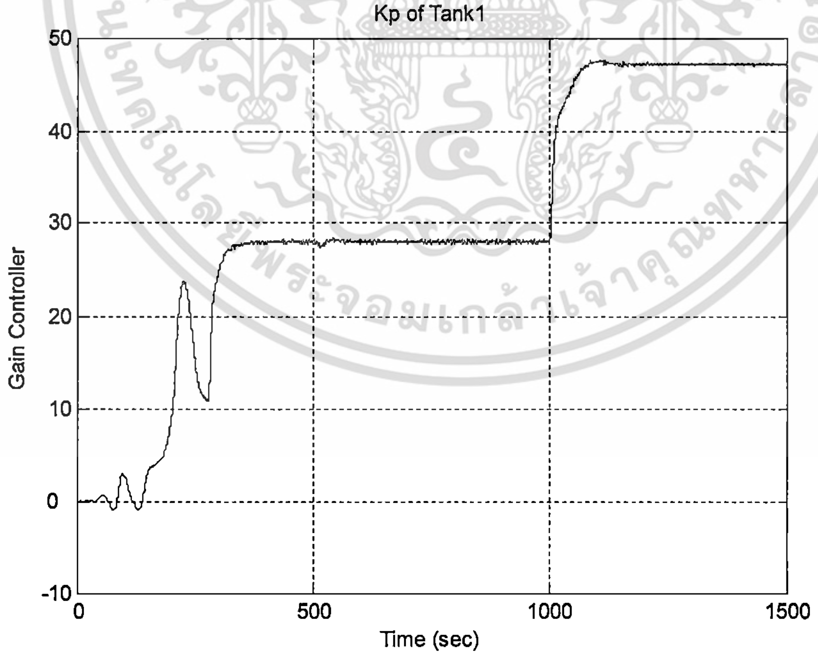
รูปที่ 5.11 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างเอาต์พุตของโมเดลอ้างอิงกับเอาต์พุตของกระบวนการจริงของถังน้ำใบที่ 1 โดยที่กราฟเส้นประเป็นสัญญาณเอาต์พุตของโมเดลอ้างอิงและกราฟเส้นทึบเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณเอาต์พุตของกระบวนการจริงซึ่งจะเห็นได้ว่ากราฟทั้ง 2 เส้น มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนกราฟรูปที่ 5.12 แสดงสัญญาณควบคุมกระบวนการ และกราฟรูปที่ 5.13 และ 5.14 เป็นกราฟแสดงสัญญาณของตัวควบคุม K_p และ K_i ของถังน้ำใบที่ 1 ตามลำดับ

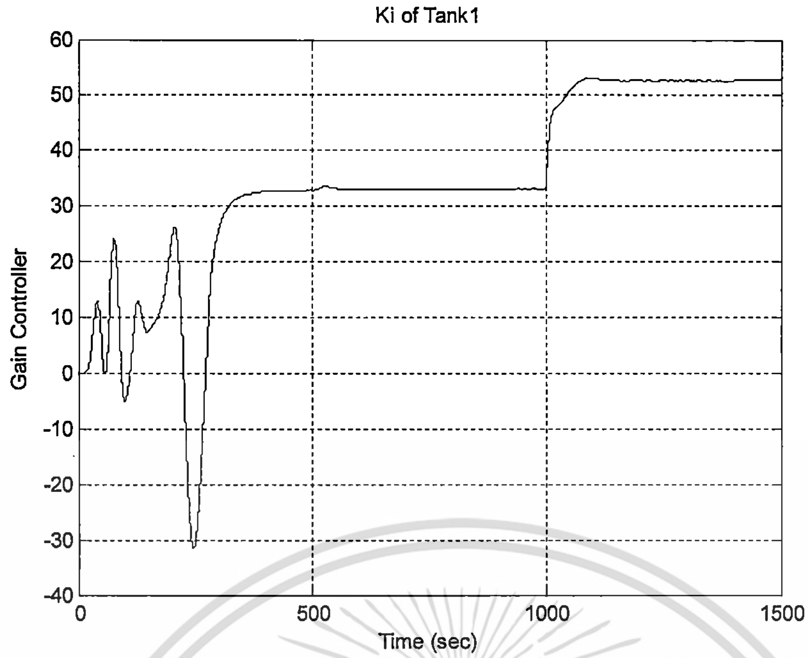


รูปที่ 5.12 แสดงสัญญาณควบคุมกระบวนการของ Tank 1

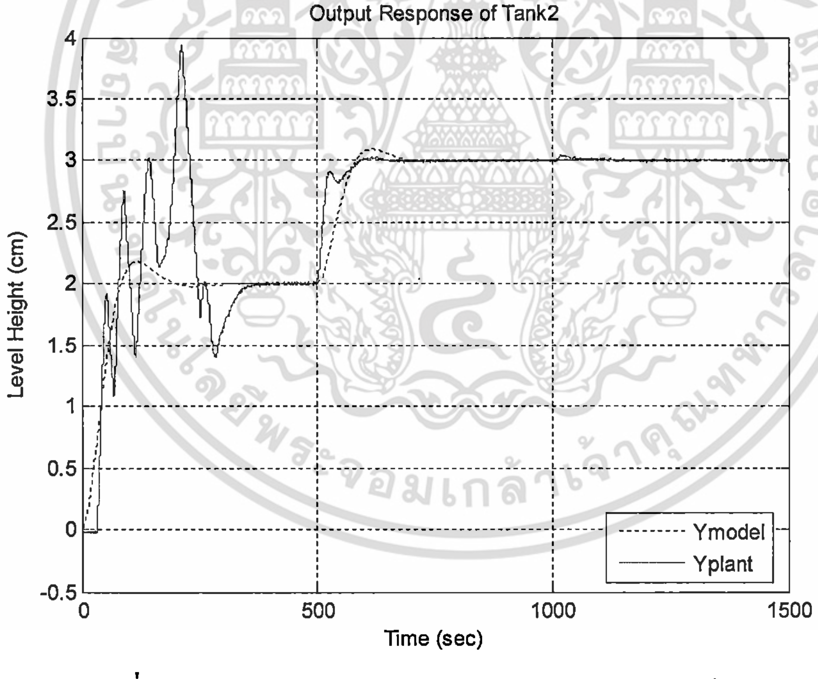


รูปที่ 5.13 สัญญาณตัวควบคุม K_p สำหรับควบคุมถังน้ำใบที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 สัญญาณตัวควบคุม K_i สำหรับควบคุมถังน้ำใบที่ 1

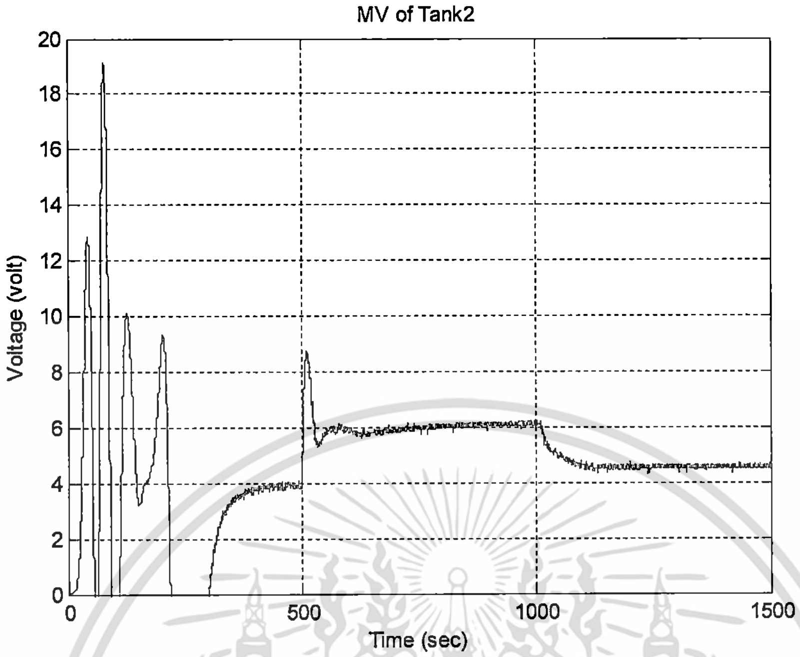


รูปที่ 5.15 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองด้านเอาต์พุต ระหว่างกระบวนการกับแบบจำลองของ Tank 2

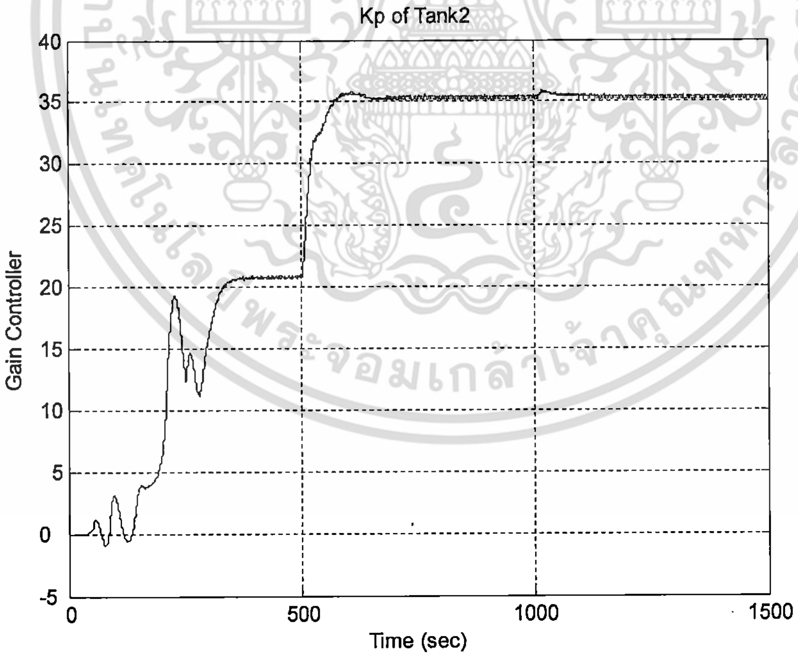
รูปที่ 5.15 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างเอาต์พุตของโมเดลอ้างอิงกับเอาต์พุตของกระบวนการจริงของถังน้ำใบที่ 2 โดยที่กราฟเส้นประเป็นสัญญาณเอาต์พุตของโมเดลอ้างอิงและกราฟเส้นทึบเป็นสัญญาณเอาต์พุตของกระบวนการจริงซึ่งจะเห็นได้ว่ากราฟทั้ง 2 เส้น มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนกราฟรูปที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.16 แสดงสัญญาณควบคุมกระบวนการ และกราฟรูปที่ 5.17 และ 5.18 เป็นกราฟแสดงสัญญาณของตัวควบคุม K_p และ K_i ของถังน้ำใบที่ 2 ตามลำดับ

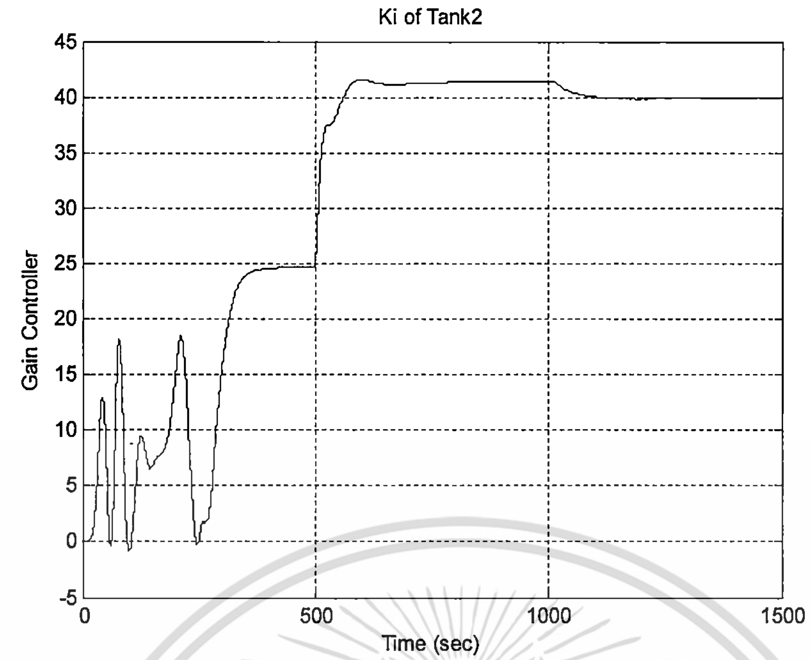


รูปที่ 5.16 แสดงสัญญาณควบคุมกระบวนการของ Tank 2

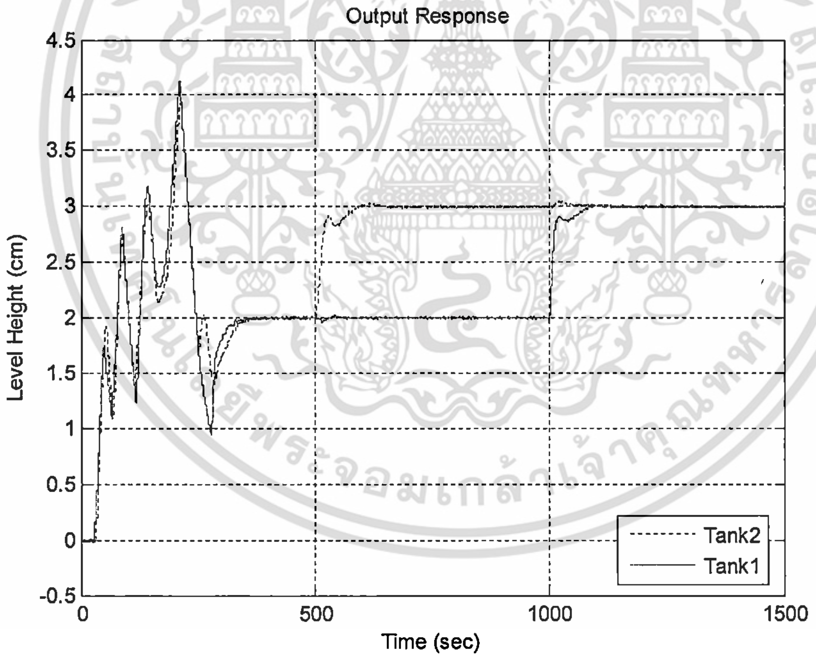


รูปที่ 5.17 สัญญาณตัวควบคุม K_p สำหรับควบคุมถังน้ำใบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.18 สัญญาณตัวควบคุม K_i สำหรับควบคุมถังน้ำใบที่ 2



รูปที่ 5.19 แสดงผลตอบสนองด้านเอาต์พุตของกระบวนการ

รูปที่ 5.19 เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบสัญญาณเอาต์พุตของกระบวนการจริง โดยที่กราฟเส้นทึบเป็นสัญญาณเอาต์พุตของถังน้ำใบที่ 1 และกราฟเส้นประเป็นสัญญาณเอาต์พุตของถังน้ำใบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 แสดงสมรรถณะของระบบเมื่อทำการเปลี่ยนระดับน้ำ จาก 2 cm ไป 3 cm

Parameter	Tank 1	Tank 2
K_p	28	35
K_i	34	42
Gramma (K_p)	-0.1	-0.1
Gramma (K_i)	-0.0003	-0.0005
Rise Time : t_r	5	8
Peak Time : t_p	0	0
Settling Time: t_s	50	52
Percent Overshoot : *P.O.*	0	0

5.4 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองจะเห็นว่าผลการจำลองจากโปรแกรม Matlab กับผลการทดลองจริงมีค่าใกล้เคียงกัน ผลการทดลองทำให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ MRAC ที่สามารถควบคุมกระบวนการให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายอีกทั้งยังเป็นไปตามข้อกำหนดอีกด้วย ซึ่งถ้าสังเกตุจากกราฟจะเห็นว่าค่าผลตอบสนองของกระบวนการจริงนั้นแทบจะไม่มีค่าพุ่งเกินเลยอีกทั้งเวลาเข้าที่ยังมีค่าน้อยกว่าข้อกำหนด และเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีทางเดินของรากแล้วทำให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ MRAC มากยิ่งขึ้น การปรับอัตราการเรียนรู้ (gramma) ถือว่ามีความสำคัญมาก เพราะเนื่องจากว่าถ้ากำหนดค่าไม่เหมาะสมผลที่ได้ก็อาจไม่เป็นไปตามข้อกำหนดที่เราต้องการ เพราะฉะนั้นทฤษฎีในบทที่ 3 และวิธีการออกแบบในบทที่ 4 จึงมีความสำคัญในการทดลองในบทที่ 5 เป็นอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการของดีคับปลิ้งเข้ามาช่วยในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลกระทบต่อกันซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการได้มาจากสมการสมดุลมวลและกฎของเบอร์นูลีโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มานั้นจะเป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงได้ใช้วิธีของอนุกรมเทเลอร์เพื่อแปลงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ให้เป็นแบบจำลองเชิงเส้น จากนั้นจึงนำแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นนี้ไปออกแบบชุดดีคับปลิ้งเพื่อให้กระบวนการระดับระดับน้ำสองถังที่มีผลกระทบต่อกันแยกโครงสร้างของระบบให้เป็นแบบอิสระต่อกันจำนวน 2 ชุด ระบบที่ได้รับการแยกอิสระโดยชุดดีคับปลิ้งจะถูกนำไปออกแบบตัวควบคุมโดยอาศัยเทคนิคการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี MRAC ต่อไป พารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้จะนำไปจำลองการทำงานโดยโปรแกรม MATLAB และทดลองกับกระบวนการจริง

การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการของ MRAC เป็นการออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมปรับเปลี่ยนไปตามโมเดลอ้างอิงของกระบวนการ ซึ่งจะทำให้การควบคุมกระบวนการเป็นแบบ Real Time มากยิ่งขึ้นความถูกต้องของการควบคุบก็มากยิ่งขึ้น อีกสิ่งหนึ่งที่สำคัญสำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วเทคนิคของ MRAC คือการปรับค่าอัตราการเรียนรู้ (Leaning Rate : γ) ซึ่งค่าที่กำหนดให้กับตัวควบคุมจะเป็นค่าที่ติดลบ โดยที่เงื่อนไขในการปรับค่าอัตราการเรียนรู้ก็คือถ้าค่าติดลบมีค่าน้อยๆ เช่น -0.00001 อัตราการเรียนรู้ก็จะช้าแต่โอกาสที่ระบบจะเข้าสู่ค่าเป้าหมายก็มีมาก แต่ถ้าค่าอัตราการเรียนรู้มีค่าติดลบมากๆ เช่น -0.1 อัตราการเรียนรู้ก็จะเร็วแต่โอกาสที่ระบบจะเข้าสู่ค่าเป้าหมายก็น้อยลง

วิธีการของ MRAC ถือเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ให้ผลตอบสนองทางเอาท์พุทได้ดีเมื่อเทียบกับวิธีอื่นวิธีการออกแบบอาจจะยุ่งยากกว่าแต่ก็ถือว่าให้ผลตอบสนองเป็นที่น่าพอใจ ซึ่งเหมาะกับกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 ปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางในการแก้ปัญหา

ปัญหาที่พบในการทดลองนั้นพบว่ามีหลายปัญหาด้วยกัน สามารถอธิบายได้ดังนี้

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

2. ในการดูดน้ำของปั้มน้ำนั้น บ่อยครั้งมักจะมีเศษผงตะกอน ถูกดูดเข้าไป ทำให้เกิดการอุดตันในตัวปั้มน้ำและเป็นสาเหตุให้อัตราการไหลของปั้มน้ำลดลง แนวทางในการแก้ปัญหาคือ ใช้อุปกรณ์ กรองน้ำเพื่อกั้นไม่ให้เศษผงตะกอนสามารถไหลเข้าไปยังปั้มได้

3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการขับกระแสของปั้มน้ำ เมื่อใช้เวลาทดลองนานๆ จะเกิดความร้อนสะสมที่ตัวไอซีมาก ถึงแม้จะมีตัวระบายความร้อนติดอยู่ที่ตัวไอซีก็ตาม ทำให้การขับกระแสของปั้มน้ำนั้นไม่สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ แรงดันและกระแสที่เข้าสู่ปั้มน้ำจะลดลงแม้ว่าแรงดันที่จ่ายให้กับอุปกรณ์ขับกระแสจะคงที่ จึงเป็นสาเหตุให้อัตราการไหลของปั้มน้ำลดลง แนวทางการแก้ไขปัญหาคือ ใช้ไอซีที่สามารถทนกระแสได้สูงมากขึ้น หรือเปลี่ยนตัวระบายความร้อนให้มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น

4. การทดลองติดต่อกันเป็นเวลานาน มีผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของปั้มน้ำต่ำลง เป็นผลให้ อัตราการไหลเข้าของน้ำลดลงอันเนื่องมาจากค่ากำลังของปั้มตกลงนั้นเอง แนวทางแก้ไขคือ ควรออกแบบการทดลองและการเก็บผลให้ใช้ระยะเวลาเหมาะสมกับความสามารถของตัวอุปกรณ์

5. วาล์วที่ใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการต่าง ๆ อาทิ วาล์วชุดปรับพื้นที่ตัดรูด้านออกของถัง หรือวาล์วชุดปรับพื้นที่ด้านเข้าของถัง มีลักษณะไม่เชิงเส้นและแตกต่างกัน ทำให้การปรับตำแหน่งของวาล์วในการหาจุดทำงานของกระบวนการทำได้ยาก

6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

การนำวิธีของ MRAC มาช่วยออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลกระทบต่อกันถือว่าเป็นต้นแบบที่แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ MRAC ซึ่งผู้วิจัยคิดว่าหากนำไปใช้กับกระบวนการอื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอยู่ตลอดเวลาก็น่าจะเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการแก้ปัญหาได้ดี

การทดลองนี้เป็นการทดลองโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุมซึ่งแนวทางการพัฒนาต่อไปอาจจะนำโปรแกรมไปเขียนลงในไอซีคอนโทรลเลอร์เพื่อให้สามารถใช้งานแบบ Stand Alone ได้ก็น่าจะเป็นแนวทางในการพัฒนาที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ana Computer engineering, Laval University, Quebec, Cnanada

[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 Triennal 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 Vrani, "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. Athenon, "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 200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.
โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

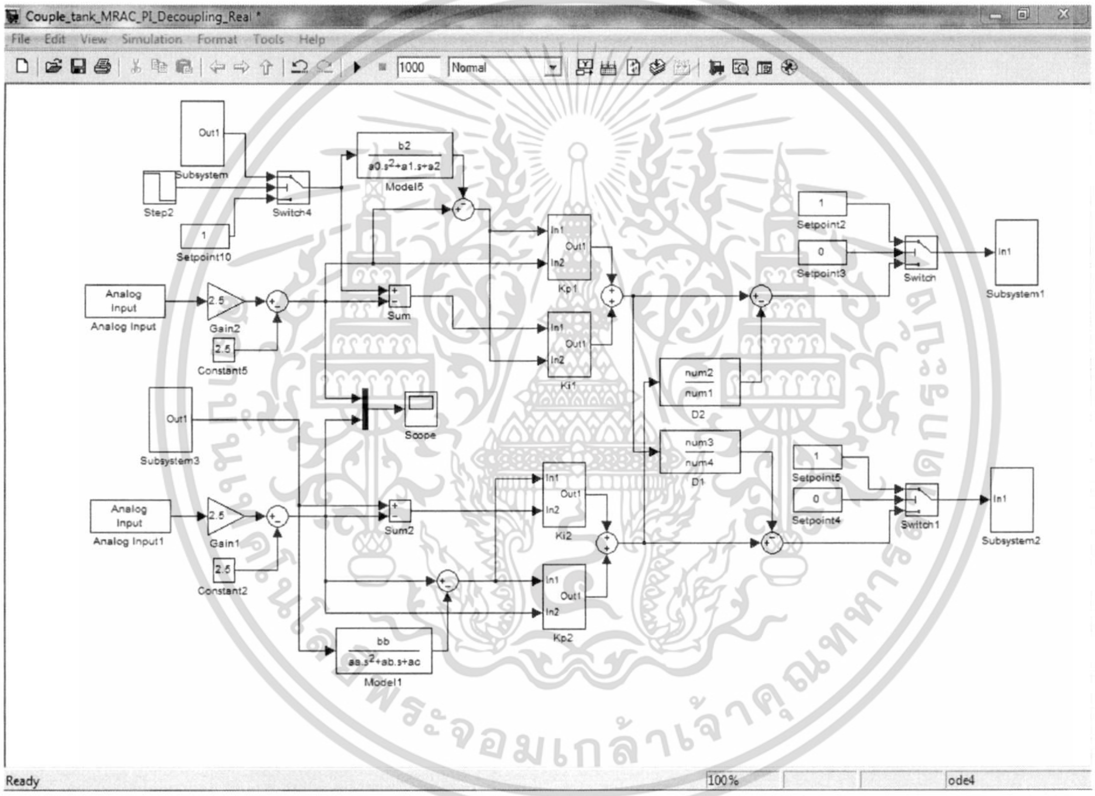
```
clear;
clc;

K1=5.4; K2=4.8; A=66.25;
a1=0.1963; a2=0.1963; ax=0.1963;
B1=0.7280; B2=0.7576; Bx=0.7668;
h1=8.3; h2=4.2; g=981;

%*****************************************************
% Ti find G11(s) G12(s) G21(s) G22(s)
%*****************************************************
Tx1=A/(B1*a1); Ty1=sqrt((2*h1)/g);
T1=Tx1*Ty1;
Tx2=A/(B2*a2); Ty2=sqrt((2*h2)/g);
T2=Tx2*Ty2;
Txx=A/(Bx*ax); Tyx=sqrt((2*(h1-h2))/g);
Tx=Txx*Tyx;
T12=T1*T2; T1x=T1*Tx; T2x=T2*Tx;
z1=1/T12;  z2=1/T1x;  z3=1/T2x; z=z1+z2+z3;
x1=T1x; x2=T2x; x3=2*T12; x4=T12*Tx; x=(x1+x2+x3)/x4;
 den=[1 x z];

%**********G11(s)*************
G1A=K1/A; G1B=Tx+T2; G1C=Tx*T2; G1D=G1B/G1C;
num1=[G1A G1A*G1D];
G11=tf(num1,den)

%**********G12(s)**************
G12A=K2/A; T12x=1/Tx;
num2=G12A*T12x;
G12=tf(num2,den)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%***********G21(s)***************
G21A=K1/A;
num3=G21A*T12x;
G21=tf(num3,den)

%***********G22(s)***************
G22A=K2/A; G22B=Tx+T1; G22C=Tx*T1; G22D=G22B/G22C;
num4=[G22A G22A*G22D];
G22=tf(num4,den)

%///Define Decoupling///%
D12x=(G12/G11);
D12=minreal(D12x)

D21x=(G21/G22);
D21=minreal(D21x)

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

Gn11=G11-(D21*G12);
Gn1=minreal(Gn11)

Gn22=G22-(D12*G21);
Gn2=minreal(Gn22)

%*********************************************************************
%b1=1; po=10%, ts=150s
b2=0.0011;
a0=1; a1=0.04; a2=0.0011;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%*************************************************************************
%%%gramma%%%
grmp1=-0.1;
grmi1=-0.0003;

grmp2=-0.1;
grmi2=-0.0005;
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. Suparoek Kangwanrat, Vittaya Tipsuwanporn and Arjin Numsomran., **"Design of PI Controller Using MRAC Technique for Coupled-Tank Process"** PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL CONFERENCE CONTROL, AUTOMATION AND SYSTEM 2010, Oct. 27-30, 2010 in KINTEX, Gyeonggi-do, Korea.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

International Conference on Control, Automation and Systems 2010
Oct. 27-30, 2010 in KINTEX, Gyeonggi-do, Korea

Design of PI Controller Using MRAC Techniques for Coupled-Tanks Process

Suparoek Kangwanrat[1], Vittaya Tipsuwannaporn[1] and Arjin Numsomran[1]

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

Abstract: The typical coupled-tanks process that is TITO plant has the difficulty in controller design because changing of system dynamics and interacting of process. This paper presents design methodology of auto-adjustable PI controller using MRAC technique. The proposed method can adjust the controller parameters in response to changes in plant and disturbance real time by referring to the reference model that specifies properties of the desired control system.

Keywords: PI Controller, MRAC, Coupled-Tanks Process

1. INTRODUCTION

The control of liquid level in tanks and flow between tanks is a basic problem in the process industries. In vital industries such as Petro-chemical industries, Paper making industries, Water treatment industries have the coupled tanks processes of chemical or mixing treatment in the tanks, the level of fluid in the tanks and interacting between tanks must be controlled. It is essential for control system engineers to understand how coupled tanks control systems work and how the level control problem is solved. The problem of level control in coupled tanks processes are system dynamics and interacting characteristic. Many control methods such as 2-DOF PID [1], Auto tuning PID [2], CDM [3] and Decoupling [4] have been applied to coupled tanks processes for solveing their problems. This paper presents design methodology of auto-adjustable PI controller using MRAC technique for solving the problem of coupled tanks processes. The proposed method can adjust the controller parameters in response to changes in plant and disturbance real time by referring to the reference model that specifies properties of the desired control system. Therefore, this technique is convenient for controller design under the requirement of the system.

The paper is organized as follows. The next section gives details about Coupled-tank process. Section 3 explains a MRAC technique. Section 4 explains an implementation of PI Controller using MRAC Technique for coupled tank process. Section 5 shows experiment process and results. Finally, conclusions are given in section 6.

2. COUPLED-TANKS PROCESS

Consider the coupled-tank , two-input two-output process, in fig.1. The target is to control water level of lower two tanks $h_1(t),\ h_2(t)$ by the inlet water flow from two pumps $Q_1(t),\ \mathrm{Q}_2(t)$. The process inputs are input voltage of two pumps $u_1(t),\ u_2(t)$. The balance of water level in two tanks relates with inlet flow $Q_1(t),\ \mathrm{Q}_2(t)$, outlet valve ratio β_1, β_2 and connected valve ratio β_x that acts on interacting between two tanks.

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

$$\frac{dh_1(t)}{dt} = \frac{k_1}{A}U_1(t) - \frac{\beta_1 a}{A}\sqrt{\frac{g}{2\bar{h}_1}}H_1(t) + \frac{\beta_x a}{A}\sqrt{\frac{g}{2\left|\bar{h}_2 - \bar{h}_1\right|}}\left[H_2(t) - H_1(t)\right]$$

$$\frac{dh_2(t)}{dt} = \frac{k_2}{A}U_2(t) - \frac{\beta_2 a}{A}\sqrt{\frac{g}{2\bar{h}_2}}H_2(t) - \frac{\beta_x a}{A}\sqrt{\frac{g}{2\left|\bar{h}_2 - \bar{h}_1\right|}}\left[H_2(t) - H_1(t)\right] \qquad (1)$$

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,

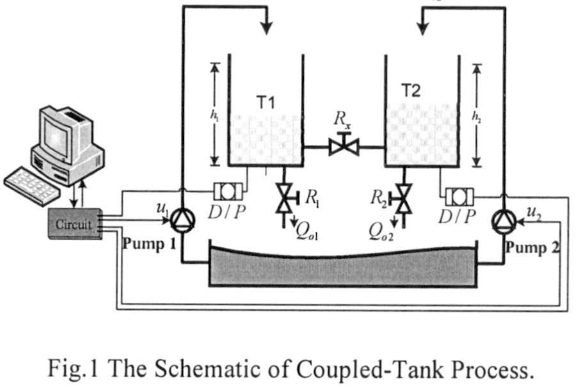


Fig.1 The Schematic of Coupled-Tank Process.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\bar{h}_1, \bar{h}_2$ 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

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

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

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

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

where

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

$\bar{h}_1, \bar{h}_2$ 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.

3. MRAC

The block diagram in Fig. 2 shows the structure of a model-reference adaptive control (MRAC) system that composed of process, controller, reference model and adjustment mechanism block. The model reference adaptive control (MRAC) Technique is based on information y_m, y, u and u_c that is used for devising a controller. The adjustment mechanism automatically adjusts controller parameters so that the behavior of the closed-loop control plant output

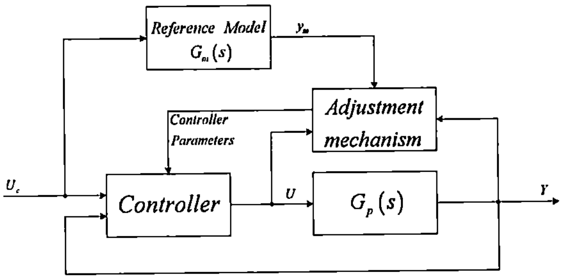


Fig. 2 Block diagram of a model-reference adaptive control (MRAC) system.

(y) closely follows that (y_m) of the reference model. Parameters and structure of reference model are specificities on base of requirements of control performance.

The adjustment mechanism of MRAC system constructs by adaptive control rule, called MIT rule which performs the algorithms as following.

Tracking error

$$e = y_p - y_m \quad (5)$$

Form cost function

$$J(\theta) = \frac{1}{2}e^2(\theta) \quad (6)$$

MIT Rule says that the time rate of change of θ is roportional to negative gradient of J. That is

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma\frac{\partial J}{\partial \theta} = -\gamma e\frac{\partial e}{\partial \theta} \quad (7)$$

Where e denotes the model error and θ is the controller parameter vector. The components of $\frac{\partial e}{\partial \theta}$ are the sensitivity derivatives of the error with respect to θ. The parameter γ is known as the adaptation gain. The MIT rule is a gradient scheme that aims to minimize the squared model cost function [5].

4. PI CONTROLLER DESIGN USING MRAC TECHNIQUE FOR COUPLED-TANKS PROCESS

Because of the interaction between processes, the Couple-tank control system needs the decoupling controllers to minimize the cross coupling effects. After the decoupling design, [4] we get 2 SISO transfer functions of plant g_{n11} and g_{n22} which are used for PI controller design by MRAC technique respectively.

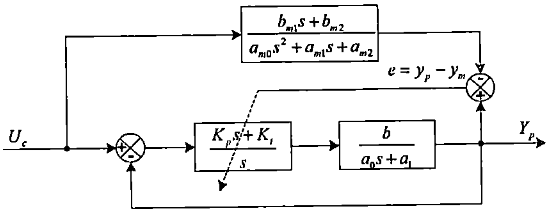


Fig. 3 structure of 1st order MRAC control system

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Consider a system described by 1st order model $b/(a_0 s + a_1)$. A block diagram of control system depicts in Fig. 3.
Closed loop transfer function is

$$\frac{Y_p(s)}{U_c(s)} = \frac{b(K_p s + K_i)}{a_0 s^2 + (a_1 + bK_d)s + bK_i} \quad (7)$$

and

$$Y_p(s) = \frac{b(K_p s + K_i)}{a_0 s^2 + (a_1 + bK_d)s + bK_i} \cdot U_c(s) \quad (8)$$

From (7) and required performance of system, we obtain a reference model
as (9).

$$\frac{Y_m(s)}{U_m(s)} = \frac{b_{m1} s + b_{m2}}{a_{m0} s^2 + a_{m1} s + a_{m2}} \quad (9)$$

Apply MIT gradient rules for determining the value of PI controller parameters K_p, K_i in (10).

$$\frac{dK_p}{dt} = -\gamma_p \frac{\partial J}{\partial K_p} = -\gamma_p \left(\frac{\partial J}{\partial \varepsilon}\right)\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right)\left(\frac{\partial y}{\partial K_p}\right)$$
$$\frac{dK_i}{dt} = -\gamma_i \frac{\partial J}{\partial K_i} = -\gamma_i \left(\frac{\partial J}{\partial \varepsilon}\right)\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right)\left(\frac{\partial y}{\partial K_i}\right) \quad (10)$$

Where $\partial J/\partial \varepsilon = \varepsilon$, $\partial \varepsilon/\partial y = 1$

$$\frac{\partial Y_p}{\partial K_p} = \frac{bs}{a_0 s^2 + (a_1 + bK_d)s + bK_i} \cdot \left[-Y_p\right] \quad (11)$$

$$\frac{\partial Y_p}{\partial K_i} = \frac{b}{a_0 s^2 + (a_1 + bK_d)s + bK_i} \cdot \left[U_c - Y_p\right] \quad (12)$$

From Eq. (11) and (12), it obtained $\frac{\partial K_p}{\partial t}, \frac{\partial K_i}{\partial t}$ as Eq. (13).

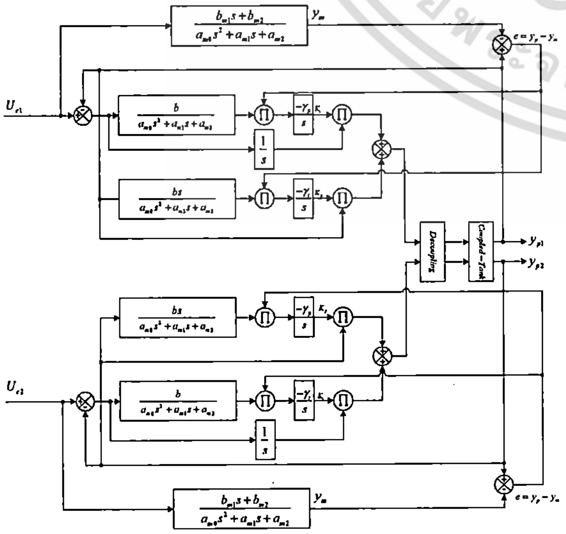


Fig. 4 MRAC Block Diagram for Couple-Tank Process

$$\frac{dK_p}{dt} = -\gamma_p \frac{\partial J}{\partial K_p} = -\gamma_p \varepsilon \frac{bs}{a_0 s^2 + (a_1 + bK_d)s + bK_i} \cdot \left[-Y_p\right]$$
$$\frac{dK_i}{dt} = -\gamma_i \frac{\partial J}{\partial K_i} = -\gamma_i \varepsilon \frac{b}{a_0 s^2 + (a_1 + bK_d)s + bK_i} \cdot \left[U_c - Y_p\right] \quad (13)$$

A block diagram in Fig. 4 shows how MRAC technique is implemented.

5. EXPERIMENT AND RESULTS

Referring to the parameters and the operating points of process in table 1 and table 2, this process can be placed into the equation (1). It will be obtained the plant transfer function as in equation (14).

Table 1 Process Parameters

Symbol	Description	Quantity
$A(cm^2)$	Cross section area of tank 1,2	66.25
$a(cm^2)$	Cross section area of outlet hole of tank 1,2	0.1963
β_1	Valve ratio at the outlet of tank 1	0.9015
β_2	Valve ratio at the outlet of tank 2	0.9919
β_x	Valve ratio between tank 1 and tank 2	0.9279

Table 2 The operating point of process

Symbol	Description	Quantity
$u_1, u_2(V)$	Input voltage of pump 1,2	2.5, 2
$\bar{h}_1$	Water level of tank 1	5.25
$\bar{h}_2$	Water level of tank 2	2.45
$k_1(cm^3/V\cdot$	Gain of pump 1	5.4
$k_2(cm^3/V\cdot$	Gain of pump 2	4.8

$$\begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{0.08151s + 0.006356}{(s^2 + 0.1402\,s + 0.003526)} & \frac{2.637\times10^{-3}}{(s^2 + 0.1402\,s + 0.003526)} \\ \frac{2.966\times10^{-3}}{(s^2 + 0.1402\,s + 0.003526)} & \frac{0.07245s + 0.004507}{(s^2 + 0.1402\,s + 0.003526)} \end{bmatrix} \quad (14)$$

From (14) we designed decoupling controllers $D_{12}(s)$ and $D_{21}(s)$ for decoupling the interaction in couple-tank process as equation (15), (16).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D_{12}(s) = -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)}$$
$$= -\left(\frac{2.637\times10^{-4}}{(s^2+0.1402\,s+0.003526)}\times\frac{(s^2+0.1402\,s+0.003526)}{0.08151s+0.006356}\right)$$
$$= -\frac{2.637\times10^{-4}}{0.08151s+0.006356} \quad (15)$$

$$D_{21}(s) = -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)}$$
$$= -\left(\frac{2.966\times10^{-4}}{(s^2+0.1402s+0.003526)}\times\frac{(s^2+0.1402s+0.003526)}{0.07245s+0.004507}\right)$$
$$= -\frac{2.966\times10^{-4}}{0.07245s+0.004507} \quad (16)$$

From decoupling controllers , it obtained new plant transfer functions as equation (17)

$$G_n(s) = \begin{bmatrix} G_{n11} & 0 \\ 0 & G_{n22} \end{bmatrix} \quad (17)$$

where

$$G_{n_{11}}(s) = G_{11}(s) - \frac{G_{21}}{G_{22}}G_{12}(s) = G_{11}(s) - D_{21}(s)G_{12}(s)$$
$$= \frac{0.08151}{s+0.06221} \quad (18)$$

$$G_{n_{22}}(s) = G_{22}(s) - \frac{G_{12}}{G_{11}}G_{21}(s) = G_{22}(s) - D_{12}(s)G_{21}(s)$$
$$= \frac{0.07245}{s+0.07797} \quad (19)$$

5.1 Simulation of Tank1 Control Loop

Plant transfer function $G_p(s) = \frac{0.08151}{s+0.06221}$

Design PI controllers by using MRAC Technique as the control structure in Fig.2. From the specifies properties of the desired control system $P.O. = 10$ % and $t_s = 150$, a reference model is shown in (20)

$$\frac{Y_m(s)}{U_m(s)} = \frac{s+0.0011}{s^2+0.04s+0.0011} \quad (20)$$

5.2 Simulation of Tank2 Control Loop

Plant transfer function $G_p(s) = \frac{0.07245}{s+0.07797}$

Design PI controllers by using MRAC Technique as the control structure in Fig.2. From the specifies properties of the desired control system $P.O. = 10$ % and $t_s = 100$, a reference model is shown in (21)

$$\frac{Y_m(s)}{U_m(s)} = \frac{s+0.0026}{s^2+0.06s+0.0026} \quad (21)$$

The test done by control the response of tank1 and tank2 control system $(g_{n11}(s),\ g_{n22}(s))$ at the set-point as the details in table 3.

Table 3 The operating point of process

Tank	$t=0\,s$	$t=1500\,s$	$t=3000\,s$	$t=4500\,s$
1	2	-	4	-
2	2	4	-	-

Determining the value of PI controller parameters K_p, K_i by MRAC algorithm, we defined the value of adaptation gain γ as following

Tank1 $\gamma_p = -0.01$ and $\gamma_i = -0.00003$

Tank2 $\gamma_p = -0.01$ and $\gamma_i = -0.00005$

The simulation results are shown as Fig.5-Fig.9 . (17)

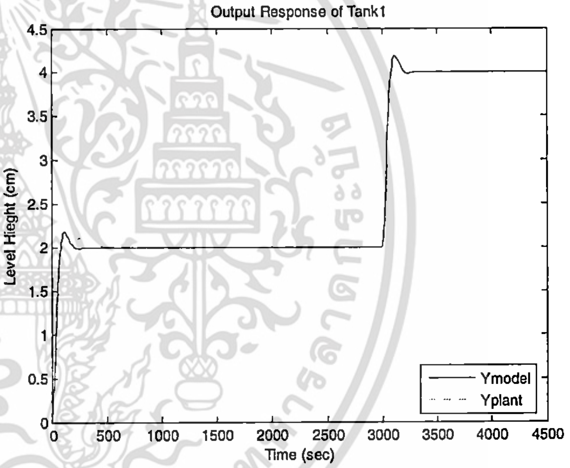


Fig.5 Comparison between output response y_p and y_m of Tank1 Control Loop.

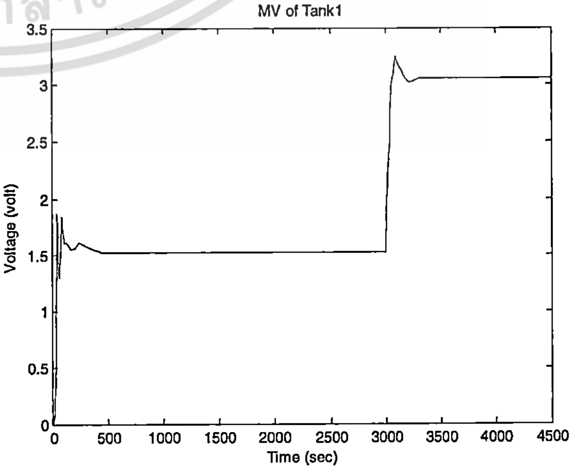


Fig.6 MV from PI Controller of Tank1 Control Loop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

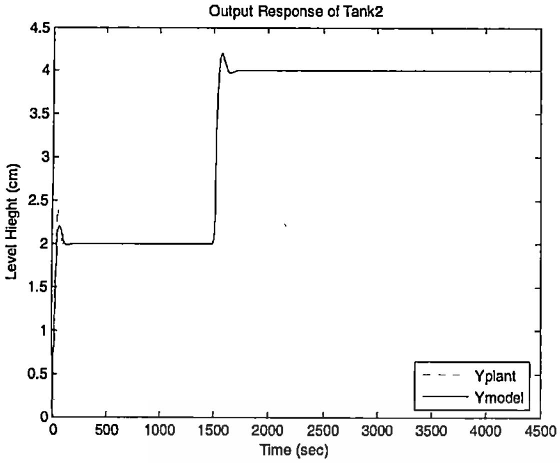


Fig.7 Comparison between output response y_p and y_m of Tank2 Control Loop.

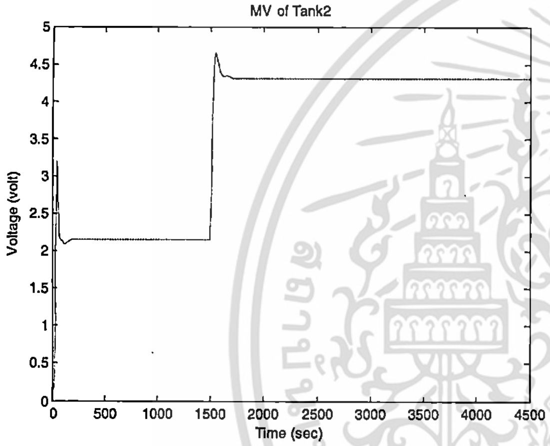


Fig.8 MV from PI Controller of Tank2 Control Loop

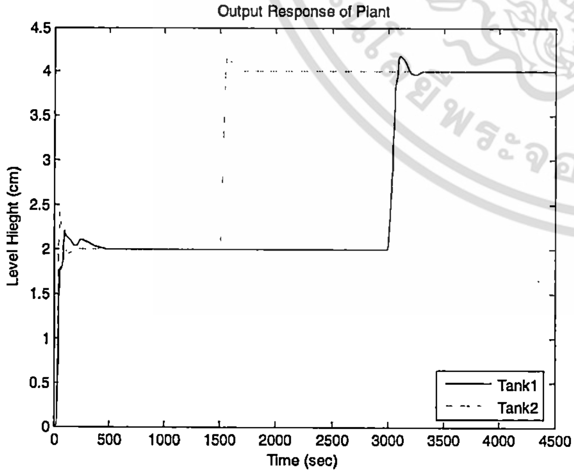


Fig.9 Simulation Output response y_{p1} y_{p2} of MRAC Control System for Coupled-Tank Process

The experiment results are shown as Fig.10-Fig.14 .

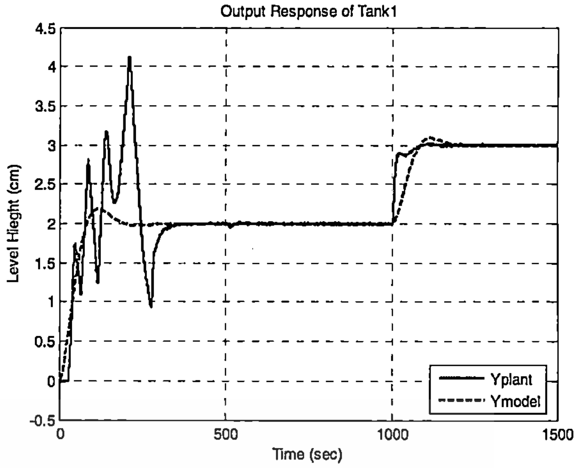


Fig.10 Comparison between output response y_p and y_m of Tank1 Control Loop.

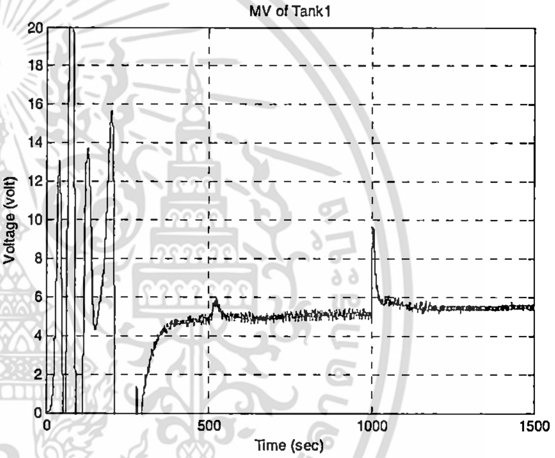


Fig.11 MV from PI Controller of Tank1 Control Loop

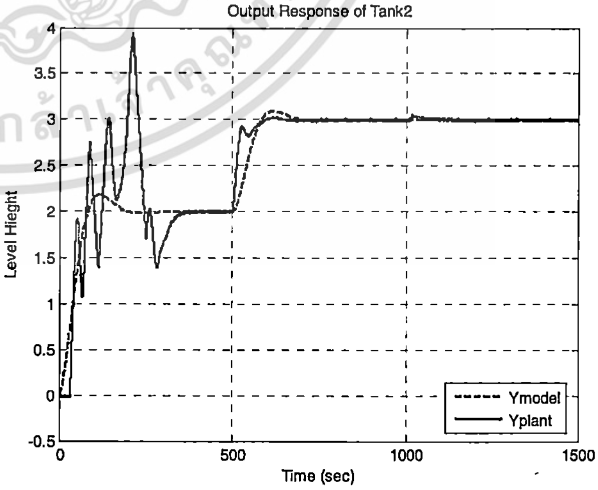


Fig.12 Comparison between output response y_p and y_m of Tank2 Control Loop.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

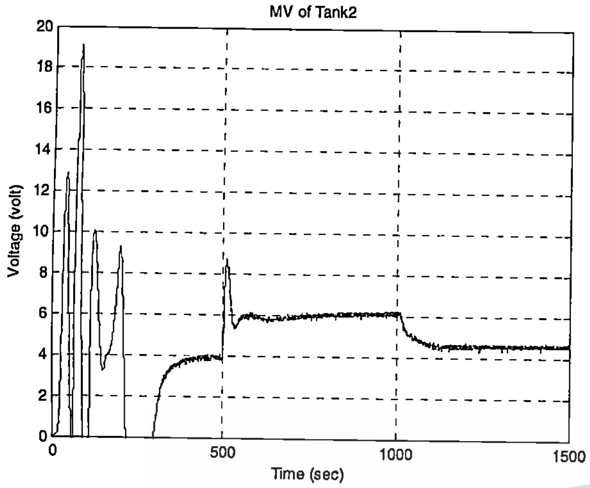


Fig.13 MV from PI Controller of Tank2 Control Loop

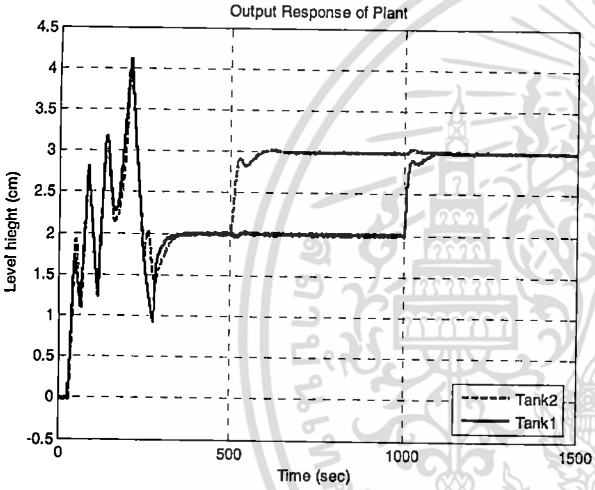


Fig.14 Response of MRAC PI Control System for Coupled-Tank Process

6. CONCLUSION

The design of PI controller using MRAC techniques for couple-tanks process can adjust controller parameters in response to changes in plant and disturbance and with specifies properties of the desired control system. It is shown by the experiment results in Section 5 that MRAC technique solve the dynamic problem of the couple-tanks process and it is convenient for controller design under the requirement of the system.

REFERENCES

[1] Astrom K.J., and T. Hagglund (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. Athenon, *"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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายศุภฤกษ์ กังวาลรัตน์ เกิดเมื่อวันที่ 29 ธันวาคม พ.ศ.2515 ที่จังหวัดสุพรรณบุรี สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาช่างไฟฟ้ากำลัง จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพ ต่อจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาตรีในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรรัฐศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาการเมืองการปกครอง คณะรัฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง สำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2548 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการวัดคุม ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2551

ประวัติการทำงาน ได้เข้าเป็นพนักงานของบริษัทสมบัติวิศวกรรมและบริษัทบิวคอน หลังจากนั้นได้เข้าทำงานในบริษัท ไอบีเอ็ม สตอเรจ โปรดักส์ ไทยแลนด์ จำกัด ตั้งแต่ปี 2541 และในปี 2546 บริษัทได้เปลี่ยนชื่อมาเป็น บริษัท ฮิตาชิ โกลบอล สตอเรจ เทคโนโลยีส์ ประเทศไทย จำกัด จนถึงปัจจุบันและเริ่มต้นทำงานในตำแหน่งวิศวกรในแผนก Cleaning หลังจากนั้นได้ย้ายตำแหน่งมาเป็นหัวหน้าส่วนซ่อมบำรุงแผนก Test Engineering และตำแหน่งปัจจุบันเป็นผู้ช่วยผู้จัดการแผนกพัฒนาทรัพยากรมนุษย์และพัฒนาองค์การและเป็นตัวแทนของบริษัทฯในการประสานความร่วมมือในการพัฒนาบุคลากรรวมถึงงานวิจัยระหว่างภาครัฐ มหาวิทยาลัย กับบริษัทฯ ภายใต้บันทึกความร่วมมือต่างๆ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้