ตัวควบคุมแบบพีไอดีแบบปรับค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติสำหรับกระบวนการระดับน้ำแบบสองถังแบบมีผลต่อกันโดยใช้การอินทริกรัลผลตอบสนองแบบขั้นได

AUTO-TUNING PID CONTROLLER FOR INTERACTING WATER LEVEL PROCESS USING INTEGRAL STEP RESPONSE

มนตรี ตันยะกุล
MONTREE TANYAKUL

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2945 8

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ตัวควบคุมแบบพีไอดีแบบปรับค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติสำหรับกระบวนการระดับน้ำแบบสองถังแบบมีผลต่อกันโดยใช้การอินทริกรัลผลตอบสนองแบบบันได

AUTO-TUNING PID CONTROLLER FOR INTERACTING WATER LEVEL PROCESS USING INTEGRAL STEP RESPONSE

มนตรี ตันยะกุล

MONTREE TANYAKUL

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2645-8

AUTO-TUNING PID CONTROLLER FOR INTERACTING WATER LEVEL PROCESS USING INTEGRAL STEP RESPONSE

MONTREE TANYAKUL

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2006

ISBN 974-15-2645-8

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ตัวควบคุมแบบพีไอดีแบบปรับค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติสำหรับกระบวนการระดับน้ำแบบสองถังแบบมีผลต่อกันโดยใช้การอินทริกรัลผลตอบสนองแบบบันได
นักศึกษา	นาย มนตรี ตันยะกุล
รหัสนักศึกษา	44061419
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. ธนิตย์ ตรีสุวรรณวัฒน์

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับวิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีแบบปรับค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติสำหรับกระบวนการระดับน้ำแบบสองถังแบบมีผลต่อกันโดยใช้การอินทริกรัลผลตอบสนองแบบบันได ซึ่งสมการคุณลักษณะของกระบวนการระดับน้ำแต่ละถังสามารถหาได้จาก วิธีอินทริกรัลของผลตอบสนองและทำการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีแบบอัตโนมัติ โดยใช้ระบบควบคุมที่ใช้ในอุตสาหกรรมของบริษัท Emerson Process Management ชื่อระบบว่า DeltaV ซึ่งเป็นจัดเป็นระบบการควบคุมแบบกระจาย (Distributed Control System; DCS) ทำการคำนวณพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยวิธีการอินทริกรัลผลตอบสนองแบบบันไดและทางเดินของรากตามข้อกำหนดทางสมรรถนะของระบบควบคุมตามที่ต้องการ ซึ่งวิธีดังกล่าวนี้จากผลการทดลองสามารถควบคุมระบบกระบวนการระดับน้ำแบบสองถังแบบมีผลต่อกันให้มีผลตอบสนองของระบบควบคุมเป็นดังที่ต้องการ

Thesis Title	Auto-Tuning PID Controller for Interacting Water Level Process Using Integral Step Response
Student	Mr. Montree Tanyakul
Student ID.	44061419
Degree	Master Degree
Programme	Master Degree of Instrumentation Engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Asst. Prof. Thanit Treesuwannawat

ABSTRACT

This paper presents the approach to design the Auto-Tuning PID controller for interactive Water Level Process using integral step response. The Integral Step Response (ISR) is the method to model a dynamic process, which can be done easily, conveniently and very efficiently. Therefore this method is advantage for design the auto tune PID controller base on Distributed Control System (DCS) of Emerson Process Management in name DeltaV system. Our scheme uses the root locus technique to design PID controller. In this paper DeltaV system is used for modeling and testing of the control system. The experimental results of interacting water level process can be satisfyingly illustrated the transient response and the steady state response.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำ และความอนุเคราะห์จาก ผศ.ดร. ธนิตย์ ตรีสุวรรณวัฒน์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ที่ได้ให้การสนับสนุนและคำปรึกษาในงานวิจัยจนสำเร็จตามวัตถุประสงค์

ขอขอบคุณ ผศ. อาจินต์ น่วมสำราญ และ อาจารย์ เทียนชัย สุขศรี ที่กรุณาแนะแนวทาง ให้คำปรึกษาแนะนำทั้งทางด้านทฤษฎีและทางด้านปฏิบัติ ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนและ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัวและบุคคลที่รักและเคารพของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

มนตรี ตันยะกุล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VIII

สารบัญรูป.....IX

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....2

1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....3

1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....3

บทที่ 2 กระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน.....5

2.1 การวัดระดับโดยการวัดความดันดิฟเฟอเรนเชียล.....4

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....7

2.3 คุณลักษณะของกระบวนการ.....8

2.4 สรุป.....9

บทที่ 3 วิธีหาแบบจำลองของกระบวนการของน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันด้วยวิธีการอินทริกรัลผลตอบสนอง (Integral Step Response, ISR)

3.1 กล่าวนำ.....10

3.2 โครงสร้างของระบบควบคุม.....10

3.3 วิธีอินทริกรัลผลตอบสนอง (Integral Step Response, ISR).....11

3.4 วิธีอินทริกรัลผลตอบสนอง ประยุกต์ใช้กับกระบวนการของน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน.....14

บทที่ 4 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดี ด้วยวิธี Root Locus 17

4.1 ความรู้เบื้องต้นวิธี Root Locus 17

4.1.1 เงื่อนไขเบื้องต้นของ Root loci 18

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2 ความรู้เบื้องต้นของตัวควบคุมแบบ Proportional Integral Derivative (PID).....23
4.2.1 ผลของพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PID กับกระบวนการ.....24
4.2.1.1 ผลของ Proportional Band (PB) กับกระบวนการ.....24
4.2.1.2 ผลของ Integral Time กับกระบวนการ.....24
4.2.1.3 ผลของ Derivative Time กับกระบวนการ.....25
4.3 โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี Root Locus.....25
4.3.1 การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีเทคนิคทางเดินราก.....25
4.4 การออกแบบตัวควบคุมพีไอ สำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน 27
4.4.1 ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุม.....28
4.4.2 ตัวอย่างการออกแบบตัวควบคุมตามเงื่อนไขที่กำหนด.....28

บทที่ 5 การออกแบบระบบควบคุมประยุกต์ใช้กับระบบ DCS.....32
5.1 กล่าวนำ.....32
5.2 โครงสร้างของระบบ DeltaV.....33
5.2.1 ระดับเวอร์กสเตชั่น (Workstation) 34
5.2.1.1 อินเจียเนียริ่งและโอเปเรเตอร์เวอร์กสเตชั่น (Engineering & Operator Workstati.....34
5.2.1.2 โอเปเรเตอร์เวอร์กสเตชั่น(OperatorWorkstation.....34
5.2.1.3 แอพฟลิเคชั่นเวอร์กสเตชั่น (Operator Workstation).....35
5.2.2 ระดับการสื่อสารระหว่างตัวควบคุมกับเวอร์กสเตชั่น 35
5.2.3 ระดับชุดตัวควบคุม (Controller).....37
5.2.4 ระดับอุปกรณ์และเครื่องมือวัดต่างๆ.....37
5.3 การออกแบบด้านซอฟว์แวร์และฮาร์ดแวร์ ของ DCS.....37
5.3.1 การออกแบบระบบของDCSด้านซอฟว์แวร์และฮาร์ดแวร์.....37
5.3.2 การทำการกำหนดอุปกรณ์และการค่าต่างๆของเดลต้าวี.....38
5.3.3 การเขียนโปรแกรมของระบบเดลต้าวี.....39
5.3.3.1 การออกแบบโปรแกรมควบคุมโดยภาษาฟังก์ชั่นบล็อก.....39

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3.3.2 การออกแบบโปรแกรมควบคุมโดยภาษาสคริป.....40

5.3.3.3 การออกแบบโปรแกรมควบคุมโดยภาษาโฟลชาร์ล.....40

5.3.3.4 PID ฟังก์ชั่นบล็อกของเดลต้าวี.....41

5.4 ระบบการปรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุมอัตโนมัติของเดลต้าวี (Auto Tune).....45

5.5 การประยุกต์ใช้ระบบเดลต้าวีกับ กระบวนการระดับน้ำแบบสองถังแบบมีผลต่อกัน โดยใช้วิธี ISR 48

5.5.1 ขั้นตอนการทำงานการหาค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการระดับน้ำแบบสองถังแบบมีผลต่อกันโดยใช้วิธี ISR.....48

5.5.2 โปรแกรมฟังก์ชั่นบล็อกของการทำงาน.....49

5.5.3 แสดงตัวอย่างของโปรแกรมที่ติดต่อกับโอเปอเรเตอร์.....52

5.5.4 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม ISR & Root Locus.....52

บทที่ 6 ผลการทดลอง.....54

6.1 กล่าวนำ.....54

6.2 ผลการทดลองการใช้ระบบเดลต้าวีในการหาค่าของตัวควบคุมโดยวิธีเดลต้าวีจูน....54

6.3 ผลการทดลองการใช้ระบบเดลต้าวีในการหาค่าของตัวควบคุมโดยวิธี ISR และ Root Locus.....60

6.3.1 การหาฟังก์ชันถ่ายโอนแบบจำลองของกระบวนการโดยวิธี ISR.....71

6.3.2 การหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโดยวิธี Root Locus.....71

6.4 การเปรียบเทียบแบบจำลองที่ได้จากวิธี ISR และกระบวนการจริง.....71

6.5 สรุปผลการทดลอง.....72

บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....82

7.1 กล่าวนำ.....82

7.2 ปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางแก้ปัญหา.....82

7.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....83

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บรรณานุกรม.....84

ภาคผนวก.....86

ภาคผนวก ก. รายละเอียดของอุปกรณ์และวงจรที่ใช้ในการทดลอง.....87

ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....102

ประวัติผู้เขียน.....114

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

6.1 ขั้นตอนในการทดลองโดยใช้ระบบเดลต้าวีจูน.....57

6.2 ผลการทดลองโดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายของวิธีเดลต้าวีจูน.....60

6.3 ผลการทดลองโดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายโดยวิธี ISR และ Root Locus 75

ก.1 รายละเอียดทางเทคนิคของอุปกรณ์วัดระดับน้ำ (Differential Pressure Transmitter).....91

ก.2 รายละเอียดทางเทคนิคของปั๊มน้ำ.....93

ก.3 รายละเอียดทางเทคนิคของเพาว์เวอร์ซัพพลาย (System Power Supply).....97

ก.4 รายละเอียดทางเทคนิคของตัวควบคุม (Controller).....98

ก.5 รายละเอียดทางเทคนิคของอนาล็กอินพุทการ์ด.....99

ก.6 รายละเอียดทางเทคนิคของอนาล็กเอาท์พุทการ์ด.....100

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 กระบวนการระดับน้ำ 2 ถังแบบมีผลต่อกัน....4

2.2 กระบวนการระดับน้ำ 2 ถังแบบมีผลต่อกัน จากรูปถ่ายจริง....4

2.3 การวัดระดับน้ำถังที่ 2 โดยอุปกรณ์วัดความดันดิฟเฟอเรนเชียล....5

3.1 โครงสร้างของระบบควบคุมในการทำวิทยานิพนธ์....11

3.2 ผลตอบสนองของกระบวนการเมื่อป้อนอินพุตแบบ ขั้นบันไดเพื่อหาค่า K_0 12

3.3 ผลผลตอบสนองของกระบวนการเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันไดเพื่อหาค่า K_1 13

4.1 Poles, zeros ของ $G(s)=[K(s+z_1)]/[s(s+p_2)(s+p_3)]$ 21

4.2 รูปแบบของตัวควบคุมแบบพีไอดี....23

4.3 โครงสร้างระบบควบคุม....26

4.4 แสดงระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่มี forward controller....27

4.5 แสดงระบบควบคุมแบบป้อนกลับแบบใช้ตัวควบคุมพีไอดี....31

5.1 โครงสร้างระบบควบคุมของระบบ DeltaV System....33

5.2 สื่อสารข้อมูลของระบบเดลต้าวี....34

5.3 การ์ดแลน....35

5.4 เน็ตเวอร์กสวิตซ์....36

5.5 ช่องสื่อสารสัญญาณของตัวควบคุม....36

5.6 ชุดตัวควบคุม....37

5.7 ตัวอย่างโปรแกรมทำงานด้านอินเจียเนียริ่งในการกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ....38

5.8 ตัวอย่างการเขียนโปรแกรมด้วยฟังก์ชั่นบล็อก....39

5.9 ตัวอย่างการเขียนโปรแกรมด้วยโฟลชาร์ล....40

5.10 PID ฟังก์ชั่นบล็อกของเดลต้าวี....41

5.11 ไดอะแกรมการทำงานของ PID ฟังก์ชั่นบล็อกของเดลต้าวี....42

5.12 แสดงตัวอย่างรูปแบบการทำงานของฟังก์ชั่นบล็อกกับกระบวนการ....43

5.13 หน้าตัวอย่างของการปรับค่าพารามิเตอร์โดยโอเปอเรเตอร์....44

5.14 หน้าตัวอย่างของการปรับค่าพารามิเตอร์โดยโอเปอเรเตอร์โดยละเอียด....45

5.15 หน้าตัวอย่างของการใช้ระบบเดลต้าวีจูน....46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.16 วิธีการเชื่อมข้อมูลและการทำงานระบบเดลต้าวีจูน.....46

5.17 โครงสร้างการทำงานระบบเดลต้าวีจูน.....47

5.18 คาบเวลาในการหาค่าตัวควบคุมของเดลต้าวีด้วยวิธีรีเลย์.....48

5.19 ระดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมในการปรับค่าตัวควบคุม.....49

5.20 แสดงของฟังก์ชั่นบล็อกของการปรับค่าตัวควบคุม.....51

5.21 แสดงฟังก์ชั่นบล็อกของการหาค่าพารามิเตอร์โดยวิธี Root Locus 51

5.22 แสดงหน้ากราฟิกที่ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ PID.....52

6.1 การประยุกต์ใช้ระบบเดลต้าวีจูนในการหาค่าพารามิเตอร์ PID 56

6.2 การปรับค่าสัญญาณเอาท์พุทของตัวควบคุมเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของ PID 57

6.3 การปรับค่าพารามิเตอร์ของ PID ใหม่ตามค่าที่หาได้จากโปรแกรมเดลต้าวีจูน.....58

6.4 กราฟแสดงผลของการปรับค่าเป้าหมายจาก 2ไปที่ 4.....58

6.5 กราฟแสดงผลของการปรับค่าเป้าหมายจาก 4ไปที่ 6.....59

6.6 กราฟแสดงผลของการปรับค่าเป้าหมายจาก 4ไปที่ 6 และภาพรวมของการปรับ.....59

6.7 กราฟิกที่ในการทดลองโดยใช้ระบบ ISR & Root Locus 61

6.8 โปรแกรมที่ใช้ในการหาค่า K0.....62

6.9 กราฟแสดงการหาค่า K0.....62

6.10 โปรแกรมที่ใช้ในการหาค่า K1.....63

6.11 กราฟแสดงการหาค่า K1.....63

6.12 โปรแกรมที่ใช้ในการหาค่า K2.....64

6.13 กราฟแสดงการหาค่า K2.....64

6.14 โปรแกรมแสดงที่หาค่าได้จากวิธีของ ISR และ Root Locus 65

6.15 แสดงการหาค่าพารามิเตอร์ที่หาค่าได้จากวิธีของ ISR และ Root Locus.....65

6.16 แสดงทางเดินรากของระบบ.....72

6.17 การปรับปรุงค่า PID ให้กับตัวควบคุม.....73

6.18 การเปลี่ยนโหมดตัวควบคุมให้เป็น CASCADE.....73

6.19 ปรับค่าเป้าหมายจาก 0 ไปที่ 2 ที่โหมดตัวควบคุมแบบ CASCADE.....74

6.20 กราฟแสดงผลของการปรับค่าเป้าหมายจาก 0ไปที่ 2.....76

6.21 กราฟแสดงผลของการปรับค่าเป้าหมายจาก 2ไปที่ 4.....76

6.22 กราฟแสดงผลของการปรับค่าเป้าหมายจาก 4ไปที่ 6.....77

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.23 กราฟแสดงผลของการปรับค่าเป้าหมายจาก 6ไปที่ 4.....77

6.24 กราฟแสดงผลของการปรับค่าเป้าหมายจาก 4ไปที่ 10.....78

6.25 กราฟแสดงผลของการปรับค่าเป้าหมายรวม.....78

6.26 กราฟแสดงผลของการปรับค่าเป้าหมายจาก 4 ไป 6 ที่ค่าเวลาเข้าที่ 180.....79

6.27 กราฟแสดงผลของการปรับค่าเป้าหมายจาก 6 ไป 4 ที่ค่าเวลาเข้าที่ 180.....79

6.28 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดระหว่างแบบจำลองที่ได้จากวิธี ISR และกระบวนการจริง.....80

ก.1 กระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน.....89

ก.2 ถังน้ำที่ใช้ในการทดลอง.....89

ก.3 วาล์วที่ใช้ในการปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำด้านออกจากถังใบที่ 2.....90

ก.4 วาล์วที่ใช้ในการปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำด้านออกจากถังที่ 1 ไปยังถังที่ 2.....90

ก.5 อุปกรณ์วัดระดับน้ำ (Differential Pressure Transmitter).....91

ก.6 ปั๊มน้ำที่ใช้ในการทดลอง.....93

ก.7 วงจรออปแอมป์แบบไม่กลับเฟส (Noninverting) ที่ใช้ขับมอเตอร์.....94

ก.8 อุปกรณ์ขับกระแสของปั๊มน้ำ.....95

ก.9 ชุดระบบควบคุมของเดลต้าวี.....96

ก.10 รายละเอียดทางเทคนิคไดอะแกรมการเชื่อมต่อของอนาล็กอินพุท.....99

ก.11 วาล์วที่ใช้ในการปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำด้านออกจากถังที่ 1 ไปยังถัง.....101

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจาก กระบวนการระดับน้ำแบบสองถังแบบมีผลต่อกัน มีสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการ ที่มีหลายตัวแปรและยากต่อการหาค่าที่ถูกต้องเสมือนกับค่าจากกระบวนการจริง และจะยิ่งมีความซับซ้อนในการออกแบบตัวควบคุมเมื่อต้องการที่จะ ควบคุมกระบวนการแบบ Two Input Two Output (TITO) Interacting Process บทความนี้ นำเสนอ วิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีแบบปรับค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติสำหรับกระบวนการระดับน้ำแบบสองถังแบบมีผลต่อกันโดยใช้การอินทริกรัลผลตอบสนองแบบบันได เพื่อหาแบบจำลองของกระบวนการ สมการคุณลักษณะของกระบวนการระดับน้ำแต่ละถัง จะหาได้จาก วิธีอินทริกรัลผลตอบสนอง จากนั้นจะทำการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดี แบบค่าอัตโนมัติโดยโปรแกรม DeltaV โดยวิธีทางเดินของรากตามข้อกำหนดทางสมรรถนะของระบบควบคุมตามที่ต้องการ ด้วยวิธีการออกแบบนี้ทำให้สามารถควบคุมกระบวนการระดับน้ำแบบ Single Input Single Output (SISO) Interacting Process ได้ ที่ค่าเป้าหมาย (set point) และ เปอร์เซ็นค่าพุ่งเกิน (% overshoot) , ความเร็วผลตอบสนอง ตามต้องการ เพื่อพิสูจน์ให้เห็นถึงความสะดวกและง่ายกว่าในการปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุม เมื่อเทียบกับวิธีการปรับค่าของตัวควบคุมพีไอดี (PID) โดยวิธีอื่น ที่ยังต้องอาศัยการ ลองผิดลองถูก ในการปรับค่า Kp, Ki, และ Kd แต่ละตัว

เพราะเหตุใดปัญหานี้ถึงน่าสนใจ

เนื่องจากการออกแบบระบบควบคุมในภาคอุตสาหกรรมปัจจุบัน สามารถออกแบบด้วยวิธีต่างๆ เช่น Trial and Error , Continuous Cycling Method หรือ Relay Feedback Method โดยแต่ละวิธีจะแตกต่างกันในขั้นตอนการออกแบบ ควบคุม และให้ประสิทธิภาพของระบบควบคุมที่ต่างกัน เพื่อเป็นการนำเสนออีกทางเลือกของการออกแบบระบบควบคุม จึงนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีแบบปรับค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติสำหรับกระบวนการระดับน้ำแบบสองถังแบบมีผลต่อกันโดยใช้การอินทริกรัลผลตอบสนองแบบบันได โดยพิสูจน์สมรรถนะของตัวควบคุมแบบพีไอดีแบบปรับค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติที่มีต่อกระบวนการระดับน้ำแบบสองถังแบบมีผลต่อกัน และนำไปเปรียบเทียบกับระบบควบคุมทางอุตสาหกรรม ที่ใช้การปรับค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติโดยวิธี รีเลย์

วิธีอินทริกรัลผลตอบสนอง (Integral Step Response, ISR) เป็นวิธีการหาแบบจำลองของกระบวนการโดยใช้วิธีการหาค่าสะสมของผลตอบสนอง ซึ่งจะทำการป้อนอินพุทแบบขั้นบันได (Unit step) ให้กับระบบและคำนวณค่าพารามิเตอร์ในทรานเฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการจากค่าพารามิเตอร์ K_0, K_1, K_2ที่ได้จากผลตอบสนองของระบบที่มีต่ออินพุทแบบขั้นบันได (unit step) นั้น ด้วยอินทริกรัลผลตอบสนอง (Integral Step Response, ISR) นี้ทำให้สามารถหาทรานเฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการที่มีสมการทางคณิตศาสตร์หลายตัวแปรและยากต่อการหาค่าที่ถูกต้องเสมือนกับค่าจากกระบวนการจริงอย่างกระบวนการระดับน้ำแบบสองถังแบบมีผลต่อกันได้และสามารถออกแบบตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติด้วยวิธีทางเดินของราก เพื่อให้ได้ผลตอบสนองของระบบควบคุมเป็นดังต้องการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอผลการทดลองในเชิงเปรียบเทียบกับวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าอัตโนมัติด้วยวิธีรีเลย์ ของระบบควบอุตสาหกรรม (Industrial Control System) ที่ใช้ในการควบคุมโรงงานอุตสาหกรรม ระบบควบคุมนี้เป็นของ บริษัท Emerson Process Management โดยระบบควบคุมนี้มีชื่อว่า เดลต้าวี (DeltaV) เป็นระบบการควบคุมแบบกระจายส่วน (Distributed Control System, DCS)

การเปรียบเทียบโปรแกรมทั้งสองระบบอยู่บน อุปกรณ์ ของเดลต้าวี (DeltaV) โดย ตัวเดลต้าวี (DeltaV) จะมีระบบ ตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าอัตโนมัติด้วยวิธีรีเลย์ และ เราเขียนโปรแกรมเพื่อหาแบบจำลองของกระบวนการด้วยวิธีอินทริกรัลผลตอบสนอง (Integral Step Response, ISR) แล้ว นำแบบจำลองของกระบวนการไปหาค่า Kp, Ki, และ Kd ด้วยวิธี ทางเดินของราก (Root Locus) ในการออกแบบตัวควบคุมนั้นจะต้องทำการกำหนดผลตอบสนองของสภาวะชั่วครู่ ในรูปของเปอร์เซ็นค่าพุ่งเกิน (Percent Overshoot, P.O) และที่สภาวะคงตัว ในรูปของค่าเวลาเข้าที่ (Settling time, t_s) เมื่อได้ค่า Kp, Ki และ Kd แล้วนำไปปรับค่าที่บล็อกพีไอดี (Block PID) เดียวกัน ที่ใช้หาค่าด้วยวิธีรีเลย์ (Relay) ของระบบเดลต้าวี (DeltaV) เพื่อเปรียบเทียบผล

ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ด้วยวิธีออกแบบตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าอัตโนมัติด้วยวิธีทางเดินของราก ให้ผลตอบสนองที่ค่าเป้าหมาย (set point) โดยสามารถระบุเปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินและค่าเวลาไต่ได้ตามต้องการ โดยไม่ต้องอาศัยการปรับแก้พารามิเตอร์ของตัวควบคุม อีกทั้งยังใช้เวลาวงรอบการควบคุมระบบ ที่น้อยกว่าวิธีรีเลย์อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาถึงโครงสร้างและคุณลักษณะของกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน

2. เพื่อศึกษาถึงโครงสร้างของระบบควบคุมที่ใช้กับกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน
3. เพื่อศึกษาถึงวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธี ทางเดินของราก (Root Locus) ซึ่งหาแบบจำลองของกระบวนการด้วยวิธีการอินทริกรัลผลตอบสนอง (Integral Step Response , ISR)

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาโครงสร้างกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันและหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ
2. ศึกษาหาแบบจำลองของกระบวนการ ด้วยวิธีการอินทริกรัลผลตอบสนอง (Integral Step Response, ISR) โดยใช้โปรแกรม DeltaV ในการหาค่า Gain ของกระบวนการ
3. ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีทางเดินราก (Root Locus) เพื่อควบคุมกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน โดยใช้แบบจำลองของกระบวนการที่ได้จากการหาด้วยวิธีการอินทริกรัลผลตอบสนอง (Integral Step Response, ISR) มาทำการออกแบบตัวควบคุม
4. นำค่า ตัวควบคุมพีไอดี Kp, Ki และ Kd มาปรับแต่งค่าบล็อกพีไอดี (Block PID) ของระบบเดลต้าวี (DeltaV) เพื่อเปรียบเทียบผลของ ระบบ การหาของโดย วิธี รีเลย์ (Relay) ของเดลต้าวี (DeltaV)

1.4 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 วัตถุประสงค์และทฤษฎีที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ ขอบเขตของการศึกษา และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบท

บทที่ 2 อธิบายคุณลักษณะของกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน, การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันและคุณลักษณะของกระบวนการ

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของวิธี การอินทริกรัลผลตอบสนอง (Integral Step Response, ISR) ที่ใช้สำหรับออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน

บทที่ 4 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของวิธีของทางเดินราก (Root Locus) และการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีทางเดินราก (Root Locus) สำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน

บทที่ 5 กล่าวถึง การออกแบบตัวควบคุมประยุกต์ใช้ในระบบ DCS โดยกล่าวถึงโครงสร้างของระบบ DCS ของเดลต้าวี (DeltaV) ทั้งฮาร์ดแวร์และซอฟแวร์ และนำมาออกแบบประยุกต์ใช้กับวิทยานิพนต์ฉบับนี้

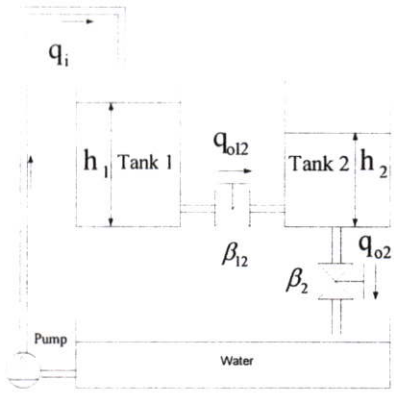
บทที่ 6 กล่าวถึงการทดลอง เพื่อหาค่า Gain, Reset และ Rate ด้วยวิธี Relay ของระบบ DeltaV และการหา Gain, Reset และ Rate โดยใช้วิธี Integral Step Response (ISR) และ Root Locus นำมาประยุกต์ใช้ในระบบเดลต้าวี พร้อมเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างวิธีรีเลย์และการใช้วิธีของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 7 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

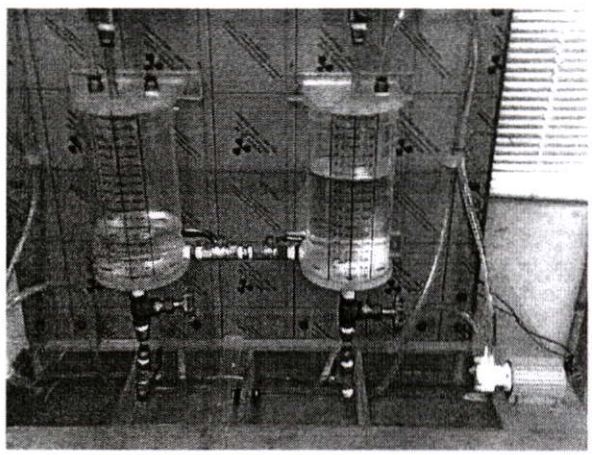
และในส่วนสุดท้ายของวิทยานิพนธ์นี้เป็นภาคผนวกแสดง รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์และประวัติผู้เขียน

บทที่ 2
กระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน

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



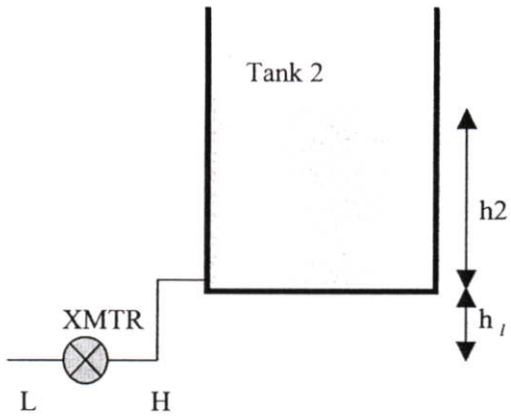
รูปที่ 2.1 กระบวนการระดับน้ำ 2 ถังแบบมีผลต่อกัน



รูปที่ 2.2 กระบวนการระดับน้ำ 2 ถังแบบมีผลต่อกัน จากรูปถ่ายจริง

2.1 การวัดระดับโดยการวัดความดันดิฟเฟอเรนเชียล

การวัดระดับโดยวิธีวัดความดันดิฟเฟอเรนเชียล เป็นวิธีที่เลือกใช้ในการวัดระดับของกระบวนการระดับน้ำสองถัง แบบมีผลต่อกัน มีหลักการวัดเบื้องต้น ดังนี้



รูปที่ 2.3 การวัดระดับน้ำถังที่ 2 โดยอุปกรณ์วัดความดันดิฟเฟอเรนเชียล

โดยทั่วไปแล้วการวัดระดับด้วยวิธีการวัดความดันดิฟเฟอเรนเชียลเป็นวิธีที่แพร่หลายในวงการอุตสาหกรรมวิธีหนึ่ง ซึ่งอุปกรณ์วัดความดันดิฟเฟอเรนเชียลจะวัดระดับของของเหลวในถังโดยตรวจจับความดันที่สองจุดคือ ที่จุดความดันสูงในระดับก้นถัง และที่จุดความดันต่ำในระดับสูงสุดของถัง ความดันแตกต่างที่อุปกรณ์วัดความดันดิฟเฟอเรนเชียลตรวจจับได้จะสัมพันธ์กับระดับความสูงของระดับของเหลวในถัง

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

จากรูปที่ 2.1 เป็นกรณีการวัดระดับของน้ำในถังที่สองโดยใช้อุปกรณ์วัดความดันดิฟเฟอเรนเชียลเป็นตัวตรวจจับ ความสัมพันธ์ของความดันที่อุปกรณ์วัดความดันดิฟเฟอเรนเชียลตรวจจับได้กับ Hydrostatic Pressure หรือ Pressure Head และความดันบรรยากาศแสดงได้ดังสมการ 2.1

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

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

เมื่อ

P_{high} คือ ความดันที่ด้านความดันสูงของตัวอุปกรณ์วัดความดันดิฟเฟอเรนเชียล

P_{low} คือ ความดันที่ด้านความดันต่ำของตัวอุปกรณ์วัดความดันดิฟเฟอเรนเชียล

P_{head} คือ Hydrostatic Pressure หรือ Pressure Head ที่เกิดจากน้ำหนักของของเหลว ในช่วงการวัด

P_{atm} คือ ความดันบรรยากาศ

P_{line} คือ ความดันที่เกิดจากของเหลวในสายยางจากก้นถังไปยังด้านความดันสูงของตัวอุปกรณ์วัดความดันดิฟเฟอเรนเชียล

ความสัมพันธ์ของ Hydrostatic Pressure หรือ Pressure Head กับความสูงของของเหลวในถังแสดงได้ดังสมการ 2.2

$$\text{Hydrostatic Pressure} = P_{head} = h \times SG_m \tag{2.2}$$

เมื่อ P_{head} คือ ค่าความดัน Head ที่เกิดจากน้ำหนักของของเหลวในช่วงการวัด มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรน้ำ

h คือ ค่าความสูงของของของเหลว มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

SG_m คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของสาร (ไม่มีหน่วย)

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

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

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากสมการสมดุลมวลและกฎของเบอร์นูลี (Bernoulli's) จะได้สมการทางคณิตศาสตร์สำหรับแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นของกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันดังนี้

$$\begin{aligned}\frac{dh_1(t)}{dt} &= -\frac{\beta_{12}a_{12}}{A_1}\sqrt{2g\left(h_1(t)-h_2(t)\right)} + \frac{k}{A_1}u(t)\\ \frac{dh_2(t)}{dt} &= -\frac{\beta_2 a_2}{A_2}\sqrt{2gh_2(t)} + \frac{\beta_{12}a_{12}}{A_2}\sqrt{2g\left(h_1(t)-h_2(t)\right)}\end{aligned} \tag{2.4}$$

โดย

A_i คือพื้นที่หน้าตัดของถัง i (cm^2)

a_2 คือพื้นที่หน้าตัดของรูทางออกของถังที่ 2 (cm^2)

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

h_i คือระดับน้ำในถังที่ i ;cm.

u คือ แรงดันที่จ่ายให้กับปั๊ม ;V

β_2 คือค่าตำแหน่งวาล์วที่ต่อทางด้านออกของถังที่ 2

β_{12} คือค่าตำแหน่งวาล์วที่ต่อระหว่างถังที่ 1 และถังที่ 2

g คือแรงโน้มถ่วงของโลก (cm/s^2)

k คือค่าอัตราขยายของปั๊มน้ำ ($cm^3/V \cdot s$)

อัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้าถังที่ 1 จะเป็นสัดส่วนกับ k , u และอัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้าถังที่ 2 จะเป็นสัดส่วนกับ k , u, β_{12} และความแตกต่างระหว่างความสูงของระดับน้ำในถังที่1 กับถังที่ 2 สัญญาณอินพุตหรือสัญญาณควบคุมที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการคือ u (ค่าสัญญาณแรงดันที่จ่ายให้กับปั๊มน้ำ) และสัญญาณเอาต์พุตที่วัดจากกระบวนการคือ h_2

2.3 คุณลักษณะของกระบวนการ

จากสมการที่ (2.4) เมื่อเมื่อทำให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นจะได้ดังสมการที่ (2.5)

$$\begin{aligned}\frac{dH_1(t)}{dt} &= \frac{1}{T_{12}}\left(-H_1(t)+H_2(t)\right)+\frac{k}{A_1}U(t)\\ \frac{dH_2(t)}{dt} &= -\frac{1}{T_2}H_2(t)+\frac{1}{T_{12}}\left(H_1(t)-H_2(t)\right)\end{aligned} \tag{2.5}$$

โดย

$$T_{12}=\frac{A_1}{\beta_{12}a_1}\sqrt{\frac{2(\overline{h_1}-\overline{h_2})}{g}},\ \text{s} \qquad T_2=\frac{A_2}{\beta_2 a_2}\sqrt{\frac{2\overline{h_2}}{g}},\ \text{s}$$

โดย

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

T_{12} คือค่าคงตัวเวลาระหว่างถังที่ 1 และถังที่ 2

T_2 คือค่าคงตัวเวลาของถังที่ 2

และ K และจากสมการที่ (2.5) ทำให้อยู่ในรูปแบบจำลองเชิงเส้นจะได้ดังสมการที่ (2.6)

$$\frac{H_2(s)}{U(s)} = G(s) = \frac{K}{T_{12}T_2 s^2 + (T_{12} + 2T_2)s + 1} \tag{2.6}$$

โดย

$$K = \frac{k\,T_2}{A_2}, \text{cm/V}$$

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

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

สมการที่ (2.6) นี้เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม ตัวแปรเอาท์พุตคือระดับน้ำในถังที่ 2 ตัวแปรอินพุตคือค่าระดับแรงดันที่จ่ายให้กับปั๊มน้ำ ณ ถังที่ 1 เป็นกระบวนการแบบหนึ่งอินพุต หนึ่งเอาท์พุต

2.4 สรุป

กระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันดังที่ได้อธิบายในบทที่ 2 นี้เป็นกระบวนการที่ถูกเลือกใช้เพื่อนำมาทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมพีไอดีที่ออกแบบด้วยวิธีทางเดินราก โดยจากแบบจำลองของกระบวนการที่หาได้ด้วยวิธี Integral Step Response (ISR) แม้ว่าจะเป็นกระบวนการที่มีหนึ่งอินพุต หนึ่งเอาท์พุต แต่มีคุณลักษณะของความไม่เป็นเชิงเส้นและความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์สูง และกระบวนการระดับน้ำแบบสองถังแบบมีผลต่อกัน มีสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการ ที่มีหลายตัวแปรและยากต่อการหาค่าที่ถูกต้องเสมือนกับค่าจากกระบวนการจริง และจะยิ่งมีความซับซ้อนในการออกแบบตัวควบคุมเมื่อต้องการที่จะ ควบคุมกระบวนการแบบ Two Input Two Output (TITO) Interacting Process จึงถือว่าเป็นกระบวนการที่น่าสนใจที่จะนำมาทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมอีกวิธีหนึ่ง

บทที่ 3
วิธีหาแบบจำลองของกระบวนการของน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันด้วยวิธีการอินทริกรัลผลตอบสนอง (Integral Step Response, ISR)

3.1 กล่าวนำ

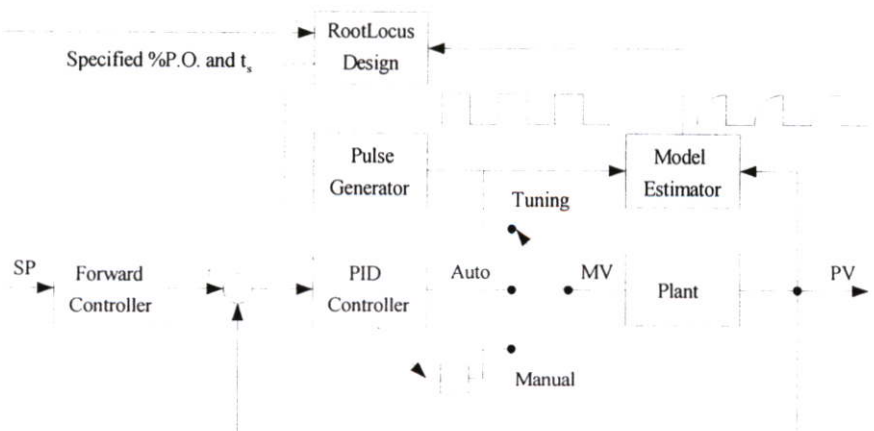
วิธีอินทริกรัลผลตอบสนอง (Integral Step Response, ISR) เป็นวิธีหาแบบจำลองของกระบวนการวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพมากเนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถใช้ประยุกต์หาแบบจำลอของกระบวนการได้ง่ายและแบบจำลองของกระบวนการที่ได้ จะใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมาก

3.2 โครงสร้างของระบบควบคุม

จากรูป รูปที่ 3.1 เป็นโครงสร้างของระบบควบคุมที่ใช่ในการศึกษาวิทยานิพนธ์นี้ เราจะทำการออกแบบระบบควบคุมกระบวนการของ ระดับน้ำ 2 ถังแบบมีผลต่อกันโดยการจำลองกระบวนการของระดับน้ำ 2 ถังแบบมีผลต่อกัน โดยใช้วิธี วิธีอินทริกรัลผลตอบสนอง (Integral Step Response, ISR) โดยการป้อนสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดให้กับกระบวนการ หลังจากได้แบบจำลองกระบวนการ ระดับน้ำ 2 ถังแบบมีผลต่อกันแล้วนำแบบจำลองของกระบวนการไปออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางเดินรากโดยการกำหนดผลตอบสนองของสภาวะชั่วครู่และที่สภาวะคงตัว เพื่อหาค่า ตัวควบคุมพีไอดี Kp, Ki และ Kd มาปรับแต่งค่าตัวควบคุม (PID Controller)

โครงสร้างระบบควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 โดยระบบควบคุมประกอบไปด้วย 3 ส่วนคือ

1. กระบวนการระดับน้ำ 2 ถังแบบมีผลต่อกัน
2. ส่วนการหาแบบจำลองกระบวนการ
3. ตัวควบคุมแบบ 2 ขั้นอิสระ



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของระบบควบคุมในการทำวิทยานิพธ์

3.3 วิธีอินทริกรัลผลตอบสนอง (Integral Step Response, ISR)

รูปแบบของกระบวนการ (Plant) นั้น เมื่อพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการ ให้อยู่ในรูปแบบดังนี้

$$G(s)=\frac{K_0\prod_{i=1}^{n-1}(1+\gamma_i s)}{\prod_{i=1}^{n}(1+\tau_i s)}=\frac{K_0[1+(\gamma_1+\gamma_2+\cdots+\gamma_{n-1})s+\cdots+(\gamma_1\gamma_2\cdots\gamma_{n-1})s^{n-1}]}{[1+(\tau_1+\tau_2+\cdots+\tau_n)s+(\tau_1\tau_2\cdots\tau_n)s^n]}$$

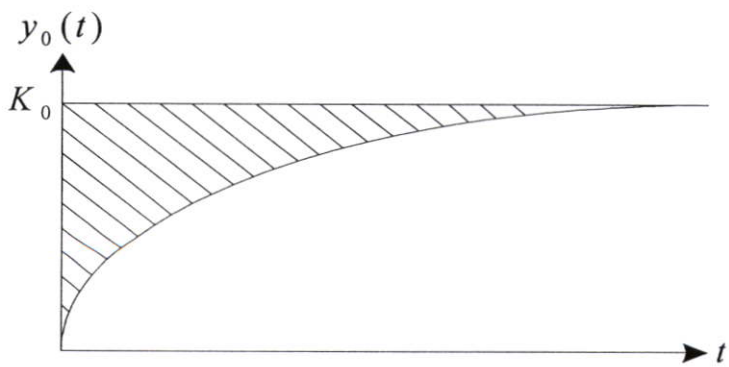
$$=\frac{[K_0+b_1 s+\cdots+b_{n-1}s^{n-1}]}{[1+a_1 s+\cdots a_n s^n]} \tag{3.1}$$

โดย

$$b_1=K_0(\gamma_1+\gamma_2+\cdots+\gamma_{n-1}) \qquad a_1=(\tau_1+\tau_2+\cdots+\tau_n)$$
$$\vdots \qquad\qquad\qquad \vdots$$
$$b_{n-1}=K_0(\gamma_1\gamma_2\cdots\gamma_{n-1}) \qquad a_n=(\tau_1\tau_2\cdots\tau_n)$$

พิจารณาให้สัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดแก่กระบวนการ

$$y_0(t)=\int_0^{\infty} g(t-\tau)1(\tau)d\tau \tag{3.2}$$



รูปที่ 3.2 ผลตอบสนองของกระบวนการเมื่อป้อนอินพุตแบบ ขั้นบันไดเพื่อหาค่า K_0

พิจารณารูปที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าสามารถพิจารณาหาค่าผลตอบสนองของกระบวนการที่สภาวะคงตัวได้ และจากทฤษฎีค่าสุดท้ายสมการที่ (3.2) เขียนได้ดังนี้

$$\lim_{t\to\infty} y_0(t) = \lim_{s\to 0} s\frac{G(s)}{s} = \lim_{s\to 0}\frac{[K_0 + b_1 s + \cdots b_{n-1}s^{n-1}]}{[1 + a_1 s + \cdots a_n s^n]} \qquad (3.3)$$
$$= K_0$$

ต่อไปกำหนดให้

$$y_1(t) = \int_0^\infty [K_0 - y_0(\tau)]d\tau \qquad (3.4)$$

โดย $y_1(t)$ คือพื้นที่ใต้กราฟระหว่างค่า K_0 และ $y_0(t)$ ทำลาปลาส สมการที่ (3.4) ได้

$$Y_1(s) = \frac{1}{s}\left[\frac{K_0}{s} - Y_u(s)\right]$$

$$= \frac{1}{s}\left[\frac{K_0}{s} - \frac{G(s)}{s}\right]$$

$$Y_1(s) = \frac{1}{s^2}[K_0 - G(s)] \qquad (3.5)$$

กำหนดให้

$$G_1(s) = [K_0 - G(s)] = \frac{(K_0 a_1 - b_1)s + (K_0 a_2 - b_2)s^2 + \cdots + K_0 a_n s^n}{1 + a_1 s + \cdots a_n s^n} \qquad (3.6)$$

จากทฤษฎีค่าสุดท้ายสมการที่ (3.5) เขียนได้ดังนี้

$$\lim_{t\to\infty} y_1(t) = \lim_{s\to 0} s\frac{[K_0 - G(s)]}{s^2} = \frac{1}{s}[K_0 - G(s)] = K_0 a_1 - b_1 \qquad (3.7)$$
$$= K_1$$

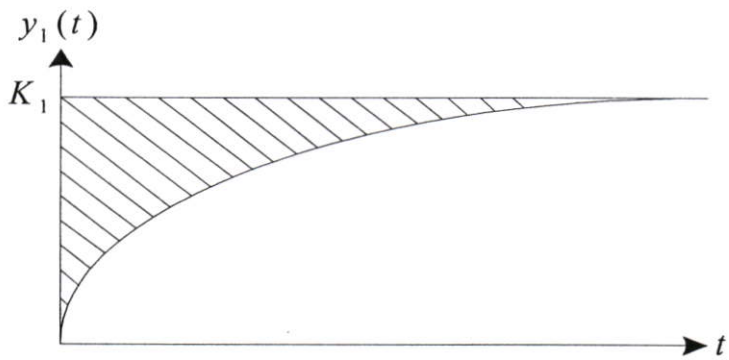
ในขณะนี้เราได้ผลลัพธ์อยู่ 2 สมการ

$$K_0 = \lim_{s\to 0} G(s)$$
$$K_1 = K_0 a_1 - b_1$$

กำหนดให้

$$y_2(t) = \int_0^{\infty} [K_1 - y_1(\tau)]d\tau \tag{3.8}$$

โดย $y_2(t)$ คือพื้นที่ใต้กราฟระหว่างค่า K_1 และ $y_1(t)$



รูปที่ 3.3 ผลตอบสนองของกระบวนการเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันไดเพื่อหาค่า K_1

ทำลาปลาสสมการที่ (3.8) ได้

$$\begin{aligned} Y_2(s) &= \frac{1}{s}\left[\frac{K_1}{s} - Y_1(s)\right] \\ &= \frac{1}{s}\left[\frac{K_1}{s} - \frac{G_1(s)}{s^2}\right] \\ &= \frac{1}{s^2}\left[K_1 - \frac{G_1(s)}{s}\right]. \end{aligned} \tag{3.9}$$

$$G_2(s) = \frac{1}{s^2}\left[K_1 - \frac{G_1(s)}{s}\right] \tag{3.10}$$

จากทฤษฎีค่าสุดท้ายสมการที่ (3.9) เขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \lim_{t\to\infty} y_2(t) &= \lim_{s\to 0} Y_2(s) \\ &= \lim_{s\to 0} s\left[K_1 - \frac{G_1(s)}{s}\right] \\ &= a_1k_1 - a_2k_0 + b_2 \end{aligned} \tag{3.11}$$

จะได้

$$K_2 = a_1 k_1 - a_2 k_0 + b_2$$

ในขณะนี้เราได้ผลลัพธ์อยู่ 3 สมการ

$$K_0 = \lim_{s \to 0} G(s)$$
$$K_1 = \mathrm{a_1 K_0} - b_1$$
$$K_2 = a_1 k_1 - a_2 k_0 + b_2$$

จากสมการที่ได้อธิบายมา แสดงให้เห็นได้ว่าถ้ากระบวนการมีอันดับสูงๆจะต้องทำการป้อนอินพุตแบบขั้นบันไดหลายครั้ง ซึ่งจำนวนในการป้อนอินพุตแบบขั้นบันได้นั้น จะขึ้นอยู่กับอันดับของกระบวนการ โดยสามารถสรุปเป็นสมการในการหาค่า K_i ได้ดังนี้

$$K_i = K_{i-1} a_1 - K_{i-2} a_2 + K_{i-3} a_3 - \cdots + (-1)^{i+1} K_0 a_i + (-1)^i b_i \quad i = 1, 2, \ldots, n \tag{3.12}$$

3.4 วิธีอินทริกรัลผลตอบสนอง ประยุกต์ใช้กับกระบวนการของน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน

การประยุกต์ใช้วิธีอินทริกรัลผลตอบสนอง (Integral Step Response, ISR) กับกระบวนการของน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน จากทฤษฎีของสมการของกระบวนการทั่วไป ในสมการที่ (3.1) เราสามารถพิจารณาให้อยู่ในรูปของกระบวนการของน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน เมื่อสมการที่ (3.13) เป็นสมการของกระบวนการของน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน

$$G(s) = \frac{K}{1 + T_{12} T_2 s^2 + (T_{12} + 2T_2)s} \tag{3.13}$$

โดยที่ $T_{12} = \dfrac{A_1}{\beta_{12} a_1} \sqrt{\dfrac{2(\overline{h_1} - \overline{h_2})}{g}}$, s $\quad T_2 = \dfrac{A_2}{\beta_2 a_2} \sqrt{\dfrac{2\overline{h_2}}{g}}$, s

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

และจากสมการ (3.1) กำหนดให้

$$a_1 = (\tau_1 + \tau_2 + \cdots + \tau_n) \quad a_n = (\tau_1 \tau_2 \cdots \tau_n)$$

เมื่อเป็นกระบวนการของน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันเรากำหนดให้

$$a_1 = (T_{12} + 2T_2)$$
$$a_2 = (T_{12} T_2)$$

จาก สมการ (3.2) พิจารณาให้สัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดแก่กระบวนการ

$$y_0(t) = \int_0^\infty g(t-\tau) 1(\tau) d\tau$$

ดังนั้นกระบวนการของน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน แทนลงในสมการ (3.3) จะได้

$$\lim_{t\to\infty} y_0(t) = \lim_{s\to 0} s \frac{G(s)}{s} = \lim_{s\to 0} \frac{K}{[1 + a_1 s + a_2 s^2]} \qquad (3.14)$$
$$= K$$

จากสมการ (3.4), (3.5) และ (3.6) จะได้

$$G_1(s) = [K - G(s)] = \frac{K(1 + a_1 s + a_2 s^2) - K}{1 + a_1 s + a_2 s^2}$$
$$= \frac{K + K a_1 s + K a_2 s^2 - K}{1 + a_1 s + a_2 s^2}$$

$$G_1(s) = \frac{K a_1 s + K a_2 s^2}{1 + a_1 s + a_2 s^2} \qquad (3.15)$$

จากทฤษฎีค่าสุดท้ายสมการที่ (3.5) เขียนในรูปของสมการ (3.15) ได้ดังนี้

$$\lim_{t\to\infty} y_1(t) = \lim_{s\to 0} s \frac{[K - G_1(s)]}{s^2} = \frac{1}{s}[K - G(s)] = K a_1 \qquad (3.16)$$
$$= K_1$$

ในขณะนี้เราได้ผลลัพธ์อยู่ 2 สมการ

$$K = \lim_{s\to 0} G(s) = K_0$$
$$K_1 = K\mathrm{a}_1$$

จากสมการ (3.8), (3.9), (3.10) และ (3.11) จะได้

$$\lim_{t\to\infty} y_2(t) = \lim_{s\to 0} Y_2(s)$$
$$= \lim_{s\to 0} s\left[K_1 - \frac{G_1(s)}{s}\right]$$
$$= a_1K_1 - a_2K_0$$

จะได้

$$K_2 = a_1K_1 - a_2K_0 \tag{3.17}$$

สรุปจากจากทฤษฎีค่าสุดท้ายทำให้เราได้ค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการกระบวนการระดับน้ำสองถังดังนี้

$$K = \lim_{s\to 0} G(s) = K_0$$
$$K_1 = a_1K_0 \tag{3.18}$$
$$K_2 = a_1K_1 - a_2K_0$$

จากสมการ (3.18) นั้นคือเราสามารถหากระบวนการจำลองของกระบวนการระดับน้ำสองถัง โดยใช้วิธี ISR เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการได้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

บทที่ 4

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดี ด้วยวิธี Root Locus

4.1 ความรู้เบื้องต้นวิธี Root Locus

การตรวจสอบสมรรถนะของระบบควบคุมเมื่อพารามิเตอร์ขอบระบบหนึ่งตัวหรือมากกว่านั้นแปรค่าไปเกินกว่าขอบเขตที่กำหนดให้เป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างหนึ่งในการพิจรณาออกแบบระบบควบคุม ดังที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าสมการคุณลักษณะ(Characteristic equation) ของระบบมีบทบาทสำคัญในการวิเคราะห์พฤติกรรมทางพลศาสตร์ (dynamic behavior) ของระบบเชิงเส้น วิธี root-locus ซึ่งเป็นวิธีที่ศึกษาถึงทางเดินของรากของสมการคุณลักษณะของระบบเมื่อพารามิเตอร์แปรค่าไปจึงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่งในการศึกษาระบบควบคุม นอกจากนี้เรายังสามารถจะนำวิธี root-locus นี้ไปประยุกต์เพื่อหารากของสมการทางพีชคณิตที่มีอันดับสูงๆได้อีกด้วย โดยทั่วไปวิธีของ root-locus จะใช้สำหรับพิจารณาทางเดินของรากเมื่อพารามิเตอร์หนึ่งตัวแปรค่าไป แต่ในกรณีที่พารามิเตอร์มากกว่าหนึ่งแปรค่าไปนั้นก็สามารถจะใช้วิธีของ root-locus ได้เช่นกัน พิจารณาสมการที่มี K เป็นพารามิเตอร์ที่แปรค่าต่อไปนี้

$$F(s) = S^n + a_1 S^{n-1} + ... + a_{n-1} S + a_n + K(S^m + b_1 S^{m-1} + ... + b_{m-1} S + b_m) = 0 \qquad (4.1)$$

โดยที่ K เป็นพารามิเตอร์ที่แปรค่า ในที่นี้กำหนดให้ K แปรค่าจาก $-\infty$ ถึง $+\infty$ และจะสมมติให้สัมประสิทธ์ $a_1, ..., a_n$ และ $b_1, ..., b_m$ นั้นมีค่าคงที่ โดยสัมประสิทธิ์เหล่านี้อาจจะเป็นค่าจริงหรือจำนวนเชิงซ้อน (complex number) ก็ได้แต่ส่วนใหญ่เราจะพิจารณาถึงสัมประสิทธิ์ที่เป็นค่าจริงเท่านั้น โดยทั่วไปเราจะแบ่งชนิดของทางเดินออกเป็น 3 ชนิดดังนี้

1. Root loci : root loci เป็นทางเดินของรากเมื่อ K ในสมการ(4.1) แปรค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง ∞
2. Complementary root loci : บางครั้งเรียกว่า Inverse root loci เป็นทางเดินของรากเมื่อ K ในสมการ(6-1) แปรค่าอยู่ในช่วง $-\infty$ ถึง 0

ถ้านำทางเดินของรากทั้ง 2 แบบในข้อ 1 และ ข้อ 2 มารวมกันจะเรียกว่า root loci ที่สมบูรณ์ (complete root loci)

3. Root contours : root contours เป็นทางเดินของรากเมื่อพารามิเตอร์มากกว่า 1 ตัวแปรค่าไป

63631

4.1.1 เงื่อนไขเบื้องต้นของ ROOT LOCI

พิจารณาระบบควบคุมเชิงเส้นที่มี Transfer function ดังนี้

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)H(s)} \tag{4.2}$$

สมการคุณลักษณะ Open loop ของระบบหาได้โดยการกำหนดให้เทอมของส่วนในสมการ(4.2) มีค่าเท่ากับ 0 นั่นคือ

$$1+G(s)H(s)=0 \tag{4.3}$$

สมการ (4.2) เป็นสมการของ closed-loop transfer function ของระบบที่มีการป้อนกลับเป็นการป้อนกลับแบบลบ (negative feedback) โดยมี

$C(s)$ = สัญญาณเอาท์พุต

$R(s)$ = อินพุทอ้างอิง

$G(s)$ = forward-path transfer function

$H(s)$ = feedback-path transfer function

$G(s)H(s)$ = loop transfer function

ถ้าจัดรูปสมการ (4.1) ให้อยู่ในรูปสมการ (4.3) จะได้ว่า

$$1+\frac{K(s^m + b_1 s^{m-1} + ... + b_{m-1}s + b_m)}{s^n + a_1 s^{n-1} + ... + a_{n-1}s + b_n} = 0 \tag{4.4}$$

จากสมการ (4.3) และสมการ (4.4) จะให้ผลดังนี้

$$G(s)H(s) = \frac{K(s^m + b_1 s^{m-1} + ... + b_{m-1}s + b_m)}{s^n + a_1 s^{n-1} + ... + a_{n-1}s + b_n} \tag{4.5}$$

เพื่อที่จะศึกษาถึง root loci ที่สมบรูณ์โดยการพิจารณาถึงทางเดินของรากในระบบ Sโดยที่ K แปรค่าจาก $-\infty$ ถึง $+\infty$ ถ้าเราเขียนสมการ (4.5) ใหม่เป็น

$$G(s)H(s) = KG_1(s)H_1(s) \tag{4.6}$$

จะเห็นว่า $G_1(s)H_1(s)$ ไม่ได้ประกอบด้วยพารามิเตอร์ K ดังนั้นเราจะเขียนสมการ (4.3) ใหม่ได้ดังนี้

$$G_1(s)H_1(s) = -\frac{1}{K} \tag{4.7}$$

เนื่องจาก S เป็นจำนวนเชิงซ้อน ดังนั้นจากสมการ (4.7) จะมีเงื่อนไขดังนี้

$$\left|G_1(s)H_1(s)\right| = \frac{1}{|K|} \qquad -\infty < K < \infty \tag{4.8}$$

$$\underline{\left|G_1(s)H_1(s)\right.} = (2K+1)\pi \qquad K \geq 0 \tag{4.9}$$

$$\underline{\left|G_1(s)H_1(s)\right.} = 2K\pi \qquad K \leq 0 \tag{4.10}$$

โดยที่ $K = 0, \pm 1, \pm 2, ...$

ในทางปฏิบัติ เราสามารถสร้าง root loci ที่สมบูรณ์ได้โดยการหาจุดทุกจุดบนระนาบ S ที่สอดคล้องกับสมการ (4.9) และสมการ (4.10) จากนั้นสามารถคำนวณค่าของ K ได้โดยใช้สมการ (4.11)

การสร้าง root loci จะเป็นวิธีทางกราฟที่จะเริ่มต้นจากการกำหนดตำแหน่ง poles และ zeros ของ loop transfer function $G(s)H(s)$ ก่อน ดังนั้นขั้นแรกจะต้องเขียนสมการ (4.5) ให้อยู่ในรูปของ poles และ zeros จะได้ว่า

$$\begin{aligned} G(s)H(s) &= \frac{K(s+z_1)(s+z_2).....(s+z_m)}{(s+p_1)(s+p_2).....(s+p_n)} \\ &= KG_1(s)H_1(s) \end{aligned} \tag{4.11}$$

โดยที่ Poles และ zeros ในสมการ (4.11) สมารถเป็นได้ทั้งค่าจริงหรือจำนวนเชิงซ้อน สมการ (6-8) สมการ (6-9) และสมการ (6-10) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\left|G_1(s)H_1(s)\right| = \frac{\prod_{i=1}^{m}|s+z_i|}{\prod_{j=1}^{n}|s+p_j|} = \frac{1}{|K|} \qquad -\infty < K < \infty \tag{4.12}$$

และ

$$\underline{\left|G_1(s)H_1(s)\right|} = \sum_{i=1}^{m}\underline{|s+z_i|} + \sum_{j=1}^{n}\underline{|s+p_j|}$$

$$= (2K+1)\pi \qquad 0 \le K \le \infty \tag{4.13}$$

$$\underline{\left|G_1(s)H_1(s)\right|} = \sum_{i=1}^{m}\underline{|s+z_i|} + \sum_{j=1}^{n}\underline{|s+p_j|}$$

$$= 2K\pi \qquad -\infty \le K \le 0 \tag{4.14}$$

โดยที่ $K = 0, \pm 1, \pm 2, ...$

สมการ (4.13) จะบอกให้ทราบว่า สำหรับค่าใดค่าหนึ่งของ K ที่เป็นบวก จุด S_1 (จุดที่สมมติ) ในระบาบ S จะเป็นจุดที่อยู่บนทางเดินของรากถ้าความแตกต่างระหว่างผลรวมของมุม vectors ที่ถูกลากจาก zeros และ poles ของ $G(s)H(s)$ ไปยังจุด S_1 ที่สมมติมีค่า 180 องศา (หรือ $180^\circ X$ เลขคี่จำนวนเต็ม) ทำนองเดียวกันสำหรับค่าลบของ K สมการ (4.14) จะบอกให้เราทราบว่าจุดใดๆบน complementary root loci ต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขที่ว่าความแตกต่างระหว่างผลรวมของมุม vectors ที่ลากจาก zeros และ poles ของ $G(s)H(s)$ ไปยังจุดนั้นมีค่าเท่ากับ $0^\circ, 360^\circ, 720^\circ, ...$ (หรือ $180^\circ X$ เลขคี่จำนวนเต็ม)

เพื่อเป็นตัวอย่างที่จะแสดงถึงการใช้สมการ (4.13) และสมการ (4.14) ในการสร้าง root loci ให้พิจารณา loop transfer function $G(s)H(s)$ (หรือ forward-path transfer function) ถ้า $H(s)=1$ ต่อไปนี้

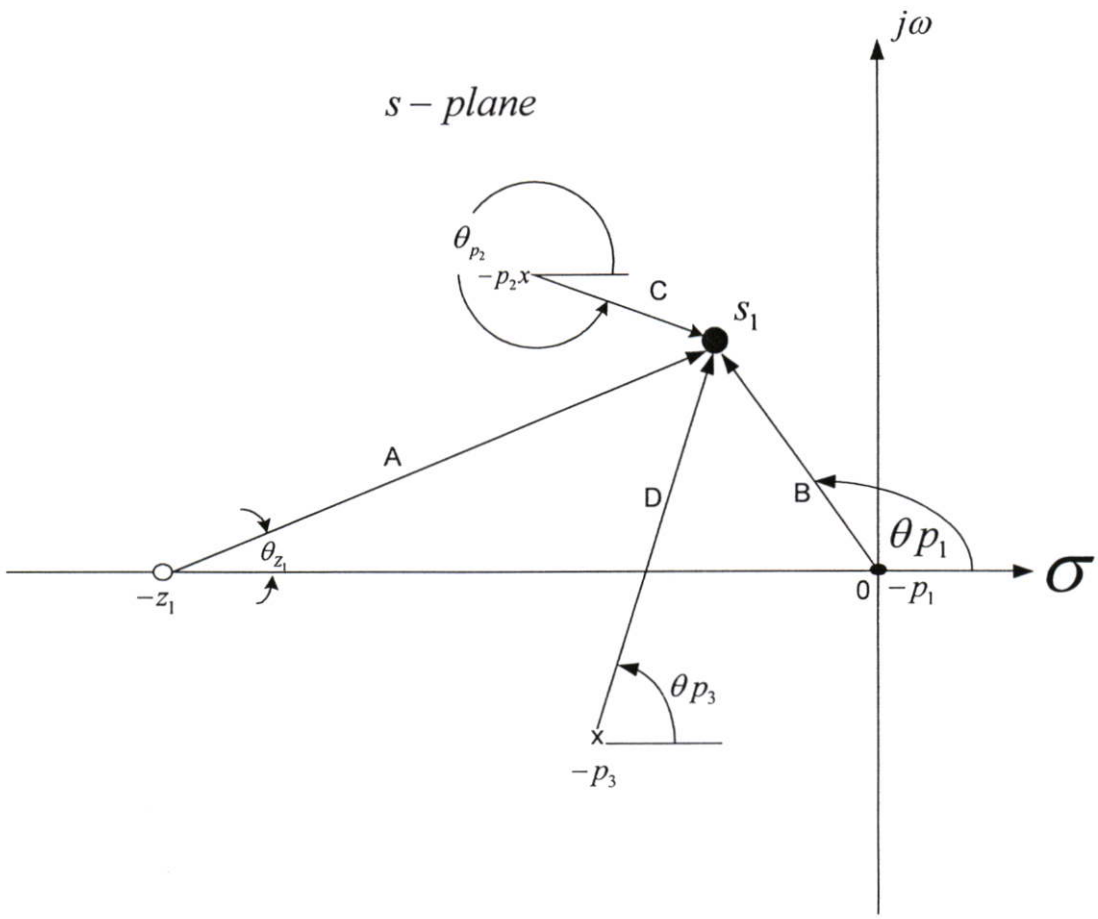
$$G(s)H(s) = \frac{K(s+z_1)}{s(s+p_2)(s+p_3)} \tag{4.15}$$

รูปที่ 4.1 จะแสดงถึงตำแหน่งของ zeros และ poles ที่เราสมมติขึ้นมาเอง ขั้นต่อไป เลือกจุด S_1 ในระนาบ S ขึ้นมา ลาก vectors จาก zeros และ poles ของ $G(s)H(s)$ ไปยังจุด S_1 จุด S_1 จะเป็นจุดที่อยู่บน root loci $(0 \le K \le \infty)$ ได้ก็จะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขในสมการ (6-12) และ สมการ (6-13) นั่นคือ

$$\frac{|s_1 + z_1|}{|s_1||s_1 + p_2||s_1 + p_3|} = \frac{1}{|K|} \tag{4.16}$$

และ

$$\underline{|s_1 + z_1} - (\underline{|s_1} + \underline{|s_1 + p_2} + \underline{|s_1 + p_3}) = (2K+1)\pi \quad , K = 0, \pm 1, \pm 2, ... \tag{4.17}$$



รูปที่ 4.1 Poles, zeros ของ $G(s) = [K(s+z_1)]/[s(s+p_2)(s+p_3)]$

ทำนองเดียวกัน จุด S_1 จะเป็นจุดที่อยู่บน complementary root loci $(-\infty \le K \le 0)$ ได้ก็ต่อเมื่อสอดคล้องกับเงื่อนไขในสมการ (4.14) นั่นคือ

$$\underline{|s_1 + z_1|} - (\underline{|s_1|} + \underline{|s_1 + p_2|} + \underline{|s_1 + p_3|}) = 2K\pi \qquad , K = 0, \pm 1, \pm 2, ... \tag{4.18}$$

จากรูป 6-1 มุม θ_{z1} , θ_{p1} , θ_{p2} และ θ_{p3} เป็นมุมของ vectors ที่วัดได้โดยมีแกน real หรือแนวนอนเป็นแนวอ้างอิง สมการ (4.17) และ สมการ (4.18) จะเขียนใหม่ได้ว่า

$$\theta_{z1} - (\theta_{p1} + \theta_{p2} + \theta_{p3}) = (2K + 1)\pi \qquad 0 \le K \le \infty \tag{4.19}$$

และ

$$\theta_{z1} - (\theta_{p1} + \theta_{p2} + \theta_{p3}) = 2K\pi \qquad -\infty \le K \le 0 \tag{4.20}$$

ถ้าจุด S_1 สอดคล้องกับเงื่อนไขของสมการ (4.19) หรือสมการ (4.20) เราก็สามารถจะคำนวณหาค่าของ K ที่จุด S_1 นั้นได้โดยใช้สมการ (4.16)

$$|K| = \frac{|s_1||s_1 + p_2||s_1 + p_3|}{|s_1 + z_1|} \tag{4.21}$$

ถ้ารูป 4.1 นี้ใช้สเกลที่ถูกต้องแน่นอนแล้ว ขนาดของ $|s_1 + z_1|$, $|s_1|$, $|s_1 + p_2|$ และ $|s_1 + p_3|$ ก็จะแทนได้ด้วยความยาวของ vectors ที่ลากจาก zeros และ poles แต่ละตัวไปยังจุด S_1 ดังในรูป ถ้าแทนความยาวของ vectors ด้วย A,B,C และ D ตามลำดับแล้ว จะได้ค่าของ K ดังนี้

$$|K| = \frac{BCD}{A} \tag{4.22}$$

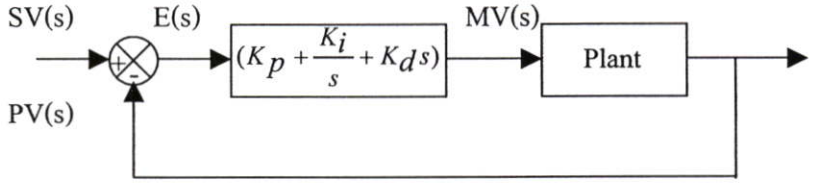
สำรับเครื่องหมายของ K นั้นจะขึ้นอยู่กับว่าจุด S_1 นั้นอยู่บน root loci หรือ อยู่บน complementary root loci

ดังที่ได้กล่าวมาจะเห็นว่าถ้าเราทราบตำแหน่งต่างๆ ของ poles และ zeros ของ loop transfer function $G(s)H(s)$ แล้ว เราสามารถจะสร้างทางเดินของรากที่สมบูรณ์ได้ตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. หาจุด S_1 ทุกๆ จุดในระนาบ S ที่สอดคล้องกับสมการ (4.9) และ (4.10)
2. ค่าต่างๆ ของ K บน root loci และบน complementary root loci หาได้โดยการใช้สมการ (6-8) โดยที่ K จะเป็นบวกเมื่อจุด S_1 อยู่บน root loci และเป็นลบเมื่อจุด S_1 อยู่บน complementary root loci

4.2 ความรู้เบื้องต้นของตัวควบคุมแบบ Proportional Integral Derivative (PID)

จากรูปที่ 4.2 นั้นเป็นรูปแบบพื้นฐานที่ใช้ในการทำความเข้าใจการทำงานของตัวควบคุมพีไอดี สมการของตัวควบคุมใน s-Domain แสดงได้ด้วยสมการที่ (4.23)



รูปที่ 4.2 รูปแบบของตัวควบคุมแบบพีไอดี

$$MV = \left(Kp + \frac{Ki}{s} + Kds \right) * e(t) \tag{4.23}$$

โดยที่

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

PV(s) = สัญญาณตัวแปรกระบวนการ (Process Variable)

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

MV(s) = สัญญาณตัวแปรปรับกระบวนการ (Manipulated Signal)

Kp = Proportional Gain

Ki = Integral Gain

Kd = Derivative Gain

ในทางการควบคุมงานอุตสาหกรรมนั้น โดยทั่วไปผู้ผลิตตัวควบคุมมักจะไม่ออกแบบให้ปรับ Kp , Ki , Kd โดยตรง แต่จะนิยมใช้ค่าที่ เรียกว่า Proportional band (PB),Integral time, Ti และ Derivative time, Td ดังนั้นสมการ (4.23) สามารถเขียนในอีกรูปแบบหนึ่งคือ

$$MV = \left(\frac{100}{PB}\right) * \left(1 + \frac{1}{Tis} + Tds\right) * e(t) \qquad (4.24)$$

โดย

Proportional band, PB = 100 / Kp

Integral time, Ti = Kp / Ki

Derivative time, Td = Kd / Kp

4.2.1 ผลของพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PID กับกระบวนการ

4.2.1.1 ผลของ Proportional Band (PB) กับกระบวนการ

ผลของ Proportional Band (PB) กับการควบคุมกระบวนการ Proportional Band จะเป็นสัดส่วนผกผันกับค่าอัตราขยายของกระบวนการ โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราขยายกับค่า Proportional Band สามารถแสดงได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ (4.25)

$$GAIN = \frac{100}{PB} \qquad (4.25)$$

สำหรับผลของ Proportional Band ที่ใช้กับการควบคุมแบบ P-Control นั้นค่า Proportional Band จะมีผลกับขนาดของผลตอบสนองรวมไปถึงเรื่องความไว (Sensitivity) และออฟเซต (Offset) หรือค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว (Steady State Error) ผลของ Proportional Band ที่มากเกินไปจะมีผลทำให้เกิดค่าผิดพลาด (Error) ในสถานะคงตัวมากขึ้นและจะทำให้ความไวของผลตอบสนองในทางกลับกันค่าของ Proportional Band ที่น้อยเกินไปนั้น จะทำให้กระบวนการเกิดการแกว่งขึ้นหรือเข้าใกล้จุดไร้เสถียรภาพ (Unstable) มาก

4.2.1.2 ผลของ Integral Time กับกระบวนการ

สำหรับ Integral Action นั้นจะมีผลกับผลตอบสนองของค่าสะสม แต่จะไม่มีผลกับผลตอบสนองในลักษณะทันทีทันใด การลดค่า Integral Time จะมีผลทำให้ออฟเซตหรือค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวของกระบวนการลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเรื่อง Integral Action จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของความผิดพลาดสะสมของผลตอบสนอง แต่ถ้า Integral Time ที่ตั้งให้กระบวนการนั้นมีค่าน้อยเกินไป (Integral Action มากเกินไป) ก็จะทำให้ผลตอบของกระบวนการเกิดการแกว่งมากขึ้น (การพุ่งเกินมากขึ้น) เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัวนานมากขึ้นได้ ในทำนองกลับกันการเพิ่มค่า Integral Time จะมีผลในทางตรงกันข้ามกับที่กล่าวมาแล้ว คือจะเพิ่มค่าผิดพลาดใน

สถานะคงตัวของผลตอบของกระบวนการ ถ้าผลตอบสนองของกระบวนการนั้นเป็นผลตอบสนองที่มีค่าผิดพลาดในสถานะคงตัวอยู่ แต่ในขณะเดียวกัน ก็จะเป็นการลดการแกว่ง หรือค่าพุ่งเกินของการตอบสนองของกระบวนการ ในกรณีที่กระบวนการนั้นมีค่า Integral Time เดิมน้อยเกินไป เมื่อมีการเริ่มเดินเครื่องอย่างอัตโนมัติ (Automatic Starting) ด้านการควบคุมของตัวควบคุม PID Integral Action จะทำให้เกิด Integral Windup เนื่องจากขณะเริ่มเดินเครื่อง ความผิดพลาดจะเกิดขึ้นเป็นเวลานาน ทำให้เทอมของ Integral มีค่าเกิน 100%

4.2.1.3 ผลของ Derivative Time กับผลตอบสนองของกระบวนการ

ผลของ Derivative Action จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุท ซึ่งมีผลทำให้กระบวนการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงได้เร็วขึ้น สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอดี ที่มีรูปแบบตามสมการที่ (4.23) และ (4.24) นั้นค่าของ Derivative Action จะมีผลกับการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่เกี่ยวกับกระบวนการ โดยจะทำให้กระบวนการมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้นแต่ Derivative Action จะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ Set Point แต่อย่างใด อย่างไรก็ตาม Derivative Action จะมีผลเสียในการควบคุมกระบวนการที่มีสัญญาณรบกวนมาก ทั้งนี้เนื่องจาก Derivative Action จะไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่เข้ามาอย่างมาก ดังนั้น กระบวนการที่มีสัญญาณรบกวน ตัวอย่างเช่น กระบวนการควบคุมอัตราการไหล หรือกระบวนการควบคุมความดัน Derivative Control อาจมีผลทำให้กระบวนการไม่มีเสถียรภาพ (Unstable)

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

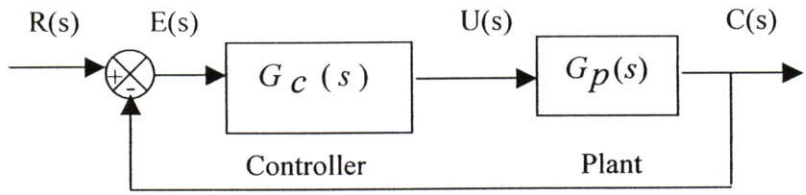
4.3 โครงสร้างระบบควบคุมสำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี Root Locus

4.3.1 การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีเทคนิคทางเดินราก

จากพื้นฐานที่ได้กล่าวมาข้างต้นในหัวข้อ 4.1 ในการออกแบบตัวควบคุมนั้นในวิทยานิพนธ์นี้เราจะทำการกำหนดผลตอบสนองของสภาวะชั่วครู่และที่สภาวะคงตัวซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

1) คุณลักษณะของผลตอบสนองชั่วครู่อธิบายได้ในรูปของค่าพุ่งเกิน (Percent Overshoot P.O.)

2) คุณลักษณะของผลตอบสนองที่สภาวะคงตัวอธิบายได้ในรูปของค่าเวลาเข้าที่ (Settling time t_s)



รูปที่ 4.3 โครงสร้างระบบควบคุม

จากข้อกำหนดของผลตอบสนองในสภาวะชั่วขณะ คือค่าพุ่งเกินและเวลาที่ต้องการนั้นจะใช้ในการคำนวณหาค่าของอัตราการหน่วง (Damping ratio: ζ) ความถี่ธรรมชาติที่ไม่มีการหน่วง (Undamped natural frequency: ω_n) และตำแหน่งของรากที่สำคัญ (Dominant closed-loop poles: s_d) ของระบบควบคุมแบบวงเปิด จากสมการต่อไปนี้

$$P.O. = 100 * e^{\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}}\,\% \tag{4.26}$$

$$ts^{(\pm 2\%)} = 4/\zeta\omega_n \tag{4.27}$$

$$s_d = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \tag{4.28}$$

ค่าของ ζ, ω_n และ s_d ที่หาได้จากสมการที่(4.26), (4.27) และ (4.28) จะใช้ในการออกแบบตัวควบคุม จากรูปที่ 4.3 และเงื่อนไขของมุมในวิธีทางเดินราก รากของสมการคุณสมบัติจะอยู่ที่จุด s_d จะได้ต้องสอดคล้องกันกับเงื่อนไขของมุม คือ

$$\angle G_c(s_d)G_p(s_d) = \pm(2k+1)\pi; k = 0,1,2,.... \tag{4.29}$$

รูปแบบโดยทั่วไปสำหรับกระบวนการสามารถที่กำหนดได้ดังสมการที่ (4.30)

$$G_p(s) = \frac{K_{pl}}{\prod_{i=1}^{n}(s+p_i)} \tag{4.30}$$

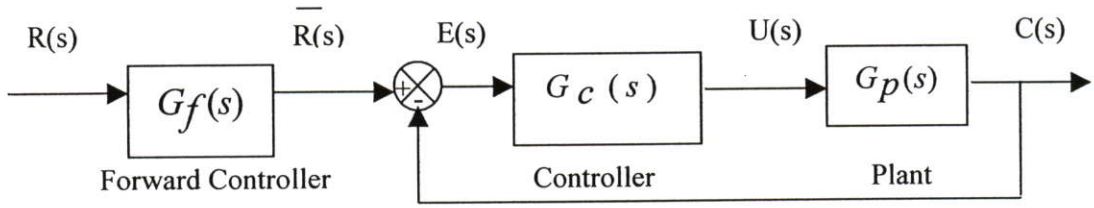
และรูปแบบโดยทั่วไปของตัวควบคุมสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบทั่วไปได้เช่นกันโดยละทิ้งโพลที่ไม่สำคัญในขั้นตอนของการออกแบบสามารถจัดสมการตัวควบคุมได้ดังนี้

$$G_c(s) = \frac{K_c \prod_{i=1}^{n} (s + z_i)}{s} \tag{4.31}$$

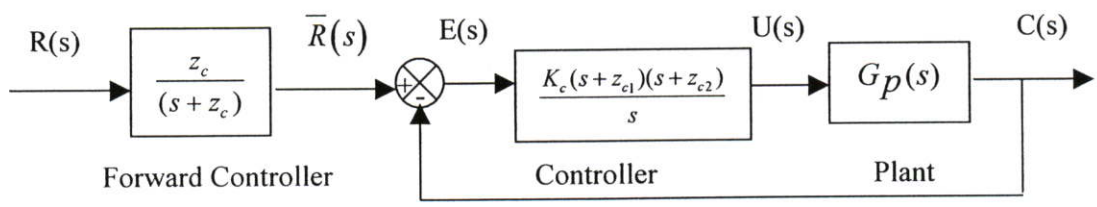
จากสมการที่ 4.30 และ 4.31 สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงเปิดได้ดังนี้

4.4 การออกแบบตัวควบคุมพีไอ สำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน

จากหัวข้อ 4.3 เป็นพื้นฐานการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีเทคนิคทางเดินรากเรานำมาใช้ในการออกแบบระบบควบคุมกระบวนการระดับน้ำสองถังนั้น แต่เราออกแบบให้มีตัวควบคุม 2 ตัว คือโดยให้มี Forward controller และ controller ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งเราสามารถปรับปรุงระบบควบคุมให้ผลตอบสนองของระบบเป็นไปตามข้อกำหนด ซึ่งหากเกิดกรณีที่ว่า ถ้าซีโรของตัวควบคุมอยู่ตำแหน่งที่ไม่เหมาะสมนั้น เราสามารถปรับอัตราการขยายของระบบให้มากขึ้นได้



รูปที่ 4.4 แสดงระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่มี forward controller



รูปที่ 4.5 แสดงระบบควบคุมแบบป้อนกลับแบบใช้ตัวควบคุมพีไอดี

4.4.1 ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุม

วิธีการในการออกแบบเพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่สภาวะชั่วครู่และคงตัวตามที่ต้องการทำได้ตามขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการหาอัตราการหน่วง (damping ratio: ζ), ความถี่ธรรมชาติ (umdamped natural frequency: ω_n) และหาจุด s_d โดยพิจารณาจากคุณลักษณะที่สภาวะคงตัวและสภาวะอยู่ตัวที่ต้องการจากสมการที่ (4.32)

$$P.O. = 100 * e^{\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}}\ \%, \quad ts^{(\pm 2\%)} = 4/\zeta\omega_n$$
$$s_d = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \tag{4.32}$$

ขั้นตอนที่ 2 หาผลรวมของมุมที่จุด s_d ของระบบแบบลูปเปิด $G_c(s)G_p(s)$ ด้วยวิธีทางกราฟิกหรือการคำนวณ เมื่อนั้นพิจารณาหามุมที่จำเป็นของ $\angle(s_d + z_c)$ เพื่อที่จะทำให้ผลรวมของมุมเป็นไปตามเงื่อนไขของสมการที่ (4.32)

$$\sum(\theta_z + \theta_{zc}) + \sum\theta_p = -(2k+1)\pi,\ k = 0,1,\ldots,n \tag{4.33}$$

ขั้นตอนที่ 3 หาอัตราขยาย K_c ของตัวควบคุมจากเงื่อนไขขนาดของวิธีการทางเดินของราก

$$K_c = K_{sd} = \frac{1}{|G(s_d)H(s_d)|} \tag{4.34}$$

ขั้นตอนที่ 4 แทนพารามิเตอร์ทุกตัวในสมการของตัวควบคุม

ขั้นตอนที่ 5 วาดทางเดินรากของ $G_c(s)G_p(s)$ เพื่อให้แน่ใจว่าทางเดินรากเดินผ่านจุด s_d ที่กำหนด

ขั้นตอนที่ 6 เพื่อให้ผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดสามารถได้ผลตอบสนองตามที่ต้องการ ทำการเพิ่มตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้า ในสมการที่ (4.35) ดังแสดงในรูปของโครงสร้างระบบควบคุม

$$G_f(s) = \frac{z_c}{(s+z_c)} \tag{4.35}$$

4.4.2 ตัวอย่างการออกแบบตัวควบคุมตามเงื่อนไขที่กำหนด

ตัวอย่างการออกแบบตัวควบคุมตามหัวข้อ 4.4.1 เพื่อแจงรายละเอียดในแต่ละขั้นตอน

1. กำหนด Percent Overshoot เป็น % เช่น 5

2. กำหนด Setting Time เช่น 200 sec

3. หา ค่าอัตราการหน่วง ζ ด้วยสมการที่ (4.45) ที่ได้จากการพิสูจน์ของสมการที่ (4.36) จากเงื่อนไขข้อกำหนด ในขั้นที่ 1 และ 2

$$P.O. = 100 * e^{-\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}} \tag{4.36}$$

$$\zeta = \sqrt{\frac{\left[\ln P.O. - \ln 100\right]^2}{\pi^2 + \left[\ln P.O. - \ln 100\right]^2}} \tag{4.37}$$

4. หลังจากที่เราหาค่าอัตราการหน่วงได้แล้ว เราสามารถหาความถี่ธรรมชาติจาก ได้ จากสมการที่ (4.39) ซึ่งมาจากการย้ายข้างของสมการที่ (4.38) จะได้

$$ts = 4/\zeta\omega_n \tag{4.38}$$

$$\omega_n = 4/\zeta ts \tag{4.39}$$

5. เมื่อเราหาค่า อัตราการหน่วงและความถี่ธรรมชาติได้แล้ว เราสามารถหาจุด s_d ด้วยสมการที่ (4.40)

$$s_d = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \tag{4.40}$$

จากกระบวนการและตัวควบคุม

$$G = Gp \bullet G_c = \frac{K_c(s+z_{c1})(s+z_{c2})}{s} \bullet \frac{K}{(s+p_1)(s+p_2)}$$

$$= \frac{K_c K(s+z_{c1})(s+z_{c2})}{s(s+p_1)(s+p_2)} \tag{4.41}$$

6. ขั้นตอนต่อไปทำการหามุมของ z_c โดยกำหนด z_{c1} หรือ z_{c2} ให้อยู่ทางซ้ายของโพล (p_1 และ p_2) ที่อยู่ทางด้านซ้ายสุดให้มีค่าใกล้เคียงกับ (p_1 และ p_2)
หามุม ณ.จุด s_d

$$\tan^{-1}(s_d + z_{c1}) + \tan^{-1}(s_d + z_{c2}) - \tan^{-1}(s_d) - \tan^{-1}(s_d + p_1) - \tan^{-1}(s_d + p_2) = -180^\circ$$

(4.42)

$$\tan^{-1}(s_d + z_{c1}) = -\tan^{-1}(s_d + z_{c2}) + \tan^{-1}(s_d) + \tan^{-1}(s_d + p_1) + \tan^{-1}(s_d + p_2) - 180^\circ$$

(4.43)

เมื่อได้ มุมของ $\tan^{-1}(s_d + z_{c1})$ แล้วต้องหา z_{c1} โดย

$$\tan^{-1}(s_d + z_{c1}) = \theta z_{c1} \tag{4.44}$$

7. เมื่อได้ z_{c1} แล้วจากนั้นหาอัตราขยายของตัวควบคุมโดย

$$|G.G_p| = 1 = \frac{K.K_c|s + z_{c1}||s + z_{c2}|}{|s||s + p_1||s + p_2|} \tag{4.45}$$

$$K_c = \frac{|s||s + p_1||s + p_2|}{K|s + z_{c1}||s + z_{c2}|} \tag{4.46}$$

เมื่อนั้นจะได้ K_c

8. หลังจากนั้นจะได้ ค่าพารามิเตอร์ของตัว PID ดังนี้

$$\begin{aligned} G_c &= \frac{K_c(s + z_{c1})(s + z_{c2})}{s} \\ &= \frac{K_c s^2 + K_c(z_{c1} + z_{c2})s + K_c z_{c1} z_{c2}}{s} \\ &= \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \end{aligned} \tag{4.47}$$

โดย

$$K_d = K_c$$

$$K_p = K_c(z_{c1} + z_{c2})$$

$$K_i = K_c z_{c1} z_{c2}$$

9. จากนั้นกำหนด Forward Controller โดย

$$G_f = \frac{z_c}{s + z_c} \tag{4.48}$$

โดย z_c (ตัวที่กำหนดในการหา z_{c1} และ z_{c2}) คือค่าตำแหน่งซีโร่ที่ได้มาจากการหามุมดังได้อธิบายมาแล้วข้างต้น ได้จากสมการที่ (4.49)

$$z_c = \frac{z}{\tan\theta z_c} - 1 \tag{4.49}$$

บทที่ 5
การออกแบบตัวควบคุมประยุกต์ใช้ในระบบ DCS

5.1 กล่าวนำ

ดีซีเอส (DCS ย่อมาจาก Distributed Control System) เป็นเครื่องมือสำหรับควบคุมกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม ดีซีเอสได้รับการปรับปรุงและพัฒนาจนเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของโรงงานอุตสาหกรรมและสถานะการณ์ปัจจุบัน จากผลของความก้าวหน้าทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในสาขาอิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ และโทรคมนาคม สำหรับควบคุมกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมที่สัญญาณวัดและสัญญาณควบคุมส่วนใหญ่เป็นสัญญาณชนิดต่อเนื่อง

ดีซีเอสเป็นระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับกระบวนการผลิตภายในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น เตาเผาและหม้อกำเนิดไอน้ำของโรงจักรไฟฟ้า หอกลั่น (Distillation column) ของโรงกลั่นน้ำมัน ถังปฏิกรณ์ (reactor tank) ของโรงงานอุตสาหกรรมเคมี และระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ระบบควบคุมอัตโนมัติในโรงงานอุตสาหกรรมแบบเดิมแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การควบคุมแบบป้อนกลับ (feedback control) และการควบคุมแบบติดและดับ

การควบคุมแบบป้อนกลับ หรือ การควบคุมชนิดสัญญาณต่อเนื่อง (Continuous control) ภายในโรงงานอุตสาหกรรมแบบเดิม มักติดตั้งเครื่องควบคุมชนิดนิวเมติกส์หรืออิเล็กทรอนิกส์แบบพีไอดีเป็นเครื่องควบคุม

การควบคุมแบบติดและดับ หรือ การควบคุมแบบอันดับ (Sequence control) ภายในโรงงานอุตสาหกรรมสามารถติดตั้งวงจรควบคุมวงจรไฟฟ้า รีเลย์ วงจรรวมชนิดดิจิตอล หรือ พีแอลซี (PLC; Programmable Logic Controller) เป็นเครื่องมือควบคุม

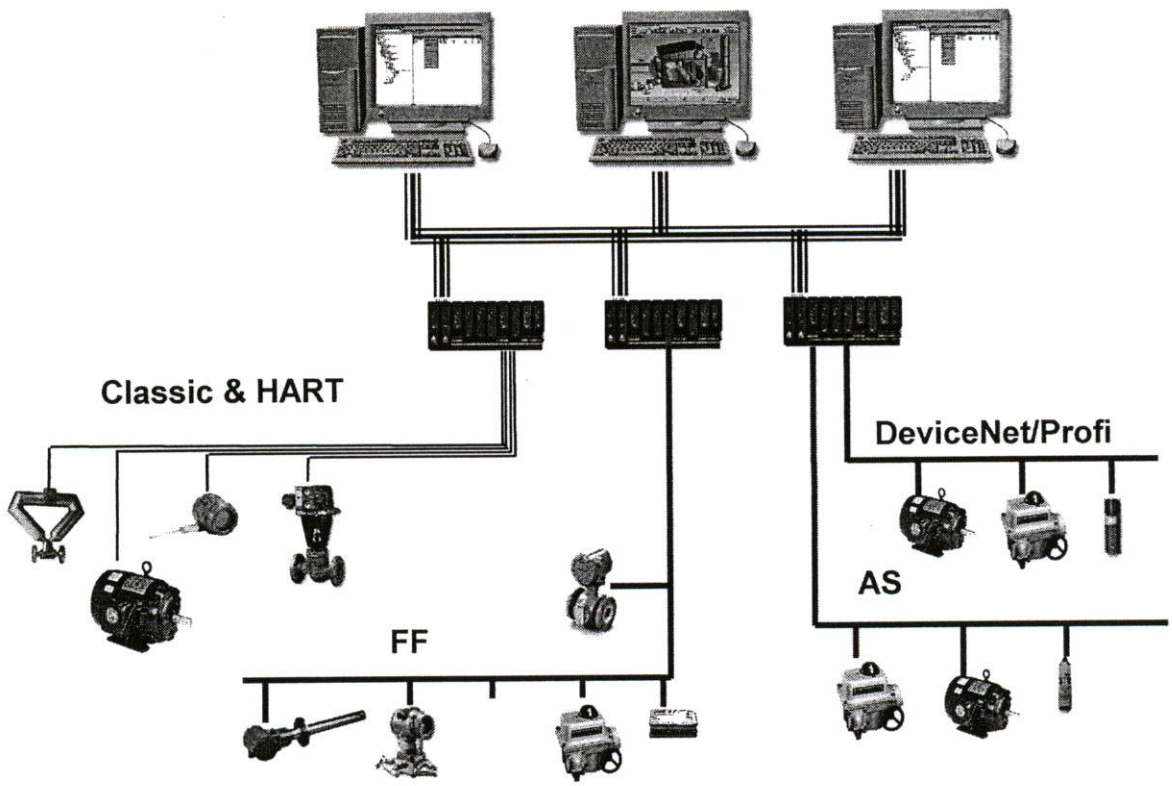
ปัจจุบันดีซีเอสเป็นระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมทั้งหมด ดีซีเอสสามารถควบคุมกระบวนการผลิตแบบป้อนกลับและกระบวนการผลิตแบบติดและดับภายในระบบควบคุมเดียว ดีซีเอสจึงเป็นระบบควบคุมที่เหมาะสมกับโรงงานอุตสาหกรรมปัจจุบันที่ประกอบด้วยกระบวนการผลิตขนาดใหญ่และซับซ้อน หรือเป็นกระบวนการผลิตแบบแบตช์ (Batch process) ที่ต้องการการควบคุมกระบวนการผลิตแบบป้อนกลับ และกระบวนการผลิตแบบติดและดับ ภายในกระบวนการผลิตเดียว

การควบคุมแบบป้อนกลับสามารถรักษาเสถียรภาพของกระบวนการผลิตจากผลกระทบของสภาพแวดล้อมภายนอกและการเปลี่ยนแปลงของสภาพภายในกระบวนการผลิตเอง โดยเครื่องวัดตรวจสอบสัญญาณวัดของตัวแปรกระบวนการ แสดงสภาพของกระบวนการผลิต เปรียบเทียบกับเป้าหมายการควบคุม โดยเครื่องควบคุมทำหน้าที่ส่งสัญญาณควบคุม(Control signal) ให้กระบวนการผลิต เพื่อปรับสภาพและรักษาเสถียรภาพของกระบวนการผลิตให้ตรงกับเป้าหมายการควบคุม

เนื่องจากสัญญาณของเครื่องควบคุมมักเป็นสัญญาณไฟฟ้าหรือความดันลมไม่สามารถใช้เปลี่ยนแปลงหรือปรับสภาพของกระบวนการผลิตโดยตรง สัญญาณของเครื่องควบคุมจึงต้องผ่านอุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย (final control elements) เช่น มอเตอร์ไฟฟ้าและวาล์วควบคุม เพื่อเปลี่ยนสัญญาณควบคุมเป็นสัญญาณควบคุมกระบวนการ ที่สามารถปรับสภาพกระบวนการผลิตโดยตรง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เราได้ใช้ระบบ DCS ของ บริษัท Emerson Process management คือว่าระบบเดลต้าวี (DeltaV System) ในการประยุกต์ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์

5.2 โครงสร้างของระบบ DeltaV



รูปที่ 5.1 โครงสร้างระบบควบคุมของระบบ DeltaV System

ระบบเดลต้าวีจัดอยู่ในระบบเปิด (Open system) นั้นคือสามารถสื่อสารกับระบบควบคุมหรืออุปกรณ์ของบริษัทอื่นๆ ได้ง่าย ซึ่งแต่ละบริษัทใช้มาตราฐานของอุตสหกรรมต่างๆกันในการสื่อสาร แต่ระบบ DeltaV ได้จัดเตรียมมาตราฐานในการสื่อสารไว้พร้อมทั้งหมด

จากรูปที่ 5.1 เราสาแบ่งระดับของอุปกรณ์ ได้ 4 ระดับ

1. ระดับเวอร์กสเตชั่น (Workstation)
2. ระดับการสื่อสารระหว่างตัวควบคุมกับเวอร์กสเตชั่น (Network communication)
3. ระดับชุดตัวควบคุม (Controller)

4. ระดับอุปกรณ์และเครื่องมือวัดต่างๆ

5.2.1 ระดับเวอร์กสเตชั่น (Workstation)

ในระดับเวอร์กสเตชั่น (Workstation) ทางระบบเดลต้าวีแบ่งชนิดของเวอร์กสเตชั่นออกเป็นชนิดใหญ่ดังนี้

5.2.1.1 อินเจียเนียริ่งและโอเปเรเตอร์เวอร์กสเตชั่น (Engineering & Operator Workstation)

อินเจียเนียริ่งและโอเปเรเตอร์เวอร์กสเตชั่น ใช้ในการทำการออกแบบและเขียนโปรแกรมให้กับตัวควบคุมและแอพพลิเคชั่นต่าง ๆ พร้อมทั้งสามารถทำการทดสอบโปรแกรมก่อนมีการใช้งานจริง และสามารถเป็นเครื่องที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการ (โอเปเรเตอร์เวอร์กสเตชั่น) ในระบบเดลต้าวีมีความสามารถพิเศษในการทำงานเกี่ยวกับงานด้านอินเจียเนียริ่งดังนี้

1. ทำการแก้ไข เพิ่มเติม และลบข้อมูลหรือเพิ่มระบบต่าง โดยไม่กระทบกับกระบวนการที่ทำการควบคุมอยู่
2. สามารถมีเครื่องอินเจียเนียริ่งได้หลายเครื่องในระบบสื่อสารเดียวกันและสามารถทำการเขียนโปรแกรม ลงในตัวควบคุมเดียวกันในเวลาเดียวกันได้
3. สามารถตรวจสอบโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นก่อนที่จะนำเข้าใช้งานจริงได้
4. มีระบบ OPC มาพร้อมกับตัวเครื่อง

5.2.1.2 โอเปเรเตอร์เวอร์กสเตชั่น (Operator Workstation)

ใช้ในการดูและควบคุมกระบวนการ ซึ่งกระบวนการจะอยู่ในรูปกราฟฟิกที่เขียนขึ้น และมีการเชื่อมต่อข้อมูลจากอุปกรณ์เครื่องมือวัดที่ใช้ในกระบวนการ บางครั้งเราจะเรียกโอเปเรเตอร์เวอร์กสเตชั่นว่า Human Machine Interface (HMI)

รูปที่ 5.2 การสื่อสารข้อมูลของระบบเดลต้าวี

โอเปเรเตอร์เวอร์กสเตชั่นยังสามารถใช้บันทึกข้อมูลกระบวนการต่าง เช่น การบันทึกผลของกระบวนการในรูปแบบของลายเส้น (Trend) และการบันทึกเหตุการณ์ต่างที่เกิดขึ้น เช่น การทำงานของคนควบคุมระบบและการเกิดเหตุการณ์ต่างในกระบวนการ

โอเปเรเตอร์เวอร์กสเตชั่นแต่ละเครื่องสามารถทำงานแทนกันได้โดยอิสระไม่ขึ้นอยู่กับเครื่องใดเครื่องหนึ่ง

5.2.1.3 แอพพลิเคชั่นเวอร์กสเตชั่น (Operator Workstation)

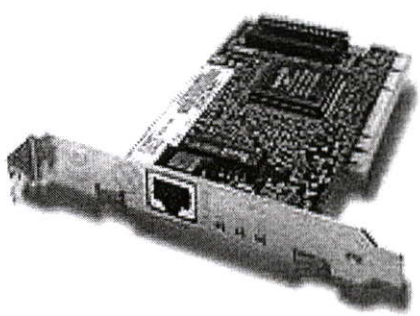
แอพพลิเคชั่นเวอร์กสเตชั่นใช้ในการติดตั้งโปรแกรมประยุกต์ต่าง เช่น โปรแกรมควบคุมแบบแบต (Batch), ระบบการ web server และระบบ อื่นที่ต้องการประยุกต์ใช้และติดต่อกับระบบเดลต้าวี

5.2.2 ระดับการสื่อสารระหว่างตัวควบคุมกับเวอร์กสเตชั่น (Network communication)

ระบบเดลต้าวีจะใช้มาตราฐาน IEEE 802.3 ในการสื่อสารระหว่าง ตัวควบคุมกับตัวควบคุมและตัวควบคุมกับเวอร์กสเตชั่น อุปกรณ์ที่ใช้ในการสื่อสารมีดังนี้

1. การ์ดแลน

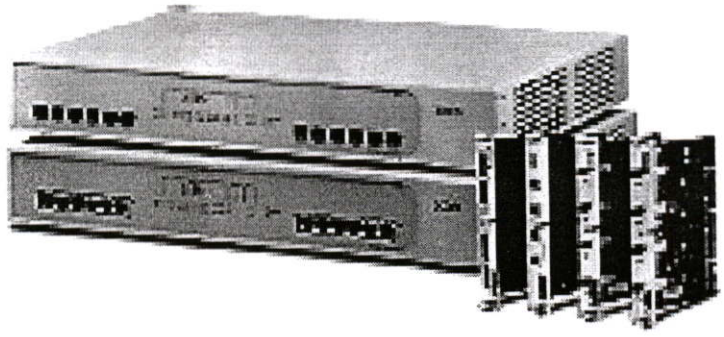
   การ์ดแลนเป็นการ์ดที่เป็นมาตราฐานทั่วไปที่ใช้อยู่ในสำนักงาน สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในระบบเดลต้าวีได้ แต่ทางระบบเดลต้าจะแนะนำให้ใช้รุ่นและยีห้อของการ์ดที่ได้ผ่านการทดสอบโดย R&D แล้ว การ์ดแลนแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 การ์ดแลน

2. เน็ตเวอร์กสวิตซ์

เน็ตเวอร์กสวิตซ์ เป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อข้อมูลระหว่างตัวควบคุมและเวอร์กสเตชั่น เน็ตเวอร์สวิตซ์ที่ใช้ในระบบเดลต้าวีนั้น เป็นมาตราฐานของ IEEE 802.3 ซึ่งเป็นมาตราฐานเดียวกันที่ใช้ในสำนักงาน รูปที่ 5.4 แสดงภาพเน็ตเวอร์กสวิตซ์



รูปที่ 5.4 เน็ตเวอร์กสวิตซ์

3. ตัวควบคุม

ตัวควบคุมของระบบเดลต้าวี แต่ละตัวจะมีช่องสื่อสารสัญญาณในการสื่อสารอยู่สองช่อง (Redundant) ที่เชื่อมต่อไปที่เน็ตเวอร์กสวิตซ์ รูปที่ 5.5 แสดงถึงตัวควบคุมและช่องสัญญาณที่ใช้ในการติดต่อ

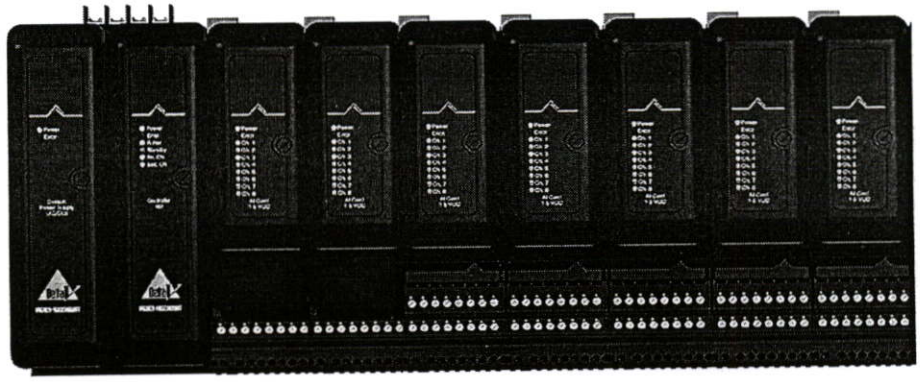
รูปที่ 5.5 ช่องสื่อสารสัญญาณของตัวควบคุม

5.2.3 ระดับชุดตัวควบคุม (Controller)

ชุดตัวควบคุมของเดลต้าวีจะประกอบไปด้วย

1. ตัวจ่ายไฟให้กับตัวควบคุมและการ์ดสัญญาณอินพุตและเอาท์พุต
2. ตัวควบคุม
3. แผงติดตั้งของตัวจ่ายไฟและตัวควบคุม
4. การ์ดสัญญาณอินพุตและเอาท์พุต
5. แผงติดตั้งของการ์ดสัญญาณอินพุตและเอาท์พุต

ชุดควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 ชุดตัวควบคุม

5.2.4 ระดับอุปกรณ์และเครื่องมือวัดต่างๆ

เป็นส่วนของเครื่องวัด ต่างๆ เช่น เครื่องวัดระดับน้ำ เครื่องมือวัดแรงดัน ฯลฯ การ์ดอินพุตจะรับสัญญาณต่างๆ แยกตามประเภทเขาสู่ตัวควบคุมเพื่อประมวลผลตามโปรแกรมที่ได้กำหนดไว้

อุปกรณ์ควบคุมตัวสุดท้าย เช่น วาล์ว มอเตอร์ ฯลฯ โดยจะรับสัญญาณ ควบคุมจากการ์ดสัญญาณเอาท์พุตโดยแยกตามประเภท

5.3 การออกแบบด้านซอฟว์แวร์และฮาร์ดแวร์ ของ DCS

5.3.1 การออกแบบระบบของ DCS ด้านซอฟว์แซร์และฮาร์ดแวร์

การออกแบบ ระบบ DCS นั้นจะต้องทราบข้อมูลต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบ ให้เหมาะสมกับกระบวนการ ซึ่งข้อมูลดังต่อไปนี้ เป็นข้อมูลที่สำคัญ แต่อาจมีปลีกย่อยออกไปอีกบางส่วน

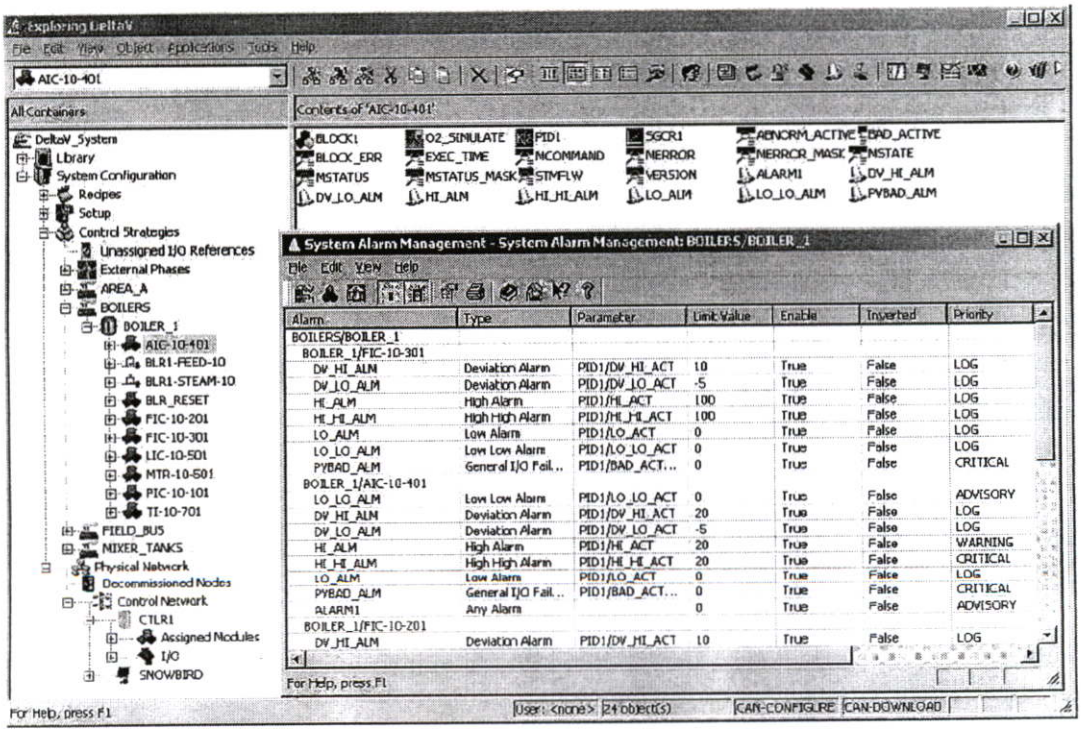
1. ชนิดของกระบวนการ เช่น เป็น โรงงานไฟฟ้า, กระบวนการแบบ BATCH ฯลฯ เพื่อออกแบบการใช้ชนิดของซอฟแวร์และฮาร์ดแวร์ให้เหมาะสมกับชนิดของกระบวนการ

2. จำนวนและชนิดของสัญญาณอินพุตและเอาท์พุต เพื่อกำหนดจำนวนตัวควบคุมและจำนวนการ์ดสัญญาณในแต่ละประเภทของสัญญาณ
3. พื้นที่ในการติดตั้งของตู้ (ตัวควบคุมและการ์ดสัญญาณ) โดยแบ่งแยกเป็นกี่พื้นที่ (โดยทั่วไปจะอยู่ในพื้นที่เดียวกัน) และห้องควบคุม (ที่ติดตั้งเวอร์กสเตชั่น) ว่าอยู่ในบริเวณเดียวกันหรือไม่ และแบ่งแยกออกเป็นกี่ห้องควบคุม
4. ข้อมูลหรือระบบของข่าวสารของโรงงาน (Plant Information System) และต้องมีการเชื่อมต่อกับระบบอื่นหรือไม่
5. จำนวนของโอเปเรเตอร์เวอร์กสเตชั่นและอินเจียเนียริ่งเวอร์กสเตชั่นที่ต้องการ

จากข้อมูลเบื้องต้นนี้ เป็นสิ่งที่ต้องนำมาทำการออกแบบระบบ DCS

5.3.2 การทำการกำหนดอุปกรณ์และการค่าต่างๆของเดลต้าวี

ระบบเดลต้าวีจะเป็นระบบแบบมีโปรแกรมในการทำงานด้านอินเจียเนียริ่งโปรแกรมเดียว ไม่ซับซ้อนและง่ายต่อการเชื่อมโยงของข้อมูลเข้าด้วยกันในแต่ละส่วน ระบบเดลต้าวีจะใช้รูปแบบการเข้าถึงและการกำหนดอุปกรณ์ทั้งฮาร์ดแวร์และซอฟแวร์ในรูปแบบคล้ายกับอินเทอร์เน็ตเอ็กโพลเลอร์ (Internet Explorer) โดยแยกระดับชั้นการเข้าถึงอุปกรณ์ต่างๆ เป็นตามความเป็นจริงเหมือนกับฮาร์ดแวร์ ดังแสดงในรูปที่ 5.7 และมีคู่มือออนไลน์ ที่ช่วยแนะนำในการทำงานในแต่ละหัวข้อ



รูปที่ 5.7 ตัวอย่างโปรแกรมทำงานด้านอินเจียเนียริ่งในการกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ

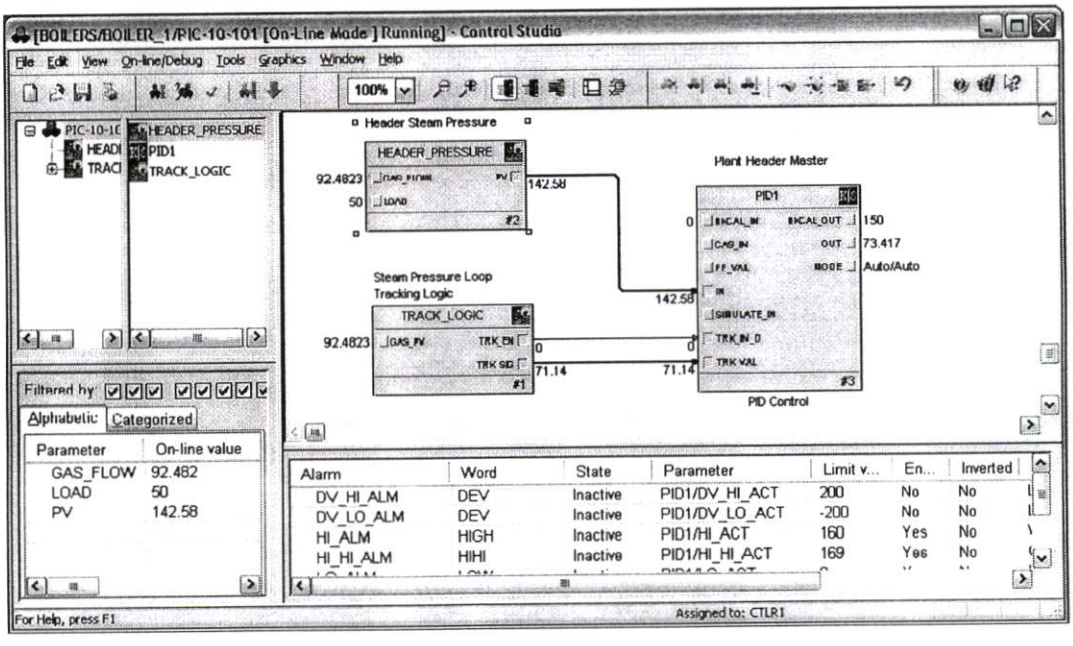
5.3.3 การเขียนโปรแกรมของระบบเดลต้าวี

ระบบเดลต้าวีจะใช้มาตราฐานภาษาควบคุม ของ IEC 61131-3ซึ่งจะประกอบไปด้วย

1. การเขียนโดยภาษาฟังก์ชั่นซ์บล็อก
2. การเขียนโดยภาษาสคริป
3. การเขียนโดยภาษาโฟลชาร์ล

5.3.3.1 การออกแบบโปรแกรมควบคุมโดยภาษาฟังก์ชั่นบล็อก

การเขียนโปรแกรมนั้นจะมีไรบารีของฟังก์ชั่นบล็อกชนิดต่างๆ ให้สามารถเลือกมาใช้งานได้โดยง่ายและสามารถเชื่อมต่อกันโดยง่ายโดยการลากเส้นเชื่อมต่อถึงกัน ตัวโปรแกรมสามารเข้าถึงสัญญาณที่อ่านค่ามาจากการ์ดอินพุตและเอาท์พุตได้โดยการกำหนดที่บล็อกได้โดยตรง โดยสัญญาณแต่ละสัญญาณเราจะกำหนดโดยการใช้ชื่อ การสัญญาณจะอ้างอิงถึงกันโดยชื่อ การเขียนโปรแกรมสามารถทดสอบโดยการออนไลน์และซิมสัญญาณที่ต้องการได้ และสามารถดูค่าจริงของกระบวนการได้ รูปแบบตัวอย่างของโปรแกรมฟังก์ชั่นบล็อกแสดงดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 ตัวอย่างการเขียนโปรแกรมด้วยฟังก์ชั่นบล็อก

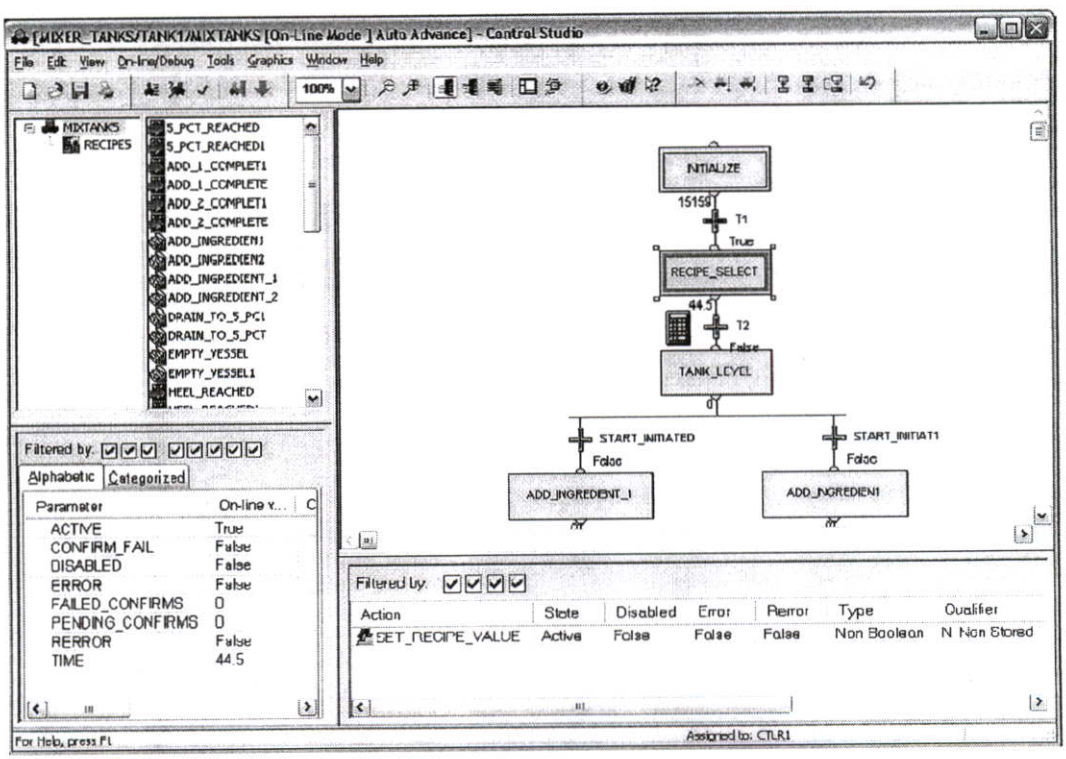
5.3.3.2 การออกแบบโปรแกรมควบคุมโดยภาษาสคริป

ระบบเคลต้าวีเป็นระบบที่เปิดสามารถใช้ภาษาวิชวลเบสิก (Visual Basic) ในการเขียนสคริป ภาษาวิชวลเบสิกนั้น เป็นภาษาที่เข้าใจง่ายและมีการใช้งานอย่างกว้างขวางในทุกวงการของซอฟแวร์ การเขียนโปรแกรมวิชวลเบสิกดังตัวอย่าง

```
Private Sub Text1_Click()
   Dim x As Variant
   x = ReadValue("Fix32.SCADA.SORTER|SIZER|BLOCK10|PT.F_CV")
   Text1.Caption = x
End Sub
```

5.3.3.3 การออกแบบโปรแกรมควบคุมโดยภาษาโฟลชาร์ล

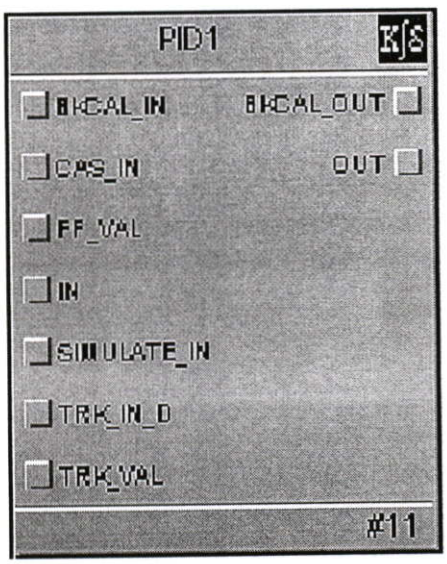
การใช้ภาษาโฟลชาร์ลนั้นในการเขียนโปรแกรม ทำให้ง่ายในการเข้าใจกระบวนการและการวิเคราะห์และติดตามการทำงานของกระบวนการ ในรูปแบบที่เป็นขั้นเป็นตอน โดยระบบเคลต้าวีสามารถมีการทำงานที่สัมพันธ์กันระหว่างภาษาฟังก์ชั่นบล็อก, ภาษาสคริปและภาษาโฟลชาร์ล รูปที่ 5.9 แสดงตัวอย่างการเขียนโปรแกรมด้วยโฟลชาร์ล



รูปที่ 5.9 ตัวอย่างการเขียนโปรแกรมด้วยโฟลชาร์ล

5..3.3.4 PID ฟังก์ชั่นบล็อกของเดลต้าวี

รูปที่ 5.10 แสดงถึงฟังก์ชั่นบล็อกของ PID



รูปที่ 5.10 PID ฟังก์ชั่นบล็อกของเดลต้าวี

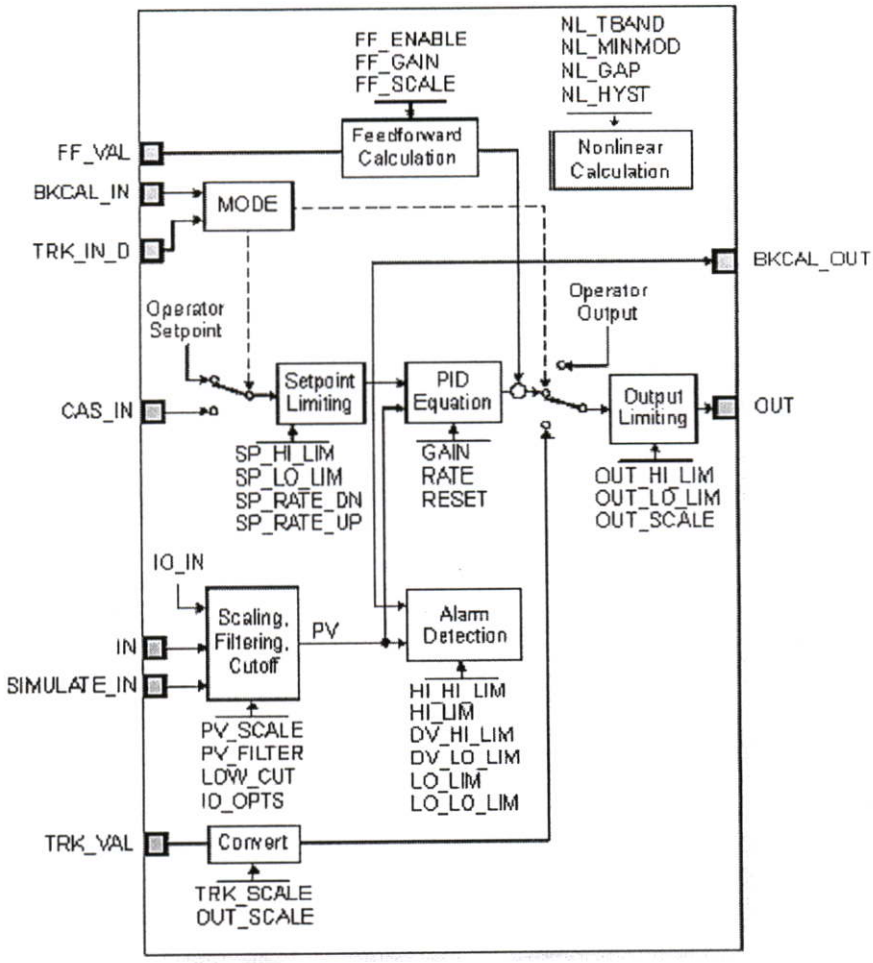
พารามิเตอร์ที่สำคัญของ PID ฟังก์ชั่นบล็อกประกอบด้วย

IN คือค่าสัญญาณอินพุทของกระบวนการหรือ Process Variable (PV) ที่จะอ้างอิงไปที่ช่องสัญญาณของอนาล็อกอินพุทการ์ด

SP คือค่าเป้าหมายของกระบวนการที่กำหนดโดยโอเปเรเตอร์ (Set Point)

OUT คือสัญญาณเอาท์พุต ที่ส่งผ่านช่องสัญญาณของการ์ดอนาล็อกเอาท์พุตเพื่อไปสั่งการให้กับตัวควบคุมตัวสุดท้าย

รูปที่ 11 แสดงไดอะแกรมของการทำงานของบล็อก PID ซึ่งบล็อก PID จะมีพารามิเตอร์อีกจำนวนมากที่สามารถนำมาใช้งาน แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่กล่าวถึงทั้งหมด



รูปที่ 5.11 ไดอะแกรมการทำงานของ PID ฟังก์ชั่นบล็อกของเดลต้าวี

สมการที่ (5.1) แสดงถึงการคำนวณของสัญญาณเอาท์พุตของ PID บล็อกของเดลต้าวีกับการ Feed forward

$$OUT(s) = GAIN_a \bullet \left[1 + \frac{1}{T_r s} + \frac{T_d s}{(\alpha T_d s + 1)} \right] \bullet E(s) \tag{5.1}$$

ซึ่ง

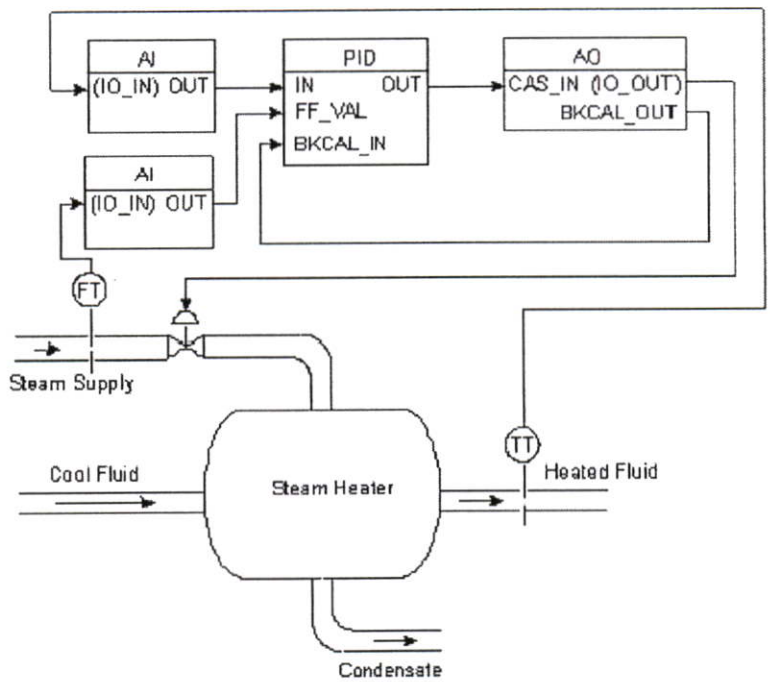
$E(s) = (SP - PV)$ ผลต่างระหว่างจุดปรับตั้งและสัญญาณป้อนกลับ

T_r คือค่าเวลารีเซ็ต (Reset timer) มีหน่วยเป็น วินาที ในการปรับจะอยู่ในของ RESET พารามิเตอร์

T_d คือค่าเวลาดีลิวีทีฟ (Derivative timer) มีหน่วยเป็น วินาที ในการปรับจะอยู่ในของ RATE พารามิเตอร์

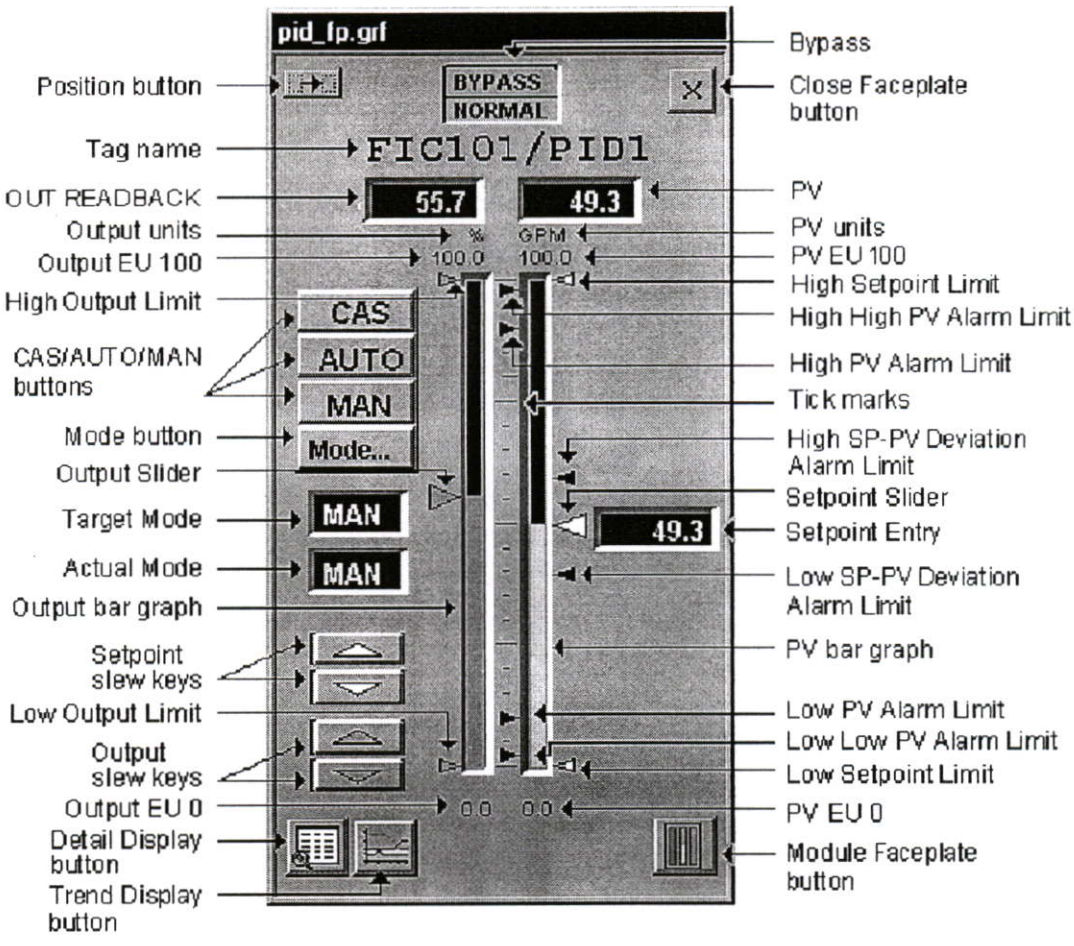
$GAIN_a$ คือค่าอัตราการขยาย

รูปที่ 5.12 แสดงตัวอย่างรูปแบบการทำงานของฟังก์ชั่นบล็อกกับกระบวนการ ในการทำด้านซอฟแวร์

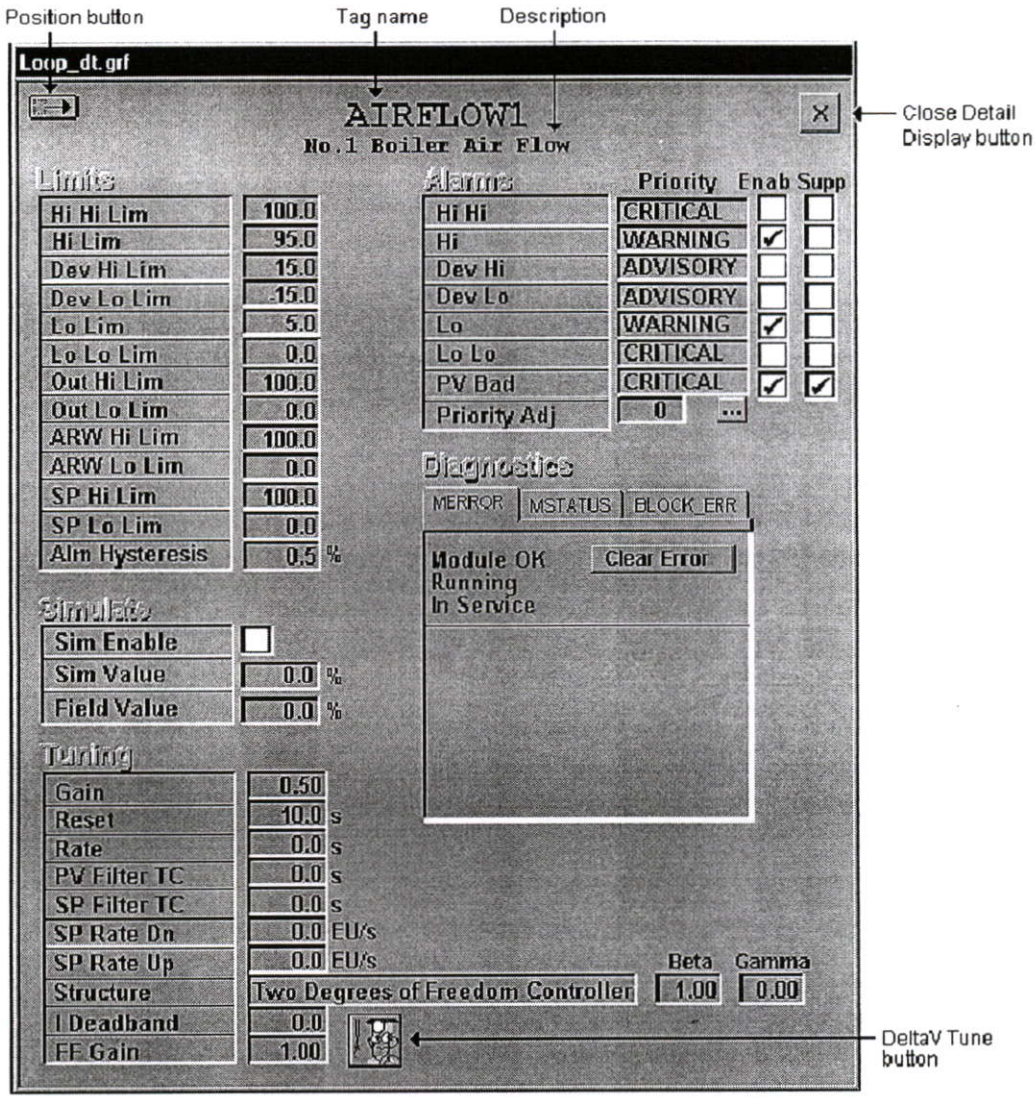


รูปที่ 5.12 แสดงตัวอย่างรูปแบบการทำงานของฟังก์ชั่นบล็อกกับกระบวนการ

การปรับค่าพารามิเตอร์ต่างของฟังก์ชั่นบล็อกโดยโอเปอเรเตอร์จะใช้เมนูย่อย ดังแสดงในรูปที่ 5.13 โดยค่าที่ใช้ปรับนั้นจะเน้นไปที่ค่าของค่าเป้าหมาย (Setpoint Entry) โดยการพิมพ์หรือการเลื่อนสกรอโดยค่าพารามิเตอร์อื่นเราจะไม่ได้กล่าวถึงใช้ในวิทยานิพนท์นี้ และปุ่มที่เกี่ยวข้องอีกปุ่มคือ Detail Display button ปุ่มนี้จะใช้กดเพื่อให้ดปิดหน้ารายละเอียดพารามิเตอร์ของฟังก์ชั่นบล็อก โดยกรณีวิทายนิพนธ์นี้ จะใช้เพื่อเปิดดูค่า GAIN, RESET และ RATE จะแสดงดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.13 หน้าตัวอย่างของการปรับค่าพารามิเตอร์โดยโอเปอเรเตอร์

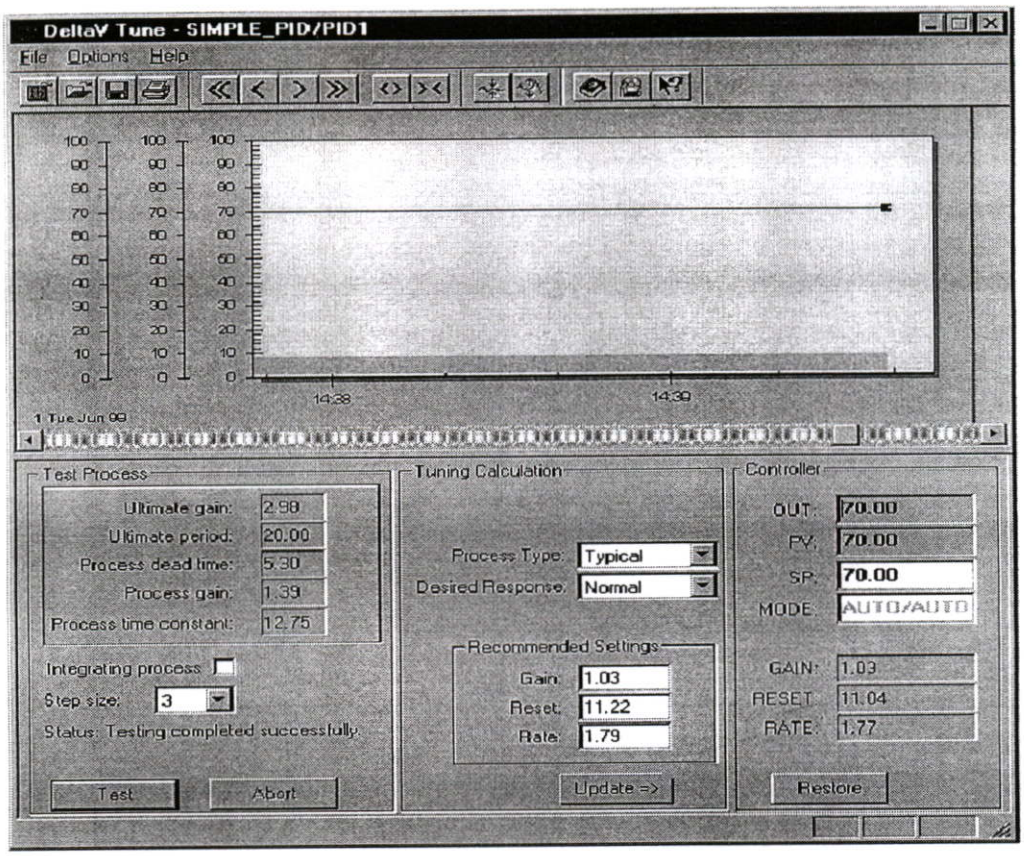


รูปที่ 5.14 หน้าตัวอย่างของการปรับค่าพารามิเตอร์โดยโอเปอเรเตอร์โดยละเอียด

5.4 ระบบการปรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุมอัตโนมัติของเดลต้าวี (Auto Tune)

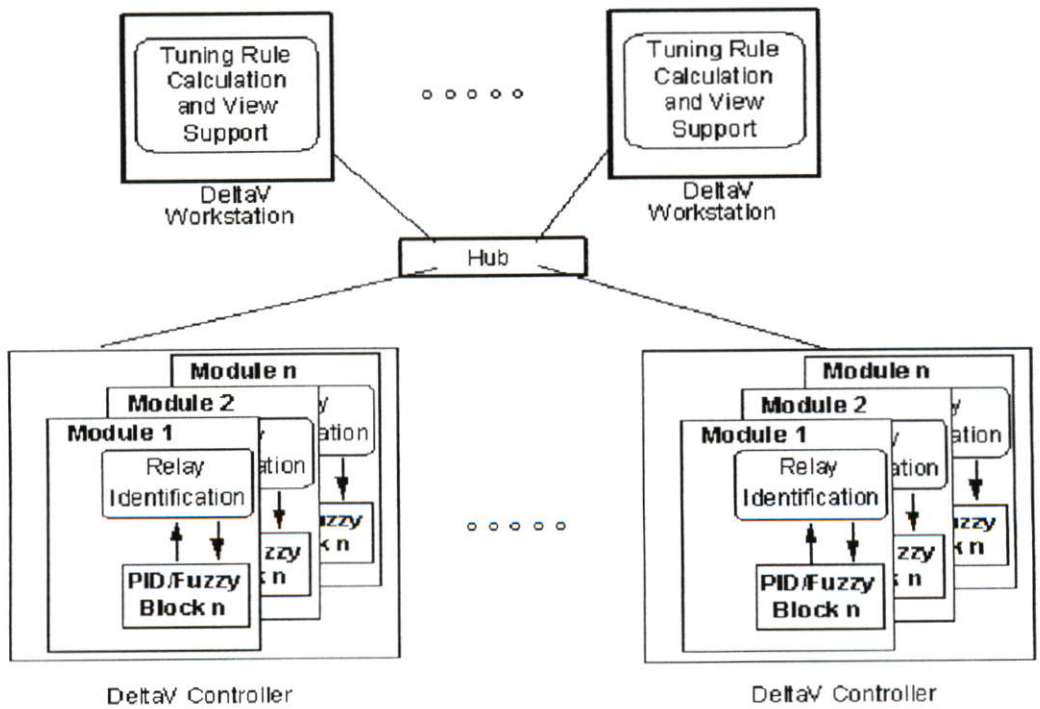
การออกแบบการปรับพารามิเตอร์นั้นจะมีโปรแกรมสำเร็จรูปมากับโปรแกรมหลักของระบบเดลต้าวี ที่เรียกว่า เดลต้าวีจูน (DeltaV Tune) ระบบออโตจูนของเดลต้าวีจะใช้ วิธีของ รีเลย์ (Relay) ที่อยู่ใน ลอการิทึมของ Astom-Hagglund ในการคำนวณหาพารามิเตอร์ของกระบวนการ

การทำงานของรีเลย์จะทำงานแบบ ให้กระบวนการแกว่งเล็กน้อยและควบคุมแอมปลิจูด ระบบจะใช้ค่าของแอมปลิจูดและความถี่ของการแกว่งนี้ จะหาค่า Ultimate Gain และค่าสุดท้ายของช่วงเวลาของกระบวนการ และผลที่ต้องการของค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจะทำการคำนวณจากการกำหนดชนิดของกระบวนการและพารามิเตอร์ของกระบวนการ ดังแสดงดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 หน้าตัวอย่างของการใช้ระบบเดลต้าวีจูน

ระบบเดลต้าวีจูนสามารถทำงานได้จากทุกเวอร์สเตชั่น ดังแสดงในรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 วิธีการเชื่อมข้อมูลและการทำงานระบบเดลต้าวีจูน

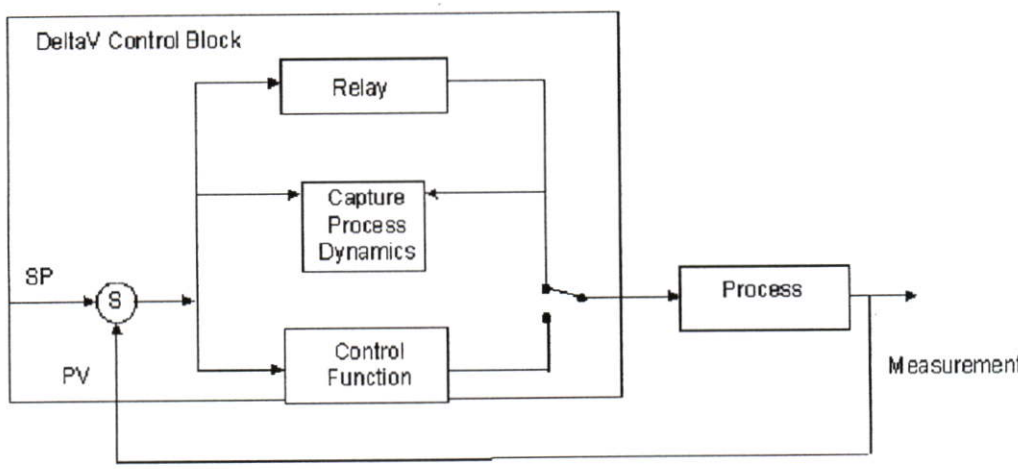
การทำงานของระบบเดลต้าวีจะทำการเปลี่ยนโหมดของตัวควบคุมเป็นโหมดโลคอล และทำการควบคุมสัญญาณเอาท์พุตด้วยรีเลย์ ดังแสดงในรูปที่ 5.17 ตัวค่าพารามิเตอร์ใหม่ที่ได้ เป็นค่าของ Gain, Reset และ Rate หลังจากที่ได้จะแสดงดังตัวอย่างในรูปที่ 5.15 การแกว่ง ค่า Ultimate Gain (K_u) หาได้จากสมการ

$$K_u = \frac{4d}{\pi a} \tag{5.2}$$

เมื่อ

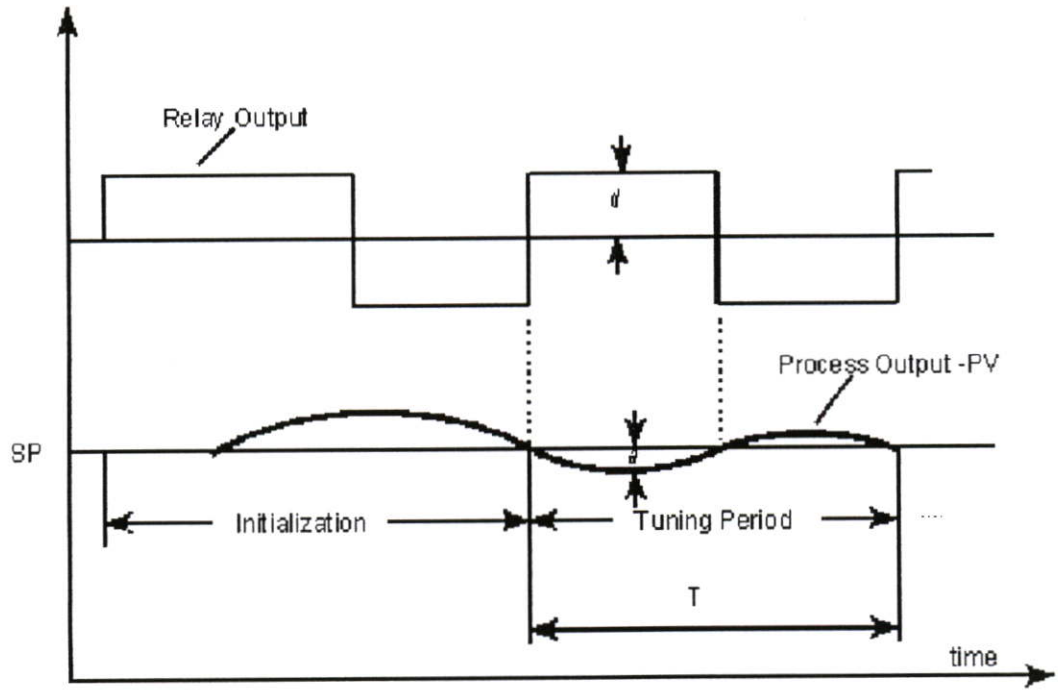
d คือค่า ของค่ารีเลย์แอบปลิจูด

a คือค่า ของแอบปลิจูดของการแกว่งของสัญญาณอินพุทของกระบวนการ (PV; process variable)



รูปที่ 5.17 การโครงสร้างการทำงานระบบเดลต้าวีจูน

ช่วงของเวลาในการปรับค่า แสดงดังรูปที่ 5.18 โดยการจ่ายสัญญาณเอาท์พุตแบบรีเลย์ให้กับกระบวนการ ค่าของรีเลย์จะส่งสัญญาณออกเมื่อค่าของ PV ผ่านค่าที่เป้าหมายของกระบวนการ (Set point; SP) ค่าแอมปลิจูดของรีเลย์ (d) จะมีค่าประมาณ 3-10 เปอร์เซ็นของย่านเอาท์พุตของตัวควบคุม ค่าของ PV ที่มีการเปลี่ยนแปลงที่ครั้งแรกจะมีขนาดใหญ่ หลังจากนั้นจะมีค่าอยู่ในช่วงของ 1-3 เปอร์เซ็นของค่าย่าน PV

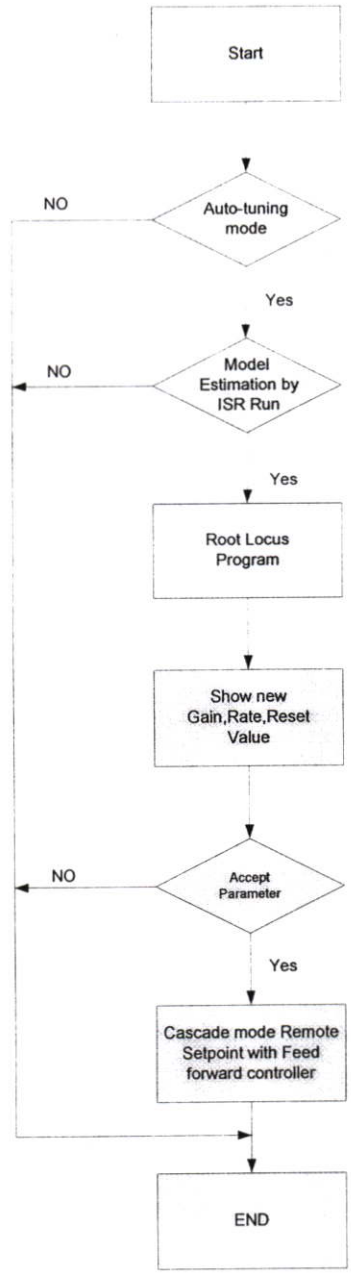


รูปที่ 5.18 คาบเวลาในการหาค่าตัวควบคุมของเคลต้าวีด้วยวิธีรีเลย์

5.5 การประยุกต์ใช้ระบบเคลต้าวีกับ กระบวนการระดับน้ำแบบสองถังแบบมีผลต่อกันโดยใช้วิธี ISR

5.5.1 ขั้นตอนการทำงานการหาค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการระดับน้ำแบบสองถังแบบมีผลต่อกันโดยใช้วิธี ISR

โดยมีระดับขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 ระดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมในการปรับค่าตัวควบคุม

5.5.2 โปรแกรมฟังก์ชั่นบล็อกของการทำงาน

การเขียนโปรแกรมในการหาค่าพารามิเตอร์จะเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชั่นบล็อก และมีการเขียนภาษาสคริปเพิ่มเติมในการคำนวณอยู่ในบล็อก CALC และเชื่อมโยงค่าตัวแปรถึงกัน โดยภาษาสคริป ระหว่างฟังก์ชั่นบล็อกต่างๆ แสดงตัวอย่างของฟังก์ชั่นบล็อกที่รูป 5.20

โดยที่โปรแกรมมีพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้

Controller = ตัวควบคุม ในที่นี้หมายถึงฟังก์ชั่นบล็อกของ พีไอดี หรือ PID1

Operator = คือบุคคลที่ทำการควบคุมโรงงาน

SP = จุดปรับตั้ง (Set Point หรือ Set Value)

PV = สัญญาณตัวแปรกระบวนการ (Process Variable)

OUT = สัญญาณตัวแปรปรับกระบวนการ หรือ Manipulated Signal

Gain = อัตราขยายของตัวควบคุม

Reset = ค่าเวลารีเซ็ต (Reset timer) มีหน่วยเป็น วินาที

Rate = ค่าเวลาดีลิวีทีฟ (Derivative timer) มีหน่วยเป็น วินาที

ATUNE/PID1 = ชื่อของตัวควบคุม หรือ PID Function Block

ATUNE/PID1/PV.CV = ค่าสัญญาณตัวแปรกระบวนการ (Process Variable)

ATUNE/PID1/SP.CV = ค่าจุดปรับตั้ง (Set Point หรือ Set Value) ของตัวควบคุม

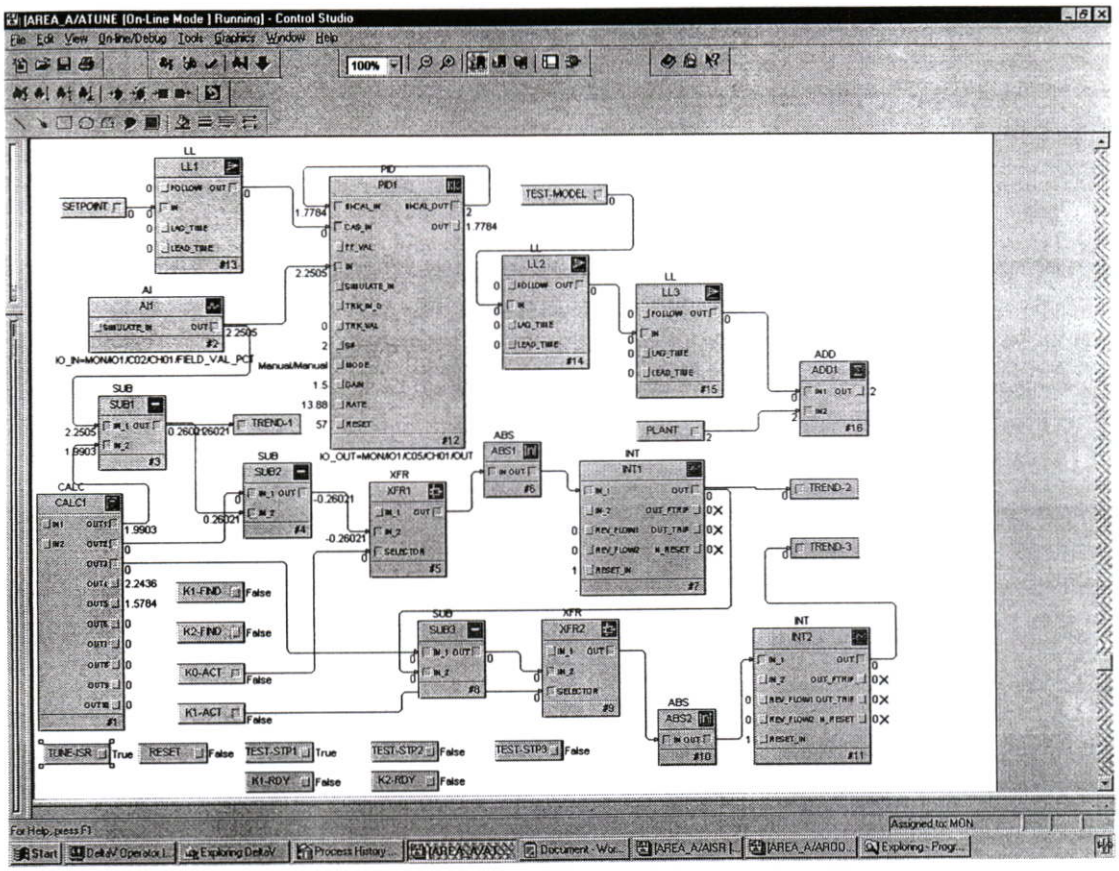
ATUNE/PID1/OUT.CV = ค่าสัญญาณตัวแปรปรับกระบวนการ หรือ Manipulated Signal ของตัวควบคุม

ATUNE/SETPOINT.CV = ค่าจุดปรับตั้ง (Set Point หรือ Set Value) ของตัวควบคุมไปข้างหน้า

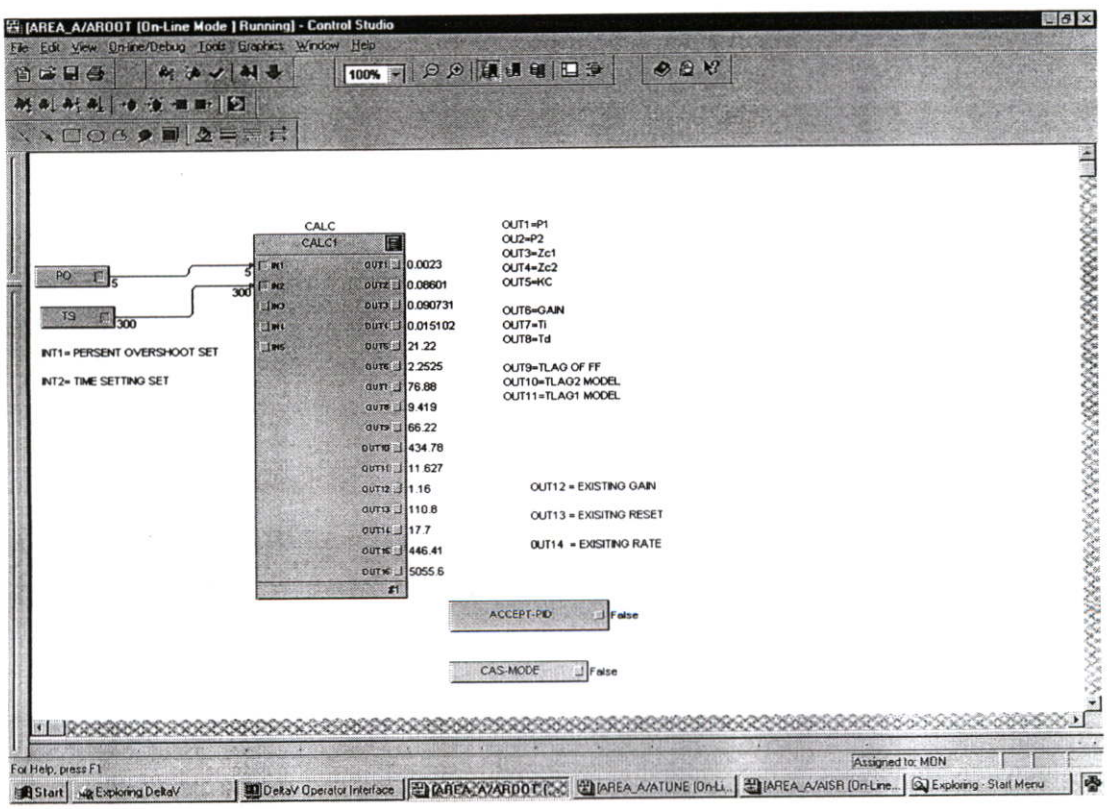
ATUNE/ADD1/OUT.CV = ค่าสัญญาณตัวแปรกระบวนการ (Process Variable) วัดได้จากแบบจำลองของกระบวนการที่หาได้จากวิธี ISR

MODE = คือโหมดการทำงานของตัวควบคุม (PID1) แบ่งออกเป็น 3 โหมด

1. โหมด AUTO คือตัวควบคุมจะปรับการทำงานของสัญญาณ OUT โดยขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของสัญญาณตัวแปรกระบวนการและค่า SP โดยมีการทำงานภายใต้พารามิเตอร์ Gain, Reset และ Rate
2. โหมด MANUAL คือการสั่งสัญญาณ OUT ของ ตัวควบคุมไปตามค่าที่มีการป้อนไปโดย Operator โดยไม่ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของสัญญาณตัวแปรกระบวนการและค่า SP และพารามิเตอร์ Gain, Reset และ Rate
3. โหมด CASECAD คือตัวควบคุมจะปรับการทำงานของสัญญาณ OUT โดยขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของสัญญาณตัวแปรกระบวนการและค่า SP ซึ่งรับค่ามาจากตัวควบคุมไปข้างหน้า โดยมีการทำงานภายใต้พารามิเตอร์ Gain, Reset และ Rateของตัวควบคุม



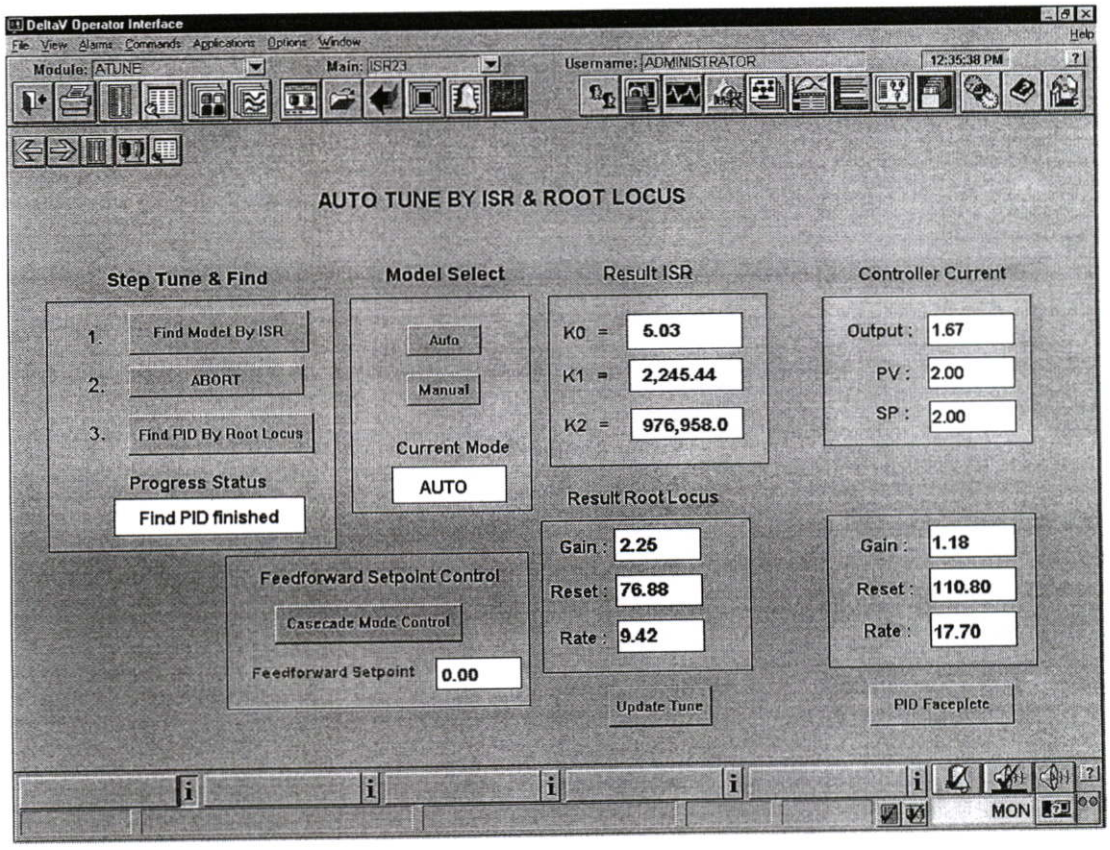
รูปที่ 5.20 แสดงของฟังก์ชั่นบล็อกของการปรับค่าตัวควบคุม



รูปที่ 5.21 แสดงฟังก์ชั่นบล็อกของการหาค่าพารามิเตอร์โดยวิธี Root Locus

5.5.3 โปรแกรมที่ติดต่อกับโอเปอเรเตอร์

จากรูปที่ 5.21 แสดงตัวอย่างของหน้ากราฟิกที่ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ PID เพื่อใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์



รูปที่ 5.22 แสดงหน้ากราฟิกที่ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ PID

5.5.4 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม ISR & Root Locus

จากรูปที่ 5.20, 5.21 และ 5.22 เราสามารถเขียนขั้นตอนรายละเอียดการทำงานของโปรแกรมได้ดังนี้

1. ขั้นตอนแรกระบบควบคุมต้องอยู่ใน Mode Auto และ มีการค่าเป้าหมายและค่าของสัญญาณตัวของกระบวนการ (Process Variable; PV) หรือระดับของน้ำที่ไม่แกว่ง
2. ทำการกดปุ่ม "Find Model By ISR" เพื่อหาแบบจำลองของกระบวนการ ของกระบวนการระดับน้ำสองถัง โดยจะหาค่า K0, K1 และ K2 เมื่อกดปุ่มแล้วโปรแกรมจะมีขั้นตอนการทำงานดังนี้
   2.1 ตัวโปรแกรมจะตรวจสอบว่าตัวควบคุมอยู่ในโหมด ออโตหรือไม่ หากอยู่จะดำเนินการในขั้นต่อไป
   2.2 โปรแกรมจำจดจำค่า PV เพื่อใช้ในการหาค่า K1 และ K2

2.3 โปรแกรมจะเปลี่ยนโหมดการทำงานของตัวควบคุมเป็นโหมด Manual แล้วทำการเพิ่มค่าสัญญาณ OUT

2.4 โปรแกรมจะทำการตรวจสอบว่าค่าของ PV ที่มีการเปลี่ยนแปลง และเมื่อค่าของ PV ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในเวลา 2 นาที โปรแกรมจำการบันทึกค่า K0 และปรับโหมดไปเป็น Auto เพื่อกลับสู่ค่าเดิมก่อนเปลี่ยนค่า OUT และให้ค่า PV คงอยู่ที่ค่าเดิมประมาณ 2 นาที

2.5 จากข้อ 2.4 ทำการหาค่า K1 และ K2 ใหม่โดยตามขั้นตอนข้อ 2.3 และ 2.4 เพื่ออีกจำนวน 2 รอบ

2.6 เมื่อโปรแกรมได้ค่า K0, K1 และ K2 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.22 ในกรอบของ "Result ISR" หลังจากนั้นโปรแกรมจะทำการปรับสู่สภาวะการควบคุมเดิมในโหมด Auto

2.7 ระหว่างการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์เราสามารถยกเลิกการทดสอบโดยการกดปุ่ม "ABORT"

3. เมื่อได้ค่าของ K0, K1 และ K2 แล้วหากเราต้องการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม (Gain, Reset, Rate) เราสามารถหาได้โดยการกดปุ่ม "Find PID by Root Locus" ซึ่งเมื่อกดปุ่มนี้แล้ว เราสามารถกำหนดค่า Percent Overshoot และ Setting Time ได้ หลังจากนั้นโปรแกรมจะคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ออกมา
4. เมื่อโปรแกรมคำนวณค่า Gain, Reset และ Rate ได้แล้วจะแสดงดังรูปที่ 5.22 ในกรอบของ "Result Root Locus"
5. หากเราต้องการนำค่าพารามิเตอร์ Gain, Reset และ Rate ใหม่เข้าใช้กับตัวควบคุมเราสามารถกดปุ่ม "Update Tune" เพื่อเข้าใช้งานได้ทันที
6. ในการออกแบบของวิทยานิพนธ์นี้เราให้มีการตัวควบคุมไปข้างหน้า (Forward Controller) เราต้องทำการเปลี่ยนโหมด โดยการกดที่ปุ่ม "Cascade Mode Control" หลังจากนั้นโปแกรมจะเปลี่ยนเอาค่าเป้าหมายเดิมให้ผ่าน Forward Controller ก่อนเข้าสู่ตัวควบคุม
7. หากเราต้องการ เปลี่ยนค่าเป้าหมายเพื่อการทดสอบเราสามารถเปลี่ยนค่าเป้าหมายได้ที่ตรงช่อง "Feed forward Setpoint"

บทที่ 6

ผลการทดลอง

6.1 กล่าวนำ

จากเนื้อหาที่ผ่านมาเป็นทฤษฎีและขั้นตอนการทำงานที่จะมาทำการทดลองการเปรียบเทียบการทำงานกับระบบเดลต้าวีนั้น เราจะมาทำการทดลองหาผลการทำงาน โดยรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองชี้แจงอยู่ในภาคผนวก ก.

6.2 ผลการทดลองการใช้ระบบเดลต้าวีในการหาค่าของตัวควบคุมโดยวิธีเดลต้าวีจูน

มีขั้นตอนในการทำงานดังนี้

1. ทำการตั้งค่า Set point ให้เท่ากับ 2 โดยที่ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ PID ไว้ที่ค่าหนึ่งเพื่อให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้
2. ที่โปรแกรมเดลต้าวีจูน กดที่ปุ่มทดสอบ (Test) ทำการเดลต้าวีจูน ดังรูปที่ 6.1
3. ตัวโปรแกรมจะเปลี่ยนโหมดการทำงานของตัวควบคุมเป็นโลคอลโหมด และทำการปรับค่าสัญญาณเอาท์พุตของตัวควบคุม เป็น 3 ครั้ง ดังรูปที่ 6.2 เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของ PID
4. รอผลการทดสอบ การหาค่า PID ของโปรแกรมเดลต้าวีจูน ซึ่งจะได้ผลของพารามิเตอร์ใหม่ ดังแสดงดังรูปที่ 6.1 และผลที่ได้ก่อนและหลังการหาด้วยโปรแกรมเดลต้าวีจูนแสดงในตารางที่ 6.1
5. นำค่าพารามิเตอร์ใหม่ที่ได้จากการใช้ระบบเดลต้าวีจูนเข้าใช้งาน ดังรูปที่ 6.3 เพื่อทดสอบผลของการทำงานของพารามิเตอร์ใหม่ที่ค่าเป้าหมายต่างๆ
6. ทำการเปลี่ยนค่าเป้าหมายต่างๆ และนำผลที่ได้แสดงในตารางที่ 6.2

โดยที่

Controller = ตัวควบคุม ในที่นี้หมายถึงฟังก์ชั่นบล็อกของ พีไอดี หรือ PID1

Operator = คือบุคคลที่ทำการควบคุมโรงงาน

SP = จุดปรับตั้ง (Set Point หรือ Set Value)

PV = สัญญาณตัวแปรกระบวนการ (Process Variable)

OUT = สัญญาณตัวแปรปรับกระบวนการ หรือ Manipulated Signal

Gain = อัตราขยายของตัวควบคุม

Reset = ค่าเวลารีเซ็ต (Reset timer) มีหน่วยเป็น วินาที

Rate = ค่าเวลาดีลิวีทีฟ (Derivative timer) มีหน่วยเป็น วินาที

ATUNE/PID1 = ชื่อของตัวควบคุม หรือ PID Function Block

ATUNE/PID1/PV.CV = ค่าสัญญาณตัวแปรกระบวนการ (Process Variable)

ATUNE/PID1/SP.CV = ค่าจุดปรับตั้ง (Set Point หรือ Set Value) ของตัวควบคุม

ATUNE/PID1/OUT.CV = ค่าสัญญาณตัวแปรปรับกระบวนการ หรือ Manipulated Signal ของตัวควบคุม

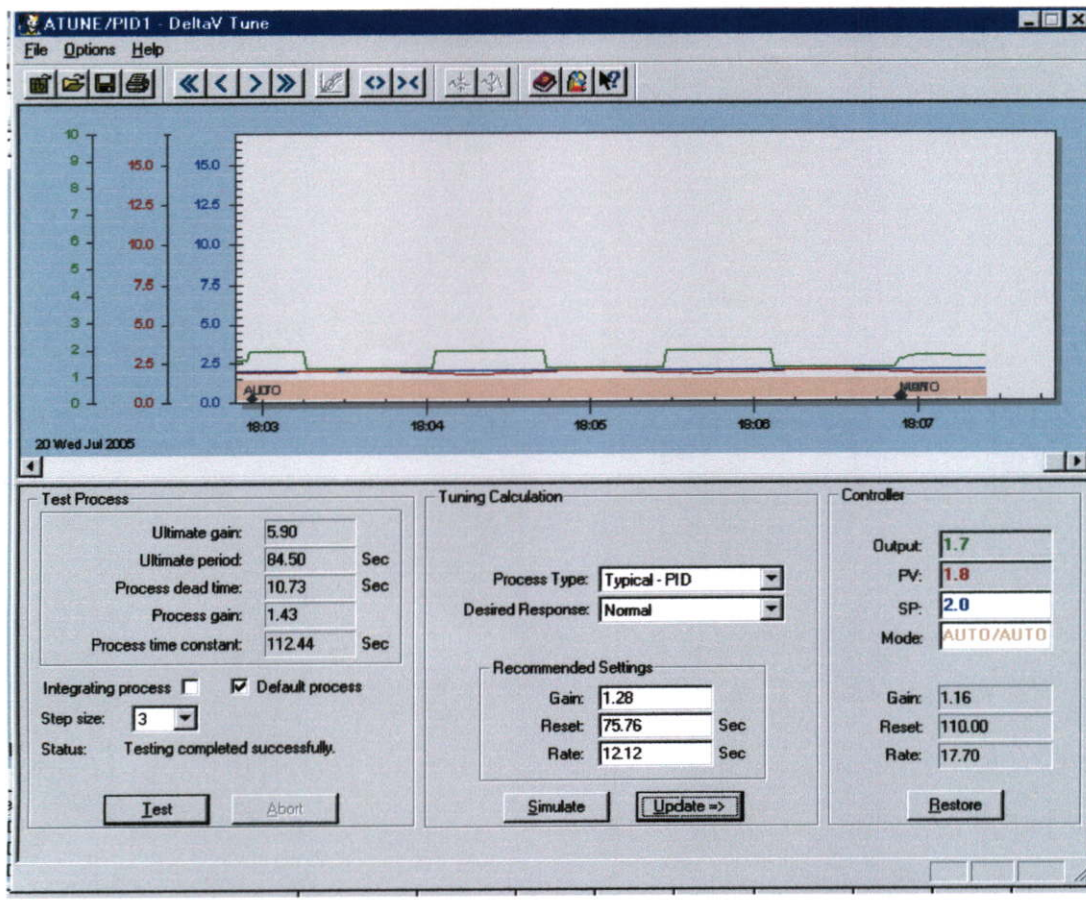
ATUNE/SETPOINT.CV = ค่าจุดปรับตั้ง (Set Point หรือ Set Value) ของตัวควบคุมไปข้างหน้า

ATUNE/LL1/OUT.CV= ค่าสัญญาณเอาท์พุตของตัวควบคุมไปข้างหน้าที่เป็นค่าค่าจุดปรับตั้งของตัวควบคุม

ATUNE/ADD1/OUT.CV = ค่าสัญญาณตัวแปรกระบวนการ (Process Variable) วัดได้จากแบบจำลองของกระบวนการที่หาได้จากวิธี ISR

MODE = คือโหมดการทำงานของตัวควบคุม (PID1) แบ่งออกเป็น 3 โหมด

1. โหมด AUTO คือตัวควบคุมจะปรับการทำงานของสัญญาณ OUT โดยขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของสัญญาณตัวแปรกระบวนการและค่า SP โดยมีการทำงานภายใต้พารามิเตอร์ Gain, Reset และ Rate
2. โหมด MANUAL คือการสั่งสัญญาณ OUT ของ ตัวควบคุมไปตามค่าที่มีการป้อนไปโดย Operator โดยไม่ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของสัญญาณตัวแปรกระบวนการและค่า SP และพารามิเตอร์ Gain, Reset และ Rate
3. โหมด CASECAD คือตัวควบคุมจะปรับการทำงานของสัญญาณ OUT โดยขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของสัญญาณตัวแปรกระบวนการและค่า SP ซึ่งรับค่ามาจากตัวควบคุมไปข้างหน้า โดยมีการทำงานภายใต้พารามิเตอร์ Gain, Reset และ Rateของตัวควบคุม



รูปที่ 6.1 การประยุกต์ใช้ระบบเคลต้าวีจูนในการหาค่าพารามิเตอร์ PID

จากรูปที่ 6.1 เป็นการใช้โปรแกรมเคลต้าวีจูนในการหาค่าพารามิเตอร์ โดยการใช้วิธีรีเลย์ในการหาค่า โดยการเปลี่ยนโหมดของตัวควบคุมเป็น "Manual" และทำการป้อนสัญญาณ Unit step ให้กับ Output ของตัวควบคุมจำนวน 3 ครั้ง เพื่อใช้หาค่าพารามิเตอร์โดยวิธีเคลต้าวีจูน ซึ่งค่าพารามิเตอร์ใหม่ของตัวควบคุมที่หาได้จะแสดงที่แทบของข้อมูลของ "Recommended Settings" และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้อยู่ ณ ปัจจุบันแสดงที่แทบข้อมูลของ "Controller"

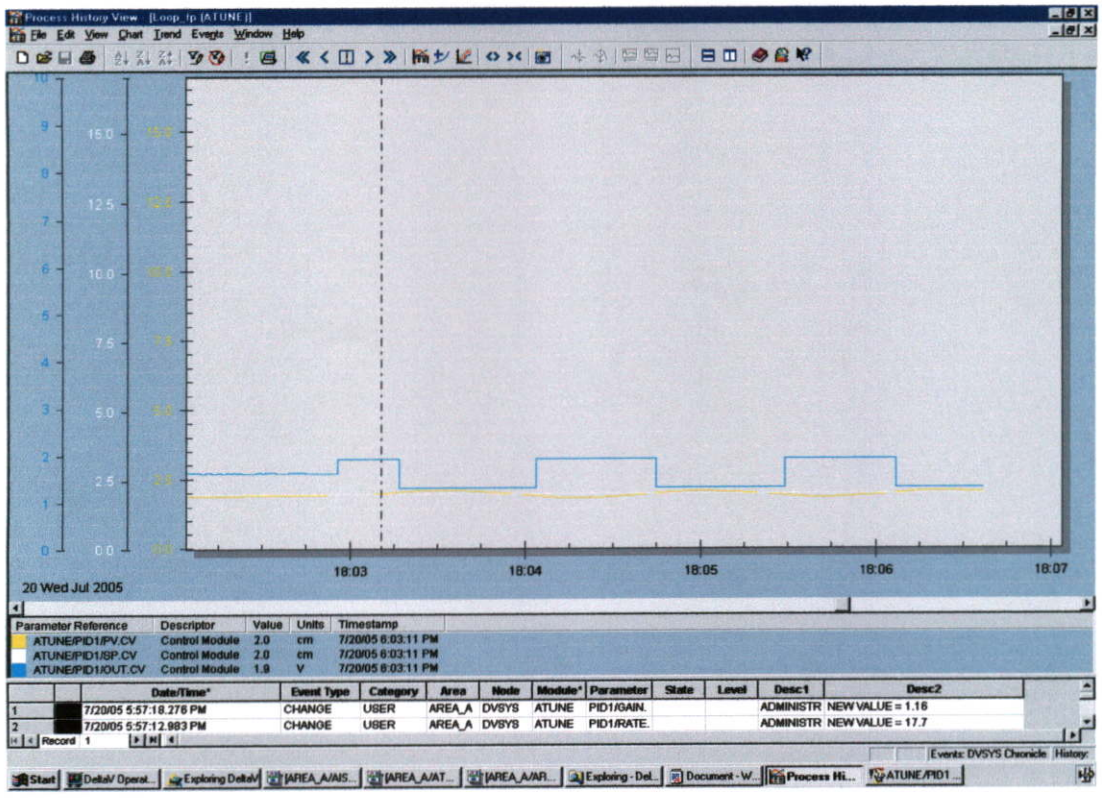
เมื่อต้องการใช้พารามิเตอร์ใหม่ที่หาได้โดยโปรแกรมเคลต้าวีจูนทำได้โดยการกดที่ปุ่ม"Update=>" ค่าพารามิเตอร์ใหม่จะถูกใช้ทันทีกับตัวควบคุม

จากรูปที่ 6.2 กราฟแสดงการทำงานของโปรแกรม เคลต้าวีจูน ซึ่งกราฟแต่ละเส้นประกอบด้วย

ATUNE/PID1/PV.CV = ค่าสัญญาณตัวแปรกระบวนการ แสดงโดยเส้นสีเหลือง

ATUNE/PID1/SP.CV = ค่าจุดปรับตั้ง ของตัวควบคุม แสดงโดยเส้นสีขาว

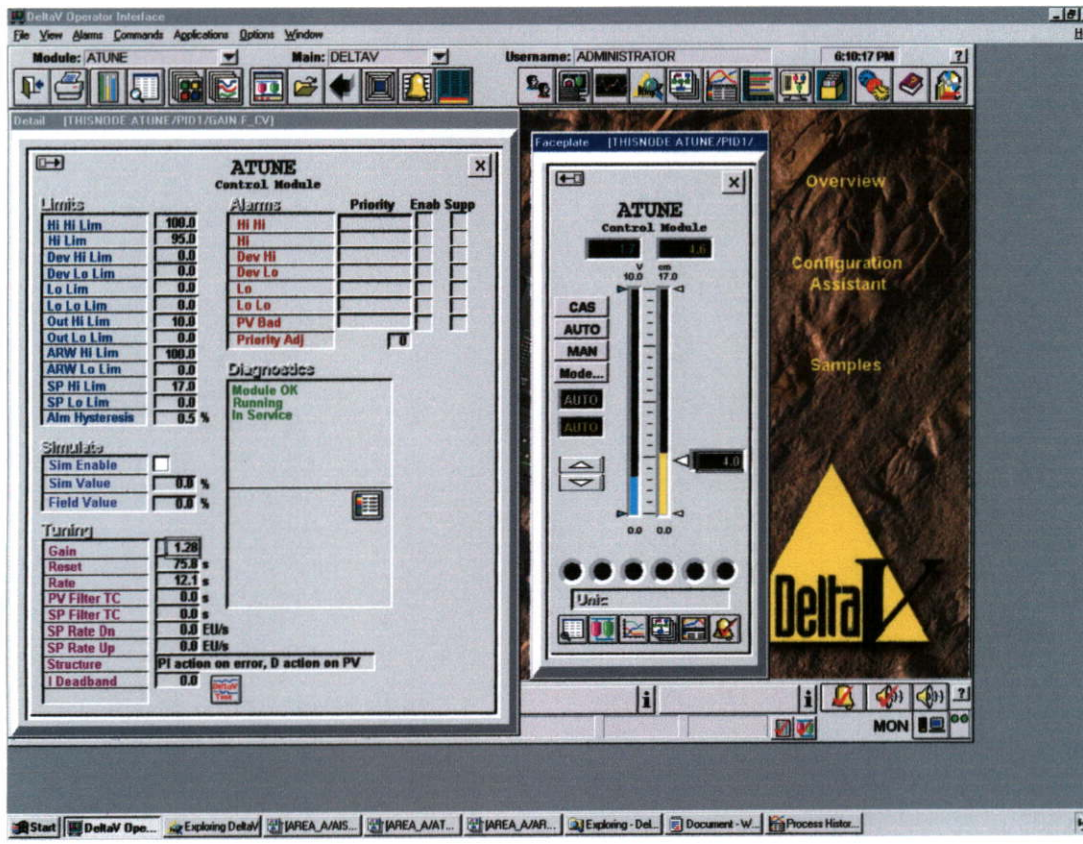
ATUNE/PID1/OUT.CV= ค่าสัญญาณตัวแปรปรับกระบวนการ แสดงโดยเส้นสีฟ้า



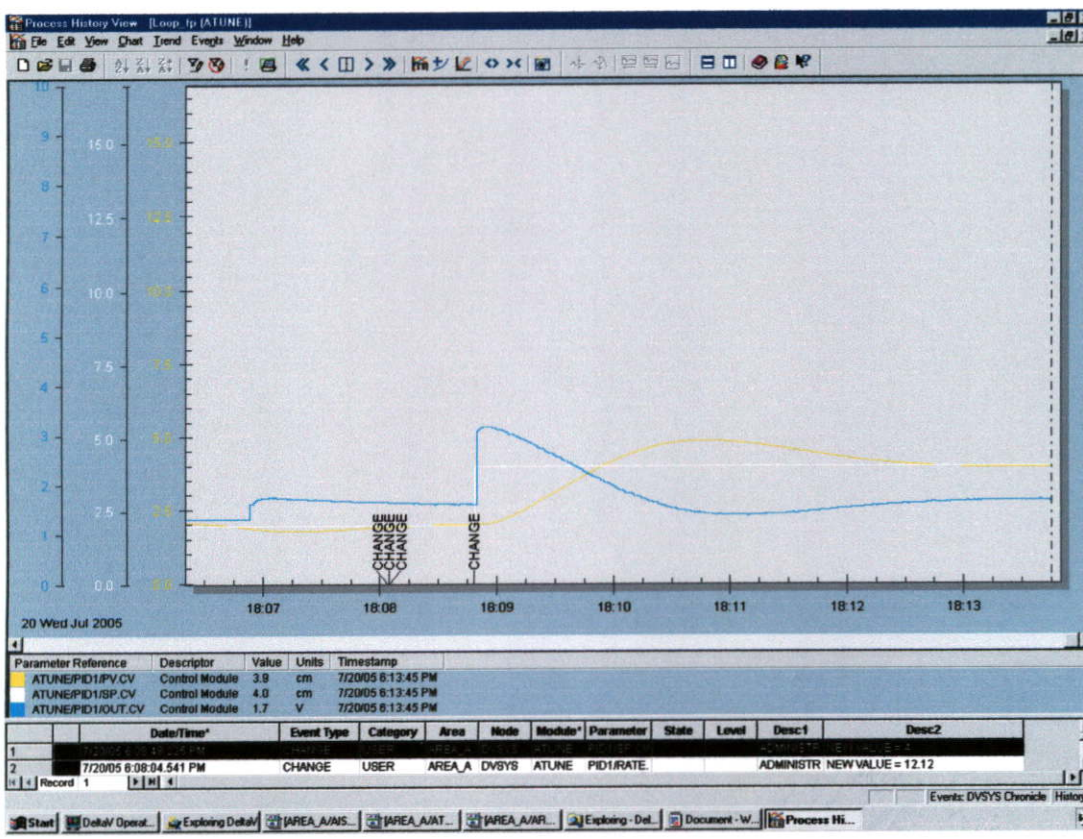
รูปที่ 6.2 การปรับค่าสัญญาณเอาท์พุตของตัวควบคุมเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของ PID

ตารางที่ 6.1 ขั้นตอนในการทดลองโดยใช้ระบบเคลต้าวีจูน

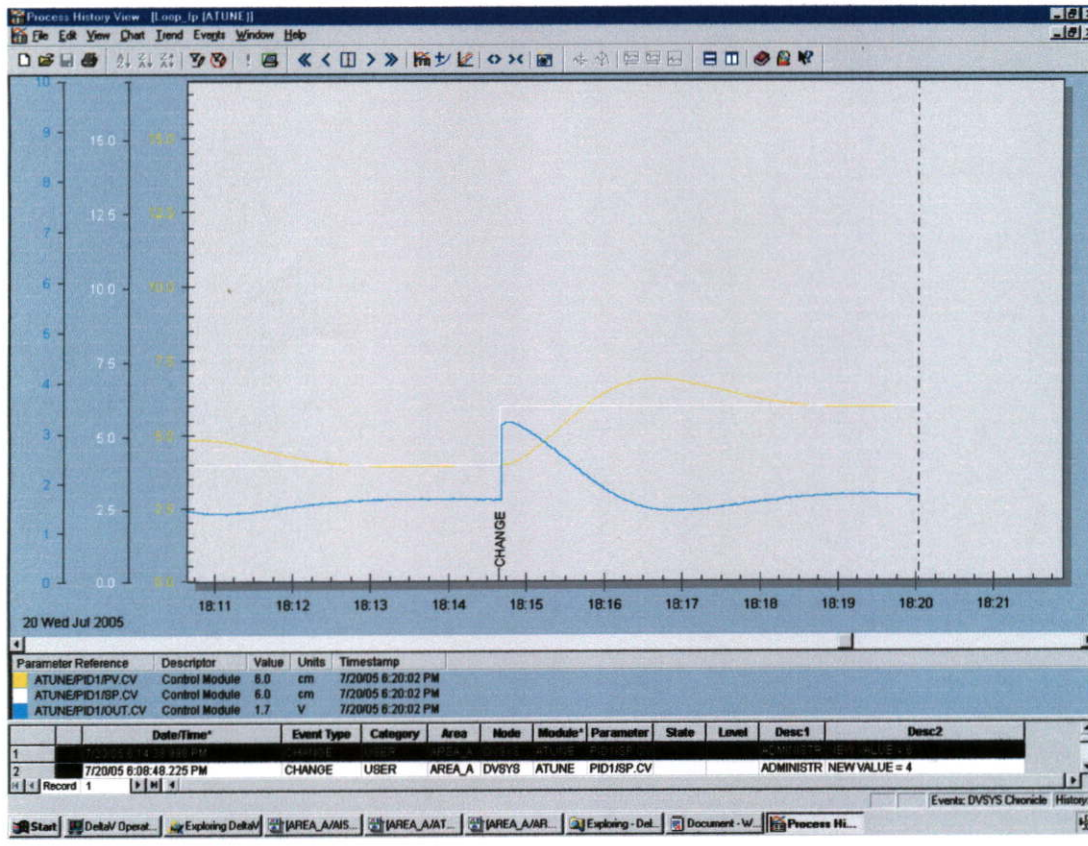
หัวข้อ	รายละเอียดการทดลอง	Set point	Gain	Reset	Rate
1	ค่าพารามิเตอร์ก่อนมีการใช้ระบบเคลต้าวีจูน	2	1.16	110	17.7
2	ค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากการใช้เคลต้าวีจูน	2	1.28	75.76	12.12



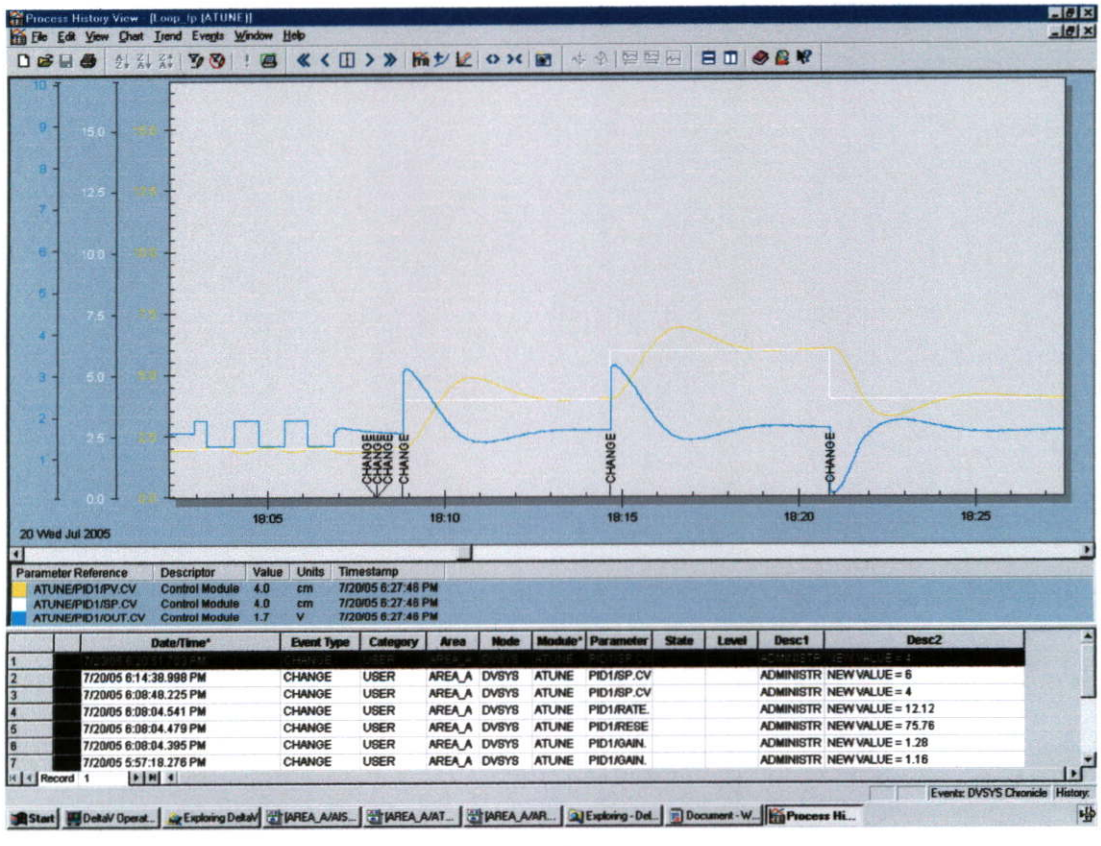
รูปที่ 6.3 การปรับค่าพารามิเตอร์ของ PID ใหม่ตามค่าที่หาได้จากโปรแกรมเดลต้าวีจูน



รูปที่ 6.4 กราฟแสดงผลของการปรับค่าเป้าหมายจาก 2ไปที่ 4



รูปที่ 6.5 กราฟแสดงผลของการปรับค่าเป้าหมายจาก 4 ไปที่ 6



รูปที่ 6.6 กราฟแสดงผลของการปรับค่าเป้าหมายจาก 4 ไปที่ 6 และภาพรวมของการปรับ

ตารางที่ 6.2 ผลการทดลองโดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายของวิธีเดลต้าวีจูน

หัวข้อ	รายละเอียดการทดลอง	Previous SP	New SP	เวลาข้าที่ (นาที)	รูปที่
1	ทำการเปลี่ยนค่า เป้าหมาย	2	4	5	6.4
2	ทำการเปลี่ยนค่า เป้าหมาย	4	6	5	6.5
3	ทำการเปลี่ยนค่า เป้าหมาย	6	4	6	6.6

จากผลการทดลองการหาค่าพารามิเตอร์ของเดลต้าวีนั้นยังมีการแกว่งของกระบวนการก่อนที่จะเข้าสู่ค่าเป้าหมาย และใช้เวลาในการเข้าสู่เป้าหมายไม่เสถียรมากนักและและใช้เวลาในการเข้าสู่เป้าหมายนานเกินกว่า 5 นาที ทั้งนี้ระบบเดลต้าวีจูนก็ไม่สามารถตั้งเวลาที่เข้าสู่เป้าหมายได้

6.3 ผลการทดลองการใช้ระบบเดลต้าวีในการหาค่าของตัวควบคุมโดยวีธี ISR และ Root Locus

มีขั้นตอนในการทำงานของโปรแกรมโดยละเอียดได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 5.3.4 ซึ่งสามารถสรุปโดยย่อได้ดังนี้

1. ทำการตั้งค่า Set point ให้เท่ากับ 2 โดยที่ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ PID ไว้ที่ค่าหนึ่งเพื่อให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้
2. ที่โปรแกรมการหาพารามิเตอร์โดยวิธี ISR กดที่ปุ่ม Find Model By ISR ดังรูปที่ 6.7
3. ตัวโปรแกรมจะเปลี่ยนโหมดการทำงานของตัวควบคุมเป็น Manual โหมด และทำการปรับค่าสัญญาณเอาท์พุตของตัวควบคุมเป็น 3 ครั้ง การป้อนสัญญาณจะเพิ่มค่าสัญญาณควบคุมจากเดิมขึ้นไปและหาค่าของระดับน้ำที่สภาวะคงที่เมื่อระดับน้ำคงที่ก็จะได้ค่าพารามิเตอร์ K0 แล้วโปรแกรมจะปรับของสู่โหมดควบคุม AUTO จนกลับสู่สภาวะเดิม แล้วโปรแกรมก็จะทำการหาค่า K1 และ K2 ตามขั้นตอนดังเดิมตามลำดับ ดังรูปที่ 6.8 ถึงรูปที่ 6.13
4. เมื่อได้ค่า K0, K1 และ K2 แล้วทำการหาค่าพารามิเตอร์ของการปรับค่า PID และค่า Feed forward control พร้อมกับการหาค่าพารามิเตอร์ของ Model เพื่อทำการเปรียบเทียบ Model ที่ได้กับกระบวนการจริง ดังรูปที่ 6.15
5. ทำการ ปรับปรุงค่า PID ดังรูปที่ 6.16
6. ทำการเปลี่ยนโหมดการควบคุมไปเป็น CASCADE เพื่อรับค่า เป้าหมายผ่านมาจากตัวควบคุมข้างหน้า ดังรูปที่ 6.17

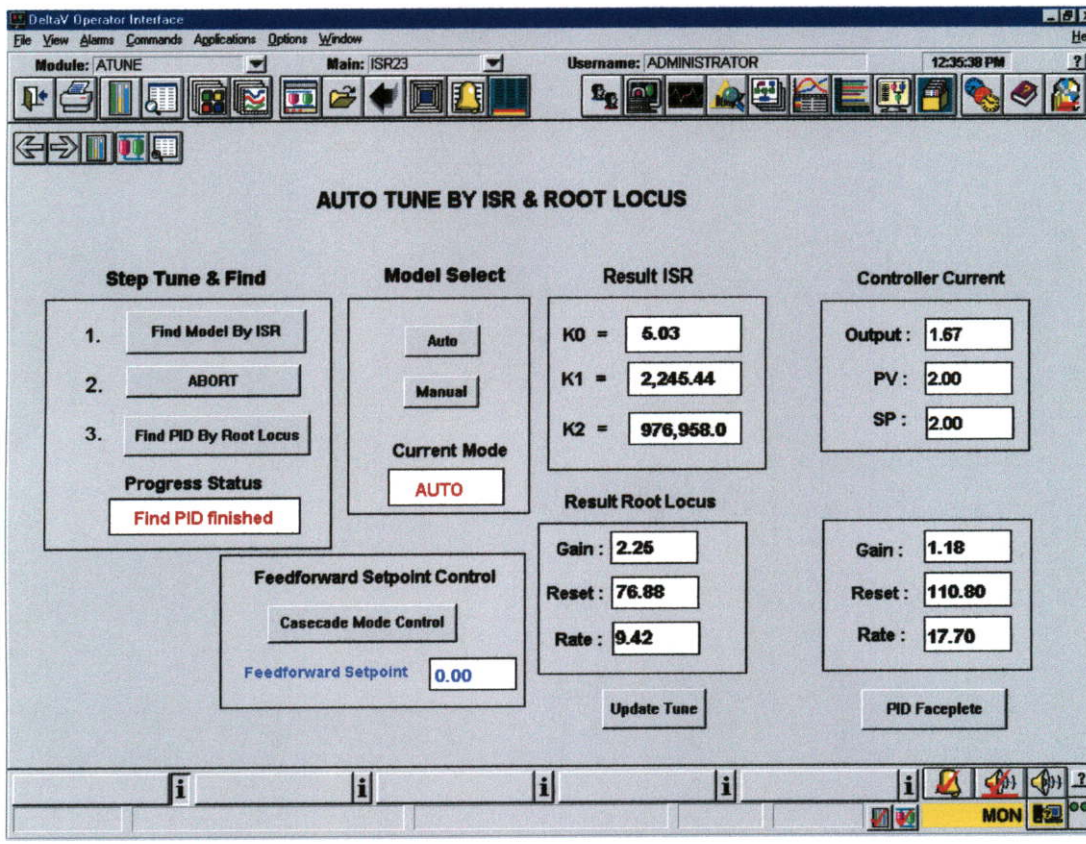
7. ทำการเปลี่ยนค่าเป้าหมายต่างๆ และนำผลที่ได้แสดงในตารางที่ 6.3 และกราฟแสดงผลตอบสนองของกระบวนการในแต่ละค่าเป้าหมายที่เปลี่ยนไป

โดยที่กราฟแสดงการทำงานของโปรแกรม เดลต้าวีจูน ซึ่งกราฟแต่ละเส้นประกอบด้วย

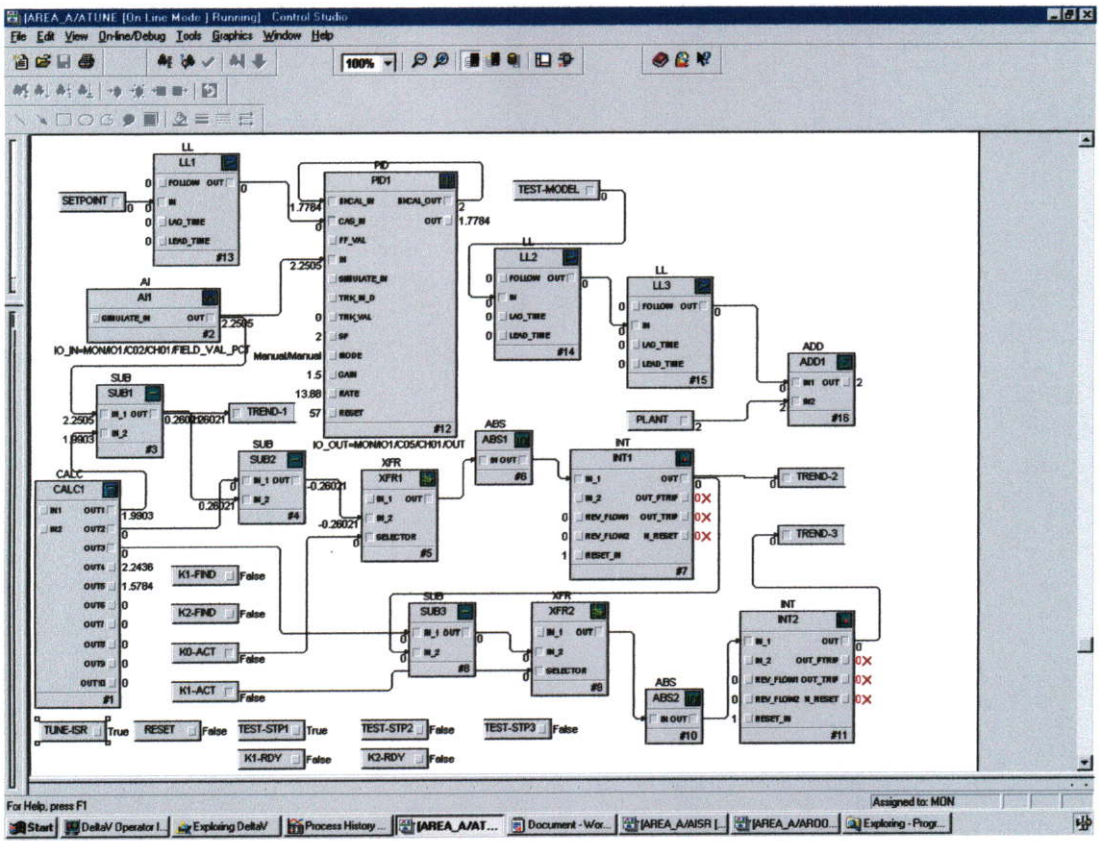
ATUNE/PID1/PV.CV = ค่าสัญญาณตัวแปรกระบวนการ แสดงโดยเส้นสีเหลือง

ATUNE/PID1/SP.CV = ค่าจุดปรับตั้ง ของตัวควบคุม แสดงโดยเส้นสีขาว

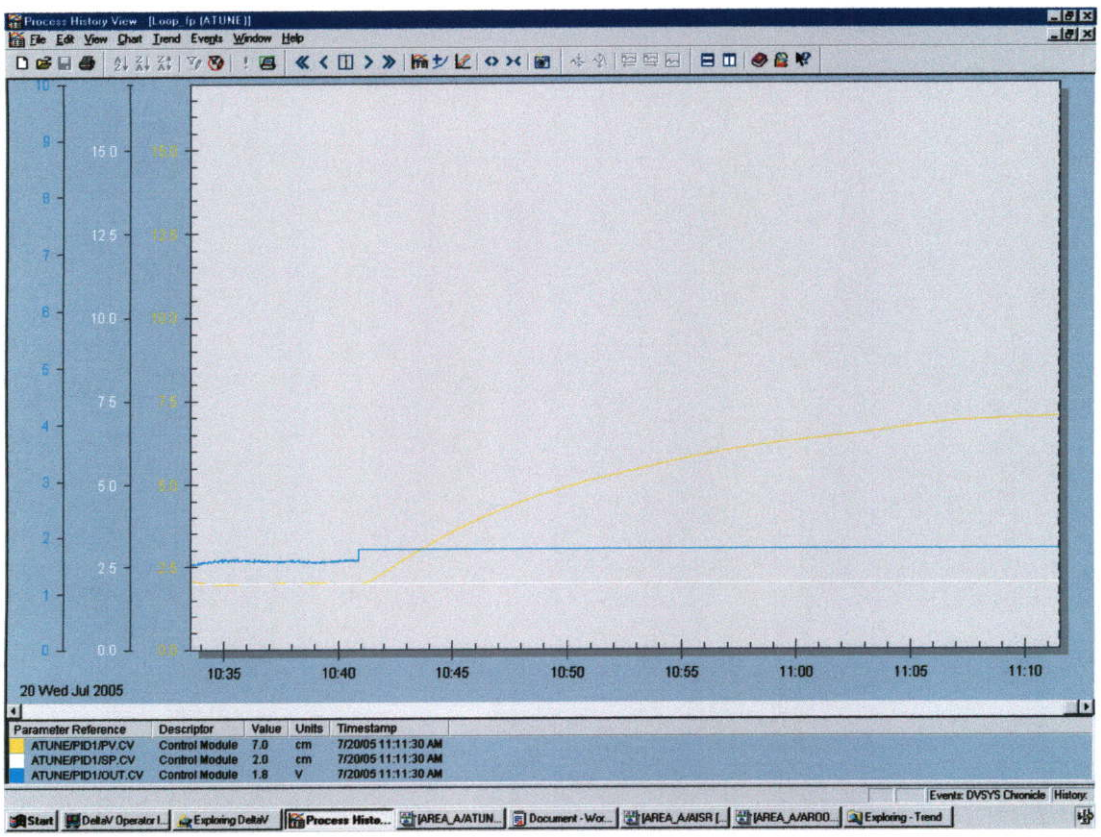
ATUNE/PID1/OUT.CV= ค่าสัญญาณตัวแปรปรับกระบวนการ แสดงโดยเส้นสีฟ้า



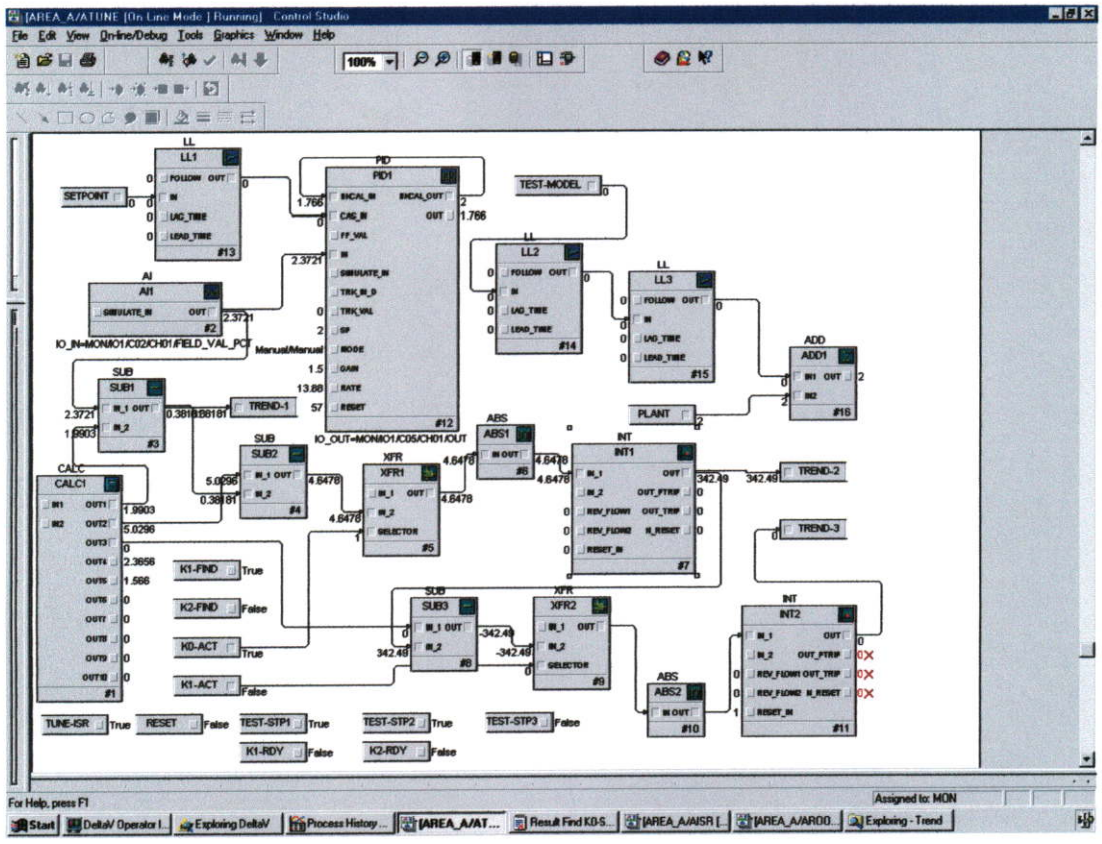
รูปที่ 6.7 กราฟิกที่ในการทดลองโดยใช้ระบบ ISR & Root Locus



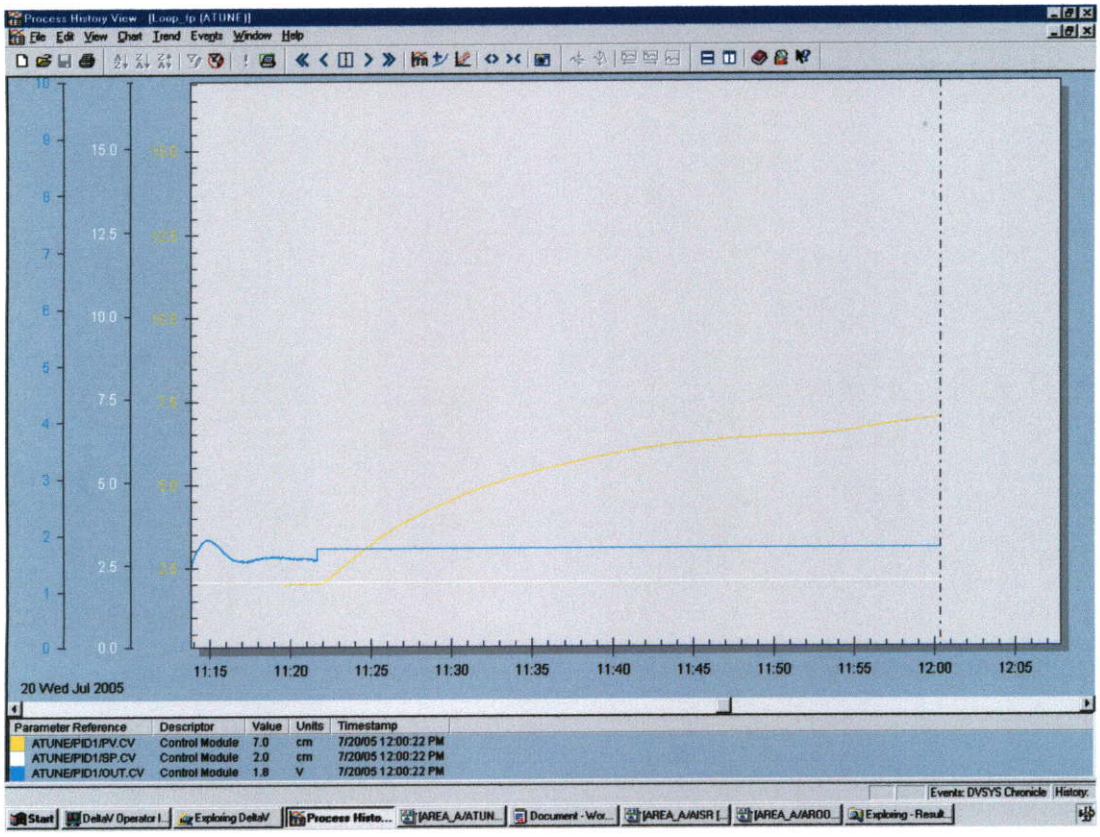
รูปที่ 6.8 โปรแกรมที่ใช้ในการหาค่า K0



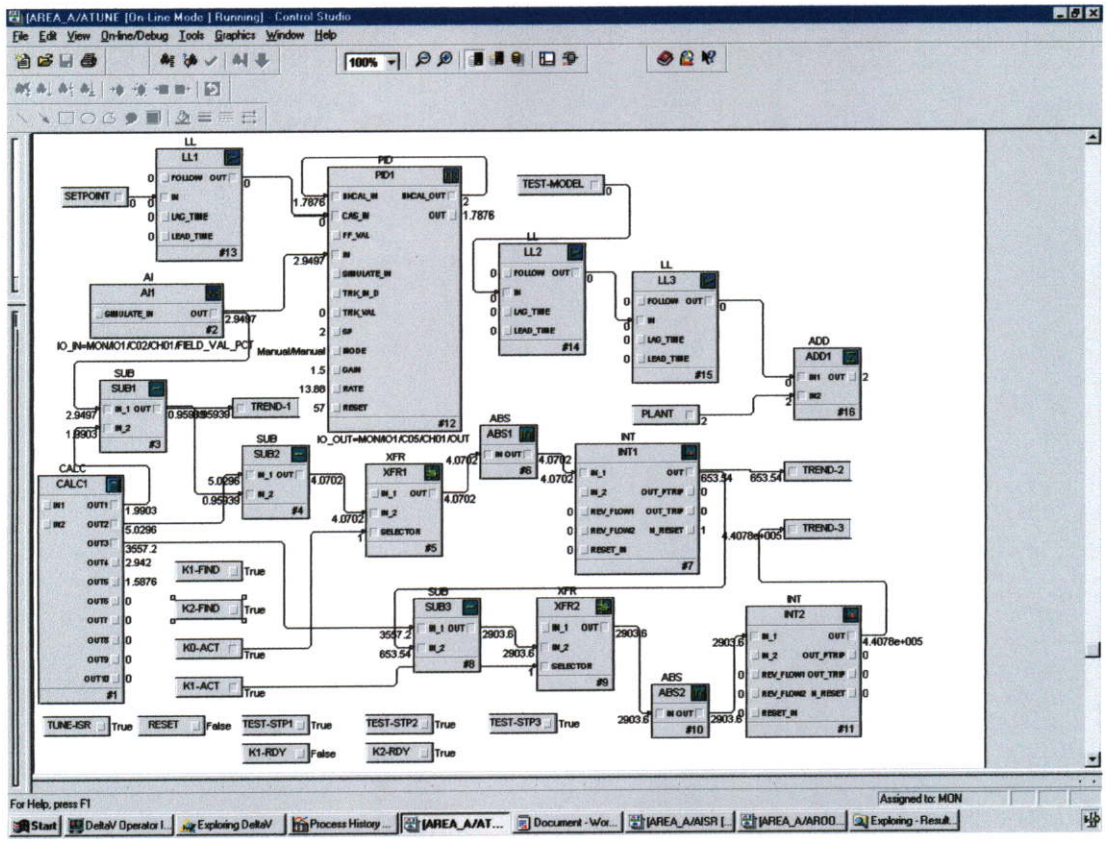
รูปที่ 6.9 กราฟแสดงการหาค่า K0



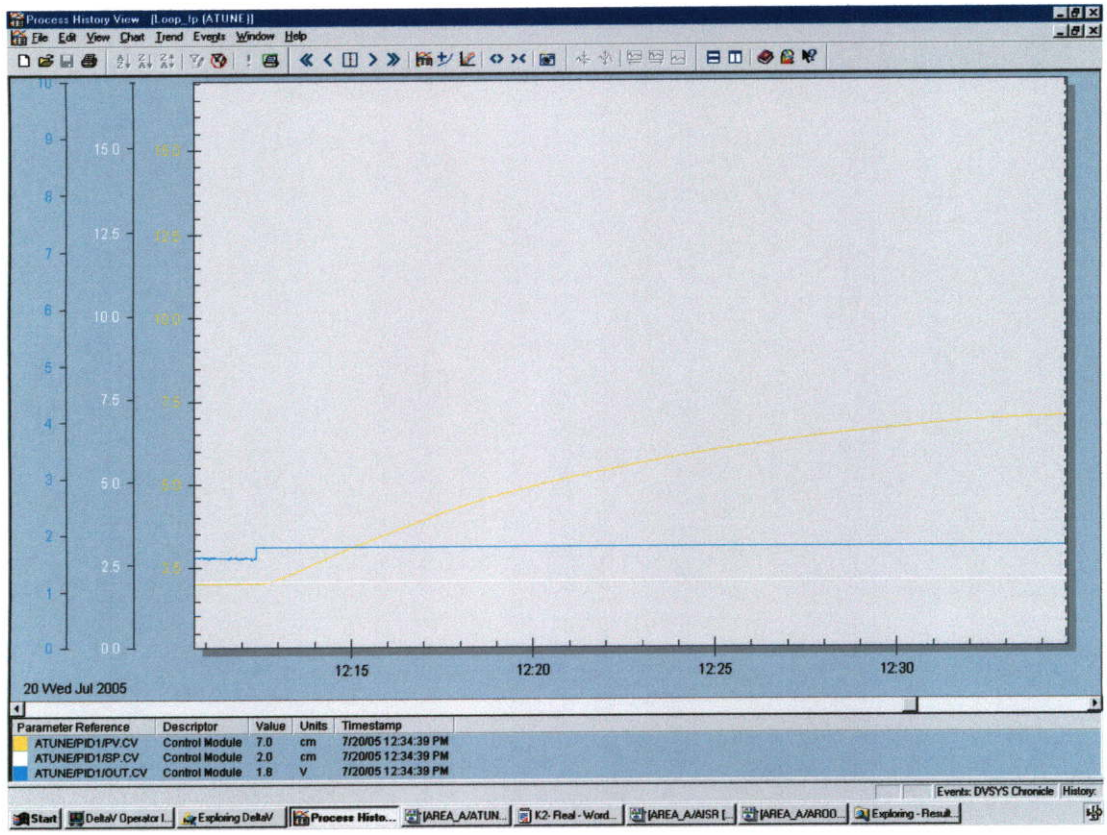
รูปที่ 6.10 โปรแกรมที่ใช้ในการหาค่า K1



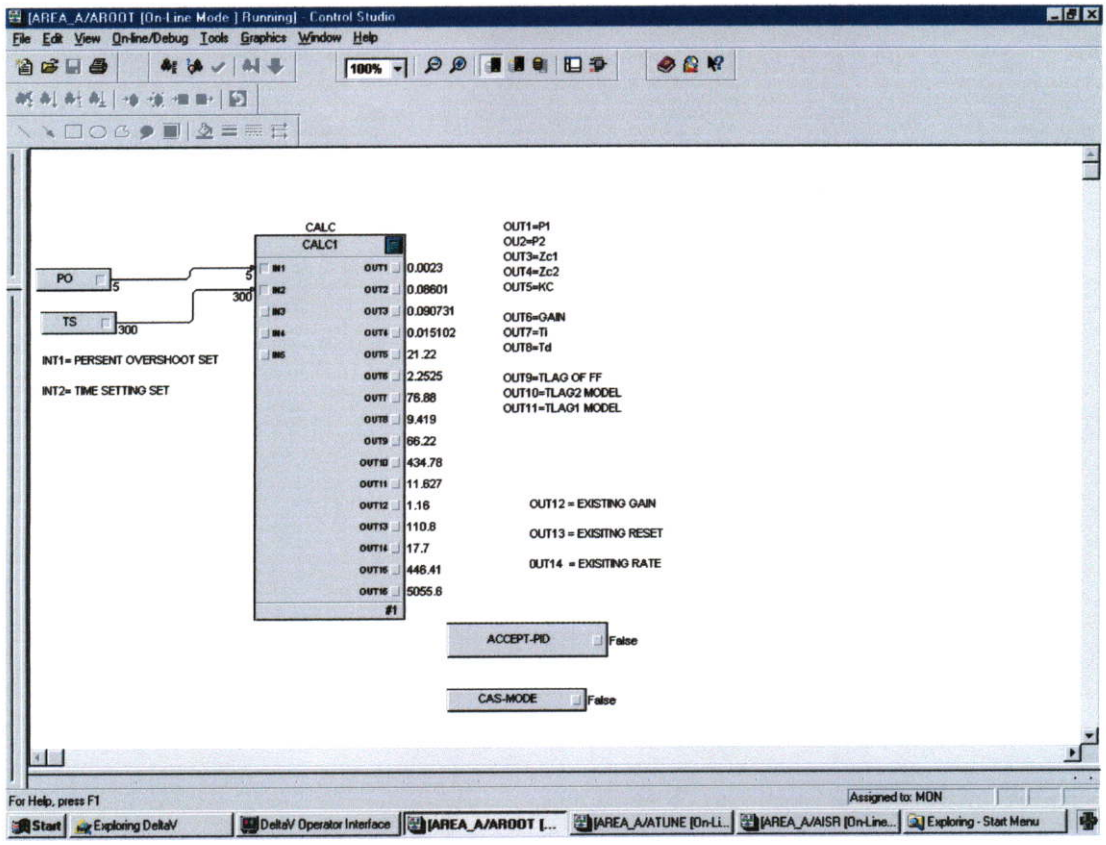
รูปที่ 6.11 กราฟแสดงการหาค่า K1



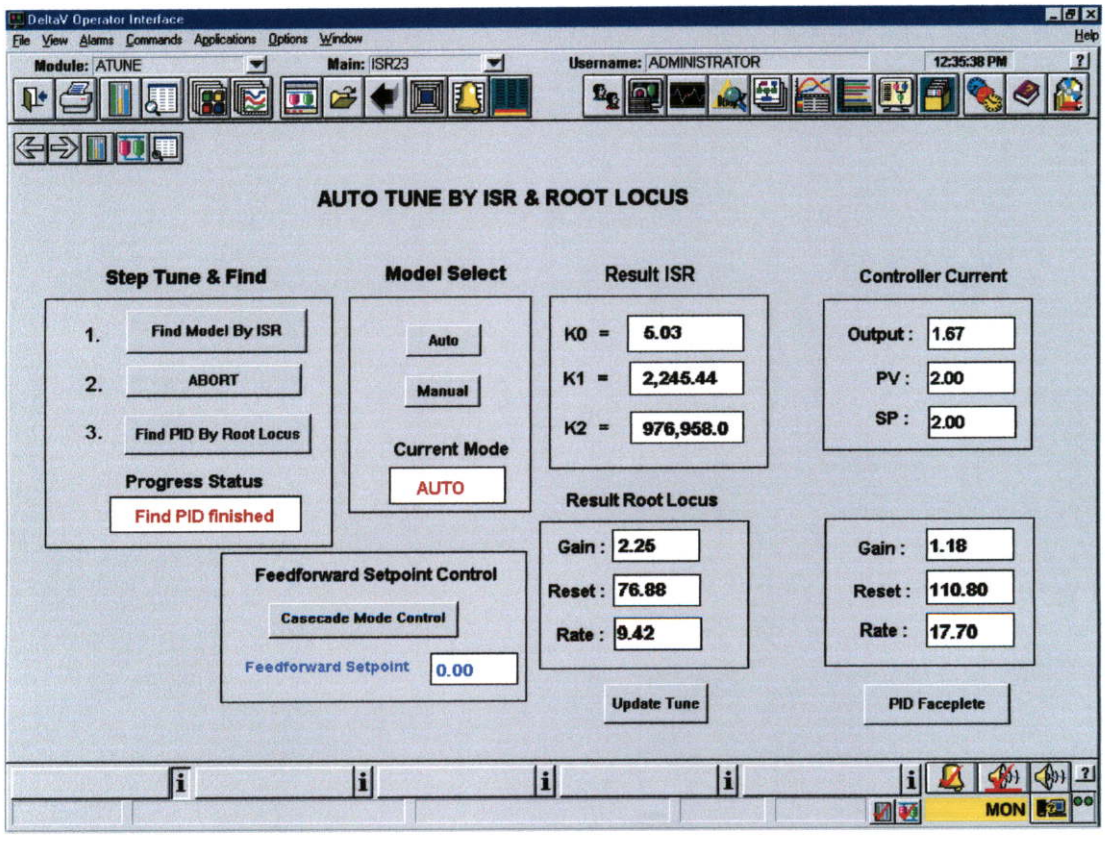
รูปที่ 6.12 โปรแกรมที่ใช้ในการหาค่า K2



รูปที่ 6.13 กราฟแสดงการหาค่า K2



รูปที่ 6.14 โปรแกรมแสดงที่หาค่าได้จากวิธีของ ISR และ Root Locus



รูปที่ 6.15 แสดงการหาค่าพารามิเตอร์ที่หาค่าได้จากวิธีของ ISR และ Root Locus

6.3.1 การหาฟังก์ชันถ่ายโอนแบบจำลองของกระบวนการโดยวิธี ISR

จากรูปที่ 6.15 เราได้ค่าพารามิเตอร์ K0, K1 และ K2 แล้วเราทำการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยวิธีของ Root Locus โดยการใช้วิธีการคำนวณโดยโปรแกรม โดยการกดที่ปุ่ม "Find PID By Root Locus" ในอีกวิธีหนึ่งเราสามารถวาดทางเดินของรากได้จากการคำนวณทางทฤษฎีได้ดังนี้

โดยที่ค่าของพารามิเตอร์ที่หาได้จากวิธี ISR โดยโปรแกรมเดลต้าวีที่เขียนขึ้นตามทฤษฎีของวิธี ISR จะได้

$$K_0 = 5.03$$
$$K_1 = 2,245.44$$
$$K_2 = 976,958$$

ทำการหาแบบจำลองของกระบวนการตามทฤษฎีและเนื้อที่ผ่านมาในวิทยานิพนธ์ในบทที่ 2 และ 3 จากสมการที่ (2.4) สำหรับแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นของกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันเขียนได้ดังนี้

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

และจากสมการที่ (2.5) และ (2.6) ของกระบวนการของน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันเขียนให้อยู่ในรูปแบบจำลองเชิงเส้นได้ว่า

$$\frac{dH_1(t)}{dt} = \frac{1}{T_{12}}\left(-H_1(t)+H_2(t)\right) + \frac{k}{A_1}U(t)$$
$$\frac{dH_2(t)}{dt} = -\frac{1}{T_2}H_2(t) + \frac{1}{T_{12}}\left(H_1(t)-H_2(t)\right)$$
$$\frac{H_2(s)}{U(s)} = G(s) = \frac{K}{T_{12}T_2s^2 + (T_{12}+2T_2)s+1}$$

ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการเขียนได้เป็น

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

จากฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการโดยเขียนให้อยู่ในรูปใหม่ ตามสมการที่ (3.1) ทฤษฎีของ ISR จะได้

$$G(s) = \frac{K_0}{[1 + a_1 s + a_2 s^2]} \tag{6.1}$$

โดยที่

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

T_{12} คือค่าคงตัวเวลาระหว่างถังที่ 1 และถังที่ 2

T_2 คือค่าคงตัวเวลาของถังที่ 2

$Gain_{plant}$ อัตราขยายของกระบวนการ

$$T_{12} = \frac{A_1}{\beta_{12} a_1}\sqrt{\frac{2(\overline{h_1} - \overline{h_2})}{g}},\ \text{s} \quad T_2 = \frac{A_2}{\beta_2 a_2}\sqrt{\frac{2\overline{h_2}}{g}},\ \text{s}$$

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

$$a_1 = (T_{12} + 2T_2)$$

$$a_2 = (T_{12} T_2)$$

$$K = \frac{K_0}{a_2} = Gain_{plant}$$

จากสมการที่ (3.18) จากทฤษฎีค่าสุดท้ายทำให้เราได้ค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการของระดับน้ำสองถัง

$$K_1 = a_1 K_0$$

$$K_2 = a_1 K_1 - a_2 K_0$$

ทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนแบบจำลองกระบวนการตามสมการที่ (6.1) ได้ดังนี้

$$a_1 = \frac{K_1}{K_0} = \frac{2,245}{5.03} = 446.41$$

$$a_2 = \frac{-K_2 + a_1 K_1}{K_0} = \frac{-976,958 + (446.41 x 2,245.44)}{5.03} = 5,055.61$$

$$G(s) = G_p(s) = \frac{5.03}{[1 + 446.41 s + 5,055.61 s^2]}$$

$$Gain_{plant} = K = \frac{5.03}{5,055.61} = 0.9949 x 10^{-3}$$

$$G_p(s) = \frac{K}{(s+p_1)(s+p_2)}$$

$$p_1 = -0.0086$$
$$p_2 = -0.0023$$

$$G_p(s) = \frac{0.994x10^{-3}}{(s+0.0086)(s+0.0023)} \qquad (6.2)$$

6.3.2 การหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโดยวิธี Root Locus

จากเนื้อหาและทฤษฎีในบทที่ 4 การออกแบบตัวควบด้วยวิธีทางเดินราก เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ในสมการที่ (4.47)

$$G_c = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} = K_p(1 + \frac{K_i}{K_p s} + \frac{K_d}{K_p} s)$$

โดยที่

$$K_d = K_c$$
$$K_p = K_c(z_{c1} + z_{c2})$$
$$K_i = K_c z_{c1} z_{c2}$$

และเราสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมของเดลต้าวีได้ดังนี้

$Gain = K_p$ = อัตราขยายของตัวควบคุม

$\text{Re}set = \frac{K_p}{K_i}$ = ค่าเวลารีเซ็ต (Reset timer) มีหน่วยเป็น วินาที

$Rate = \frac{K_d}{K_p}$ = ค่าเวลาดีลิวีทีฟ (Derivative timer) มีหน่วยเป็น วินาที

จากขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมในหัวข้อที่ 4.4 โดยเรามีเงื่อนไขในการออกแบบตัวควบคุมนี้ ซึ่งเราจะกำหนดผลตอบสนองของสภาวะชั่วครู่ซึ่งอธิบายได้ในรูปของค่าพุ่งเกิน (Percent Overshoot P.O.) และที่สภาวะคงตัวที่ซึ่งอธิบายได้ในรูปของค่าเวลาเข้าที่ (Settling time t_s) มีหน่วยเป็นวินาที

ในการออกแบบตัวควบคุมในการทดลองครั้งนี้เรากำหนดค่าในโปรแกรมให้ค่า Percent Overshoot เป็น 5 % และ กำหนด Setting Time เป็น 300 วินาที

$P.O. = 5$

$ts = 300$

หาตำแหน่งของโพลโดดเด่น (Dominant closed-loop poles) s_d จาก $P.O. = 5\%$ ที่ให้มา ทำให้รู้ ς ตามหัวข้อที่ 4.4.2 และจากสมการที่ (4.37) หา ค่าอัตราการหน่วง ς

$$\varsigma = \sqrt{\frac{\left[\ln P.O. - \ln 100\right]^2}{\pi^2 + \left[\ln P.O. - \ln 100\right]^2}} = \sqrt{\frac{\left[\ln 5 - \ln 100\right]^2}{\pi^2 + \left[\ln 5 - \ln 100\right]^2}} = \sqrt{\frac{\left[1.6094 - 4.6051\right]^2}{3.14^2 + \left[1.6094 - 4.6051\right]^2}}$$

$$\varsigma = 0.6902$$

จาก ค่าเวลาเข้าที่ (Settling time t_s) เท่ากับ 300 วินาที เราสามารถหาความถี่ธรรมชาติจาก ได้ จากสมการที่ (4.39) และ (4.38) จะได้

$$\omega_n = 4/\varsigma ts$$

$$\omega_n = \frac{4}{0.6902x300} = 0.0193$$

จากสมการที่ (4.40) ทำการหาค่าจุด s_d ทั้งสองจุดที่ทางเดินรากผ่าน

$$s_d = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2} = -0.6902x0.0193 \pm j0.0193\sqrt{1-0.6902^2}$$

$$s_{d1} = -0.0133 - j0.014$$

$$s_{d2} = -0.0133 + j0.014$$

จากค่าของ ζ, ω_n และ s_d ที่หาได้จะใช้ในการออกแบบตัวควบคุม และจากเงื่อนไขของมุมในวิธีทางเดินราก รากของสมการคุณสมบัติจะอยู่ที่จุด s_d จะได้ต้องสอดคล้องกันกับเงื่อนไขของมุมจากสมการที่ (4.29)

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

จากการออกแบบตัวควบจากสมการที่ (4.41) และสมการที่ (4.29)

$$G = Gp \bullet G_c = \frac{K_c(s+z_{c1})(s+z_{c2})}{s} \bullet \frac{K}{(s+p_1)(s+p_2)}$$

$$= \frac{K_c K(s+z_{c1})(s+z_{c2})}{s(s+p_1)(s+p_2)}$$

$$= \pm 180^\circ \text{ ที่ } k = 0$$

สิ่งที่จะต้องหาก็คือ เราจะต้องวาง (Place) ซีโร่ (zeros) ทั้งสองตัวนี้ของตัวควบคุม z_{c1} และ z_{c2} ตรงตำแหน่งไหน บนระนาบ S (S-Plane) โดยใช้เทคนิคโลกัสของราก ซึ่งเราจะทำการหาตำแหน่งของ Zeros โดยทำการหามุมของ z_c โดยกำหนด z_{c1} หรือ z_{c2} ให้อยู่ทางซ้ายของโพล (p_1 และ p_2) ที่อยู่ทางด้านซ้ายสุดให้มีค่าใกล้เคียงกับ (p_1 และ p_2) โดยเพิ่มค่าตำแหน่งขึ้นไปเล็กน้อยที่ 0.005 จะได้

$$z_{c2} = p_1 + (-0.005)$$
$$z_{c2} = -0.091$$

หลังจากนั้นทำการหาตำแหน่งของ Zeros อีกตัวจากสมการที่ (4.42), (4.43) และ (4.44)

$$\begin{aligned}\arctan\left(\frac{\mathrm{Im}(s_d)}{\mathrm{Re}(s_d+z_{c1})}\right) = &-\left\{\frac{180}{\pi}(\arctan\left(\frac{\mathrm{Im}(s_d)}{\mathrm{Re}(s_d+z_{c2})}\right)-180\right\}\\ &+\left\{\frac{180}{\pi}(\arctan\left(\frac{\mathrm{Im}(s_d)}{\mathrm{Re}(s_d)}\right)-180\right\}\\ &+\left\{\frac{180}{\pi}(\arctan\left(\frac{\mathrm{Im}(s_d)}{\mathrm{Re}(s_d+p_1)}\right)-180\right\}\\ &+\left\{\frac{180}{\pi}(\arctan\left(\frac{\mathrm{Im}(s_d)}{\mathrm{Re}(s_d+p_2)}\right)-180\right\}\\ &+180\end{aligned}$$

จะได้

$$\begin{aligned}\arctan\left(\frac{\mathrm{Im}(s_d)}{\mathrm{Re}(s_d+z_{c1})}\right) = &-\left\{\frac{180}{\pi}(\arctan\left(\frac{\mathrm{Im}(0.014)}{\mathrm{Re}(-0.0133-0.091)}\right)-180\right\}\\ &+\left\{\frac{180}{\pi}(\arctan\left(\frac{\mathrm{Im}(0.014)}{\mathrm{Re}(-0.0133)}\right)-180\right\}\\ &+\left\{\frac{180}{\pi}(\arctan\left(\frac{\mathrm{Im}(0.014)}{\mathrm{Re}(-0.0133-0.086)}\right)-180\right\}\\ &+\left\{\frac{180}{\pi}(\arctan\left(\frac{\mathrm{Im}(0.014)}{\mathrm{Re}(-0.0133-0.0023)}\right)-180\right\}\\ &+180\end{aligned}$$

จะได้

$$\theta_{c1} = 82.6$$
$$z_{c1} = -0.0151$$

จากสมการที่ (4.45) และ (4.46)

$$1+G_c(s)G_p(s)=\frac{K_cK\left(s+z_{c1}\right)\left(s+z_{c2}\right)}{s\left(s+p_1\right)\left(s+p_2\right)}=0=F(s)$$

$$\left|G_c(s)G_p(s)\right|=\left|\frac{K_cK\left(s_d+z_{c1}\right)\left(s_d+z_{c2}\right)}{s_d\left(s_d+p_1\right)\left(s_d+p_2\right)}\right|=\left|-1\right|$$

จะได้

$$K_c=\frac{\left|s_d\right|\left|s_d+p_1\right|\left|s_d+p_2\right|}{K\left|s_d+z_{c1}\right|\left|s_d+z_{c2}\right|}$$

$$K_c=\frac{\left|\sqrt{\mathrm{Re}(s_d)^2+\mathrm{Im}(s_d)^2}\right|\left|\sqrt{\mathrm{Re}(s_d+p_1)^2+\mathrm{Im}(s_d)^2}\right|\left|\sqrt{\mathrm{Re}(s_d+p_2)^2+\mathrm{Im}(s_d)^2}\right|}{K\left|\sqrt{\mathrm{Re}(s_d+z_{c1})^2+\mathrm{Im}(s_d)^2}\right|\left|\sqrt{\mathrm{Re}(s_d+z_{c2})^2+\mathrm{Im}(s_d)^2}\right|}$$

$$K_c=\frac{\left|\sqrt{\mathrm{Re}(0.0133)^2+\mathrm{Im}(0.014)^2}\right|\left|\sqrt{\mathrm{Re}(0.0133+0.086)^2+\mathrm{Im}(0.014)^2}\right|\left|\sqrt{\mathrm{Re}(0.0133+0.0023)^2+\mathrm{Im}(0.014)^2}\right|}{0.9949x10^{-3}\left|\sqrt{\mathrm{Re}(0.0133+0.0151)^2+\mathrm{Im}(0.014)^2}\right|\left|\sqrt{\mathrm{Re}(0.0133+0.091)^2+\mathrm{Im}(0.014)^2}\right|}$$

$$K_c=21.2197$$

หลังจากนั้นจะได้ ค่าพารามิเตอร์ของตัว PID จากสมการที่ (4.47)

$$G_c=\frac{K_c\left(s+z_{c1}\right)\left(s+z_{c2}\right)}{s}$$

$$=\frac{K_cs^2+K_c\left(z_{c1}+z_{c2}\right)s+K_cz_{c1}z_{c2}}{s}$$

$$=\frac{K_ds^2+K_ps+K_i}{s}$$

โดยที่

$$K_d=K_c=21.2197$$

$$K_p=K_c\left(z_{c1}+z_{c2}\right)=21.2197x(0.0151+0.091)=2.2525$$

$$K_i=K_cz_{c1}z_{c2}=21.2197x0.0151x0.091=0.0293$$

ดังนั้น ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมของเคลต้าวีจูนจะได้

$$Gain=K_p=2.2525$$

$$\text{Re}set = \frac{K_p}{K_i} = \frac{2.2525}{0.0293} = 76.88 \text{ วินาที}$$

$$Rate = \frac{K_d}{K_p} = \frac{21.2197}{2.2525} = 9.42 \text{ วินาที}$$

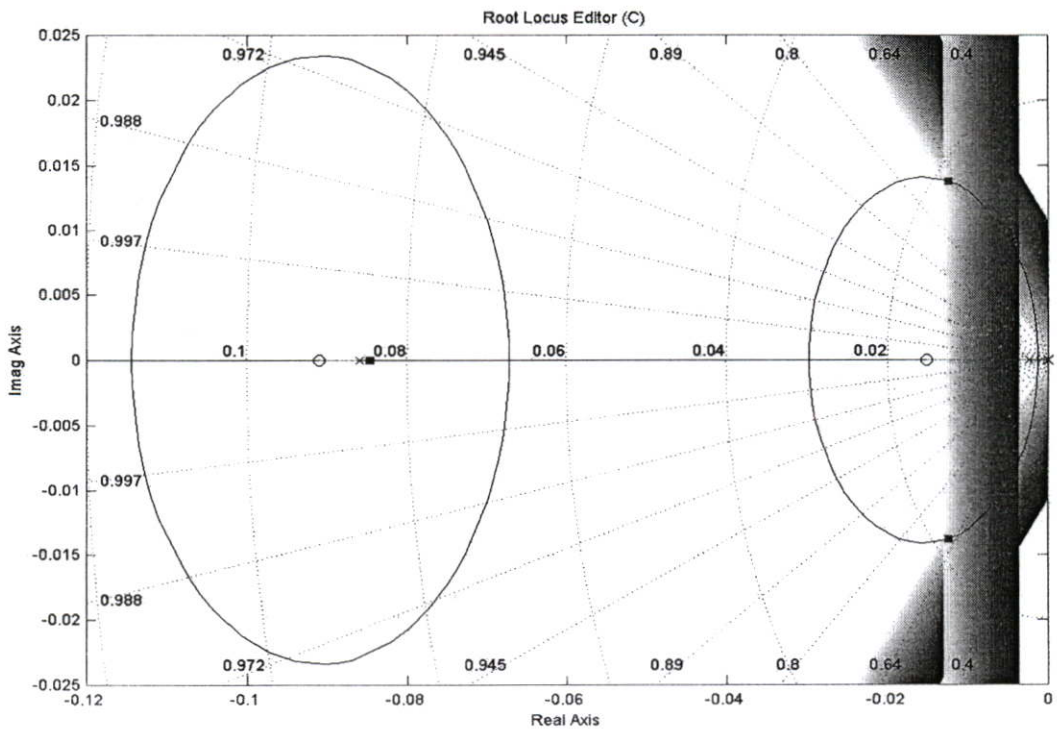
ตัวควบคุมไปข้างหน้าของระบบเคลต้าวีสามารถเขียนในรูปแบบฟังก์ชันถ่ายโอนจะได้

$G_l = \frac{1}{Tls+1}$ เมื่อ T_l คือเวลามีหน่วยเป็น วินาที

และจากสมการที่ (4.48) เราสามารถหาค่า T_l ของตัวควบคุมไปข้างหน้าในระบบเคลต้าวีได้

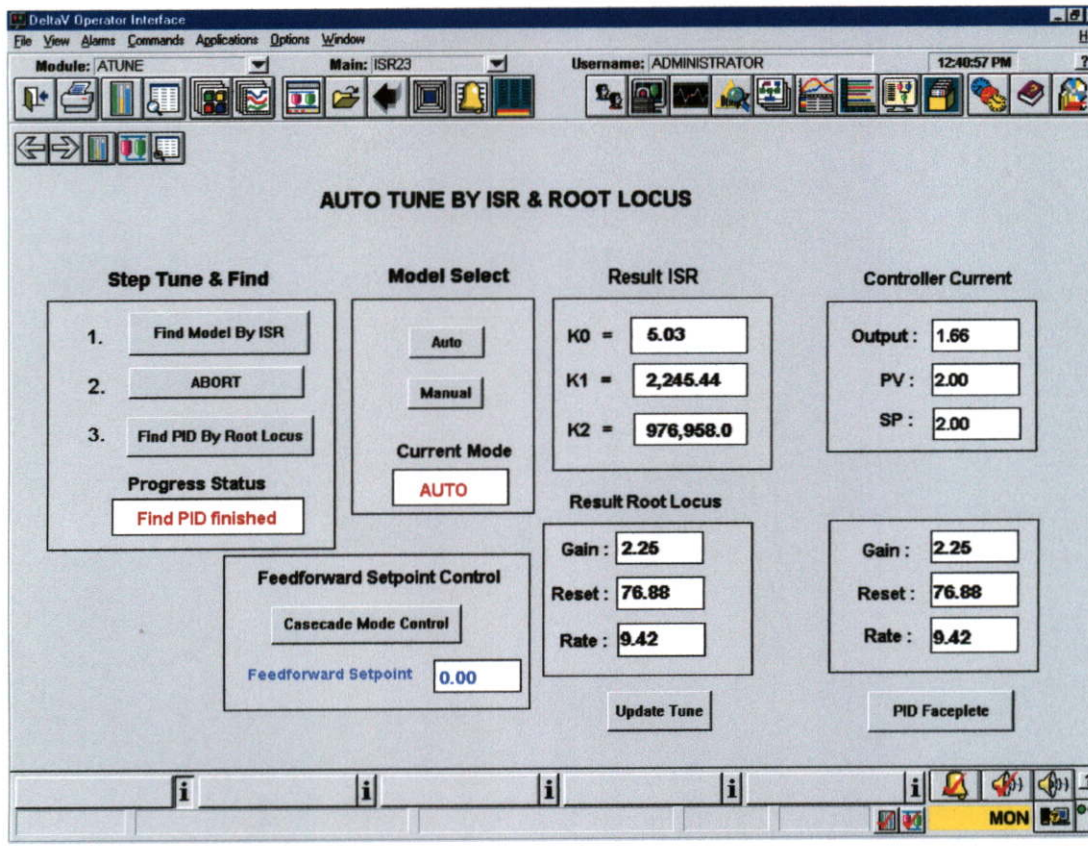
$$T_l = \frac{1}{Z_{cl}} = \frac{1}{0.0151} = 66.22 \text{ วินาที}$$

เราสามารถวาดทางเดินรากได้ดังรูปที่ 6.16 ซึ่งแสดงทางเดินรากของระบบ

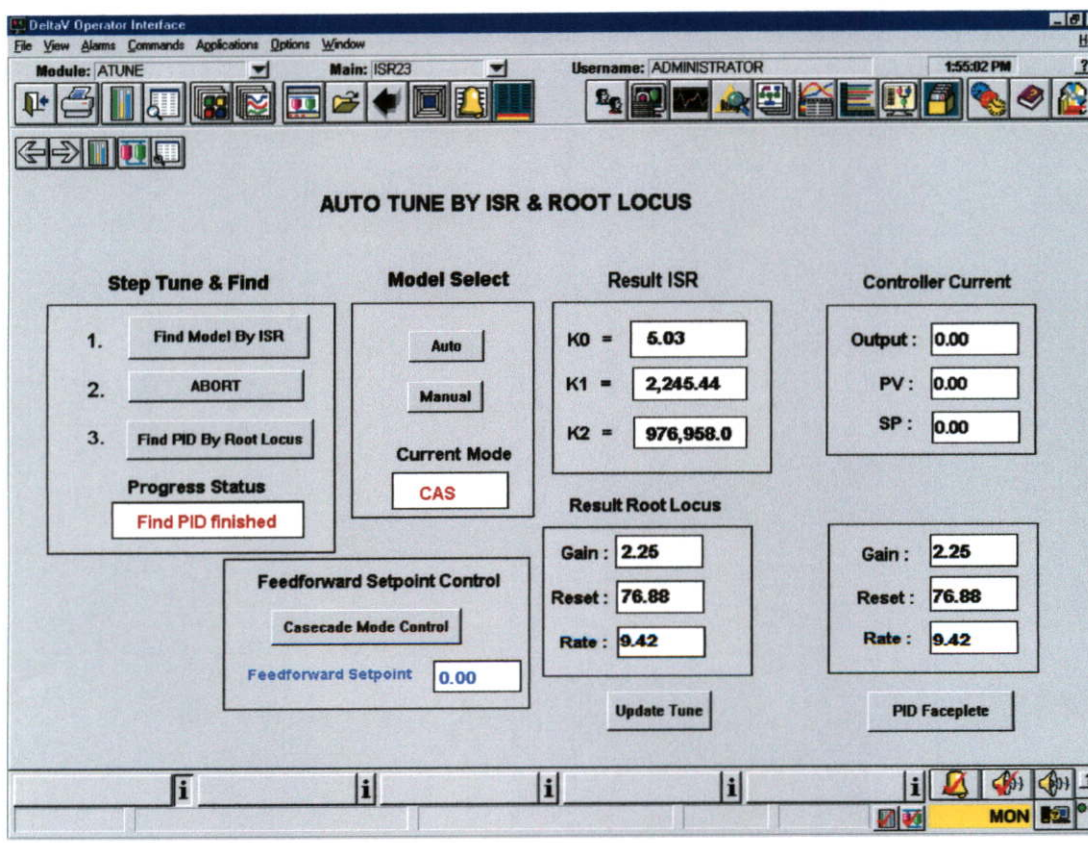


รูปที่ 6.16 แสดงทางเดินรากของระบบ

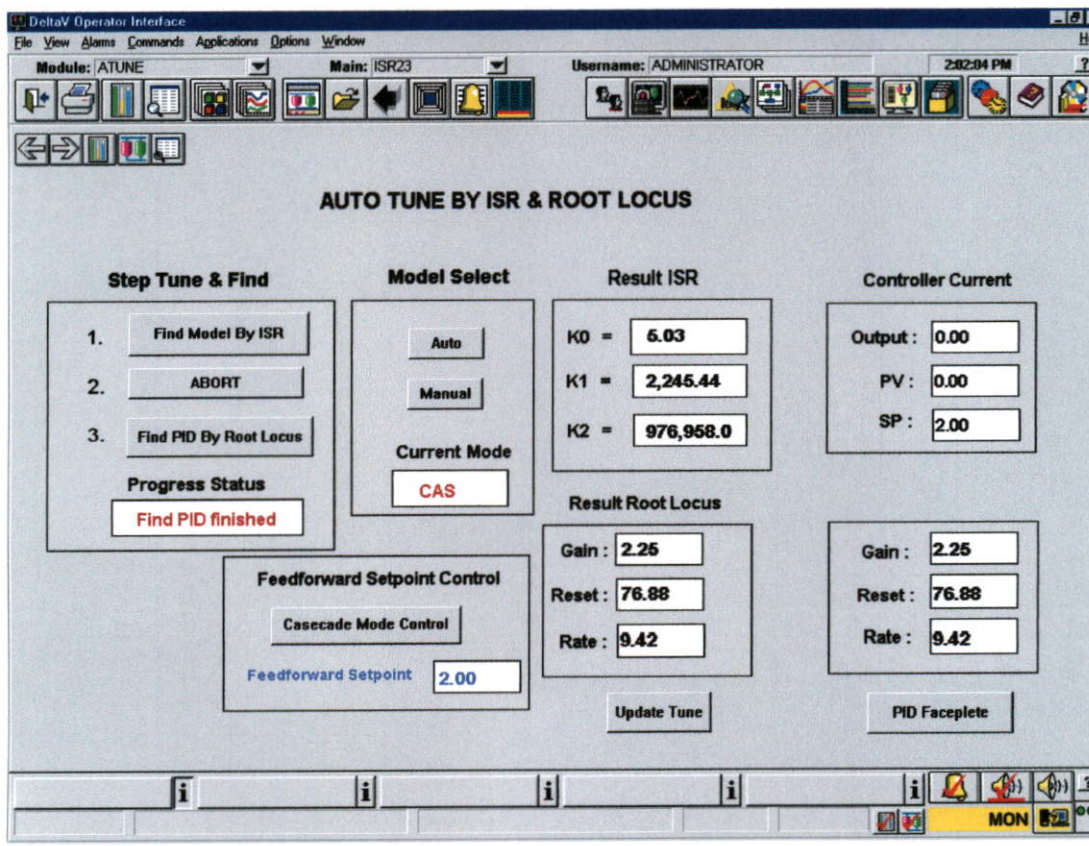
ดูไปแล้ว ทางเดินราก ก็เป็นไปตามทฤษฎี กล่าวคือ จุดทำงาน หรือจุด S_d อยู่บนทางเดินราก จากที่เรารู้ว่าทางเดินของราก เริ่มต้นที่โพลของ $G(s)H(s)$ และสิ้นสุดที่ ซีโร่ ของ $G(s)H(s)$ เมื่อ พารามิเตอร์ $K \to \infty$



รูปที่ 6.17 การปรับปรุงค่า PID ให้กับตัวควบคุม



รูปที่ 6.18 การเปลี่ยนโหมดตัวควบคุมให้เป็น CASCADE



รูปที่ 6.19 ปรับค่าเป้าหมายไปจาก 0 ที่ 2 ที่โหมดตัวควบคุมแบบ CASCADE

ทำการทดลองโดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายให้กับตัวควบคุมไปข้างหน้าซึ่งค่าสัญญาณเอาท์พุตของตัวควบคุมไปข้างหน้าจะเป็นค่าเป้าหมายของตัวควบคุม ทำการทดลองโดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมายให้กับตัวควบคุมไปข้างหน้าที่ละค่า ดังแสดงในตารางที่ 6.3

โดยที่

Previous SP = คือค่าค่าจุดปรับตั้ง หรือค่าเป้าหมาย ของของตัวควบคุมไปข้างหน้าก่อนที่มีการเปลี่ยนค่าปรบตั้ง

New SP = คือค่าจุดปรับตั้ง หรือค่าเป้าหมาย ของของตัวควบคุมไปข้างหน้าที่เป็นค่าที่ปรับตั้งใหม่

เวลาเข้าที่เป้าหมาย = คือเวลาที่ปรับตั้ง (Settling time t_s) ของเวลาเข้าสู่ค่า SP

เวลาเข้าที่จริง = คือเวลาเข้าสู่ค่า SP จริงของกระบวนการโดยไม่มีการแกว่งของกระบวนการ

รูปที่ = ผลของการทดลองที่แสดงในรูปแบบเส้นกราฟ

ตารางที่ 6.3 ผลการทดลองโดยการเปลี่ยนค่าเป้าหมาย โดยวิธี ISR และ Root Locus

หัวข้อ	รายละเอียดการทดลอง	Previous SP	New SP	เวลาเข้าที่เป้าหมาย (นาที)	เวลาข้าที่จริง (นาที)	รูปที่
1	ทำการเปลี่ยนค่า เป้าหมาย	0	2	5	3.30	6.20
2	ทำการเปลี่ยนค่า เป้าหมาย	2	4	5	3.35	6.21
3	ทำการเปลี่ยนค่า เป้าหมาย	4	6	5	3.35	6.22
4	ทำการเปลี่ยนค่า เป้าหมาย	6	4	5	2.30	6.23
5	ทำการเปลี่ยนค่า เป้าหมาย	4	10	5	3.50	6.24
6	ทำการเปลี่ยนค่า เป้าหมาย	4	6	3	2.80	6.26
7	ทำการเปลี่ยนค่า เป้าหมาย	6	4	3	2.40	6.27

โดยที่กราฟแสดงการทำงานของโปรแกรม เดลต้าวีจูน ซึ่งกราฟแต่ละเส้นประกอบด้วย

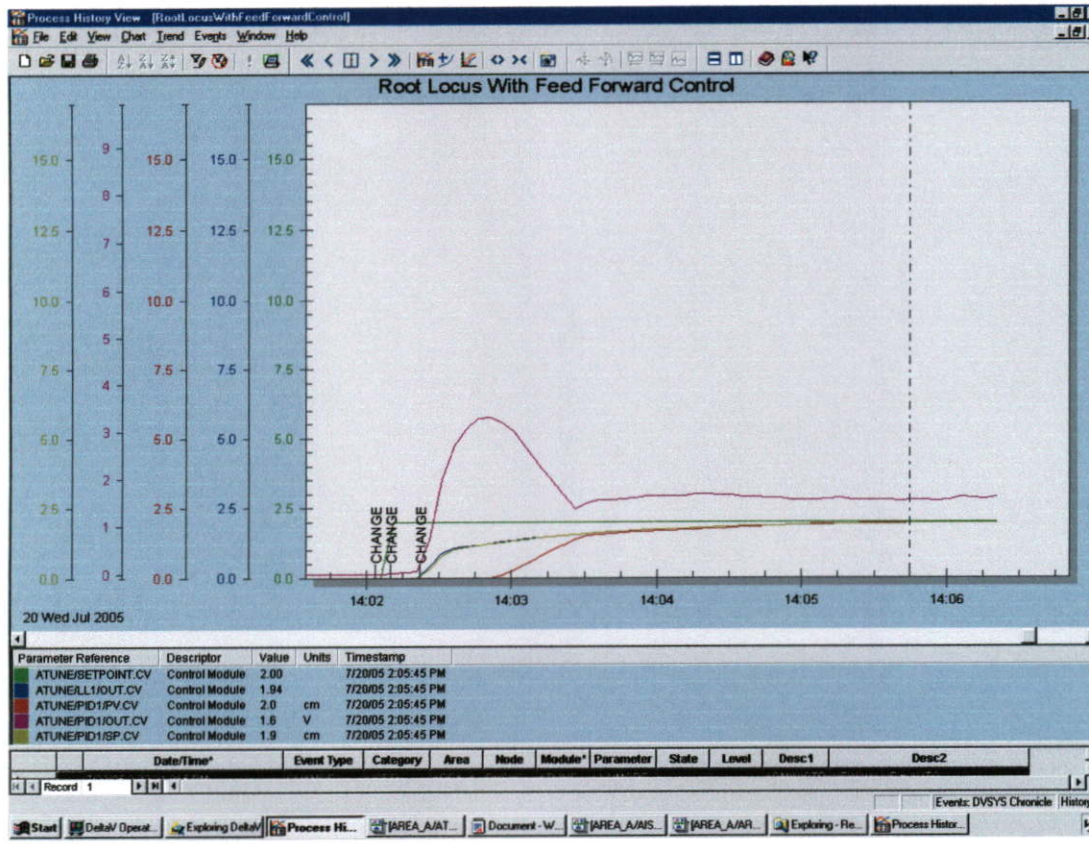
ATUNE/SETPOINT.CV = ค่าจุดปรับตั้งของตัวควบคุมไปข้างหน้า แสดงโดยเส้นสีเขียว

ATUNE/LL1/OUT.CV= ค่าสัญญาณเอาท์พุตของตัวควบคุมไปข้างหน้าที่เป็นค่าค่าจุดปรับตั้งของตัวควบคุม แสดงโดยเส้นสีน้ำเงิน

ATUNE/PID1/PV.CV = ค่าสัญญาณตัวแปรกระบวนการ แสดงโดยเส้นสีแดง

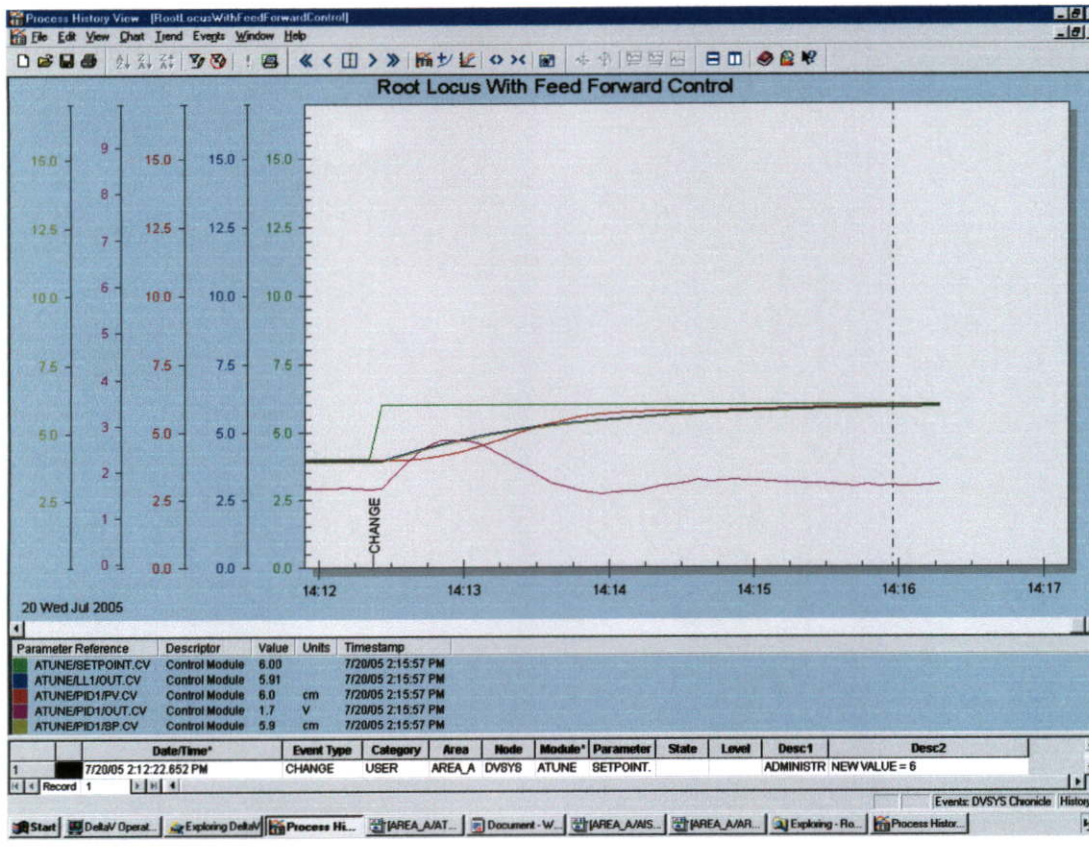
ATUNE/PID1/SP.CV = ค่าจุดปรับตั้ง ของตัวควบคุม แสดงโดยเส้นสีเหลือง ซึ่งไม่มีการใช้งานในกรณีของระบบ ISR & Root Locus

ATUNE/PID1/OUT.CV= ค่าสัญญาณตัวแปรปรับกระบวนการ แสดงโดยเส้นสีชมพู

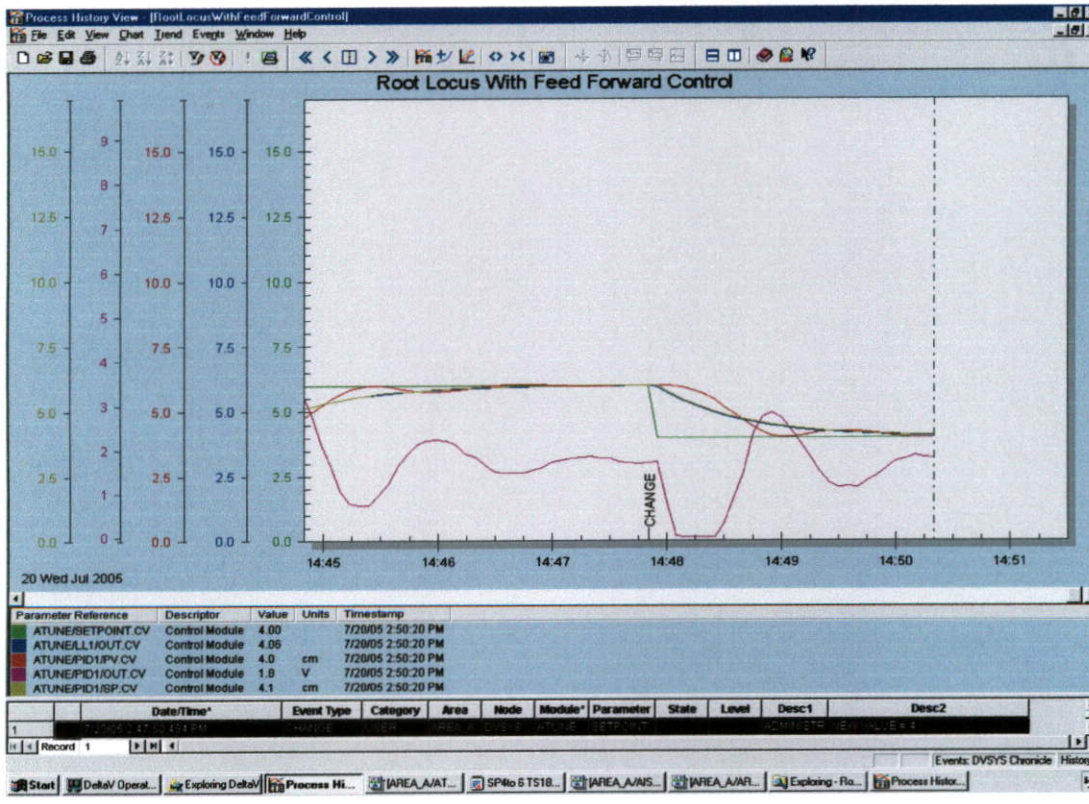


รูปที่ 6.20 กราฟแสดงผลของการปรับค่าเป้าหมายจาก 0ไปที่ 2

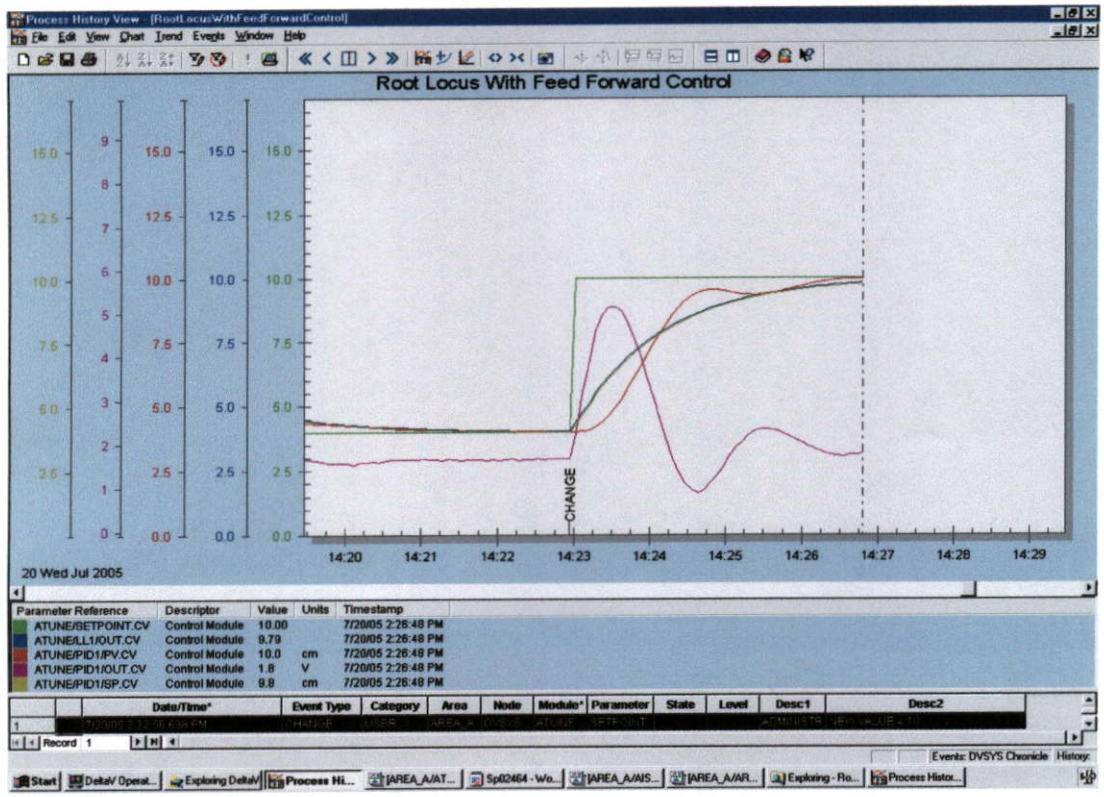
รูปที่ 6.21 กราฟแสดงผลของการปรับค่าเป้าหมายจาก 2ไปที่ 4



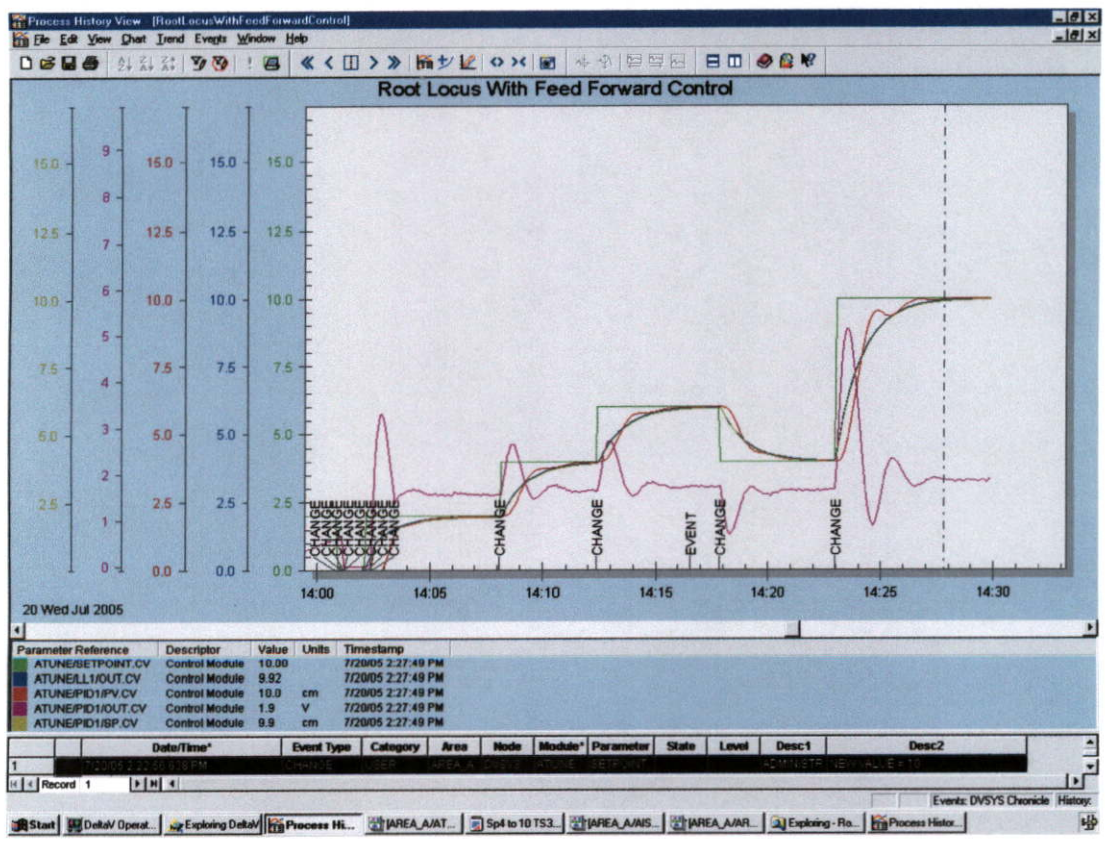
รูปที่ 6.22 กราฟแสดงผลของการปรับค่าเป้าหมายจาก 4 ไปที่ 6



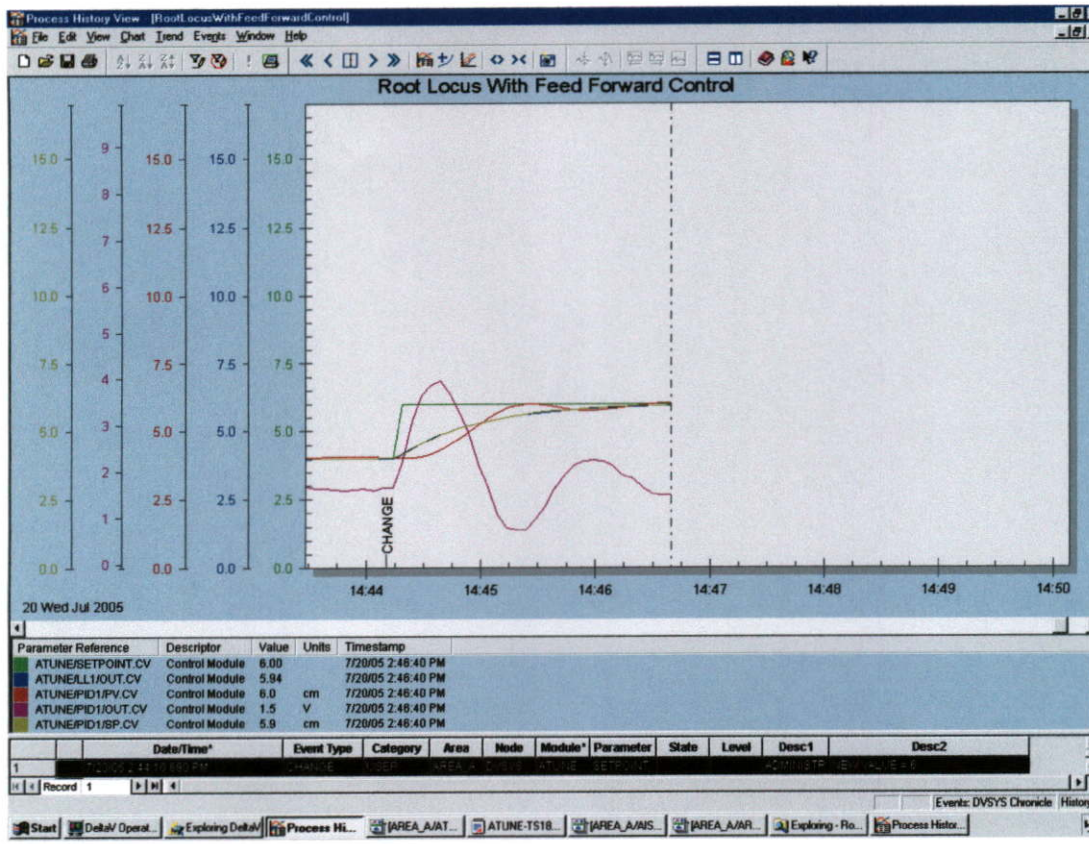
รูปที่ 6.23 กราฟแสดงผลของการปรับค่าเป้าหมายจาก 6 ไปที่ 4



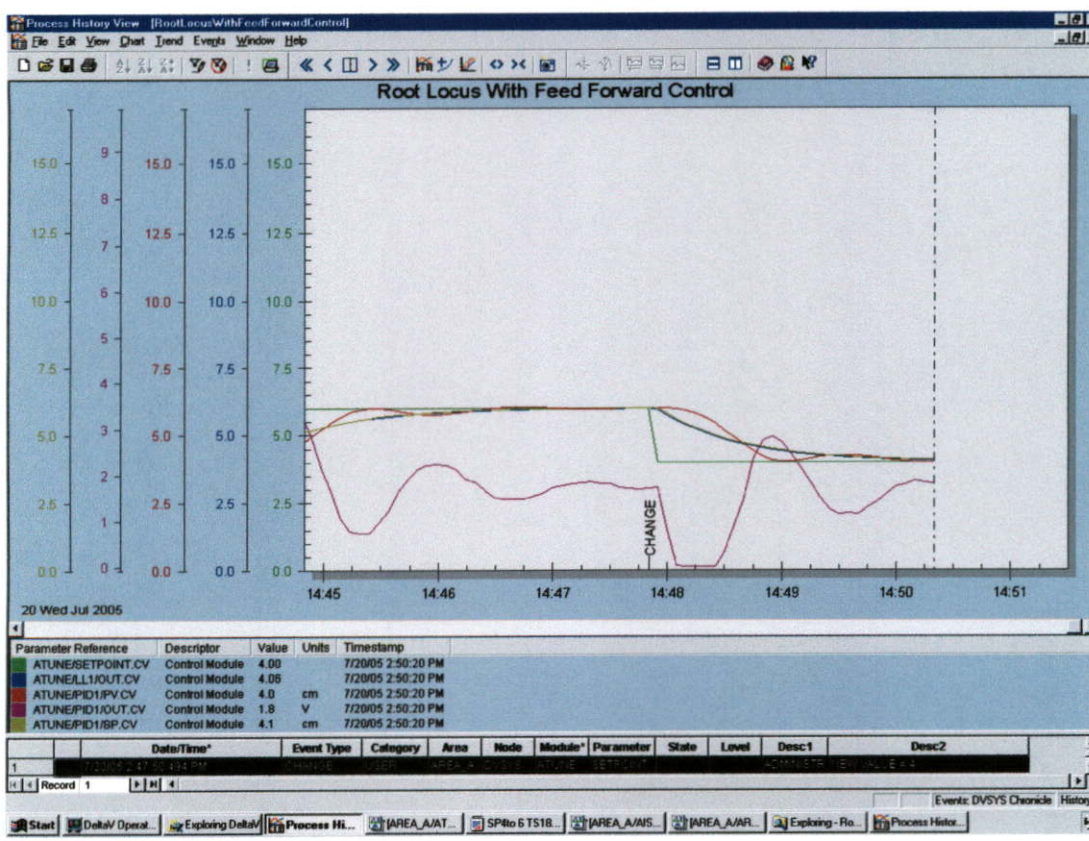
รูปที่ 6.24 กราฟแสดงผลของการปรับค่าเป้าหมายจาก 4 ไปที่ 10



รูปที่ 6.25 กราฟแสดงผลของการปรับค่าเป้าหมายรวม



รูปที่ 6.26 กราฟแสดงผลของการปรับค่าเป้าหมายจาก 4 ไป 6 ที่ค่าเวลาเข้าที่ 180

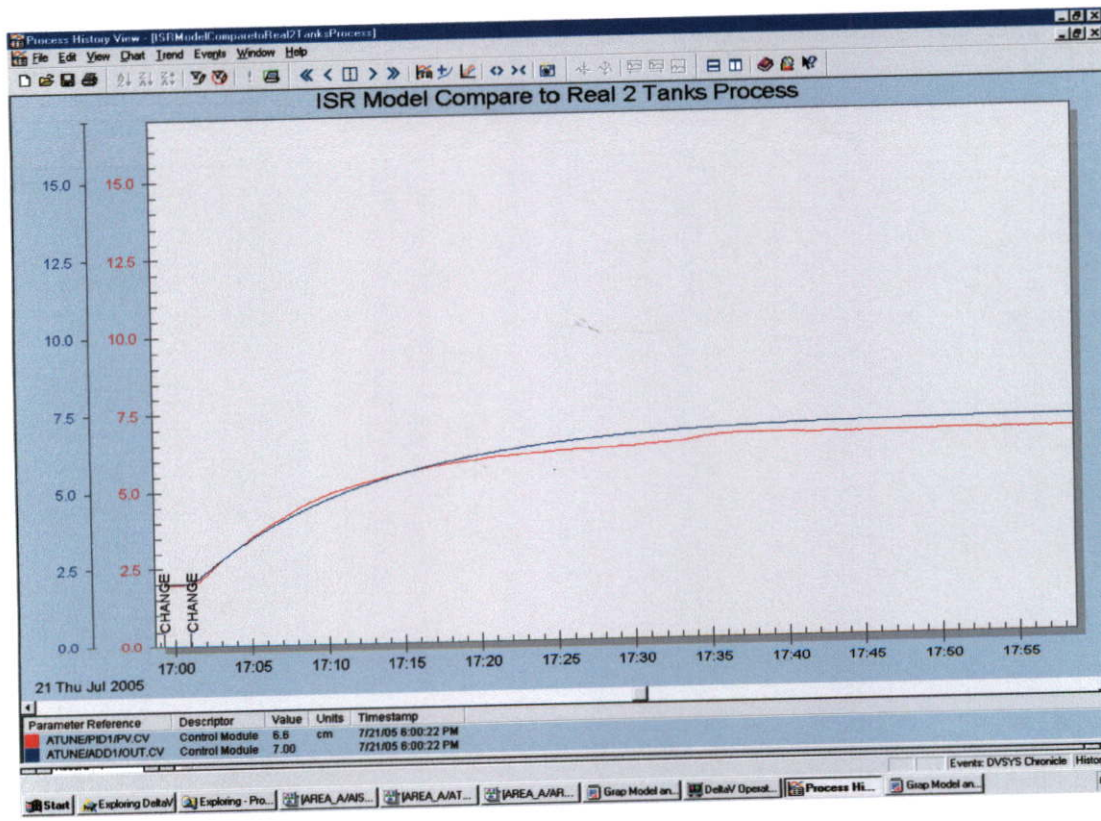


รูปที่ 6.27 กราฟแสดงผลของการปรับค่าเป้าหมายจาก 6 ไป 4 ที่ค่าเวลาเข้าที่ 180

จากผลการทดลองการหาค่าพารามิเตอร์ของ PID นั้นตามเงื่อนไขที่กำหนด ที่มีค่าพุ่งเกินไม่เกิน 5% และเวลาเข้าที่ ที่เวลา 300 วินาที และค่าเวลาเข้าที่ ที่เวลา 180 วินาที จากผลการทดลองกระบวนการเป็นไปตามเงื่อนไขและเร็วกว่าค่าที่ตั้งในบางค่าปรับตั้ง ในการเข้าสู่เป้าหมายแบบมีระบบเสถียรและมีค่าพุ่งเกินไม่เกิน 5% ซึ่งเมื่อพิจารณาผลการทดลองในตารางที่ 6.2 ของเคลต้าวีจูน และตารางที่ 6.3 ของ ISR & Root Locus แสดงให้เห็นว่า การหาพารามิเตอร์โดยวิธีของ ISR & Root Locus ให้ผลที่ดีกว่าระบบเคลต้าวีจูนและระบบ ISR & Root Locus ยังสามารถปรับตั้งค่าเวลาเข้าที่และค่าพุ่งเกินของตัวแปรกระบวนการได้

6.4 การเปรียบเทียบแบบจำลองที่ได้จากวิธี ISR และกระบวนการจริง

จากผลการทดลองที่ผ่านมาในนั้นพิสูจน์ได้ว่าการหากระบวนการจำลองจากวิธี ISR นั้นนำมาหาค่าได้ค่าการควบคุมด้วยวิธี Root Locus ได้ผลตามเงื่อนไข เพื่อเป็นการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์จากระบบ ISR นั้นมีค่าใกล้เคียงกับกระบวนการจริง เราทำการเปรียบเทียบแบบจำลองของกรบวนการกับกระบวนการจริงดังรูปที่ 28 จะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่เมื่อเวลานานไป gain ของปั้มมีค่าผิดพลาดบ้างทำให้กราฟไม่ทับกันอย่างสนิท เส้นสีแดงเป็นค่า Process variable จริงจากกระบวนการ ส่วนสีน้ำเงินเป็นค่า Process variable ที่ได้จากแบบจำลองของกระบวนการ



รูปที่ 6.28 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดระหว่างแบบจำลองที่ได้จากวิธี ISR และกระบวนการจริง

6.5 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลงทั้งสองเปรียบเทียบกัน จะเห็นได้ชัดว่าการทำงานของวิทยานิพนธ์ นี้ได้ผลตอบสนองของกระบวนการเป็นไปตามเงื่อนไข โดยที่ระบบไม่มีการแกว่งและเข้าสู่เป้าหมายได้เร็วกว่า นั้นหมายความว่า การหาแบบจำลองของกระบวนการโดยวิธี ISR และหาค่าพารามิเตอร์ในการปรับตัวควบคุมโดยวิธี Root Locus นั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับระบบควบคุม DCS ได้เป็นอย่างดี

บทที่ 7
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 บทสรุป

ในบทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติ โดยใช้วิธีอินทิกรัลผลตอบสนองในการหาแบบจำลองของกระบวนการ โดยจากการจำลองทำการหาแบบจำลองของกระบวนการด้วยโปรแกรมเดลต้าวี หลังจากนั้นเอาแบบจำลองของกระบวนการไปหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โดยมีเงื่อนไขตามที่เรากำหนดที่มีค่าเปอร์เซ็นของค่าพุ่งเกินและเวลาเข้าที่เข้าเข้าที่ที่ต้องการ เราจะได้ค่า GAIN, RESET และ RATE ตามเงื่อนไขดังกล่าว และนำค่านั้นประยุกต์ใช้กับตัวควบคุม

ในทำนองเดียวกันเราจะหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยระบบเดลต้าวีจูนโดยวิธีรีเลย์แล้ว ซึ่งเราไม่สามารถกำหนดค่าเงื่อนไขได้ ตัวโปรแกรมจะทำการหาค่าพารามิเตอร์ด้วยตัวเอง ซึ่งจะได้ค่า GAIN, RESET และ RATE

หลังจากนั้นนำผลการทดลองทั้งสองมาปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ที่มีเงื่อนไขต่างๆ เหมือนกันและมีค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้เหมือนกัน เราจะพบว่าการทำงานของระบบที่หาค่าพารามิเตอร์โดยวิธีตามวิทยานิพนธ์นี้ให้ผลตามเงื่อนไข โดยมีค่าได้ตามต้องการและมีค่าเกินเพียงเล็กน้อยและมีเวลาเข้าที่สู่ค่าเป้าหมายอย่างเสถียรและไม่ค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัว ในทำนองเดียวกัน ในทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณาผลตอบสนองและผลที่ได้รับจากการใช้ระบบเดลต้าวีจูนที่เป็นระบบควบคุมในวงการอุตสาหกรรม จะเห็นการเข้าสู่ค่าเป้าหมายนั้นช้ากว่าและมีค่าพุ่งเกินที่มากกว่าและไม่สามารถกำหนดเวลาเข้าที่ของกระบวนการได้

7.2 ปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางแก้ปัญหา

1 การทดลองติดต่อกันเป็นเวลานาน มีผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของปั้มน้ำต่ำลงเป็นผลให้ อัตราการไหลเข้าของน้ำลดลงอันเนื่องมาจากค่ากำลังของปั้มตกลงนั้นเอง แนวทางแก้ไขคือ ควรออกแบบการทดลองและการเก็บผลให้ใช้ระยะเวลาเหมาะสมกับความสามารถของตัวอุปกรณ์หรือเปลี่ยนตัวปั้มน้ำให้มีประสิทิภาพสูงกว่านี้

2. การหาแบบจำลองของกระบวนการด้วย ISR นั้นมีข้อจำกัดในเรื่องการใช้เวลาในการหาค่าพารามิเตอร์แบบจำลองของกระบวนการและ แนวทางแก้ไขปัญหานี้คือการหาวิธีในการหาแบบจำลองของกระบวนการใหม่ในวิธีที่แตกต่างออกไปที่สามารถลดเวลาในการหาค่าพารามิเตอร์ลงได้

7.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการทางเดินราก (Root Locus) ที่หาค่าพารามิเตอร์ PID มาจากแบบจำลองของกระบวนการโดยวิธี ISR สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับระบบควบคุมทางอุตสาหกรรมได้จริง และให้ผลที่ดีตามเงื่อนไขที่ต้องการและเหมาะกับกระบวนการที่ต้องการหาค่าแบบจำลองของกระบวนการเพื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการจริงที่ได้จากการคำนวณ อย่างไร การหาแบบจำลองของกระบวนการด้วยวิธี ISR นั้นอย่างมีการสูญเสียพลังงงานที่สูงอยู่และใช้เวลาในการหาค่าพารามิเตอร์ที่นาน แต่การออกแบบการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโดยวิธี Root Locus นั้นเป็นวิธีที่สามารถกำหนดค่าเข้าที่และค่าพุงเกินตามต้องการได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับแบบจำลองกระบวนการที่หามาได้โดยวิธีใหม่ๆ ที่มีประสิทธิภาพที่สูงกว่าระบบ ISR

บรรณานุกรม

[1] L, Ljung, *System Identification Theory for the User*, Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall 1987

[2] J.G. Ziegler and N.B. Nichols, "Optimum settings for automatic controllers", Trans. ASME, vol.65, 1943, pp.433-444

[3] K.J. Astrom and T. Hagglund, "Automatic tuning of simple regulators", Proceeding of IFAC 9th World Congr., Budapest, Hungary, 1984, 1867-1872

[4] J. Dorsey, *Continuous and Discrete Control Systems*, McGraw Hill, 2002 of KACC control 15th, Korea, October 2000

[5] Numsomran A.,"2-DOF Control System Designed by Root Locus Technique", Proceeding

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

[7] Carlos A. Smith, Ph.D.,P.E, University of South Florida, Armando B. Corripio, Ph.D., P.E., Louisiana State University, **"Principles and Practice of Automatic Process Control", Second** Edition, John Wiley & Sons, Inc.

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

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

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

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

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

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

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

Company, 1958.

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

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

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

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

รายละเอียดของอุปกรณ์และวงจรที่ใช้ในการทดลอง

ในการควบคุมการทำงานของกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันเพื่อให้สามารถทำงานได้ตามที่ต้องการนั้นต้องใช้อุปกรณ์ต่างๆมาประกอบเข้าด้วยกัน ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนั้นสามารถแบ่งเป็น 5ส่วนด้วยกัน ซึ่งประกอบด้วย

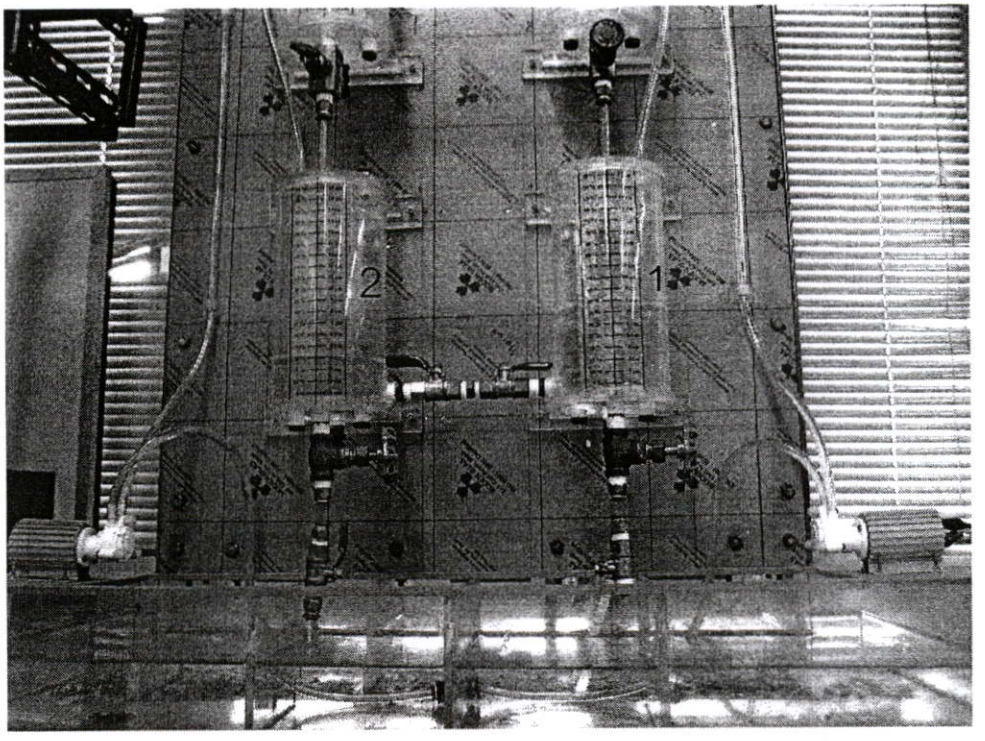
1. กระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน
2. อุปกรณ์วัดระดับน้ำ (Differential Pressure Transmitter)
3. ปั๊มน้ำ
4. วงจรออปแอมป์ (Operation Amplifier) ที่ใช้ขับมอเตอร์ (Drive Motor)
5. ระบบ DeltaV ทั้ง Hardware และ Software

โดยรายละเอียดของอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองนั้นสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

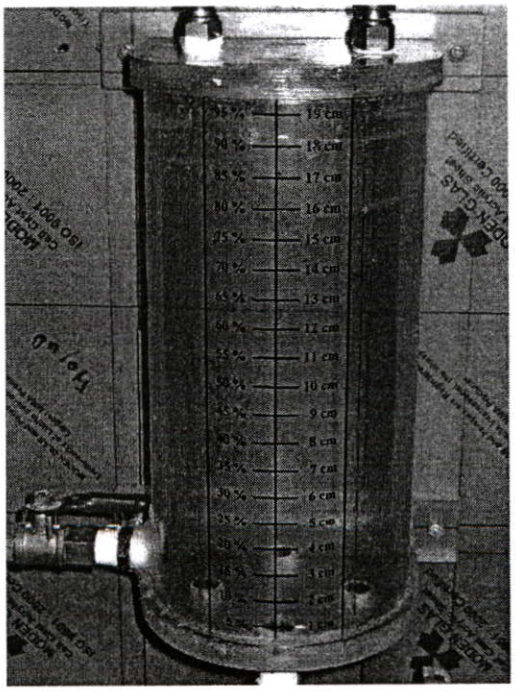
ก.1 กระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน

กระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันจะประกอบไปด้วยถังน้ำ 2 ใบด้วยกัน แสดงได้ดังรูปที่ ก.1 ถังน้ำแต่ละใบจะมีขนาดพื้นที่หน้าตัด 66.25 cm^2 และสูง 18.5 เซนติเมตร แสดงได้ดังรูปที่ ก.2 โดยถังใบที่ 2 จะมีวาล์วที่ใช้ในการปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำด้านออกจากถัง แสดงได้ดังรูปที่ ก.3 น้ำที่ไหลเข้าสู่ถังน้ำแต่ละใบนั้นจะถูกปั๊มขึ้นมาจากบ่อเก็บน้ำด้านล่าง ซึ่งบ่อเก็บน้ำจะมีขนาดความจุเท่ากับ 40 x 80 x 10 เซนติเมตร

โดยปั๊มน้ำทางด้านขวานั้นจะถูกใช้เพื่อจ่ายน้ำให้ถังใบที่ 1 ซึ่งอยู่ทางด้านขวามือ และน้ำจะถูกจ่ายไปยังถังใบที่ 2 ซึ่งอยู่ทางด้านซ้ายมือ โดยผ่านวาล์วที่ใช้ในการปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำด้านออกจากถังที่ 1 ไปยังถังที่ 2 แสดงดังรูป ก.4 สายยางที่ใช่ต่อกับปั๊มน้ำนั้นจะเป็นสายยางอ่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 8 มิลลิเมตร



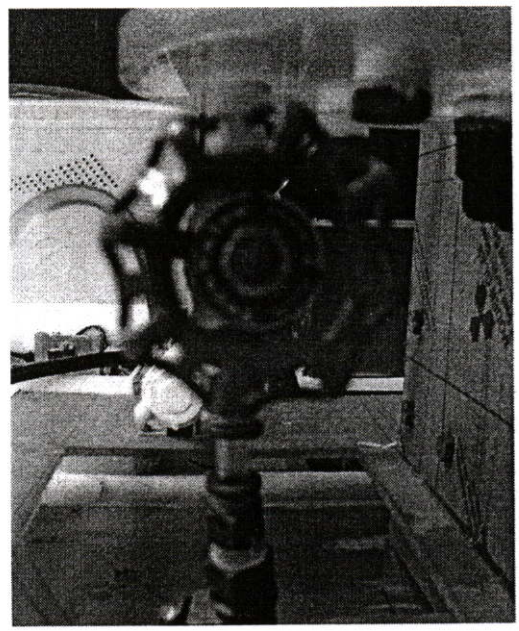
รูปที่ ก.1 กระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน



รูปที่ ก.2 ถังน้ำที่ใช้ในการทดลอง

ก.1.1 วาล์วปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำด้านออก

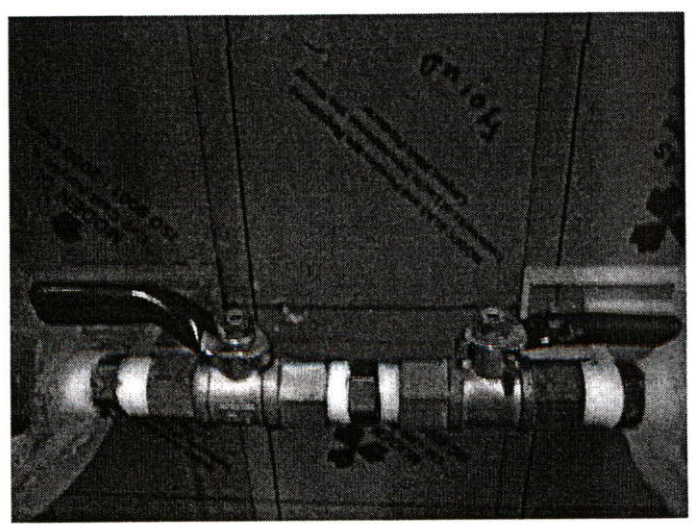
วาล์วที่ใช้ในการปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำทางด้านออกของถังใบที่ 2 แสดงได้ดังรูป ก. 3



รูปที่ ก.3 วาล์วที่ใช้ในการปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำด้านออกจากถังใบที่ 2

ก.1.2 วาล์วที่ใช้ในการปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำด้านออกจากถังที่ 1 ไปยังถังที่ 2

วาล์วที่ใช้ในการปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำทางด้านออกจากถังที่ 1 ไปยังถังที่ 2 แสดงได้ดังรูป ก. 4



รูปที่ ก. 4 วาล์วที่ใช้ในการปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำด้านออกจากถังที่ 1 ไปยังถังที่ 2

ก. 2 อุปกรณ์วัดระดับน้ำ (Differential Pressure Transmitter)

อุปกรณ์ที่ใช้วัดระดับน้ำที่เลือกใช้สำหรับกระบวนการนี้จะเลือกใช้ อุปกรณ์วัดแรงดันแบบความดันแตกต่าง (Differential Pressure Transmitter) ของ Rosemount รุ่น 3051CD Range 0-250 inH2O ค่าความแม่นยำคือ ± 0.065% of Span ใช้พาวเวอร์ซัพพลาย 0-24 VDC และ ให้เอาท์พุท 4/20 mA พร้อมกับสัญญาณดิจิตอล HART รูปของอุปกรณ์วัดระดับน้ำแสดงได้ดังรูป ก.5

ตารางที่ ก.1 รายละเอียดทางเทคนิคของอุปกรณ์วัดระดับน้ำ (Differential Pressure Transmitter)

Reference Accuracy	0.065% of Span
Installed Stability	0.125% URL/ 5yr
Response Time	100ms
Max Working Pressure (MWP)	420Bar (6ksi)
Differential Pressure Range	-250 to 250 inH2O
Sensor Technology	Capacitance (DP)
Communication Protocol	4-20mA & HART, Fieldbus
Rangeability	100 to 1

รูปที่ ก.5 อุปกรณ์วัดระดับน้ำ (Differential Pressure Transmitter)

การวัดระดับน้ำนั้นจะใช้สายยางขนาด 8 มิลลิเมตรที่ต่อมาจากด้านก้นถังของถังน้ำใบที่ 2 ต่อเข้าทางด้านความดันสูงของตัวอุปกรณ์วัดความดันแตกต่าง ส่วนทางด้านความดันต่ำของตัวอุปกรณ์จะเปิดไว้เพื่อรับความดันบรรยากาศ เนื่องจากถังน้ำที่ใช้ในกระบวนการเป็นถังน้ำแบบเปิด ความดันแตกต่างที่วัดโดยอุปกรณ์วัดความดันแตกต่างจึงสัมพันธ์กับระดับน้ำในถังดังต่อไปนี้

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

โดย

ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ 1000 kg/cm^3

g คือ แรงโน้มถ่วงของโลก 9.81 m/s^2

h คือ ระดับน้ำที่วัด m

ΔP คือ ความดันแตกต่าง KPa

ในการทดลองกำหนด ช่วงการวัดอยู่ที่ระยะ 0 เซนติเมตรถึง 17 เซนติเมตร

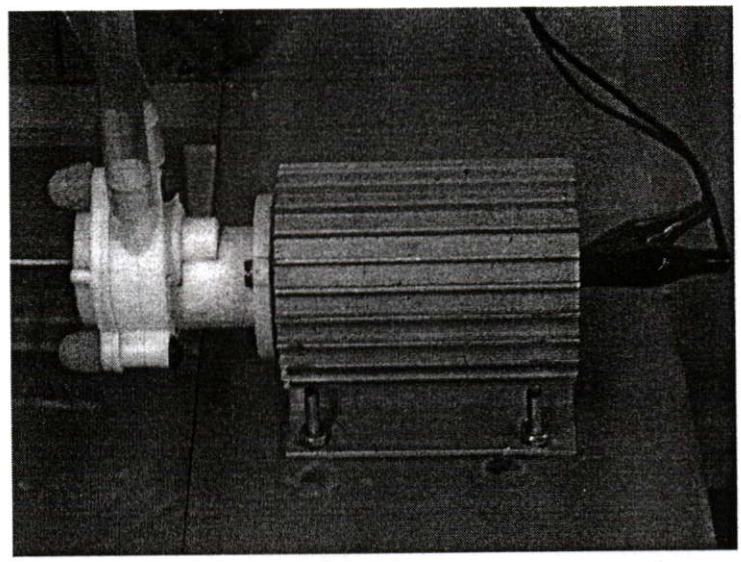
$$\Delta P = (1000 \times 9.81 \times 0.17)/1000$$
$$= 1.667 \text{ KPa}$$

ดังนั้นจะได้ช่วงความดันแตกต่างเท่ากับ

$$\Delta P = 0 - 1.667 \text{ KPa}$$

เมื่อกำหนดช่วงความดันแตกต่างข้างต้นให้เป็นช่วงการวัดระดับ 0% ถึง 100% ของระดับน้ำในถังที่2 อุปกรณ์วัดแรงดันแบบความดันแตกต่าง (Differential Pressure Transmitter) จะให้เอาท์พุตเป็นค่ากระแสไฟฟ้า 4-20 mA ที่สัมพันธ์กับระดับน้ำในถังที่ 2 ที่ความสูง 0 ถึง 17 เซนติเมตร

ก. 3 ปั๊มน้ำ



รูปที่ ก.6 ปั๊มน้ำที่ใช้ในการทดลอง

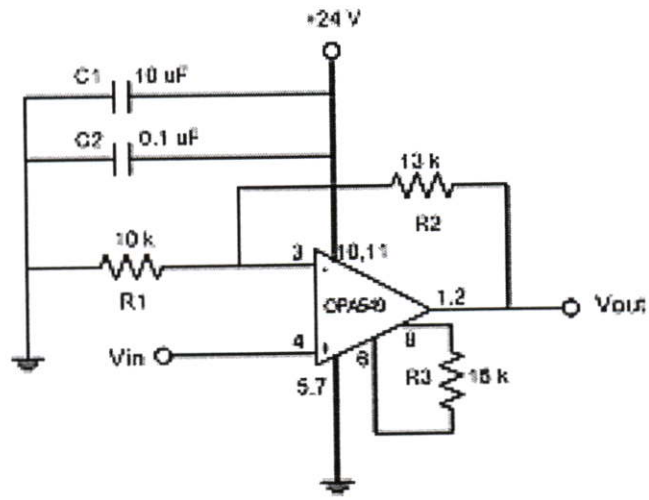
ปั๊มน้ำที่ใช้ในการทดลองนั้นจะใช้ของบริษัท API Instruments รุ่น P6 10.0006 ซึ่งจะเป็นปั๊มน้ำแบบเกียร์ปั๊ม โดยรูปของปั๊มน้ำที่ใช้ในการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ ก.6 ส่วนข้อมูลคุณสมบัติและรายละเอียดของปั๊มน้ำแสดงได้ดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.2 รายละเอียดทางเทคนิคของปั๊มน้ำ

Max Flow rate	2200 ml/min (Vdc)
Max. Suction	10 ft. H_2O wet, 4" dry
Max. Pressure	20 psig (46 ft. H_2O)
Port Size (OD)	4.8 mm (0.18") hose barb
Power Require (Vdc)	24 Vdc (up to 28W)
Max Operating Temp	93^{0}C (200^{0}F)
Ambient Fluid Temp	0 to 93^{0}C (32 to 200^{0}F)
Particulates	No
Run dry	No
Max. Viscosity	200 cps
Dimensions	88×81×92 mm (4×1.75×2.63)
Weight	1.4 kg (3 lb.)

ก. 4 วงจรออปแอมป์ (Operation Amplifier) ที่ใช้ขับมอเตอร์ (Drive Motor)

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



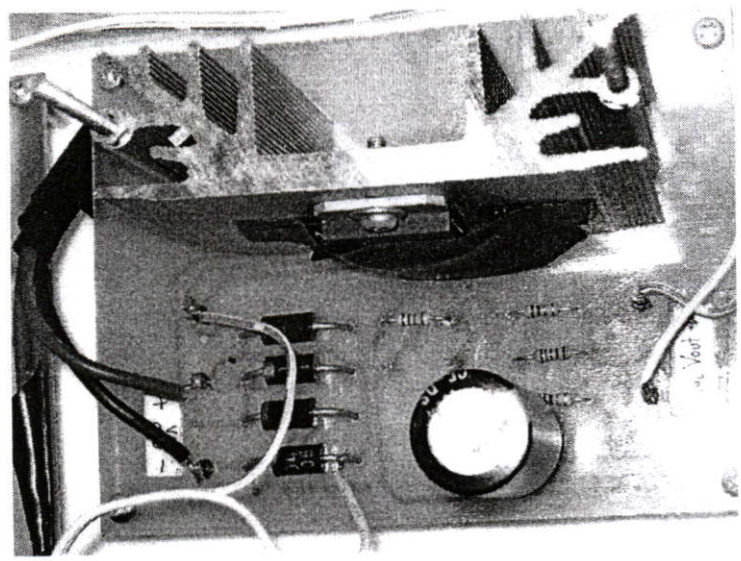
รูปที่ ก.7 วงจรออปแอมป์แบบไม่กลับเฟส (Noninverting) ที่ใช้ขับมอเตอร์

อัตราการขยายของวงจร

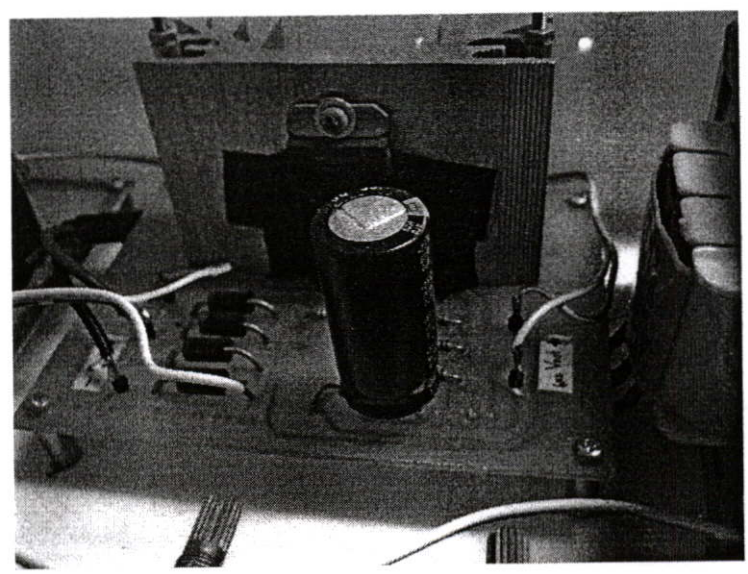
$$\frac{Vo}{Vin} = 1 + \frac{R2}{R1}$$

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

$$= 2.4 \text{ เท่า}$$



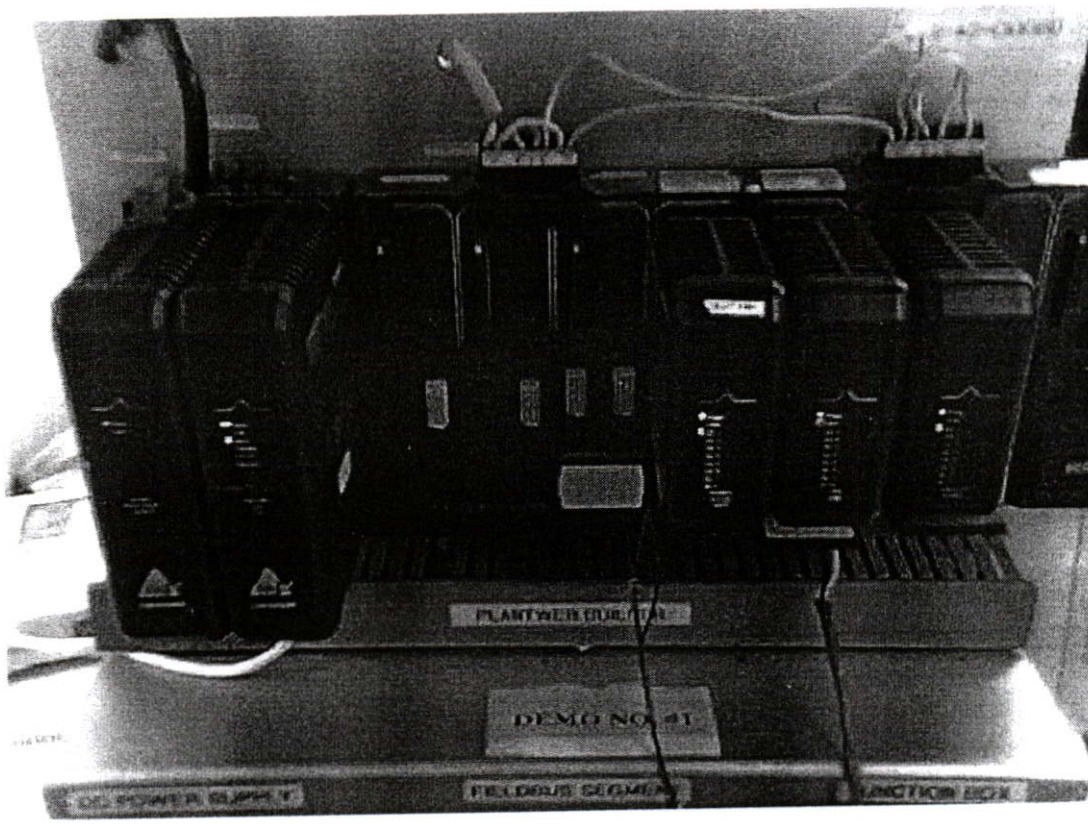
ในวงจรจะรวมแหล่งแหล่งจ่ายไฟให้กับระบบ เป็นวงจรบริดจ์ Input 24 Vac Output 15 Vdc



รูปที่ ก.8 อุปกรณ์ขับกระแสของปั๊มน้ำ

ก. 5 ชุดระบบควบคุมของเดล้าวี

ชุดอุปกรณ์เดลต้าวีที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ ก.9 ที่ใช้ในการทดลองจะประกอบด้วย



รูปที่ ก.9 ชุดระบบควบคุมของเดลต้าวี

1. เดลต้าวีเพาว์เวอร์ซัพพลาย (System Power Supply)

ตัวเพาว์เวอร์ซัพพลายจะจ่ายไฟเลี้ยงให้แก้ตัวควบคุม (Controller) และการ์ดอินพุตและเอาท์พุต ผ่าน Backplate ด้านหลัง รายละเอียดทางเทคนิคของเพาว์เวอร์ซัพพลาย (System Power Supply) แสดงดังตารางที่ ก.3

ตารางที่ ก.3 รายละเอียดทางเทคนิคของเพาว์เวอร์ซัพพลาย (System Power Supply)

Description	AC/DC System Power Supply Specifications
Input	100 VAC to 264 VAC, 47 Hz to 63 Hz, single-phase
Inrush (soft start)	35 A peak maximum for one cycle or less at 230 VAC input
Output power	25 W total at 60 °C
Output voltages	+12 VDC at 2.1 A maximum +5 VDC at 2.0 A maximum +3.3 VDC at 0.5 A maximum Combined 5 VDC and 3.3 VDC output = 10 W maximum
Input protection	Internally fused, non-replaceable
Overvoltage protection	Output protected at 110 to 120%
Hold-up time	Output: remains within 5% of nominal at full load and 155 VAC input for 20 ms
Operating temperature	0 to 60° C (32 to 140 °F) without derating
Storage temperature	-40 to 70 °C (-40 to 158 °F)
Relative humidity	5 to 95%, non-condensing
Airborne contaminants	ISA-S71.04 - 1985 Airborne Contaminants Class G2
Hazardous areas	Class I, Div. II approval
Shock	10 g ½-sine wave for 11 ms
Vibration	1 mm peak-to-peak from 5 Hz to 16 Hz, 0.5 g from 16 Hz to 150 Hz
Mounting	On either slot of 2-wide power/controller carrier
LED indicators	
Green—AC power	Input AC power is applied and internal fuse is sound
Red—Error	Outputs are not within ±4% of nominal (normal conditions).
External connectors:	
Primary power	AC input: 3-wire
Alarm contact	2-wire normally open relay; relay is closed when outputs are within ±4% of nominal; 2.0 A at 30 VDC, 2.0 A at 250 VAC

2. ตัวควบคุมของเคลต้า (Controller)

ตัวควบคุมของเคลต้าวี 1 ตัวควบคุมสามารถรองรับสัญญาณอินพุทและเอาพุทได้สูงสุดที่ 750 สัญญาณ และสามารถมีระบบสำรองอีกตัวในการทำงาน (Redundant) หากตัวใดมีการเสียอีกตัวจะทำหน้าที่แทนทันที โดยไม่มีผลกระทบต่อกระบวนการ ในวิทยานิพนท์นี้เราใช้เพียงตัวเดียว รายละเอียดทางเทคนิคของตัวควบคุม (Controller) แสดงดังตารางที่ ก.4

ตารางที่ ก.4 รายละเอียดทางเทคนิคของตัวควบคุม (Controller)

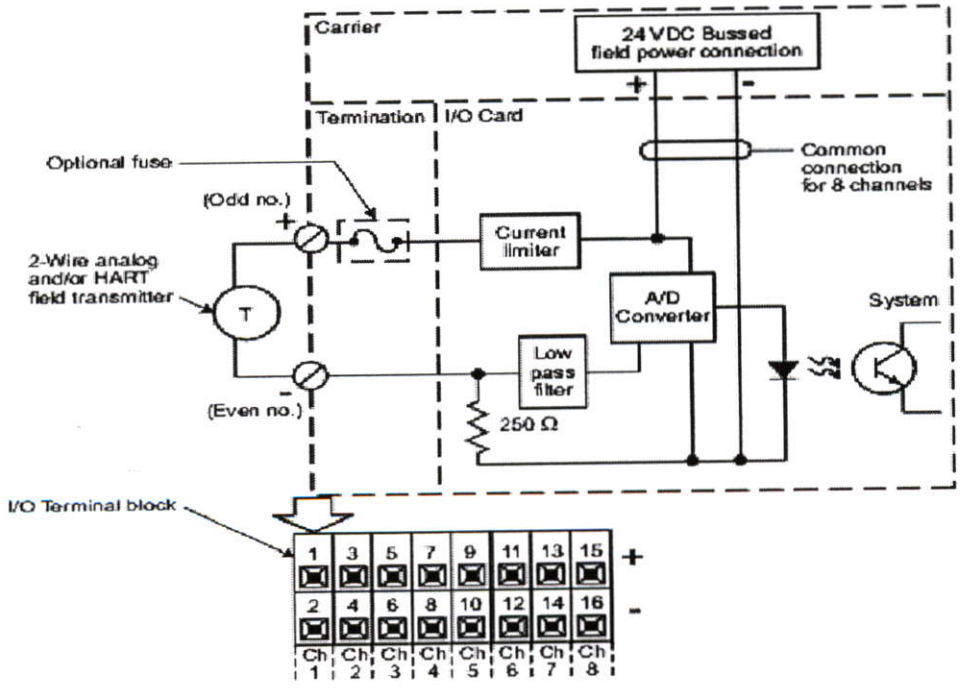
Specifications for the MD Controller	
Power requirement	Supplied by System Power Supply through 2-wide Power/Controller Carrier
Fuse protection	3.0 A, non-replaceable fuses
Power dissipation	5.0 W typical, 7.0 W maximum
Environmental specifications:	
Operating temperature	0 to 60 °C (32 to 140 °F)
Storage temperature	-40 to 85 ° C (-40 to 185°F)
Relative humidity	5 to 95%, non-condensing
Airborne contaminants	• ISA-S71.04-1985 Airborne Contaminants Class G3 • Conformal coating
Shock (normal operating conditions)	10 g ½-sine wave for 11 ms
• Hazardous area/location Refer to Zone 2 installation instructions (12P2046) and/or Class 1 Division 2 installation instructions (12P1293) for information on installing in hazardous areas.	ATEX EEx nA IIC T4 Class 1, Div 2, Groups A, B, C, D, T4
Vibration (operative limit)	1 mm peak-to-peak from 5 Hz to 16 Hz, 0.5 g from 16 Hz to 150 Hz
User Memory MD Controller	14 MB
LED Indicators:	ON Status
Green – Power	Indicates DC power is applied.
Red – Error	Indicates an error condition.
Green – Active	Indicates that the controller is operating as the primary controller.
Green – Standby	Indicates that the controller is operating as a backup controller (reserved for future use).
Yellow flashing – Pri. CN	Indicates valid primary control network communication.
Yellow, flashing – Sec. CN	Indicates valid secondary control network communication.
All except Power flashing	Visual identification of controller initiated from user interface software by *ping* command.
All except Power flashing, alternating even and odd	Firmware upgrade in progress.
Mounting	On right slot of power/controller carrier.
External connections:	
Primary Control Network	8-pin RJ-45 connector
Redundant Control Network	8-pin RJ-45 connector

3. อนาล็กอินพุทการ์ด (Analog Input Card)

อนาล็กอินพุทการ์ด ในการรับสัญญาณอินพุทแบบ 4-20 mA รองรับสัญญาณได้ 8 ช่องสัญญาณ ในวิทยานิพนท์ฉบับนี้เราใช้เพียงช่องสัญญาณเดียวในการรับสัญญาณมาจาก อุปกรณ์วัดระดับน้ำ (Differential Pressure Transmitter) รายละเอียดทางเทคนิคของอนาล็กอินพุทการ์ดแสดงดังตารางที่ ก.5 โดยการต่อสัญญาณแสดงดังรูปที่ ก.10

ตารางที่ ก.5 รายละเอียดทางเทคนิคของอนาล็กอินพุทการ์ด

Specifications for AI-Card, 8 channel, 4 to 20 mA	
Number of channels	8
Isolation	Each channel is optically isolated from the system at field to system isolation = 100 VAC (verified by 1700 VDC factory test)
Nominal signal range (span)	4 to 20 mA
Full signal range	1 to 23 mA, with overrange checking
LocalBus current (12 VDC nominal) per card	120 mA typical, 150 mA maximum
Field circuit power per card	300 mA maximum at 24 VDC (±10%)
Accuracy over temperature range	0.1% of span
Resolution	16 bits
Repeatability	0.05% of span
Rolloff frequency	-3 dB at 2.7 Hz; -20.5 dB at ½ the sampling frequency
Calibration	None required
Optional fuse	2.0 A
Hazardous area/location	Class 1, Div 2, Groups A, B, C, D, T4 hazardous locations ATEX 3 G IIC T4
Field wiring	Class 1, Div 2, Groups A, B, C, D, T4 2-wire—non-incendive 4-wire—non-arcing 2-wire— ATEX 3 G IIC T4 -nL 4-wire— ATEX 3 G IIC T4 -nA



รูปที่ ก.10 รายละเอียดทางเทคนิคไดอะแกรมการเชื่อมต่อของอนาล็กอินพุท

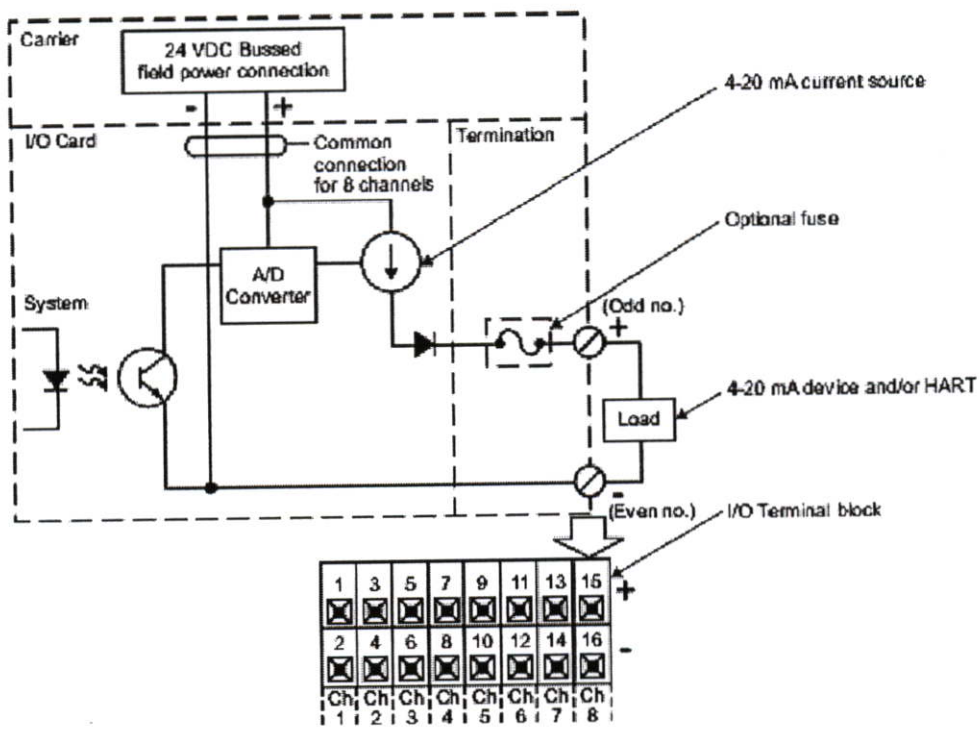
3. อนาล็กเอาท์พุทการ์ด (Analog Output Card)

อนาล็กเอาท์พุทการ์ด ในการส่งสัญญาณอินพุทแบบ 4-20 mA ให้กับอุปกรณ์ตัวสุดท้าย และรองรับสัญญาณได้ 8 ช่องสัญญาณ ในวิทยานิพนท์ฉบับนี้เราใช้เพียงช่องสัญญาณเดียวในการส่งสัญญาณให้กับ วงจรออปแอมป์ (Operation Amplifier) ที่ใช้ขับมอเตอร์ (Drive Motor) รายละเอียดทางเทคนิคของอนาล็กเอาท์พุทการ์ด แสดงดังตารางที่ ก.6 โดยการต่อสัญญาณแสดงดังรูปที่ ก.11

Specifications for AO Card, 8 channel, 4 to 20 mA	
Number of channels	8
Isolation	Each channel is optically isolated from the system at field to system isolation = 100 VAC (verified by 1700 VDC factory test)
Nominal signal range (span)	4 to 20 mA
Full signal range	1 to 23 mA
LocalBus current (12 VDC nominal) per card	100 mA typical, 150 mA maximum
Field circuit power per card	300 mA maximum
Accuracy over temperature range	0.25% of span
Resolution	12 bits
Output compliance	20 mA at 21.6 VDC supply into 700 Ω load
Calibration	Information stored on card.
Optional fuse	2.0 A
Hazardous area/location	Class 1, Div 2, Groups A, B, C, D T4 hazardous locations ATEX 3 G IIC T4
Field wiring	Class I, Div 2, Groups A, B, C, D T4 non-incendive ATEX 3 G IIC T4 -nL

ตารางที่ ก.6 รายละเอียดทางเทคนิคของอานาล็กเอาท์พุทการ์ด

Specifications for AO Card, 8 channel, 4 to 20 mA	
Number of channels	8
Isolation	Each channel is optically isolated from the system at field to system isolation = 100 VAC (verified by 1700 VDC factory test)
Nominal signal range (span)	4 to 20 mA
Full signal range	1 to 23 mA
LocalBus current (12 VDC nominal) per card	100 mA typical, 150 mA maximum
Field circuit power per card	300 mA maximum
Accuracy over temperature range	0.25% of span
Resolution	12 bits
Output compliance	20 mA at 21.6 VDC supply into 700 Ω load
Calibration	Information stored on card.
Optional fuse	2.0 A
Hazardous area/location	Class 1, Div 2, Groups A, B, C, D T4 hazardous locations ATEX 3 G IIC T4
Field wiring	Class I, Div 2, Groups A, B, C, D T4 non-incendive ATEX 3 G IIC T4 -nL



รูปที่ ก.11 รายละเอียดทางเทคนิคไดอะแกรมการเชื่อมต่อของอนาล็กเอาท์พุท

ภาคผนวก ข.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

ขอรับรองว่าผลงานวิจัย

เรื่อง

ตัวควบคุมแบบพีไอดีแบบปรับค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติ สำหรับกระบวนการระดับน้ำแบบสองถังแบบมีผลต่อกันโดยใช้การอินทริกรัลผลตอบสนองแบบบันได

โดย

มนตรี ตันยะกุล ธนิตย์ ตรีสุวรรณวัฒน์
อาจินต์ น่วมสำราญ และเทียนชัย สุขศรี

ได้ผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ สาขา วิศวกรรมศาสตร์
และ
ได้นำเสนอในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 44
ระหว่างวันที่ 30 มกราคม - 2 กุมภาพันธ์ 2549

(ศาสตราจารย์ ดร.ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
ประธานคณะกรรมการดำเนินการจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 44

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ
สาขาวิศวกรรมศาสตร์

1.	พีรยุทธ์	ชาญเศรษฐิกุล	2.	ประเทือง	อุษาบริสุทธิ์
3.	สุนันท์	ลิ้มตระกูล	4.	วันชัย	ยอดสุดใจ
5.	กิจพัฒน์	ภู่วรวรรณ	6.	พันธุ์ปิติ	เปี่ยมสง่า
7.	ดุสิต	ธนเพทาย	8.	ศิริโรจน์	ศิริสุขประเสริฐ
9.	อนันต์	มุ่งพัฒนา	10.	พรเทพ	อนุสสรนิติสาร
11.	เอกสิทธิ์	โฆสิตสกุลชัย	12.	วิชัย	ศิวะโกศิษฐ
13.	อภิชาต	แจ้งบำรุง	14.	นุชนารถ	ศริวงศิตานนท์
15.	วิไล	เจียมไชยศรี	16.	ชัชพล	ซังชู
17.	ทวีเดช	ศิริธนาพิพัฒน์	18.	อนุพันธ์	เทอดวงศ์วรกุล
19.	สุรีรัตน์	ผลศิลป์	20.	เวชพงศ์	ชุติชูเดช
21.	มานิตย์	ลีกิจวัฒนะ	22.	ศุภกิจ	นนทนานันท์
23.	เพ็ญสุดา	โหมลา	24.	จันทร์เพ็ญ	อุดมโชติพฤทธิ์

เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๔๔ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

The Proceedings of 44th Kasetsart University Annual Conference

เล่มที่ 5

สาขาวิศวกรรมศาสตร์ (Subject: Engineering)

สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์ (Subject: Architecture)

สาขาการจัดการทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม

(Subject: Natural Resources and Environmental Management)

๓๐ มกราคม - ๒ กุมภาพันธ์ ๒๕๔๙

ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

"เกษตรศาสตร์เพื่อพลังงานชีวภาพตามแนวพระราชดำริ"

"Agricultural Science : Carrying Forward the Royal Bio - Energy Initiative"

ตัวควบคุมแบบพีไอดีแบบปรับค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติสำหรับกระบวนการระดับน้ำแบบสองถังแบบมีผลต่อกันโดยใช้การอินทริกรัลผลตอบสนองแบบบันได

Auto-Tuning PID Controller for Interacting Water Level Process Using Integral Step Response

มนตรี ตันยะกุล[1] ธนิตย์ ตรีสุวรรณวัฒน์[2] อาจินต์ น่วมสำราญ[3] เทียนชัย สุขศรี[4]

Montree Tanyakul[1] Thanit Trisuwannawat[2] Arjin Numsomran[3] Tianchai Suksri[4]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติ สำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกันโดยใช้วิธีอินทิกรัลผลตอบสนอง ซึ่งวิธีอินทิกรัลผลตอบสนอง (ISR) นั้นเป็นวิธีที่ใช้สำหรับทำการหาแบบจำลองของกระบวนการวิธีหนึ่งที่ง่ายสะดวกและมีประสิทธิภาพ ซึ่งหลังจากที่ได้แบบจำลองของกระบวนการด้วยวิธี ISR แล้วจะทำการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีแบบอัตโนมัติ โดยใช้วิธีทางเดินรากในการออกแบบตัวควบคุม โดยการหาแบบจำลองของกระบวนการและการทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุม จะทำโดยการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB ผลตอบสนองของการควบคุมกระบวนการระดับน้ำแบบสองถังที่มีผลแก่กันให้ผลตอบสนองเป็นไปตามต้องการทั้งในสภาวะทรานเซียลและสภาวะคงตัว

ABSTRACT

This paper presents the approach to design the Auto-Tuning PID controller for interactive Water Level Process using integral step response. The Integral Step Response (ISR) is the method to model a dynamic process which can be done easily, conveniently and very efficiently. Therefore this method is advantage for design the auto tune PID controller. Our scheme uses the root locus technique to design PID controller. In this paper MATLAB is used for modeling and testing of the control system. The experimental results of interacting water level process can be satisfyingly illustrated the transient response and the steady state response.

Keywords: Coupled-Tank, Auto-Tuning PID Controller, Interacting water level process.

E-mail: knarjin@kmitl.ac.th

[1,2,3] ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Department of Instrumentation Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

[4] ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

Department of Instrumentation Engineering, Faculty of Engineering, Pathumwan Institute of Technology

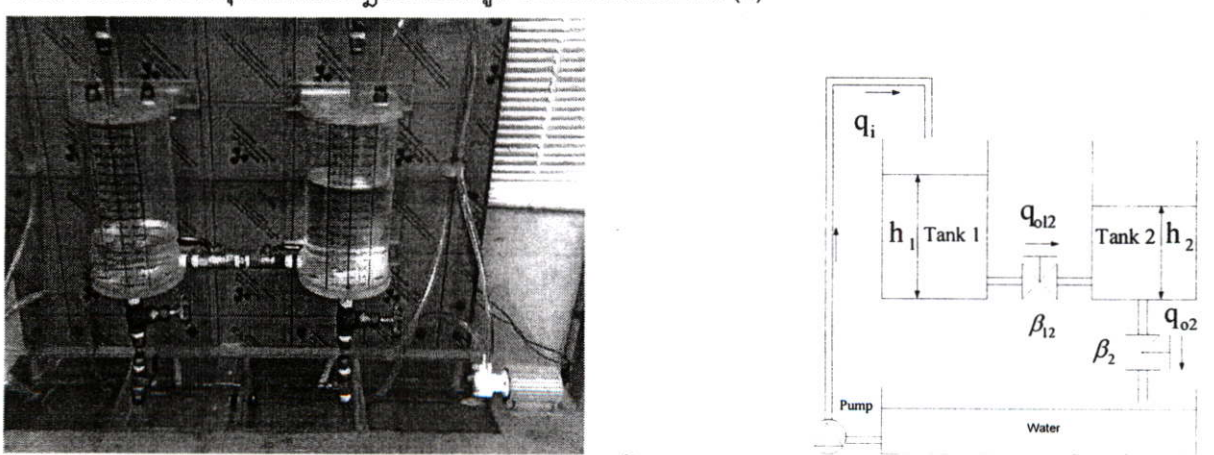
คำนำ

ในการพิจารณาหาแบบจำลองสำหรับกระบวนการทางอุตสาหกรรมนั้นนับว่าเป็นสิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญมาก อันเนื่องมาจากแบบจำลองของกระบวนการนั้นจะถูกนำไปใช้สำหรับทำการออกแบบตัวควบคุมแบบเชิงเส้น เช่น ตัวควบคุมแบบ PI, PID โดยวิธีในการหาแบบจำลองของกระบวนการนั้นก็มีเทคนิคและวิธีการที่แตกต่างกันไปหลายวิธี [1] แต่โดยส่วนใหญ่แล้ววิธีของ J.G. Ziegler และ N.B. Nichols [2] และวิธีของ K.J. Astrom และ T. Hagglund [3] จะได้รับความนิยมในการนำไปประยุกต์ใช้งานเพื่อหาแบบจำลองของกระบวนการมากกว่า อันเนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและเพียงพอต่อการหาแบบจำลองของกระบวนการ โดยวิธี [2, 3] นั้นจะทำการหาความถี่และอัตราขยายที่จุดวิกฤติของกระบวนการ จากนั้นจึงนำเอาความถี่และอัตราขยายที่ได้ไปทำการพิจารณาหาแบบจำลองของกระบวนการ แต่ถึงอย่างไรก็ตามแบบจำลองของกระบวนการที่ได้จากวิธี [2, 3] นั้นก็ยังมีความคลาดเคลื่อนจากกระบวนการจริงอยู่มาก ดังนั้นจึงมีวิธีการหาแบบจำลองของกระบวนการแบบใหม่ขึ้นมาเรียกว่าวิธีอินทิกรัลผลตอบสนอง (Integral System Response: ISR) [4] โดยวิธีนี้จะได้แบบจำลองของกระบวนการที่ใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมากกว่า และการหาแบบจำลองของกระบวนการทำได้โดยใช้สัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดป้อนให้กับกระบวนการและวัดผลตอบสนองของกระบวนการ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการ

บทความนี้ นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติสำหรับกระบวนการระดับน้ำ 2 ถังแบบมีผลต่อกัน โดยในการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีนั้นจะใช้วิธีทางเดินราก [5] และแบบจำลองของกระบวนการที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมจะได้จากวิธีอินทิกรัลผลตอบสนอง (ISR) [4]

กระบวนการระดับน้ำ 2 ถังแบบมีผลต่อกัน

พิจารณากระบวนการระดับน้ำ 2 ถัง แบบมีผลต่อกันในรูปที่ 1. ซึ่งเป้าหมายของการควบคุมกระบวนการก็คือระดับน้ำในถังที่ 2 ด้วยปั๊มน้ำที่จ่ายให้กับถังที่ 1 อินพุตของกระบวนการคือ u1 (ค่าแรงดันอินพุตที่จ่ายให้กับปั๊มน้ำ) และเอาต์พุตของกระบวนการคือ h2 (ระดับน้ำในถังที่ 2) สมการไม่เป็นเชิงเส้นของกระบวนการสามารถหาได้จากสมการสมดุลมวลและกฎของเบอร์นูลี ซึ่งจะได้ดังสมการที่ (1)



รูปที่ 1. กระบวนการระดับน้ำ 2 ถังแบบมีผลต่อกัน

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

โดย A_i คือพื้นที่หน้าตัดของถัง i (cm^2) , a_2 คือพื้นที่หน้าตัดของรูทางออกของถังที่ 2 (cm^2) , a_{12} คือพื้นที่หน้าตัดของรูที่เชื่อมต่อระหว่างถังที่ 1 และถังที่ 2 (cm^2) , β_2 คือค่าตำแหน่งวาล์วที่ต่อทางด้านออกของถังที่ 2, β_{12} คือค่าตำแหน่งวาล์วที่ต่อระหว่างถังที่ 1 และถังที่ 2, g คือแรงโน้มถ่วงของโลก (cm/s^2) และ k คือค่าอัตราขยายของปั๊มน้ำ $(cm^3/V \cdot s)$ จากสมการที่ (1) เมื่อทำให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นจะได้ดังสมการที่ (2)

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

โดย $T_{12} = \frac{A_1}{\beta_{12}a_1}\sqrt{\frac{2(\overline{h_1} - \overline{h_2})}{g}}$, s $\quad T_2 = \frac{A_2}{\beta_2 a_2}\sqrt{\frac{2\overline{h_2}}{g}}$, s

โดย $\overline{h_1}$ และ $\overline{h_2}$ คือระดับน้ำณ.จุดทำงานของกระบวนการ, T_{12} คือค่าคงตัวเวลาระหว่างถังที่ 1 และถังที่ 2 และ T_2 คือค่าคงตัวเวลาของถังที่ 2 และ K และจากสมการที่ (2) ทำให้อยู่ในรูปแบบจำลองเชิงเส้นจะได้ดังสมการที่ (3)

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

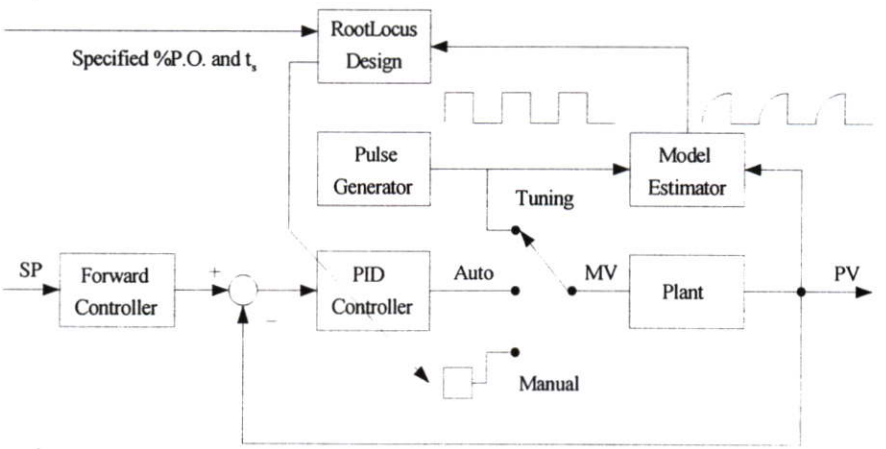
โดย $K = \frac{kT_2}{A_2}$, cm/V

สมการที่ (3) นี้เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม

โครงสร้างระบบควบคุม

โครงสร้างระบบควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 2. โดยระบบควบคุมจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนด้วยกันคือ

1. กระบวนการระดับน้ำ 2 ถังแบบมีผลต่อกัน
2. ส่วนการหาแบบจำลองกระบวนการ
3. ตัวควบคุมแบบ 2 ขั้นอิสระ



รูปที่ 2. โครงสร้างของระบบควบคุม

โดยส่วนการหาแบบจำลองของกระบวนการจะใช้วิธีอินทิกรัลผลตอบสนอง (ISR) [4] สำหรับกระบวนการระดับน้ำ 2 ถังนี้นั้นจากสมการที่ (3) พบว่าแบบจำลองของกระบวนการเป็นแบบอันดับ 2 โดยมีโพล 2 ตัวและไม่มีซีโร่ ดังนั้นในการหาแบบจำลองของกระบวนการโดยวิธี ISR นั้นจะทำการป้อนสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดให้กับกระบวนการ 3 ครั้ง วิธีการหาแบบจำลองด้วยวิธี ISR แสดงได้ในส่วนวิธีอินทิกรัลผลตอบสนอง

ส่วนโครงสร้างของตัวควบคุมเป็นแบบ 2 ขั้นอิสระประกอบไปด้วยตัวควบคุมป้อนกลับแบบพีไอดี และตัวควบคุมป้อนไปหน้าแบบพรีฟิลเตอร์ โดยหลังจากที่ได้แบบจำลองของกระบวนการด้วยวิธี ISR แล้วจะทำการออกแบบตัวควบคุมป้อนกลับและตัวควบคุมป้อนไปหน้าอัตโนมัติด้วยวิธีทางเดินราก [5]

ตัวควบคุมป้อนกลับ $$G_c = \frac{(s+z_{c1})(s+z_{c2})}{s} = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \quad (4)$$

ตัวควบคุมป้อนไปหน้า $$G_f = \frac{z_c}{(s+z_c)} \quad (5)$$

วิธีอินทิกรัลผลตอบสนอง

วิธีอินทิกรัลผลตอบสนอง (ISR) [4] เป็นวิธีหาแบบจำลองของกระบวนการวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพมากเนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถใช้ประยุกต์หาแบบจำลองของกระบวนการได้ง่ายและแบบจำลองของกระบวนการที่ได้ จะใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมาก วิธีอินทิกรัลผลตอบสนอง (ISR) [4] สามารถแสดงได้ดังนี้

พิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการ ให้อยู่ในรูปแบบดังนี้

$$G(s) = \frac{K_0 \prod_{i=1}^{n-1}(1+\gamma_i s)}{\prod_{i=1}^{n}(1+\tau_i s)} = \frac{K_0[1+(\gamma_1+\gamma_2+\cdots+\gamma_{n-1})s+\cdots+(\gamma_1\gamma_2\cdots\gamma_{n-1})s^{n-1}]}{[1+(\tau_1+\tau_2+\cdots+\tau_n)s+(\tau_1\tau_2\cdots\tau_n)s^n]}$$

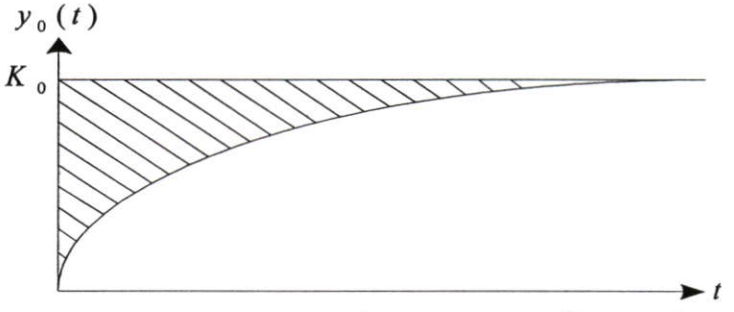
$$= \frac{[K_0 + b_1 s + \cdots + b_{n-1}s^{n-1}]}{[1+a_1 s+\cdots a_n s^n]} \quad (6)$$

โดย

$$b_1 = K_0(\gamma_1+\gamma_2+\cdots+\gamma_{n-1}) \qquad a_1 = (\tau_1+\tau_2+\cdots+\tau_n)$$
$$\vdots \qquad\qquad\qquad \vdots$$
$$b_{n-1} = K_0(\gamma_1\gamma_2\cdots\gamma_{n-1}) \qquad a_n = (\tau_1\tau_2\cdots\tau_n)$$

พิจารณาให้สัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดแก่กระบวนการ

$$y_0(t) = \int_0^\infty g(t-\tau)1(\tau)d\tau \quad (7)$$



รูปที่ 3. ผลตอบสนองของกระบวนการเมื่อป้อนอินพุตแบบ ขั้นบันไดเพื่อหาค่า K_0

พิจารณารูปที่ 3. จะเห็นได้ว่าสามารถพิจารณาหาค่าผลตอบสนองของกระบวนการที่สภาวะคงตัวได้ และจากทฤษฎีค่าสุดท้ายสมการที่ (7) เขียนได้ดังนี้

$$\lim_{t\to\infty} y_0(t) = \lim_{s\to 0} s\frac{G(s)}{s} = \lim_{s\to 0}\frac{[K_0 + b_1 s + \cdots b_{n-1}s^{n-1}]}{[1+a_1 s+\cdots a_n s^n]} \quad (8)$$
$$= K_0$$

ต่อไปกำหนดให้ $$y_1(t) = \int_0^\infty [K_0 - y_0(\tau)]d\tau \quad (9)$$

โดย $y_1(t)$ คือพื้นที่ใต้กราฟระหว่างค่า K_0 และ $y_0(t)$ ทำลาปลาสสมการที่ (9) ได้

$$Y_1(s) = \frac{1}{s^2}[K_0 - G(s)] \tag{10}$$

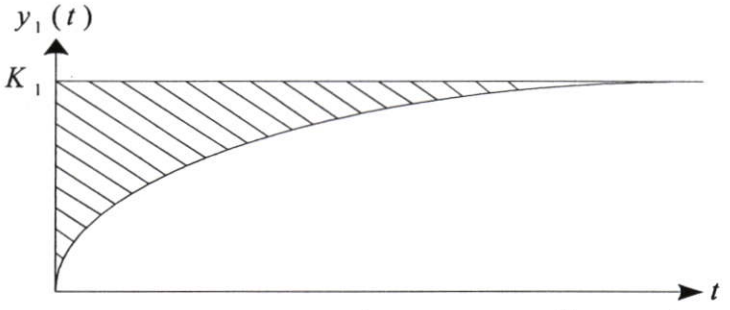
กำหนดให้ $$G_1(s) = [K_0 - G(s)] = \frac{(K_0 a_1 - b_1)s + (K_0 a_2 - b_2)s^2 + \cdots + K_0 a_n s^n}{1 + a_1 s + \cdots a_n s^n} \tag{11}$$

จากทฤษฎีค่าสุดท้ายสมการที่ (10) เขียนได้ดังนี้

$$\lim_{t\to\infty} y_1(t) = \lim_{s\to 0} s\frac{[K_0 - G(s)]}{s^2} = \frac{1}{s}[K_0 - G(s)] = K_0 a_1 - b_1 = K_1 \tag{12}$$

กำหนดให้ $$y_2(t) = \int_0^{\infty}[K_1 - y_1(\tau)]d\tau \tag{13}$$

โดย $y_2(t)$ คือพื้นที่ใต้กราฟระหว่างค่า K_1 และ $y_1(t)$



รูปที่ 4. ผลตอบสนองของกระบวนการเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันไดเพื่อหาค่า K_1

จากสมการที่ได้อธิบายมา แสดงให้เห็นได้ว่าถ้ากระบวนการมีอันดับสูงๆจะต้องทำการป้อนอินพุตแบบขั้นบันไดหลายครั้ง ซึ่งจำนวนในการป้อนอินพุตแบบขั้นบันได้นั้น จะขึ้นอยู่กับอันดับของกระบวนการ โดยสามารถสรุปเป็นสมการในการหาค่า K_i ได้ดังนี้

$$K_i = K_{i-1}a_1 - K_{i-2}a_2 + K_{i-3}a_3 - \cdots + (-1)^{i+1}K_0 a_i + (-1)^i b_i \quad i = 1,2,\ldots,n \tag{14}$$

การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางเดินราก

ในการออกแบบตัวควบคุมนั้นจะต้องทำการกำหนดผลตอบสนองของสภาวะชั่วครู่และที่สภาวะคงตัว [5] ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

1) คุณลักษณะของผลตอบสนองชั่วครู่อธิบายได้ในรูปของค่าพุ่งเกิน (Percent Overshoot P.O.)

2) คุณลักษณะของผลตอบสนองที่สภาวะคงตัวอธิบายได้ในรูปของค่าเวลาเข้าที่ (Settling time t_s)

วิธีการในการออกแบบเพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่สภาวะชั่วครู่และคงตัวตามที่ต้องการทำได้ตามขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่1.ทำการหาอัตราการหน่วง (damping ratio: ζ), ความถี่ธรรมชาติ (umdamped natural frequency: ω_n) และหาจุด s_d โดยพิจารณาจากคุณลักษณะที่สภาวะคงตัวและสภาวะอยู่ตัวที่ต้องการจากสมการ (15)

$$P.O. = 100 * e^{\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}}\%, \quad ts^{(\pm 2\%)} = 4/\zeta\omega_n$$
$$s_d = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \tag{15}$$

ขั้นที่2.หาผลรวมของมุมที่จุด s_d ของระบบแบบลูปเปิด $G_c(s)G_p(s)$ ด้วยวิธีทางกราฟิกหรือการคำนวณ เมื่อนั้นพิจารณาหามุมที่จำเป็นของ $\angle(s_d + z_c)$ เพื่อที่จะทำให้ผลรวมของมุมเป็นไปตามเงื่อนไข (16)

$$\sum(\theta_z + \theta_{zc}) + \sum\theta_p = -(2k+1)\pi, \; k = 0,1,\ldots,n \tag{16}$$

ขั้นที่3.หาอัตราขยาย K_c ของตัวควบคุมจากเงื่อนไขขนาดของวิธีการรูทโลกัส

$$K_c = K_{sd} = \frac{1}{|G(s_d)H(s_d)|} \tag{17}$$

ขั้นที่4.แทนพารามิเตอร์ทุกตัวในสมการของตัวควบคุม

ขั้นที่5.วาดทางเดินรากของ $G_c(s)G_p(s)$ เพื่อให้แน่ใจว่าทางเดินรากเดินผ่านจุด s_d ที่กำหนด

ขั้นที่6.เพื่อให้ผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดสามารถได้ผลตอบสนองตามที่ต้องการ ทำการเพิ่มตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้า ในสมการ (18) ดังแสดงในรูปของโครงสร้างระบบควบคุม

$$G_f(s) = \frac{z_c}{(s+z_c)} \tag{18}$$

ผลการทดลอง

ในส่วนนี้จะทำการจำลอง หาแบบจำลองของกระบวนการระดับน้ำ 2 ถังแบบมีผลต่อกันด้วยวิธี ISR ด้วยโปรแกรม MATLAB และหลังจากที่ได้แบบจำลองของกระบวนการแล้วจะทำการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีแบบอัตโนมัติด้วยวิธีทางเดินราก จากนั้นจะทดสอบผลตอบสนองของระบบควบคุม พารามิเตอร์และจุดการทำงานของกระบวนการแสดงได้ดังตารางที่ 1. และตารางที่ 2.

A_1, A_2; cm^2	a_2, a_{12}; cm^2	β_2	β_{12}
66.25	0.1963	0.3	0.56

ตารางที่ 1. พารามิเตอร์ของกระบวนการ

$\overline{h_1}$; cm	$\overline{h_2}$; cm	$\overline{u}$; V	k; cm^3/V·s
9	7	3	2.3

ตารางที่ 2. จุดการทำงานของกระบวนการ

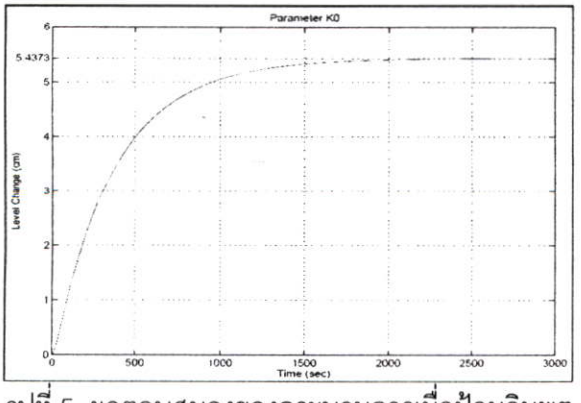
จากพารามิเตอร์และจุดการทำงานของกระบวนการแทนในสมการ (3) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการคือ

$$G(s) = \frac{4.662}{5177s^2 + 307.2s + 1} \tag{19}$$

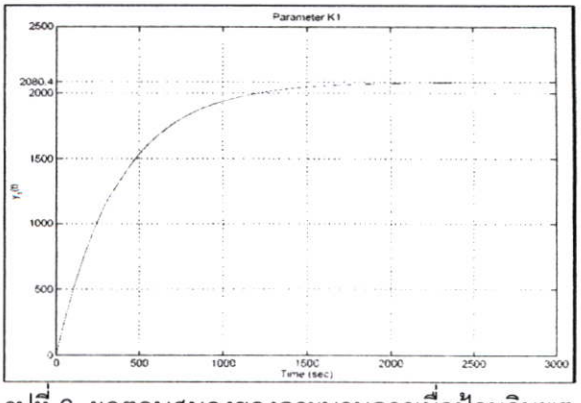
การหาแบบจำลองกระบวนการด้วยวิธีอินทิกรัลผลตอบสนอง

ในส่วนนี้จะทำการหาแบบจำลองของกระบวนการ ด้วยวิธี ISR และหลังจากที่ได้แบบจำลองของกระบวนแล้วจะเปรียบเทียบแบบจำลองที่ได้กับแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นของกระบวนการ จากแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นของกระบวนการ สามารถทำการหาแบบจำลองของกระบวนการ ISR ได้ดังนี้

จากสมการที่ (3) พบว่าแบบจำลองของกระบวนการระดับน้ำ 2 ถังแบบมีผลต่อกันนั้นเป็นแบบอันดับ 2 โดยมีโพลอยู่ 2 ตัวและไม่มีซีโร่ ดังนั้นในการหาแบบจำลองของกระบวนการด้วยวิธี ISR นั้นจึงต้องทำการป้อนสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดให้กับกระบวนการ 3 ครั้งเพื่อหาค่า K_0, K_1 และ K_2 จากการทดลองรูปผลตอบสนองของกระบวนการในการหาค่า K_0, K_1 และ K_2 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5, 6 และ 7 ตามลำดับ

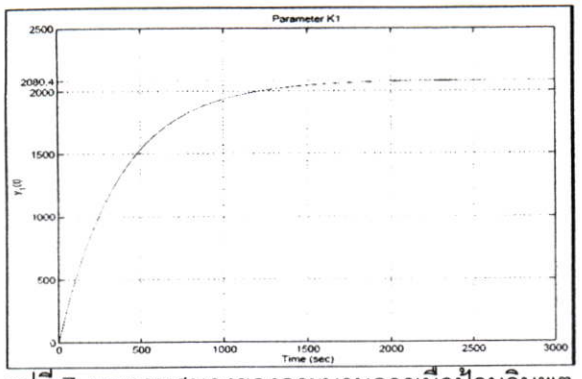


รูปที่ 5. ผลตอบสนองของกระบวนการเมื่อป้อนอินพุต



รูปที่ 6. ผลตอบสนองของกระบวนการเมื่อป้อนอินพุต

แบบขั้นบันไดเพื่อหาค่า K_0



รูปที่ 7. ผลตอบสนองของกระบวนการเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นบันไดเพื่อหาค่า K_2

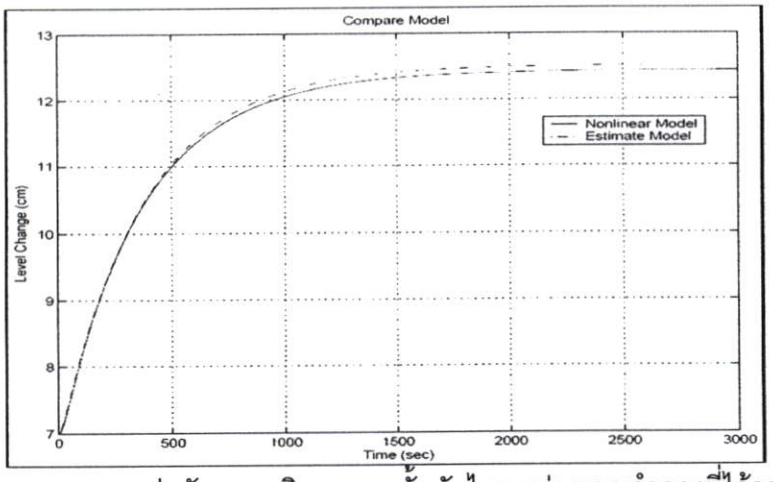
แบบขั้นบันไดเพื่อหาค่า K_1

จากการทดลองจะได้ค่า K_0, K_1 และ K_2 ดังนี้

$K_0 = 5.4373, K_1 = 2080.4$ และ $K_2 = 772920$

และจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการดังนี้

$$G(s) = \frac{5.4373}{4243.863s^2 + 382.614s + 1} \qquad (20)$$



รูปที่ 8. เปรียบเทียบผลตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดระหว่างแบบจำลองที่ได้จากวิธี ISR และแบบจำลองแบบไม่เป็นเชิงเส้น

รูปที่ 8. แสดงเปรียบเทียบผลตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดระหว่างแบบจำลองที่ได้จากวิธี ISR และแบบจำลองแบบไม่เป็นเชิง จากรูปจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองในสภาวะชั่วครู่ของแบบจำลองที่ได้จากการหาด้วยวิธี ISR นั้นจะใกล้เคียงกับแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นมาก แต่ผลตอบสนองที่สภาวะอยู่ตัวของแบบจำลองที่ได้จากการหาด้วยวิธี ISR จะมีค่าความผิดพลาดอยู่ แต่จะไม่เกิน 5 %

ผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันได

ในส่วนนี้จะทำการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีทางเดินราก โดยจะใช้แบบจำลองของกระบวนการที่ได้จากการหาด้วยวิธี ISR ซึ่งก็คือสมการ (20) มาทำการออกแบบตัวควบคุม โดยเงื่อนไขในการออกแบบตัวควบคุมได้กำหนดให้

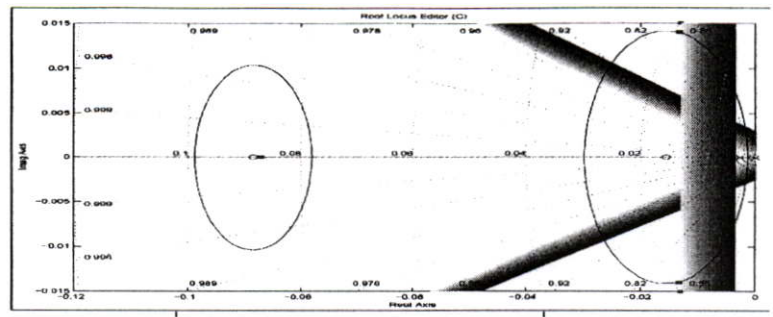
$$P.O. \le 5\%, ts^{(\pm 2\%)} \le 300\,\text{sec}, e_{ss}(t) = 0$$

จากเงื่อนไขคุณลักษณะที่ต้องการจะได้

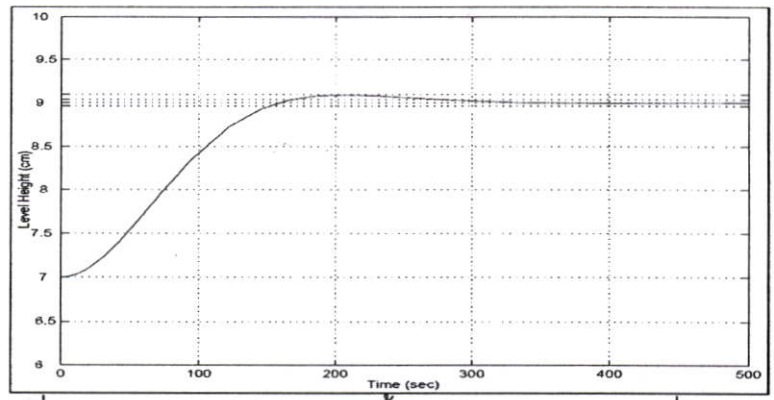
$$\zeta = 0.6901, \omega_n = 0.0193, s_d = -0.0133 \pm j0.14$$

จากการออกแบบตัวควบคุมตามเงื่อนไขที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ 5 จะได้มุม θ_{zc}, ตำแหน่งซีโร่ z_c อัตราขยาย K_c คือ $\theta_c = 81.0484, z_{c1} = 0.0155, z_{c2} = 0.0885, K_c = 18.2115$ และจะได้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับและแบบป้อนไปหน้าดังนี้

$$G_c = \frac{18.2115s^2 + 1.8948s + 0.025}{s} \qquad G_f = \frac{0.0155}{s + 0.0155}$$



รูปที่ 9. ทางเดินรากของระบบควบคุมที่ออกแบบ



รูปที่ 10. ผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดของระบบควบคุมที่ออกแบบ

รูปที่ 10. แสดงผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดของระบบควบคุมที่ได้จากการออกแบบ จากรูปจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ได้จากการออกแบบนั้นจะมีค่าพุ่งเกินไม่เกิน 5% และมีค่าเวลาเข้าที่ไม่เกิน 300 วินาที ซึ่งได้ตามเงื่อนไขที่ต้องการในการออกแบบระบบควบคุม

สรุป

ในบทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติ โดยใช้วิธีอินทิกรัลผลตอบสนองในการหาแบบจำลองของกระบวนการ โดยจากการจำลองทำการหาแบบจำลองของกระบวนการด้วยโปรแกรม MATLAB พบว่าแบบจำลองที่ได้จากการหาด้วยวิธีอินทิกรัลผลตอบสนองนั้นจะมีความใกล้เคียงกับแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นของกระบวนการมาก โดยจะมีค่าความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวไม่เกิน 5% และเมื่อนำเอาแบบจำลองของกระบวนการ ที่ได้มาทำการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีแบบอัตโนมัติด้วยวิธีทางเดินราก ผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดของระบบควบคุมก็ได้ตามเงื่อนไขในการออกแบบตามที่ต้องการ

เอกสารอ้างอิง

[1] L, Ljung, *System Identification Theory for the User*, Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall 1987

[2] J.G. Ziegler and N.B. Nichols, "Optimum settings for automatic controllers", Trans. ASME, vol.65, 1943, pp.433-444

[3] K.J. Astrom and T. Hagglund, "Automatic tuning of simple regulators", Proceeding of IFAC 9th World Congr., Budapest, Hungary, 1984, 1867-1872

[4] J. Dorsey, *Continuous and Discrete Control Systems*, McGraw Hill, 2002

[5] Numsomran A.,"2-DOF Control System Designed by Root Locus Technique", Proceeding of KACC control 15th, Korea, October 2000

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นาย มนตรี ตันยะกุล
วัน เดือน ปีเกิด	10 ตุลาคม 2516 ที่ฉะเชิงเทรา
ที่อยู่	33/1 ม. 7 ต. หัวไทร อ. บางคล้า จ. ฉะเชิงเทรา 24000
ประวัติการศึกษา	2538 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาไฟฟ้ากำลัง จากสถาบันเทคโนโลยีมงคล วิทยาเขตพระนครเหนือในปี พ. ศ. 2538 2540 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) Inter Project Management (Automation System) 2.) Automation Design on legacy system and latest technology with Implementation 3.) Plant information Management System 4.) Cost Control and Manpower Planning
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2540 ถึง 2542	: ทำงานที่ บริษัท Foxboro (Thailand) Co., Ltd. ในตำแหน่ง Project Engineer
พ.ศ. 2543 ถึง 2545	: ทำงานที่ บริษัท ABB Bailey Co., Ltd. ในตำแหน่ง Sales & Marketing Engineer
พ.ศ. 2545 ถึง ปัจจุบัน	: ทำงานที่ บริษัท Polytechnology Co., Ltd. ในตำแหน่ง Systems & Solutions Manager (Emerson Process Management (DeltaV), Triconex, Rockwell Automation)