

ผลของเวลาหน่วงต่อสมรรถนะการควบคุมของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย
ในการควบคุมระบบสี่ถัง

นาย จักรกฤษ รัชแก้วกรพินธุ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF DELAY TIME TO CONTROL PERFORMANCE OF MODEL PREDICTIVE
CONTROLLER IN CONTROL OF QUADRUPLE TANK SYSTEM

Mr. Chakkrit Touchkaewkorpint

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของเวลาหน่วงต่อสมรรถนะการควบคุมของตัวควบคุมซึ่ง
ใช้แบบจำลองในการทำนายในการควบคุมระบบสี่ถัง
โดย นาย จักรกฤษ รัชแก้วกรพินธุ์
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.กษิติศ หนูทอง)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. วีรยุทธ เลิศบำรุงสุข)

จักรกฤษ รัชแก้วกรพินธุ์ : ผลของเวลาหน่วงต่อสมรรถนะการควบคุมของตัวควบคุม
 ซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายในการควบคุมระบบสี่ถัง. (Effect of Delay Time to
 Control Performance of Model Predictive Controller in Control of Quadruple
 Tank System) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.สุรเทพ เขียวหอม, 159 หน้า.

เนื่องจากมีความต้องการให้กระบวนการอุตสาหกรรมดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ
 จึงมีการพัฒนาตัวควบคุมขั้นสูงขึ้น โดยตัวควบคุมขั้นสูงซึ่งถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางก็คือ
 ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย แต่สิ่งหนึ่งที่มีอยู่ในกระบวนการควบคุมก็คือเวลาหน่วง
 ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาต่อกระบวนการควบคุมได้ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงปรับปรุงเพิ่ม
 เวลาหน่วงอิสระในระบบสี่ถัง เพื่อศึกษาผลของเวลาหน่วงต่อสมรรถนะการควบคุมของ
 ตัวควบคุมในระบบสี่ถัง โดยได้ทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลอง
 ในการทำนาย กับตัวควบคุมพีไอดี ในการควบคุมระดับของของเหลวในระบบควบคุมสี่ถัง
 ให้อยู่ที่ค่าเป้าหมาย ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำ
 ทำนายมีสมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่า โดยพิจารณาจากค่าผลรวมของความผิดพลาด
 สัมบูรณ์ของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายมีค่าน้อยกว่าตัวควบคุมพีไอดี

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อนิติ.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2553

5171486521 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : MODEL PREDICTIVE CONTROL/QUADRUPLE TANK/DELAY TIME

CHAKKRIT TOUCHKAEWKORNPINT : EFFECT OF DELAY TIME TO
CONTROL PERFORMANCE OF MODEL PREDICTIVE CONTROLLER IN
CONTROL OF QUADRUPLE TANK SYSTEM. ADVISOR: ASST.
PROF.SOORATHEP KHEAWHOM, Ph.D., 159 pp.

Due to the need for industrial process to be operated efficiently, there is a development in advanced process control and the one which is widely used is Model Predictive Controller (MPC). One problem that always be with the process control is time delay, therefore in this research, we improved the independent time delay in the quadruple tanks system (QTS) to study the effect of the delay on performance of the controller. In our experiment, we controlled the liquid level in QTS and compared the result of the system which uses MPC with the one using PID controller. The results show that MPC has better performance than PID controller based on considering the integral of absolute error (IAE).

Department :Chemical Engineering..... Student's Signature

Field of Study : ...Chemical Engineering... Advisor's Signature

Academic Year : ..2010.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม เป็นอย่างสูงที่คอยให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี และได้อนุเคราะห์รับเป็นที่ปรึกษา ทั้งยังให้คำแนะนำ คำปรึกษา และแสดงข้อคิดเห็นต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการวิจัยและการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนตรวจทาน และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี อาจารย์ ดร.กษิติศ หนูทอง อาจารย์ ดร. วีรยุทธ เลิศบำรุงสุข ที่กรุณาสละเวลามาร่วมเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ทั้งยังให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับงานวิจัยนี้ ทำให้งานวิจัยมีคุณภาพมากขึ้น

ขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่และรุ่นน้องและบุคคลอื่นที่ไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้ สำหรับข้อแนะนำและกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดาที่ให้กำเนิด ทั้งยังเป็นแรงบันดาลใจอันยิ่งใหญ่และให้ความช่วยเหลือสนับสนุนผู้เขียนในทุกๆ ด้าน สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณภรรยาและบุตรที่กำลังจะถือกำเนิด ที่คอยเป็นกำลังใจตลอดเวลาจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

อนึ่ง หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีคุณค่าและเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาค้นคว้าของผู้สนใจ ผู้เขียนขออุทิศให้บุพการี ผู้มีพระคุณทุกท่าน และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ส่วนข้อผิดพลาดบกพร่องใดๆ ผู้เขียนขอน้อมรับไว้แต่ผู้เดียว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย.....	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการระบบสี่ถัง.....	8
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวหน่วงเวลา.....	9
3. ทฤษฎี.....	10
3.1 การควบคุมกระบวนการ (Process Control).....	10
3.2 โครงสร้างการควบคุม (Control Configuration).....	11
3.2.1 การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control).....	11
3.2.2 การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feedforward Control).....	12
3.2.3 การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าและป้อนกลับ (Feedforward and Feedback Control).....	12
3.2.4 การควบคุมแบบชั้นลำดับ (Cascade Control).....	13
3.3 ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller).....	14
3.3.1 การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control).....	14

บทที่	หน้า
3.3.2 การควบคุมปริพันธ์ (Integral Control).....	15
3.3.3 การควบคุมอนุพันธ์ (Derivative Control).....	15
3.4 ตัวควบคุมที่ใช้แบบจำลองในการทำนาย (Model Predictive Control).....	16
3.4.1 โครงสร้างของกระบวนการของตัวควบคุมที่ใช้แบบจำลองในการทำนาย	17
3.4.2 ส่วนประกอบของตัวควบคุมที่ใช้แบบจำลองในการทำนาย.....	19
3.4.3 สมการแบบจำลองของกระบวนการ.....	19
3.4.4 ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective function).....	23
3.4.5 ขอบเขตของตัวแปรปรับและขอบเขตของตัวแปรสถานะ.....	25
3.5 เวลาหน่วง (Delay Time).....	26
3.6 การวัดสมรรถนะ (Performance Measures).....	27
4. วิธีดำเนินการวิจัย.....	29
4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยกระบวนการระบบสี่ถึง.....	29
4.1.1 ชุดการทดลองกระบวนการระบบสี่ถึง.....	29
4.1.2 อุปกรณ์เชื่อมต่อข้อมูล.....	33
4.1.3 ค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการระบบสี่ถึง.....	35
4.2 การสร้างแบบจำลองของระบบสี่ถึง.....	40
4.2.1 การดูลมวลาสาร.....	40
4.2.2 การทำให้เป็นเชิงเส้น (Linearization).....	45
4.3 กระบวนการทดลองระบบสี่ถึง.....	47
4.4 ตัวควบคุม.....	49
4.4.1 ตัวควบคุมแบบพีไอดี.....	49
4.4.2 การทดสอบ (Relative Gain Array, RGA).....	50
4.4.3 ตัวควบคุมที่ใช้แบบจำลองในการทำนาย.....	55
5. ผลการทดลอง.....	58
5.1 กรณีการควบคุมระดับของของเหลวในถังที่ 1 กับถังที่ 3 ที่ไม่มีเวลาหน่วง.....	59
5.2 กรณีการควบคุมระดับของของเหลวในถังที่ 1 กับถังที่ 3 ที่มีเวลาหน่วง 20 วินาที	61
5.3 กรณีการควบคุมระดับของของเหลวในถังที่ 1 กับถังที่ 3 ที่มีเวลาหน่วง 60 วินาที	63
5.4 กรณีการควบคุมระดับของของเหลวในถังที่ 1 กับถังที่ 3 ที่มีเวลาหน่วง 120 วินาที	65
5.5 กรณีการควบคุมระดับของของเหลวในถังที่ 2 กับถังที่ 4 ที่ไม่มีเวลาหน่วง.....	67

บทที่	หน้า
5.6 กรณีการควบคุมระดับของของเหลวในถังที่ 2 กับถังที่ 4 ที่มีเวลาหน่วง 20 วินาที	69
5.7 กรณีการควบคุมระดับของของเหลวในถังที่ 2 กับถังที่ 4 ที่มีเวลาหน่วง 60 วินาที	71
5.8 กรณีการควบคุมระดับของของเหลวในถังที่ 2 กับถังที่ 4 ที่มีเวลาหน่วง 120 วินาที	73
6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	75
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	75
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	80
รายการอ้างอิง.....	81
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง.....	85
ภาคผนวก ข การเขียนคำสั่งโปรแกรม Matlab.....	133
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	159

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	ค่ารากที่สองของความสูงและอัตราการไหลออกของน้ำที่ได้จากการคำนวณ ในถังควบคุมที่ 1, 2, 3 และ 4.....	36
4.2	ความชันและค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วของวาล์ว 1, 2, 3 และ 4.....	39
4.3	อัตราการไหลของน้ำผ่าน Flow meter ต่อปริมาณการเปิด Control Valve (U)..	39
4.4	ค่าสัมประสิทธิ์การเปิด Control Valve1 ต่ออัตราการไหลของน้ำ.....	40
4.5	ค่าสัมประสิทธิ์การเปิด Control Valve2 ต่ออัตราการไหลของน้ำ.....	40
4.6	ค่าพารามิเตอร์ของการทดลองระบบสี่ถังที่สถานะอยู่ตัว.....	44

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
3.1	แผนภาพการควบคุมแบบป้อนกลับ.....	11
3.2	แผนภาพการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า.....	12
3.3	แผนภาพการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าและป้อนกลับ.....	13
3.4	แผนภาพการควบคุมแบบชั้นลำดับ.....	14
3.5	โครงสร้างของการควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย.....	17
3.6	การหาค่าตัวแปรปรับลวงหน้า.....	18
3.7	แผนภาพการควบคุมโดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นแบบจำลอง.....	21
3.8	แผนภาพของการควบคุมโดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นแบบจำลองพร้อมด้วย สังเกต.....	21
4.1	กระบวนการของระบบสี่ถัง.....	29
4.2	ถังควบคุมระดับน้ำ.....	30
4.3	อุปกรณ์วัดระดับน้ำ (Pressure Transmitter).....	30
4.4	วาล์วควบคุม (Control Valve).....	31
4.5	มิเตอร์วัดปริมาณน้ำ (Flow meter).....	31
4.6	ปั้มน้ำแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Pump).....	32
4.7	วาล์ว (Valve).....	33
4.8	อุปกรณ์รับและส่งข้อมูล DAQ รุ่น NI USB-6008.....	34
4.9	เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	34
4.10	กราฟระหว่างอัตราการไหลและรากที่สองของความระดับน้ำในถังที่ 1.....	37
4.11	กราฟระหว่างอัตราการไหลและรากที่สองของความระดับน้ำในถังที่ 2.....	37
4.12	กราฟระหว่างอัตราการไหลและรากที่สองของความระดับน้ำในถังที่ 3.....	38
4.13	กราฟระหว่างอัตราการไหลและรากที่สองของความระดับน้ำในถังที่ 4.....	38
4.14	ความสัมพันธ์ Ciancone ที่ใช้ปรับตัวควบคุมไอ ในรูปไร้หน่วย.....	50
5.1	กระบวนการของระบบสี่ถัง.....	58
5.2	ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 1 ของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย และตัวควบคุมแบบพีไอดี.....	59

ภาพที่		หน้า
6.6	ค่าIAE ของการควบคุมระดับของของเหลวถังที่ 4 ด้วยตัวควบคุมซึ่งใช้ แบบจำลองในการทำนายและตัวควบคุมแบบพีไอดี.....	79

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาและปรับปรุงกระบวนการผลิตกันเป็นอย่างมาก ทั้งนี้ เพราะต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้น ความต้องการเพิ่มกำลังการผลิต รวมถึงความต้องการลดปริมาณของเสียจากการผลิตที่อาจก่อให้เกิดมลภาวะซึ่งผลของการปรับปรุงกระบวนการผลิตนั้น มักจะส่งผลให้กระบวนการมีความสลับซับซ้อนมากขึ้นและตัวแปรกระบวนการจะมีปฏิสัมพันธ์ภายในต่อกันอย่างมาก เช่น การนำสายขาออกจากกระบวนการเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับสายป้อนเข้า ซึ่งจะเห็นว่าอุณหภูมิของสายขาออกนั้นจะส่งผลย้อนกลับไปยังอุณหภูมิของสายป้อนเข้า อีกทั้งในกระบวนการดังกล่าว โดยทั่วไปจะเป็นระบบแบบอินพุท-เอาต์พุทหลายตัว (Multiple Input- Multiple Output, MIMO) ทำให้ไม่ง่ายนักที่จะทำการควบคุมด้วยวิธีแบบดั้งเดิม เพื่อให้ได้สมรรถนะของการควบคุมตามต้องการดังนั้น เพื่อให้การควบคุมกระบวนการเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ จึงจำเป็นต้องพัฒนาตัวควบคุมให้มีสมรรถนะสูงเพื่อสามารถควบคุมตัวแปรกระบวนการให้เข้าสู่ค่าเป้าหมาย (Set point) ได้อย่างรวดเร็วแม่นยำ

ในปี ค.ศ.1939 ได้มีการนำตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller) มาใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรม โดยใช้ในกระบวนการที่มีลักษณะเป็นแบบอินพุท-เอาต์พุทตัวเดียว (Single Input-Single Output, SISO) ซึ่งให้สมรรถนะการควบคุมที่ดี แต่ตัวควบคุมแบบพีไอดี ก็มีขีดจำกัดหลายอย่าง เช่น ตัวควบคุมแบบพีไอดีไม่สามารถนำมาใช้ในการควบคุมระบบที่มีตัวแปรหลายตัว (Multivariable Systems) ได้ ดังนั้น จึงมีการพัฒนาตัวควบคุมซึ่งให้สมรรถนะการควบคุมที่ดีในการควบคุมกระบวนการที่มีความสลับซับซ้อนมากๆ และกระบวนการที่ตัวแปรปฏิสัมพันธ์ต่อกันได้ ต่อมาจึงมีการพัฒนาและนำเทคโนโลยีการควบคุมกระบวนการขั้นสูงมาใช้

ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย (Model Predictive Controller , MPC) เป็นตัวควบคุมกระบวนการขั้นสูงที่ดีมากประเภทหนึ่ง โดยเป็นเทคนิคที่อาศัยแบบจำลองและประยุกต์ใช้การหาค่าเหมาะที่สุดเพื่อคำนวณค่าตัวแปรปรับที่เหมาะสม และนำไปใช้ควบคุมตัวแปรควบคุมให้อยู่ที่ค่าเป้าหมายที่ต้องการ โดยตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายนี้มีความสามารถในการจัดการกับข้อจำกัดต่างๆ ของระบบ ตลอดจนจัดการกับระบบที่มีหลายตัวแปรได้ ดังนั้น จึงมีการนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย โดยส่วนใหญ่

จะใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี นอกจากนั้นยังมีการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมอาหารและเคมีอีกด้วย

กระบวนการที่กล่าวมาข้างต้นส่วนใหญ่เป็นกระบวนการที่ไม่คิดเวลาหน่วง (Delay time) โดยเรากำหนดให้ว่าทันทีที่ตัวแปรขาเข้ามีการเปลี่ยนแปลง จะเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับตัวแปรขาออกเช่นกัน ซึ่งข้อกำหนดนี้ไม่จริงเสมอไปในทุกกรณี โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่มีการขนส่งหรือถ่ายโอนปริมาณใดๆ จากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งซึ่งต้องใช้เวลาในการขนย้าย การเปลี่ยนแปลงของปริมาณดังกล่าวจะไม่ปรากฏผลขึ้นทางด้านตัวแปรขาออก จนกระทั่งปริมาณดังกล่าว เคลื่อนมาถึงทางขาออก โดยทั่วไปเวลาหน่วงคือ เวลาที่ใช้ในการขนส่งหรือถ่ายโอนปริมาณ หรือข้อมูลไปยังกลไกการตอบสนองของกระบวนการ

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาสมรรถนะของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย โดยเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยมุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของเวลาหน่วงที่มีต่อสมรรถนะของตัวควบคุม ระบบที่ใช้ในการศึกษานี้คือ ชุดทดลองระบบสี่ถัง ซึ่งเป็นระบบที่มีความซับซ้อนและมีปฏิสัมพันธ์ของตัวแปรภายใน โดยในการจำลองเวลาหน่วงนั้นจะกำหนดเวลาหน่วงสัญญาณที่ส่งจากตัวควบคุมไปยังวาล์วควบคุม ผลที่ได้จากการศึกษาจะสามารถนำไปใช้ในการพัฒนาความรู้ด้านการควบคุมกระบวนการต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลของเวลาหน่วงที่มีต่อสมรรถนะของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย
- 2) เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย กับตัวควบคุมแบบพีไอดี ในการควบคุมชุดทดลองของระบบสี่ถังซึ่งมีเวลาหน่วงขนาดต่างๆ กัน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ศึกษาการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย และตัวควบคุมแบบพีไอดีในระบบการทดลองระบบสี่ถังซึ่งมีเวลาหน่วงขนาดต่างๆ กัน
- 2) ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย และตัวควบคุมแบบพีไอดีพัฒนาโดยใช้โปรแกรมแมทแลป (MATLAB)

3) ประยุกต์ใช้ตัวควบคุมที่ศึกษาในระบบการทดลองระบบสี่ถัง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ความสัมพันธ์ของสมรรถนะการควบคุมกับขนาดของเวลาหนึ่งของตัวควบคุม
ซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1) ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยเกี่ยวกับตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย
- 2) ศึกษากระบวนการของระบบสี่ถัง
- 3) ศึกษาการใช้โปรแกรมแมทแลป (MATLAB) และการใช้อุปกรณ์เชื่อมต่อต่างๆ
- 4) เขียนโปรแกรมตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย และตัวควบคุมแบบพีไอดี และเชื่อมต่อตัวควบคุมกับระบบสี่ถัง
- 5) ทดสอบตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย และตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยปรับเวลาหนึ่งตามขนาดที่ศึกษา
- 6) วิเคราะห์และเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม
- 7) สรุปผลและจัดทำรายงานวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยต่างๆ อันเป็นแหล่งข้อมูลที่สำคัญสำหรับศึกษาทฤษฎีและแนวทางในการทำวิจัย โดยสามารถแบ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องออกเป็น 3 เรื่อง คือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายงานวิจัย งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการระบบสั่งถึง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวหน่วงเวลา

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย

จากการรวบรวมพบว่าระบบควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายมีพื้นฐานจากระบบควบคุมแบบออปติมัล (Optimal Control) และมีการพัฒนาเรื่อยมา จนกระทั่งในปี ค.ศ.1980 Cutler และคณะ ได้นำหลักการของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายมาใช้งานในการควบคุมหน่วยการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Cracking Unit) โดยพัฒนาตัวควบคุมแบบไดนามิกเมตริกซ์ (Dynamic Matrix Control) ขึ้นจากการนำลักษณะทางไดนามิกของกระบวนการมาสร้างเป็นเมตริกซ์ และใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรปรับที่ทำให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด ทำให้แก้ปัญหาการควบคุมแบบหลายตัวแปร ซึ่งมีผลต่อกันภายในระบบ ซึ่งไม่สามารถแก้ปัญหาการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีได้ [1]

Prett และ Gillette [2] ในปี ค.ศ.1980 ได้ประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบไดนามิกเมตริกซ์กับเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดคตะไลติกแครกกิง อัลกอริทึมของการควบคุมแบบไดนามิกเมตริกซ์ใช้แบบจำลองของการตอบสนองแบบสแต็ปแบบเชิงเส้น โดยค่าเอาต์พุตของกระบวนการในขนาดที่ถูกกำหนดโดยความพยายามที่จะให้เอาต์พุตของกระบวนการเข้าใกล้ค่าเป้าหมายที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ และค่าอินพุตที่เหมาะสมสามารถคำนวณได้จากคำตอบของการหาค่ากำลังสองที่น้อยที่สุด ซึ่งหลักการดังกล่าวได้นำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของเตาหลอมโลหะ และปรากฏผลว่ามีสมรรถนะในการควบคุมดีกว่าการควบคุมแบบพีไอดีธรรมดา โดยส่วนของการออปติไมซ์ขอบเขตจำกัดใช้เทคนิคการโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming , LP)

อาจกล่าวโดยสรุปได้ว่า การควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายรุ่นแรกมีอยู่ในอัลกอริทึมโมเดลอีวิริสติกและไดนามิกเมตริกซ์ ซึ่งเป็นพื้นฐานในการออกแบบการควบคุมในอุตสาหกรรม ต่อมาได้มีการพัฒนาอัลกอริทึมของตัวควบคุมแบบไดนามิกเมตริกซ์ ในรูปแบบ

ควอดราติกโปรแกรม (Quadratic Program, QP) เรียกว่า ควอดราติกไดนามิกเมตริกซ์ (Quadratic Dynamic Matrix Control, QDMC) โดยขอบเขตจำกัดต่างๆ จะปรากฏอย่างชัดเจนในอัลกอริทึมสำหรับการควบคุม ซึ่งรูปแบบเหมือนกับการควบคุมแบบไดนามิกเมตริกซ์ แตกต่างกันเพียงการคำนวณค่าอินพุตที่เหมาะสมจะเป็นค่าคำตอบของควอดราติกโปรแกรม

Clark และ Scattolini [3] ในปี 1991 ได้พัฒนาอัลกอริทึมการซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายเป็นพื้นฐาน โดยเจเนอไรซ์พรีดิกทีฟ (Generalize Predictive) เป็นอัลกอริทึมที่ได้รับการยอมรับอย่างมาก เนื่องจากสามารถควบคุมระบบได้ดี และมีความทนทาน ทั้งยังลดการคำนวณผลตอบสนองของการควบคุม และสามารถแก้ไขปัญหาการควบคุมกระบวนการต่างๆ ที่ไม่มีเฟสต่ำสุด (non-minimum phase)

Alex Zheng [4] ในปี 1997 ได้แสดงให้เห็นว่าเสถียรภาพของระบบการควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายที่มีขอบเขตสามารถรับประกันได้โดยวิธีถ่วงน้ำหนักการแปรผันเวลา โดยการรวมสองอัลกอริทึมการควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายคือ Infinite Horizon และการควบคุมที่มีขอบเขตสุดท้าย พร้อมกับรับประกันเสถียรภาพ ซึ่งวิธีถ่วงน้ำหนักการแปรผันเวลาอาจมีประโยชน์ในการวิเคราะห์คุณสมบัติเสถียรภาพของการควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายสำหรับระบบที่แปรผันตามเวลา ได้ดีเทียบเท่ากับระบบเชิงเส้นที่ไม่แน่นอน

ศราวุธ [5] ในปี 1998 ได้ประยุกต์ใช้การควบคุมแบบซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายบน MATLAB สำหรับควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบแบตช์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อน ทั้งในกรณีปกติ และในกรณีที่เกิดความผิดพลาดของค่าคงที่พารามิเตอร์ และของกระบวนการ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ค่ามวลรวมในเครื่องปฏิกรณ์ อัตราการเกิดปฏิกิริยา และค่าความร้อนของการเกิดปฏิกิริยา โดยเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายกับระบบควบคุมเจเนอริกโมเดล โดยมีคาลมานฟิลเตอร์ประมาณค่าความร้อนที่เกิดในเครื่องปฏิกรณ์ให้กับระบบควบคุมทั้งสอง ผลการวิจัยปรากฏว่าการควบคุมอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ ระบบควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายสามารถควบคุมได้ดีเทียบเท่ากับระบบควบคุมเจเนอริกโมเดลภายใต้การปรับจูนที่ดี

Loeblien และ Perkin [6] ในปี 1999 ได้ศึกษาเปรียบเทียบโครงสร้างของ Integrated Online Process Optimization และ Regulatory Control System Based เชิงเศรษฐศาสตร์วิเคราะห์ของหน่วยฟลูอิดแคตะไลติกในโรงแยกแก๊ส ซึ่งในระบบ

มีความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์และมีตัวแปรบกวน เช่น คุณภาพของอัตราสายป้อนกลับ และ ความต้องการของตลาดเป็นต้น โดยกำหนดให้ Regulatory Control System Based เป็น MPC

ปริญญาพร รักสวิต [7] ในปี 1999 ในงานวิจัยได้นำเสนอการประยุกต์ใช้ การควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย สำหรับการควบคุมอุณหภูมิและความเข้มข้นของ เครื่องปฏิกรณ์เคมีถึงกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนอันดับหนึ่งแบบผันกลับได้ ซึ่งแสดงพฤติกรรมที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง โดยงานวิจัยดังกล่าวได้ออกแบบเครื่องควบคุมซึ่งใช้ แบบจำลองในการทำนาย ที่ใช้ร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ ซึ่งจากผลการจำลองระบบควบคุมแสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายที่ใช้ร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ให้สมรรถนะ และความทนทานที่ดีกว่าเครื่องควบคุมแบบพีไอดีในการควบคุมอุณหภูมิและความเข้มข้นของ เครื่องปฏิกรณ์เคมีถึงกวนแบบต่อเนื่อง

อธิป ถายานวัตร [8] ในปี 2002 ในงานวิจัยได้ทำการสร้างชุดทดลองและ ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายสำหรับควบคุมระดับของเหลวแบบเฉลี่ยซึ่งมักใช้เป็น ดังพักที่เชื่อมระหว่างหน่วยปฏิบัติการเพื่อวัตถุประสงค์ทำให้การเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหล เป็นไปได้อย่างรวดเร็ว โดยได้ทำการทดสอบกับตัวรบกวนของระบบ และทำการควบคุมด้วยวิธีการ ปรับค่าพารามิเตอร์ตามปกติ และการกำหนดวิธีรูปกรวย อีกทั้งทำการทดสอบความทนทานของ ตัวควบคุมโดยเปลี่ยนช่วงการควบคุมให้แตกต่างจากจุดที่ทำการหาแบบจำลอง ซึ่งสรุปได้ว่าการควบคุมของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายสามารถทำงานได้เป็นไปตามแนวทางที่ ต้องการได้เป็นอย่างดี และทำการเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีและพีไอ

Biao Huang และคณะ [9] ในปี 2003 ได้เสนอบทบาทของการกรองข้อมูลก่อน ในการระบุและตรวจสอบของแบบจำลอง ซึ่งปรากฏว่าแบบจำลองที่ทำให้ความผิดพลาดจาก การทำนาย multistep ลงน้อยที่สุด สามารถระบุหรือตรวจสอบโดยการกรองข้อมูล โดยใช้วิธีการ กรองข้อมูลที่แน่นอนก่อนแล้ว ใช้วิธีการทำนายความผิดพลาดกับข้อมูลที่กรองแล้ว อัลกอริธึม ที่พัฒนานี้ได้ถูกยืนยันความถูกต้องผ่านการจำลองได้ดีพอๆกับการใช้งานอุตสาหกรรม

Ramaswamy และคณะ [10] ในปี 2005 กล่าวว่าที่ผ่านมามีการควบคุม เครื่องปฏิกรณ์แบบชีวภาพเป็นสิ่งที่สำคัญมาก เนื่องจากปัญหาในการควบคุมพฤติกรรมความไม่เป็น เชิงเส้นอย่างยิ่งของระบบชีวภาพ การควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายจึงถูกนำมาใช้ในการ ควบคุมถึงหมักแบบกวนแบบต่อเนื่องที่ไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อให้ถึงสภาวะนิ่งซึ่งไม่มีความเสถียร ซึ่งเป็นจุดเซตพอยท์ที่ต้องการ ในงานวิจัยได้ศึกษาผลของการแปรผัน predictor horizon ซึ่งเป็น

พารามิเตอร์ที่สำคัญในการปรับแต่งตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายขณะที่ predictor horizon เพิ่มขึ้น เส้นทางการจะออกไปจากจากสถานะนิ่งตลอดระยะเวลาดึงดูด (attractor) นอกจากนี้ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนตัวแปรปรับและพฤติกรรมของระบบสำหรับสถานะเริ่มต้นที่ต่างกัน จากผลความไม่เป็นเชิงเส้นที่เกี่ยวข้องกับพลวัตของเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพยังถูกวิเคราะห์ด้วย ซึ่งผลการศึกษพบว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบชีวภาพที่ควบคุมสามารถแสดงพฤติกรรมไม่เชิงเส้นได้ง่ายและแม้แต่การควบคุมที่ออกแบบอย่างดีอาจให้ประสิทธิภาพที่ต่ำมาก

Adrian และ William [11] ในปี 2005 ได้ใช้ตัวควบคุมป้อนกลับหลายตัวแปรเพื่อลดการแปรผันในการไหลและแรงดันกลับที่เกี่ยวข้องกับสองหน่วยแยกในอุตสาหกรรม การผลิตน้ำมันเพื่อการบริโภค ทำให้ได้ตัวปฏิบัติการพร้อมขั้นตอนเพื่อเพิ่มผลผลิตกระบวนการ โดยไม่ลดคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งชี้ชัดจำกัดตัวกระตุ้นเป็นการพิจารณาพื้นฐานในการออกแบบตัวควบคุมเนื่องจากอัตราการเพิ่มผลผลิตต้องอาศัยตัวกระตุ้นให้ปฏิบัติการเข้าใกล้ขีดจำกัดของพวกตัวกระตุ้น และการใช้การควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย recentred barrier ฟังก์ชันในงานนี้ทำให้ได้รับผลลัพธ์ที่ดี

Bingfeng และ Yash [12] ในปี 2008 กล่าวว่ากระบวนการทางเคมีส่วนมากไม่เป็นเชิงเส้น แต่เพราะความง่าย อัลกอริธึมการควบคุมเชิงเส้นจึงถูกใช้สำหรับควบคุมกระบวนการที่ไม่เป็นเชิงเส้น ในการศึกษาที่พิจารณาใช้อัลกอริธึมควบคุมแบบไดนามิกเมตริกซ์และอัลกอริธึมควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายอย่างง่าย สำหรับการควบคุมกระบวนการ neutralization ความไม่เป็นเชิงเส้นถูกจัดการโดยแบ่งพื้นที่ปฏิบัติการให้เป็นพื้นที่ย่อยและสลับรูปแบบการควบคุม ในขณะที่กระบวนการย้ายจากพื้นที่ย่อยหนึ่งไปยังพื้นที่ย่อยอื่น การแก้ไขอย่างง่ายสำหรับอัลกอริธึมควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย จึงถูกนำเสนอเพื่อจัดการสลับรูปแบบการควบคุม ผลของการจำลองและการทดลองแสดงให้เห็นว่าการแก้ไขสามารถทำให้ได้ การปรับปรุงที่สำคัญในการควบคุมกระบวนการที่ไม่เป็นเชิงเส้น

Adetola และ Guay [13] ในปี 2010 ได้นำเสนอแนวทางการออกแบบตัวควบคุมที่รวม Real-Time Optimization (RTO) และซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย สำหรับการควบคุมระบบไม่เชิงเส้นภายใต้ขอบเขตไม่แน่นอน โดยสมมติว่าฟังก์ชันทางเศรษฐศาสตร์เป็นฟังก์ชันของสถานะระบบขอบเขตโดยกำหนดพารามิเตอร์จากพารามิเตอร์ไม่ทราบค่าและเวลาที่แตกต่างกัน ขณะที่วัตถุประสงค์การออกแบบตัวควบคุมเพื่อระบุค่าตัวแปรพร้อมกับควบคุมระบบให้ได้ จุดปฏิบัติการที่ดีที่สุดโดยใช้วิธีการอาศัยชุดพารามิเตอร์ที่ใช้ประมาณค่าประจำใหม่และ

ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายที่ทนทาน เพื่อนำไปสู่ผลของค่าความผิดพลาดในการประมาณค่าพารามิเตอร์

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการระบบสี่ถึง

Gatzke และคณะ [14] ในปี 2000 ได้ทำการศึกษาและพัฒนาความรู้ด้านระบบควบคุมขั้นสูง โดยทำการทดสอบกับการควบคุมระดับของของเหลวในระบบสี่ถึงซึ่งแบ่งวิธีการศึกษาออกเป็น 2 แบบ คือ 1. ตัวควบคุมแบบอินเทอร์เน็ลโมเดล 2. ตัวควบคุมแบบไดนามิกเมตริกซ์ เปรียบเทียบกัน

Raff และคณะ [15] ในปี 2006 ได้กล่าวถึงทฤษฎีที่รู้จักกันดีที่ว่า ขอบเขตความเสถียรในตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายที่ไม่เป็นเชิงเส้นเป็นสิ่งจำเป็นในการรับประกันความเสถียรของลูบปิด จึงได้ทำการศึกษาทดลองควบคุมระดับของของเหลวในระบบสี่ถึงใน 2 กรณี คือ Zero Terminal State Constraint และ Quasi-Infinite Horizon โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบ เรื่องของเวลาที่ใช้ในการควบคุม และสมรรถนะของการควบคุม ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่า Quasi-Infinite Horizon ใช้เวลาในการควบคุม และให้สมรรถนะของการควบคุมที่ดีกว่า Zero Terminal State Constraint

Merchango และ Doyle [16] ในปี 2007 ได้นำเสนอกรอบการทำงาน Distributed Model Predictive Control (DMPC) ซึ่ง DMPC ถูกนำมาสาธิตในการทดลองควบคุมระดับของของเหลวระบบสี่ถึง โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสมรรถนะของ DMPC ดีกว่าตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายชนิด completely decentralized และเทียบเท่าตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายชนิด fully centralized

Pinak Pani Biswas และคณะ [17] ในปี 2009 ได้ทำการทดสอบอัลกอริธึม Sliding Mode เปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอในระบบสี่ถึงที่มีช่วงของการปรับพารามิเตอร์ที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพแคบ และในระหว่างการทดลองเขาได้ใส่สภาวะขอบ (Boundary Layer) ที่บริเวณขอบซึ่งส่งผลให้สามารถลด chattering ได้ นอกจากนี้การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมยังช่วยเพิ่มความทนทานและเข้าสู่ค่าเซตพอยท์ได้อย่างยอดเยี่ยม

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวหน่วงเวลา

Garcia และคณะ [18] ในปี 1989 ได้เสนออัลกอริทึมการควบคุมแบบอินเทอร์วัลโมเดล ซึ่งการควบคุมแบบอินเทอร์วัลโมเดลเป็นการควบคุมสำหรับกระบวนการแบบเชิงเส้นที่มีตัวแปรเข้าออกตัวแปรเดียว (Single Input Single Output, SISO) หรือมีตัวแปรเข้าออกหลายตัวแปร (Multi Input Multi Output, MIMO) ในเบื้องต้นการควบคุมแบบอินเทอร์วัลโมเดลถูกใช้ในการควบคุมระบบต่างๆ ที่มีตัวหน่วงเวลา

Shinsky [19] ในปี 2001 ได้กล่าวถึงตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายถูกนำมาใช้สำเร็จในการควบคุมเครื่องผลิตกระดาษและกระบวนการอื่นๆ ที่มีอิทธิพลของตัวหน่วงเวลากลุ่มของกระบวนการสำคัญที่มีอิทธิพลของตัวหน่วงเวลาเช่นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและหม้อต้มน้ำเป็นตัวควบคุมพีไอดีที่มีการชดเชยการหน่วงเวลา ที่มีหน้าที่คล้ายกับตัวควบคุมแบบออสซิลโลแกรมจะมีประสิทธิภาพเป็นสองเท่าตัวเมื่อเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอดีทั่วไปในกระบวนการดังกล่าว และในงานวิจัยแสดงถึงการประยุกต์ใช้เพื่อควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำ

Oliveira และคณะ [20] ในปี 2009 ใช้ทฤษฎีบท Hermite Biehler สร้างผลในการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดี ในระบบที่มีตัวหน่วงเวลา อาศัยคุณสมบัติของการพัชพันความถี่สูงและกำหนดการเชิงเส้นทำให้ได้กลุ่มของตัวควบคุมพีไอดีที่เสถียร ซึ่งเป็นที่ทราบกันมานานแล้วว่าผลของการใช้ตัวควบคุมพีไอดี จะต้องพึ่งพาแก่สมการชั้นสูง บทความนี้จึงขยายผลของการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี ในระบบที่มีตัวหน่วงอย่างง่ายไปยังระบบที่มีตัวหน่วงขนาดใหญ่

Shneiderman และ Palmor [21] ในปี 2010 ได้กล่าวถึงการปฏิบัติการกระบวนการสี่ถึงที่รู้จักกันดี กระบวนการดังกล่าวได้รับการถ่ายทอดในห้องปฏิบัติการของสถาบันหลายแห่งทั่วโลก ในฐานะที่มีความเหมาะสมเพื่อแสดงแนวคิดในการควบคุมหลายตัวแปร ในงานวิจัยนี้กระบวนการสี่ถึงได้ถูกขยายกรอบศึกษาเพื่อรวมตัวหน่วงเวลาหลายตัวแปรอิสระ และผลกระทบต่อคุณสมบัติและการควบคุมของกระบวนการสี่ถึง ตัวหน่วงเวลาจะพบมากในกระบวนการต่างๆ ซึ่งทำให้การควบคุมกระบวนการสี่ถึงน่าสนใจและท้าทาย การเพิ่มตัวหน่วงเวลาอาจนำไปสู่จำนวนที่จำกัด (finite), ไม่จำกัด (infinite) หรือ ไม่มี Non-Minimum-Phase (NMP) Zero เลย ซึ่งจำนวนดังกล่าวขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์กันของหลายตัวแปรหน่วงโดยเฉพาะ นอกจากนี้ในงานวิจัยยังได้แสดงคุณสมบัติอื่นของกระบวนการสี่ถึงที่ตัวหน่วงเวลามีทิศทาง Non-Minimum-Phase (NMP) Zero เช่น สมรรถนะการควบคุมเข้าสู่ศูนย์กลางของกระบวนการและประสิทธิภาพวงปิดในขอบเขตเวลาดำวย

บทที่ 3

ทฤษฎี

ในบทนี้จะกล่าวถึงการควบคุมกระบวนการ โครงสร้างการควบคุม หลักการของตัวควบคุมแบบพีไอดีและตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายที่ใช้ในงานวิจัยนี้ รวมถึงความรู้พื้นฐานของการควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย เช่น ข้อจำกัดของการควบคุม, สิ่งที่ต้องการสำหรับการควบคุม, โครงสร้างโดยทั่วไปของการควบคุม, หลักการพื้นฐานของการควบคุม อีกทั้งความหมายของเวลาหน่วง และการวัดสมรรถนะการควบคุมในงานวิจัย

3.1 การควบคุมกระบวนการ (Process Control)

การควบคุมกระบวนการ คือ การควบคุมตัวแปรขาออกของกระบวนการให้อยู่ที่ค่าเป้าหมายที่ต้องการ ด้วยการปรับเปลี่ยนปัจจัยภายนอกที่มีผลกระทบต่อกระบวนการ โดยในกระบวนการจะประกอบไปด้วยตัวแปรดังนี้

1) ตัวแปรขาเข้า (Input Variables) คือ ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงตัวแปรสถานะและตัวแปรขาออกของกระบวนการ ซึ่งตัวแปรขาเข้าประกอบด้วย

- ตัวแปรปรับ (Manipulated Variables) หมายถึง ตัวแปรที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ตามต้องการ เพื่อควบคุมกระบวนการให้ไปสู่สภาวะที่ต้องการ

- ตัวแปรรบกวน (Disturbance Variables) หมายถึง ตัวแปรที่ไม่สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ตามต้องการ และส่งผลให้สภาวะดำเนินงานเปลี่ยนแปลงไปจากสภาวะเดิม

2) ตัวแปรสถานะ (State Variables) หมายถึง ตัวแปรที่บอกถึงสภาวะของกระบวนการ มักเป็นตัวแปรที่อยู่ในรูปของอนุพันธ์ในแบบจำลองกระบวนการที่พัฒนาจากการดูลมวลาสารและพลังงาน

3) ตัวแปรขาออก (Output Variables) หมายถึง ตัวแปรที่บอกถึงสถานะของกระบวนการ โดยจะเปลี่ยนแปลงเมื่อตัวแปรขาเข้าเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งตัวแปรขาออกประกอบด้วย

- ตัวแปรวัดค่าได้ (Measurable Variables) หมายถึง ตัวแปรที่สามารถวัดค่าได้โดยตรง ด้วยอุปกรณ์วัด ทั้งนี้เวลาที่ใช้ในการดำเนินการวัดควรสั้นพอสำหรับการควบคุมกระบวนการแบบ Real time

- ตัวแปรวัดค่าไม่ได้ (Unmeasurable Variables) หมายถึง ตัวแปรที่ไม่สามารถหาอุปกรณ์วัดค่าได้โดยตรง หรือมีอุปกรณ์ที่สามารถวัดค่าได้แต่ต้องใช้เวลาในการประมวลผลยาวนานกว่าที่ใช้งานในระบบการควบคุมกระบวนการแบบ Real time

4) ตัวแปรควบคุม (Controlled Variables) หมายถึง ตัวแปรขาออกที่ต้องการควบคุมให้อยู่ที่ค่าเป้าหมาย

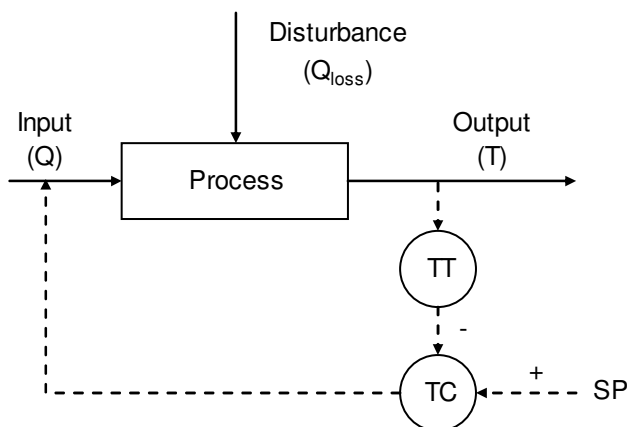
3.2 โครงสร้างการควบคุม (Control Configuration)

โครงสร้างการควบคุม คือ โครงสร้างที่ถูกจำแนกลักษณะการใช้ข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์วัดเพื่อปรับเปลี่ยนตัวแปรปรับ โครงสร้างการควบคุมมีหลายลักษณะ แต่ที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมมีดังนี้

3.2.1 การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control)

การควบคุมแบบป้อนกลับเป็นการควบคุมโดยวัดค่าตัวแปรควบคุมแล้วเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้ เพื่อคำนวณค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น จากนั้นจะคำนวณค่าตัวแปรปรับเพื่อควบคุมตัวแปรควบคุมให้ได้ตามค่าเป้าหมาย

วัด	ปรับ
ตัวแปรควบคุม (ตัวแปรขาออก)	ตัวแปรปรับ (ตัวแปรขาเข้า)

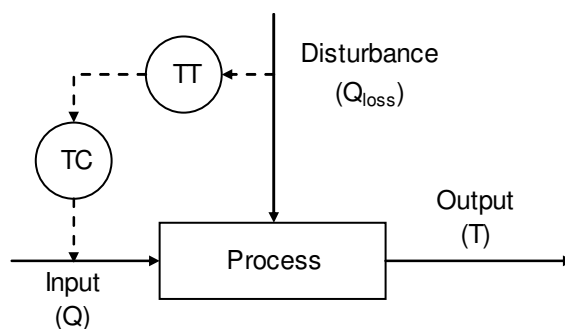


รูปที่ 3.1 แผนภาพการการควบคุมแบบป้อนกลับ

3.2.2 การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feedforward Control)

การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าเป็นการควบคุมโดยวัดค่าตัวแปรรบกวนเปรียบเทียบกับค่าตัวแปรรบกวนในอดีต แล้วปรับเปลี่ยนตัวแปรปรับโดยที่ไม่วัดตัวแปรควบคุม

วัด	ปรับ
ตัวแปรรบกวน (ตัวแปรขาเข้า)	ตัวแปรปรับ (ตัวแปรขาเข้า)

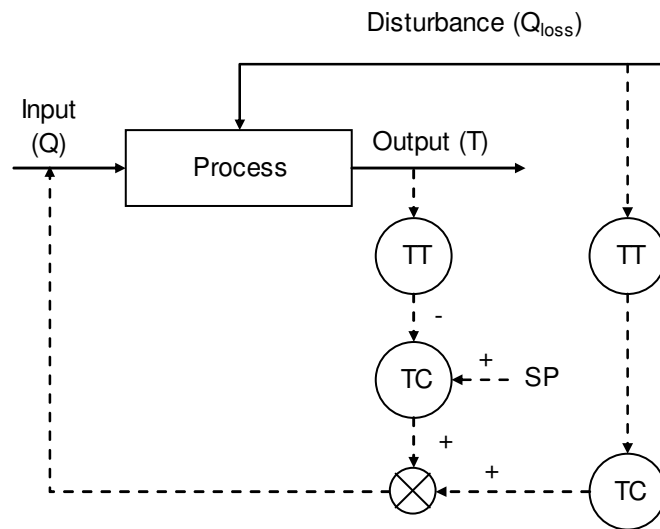


รูปที่ 3.2 แผนภาพการการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

3.2.3 การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าและป้อนกลับ (Feedforward and Feedback Control)

การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าและป้อนกลับเป็นการควบคุมที่ผสมผสานการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าและแบบป้อนกลับเข้าด้วยกันเพื่อลดข้อด้อยของทั้งสองโครงสร้าง กล่าวคือ การควบคุมแบบป้อนกลับมีความล่าช้าในการแก้ไขความผิดพลาด ส่วนการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าไม่สามารถประกันได้เสมอไปว่าตัวแปรควบคุมจะมีค่าตรงตามค่าเป้าหมาย

วัด	ปรับ
ตัวแปรรบกวน (ตัวแปรขาเข้า) และ ตัวแปรควบคุม (ตัวแปรขาออก)	ตัวแปรปรับ (ตัวแปรขาเข้า)

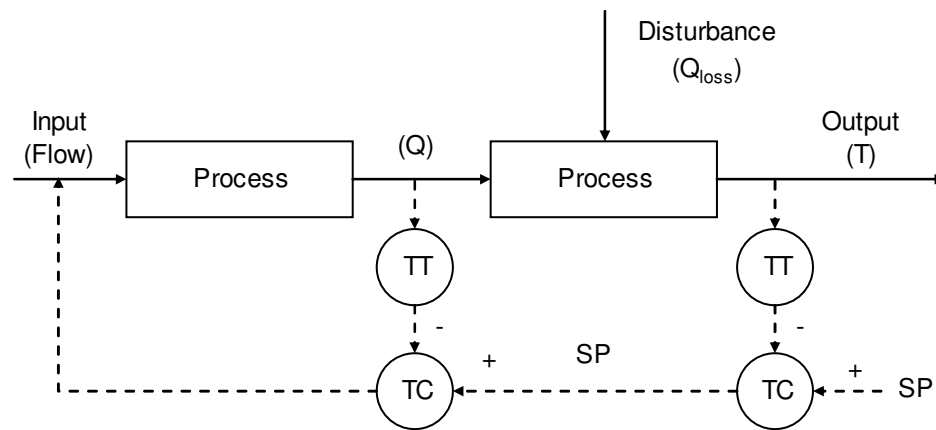


รูปที่ 3.3 แผนภาพการการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าและป้อนกลับ

3.2.4 การควบคุมแบบชั้นลำดับ (Cascade Control)

การควบคุมแบบชั้นลำดับเป็นการควบคุมที่ประกอบด้วยวงควบคุม 2 วง คือ วงควบคุมปฐมภูมิหรือวงควบคุมหลัก (Primary loop) และวงควบคุมทุติยภูมิหรือวงควบคุมรอง (Secondary loop) วงควบคุมทั้งสองนี้จะถูกจัดวางในลักษณะที่ค่าขาออกของตัวควบคุมหนึ่ง จะถูกใช้เป็นค่าเป้าหมายสำหรับตัวควบคุมอีกตัวหนึ่ง โดยทั่วไปตัวแปรขาออกจากตัวควบคุมในวงควบคุมหลักจะถูกส่งเข้ามาเป็นค่าเป้าหมายสำหรับตัวควบคุมในวงควบคุมรองเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบค่าจากอุปกรณ์วัดเพื่อคำนวณและปรับค่าตัวแปรปรับ ซึ่งจะมีผลกลับไปยังวงควบคุมหลัก

วัด	ปรับ
ตัวแปรควบคุม (ตัวแปรขาออก) (วงควบคุมหลัก)	ตัวแปรควบคุม (ตัวแปรขาออก) (วงควบคุมรอง)
ตัวแปรควบคุม (ตัวแปรขาออก) (วงควบคุมรอง)	ตัวแปรปรับ (ตัวแปรขาเข้า) (วงควบคุมรอง)



รูปที่ 3.4 แผนภาพการควบคุมแบบขั้นลำดับ

3.3 ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller)

ตัวควบคุมแบบพีไอดี มีพื้นฐานมาจากมาจากการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) เพื่อลดค่าความผิดพลาด (Error, $e(t)$) ให้เป็นศูนย์โดยที่

$$e(t) = R(t) + B(t) \quad (3.1)$$

เมื่อ $e(t)$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อน (Error)

$R(t)$ คือ ค่าเป้าหมาย (Set Point)

$B(t)$ คือ ค่าของตัวแปรควบคุม (Controlled Variable) ที่วัดได้

วิธีการควบคุมแบบพีไอดี ประกอบด้วย 3 โหมด คือ สัดส่วนหรือพี (Proportional, P) ปริพันธ์หรือไอ (Integral, I) และอนุพันธ์หรือดี (Derivative, D)

3.3.1 การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control)

การควบคุมแบบสัดส่วนหรือพีนั้น การปรับเปลี่ยนค่าเอาต์พุตตัวควบคุม (Controller Output) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความผิดพลาด ดังสมการต่อไปนี้

$$p(t) = p + K_c e(t) \quad (3.2)$$

เมื่อ $p(t)$ คือ เอาต์พุตตัวควบคุม

p คือ ค่าเบี่ยงเบนหรือค่าเอาต์พุตตัวควบคุมที่สถานะอยู่ตัว

K_c คือ อัตราการขยายตัวควบคุม (Controller Gain)

3.3.2 การควบคุมปริพันธ์ (Integral Control)

การควบคุมปริพันธ์หรือไอ จะออกแบบโดยกำหนดให้เอาต์พุตตัวควบคุมขึ้นอยู่กับค่าปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดของตัวแปรควบคุมตลอดช่วงเวลา

$$p(t) = p + \frac{K_c}{\tau_I} \int e(t) dt \quad (3.3)$$

เมื่อ $p(t)$ คือ เอาต์พุตตัวควบคุม

p คือ ค่าเบี่ยงเบนหรือค่าเอาต์พุตตัวควบคุมที่สถานะอยู่ตัว

K_c คือ อัตราการขยายตัวควบคุม (Controller Gain)

τ_I คือ เวลาปริพันธ์ (Integral Time) หรือ เวลารีเซต (Reset Time)

3.3.3 การควบคุมอนุพันธ์ (Derivative Control)

เอาต์พุตตัวควบคุมเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดของตัวแปรควบคุม ดังสมการ

$$p(t) = p + K_c \tau_D \frac{de(t)}{dt} \quad (3.4)$$

เมื่อ $p(t)$ คือ เอาต์พุตตัวควบคุม

p คือ ค่าเบี่ยงเบนหรือค่าเอาต์พุตตัวควบคุมที่สถานะอยู่ตัว

K_c คือ อัตราการขยายตัวควบคุม (Controller Gain)

τ_D คือ เวลาอนุพันธ์ (Derivative, Time)

การควบคุมแบบพีไอดีจะให้เอาต์พุตตัวควบคุมเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$p(t) = p + K_c \left[e(t) + \frac{1}{\tau_I} \int e(t) dt + \tau_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (3.5)$$

เมื่อ	$p(t)$	คือ เอาท์พุทตัวควบคุม
	p	คือ ค่าเบี่ยงเบนหรือค่าเอาท์พุทตัวควบคุมที่สถานะอยู่ตัว
	K_c	คือ อัตราการขยายตัวควบคุม (Controller Gain)
	τ_I	คือ เวลาปริพันธ์ (Integral Time) หรือ เวลารีเซต (Reset Time)
	τ_D	คือ เวลาอนุพันธ์ (Derivative, Time)

เมื่อกระบวนการแบบต่อเนื่องเบี่ยงเบนไปจากสถานะอยู่ตัว ผลการตอบสนองโดยทั่วไปของระบบที่มีเสถียรภาพจะลู่เข้าสู่ค่าที่สถานะอยู่ตัวอย่างช้าๆ (โดยที่อาจจะไม่ใช่ค่าเป้าหมายที่ต้องการ) การใช้ตัวควบคุมพีกับกระบวนการดังกล่าว จะเร่งความเร็วของผลตอบสนองให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายเร็วขึ้นและลดออฟเซตให้น้อยลง การเพิ่มพจน์ปริพันธ์เข้าไปจะช่วยกำจัดออฟเซตแต่ผลตอบสนองจะแกว่งมากขึ้น การเพิ่มพจน์อนุพันธ์เข้าไปเพื่อเร่งให้ผลตอบสนองจากการควบคุมเร็วขึ้นและแกว่งน้อยลง แต่อย่างไรก็ตาม ลักษณะของผลตอบสนองจะขึ้นอยู่กับค่า K_c , τ_I และ τ_D ที่ใช้และลักษณะของกระบวนการดังกล่าวโดยทั่วไป คือ

- การเพิ่มค่า K_c ทำให้ผลการตอบสนองเร็วขึ้น แต่ถ้าสูงเกินไปอาจทำให้ผลตอบสนองเกิดการแกว่งหรือไม่เสถียร

- การลดค่า τ_I ทำให้กำจัดออฟเซตได้ แต่ถ้าต่ำเกินไปจะทำให้ให้ผลตอบสนองรุนแรง และแกว่งมากจนไม่เสถียร

- การลดค่า τ_D ช่วยลดทั้งเวลาการตอบสนองและการแกว่ง แต่ถ้าค่าสูงมากเกินไปจะขยายสัญญาณรบกวน (Noise) และส่งผลให้การตอบสนองเกิดการแกว่งมากขึ้น

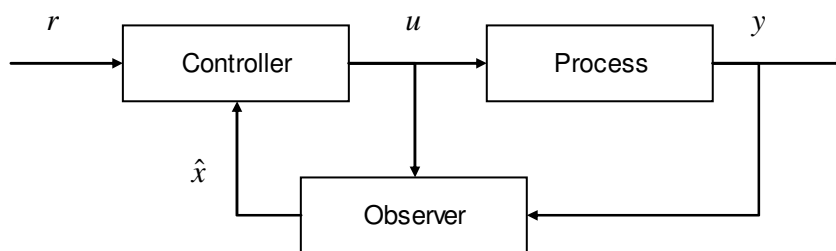
3.4 ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย (Model Predictive Control)

ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย (Model Predictive Control , MPC) เป็นตัวควบคุมที่อาศัยแบบจำลองกระบวนการสำหรับประมาณผลตอบสนองของกระบวนการ และประยุกต์ใช้ฟังก์ชันเป้าหมายในการออกแบบเพื่อคำนวณค่าตัวแปรปรับที่เหมาะสม และนำไปใช้ควบคุมตัวแปรควบคุมให้อยู่ที่ค่าเซตพอยท์ โดยแบบจำลองที่ใช้สำหรับการควบคุมมีทั้งแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น และแบบจำลองที่ไม่เป็นเส้น ซึ่งสามารถครอบคลุมข้อมูลต่างๆ ของระบบ

ทั้งที่เป็นเชิงเส้นและที่ไม่เป็นเส้นได้ รูปแบบของการควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ที่เป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลาย เช่น ตัวควบคุมแบบไดนามิกเมตริกซ์ , ตัวควบคุมแบบอินเทอร์นัลโมเดล , ตัวควบคุมแบบควอดราติกไดนามิกเมตริกซ์ และตัวควบคุมแบบเจนเนอริกโมเดล เป็นต้น ซึ่งอาศัยหลักการเดียวกันคือเป็นการควบคุมโดยอาศัยแบบจำลองในการคำนวณชุดของค่าการควบคุมในอนาคต โดยอัลกอริทึมของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย จะทำการหาค่าตัวแปรปรับใหม่ที่เหมาะสมจากค่าตัวแปรสแตตที่แทนพฤติกรรมของกระบวนการทุกครั้งที่ทำการควบคุม ทำให้ระบบควบคุมสามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในกระบวนการได้ แม้แบบจำลองกระบวนการในระบบจะผิดพลาดหรือมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้น และยังสามารถควบคุมกระบวนการให้อยู่บนขอบเขตที่ปลอดภัยได้โดยไม่ต้องปรับปรุงแก้ไขระบบควบคุมบ่อยครั้ง นอกจากนี้ยังได้มีการประยุกต์ใช้การควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ร่วมกับการประมาณค่าตัวแปรสแตตและพารามิเตอร์ เช่น คาลมานฟิลเตอร์ซึ่งจะช่วยส่งเสริมให้การควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย มีประสิทธิภาพการทำงานสูงยิ่งขึ้น

3.4.1 โครงสร้างของกระบวนการของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย

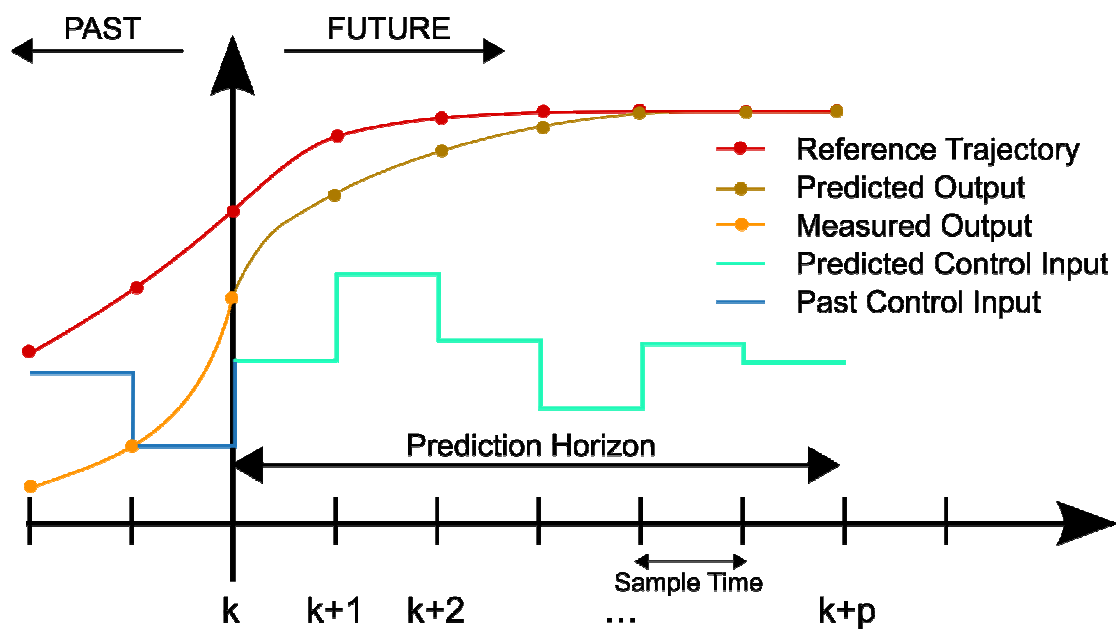
การควบคุมกระบวนการซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย เป็นการควบคุมที่อาศัยสัญญาณของตัวแปรที่วัดได้ และตัวที่ได้จากการประมาณค่า ซึ่งถูกนำไปคำนวณหาตัวแปรปรับที่เหมาะสมตามสถานะของกระบวนการที่เกิดขึ้น ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายอาศัยแบบจำลองของกระบวนการที่ประกอบตัวแปรสแตต ซึ่งบางตัวแปรไม่สามารถทำการวัดค่าได้โดยตรง เพราะฉะนั้นจึงมีการนำตัวสังเกตมาช่วยในการประมาณตัวแปรนั้นๆ ณ เวลาที่ทำการควบคุม โดยอาศัยค่าตัวแปรวัดและตัวแปรปรับ ณ เวลาที่ผ่านมา ทำให้สามารถเขียนโครงสร้างทั่วไปของระบบควบคุมได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 โครงสร้างของการควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย

พิจารณาจากรูปที่ 3.5 ผลกระทบของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในกระบวนการและส่งผลต่อตัวแปรวัดจะถูกกำจัดโดยการประมาณค่าตัวแปรวัดที่ถูกต้องของตัวสังเกต (Observer) ซึ่งนอกจากจะประมาณตัวแปรวัดที่ถูกต้องแล้ว ตัวสังเกตยังสามารถใช้ในการประมาณค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าได้อีกด้วย ในขณะที่เดียวกันตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายสามารถหาค่าตัวแปรปรับที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการที่มีความผิดพลาดของแบบจำลอง (Model Mismatch) และสัญญาณรบกวน (Disturbance) ที่เกิดในกระบวนการผลิตได้ ตรวจจับที่แบบจำลองยังสามารถใช้แทนกระบวนการจริงได้

การออปติไมซ์ในระบบควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายทำเพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการปรับตัวแปรปรับที่ทำให้ตัวแปรควบคุมเข้าสู่ค่าที่ต้องการ โดยการควบคุมจะอาศัยการออปติไมซ์ล่วงหน้า เพื่อคำนวณค่าตัวแปรปรับค่าแรกที่ได้จากการออปติไมซ์ ค่าที่ได้จะถูกนำมาใช้ควบคุมกระบวนการ ณ ปัจจุบัน หลังจากนั้นระบบควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย จะทำการวัดค่าตัวแปรวัดและประมาณค่าตัวแปรสเตทเพื่อนำไปออปติไมซ์หาค่าตัวแปรปรับใหม่ ทุกครั้งที่ทำการวัด



รูปที่ 3.6 การหาค่าตัวแปรปรับล่วงหน้า

3.4.2 ส่วนประกอบของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย

โครงสร้างโดยทั่วไปของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย Clarke และ Scattolini [3] ได้เสนอไว้ประกอบด้วยฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function , F) ซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ในรูปผลรวมของค่ากำลังสองของความผิดพลาดระหว่างสัญญาณขาออก (Output) กับค่าที่ตั้งไว้ (Set Point) และกำลังสองของค่าตัวแปรปรับ, ฟังก์ชันกระบวนการ (Process Model) และฟังก์ชันขอบเขตของกระบวนการ (Constraint function) ทั้งในรูปของสมการ (h) และรูปของอสมการ (k) ดังนี้ คือ

$$\text{ฟังก์ชันเป้าหมาย} \quad F = f[u(t), x(t), y(t)] \quad (3.6)$$

$$\text{ดัชนีสมรรถนะ} \quad \min_{u(t)} J; J = \int_{t_0}^{t_0+PT} F[u(t), x(t), y(t)] dt \quad (3.7)$$

โดยที่

$$\text{กระบวนการ} \quad \frac{dx}{dt} = f(x, u) \quad ; \quad y = g(x, u) \quad (3.8)$$

$$\text{ขอบเขตกระบวนการ} \quad h(x, u) = 0 \quad ; \quad k(x, u) \geq 0 \quad (3.9)$$

$$\text{ค่าเริ่มต้น} \quad x(t_0) = x_0 \quad (3.10)$$

ซึ่งส่วนประกอบสำคัญทั้งสามส่วนอันได้แก่ แบบจำลองของกระบวนการ ฟังก์ชันเป้าหมาย และขอบเขตของกระบวนการทั้งขอบเขตของตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุม

3.4.3 สมการแบบจำลองของกระบวนการ

ในระบบควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย สมการแบบจำลองกระบวนการสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามกระบวนการที่ใช้งาน จากงานวิจัยที่ผ่านมาพอจะสรุปรูปแบบของสมการจำลองของกระบวนการได้ 3 รูปแบบ ดังนี้

1) ฟังก์ชันอินพุทเอาต์พุท (Input/ Output Model) เป็นสมการแบบจำลองที่ค่าตัวแปรควบคุมขึ้นกับค่าตัวแปรปรับ สามารถแยกได้สามแบบตามการวัดค่าคือ เป็นฟังก์ชันพัลส์ (Pulse function) ฟังก์ชันสเต็ป (Step function) และฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function)

ฟังก์ชันพัลส์ (Pulse function)

$$y_k = \sum_{j=0}^P H_j u_{k-j-1} \quad (\text{Finite Impulse Response Model-FIR}) \quad (3.11)$$

ฟังก์ชันสเต็ป (Step function)

$$y_k = \sum_{j=0}^P S_j \Delta u_{k-j-1} \quad (\text{Finite Step Response Model-FSR}) \quad (3.12)$$

โดยที่เมตริกซ์ H และ S เป็นเมตริกซ์ค่าคงที่ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function)

ฟังก์ชันการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรควบคุมกับตัวแปรวัดในรูป z โดเมน โดยสามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนระบบวงเปิดที่เป็นเศษส่วนของพหุนามโพลิโนเมียล

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{B(z)}{A(z)} \quad (3.13)$$

โดยที่

$$A(z) = z^n + a_1 z^{n-1} + \dots + a_{n-1} z + a_n$$

$$B(z) = b_0 z^n + b_1 z^{n-1} + \dots + b_{n-1} z + b_n$$

ใช้สมการไดโอฟินไทน์ ในการหาค่าตัวแปรปรับ

โดยที่

$$\alpha(z)A(z) + \beta(z)b(z) = H(z)F(z)$$

$$\alpha(z) = z^n + \alpha_1 z^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} z + \alpha_n$$

$$\beta(z) = \beta_0 z^n + \beta_1 z^{n-1} + \dots + \beta_{n-1} z + \beta_n$$

จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิดดังรูปที่ 3.7

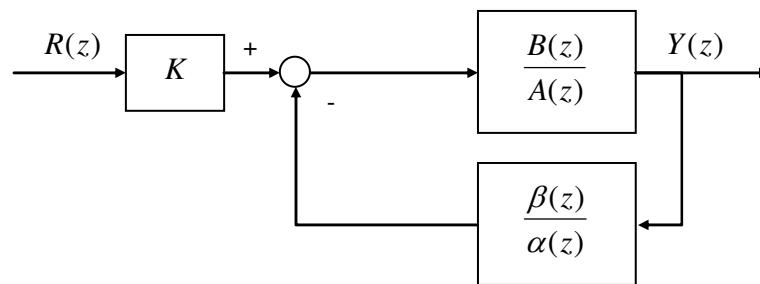
$$\frac{Y(z)}{R(z)} = K \frac{\alpha(z)B(z)}{H(z)F(z)} \quad (3.14)$$

โดยที่ค่า K เป็นค่าเกนของระบบควบคุม

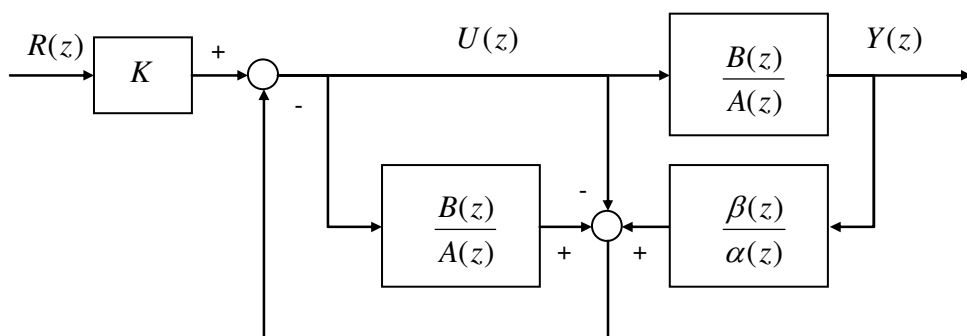
และถ้าระบบควบคุมมีตัวสังเกต (Observer) ดังรูปที่ 3.8

$$\frac{Y(z)}{R(z)} = K \frac{B(z)}{H(z)} \quad (3.15)$$

โดยที่ $F(z)$ เป็นฟังก์ชันโพลีโนเมียลของตัวสังเกต



รูปที่ 3.7 แผนภาพการควบคุมโดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นแบบจำลอง



รูปที่ 3.8 แผนภาพของการควบคุมโดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นแบบจำลองพร้อมด้วยสังเกต

2) สมการตัวสถานะ (State Equation) เป็นแบบจำลองเชิงเส้นเขียนอยู่ในรูปตัวแปรสถานะ (State variable) เช่น ตัวแปรปรับ (แทนสัญลักษณ์ u) ตัวแปรสถานะ (แทนด้วยสัญลักษณ์ x) และตัวแปรวัด (แทนด้วยสัญลักษณ์ y) และตัวแปรสถานะบางตัวแปรไม่สามารถวัดโดยตรงได้แต่สามารถประมาณค่าได้จากตัวแปรที่วัดได้ สมการทั่วไปของกระบวนการเพื่อใช้แทนกระบวนการจริงในระบบควบคุมทำนายแบบจำลองสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u) \\ y &= g(x, d) \end{aligned} \tag{3.16}$$

โดยที่ \hat{x} คือ เวกเตอร์สถานะ

\hat{u} คือ เวกเตอร์ของตัวแปรปรับ (สัญญาณขาเข้ากระบวนการ)

ในกรณีที่แบบจำลองของกระบวนการมีความไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นในการเขียนสมการสถานะจึงต้องทำการแปลงแบบจำลองให้เป็นสมการเชิงเส้น เรียกเทคนิคนี้ว่า Linearization และถ้าทำการแปลงให้เป็นเชิงเส้นใหม่ทุกค่าของการควบคุมจะเรียกว่า Locally

Linearization หลังจากการแปลงให้เป็นเชิงเส้นจะได้สมการสถานะของกระบวนการทั้งในรูปของสมการต่อเนื่อง (Continuous) และสมการไม่ต่อเนื่อง (discrete)

สมการต่อเนื่อง

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (3.17)$$

โดยที่ A , B และ C เป็นเมตริกซ์ของค่าคงที่

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \frac{\partial f_1}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u_1} & \frac{\partial f_2}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial u_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \frac{\partial f_n}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial u_n} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \frac{\partial g_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial g_2}{\partial x_1} & \frac{\partial g_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial g_n}{\partial x_1} & \frac{\partial g_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$

สมการไม่ต่อเนื่อง

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Gx_k + Hu_k \\ y &= Cx_k \end{aligned} \quad (3.18)$$

โดยที่ G , H , และ C เป็นเมตริกซ์ของค่าคงที่

$$\begin{aligned} G &= e^{AT} = I + A\Psi \\ H &= \Psi B \\ \Psi &= T + \frac{AT^2}{2!} + \frac{A^2T^3}{3!} + \dots + \frac{A^i T^{i+1}}{(i+1)!} + \dots \end{aligned} \quad (3.19)$$

$T =$ คาบของการควบคุม

3.4.4 ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective function)

ฟังก์ชันเป้าหมายคือฟังก์ชันที่กำหนดสมรรถนะของการทำออปติไมซ์ ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ให้ผลเป็นค่าบวกเพียงค่าเดียวในกรณีที่เราหาค่าที่น้อยที่สุด (เป็นลบในกรณีที่เราหาค่ามากที่สุด) สามารถเปลี่ยนตามกระบวนการหรือตัวแปรที่ต้องการออปติไมซ์ ในระบบตัวควบคุมที่ใช้แบบจำลองในการทำนายส่วนมากจะเขียนฟังก์ชันเป้าหมายในรูปกำลังสองหรือสมการควอดราติกของตัวแปรควบคุมและตัวแปรปรับ โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้ฟังก์ชันเป้าหมายในรูปกำลังสองของตัวแปรควบคุมและตัวแปรปรับ โดยกำหนดให้ตัวแปรควบคุมมีความผิดพลาดยกกำลังสองน้อยที่สุด และคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรปรับ โดยกำหนดปัจจัยถ่วงน้ำหนักเพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ต้องการ

ฟังก์ชันเป้าหมายในตัวควบคุมควอดราติกไดนามิกดังต่อไปนี้

$$F = (y_r - \hat{y})^T Q (y_r - \hat{y}) + (u_k - u_{k-1})^T R (u_k - u_{k-1}) \quad (3.20)$$

เมื่อ

y_r คือ ค่าเป้าหมาย

\hat{y} คือ ตัวแปรวัดที่ได้จากการทำนาย

Q, R คือ เมตริกซ์น้ำหนักของตัวแปรสเตตและตัวแปรปรับ

$u_k - u_{k-1}$ คือ การเปลี่ยนแปลงตัวแปรตั้งแต่ ณ เวลาที่ปัจจุบันเป็นต้นไป

เพื่อให้ฟังก์ชันเป้าหมายเป็นฟังก์ชันที่เป็นบวกจึงเขียนให้อยู่ในรูปยกกำลังสองของตัวแปรสเตตและตัวแปรปรับ โดยมีเมตริกซ์บวก (Positive definite) Q และ R เป็นเมตริกซ์น้ำหนักของตัวแปรสถานะและตัวแปรปรับตามลำดับ ซึ่งเมตริกซ์น้ำหนัก Q และ R เป็นเมตริกซ์ที่ระบุความสำคัญของตัวแปรในการควบคุมและการปรับจูนของระบบควบคุมเป็นค่าที่สามารถปรับเปลี่ยนได้

เมื่อพิจารณาฟังก์ชันเป้าหมายในระบบควบคุมที่ใช้แบบจำลองในการทำนายตลอดเวลาการควบคุมให้ค่าตัวแปรควบคุมเข้าสู่ค่าที่ต้องการภายในการควบคุม M ค่าและการคำนวณผลตอบสนองกระบวนการ P ค่าทำให้สามารถหาค่าดัชนีสมรรถนะ (J) ได้ดังสมการดังนี้

$$J = \int_t^{t+PT} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad \text{หรือ} \quad (3.21)$$

$$J = \sum_k^{k+P} (x^T Qx + u^T Ru) = \sum_k^{k+M} (x^T Qx + u^T Ru) + \sum_{k+M}^{k+P} (x^T Qx + u^T Ru)$$

ระบบควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายสามารถควบคุมให้ค่าตัวแปรปรับเข้าสู่ค่าที่ต้องการภายในเวลา M ทำให้ค่าตัวแปรปรับและตัวแปรสแตทมีค่าเท่ากับศูนย์ ทำให้สามารถเขียนฟังก์ชันดัชนีสมรรถนะ (J) คือ

$$J = \sum_k^{k+M} (x^T Qx + u^T Ru) \quad (3.22)$$

ภายใต้เงื่อนไข

$$x_{k+1} = Gx_k + Hu_k$$

นำหลักการของ Lagrange Multipliers ทำให้รวมสมการ ได้สมการหาดัชนีสมรรถนะใหม่ในสมการ

$$L(x, u) = \sum_k^{k+M} \left[\frac{1}{2} (x_k^T Qx_k + u_k^T Ru_k) + \lambda_{k+1} (Gx_k + Hu_k - x_{k+1}) \right] \quad (3.23)$$

เมื่อทำการแก้สมการจะได้สมการริคาติ (Riccati Equation) ช่วยในการแก้สมการเพื่อให้ได้เมตริกซ์นำหน้า P สำหรับการคำนวณหาค่าเกณฑ์ของระบบควบคุม และหาชุดตัวแปรปรับสำหรับการควบคุมกระบวนการต่อไป ในกรณีที่เมตริกซ์นำหน้า P Q และ R มีค่าคงที่จะเรียก ระบบควบคุมนี้ว่าระบบควบคุมออปติมัลคงตัว (Steady State Optimal Control) จะได้ สมการริคาติ ซึ่งจะหาค่า P_k ที่ได้จะมีค่าเข้าสู่ค่าคงที่

$$P_k = Q + GP_{k+1}G - GP_{k+1}H(R + H^T P_{k+1}H)^{-1}H^T P_{k+1}G^T \quad (3.24)$$

และสมการหาค่าเกณฑ์สำหรับวิธีควบคุมป้อนกลับ (State Feedback) จากสมการในการควบคุมทำการหาค่าเพียงครั้งเดียวคือ ณ เวลาควบคุม

$$K_k = R^{-1}H^T (G^T)^{-1} (P_k - Q) \quad (3.25)$$

สมการหาค่าแปรปรับ (หาเพียงค่าเดียวคือค่า ณ เวลา $k\Delta t$ สำหรับควบคุม)

$$u_k = -K_k x_k \quad (3.26)$$

3.4.5 ขอบเขตของตัวแปรปรับและขอบเขตของตัวแปรสถานะ

ในปัจจุบันระบบควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายสามารถควบคุมระบบให้อยู่ภายในขอบเขตของตัวแปรและขอบเขตของตัวแปรสถานะที่ต้องการได้นอกเหนือจากขอบเขตของกระบวนการที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.4.2 การแบ่งชนิดขอบเขตสามารถแบ่งตามรูปแบบของสมการขอบเขตได้สองชนิดคือ สมการขอบเขต (equality constraint) และ อสมการขอบเขต (inequality constraint) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

(1) สมการขอบเขต (equality constraint) มีลักษณะเป็นสมการที่หาค่าได้ชัดเจนสามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ดังนี้

$$h(x, u) = 0 \quad (3.27)$$

ดังเช่น สมการขอบเขตของกระบวนการในหัวข้อ

$$\mathbf{G}x_k + \mathbf{H}u_k - x_{k+1} = 0 \quad (3.28)$$

(2) อสมการขอบเขต (inequality constraint) มีลักษณะเป็นสมการที่ค่าตอบเป็นช่วงสามารถเขียนสมการทั่วไปได้ดังนี้

$$k(x, u) \geq 0 \quad (3.29)$$

ในปัจจุบันอสมการขอบเขตยังแบ่งได้สองประเภท คือ อสมการที่มีขอบเขตชัดเจนเรียกว่า Hard Constraint และอสมการที่มีขอบเขตไม่ชัดเจนเรียกว่า Soft Constraint ยกตัวอย่างเช่น ขอบเขตของตัวแปรปรับที่สามารถเขียนได้ทั้งสองแบบดังนี้

(2.1) อสมการขอบเขตที่มีขอบเขตชัดเจน (Hard Constraint)

$$u_{\min} \leq u \leq u_{\max} \quad (3.30)$$

(2.2) อสมการขอบเขตที่มีขอบเขตไม่ชัดเจน (Soft Constraint)

$$\begin{aligned} u_{\min} \pm \varepsilon \leq u \leq u_{\max} \pm \varepsilon \\ 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{\max} \end{aligned} \quad (3.31)$$

ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายสามารถเพิ่มขอบเขตทั้งในรูปของสมการและอสมการโดยในการเพิ่มขอบเขตแบบอสมการมีความยุ่งยากและซับซ้อน และใช้เวลาในการคำนวณนานทำให้ไม่สะดวกต่อการใช้งานอุตสาหกรรม ในการศึกษาาระบบซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายแบบไม่กำหนดขอบเขตของตัวแปรสแตทและตัวแปรปรับ จะใช้ขอบเขตตัวแปรปรับของระบบควบคุมระดับล่างแทน (ตัวควบคุมแบบพีไอดี- PID Controller) เพื่อไม่ให้มีการควบคุมอยู่นอกเหนือขอบเขตของตัวแปรปรับที่สามารถทำได้

3.5 เวลาหน่วง (Delay Time)

เวลาหน่วง คือ เวลาที่ล่าช้า เริ่มตั้งแต่เมื่อสัญญาณจากตัวควบคุมถูกปล่อยออกไป จนกระทั่งเมื่อตัวแปรกระบวนการเริ่มตอบสนอง การมีเวลาหน่วงเกิดขึ้นสำหรับกระบวนการใดๆ ก็ตาม ไม่เคยเป็นสิ่งที่ดีสำหรับการควบคุม หากมีเวลาหน่วงเกิดมากขึ้นจะทำให้การควบคุมยิ่งท้าทายและยากที่จะเสถียร เวลาหน่วงสามารถเกิดขึ้นได้ในรูปควบคุมเนื่องมาจากหลายเหตุผล เช่น

- ลูปควบคุมโดยทั่วไปมักจะมีเครื่องมือวัดตัวอย่างที่จะนำมาซึ่งเวลาหน่วงอย่างน้อยที่สุดจากการวัดตัวอย่างหนึ่งครั้งในหนึ่งลูปควบคุม เวลาหน่วงนี้แทบจะไม่ใช่ประเด็นในการปรับตัวควบคุม แต่ชี้ให้เห็นว่าทุกลูปควบคุมจะมีเวลาหน่วงเป็นอย่างน้อย

- เวลาที่ใช้สำหรับเดินทางของของใดๆ จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งสามารถเพิ่มเวลาหน่วงในลูปได้ ถ้าคุณสมบัติ (เช่น ความเข้มข้นหรืออุณหภูมิ) มีการเปลี่ยนแปลงที่ปลายด้านหนึ่งของท่อและเซ็นเซอร์ตั้งอยู่ที่ปลายอีกด้านหนึ่ง การเปลี่ยนแปลงจะไม่ได้รับการตรวจพบจนของใดๆ นั้น ได้ย้ายไปถึงปลายความยาวของท่อ ในกรณีนี้เวลาในการเดินทางก็คือเวลาหน่วง แต่สิ่งนี้ไม่ได้เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นเฉพาะในโรงงานขนาดใหญ่ที่มีท่อยาวเท่านั้น แต่สามารถเกิดขึ้นได้หากในกระบวนการมีของเหลวเคลื่อนที่อย่างช้าๆ ไปตามท่อ ระยะทางอาจจะเท่าความยาวของแขน แต่ความเร็วของการไหลที่ต่ำมากสามารถทำให้เกิดเวลาหน่วงที่มีผลต่อการควบคุม

- อุปกรณ์ตรวจวัดและวิเคราะห์อาจใช้เวลามากเพื่อให้ได้ผลของการวัด ตัวอย่างเช่น Thermocouple ที่ถูกหุ้มไว้อย่างแน่นหนา เพื่อที่จะสามารถทนอยู่ในสภาพแวดล้อมที่รุนแรงได้ แต่สิ่งห่อหุ้มที่มากสามารถเพิ่มความล่าช้าของการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในน้ำที่ทำการวัด

3.6 การวัดสมรรถนะ (Performance Measures)

ในบางครั้งจะมีประโยชน์มากถ้าใช้การวัดสมรรถนะการควบคุมแบบกว้างๆ ที่พิจารณาเรื่องวงควบคุมให้น้อยกว่าเรื่องความผันแปรและเบี่ยงเบนจากสมรรถนะที่ตั้งไว้ ประเด็นนี้เป็นเรื่องสำคัญในการควบคุม จึงเกิดความพยายามที่จะวัดคุณภาพและใช้เทคนิคการควบคุมคุณภาพเชิงสถิติ ดังนั้นเทคนิคการควบคุมคุณภาพเชิงสถิติจึงถูกออกแบบเพื่อลดและกำจัดความผันแปรสมรรถนะการควบคุม ค่าความคลาดเคลื่อน (error) ในวงควบคุมจึงถูกนิยามไว้ว่า คือ ค่าความเบี่ยงเบนจากค่าเป้าหมาย ซึ่งมีวิธีการมากมายในการคำนวณหาปริมาณของค่าความคลาดเคลื่อนสะสม ดังต่อไปนี้

- ผลรวมของความคลาดเคลื่อน (Integral of Error, IE) หมายถึง ค่าความคลาดเคลื่อนสะสม โดยไม่พิจารณาถึงทิศทางความคลาดเคลื่อน ดังนั้นการใช้ ค่าIE จึงไม่สามารถยืนยันรูปแบบของการแกว่งได้ ดังสมการที่ 3.32

$$IE = \int_0^{\infty} e(t).dt \quad (3.32)$$

- ผลรวมของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Integral of Absolute Error, IAE) คือ ค่าผลรวมของพื้นที่ด้านบนและล่างของค่าเป้าหมายอย่างสม่ำเสมอและไม่พิจารณาถึงเรื่องทิศทาง ดังสมการที่ 3.33

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)|.dt \quad (3.33)$$

- ผลรวมของความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Integral of Squared Error, ISE) วิธีการนี้จะคิดค่าความคลาดเคลื่อนสะสมโดยให้น้ำหนักค่าความคลาดเคลื่อนที่มีค่ามาก เนื่องจากการยกกำลังสองจะทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่มีความเบี่ยงเบนมากจะยังมีค่ามากขึ้น ดังสมการที่ 3.34

$$ISE = \int_0^{\infty} \{e(t)\}^2 .dt \quad (3.34)$$

- ผลรวมของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ที่คิดน้ำหนักตามเวลาที่ผ่านไป (Integral of Time-weighted Absolute Error, ITAE) วิธีการนี้จะคิดค่า ความคลาดเคลื่อนสะสม

โดยให้น้ำหนักความสำคัญกับค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นหลังจากเวลาผ่านไปมากๆ มากกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปน้อยๆ ดังสมการที่ 3.35

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)|.dt \quad (3.35)$$

- ผลรวมของความคลาดเคลื่อนกำลังสองที่คิดน้ำหนักตามเวลาที่ผ่านไป (Integral of Time-weighted Squared Error, ITSE) วิธีการนี้จะคิดค่า ความคลาดเคลื่อนสะสม โดยให้น้ำหนักความสำคัญกับค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นหลังจากเวลาผ่านไปมากๆ และค่าความคลาดเคลื่อนที่มีค่ามาก ดังสมการที่ 3.36

$$ITSE = \int_0^{\infty} t\{e(t)\}^2 .dt \quad (3.36)$$

บทที่ 4

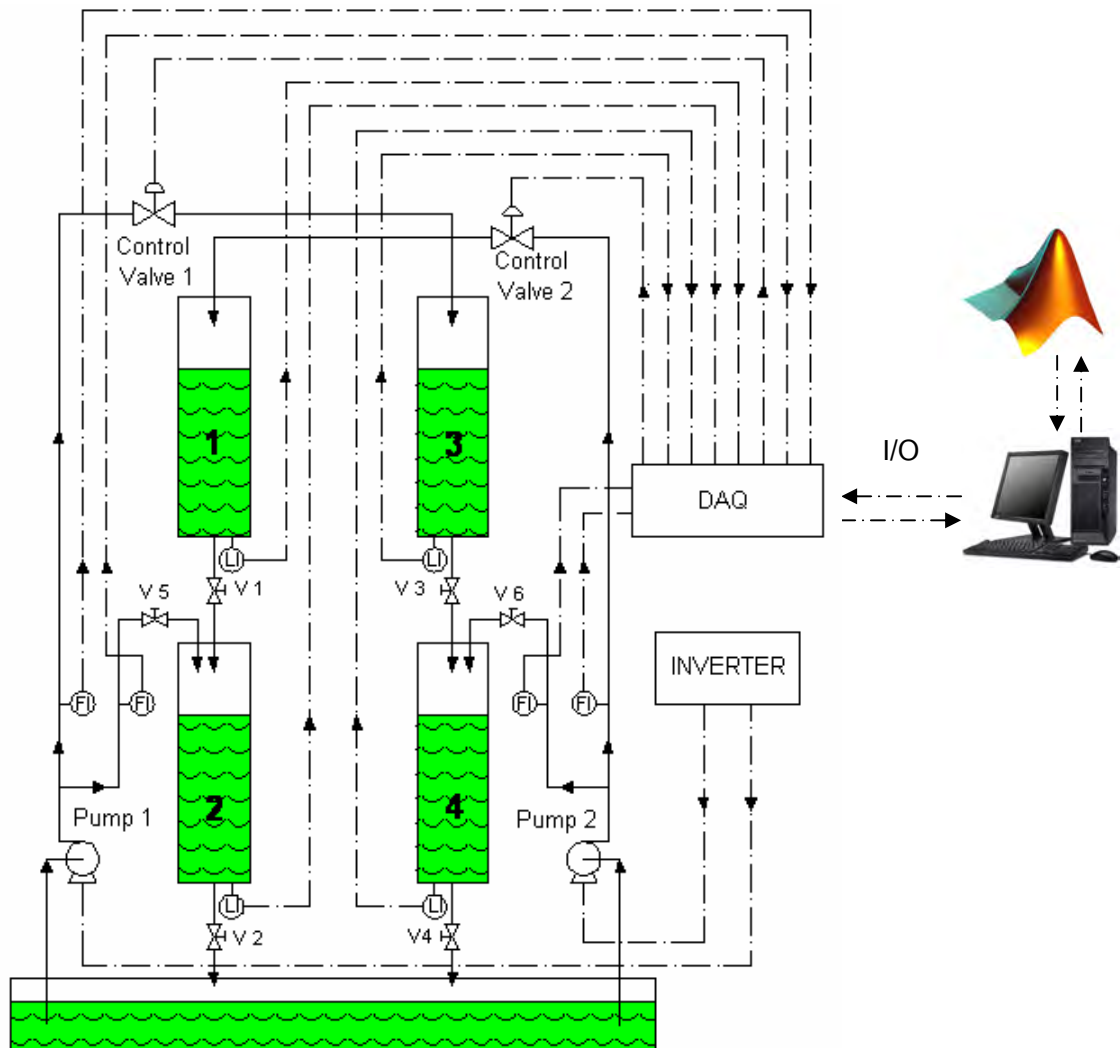
วิธีดำเนินการวิจัย

บทนี้จะกล่าวถึงเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยกระบวนการระบบสี่ถังซึ่งประกอบไปด้วย ชุดการทดลองกระบวนการระบบสี่ถัง อุปกรณ์เชื่อมต่อข้อมูล รวมถึงการหาค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการระบบสี่ถัง การสร้างแบบจำลองของระบบสี่ถังและการปรับแต่งตัวควบคุม

4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยกระบวนการระบบสี่ถัง

4.1.1 ชุดการทดลองกระบวนการระบบสี่ถัง

ในการทดลองนี้จะใช้ถัง 4 ถังเชื่อมต่อกัน ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจะประกอบไปด้วย



รูปที่ 4.1 กระบวนการของระบบสี่ถัง

1) ถังควบคุมระดับน้ำ จำนวน 4 ถัง



รูปที่ 4.2 ถังควบคุมระดับน้ำ

2) อุปกรณ์วัดระดับน้ำ (Pressure Transmitter) จำนวน 4 ตัว โดยให้ผลการตรวจจับเป็นกระแสไฟตรง ในช่วง 4 - 20 mA



รูปที่ 4.3 อุปกรณ์วัดระดับน้ำ (Pressure Transmitter

3) วาล์วควบคุม (Control Valve) ใช้สำหรับควบคุมระดับความสูงของน้ำ โดยทำการปรับอัตราการไหลที่ป้อนเข้าสู่ถัง โดยวาล์วควบคุมมีจำนวน 2 ตัว

- Control Valve 1 ใช้ปรับอัตราการไหลของน้ำไหลเข้าถังที่ 2 และถังที่ 3 สำหรับการควบคุมความระดับของความสูงของของเหลวถังที่ 2 และถังที่ 3

- Control Valve 2 ใช้ปรับอัตราการไหลของน้ำไหลเข้าถังที่ 1 และถังที่ 4 สำหรับการควบคุมความระดับของความสูงของเหลวถังที่ 1 และถังที่ 4



รูปที่ 4.4 วาล์วควบคุม (Control Valve)

4) มิเตอร์วัดปริมาณน้ำ (Flow meter) ใช้สำหรับวัดอัตราการไหลของน้ำ



รูปที่ 4.5 มิเตอร์วัดปริมาณน้ำ (Flow meter)

5) ปั้มน้ำแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Pump) จำนวน 2 ตัว ซึ่งใช้ในการสูบน้ำจากอ่างพักน้ำไปยังถังควบคุมความสูงของน้ำทั้ง 4 ถัง โดยปั้มน้ำที่ตัวที่ 1 สูบน้ำป้อนเข้าสู่ถังที่ 2 และถังที่ 3 และปั้มน้ำที่ตัวที่ 2 สูบน้ำป้อนเข้าสู่ถังที่ 1 และถังที่ 4 และปั้มน้ำทั้ง 2 ตัวจะต่อกับอินเวอร์เตอร์เพื่อใช้ ปรับอัตราการไหลรวมของน้ำในระบบให้ได้ตามอัตราการไหลที่ต้องการ



รูปที่ 4.6 ปั้มน้ำแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Pump)

6) อินเวอร์เตอร์ (Inverter) จำนวน 2 ตัวต่อเข้ากับปั้มน้ำโดยอินเวอร์เตอร์ตัวที่ 1 ใช้ปรับแรงดันไฟฟ้าของปั้มน้ำตัวที่ 1 เพื่อควบคุมอัตราการไหลรวมที่ไหลออกจากปั้มน้ำตัวที่ 1 และอินเวอร์เตอร์ตัวที่ 2 ใช้ปรับแรงดันไฟฟ้าของปั้มน้ำตัวที่ 2 เพื่อควบคุมอัตราการไหลรวมที่ไหลออกจากปั้มน้ำตัวที่ 2

7) วาล์ว (Valve, V) ใช้ปรับตั้งค่าอัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้าและออกจากถัง โดยวาล์วมีจำนวน 6 ตัว

- V1 ใช้ปรับตั้งค่าอัตราการไหลออกจากถังที่ 1
- V2 ใช้ปรับตั้งค่าอัตราการไหลออกจากถังที่ 2
- V3 ใช้ปรับตั้งค่าอัตราการไหลออกจากถังที่ 3
- V4 ใช้ปรับตั้งค่าอัตราการไหลออกจากถังที่ 4
- V5 ใช้ปรับตั้งค่าอัตราการไหลเข้าถังที่ 2
- V6 ใช้ปรับตั้งค่าอัตราการไหลเข้าถังที่ 4



รูปที่ 4.7 วาล์ว (Valve)

8) อ่างพักน้ำขนาดใหญ่ (Water Reservoir) ใช้สำหรับพักน้ำก่อนที่จะสูบเข้ากระบวนการ

9) ท่อส่งน้ำ PVC ชนิดท่อแข็งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $\frac{1}{2}$ นิ้ว

จากรูปที่ 4.1 บีมน้ำที่ตัวที่ 1 จะทำการสูบน้ำจากอ่างพักน้ำ (Water Reservoir) เพื่อส่งผ่านไปยัง ถังที่ 2 และ ถังที่ 3 โดยที่ทางออกของถังที่ 3 จะถูกควบคุมด้วย Control Valve 1 และที่ทางออกของถังที่ 2 จะควบคุมด้วยวาล์ว V 5 และ บีมน้ำที่ตัวที่ 2 จะสูบน้ำจากอ่างพักน้ำ (Water Reservoir) เพื่อส่งผ่านไปยัง ถังที่ 1 และ ถังที่ 4 โดยที่ทางออกของถังที่ 1 จะถูกควบคุมด้วย Control Valve 2 และที่ทางออกของถังที่ 4 จะควบคุมด้วยวาล์ว V6 หลังจากนั้นน้ำจากถังที่ 1 และถังที่ 3 จะไหลลงมาถึงถังที่ 2 และถังที่ 4 ผ่านวาล์ว V1 และ V3 ตามลำดับ และน้ำจากถังที่ 2 และถังที่ 4 จะไหลลงอ่างพักน้ำผ่านวาล์ว V2 และ V4 ตามลำดับ

4.1.2 อุปกรณ์เชื่อมต่อข้อมูล

1) อุปกรณ์รับและส่งข้อมูล (Data Acquisition, DAQ) โดยจะทำหน้าที่ในการรับสัญญาณแบบอะนาล็อกจากอุปกรณ์วัดระดับน้ำ (Pressure Transmitter) ของถังที่ 1, 2, 3, และ 4 แล้วทำการแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัล เพื่อส่งให้คอมพิวเตอร์ทำการประมวลผลในการสร้างสัญญาณควบคุม จากนั้นจะทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณควบคุมซึ่งอยู่ในรูปแบบดิจิทัลให้เป็นสัญญาณอะนาล็อก เพื่อส่งให้กับวาล์วควบคุม (Control Valve) ทั้งสอง โดยอุปกรณ์รับส่งข้อมูลที่ใช่เป็นของบริษัท เนชั่นแนลอินสตรูเมนต์ รุ่น NI USB-6008



รูปที่ 4.8 อุปกรณ์รับและส่งข้อมูล DAQ รุ่น NI USB-6008

2) เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลทำหน้าที่ในการรับและส่งข้อมูล



รูปที่ 4.9 เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

3) โปรแกรมควบคุมในงานวิจัยนี้ได้ทำการเขียนโปรแกรมควบคุมขึ้นมาโดยอาศัยโปรแกรม Matlab ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีสมรรถนะสูงเพื่อควบคุมทางเทคนิค นอกจากนี้ลักษณะของการเขียนสมการในโปรแกรมก็เหมือนสมการคณิตศาสตร์ที่คุ้นเคยกันอยู่แล้ว การทำงานสามารถทำได้ทั้งแบบติดต่อโดยตรง (Interactive) คือการเขียนคำสั่งเข้าไปทีละคำสั่ง เพื่อให้ Matlab ประมวลผลไปเรื่อยๆ หรือสามารถรวมชุดคำสั่งเป็นโปรแกรม จุดเด่นอย่างหนึ่งของ Matlab คือข้อมูลทุกตัวเก็บในรูปแบบ array คือตัวแปรแต่ละตัวจะได้รับการแบ่งเป็นส่วนย่อยๆ ขึ้นหรือ แบ่งเป็น Element นั้นเอง ซึ่งการใช้ตัวแปรเป็น array ใน Matlab นั้น ไม่จำเป็นต้องจอง dimension เหมือนการเขียนโปรแกรมระดับอื่นทั่วไป

4.1.3 ค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการระบบสี่ถัง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบจากการทดลองและการวัดค่าจากอุปกรณ์จริง

1) ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์ว (V_1, V_2, V_3, V_4) สามารถหาได้จากสมการ

$$F = C_v \sqrt{\frac{\rho g h}{G_f}} \quad (4.1)$$

เมื่อ

F คือ อัตราการไหลของน้ำ (L/min)

C_v คือ ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์ว (L/(min* \sqrt{Pa}))

h คือ ความสูงของน้ำในถัง (m)

ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ = 1000 kg/m³

g คือ ค่าแรงโน้มถ่วง = 9.81m/s²

G_f คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำ = 1

จากสมการที่ 4.1 สามารถจัดรูปใหม่ได้

$$F = K\sqrt{h} \quad (4.2)$$

เมื่อ

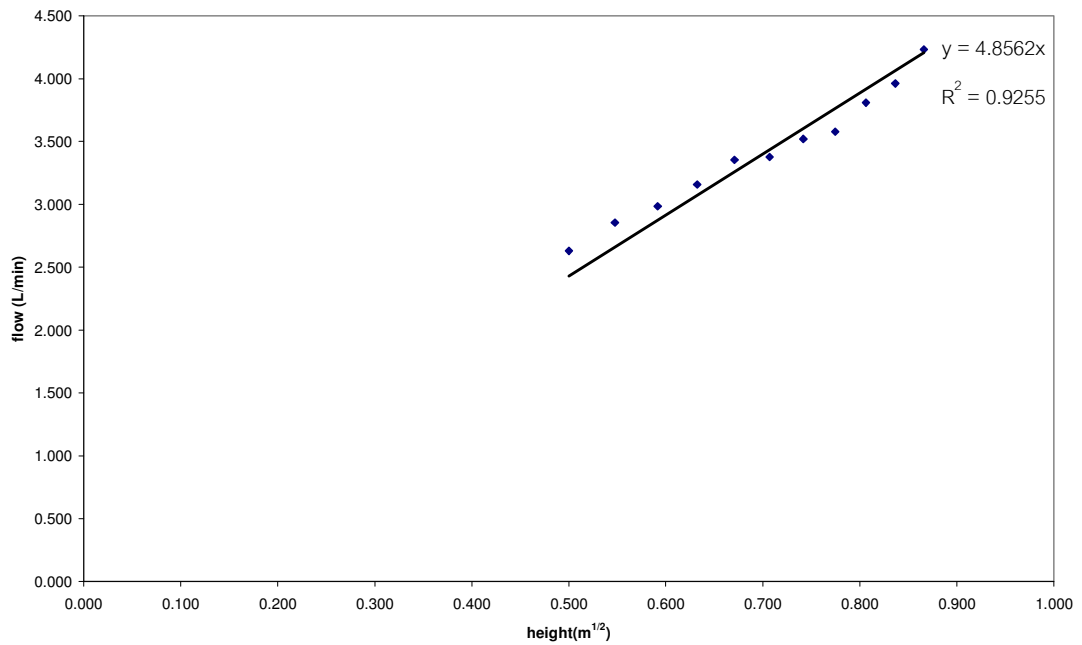
$$K = C_v \sqrt{\frac{\rho g}{G_f}} \quad (4.3)$$

ความสูงของน้ำ (\sqrt{h}) สามารถหาได้จากกราฟที่สองของค่าความสูงเฉลี่ยของน้ำ และอัตราการไหลของน้ำ (F) สามารถหาได้จากผลต่างของความสูงของน้ำหารด้วยผลต่างของเวลาที่ความสูงของน้ำ h_i และ h_{i+1} คูณด้วยพื้นที่หน้าตัดของถังควบคุมระดับน้ำซึ่งจะได้ดังตารางที่ 4.1

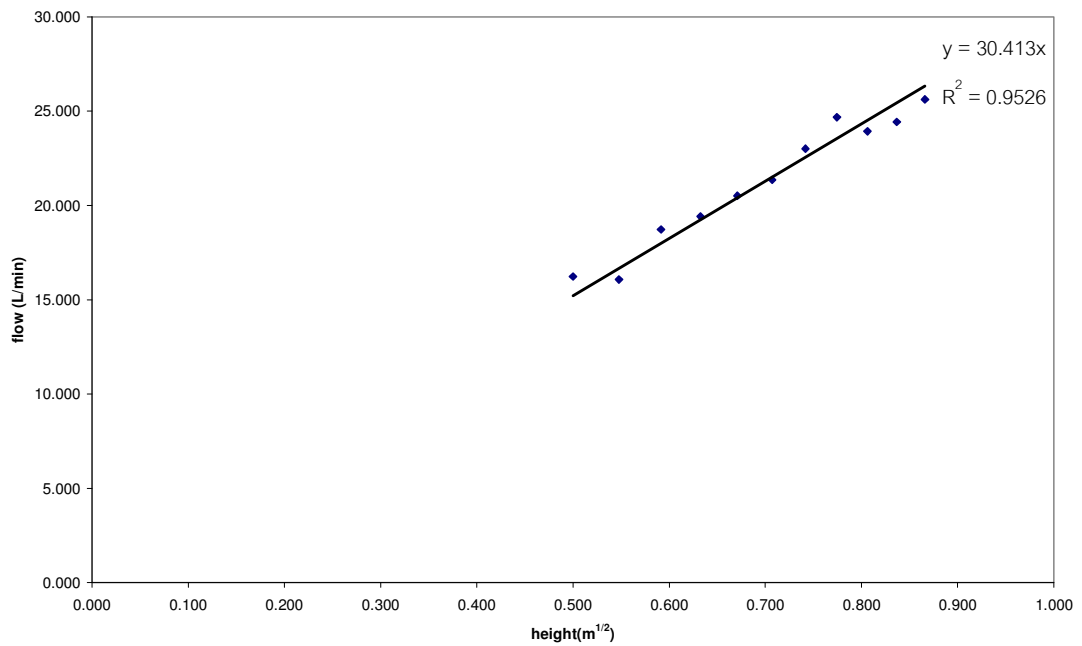
ตารางที่ 4.1 ค่ารากที่สองของความสูงและอัตราการไหลออกของน้ำที่ได้จากการคำนวณ ในถังควบคุมที่ 1, 2, 3 และ 4

Height(cm)	\sqrt{h} (m ^{1/2})	time (s)				F (L/min)			
		ถังที่1	ถังที่2	ถังที่3	ถังที่4	ถังที่1	ถังที่2	ถังที่3	ถังที่4
0.8	0.894	0	0	0	0	4.072	23.819	4.693	19.426
0.75	0.866	11.64	1.99	10.1	2.44	4.232	25.622	4.580	25.348
0.7	0.837	22.84	3.84	20.45	4.31	3.960	24.433	4.361	23.122
0.65	0.806	34.81	5.78	31.32	6.36	3.807	23.939	4.514	23.700
0.6	0.775	47.26	7.76	41.82	8.36	3.577	24.688	4.191	22.150
0.55	0.742	60.51	9.68	53.13	10.5	3.522	23.010	4.020	21.161
0.5	0.707	73.97	11.74	64.92	12.74	3.376	21.351	3.841	20.519
0.45	0.671	88.01	13.96	77.26	15.05	3.355	20.519	3.801	18.444
0.4	0.632	102.14	16.27	89.73	17.62	3.158	19.426	3.567	18.161
0.35	0.592	117.15	18.71	103.02	20.23	2.985	18.735	3.410	18.588
0.3	0.548	133.03	21.24	116.92	22.78	2.854	16.068	3.185	16.014
0.25	0.500	149.64	24.19	131.8	25.74	2.630	16.233	2.977	14.320
0.2	0.447	167.66	27.11	147.72	29.05	2.592	13.660	2.823	13.621
0.15	0.387	185.95	30.58	164.51	32.53	2.319	13.058	2.726	12.216
0.1	0.316	206.39	34.21	181.9	36.41	2.123	10.998	2.145	11.970
0.05		228.72	38.52	204	40.37				

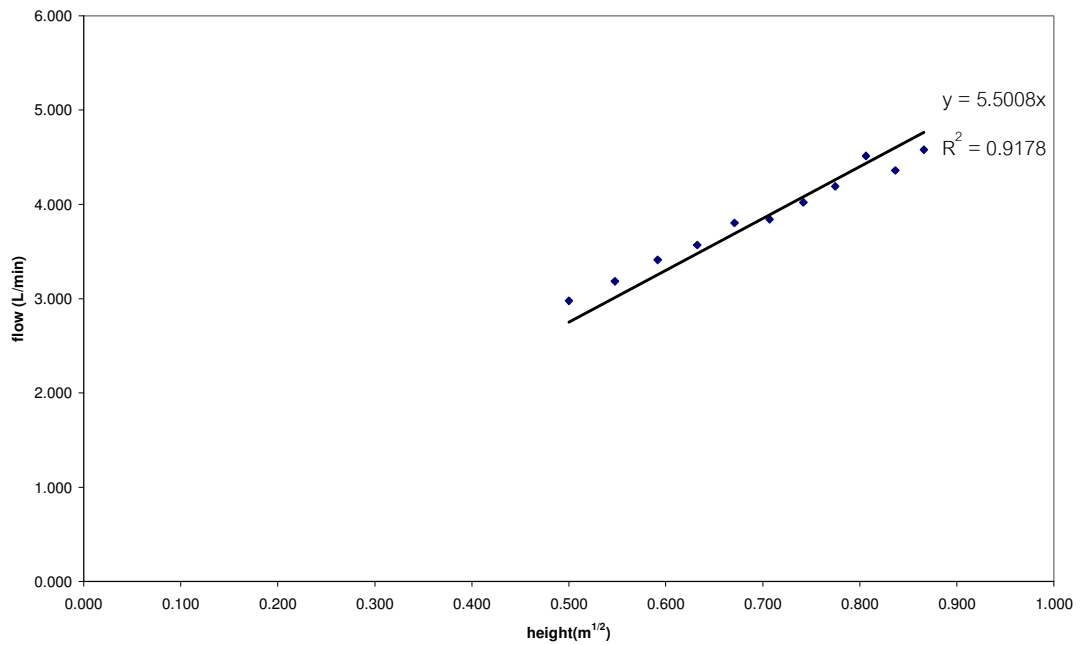
จากตารางที่ 4.1 นำค่ารากที่สองของความสูง (\sqrt{h}) มาพล็อตกับอัตราการไหลของน้ำ (F) เพื่อหาค่า K ของวาล์ว (V_1, V_2, V_3, V_4) จากสมการที่ 4.2 ดังรูปที่ 4.10, 4.11, 4.12 และ 4.13



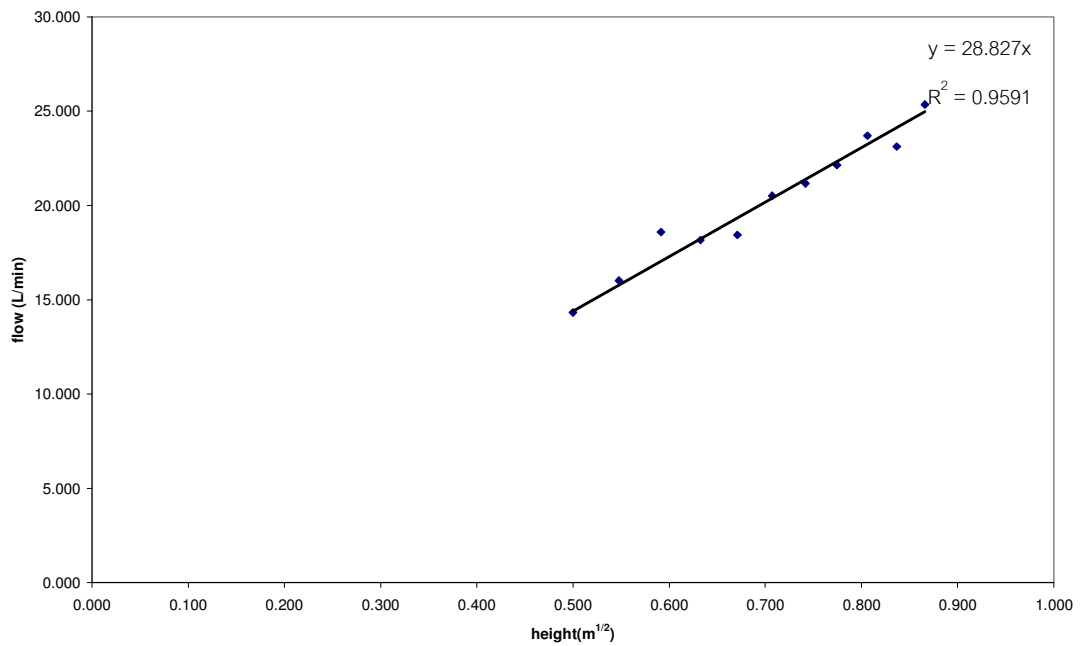
รูปที่ 4.10 กราฟระหว่างอัตราการไหลและรากที่สองของระดับน้ำในถังที่ 1



รูปที่ 4.11 กราฟระหว่างอัตราการไหลและรากที่สองของระดับน้ำในถังที่ 2



รูปที่ 4.12 กราฟระหว่างอัตราการไหลและรากที่สองของระดับน้ำในถังที่ 3



รูปที่ 4.13 กราฟระหว่างอัตราการไหลและรากที่สองของระดับน้ำในถังที่ 4

ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์ว (V1, V2, V3, V4) สามารถหาได้จากความชันของกราฟ จากรูปที่ 4.10, 4.11, 4.12, 4.13 ซึ่งจะได้ค่าเท่ากับ 4.856, 30.413, 5.500 และ

28.827 ตามลำดับ คุณด้วยรากที่สองของค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำ (G_f) ทหารด้วยค่าแรงโน้มถ่วง (g) และความหนาแน่นของน้ำ (ρ) ดังสมการที่ 4.4 และตารางที่ 4.2

$$C_V = K \sqrt{\frac{G_f}{\rho g}} \quad (4.4)$$

ตารางที่ 4.2 ความชันและค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์ว 1, 2, 3 และ 4

	ความชัน ($(L/(\text{min} \cdot \sqrt{m}))$)	ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์ว ($(L/(\text{min} \cdot \sqrt{Pa}))$)
C_{V1}	4.856	0.0490280
C_{V2}	30.413	0.3070308
C_{V3}	5.500	0.0555301
C_{V4}	28.827	0.2909775

2.) ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วควบคุม (Control Valve 1, Control Valve 2)

สามารถหาได้จากการวัดค่าจริงของอัตราการไหลของน้ำผ่าน Flow meter ต่อปริมาณการเปิด Control Valve (U) ดังตารางที่ 4.3 เพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การเปิด Control Valve โดยใช้โปรแกรม Matlab ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และ 4.5

ตารางที่ 4.3 อัตราการไหลของน้ำผ่าน Flow meter ต่อปริมาณการเปิด Control Valve (U)

ปริมาณการเปิด Control Valve	ถังที่1	ถังที่2	ถังที่3	ถังที่4
0	0	0.000221	0	0.000236
0.2	7.99E-06	0.000219	1.13E-05	0.000234
0.3	1.59E-05	0.000216	1.94E-05	0.000231
0.4	2.69E-05	0.000213	2.92E-05	0.000227
0.5	4.26E-05	0.000212	4.22E-05	0.000221
0.6	6.31E-05	0.000208	6.16E-05	0.000214
0.7	0.000102	0.000205	8.11E-05	0.000206
0.8	0.000114	0.000204	0.000102	0.000197
0.9	0.000126	0.000202	0.000109	0.000194
1	0.000128	0.000202	0.000114	0.000194

ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การเปิด Control Valve1 ต่ออัตราการไหลของน้ำ

	u_1^4	u_1^3	u_1^2	u_1	
$F_2(\text{m}^3/\text{s})$	-4.735E-06	4.898E-05	-6.285E-05	9.049E-08	2.208E-04
$F_3(\text{m}^3/\text{s})$	-5.106E-04	8.115E-04	-2.726E-04	8.430E-05	0

ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การเปิด Control Valve2 ต่ออัตราการไหลของน้ำ

	u_2^4	u_2^3	u_2^2	u_2	
$F_1(\text{m}^3/\text{s})$	-7.272E-04	1.120E-03	-3.344E-04	6.720E-05	0
$F_4(\text{m}^3/\text{s})$	2.054E-04	-3.018E-04	6.867E-05	-1.388E-05	2.356E-04

4.2 การสร้างแบบจำลองของระบบสี่ถัง

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์(Mathematic model) ของกระบวนการระบบสี่ถังโดยใช้การดุลมวลสาร (Mass Balance) และการทำให้เป็นเชิงเส้น (Linearization)

4.2.1 การดุลมวลสาร

สมการการดุลโดยทั่วไปจะใช้หลักการว่า อัตราการสะสมในระบบจะเท่ากับอัตราการเข้าระบบ ลบอัตราการออกจากระบบ บวกอัตราการเกิดขึ้น ลบอัตราการสูญหาย ซึ่งในกรณีการดุลมวลสารจะได้ดังสมการที่ 4.5

$$\text{อัตราการสะสมของมวล} = \text{มวลไหลเข้า} - \text{มวลไหลออก} + \text{มวลที่เกิดขึ้น} - \text{มวลที่หายไป} \quad (4.5)$$

โดยอาศัยสมมติฐาน

- 1) ความหนาแน่นของน้ำ (ρ) คงที่
- 2) พื้นที่หน้าตัดของถังแต่ละถังคงที่
- 3) ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงมีค่าคงที่
- 4) ความถ่วงจำเพาะของน้ำคงตัว
- 5) ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลของวาล์ว C_{V1} , C_{V2} , C_{V3} , C_{V4} , คงที่
- 6) สัมประสิทธิ์การเปิด Control Valve มีค่าคงที่

พิจารณาถังควบคุมที่ 1

$$\text{อัตราการสะสมของมวล} = \frac{d(\rho V_1)}{dt} = A_1 \rho \frac{dh_1}{dt} \quad (4.6)$$

เมื่อ $V_1 = A_1 h_1$ และ A_1, ρ คงที่

$$\begin{aligned} \text{มวลที่ไหลเข้าถัง 1} &= \text{มวลที่ไหลผ่าน Control Valve 2} \\ &= \rho(a_1 u_2^4 + a_2 u_2^3 + a_3 u_2^2 + a_4 u_2) \end{aligned} \quad (4.7)$$

เมื่อ a คือค่าสัมประสิทธิ์การเปิด Control Valve 2 ต่ออัตราการไหลของน้ำเข้าถัง 1

$$\begin{aligned} \text{มวลที่ไหลออกถัง 1} &= \text{มวลที่ไหลผ่าน CV1} \\ &= \rho(C_{V1} \sqrt{\frac{\rho g h_1}{G_f}}) \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$\text{มวลที่เกิดขึ้น} = 0 \quad (4.9)$$

$$\text{มวลที่หายไป} = 0 \quad (4.10)$$

แทนค่าจากสมการที่ 4.6 ถึง 4.10 ในสมการที่ 4.5 จะได้

$$A_1 \rho \frac{dh_1}{dt} = \rho(a_1 u_2^4 + a_2 u_2^3 + a_3 u_2^2 + a_4 u_2 - C_{V1} \sqrt{\frac{\rho g h_1}{G_f}}) \quad (4.11)$$

จากสมการ 4.11 จัดรูปใหม่จะได้สมการ 4.12

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{a_1}{A_1} u_2^4 + \frac{a_2}{A_1} u_2^3 + \frac{a_3}{A_1} u_2^2 + \frac{a_4}{A_1} u_2 - \frac{C_{V1}}{A_1} \sqrt{\frac{\rho g h_1}{G_f}} \quad (4.12)$$

พิจารณาถังควบคุมที่ 2

$$\text{อัตราการสะสมของมวล} = \frac{d(\rho V_2)}{dt} = A_2 \rho \frac{dh_2}{dt} \quad (4.13)$$

เมื่อ $V_2 = A_2 h_2$ และ A_2, ρ คงที่

$$\begin{aligned} \text{มวลที่ไหลเข้าถัง 2} &= \text{มวลที่ไหลผ่าน Control Valve1} + \text{มวลที่ไหลผ่าน CV1} \\ &= \rho(b_1u_1^4 + b_2u_1^3 + b_3u_1^2 + b_4u_1 + b_5 + C_{V1}\sqrt{\frac{\rho gh_1}{G_f}}) \end{aligned} \quad (4.14)$$

เมื่อ b คือค่าสัมประสิทธิ์การเปิด Control Valve1 ต่ออัตราการไหลของน้ำเข้าถัง2

$$\begin{aligned} \text{มวลที่ไหลออกถัง 2} &= \text{มวลที่ไหลผ่าน CV2} \\ &= \rho(C_{V2}\sqrt{\frac{\rho gh_2}{G_f}}) \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$\text{มวลที่เกิดขึ้น} = 0 \quad (4.16)$$

$$\text{มวลที่หายไป} = 0 \quad (4.17)$$

แทนค่าจากสมการที่ 4.13 ถึง 4.17 ในสมการที่ 4.5จะได้

$$A_2\rho\frac{dh_2}{dt} = \rho(b_1u_1^4 + b_2u_1^3 + b_3u_1^2 + b_4u_1 + b_5 + C_{V1}\sqrt{\frac{\rho gh_1}{G_f}} - C_{V2}\sqrt{\frac{\rho gh_2}{G_f}}) \quad (4.18)$$

จากสมการ 4.18 จัดรูปใหม่จะได้สมการ 4.19

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{b_1}{A_2}u_1^4 + \frac{b_2}{A_2}u_1^3 + \frac{b_3}{A_2}u_1^2 + \frac{b_4}{A_2}u_1 + \frac{b_5}{A_2} + \frac{C_{V1}}{A_2}\sqrt{\frac{\rho gh_1}{G_f}} - \frac{C_{V2}}{A_2}\sqrt{\frac{\rho gh_2}{G_f}} \quad (4.19)$$

พิจารณาถังควบคุมที่3

$$\text{อัตราการสะสมของมวล} = \frac{d(\rho V_3)}{dt} = A_3\rho\frac{dh_3}{dt} \quad (4.20)$$

เมื่อ $V_3 = A_3h_3$ และ A_3, ρ คงที่

$$\begin{aligned} \text{มวลที่ไหลเข้าถัง 3} &= \text{มวลที่ไหลผ่าน Control Valve1} \\ &= \rho(c_1u_1^4 + c_2u_1^3 + c_3u_1^2 + c_4u_1) \end{aligned} \quad (4.21)$$

เมื่อ c คือค่าสัมประสิทธิ์การเปิด Control Valve1 ต่ออัตราการไหลของน้ำเข้าถัง3

$$\begin{aligned} \text{มวลที่ไหลออกถัง 3} &= \text{มวลที่ไหลผ่าน CV3} \\ &= \rho(C_{V3}\sqrt{\frac{\rho gh_3}{G_f}}) \end{aligned} \quad (4.22)$$

$$\text{มวลที่เกิดขึ้น} = 0 \quad (4.23)$$

$$\text{มวลที่หายไป} = 0 \quad (4.24)$$

แทนค่าจากสมการที่ 4.20 ถึง 4.24 ในสมการที่ 4.5 จะได้

$$A_3\rho\frac{dh_3}{dt} = \rho(c_1u_1^4 + c_2u_1^3 + c_3u_1^2 + c_4u_1 - C_{V3}\sqrt{\frac{\rho gh_3}{G_f}}) \quad (4.25)$$

จากสมการ 4.25 จัดรูปใหม่จะได้สมการ 4.26

$$\frac{dh_3}{dt} = \frac{c_1}{A_3}u_1^4 + \frac{c_2}{A_3}u_1^3 + \frac{c_3}{A_3}u_1^2 + \frac{c_4}{A_3}u_1 - \frac{C_{V3}}{A_3}\sqrt{\frac{\rho gh_3}{G_f}} \quad (4.26)$$

พิจารณาถังควบคุมที่ 4

$$\text{อัตราการสะสมของมวล} = \frac{d(\rho V_4)}{dt} = A_4\rho\frac{dh_4}{dt} \quad (4.27)$$

$$\text{เมื่อ} \quad V_4 = A_4h_4 \quad \text{และ} \quad A_4, \rho \text{ คงที่}$$

มวลที่ไหลเข้าถัง 4 = มวลที่ไหลผ่าน Control Valve2 + มวลที่ไหลผ่าน CV3

$$= \rho(d_1u_2^4 + d_2u_2^3 + d_3u_2^2 + d_4u_2 + d_5 + C_{V3}\sqrt{\frac{\rho gh_3}{G_f}}) \quad (4.28)$$

เมื่อ d คือค่าสัมประสิทธิ์การเปิด Control Valve2 ต่ออัตราการไหลของน้ำเข้าถัง 4

$$\begin{aligned} \text{มวลที่ไหลออกถัง 4} &= \text{มวลที่ไหลผ่าน CV4} \\ &= \rho(C_{V4}\sqrt{\frac{\rho gh_4}{G_f}}) \end{aligned} \quad (4.29)$$

$$\text{มวลที่เกิดขึ้น} = 0 \quad (4.30)$$

$$\text{มวลที่หายไป} = 0 \quad (4.31)$$

แทนค่าจากสมการที่ 4.27 ถึง 4.31 ในสมการที่ 4.5 จะได้

$$A_4 \rho \frac{dh_4}{dt} = \rho(d_1 u_2^4 + d_2 u_2^3 + d_3 u_2^2 + d_4 u_2 + d_5 + C_{V3} \sqrt{\frac{\rho g h_3}{G_f}} - C_{V4} \sqrt{\frac{\rho g h_4}{G_f}}) \quad (4.32)$$

จากสมการ 4.32 จัดรูปใหม่จะได้สมการ 4.33

$$\frac{dh_4}{dt} = \frac{d_1}{A_4} u_2^4 + \frac{d_2}{A_4} u_2^3 + \frac{d_3}{A_4} u_2^2 + \frac{d_4}{A_4} u_2 + \frac{d_5}{A_4} + \frac{C_{V3}}{A_4} \sqrt{\frac{\rho g h_3}{G_f}} - \frac{C_{V4}}{A_4} \sqrt{\frac{\rho g h_4}{G_f}} \quad (4.33)$$

ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ของการทดลองระบบสี่ถังที่สถานะอยู่ตัว

A_1, A_2, A_3, A_4	0.016 m ²	C_{V1}	0.0490280
ρ	1000 kg/m ³	C_{V2}	0.3070308
\bar{h}_1	0.27 m	C_{V3}	0.0555301
\bar{h}_2	0.30 m	C_{V4}	0.2909775
\bar{h}_3	0.29 m	\bar{u}_1	0.5
\bar{h}_4	0.30 m	\bar{u}_2	0.5
g	9.81 m/s ²		
G_f	1		

- เมื่อ
- h_i คือ ความสูงของน้ำในถังที่ i (m.)
 - A_i คือ พื้นที่หน้าตัดของถังที่ i (m²)
 - ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m³)
 - C_{Vi} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์ว i
 - g คือ ค่าแรงโน้มถ่วง = 9.81m/s²
 - G_f คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำ = 1
 - u_i คือ ปริมาณการเปิด Control Valve i

\bar{h}_i คือ ความสูงของน้ำถังที่ i ที่สถานะอยู่ตัว

\bar{u}_i คือ ปริมาณการเปิด Control Valve i ที่สถานะอยู่ตัว

ขอบเขตของตัวแปรปรับ (--) : $0 \leq u_1, u_2 \leq 1$

ขอบเขตของตัวแปรควบคุม (m) : $0 \leq h_1, h_2, h_3, h_4 \leq 0.8$

4.2.2 การทำให้เป็นเชิงเส้น (Linearization)

จากสมการที่ 4.12, 4.19, 4.26 และ 4.33 จะพบว่าสมการที่กล่าวมาไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้น จึงต้องใช้อนุกรมเทย์เลอร์ดังสมการที่ 4.34 เพื่อแปลงให้เป็นเชิงเส้นและจัดรูปให้เป็น state space model ดังสมการที่ 4.35

$$f(x, u) = f(x_0, u_0) + \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{(x_0, u_0)} (x - x_0) + \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{(x_0, u_0)} (u - u_0) \quad (4.34)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{dh_1'}{dt} \\ \frac{dh_2'}{dt} \\ \frac{dh_3'}{dt} \\ \frac{dh_4'}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \alpha_{14} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & \alpha_{24} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & \alpha_{34} \\ \alpha_{41} & \alpha_{42} & \alpha_{43} & \alpha_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1' \\ h_2' \\ h_3' \\ h_4' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} \\ \beta_{21} & \beta_{22} \\ \beta_{31} & \beta_{32} \\ \beta_{41} & \beta_{42} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1' \\ u_2' \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

โดยที่ $\alpha_{11} = -\frac{C_{v1}}{2A_1} \sqrt{\frac{\rho g}{G_f \bar{h}_1}}$

$$\alpha_{12} = 0$$

$$\alpha_{13} = 0$$

$$\alpha_{14} = 0$$

$$\beta_{11} = 0$$

$$\beta_{12} = \frac{a_1}{A_1} 4\bar{u}_2^3 + \frac{a_2}{A_1} 3\bar{u}_2^2 + \frac{a_3}{A_1} 2\bar{u}_2 + \frac{a_4}{A_1}$$

$$\alpha_{21} = \frac{C_{V1}}{2A_2} \sqrt{\frac{\rho g}{G_f h_1}}$$

$$\alpha_{22} = -\frac{C_{V2}}{2A_2} \sqrt{\frac{\rho g}{G_f h_2}}$$

$$\alpha_{23} = 0$$

$$\alpha_{24} = 0$$

$$\beta_{21} = \frac{b_1}{A_2} 4\bar{u}_1^3 + \frac{b_2}{A_2} 3\bar{u}_1^2 + \frac{b_3}{A_2} 2\bar{u}_1 + \frac{b_4}{A_2}$$

$$\beta_{22} = 0$$

$$\alpha_{31} = 0$$

$$\alpha_{32} = 0$$

$$\alpha_{33} = -\frac{C_{V3}}{2A_3} \sqrt{\frac{\rho g}{G_f h_3}}$$

$$\alpha_{34} = 0$$

$$\beta_{31} = \frac{c_1}{A_3} 4\bar{u}_1^3 + \frac{c_2}{A_3} 3\bar{u}_1^2 + \frac{c_3}{A_3} 2\bar{u}_1 + \frac{c_4}{A_3}$$

$$\beta_{32} = 0$$

$$\alpha_{41} = 0$$

$$\alpha_{42} = 0$$

$$\alpha_{43} = \frac{C_{V3}}{2A_4} \sqrt{\frac{\rho g}{G_f h_3}}$$

$$\alpha_{44} = -\frac{C_{V4}}{2A_4} \sqrt{\frac{\rho g}{G_f h_4}}$$

$$\beta_{41} = 0$$

$$\beta_{42} = \frac{d_1}{A_4} 4\bar{u}_2^3 + \frac{d_2}{A_4} 3\bar{u}_2^2 + \frac{d_3}{A_4} 2\bar{u}_2 + \frac{d_4}{A_4}$$

และแทนค่าจากตารางที่ 4.6 จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบ state space model ดังสมการที่ 4.36

$$\begin{bmatrix} \frac{dh_1'}{dt} \\ \frac{dh_2'}{dt} \\ \frac{dh_3'}{dt} \\ \frac{dh_4'}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0047 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0047 & -0.0308 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0053 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0053 & -0.0282 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1' \\ h_2' \\ h_3' \\ h_4' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0.0132 \\ -0.0018 & 0 \\ 0.0104 & 0 \\ 0 & -0.0043 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1' \\ u_2' \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

เมื่อ \bar{h}_i คือ ความสูงของน้ำถังที่ i ที่สถานะอยู่ตัว

\bar{u}_i คือ ปริมาณการเปิด Control Valve i ที่สถานะอยู่ตัว

$$h_1' = h_1 - \bar{h}_1$$

$$h_2' = h_2 - \bar{h}_2$$

$$h_3' = h_3 - \bar{h}_3$$

$$h_4' = h_4 - \bar{h}_4$$

$$u_1' = u_1 - \bar{u}_1$$

$$u_2' = u_2 - \bar{u}_2$$

4.3 กระบวนการทดลองระบบสี่ถัง

การศึกษาดูผลการควบคุมในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษามรรณะของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายและตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยทำการควบคุมด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย (Setpoint change) โดยแบ่งหัวข้อของกรณีศึกษาดังต่อไปนี้

- 1) กรณีการควบคุมระดับของของเหลวในถังที่ 1 กับถังที่ 3
- 2) กรณีการควบคุมระดับของของเหลวในถังที่ 2 กับถังที่ 4
- 3) กรณีการควบคุมระดับของของเหลวในถังที่ 1 กับถังที่ 3 ที่มีเวลาหน่วง
- 4) กรณีการควบคุมระดับของของเหลวในถังที่ 2 กับถังที่ 4 ที่มีเวลาหน่วง

ในการทดลองควบคุมกระบวนการจริงมีวิธีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) ปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ให้อยู่ที่ 50% รอกจนกระทั่งกระบวนการเข้าสู่สถานะอยู่ตัว ที่ความสูงของน้ำถังที่ 1 และถังที่ 3 มีค่าอยู่ที่ 0.3 เมตร และความสูงของน้ำในถังที่ 2 และถังที่ 4 มีค่าอยู่ที่ 0.25 เมตร

2) ทำการควบคุมระดับของของเหลวด้วยตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายและตัวควบคุมแบบพีไอดีให้อยู่ที่ค่าเป้าหมายโดยค่าเป้าหมายสำหรับถังที่ 1 และถังที่ 3 มีค่าเท่ากับ 50 เซนติเมตร และของถังที่ 2 และถังที่ 4 มีค่าเท่ากับ 30 เซนติเมตรด้วยโปรแกรม matlab

3.) ทำการเก็บข้อมูลระดับของของเหลวและการตอบสนองของวาล์วควบคุมทุก 1 วินาที ในแต่ละกรณีศึกษา จากทั้งสองตัวควบคุม

4.) คำนวณหาค่าผลรวมของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Integral of the absolute value of error, IAE) ดังสมการที่ 4.37

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (4.37)$$

เมื่อ $e(t)$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อน (error)

dt คือ ผลต่างของเวลาการเก็บข้อมูล

5) ทำการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมให้เหมาะสมกับการควบคุม โดยให้ค่าของ IAE มีค่าน้อยที่สุด

6) เปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมในแต่ละกรณีศึกษา โดยพิจารณาจากค่า IAE

4.4 ตัวควบคุม

4.4.1 ตัวควบคุมแบบพีไอดี

ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ใช้ในงานวิจัยได้ใช้เฉพาะโหมดพีและไอทั้งนี้เพราะการใช้โหมดดีจะเป็นการขยายสัญญาณรบกวนทำให้การควบคุมไม่เสถียร ตัวควบคุมแบบพีไอในการทดลองจะเป็นไปดังสมการที่ 4.38

$$u(t) = \bar{u} + K_c e(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int e(t) dt \quad (4.38)$$

เมื่อ	$u(t)$	คือ ปริมาณการเปิด Control Valve
	\bar{u}	คือ ปริมาณการเปิด Control Valve ที่สถานะอยู่ตัว
	K_c	คือ อัตราการขยายตัวควบคุม (Controller Gain)
	τ_I	คือ เวลาปริพันธ์ (Integral Time)
	$e(t)$	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของระดับน้ำจากค่าเป้าหมาย

วิธีการปรับตัวควบคุมเริ่มต้นในการทดลองได้ใช้วิธีแบบลูเปิดของ Marlin and Ciancone ที่ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์เดียวซึ่งเรียกว่า อัตราส่วนเวลาหน่วง (Fraction dead time) อัตราส่วนเวลาหน่วงจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.0 ถึง 1.0 และได้จากการคำนวณจากฟังก์ชันถ่ายโอนลำดับหนึ่งที่มีเวลาหน่วง (first-order-with-dead-time transfer function) ซึ่งอัตราส่วนเวลาหน่วงจะแสดงถึงสัดส่วนของเวลาทั้งหมดที่ใช้สำหรับการตอบสนองแบบลูเปิดเพื่อให้ถึงค่า 63.2% ของค่าสุดท้ายอันเนื่องมาเวลาหน่วง ในการหาค่าพารามิเตอร์ควบคุมพีไอดีโดยใช้ความสัมพันธ์ Ciancone สามารถแบ่งเป็นสามขั้นตอนได้ดังนี้

1) จากแบบจำลองฟังก์ชันถ่ายโอนลำดับหนึ่งที่มีเวลาหน่วงสามารถคำนวณหาค่าอัตราส่วนเวลาหน่วง $\theta/(\theta + \tau)$ ได้จากสมการ 4.39 และ 4.40

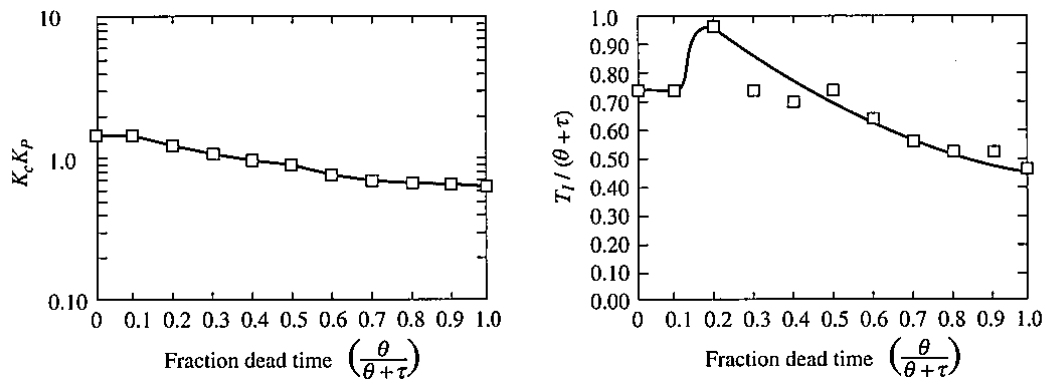
$$\tau = 1.5(t_{63.2\%} - t_{28.3\%}) \quad (4.39)$$

$$\theta = t_{63.2\%} - \tau \quad (4.40)$$

เมื่อ $t_{63.2\%}$ คือ เวลาที่ใช้ในการตอบสนองเพื่อให้ถึงค่า 63.2% ของค่าสุดท้าย

$t_{28.3\%}$ คือ เวลาที่ใช้ในการตอบสนองเพื่อให้ถึงค่า 28.3% ของค่าสุดท้าย

2) อ่านค่าไร้หน่วย $K_c K_p, \tau_I / (\theta + \tau)$ จากรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ Ciancone ที่ใช้ปรับตัวควบคุมพีไอดี ในรูปไร้หน่วย [21]

3) คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ K_c และ τ_I จากค่า $K_c K_p, \tau_I / (\theta + \tau)$ ที่อ่านได้จากความสัมพันธ์ในขั้นตอนที่สองและสมการที่ 4.41 และ 4.42 ในการคำนวณ

$$K_c = \frac{(K_c K_p)}{K_p} \quad (4.41)$$

$$\tau_I = \left(\frac{\tau_I}{\theta + \tau} \right) (\theta + \tau) \quad (4.42)$$

ในงานวิจัยนี้ใช้เงื่อนไขในการปรับตัวควบคุมแบบพีไอดีคือ พิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรปรับ(ปริมาณการเปิด Control Valve) ต้องไม่เกิน 10% และสามารถควบคุมกระบวนการให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้โดยไม่มีแกว่งของตัวแปรควบคุม

4.4.2 การทดสอบ (Relative Gain Array, RGA)

RGA เป็นเครื่องมือที่ถูกใช้ในการควบคุมกระบวนการหลายตัวแปร อยู่บนหลักการของการเทียบการควบคุมคู่เดียวกับการควบคุมหลายตัวแปร มักจะแสดงในรูปแบบอาร์เรย์ของอัตราส่วนพฤติกรรมคู่เดียวระหว่างตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตหนึ่งคู่เทียบกับพฤติกรรมของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตคู่เดียวกันภายใต้การควบคุมหลายตัวแปรอุดมคติ ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) คำนวณหา Gain Matrix ดังสมการที่ 4.43

$$H = GU \quad (4.43)$$

เมื่อ

H คือ เวกเตอร์ความสูงของน้ำที่สถานะอยู่ตัว

U คือ เวกเตอร์ปริมาณการเปิด Control Valve ที่สถานะอยู่ตัว

G คือ Gain Matrix

โดยจากสมการที่ 4.36 สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ 4.44, 4.45, 4.46, 4.47

$$\frac{dh'_1}{dt} = -\delta_1 h'_1 + \beta_{12} u'_2 \quad (4.44)$$

$$\frac{dh'_2}{dt} = \delta_1 h'_1 - \delta_2 h'_2 + \beta_{21} u'_1 \quad (4.45)$$

$$\frac{dh'_3}{dt} = -\delta_3 h'_3 + \beta_{31} u'_1 \quad (4.46)$$

$$\frac{dh'_4}{dt} = \delta_3 h'_3 - \delta_4 h'_4 + \beta_{12} u'_2 \quad (4.47)$$

เมื่อ

$$\delta_1 = -\alpha_{11} = \alpha_{21}$$

$$\delta_2 = -\alpha_{22}$$

$$\delta_3 = -\alpha_{33} = \alpha_{43}$$

$$\delta_4 = -\alpha_{44}$$

พิจารณาถึงควบคุมที่ 1

จากสมการที่ 4.44 ทำการอินทิเกรตจากเวลาเท่ากับศูนย์ ถึงเวลาใดๆเพื่อหาความสูงของน้ำจากปริมาณการเปิด Control Valve ดังแสดงในสมการที่ 4.48, 4.49 และ 4.50

$$\frac{d(e^{\delta_1 t} h'_1)}{dt} = e^{\delta_1 t} \beta_{12} u'_2 \quad (4.48)$$

$$e^{\delta_1 t} h'_1(t) - h'_1(0) = e^{\delta_1 t} \frac{\beta_{12} u'_2}{\delta_1} - \frac{\beta_{12} u'_2}{\delta_1} \quad (4.49)$$

$$h'_1(t) = \frac{\beta_{12} u'_2}{\delta_1} (1 - e^{-\delta_1 t}) + h'_1(0) e^{-\delta_1 t} \quad (4.50)$$

จากสมการที่ 4.50 แทนเวลาเท่ากับอนันต์เพื่อหาความสูงของน้ำจากปริมาณการเปิด Control Valve ที่สถานะอยู่ตัวดังแสดงในสมการที่ 4.51 และ 4.52

$$h_1'(\infty) = \frac{\beta_{12}u_2'}{\delta_1}(1-0) + h_1'(0)*0 \quad (4.51)$$

$$h_1'(\infty) = \frac{\beta_{12}u_2'}{\delta_1} \quad (4.52)$$

พิจารณาถึงควบคุมที่ 2

จากสมการที่ 4.45 ทำการอินทิเกรตจากเวลาเท่ากับศูนย์ ถึงเวลาใดๆเพื่อหาความสูงของน้ำจากปริมาณการเปิด Control Valve ดังแสดงในสมการที่ 4.53, 4.54 และ 4.55

$$\frac{d(e^{\delta_2 t} h_2')}{dt} = e^{\delta_2 t} (\delta_1 h_1' + \beta_{21} u_1') \quad (4.53)$$

$$e^{\delta_2 t} h_2'(t) - h_2'(0) = e^{\delta_2 t} \frac{(\delta_1 h_1' + \beta_{21} u_1')}{\delta_2} - \frac{(\delta_1 h_1' + \beta_{21} u_1')}{\delta_2} \quad (4.54)$$

$$h_2'(t) = \frac{(\delta_1 h_1' + \beta_{21} u_1')}{\delta_2} (1 - e^{-\delta_2 t}) + h_2'(0) e^{-\delta_2 t} \quad (4.55)$$

จากสมการที่ 4.55 แทนเวลาเท่ากับอนันต์เพื่อหาความสูงของน้ำจากปริมาณการเปิด Control Valve ที่สถานะอยู่ตัวดังแสดงในสมการที่ 4.56 และ 4.57

$$h_2'(\infty) = \frac{(\delta_1 h_1' + \beta_{21} u_1')}{\delta_2} (1-0) + h_2'(0)*0 \quad (4.56)$$

$$h_2'(\infty) = \frac{(\delta_1 h_1' + \beta_{21} u_1')}{\delta_2} \quad (4.57)$$

แทนค่าจากสมการที่ 4.52 ในสมการที่ 4.57

$$h_2'(\infty) = \frac{(\beta_{12}u_2' + \beta_{21}u_1')}{\delta_2} \quad (4.58)$$

พิจารณาถึงควบคุมที่ 3

จากสมการที่ 4.46 ทำการอินทิเกรตจากเวลาเท่ากับศูนย์ ถึงเวลาใดๆเพื่อหาความสูงของน้ำจากปริมาณการเปิด Control Valve ดังแสดงในสมการที่ 4.59, 4.60 และ 4.61

$$\frac{d(e^{\delta_3 t} h'_3)}{dt} = e^{\delta_3 t} \beta_{31} u'_1 \quad (4.59)$$

$$e^{\delta_3 t} h'_3(t) - h'_3(0) = e^{\delta_3 t} \frac{\beta_{31} u'_1}{\delta_3} - \frac{\beta_{31} u'_1}{\delta_3} \quad (4.60)$$

$$h'_3(t) = \frac{\beta_{31} u'_1}{\delta_3} (1 - e^{-\delta_3 t}) + h'_3(0) e^{-\delta_3 t} \quad (4.61)$$

จากสมการที่ 4.61 แทนเวลาเท่ากับอนันต์เพื่อหาความสูงของน้ำจากปริมาณการเปิด Control Valve ที่สถานะอยู่ตัวดังแสดงในสมการที่ 4.62 และ 4.63

$$h'_3(\infty) = \frac{\beta_{31} u'_1}{\delta_3} (1 - 0) + h'_3(0) * 0 \quad (4.62)$$

$$h'_3(\infty) = \frac{\beta_{31} u'_1}{\delta_3} \quad (4.63)$$

พิจารณาถึงควบคุมที่ 4

จากสมการที่ 4.47 ทำการอินทิเกรตจากเวลาเท่ากับศูนย์ ถึงเวลาใดๆเพื่อหาความสูงของน้ำจากปริมาณการเปิด Control Valve ดังแสดงในสมการที่ 4.64, 4.65 และ 4.66

$$\frac{d(e^{\delta_4 t} h'_4)}{dt} = e^{\delta_4 t} (\delta_3 h'_3 + \beta_{42} u'_2) \quad (4.64)$$

$$e^{\delta_4 t} h'_4(t) - h'_4(0) = e^{\delta_4 t} \frac{(\delta_3 h'_3 + \beta_{42} u'_2)}{\delta_4} - \frac{(\delta_3 h'_3 + \beta_{42} u'_2)}{\delta_4} \quad (4.65)$$

$$h'_4(t) = \frac{(\delta_3 h'_3 + \beta_{42} u'_2)}{\delta_4} (1 - e^{-\delta_4 t}) + h'_4(0) e^{-\delta_4 t} \quad (4.66)$$

จากสมการที่ 4.60 แทนเวลาเท่ากับอนันต์เพื่อหาความสูงของน้ำจากปริมาณการเปิด Control Valve ที่สถานะอยู่ตัวดังแสดงในสมการที่ 4.67 และ 4.68

$$h'_4(\infty) = \frac{(\delta_3 h'_3 + \beta_{42} u'_2)}{\delta_4} (1 - 0) + h'_4(0) * 0 \quad (4.67)$$

$$h'_4(\infty) = \frac{(\delta_3 h'_3 + \beta_{42} u'_2)}{\delta_4} \quad (4.68)$$

แทนค่าจากสมการที่ 4.63 ในสมการที่ 4.68

$$h_4'(\infty) = \frac{(\beta_{31}u_1' + \beta_{42}u_2')}{\delta_4} \quad (4.69)$$

จากสมการที่ 4.52, 4.58, 4.63, 4.69 สามารถจัดรูปได้ดังสมการที่ 4.70

$$\begin{bmatrix} h_1' \\ h_2' \\ h_3' \\ h_4' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\beta_{12}}{\delta_1} \\ \frac{\beta_{21}}{\delta_2} & \frac{\beta_{12}}{\delta_2} \\ \frac{\beta_{31}}{\delta_3} & 0 \\ \frac{\beta_{31}}{\delta_4} & \frac{\beta_{42}}{\delta_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1' \\ u_2' \end{bmatrix} \quad (4.70)$$

แทนค่า β, δ จากสมการที่ 4.36 ลงในสมการที่ 4.70 ได้ดังสมการที่ 4.71

$$\begin{bmatrix} h_1' \\ h_2' \\ h_3' \\ h_4' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 2.8359 \\ -0.0582 & 0.4296 \\ 1.9727 & 0 \\ 0.3702 & -0.1543 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1' \\ u_2' \end{bmatrix} \quad (4.71)$$

2) คำนวณหา Relative Gain Array เพื่อเลือกตัวแปรปรับสำหรับการควบคุมกระบวนการรูปเดียว

- กรณีการควบคุมระดับของของเหลวในถังที่ 1 กับถังที่ 3

จากสมการที่ 4.71 เลือกความสูงของน้ำในถังที่ 1 และ ถังที่ 3 เป็นตัวแปรควบคุมเพื่อกำหนด Gain Matrix

$$\begin{bmatrix} h_1' \\ h_3' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 2.8359 \\ 1.9727 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1' \\ u_2' \end{bmatrix} \quad (4.72)$$

คำนวณหา Relative Gain Array จากสมการที่ 4.72

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.73)$$

จากสมการที่ 4.73 สามารถสรุปได้ว่ากรณีการควบคุมระดับของของเหลวในถังที่ 1 กับถังที่ 3 หากต้องการควบคุมระดับน้ำในถังที่ 1 ให้ปรับปริมาณการเปิด Control Valve 2 และหากต้องการควบคุมระดับน้ำในถังที่ 3 ให้ปรับปริมาณการเปิด Control Valve 1

- กรณีการควบคุมระดับของของเหลวในถังที่ 2 กับถังที่ 4

จากสมการที่ 4.71 เลือกความสูงของน้ำในถังที่ 2 และ ถังที่ 4 เป็นตัวแปรควบคุม เพื่อกำหนด Gain Matrix

$$\begin{bmatrix} h'_2 \\ h'_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0582 & 0.4296 \\ 0.3702 & -0.1543 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u'_1 \\ u'_2 \end{bmatrix} \quad (4.74)$$

คำนวณหา Relative Gain Array จากสมการที่ 4.74

$$\Lambda = \begin{bmatrix} -0.0599 & 1.0599 \\ 1.0599 & -0.0599 \end{bmatrix} \quad (4.75)$$

จากสมการที่ 4.75 สามารถสรุปได้ว่ากรณีการควบคุมระดับของของเหลวในถังที่ 2 กับถังที่ 4 หากต้องการควบคุมระดับน้ำในถังที่ 2 ให้ปรับปริมาณการเปิด Control Valve 2 และ หากต้องการควบคุมระดับน้ำในถังที่ 4 ให้ปรับปริมาณการเปิด Control Valve 1

4.4.3 ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย

ส่วนประกอบของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายในการทดลองนี้ ประกอบไปด้วย

1) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Math Model) ซึ่งโดยทั่วไปตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการในการควบคุม โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในหัวข้อ 4.2

$$\begin{bmatrix} \frac{dh'_1}{dt} \\ \frac{dh'_2}{dt} \\ \frac{dh'_3}{dt} \\ \frac{dh'_4}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0047 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0047 & -0.0308 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0053 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0053 & -0.0282 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h'_1 \\ h'_2 \\ h'_3 \\ h'_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0.0132 \\ -0.0018 & 0 \\ 0.0104 & 0 \\ 0 & -0.0043 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u'_1 \\ u'_2 \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

เมื่อ \bar{h}_i คือ ความสูงของน้ำในถังที่ i ที่สถานะอยู่ตัว (m.)

\bar{u}_i คือ ปริมาณการเปิด Control Valve i ที่สถานะอยู่ตัว

$$h'_1 = h_1 - \bar{h}_1$$

$$h'_2 = h_2 - \bar{h}_2$$

$$h'_3 = h_3 - \bar{h}_3$$

$$h'_4 = h_4 - \bar{h}_4$$

$$u'_1 = u_1 - \bar{u}_1$$

$$u'_2 = u_2 - \bar{u}_2$$

2) ขอบเขตของกระบวนการ (Constraint function)

$$0 < h_{1,2,3,4} < 0.8$$

$$0 < u_{1,2} < 1$$

$$0 < \Delta u_{1,2} < 0.1$$

3) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

$$J = \sum_k^{k+M} (x^T Q x + u^T R u)$$

Q, R คือ เวกเตอร์น้ำหนักเพื่อเลือกผลของการตอบสนอง ของกระบวนการ

โดยมีขั้นตอนการปรับแต่งตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายดังต่อไปนี้

1) กำหนดปัจจัยถ่วงน้ำหนักเพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ต้องการ ปัจจัยถ่วงน้ำหนักของตัวแปรควบคุม (Q) เป็นเมตริกซ์ที่เป็น diagonal ที่มีค่าเป็นบวก ค่าเมตริกซ์ปัจจัยถ่วงน้ำหนักของตัวแปรควบคุมพื้นฐานเป็นการวัดความสำคัญของการควบคุมสำหรับแต่ละตัวแปรควบคุม ถ้าค่าเมตริกซ์ปัจจัยถ่วงน้ำหนักของตัวแปรควบคุมเพิ่มขึ้นการเบี่ยงเบนจากค่าเป้าหมายของตัวแปรควบคุมจะลดลง ส่วนปัจจัยถ่วงน้ำหนักของตัวแปรปรับ (R) เป็นเมตริกซ์ที่เป็น diagonal ที่มีค่าเป็นบวก ปัจจัยถ่วงน้ำหนักของตัวแปรปรับที่ผลต่อการเคลื่อนที่ของตัวแปรปรับสำหรับในการปรับกระบวนการ ถ้าปัจจัยถ่วงน้ำหนักของตัวแปรปรับเพิ่มขึ้นทำให้การเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับลดลง ซึ่งจะส่งผลสมรรถนะในการควบคุมลดลงแต่ความทนทานในการควบคุมเพิ่มขึ้น

2) เลือกเวลาสุดท้ายที่เหมาะสม (จำนวนตัวแปรควบคุม) (Prediction Horizon, P)

หลักการเลือกเวลาสุดท้าย คือ เลือกเวลาสุดท้ายให้มากกว่าเวลาของโพลลูบเปิด เพื่อรับประกันเสถียรภาพของกระบวนการ อย่างไรก็ตามสามารถเลือกสุดท้ายน้อยกว่าได้ ทั้งนี้ ต้องตรวจสอบว่าตัวแปรควบคุมสามารถเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ภายในเวลาที่เลือกไว้

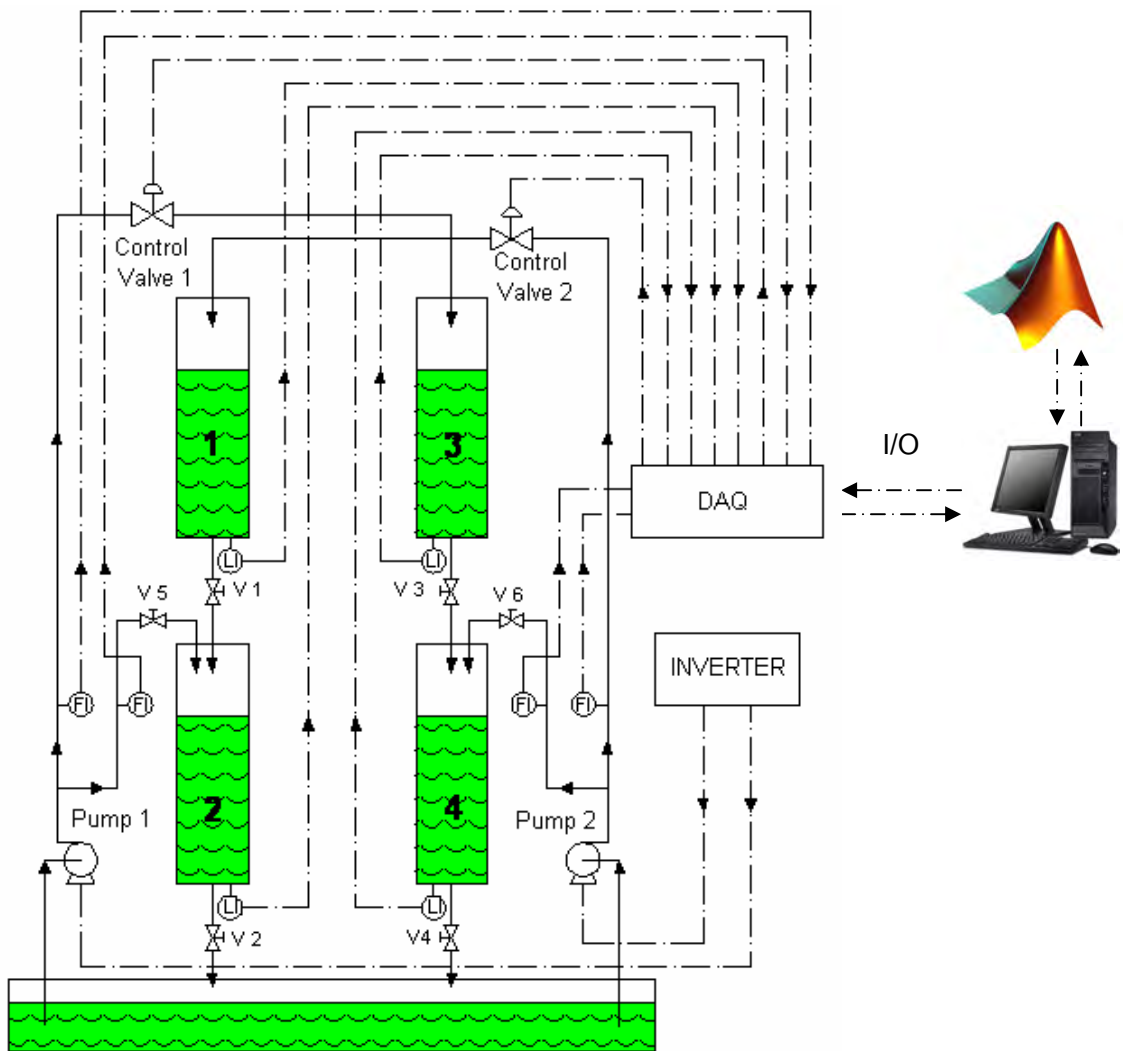
3) กำหนดจำนวนตัวแปรปรับ (Control Horizon, M)

ปกติจะกำหนดจำนวนตัวแปรปรับให้น้อยกว่าจำนวนตัวแปรควบคุมเพื่อลดเวลาออกปติไมซ์ ทั้งนี้จำนวนตัวแปรปรับที่เหมาะสมจะต้องให้สมรรถนะการควบคุมที่ดีและใช้เวลาคำนวณสั้นกว่าเวลาการควบคุมที่ต้องการจึงจะสามารถนำตัวแปรปรับที่ได้ไปใช้ควบคุมกระบวนการ โดยแนวทางของการปรับแต่งตัวควบคุม คือ ทำการปรับกระบวนการให้มีค่า IAE น้อยที่สุด และคำนึงถึงความไม่มีรุนแรงของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับ

บทที่ 5

ผลการทดลอง

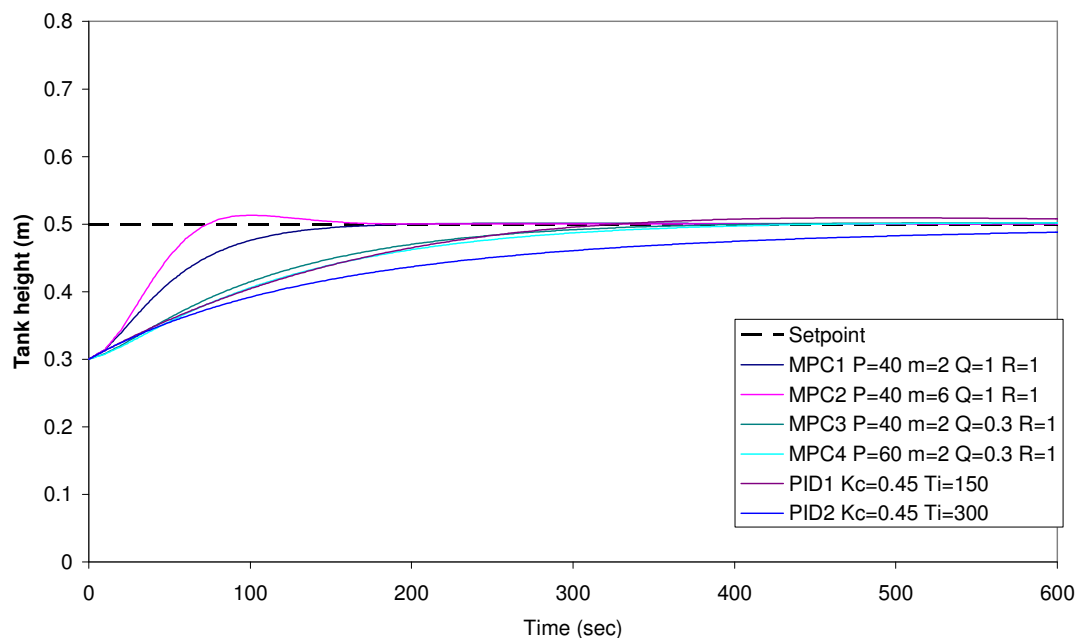
บทนี้กล่าวถึงผลการควบคุมระดับของของเหลวในระบบสี่ถังและเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมระหว่างตัวควบคุมพีไอดีกับตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย โดยแบ่งตามกรณีศึกษาดังต่อไปนี้



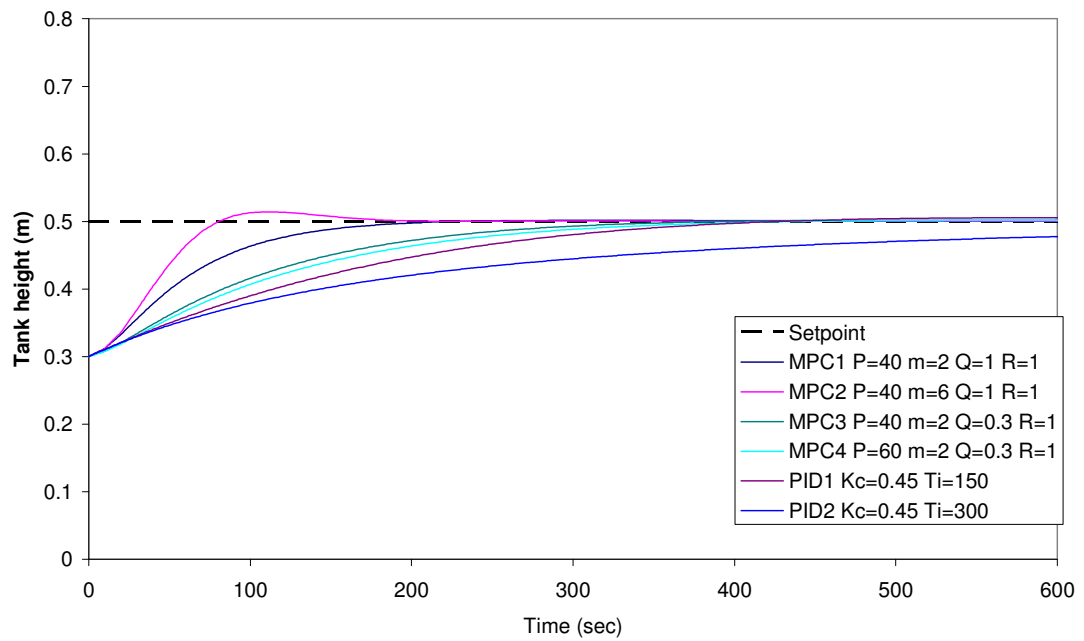
รูปที่ 5.1 กระบวนการของระบบสี่ถัง

5.1 กรณีการควบคุมระดับของของเหลวในถังที่ 1 กับถังที่ 3 ที่ไม่มีเวลาหน่วง

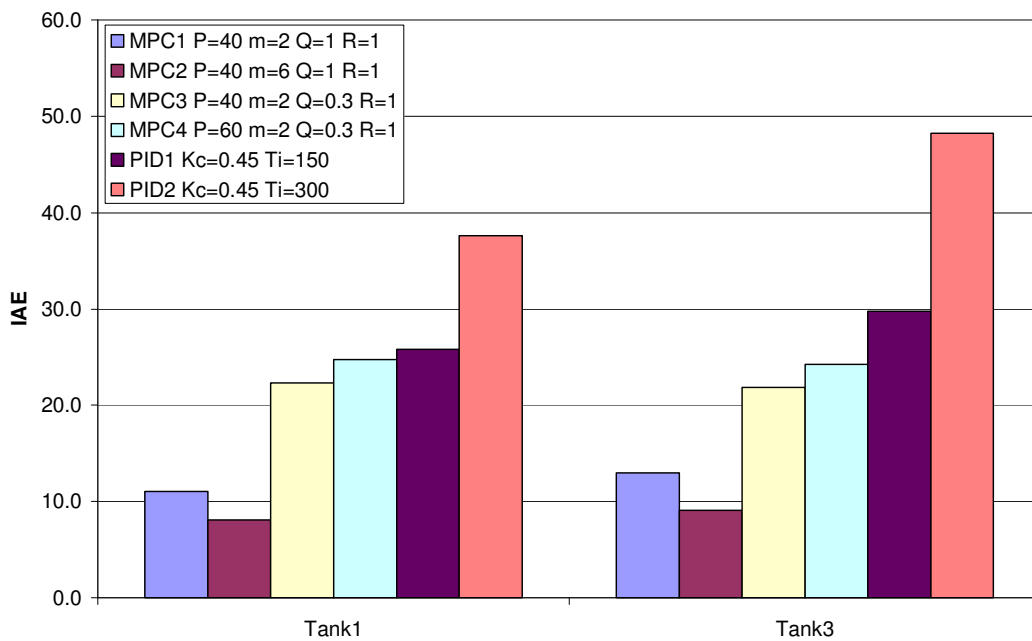
จากรูปที่ 5.2 ถึง 5.3 เป็นผลการทดลองควบคุมระดับของน้ำในถังที่ 1 และ ถังที่ 3 ซึ่งพบว่าตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย MPC1 และ MPC2 สามารถควบคุมระดับของน้ำทั้งสองถังให้เข้าสู่ค่าเป้าหมาย 0.5 เมตรได้เร็วกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายมีสมรรถนะการควบคุมดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี ทั้งนี้พิจารณาจากค่า IAE ซึ่งตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายทั้ง 4 ตัว มีค่า IAE น้อยกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี ดังรูปที่ 5.4 ในกรณีนี้ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย MPC2 จะให้ค่า IAE น้อยที่สุด เมื่อเทียบกับตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายทั้ง 4 ตัว



รูปที่ 5.2 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 1 ของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย และตัวควบคุมแบบพีไอดี



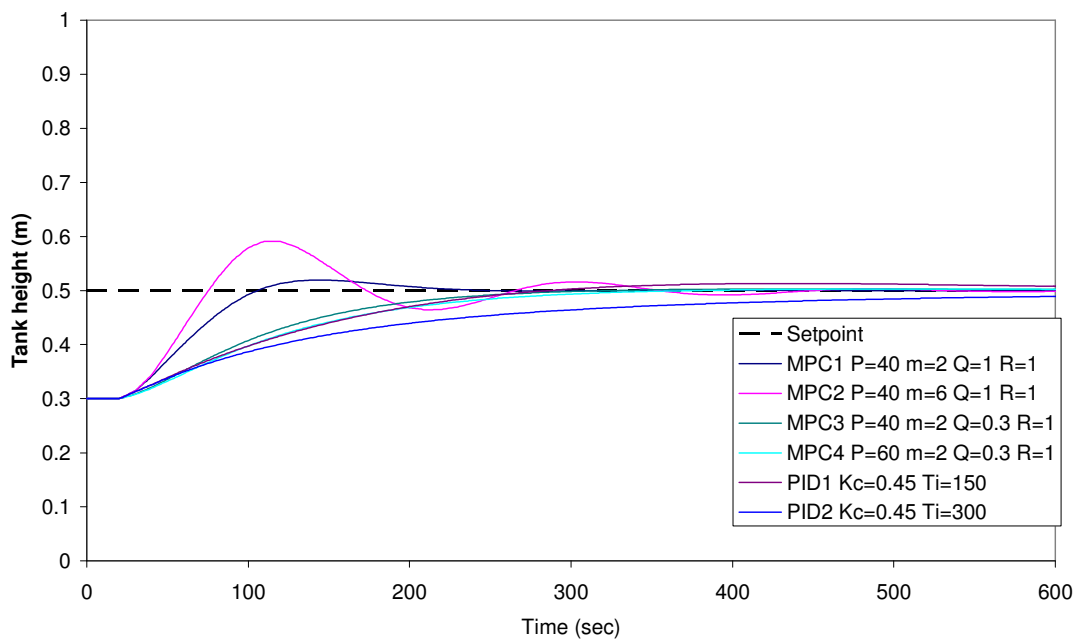
รูปที่ 5.3 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 3 ของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย และตัวควบคุมแบบพีไอดี



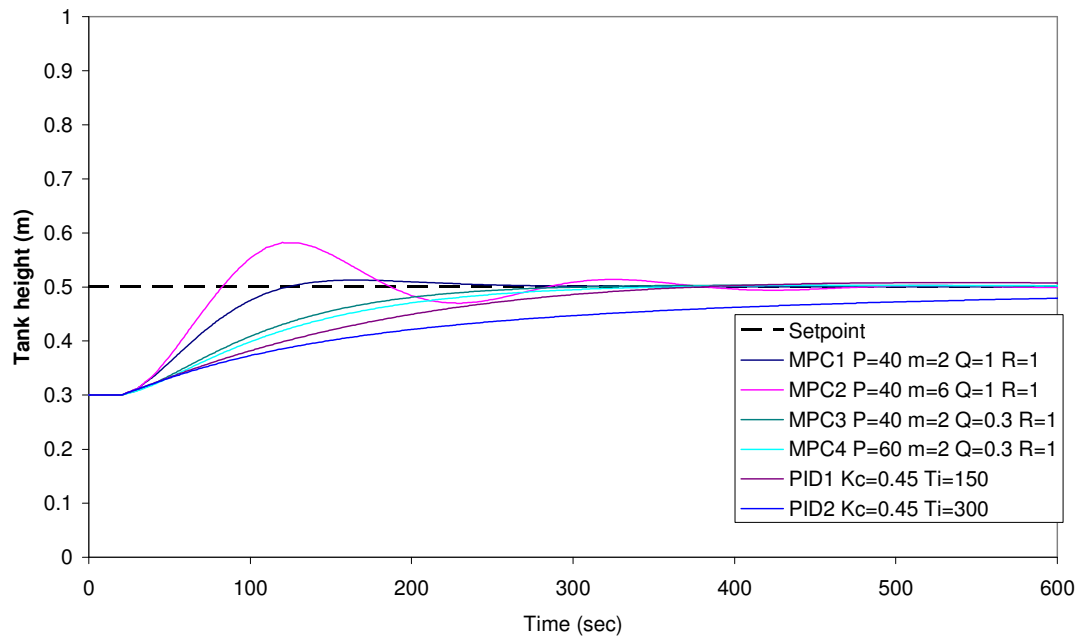
รูปที่ 5.4 ค่าIAE ของการควบคุมระดับของของเหลวถังที่ 1 กับถังที่ 3 ด้วยตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายและตัวควบคุมแบบพีไอดี

5.2 กรณีการควบคุมระดับของของเหลวในถังที่ 1 กับถังที่ 3 ที่มีเวลาหน่วง 20 วินาที

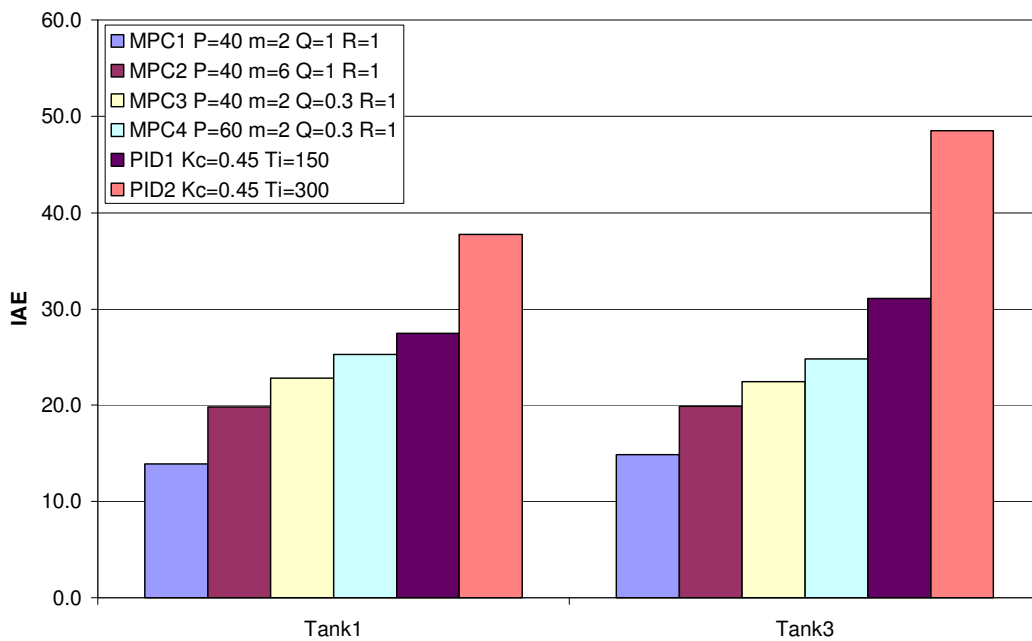
จากรูปที่ 5.5 ถึง 5.6 เป็นผลการทดลองควบคุมระดับของน้ำในถังที่ 1 และ ถังที่ 3 ที่มีเวลาหน่วง 20 วินาที ซึ่งพบว่าตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย MPC1 และ MPC2 สามารถควบคุมระดับของน้ำทั้งสองถังให้เข้าสู่ค่าเป้าหมาย 0.5 เมตรได้เร็วกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายมีสมรรถนะการควบคุมดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี ทั้งนี้พิจารณาจากค่าIAE ซึ่งตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายทั้ง 4 ตัว มีค่า IAE น้อยกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี ดังรูปที่ 5.7 ในกรณีนี้ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย MPC1 จะให้ค่าIAE น้อยที่สุด เมื่อเทียบกับตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายทั้ง 4 ตัว



รูปที่ 5.5 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 1 ของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย และตัวควบคุมแบบพีไอดี



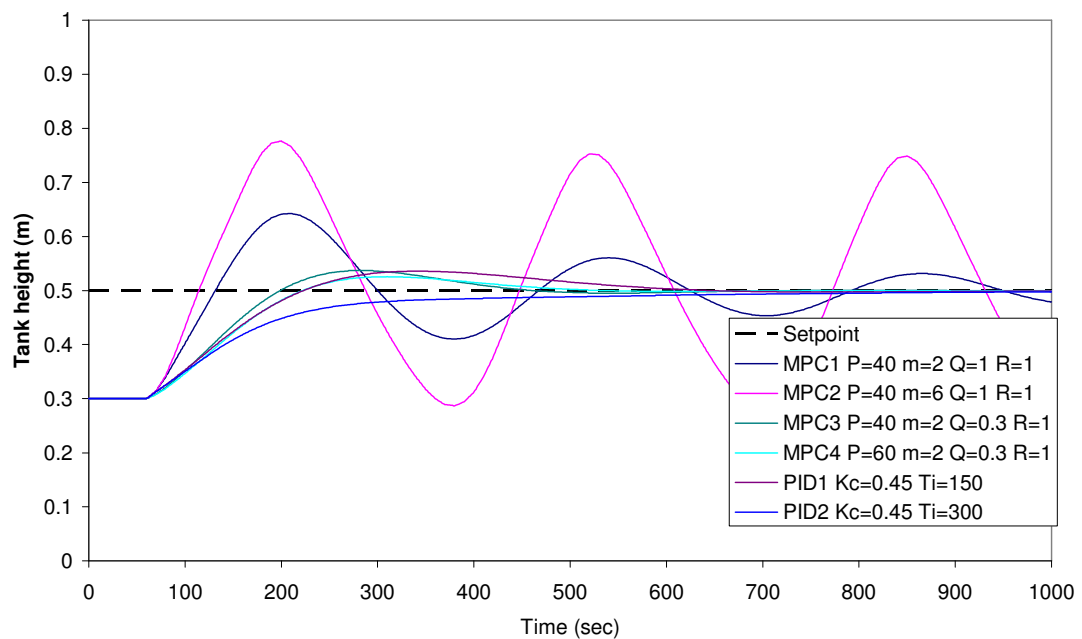
รูปที่ 5.6 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 3 ของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย และตัวควบคุมแบบพีไอดี



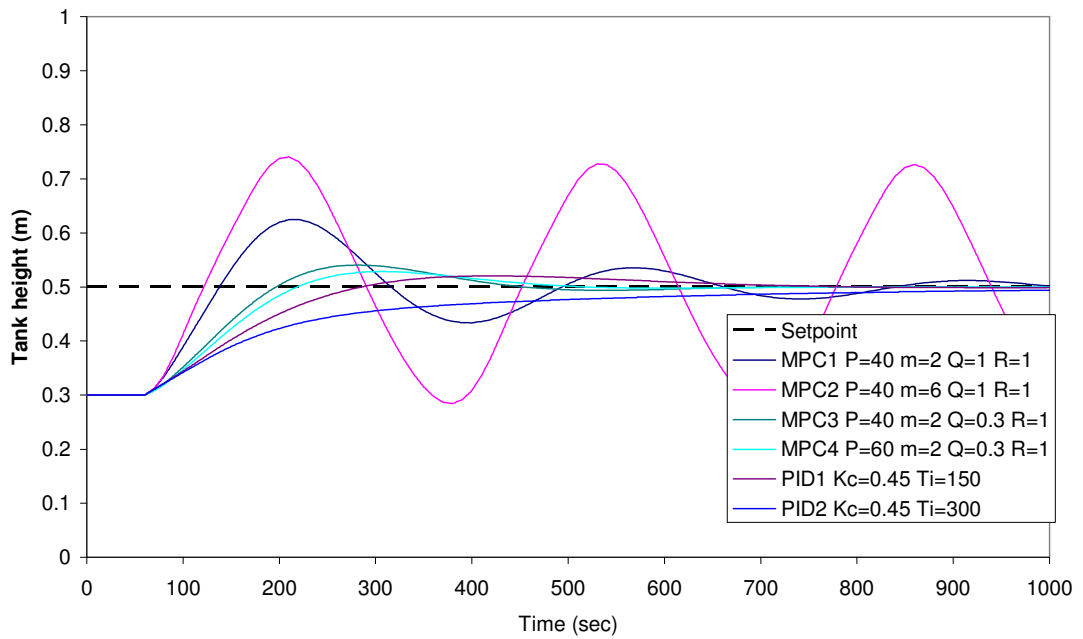
รูปที่ 5.7 ค่าIAE ของการควบคุมระดับของของเหลวถังที่ 1 กับถังที่ 3 ด้วยตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายและตัวควบคุมแบบพีไอดี

5.3 กรณีการควบคุมระดับของของเหลวในถังที่ 1 กับถังที่ 3 ที่มีเวลาหน่วง 60 วินาที

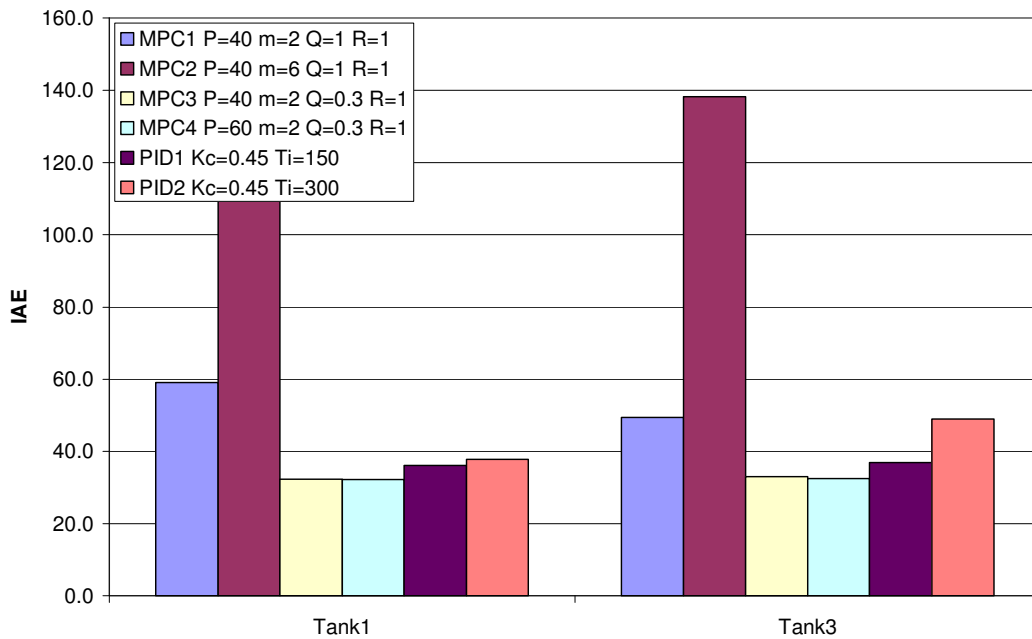
จากรูปที่ 5.8 ถึง 5.9 เป็นผลการทดลองควบคุมระดับของน้ำในถังที่ 1 และ ถังที่ 3 ที่มีเวลาหน่วง 60 วินาที ซึ่งพบว่าตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย MPC3 และ MPC4 สามารถควบคุมระดับของน้ำทั้งสองถังให้เข้าสู่ค่าเป้าหมาย 0.5 เมตรได้เร็วกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี นอกจากนี้ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย MPC3 และ MPC4 มีสมรรถนะการควบคุมดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี ทั้งนี้พิจารณาจากค่าIAE ซึ่งตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย MPC3 และ MPC4 มีค่า IAE น้อยกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี ดังรูปที่ 5.10 ในกรณีนี้ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย MPC4 จะให้ค่า IAE น้อยที่สุด เมื่อเทียบกับตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายทั้ง 4 ตัว



รูปที่ 5.8 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 1 ของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย และตัวควบคุมแบบพีไอดี



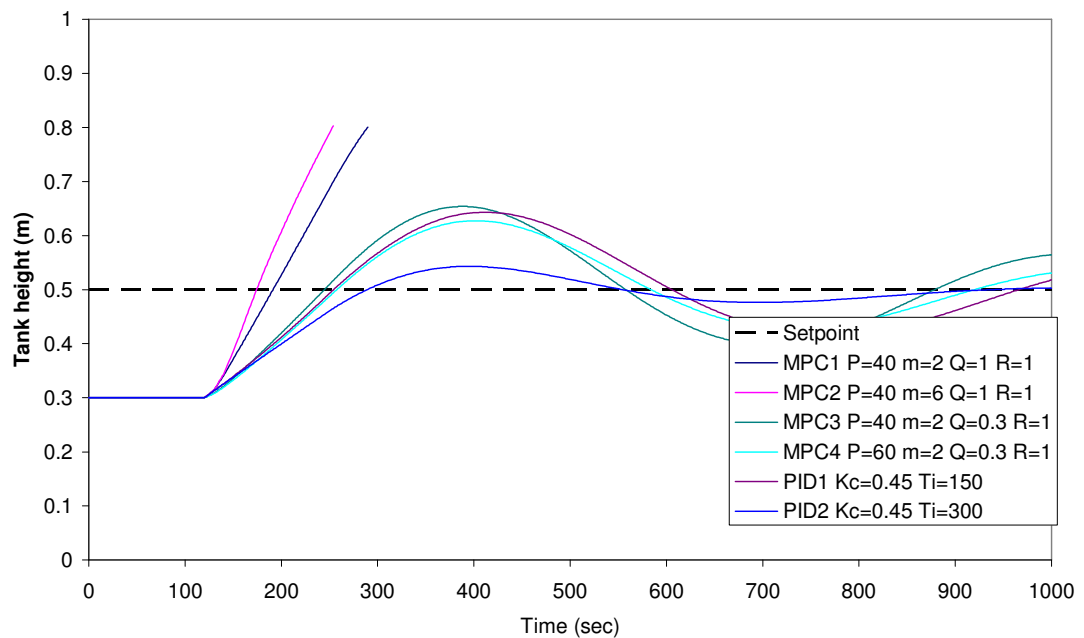
รูปที่ 5.9 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 3 ของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย และตัวควบคุมแบบพีไอดี



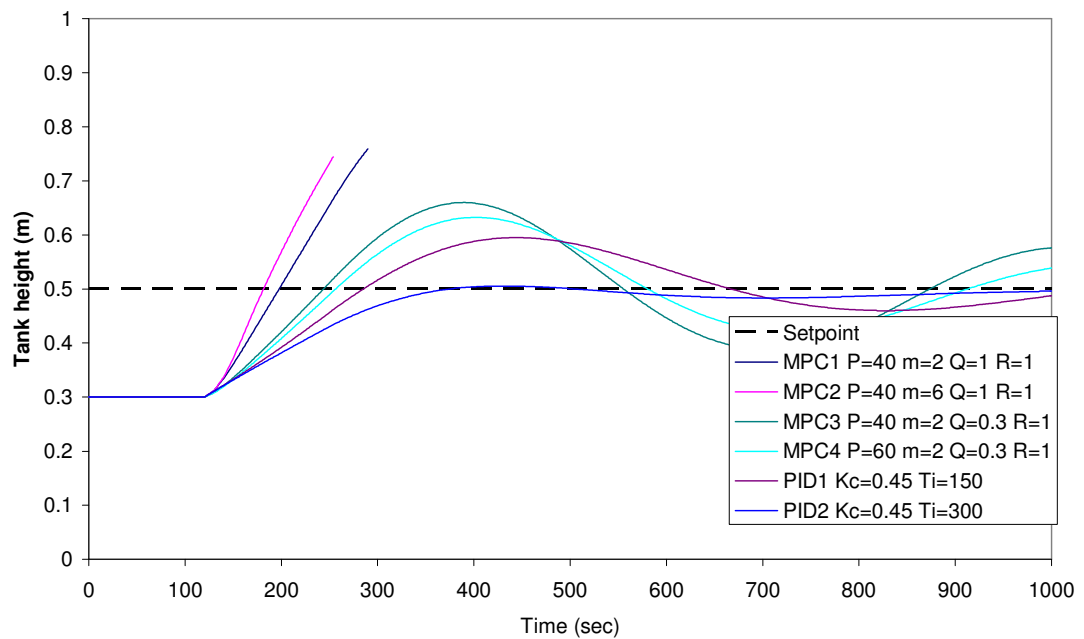
รูปที่ 5.10 ค่า IAE ของการควบคุมระดับของของเหลวถังที่ 1 กับถังที่ 3 ด้วยตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายและตัวควบคุมแบบพีไอดี

5.4 กรณีการควบคุมระดับของของเหลวในถังที่ 1 กับถังที่ 3 ที่มีเวลาหน่วง 120 วินาที

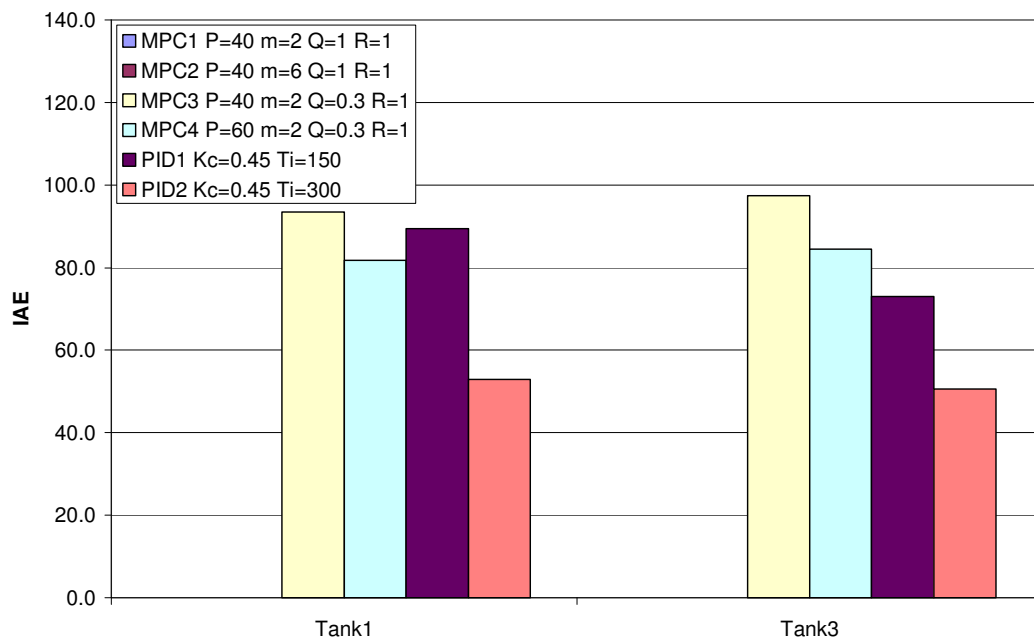
จากรูปที่ 5.11 ถึง 5.12 เป็นผลการควบคุมระดับของน้ำในถังที่ 1 และ ถังที่ 3 ที่มีเวลาหน่วง 120 วินาที ซึ่งพบว่าตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายสามารถควบคุมระดับของน้ำทั้งสองถังให้เข้าสู่ค่าเป้าหมาย 0.5 เมตร ได้ช้ากว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี นอกจากนี้ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายมีสมรรถนะการควบคุมแยกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี ทั้งนี้พิจารณาจากค่า IAE ซึ่งตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย มีค่า IAE มากกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี ดังรูปที่ 5.13 ในกรณีนี้ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย MPC4 จะให้ค่า IAE น้อยที่สุด เมื่อเทียบกับตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายทั้ง 4 ตัว



รูปที่ 5.11 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 1 ของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย และตัวควบคุมแบบพีไอดี



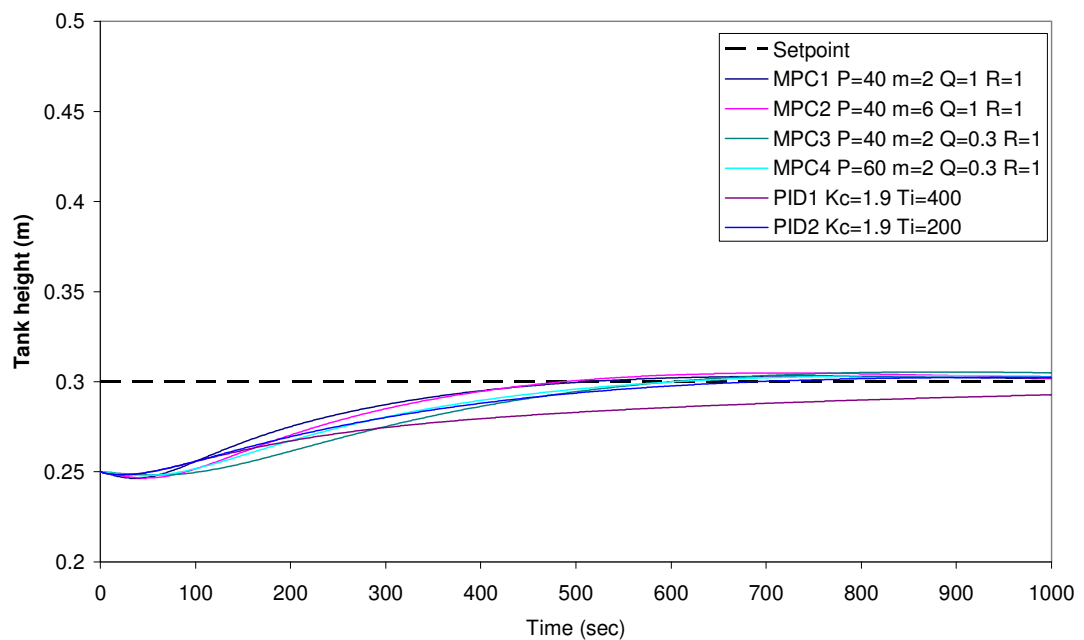
รูปที่ 5.12 ความสูงของระดับของน้ำถึงที่ 3 ของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย และตัวควบคุมแบบพีไอดี



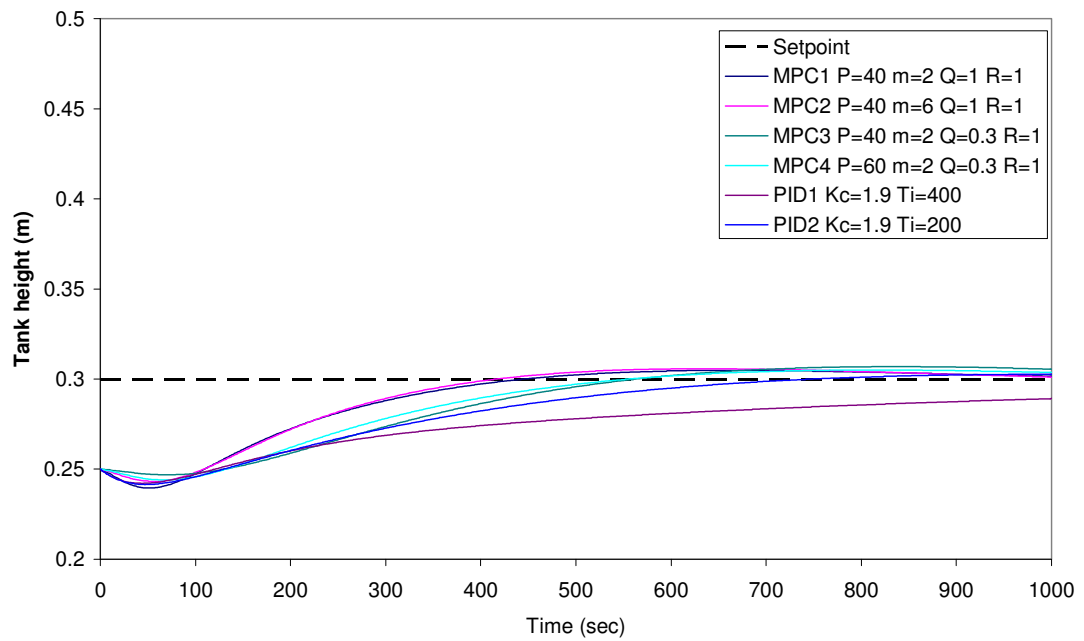
รูปที่ 5.13 ค่า IAE ของการควบคุมระดับของของเหลวถึงที่ 1 กับถึงที่ 3 ด้วยตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายและตัวควบคุมแบบพีไอดี

5.5 กรณีการควบคุมระดับของของเหลวในถังที่ 2 กับถังที่ 4 ที่ไม่มีเวลาหน่วง

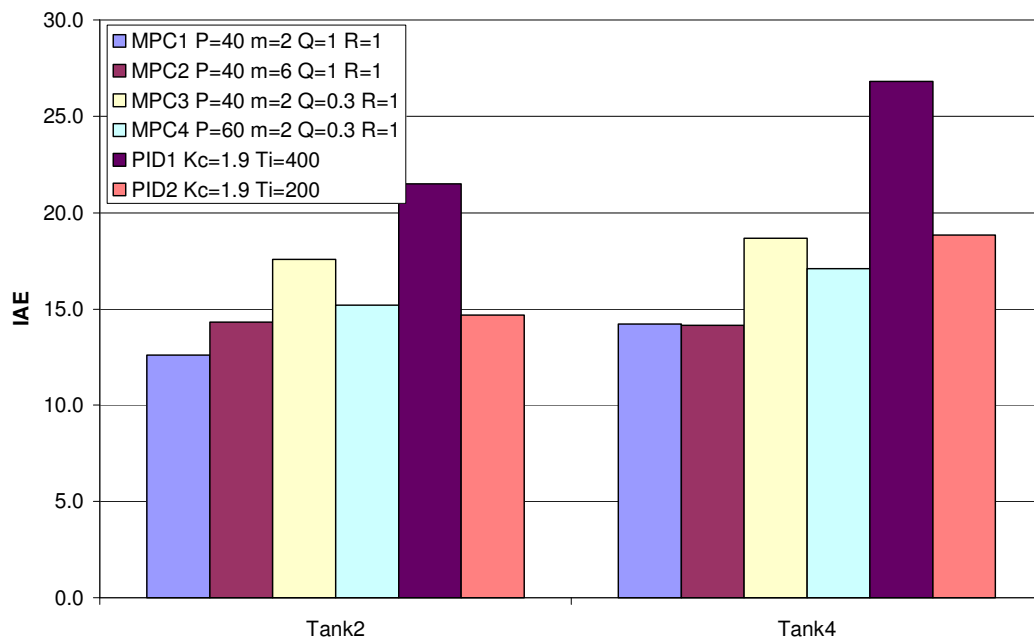
จากรูปที่ 5.14 ถึง 5.15 เป็นผลการควบคุมระดับของน้ำในถังที่ 2 และ ถังที่ 4 ซึ่งพบว่าตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย MPC1 และ MPC2 สามารถควบคุมระดับของน้ำทั้งสองถังให้เข้าสู่ค่าเป้าหมาย 0.3 เมตรได้เร็วกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี นอกจากนี้ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายมีสมรรถนะการควบคุมดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี ทั้งนี้พิจารณาจากค่า IAE ซึ่งตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย MPC1 และ MPC2 มีค่า IAE น้อยกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี ดังรูปที่ 5.16 ในกรณีนี้ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย MPC1 จะให้ค่า IAE น้อยที่สุด เมื่อเทียบกับตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายทั้ง 4 ตัว



รูปที่ 5.14 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 2 ของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย และตัวควบคุมแบบพีไอดี



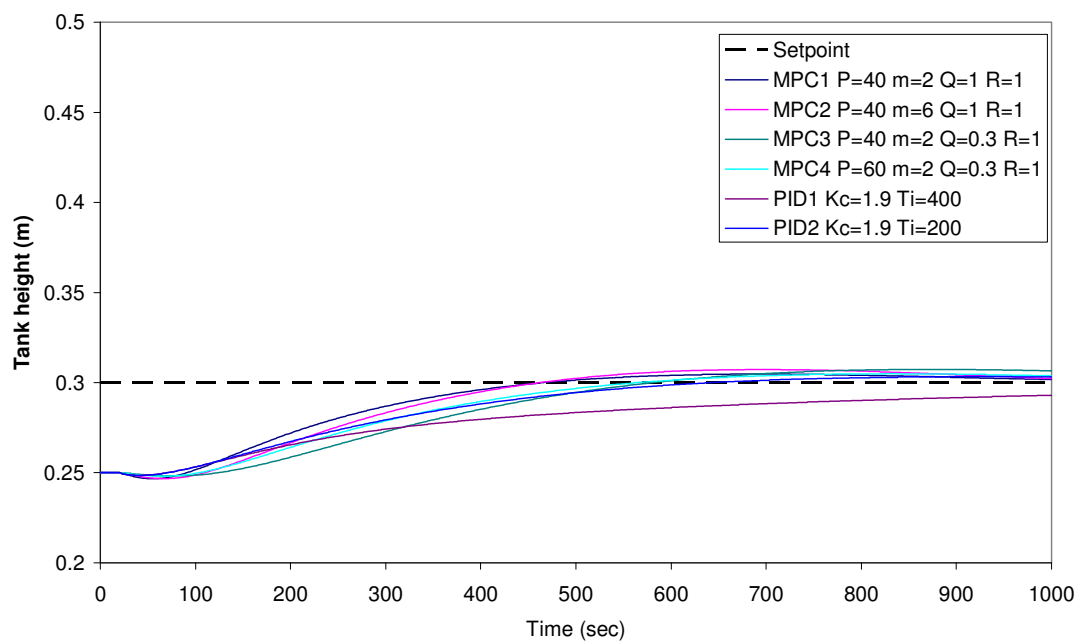
รูปที่ 5.15 ความสูงของระดับของน้ำถึงที่ 4 ของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย และตัวควบคุมแบบพีไอดี



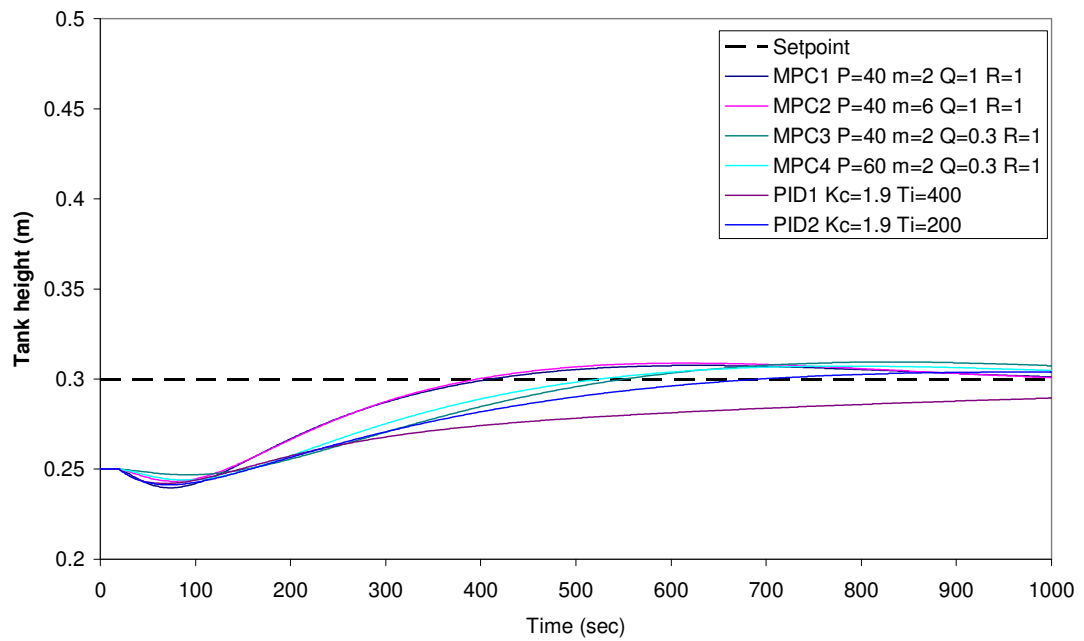
รูปที่ 5.16 ค่า IAE ของการควบคุมระดับของของเหลวถึงที่ 2 กับถึงที่ 4 ด้วยตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายและตัวควบคุมแบบพีไอดี

5.6 กรณีการควบคุมระดับของของเหลวในถังที่ 2 กับถังที่ 4 ที่มีเวลาหน่วง 20 วินาที

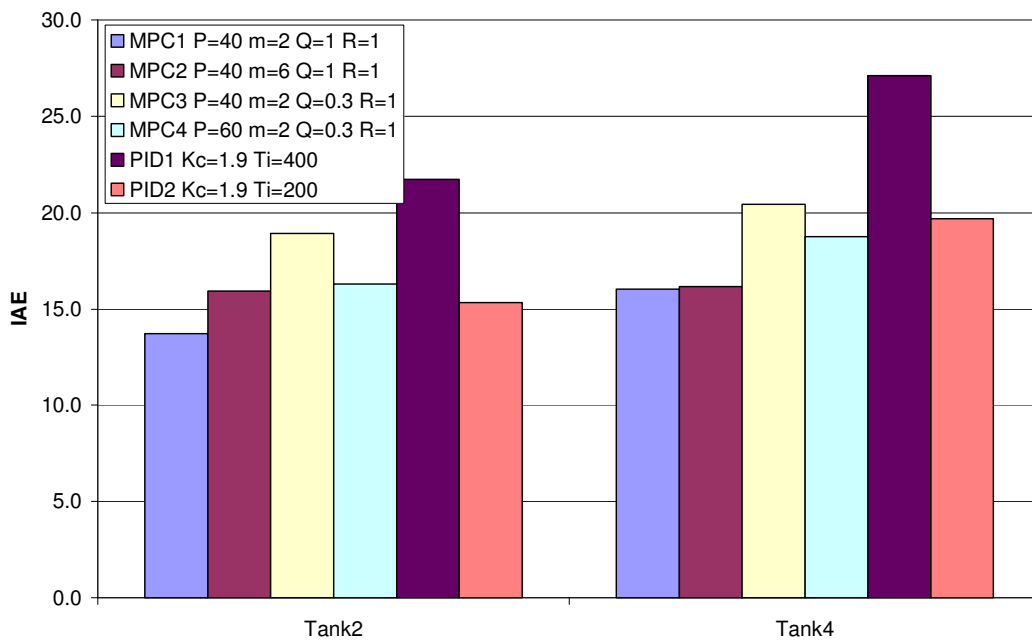
จากรูปที่ 5.17 ถึง 5.18 เป็นผลการควบคุมระดับของน้ำในถังที่ 2 และ ถังที่ 4 ที่มีเวลาหน่วง 20 วินาที ซึ่งพบว่าตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย MPC1 และ MPC2 สามารถควบคุมระดับของน้ำทั้งสองถังให้เข้าสู่ค่าเป้าหมาย 0.3 เมตรได้เร็วกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี นอกจากนี้ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายมีสมรรถนะการควบคุมดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี ทั้งนี้พิจารณาจากค่า IAE ซึ่งตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย MPC1 และ MPC2 มีค่า IAE น้อยกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี ดังรูปที่ 5.19 และซึ่งในกรณีนี้ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย MPC1 จะให้ค่า IAE น้อยที่สุด เมื่อเทียบกับตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายทั้ง 4



รูปที่ 5.17 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 2 ของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย และตัวควบคุมแบบพีไอดี



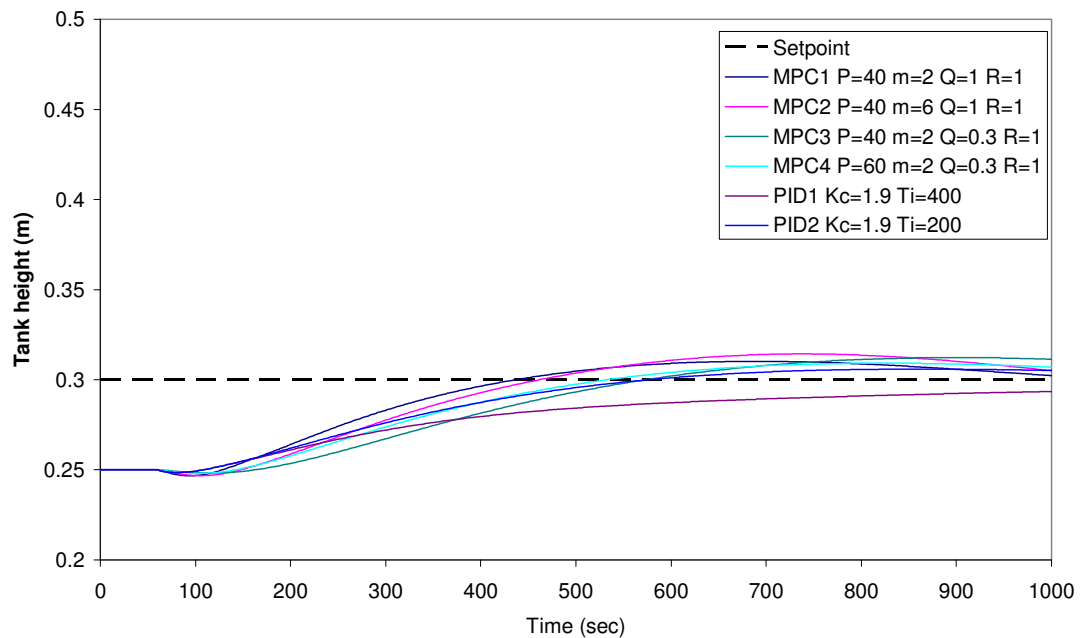
รูปที่ 5.18 ความสูงของระดับของน้ำถึงที่ 4 ของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย และตัวควบคุมแบบพีไอดี



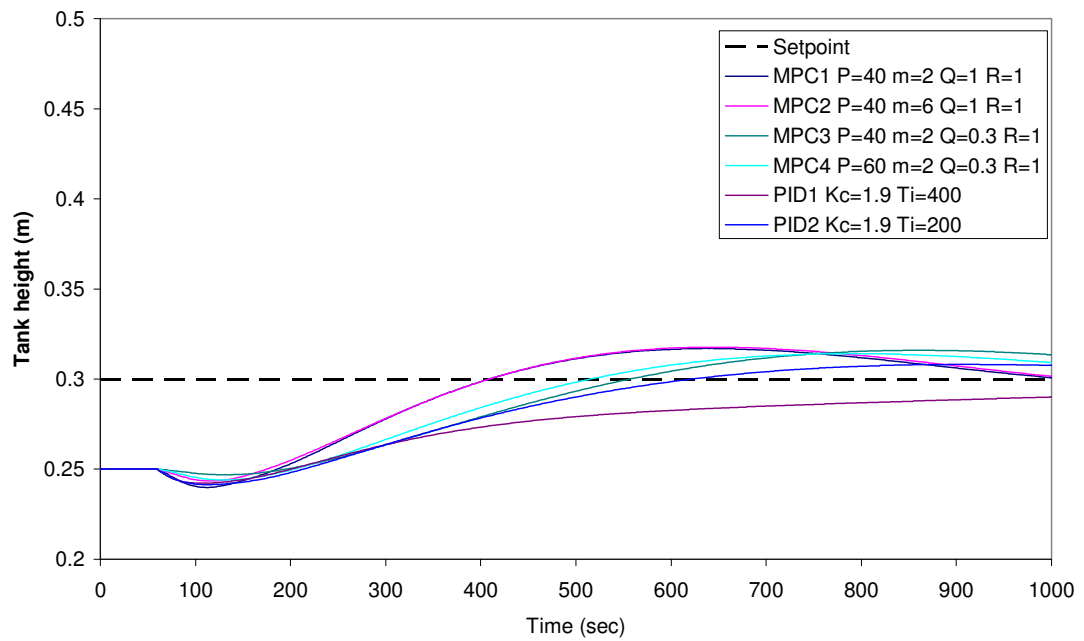
รูปที่ 5.19 ค่า IAE ของการควบคุมระดับของของเหลวถึงที่ 2 กับถึงที่ 4 ด้วยตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายและตัวควบคุมแบบพีไอดี

5.7 กรณีการควบคุมระดับของของเหลวในถังที่ 2 กับถังที่ 4 ที่มีเวลาหน่วง 60 วินาที

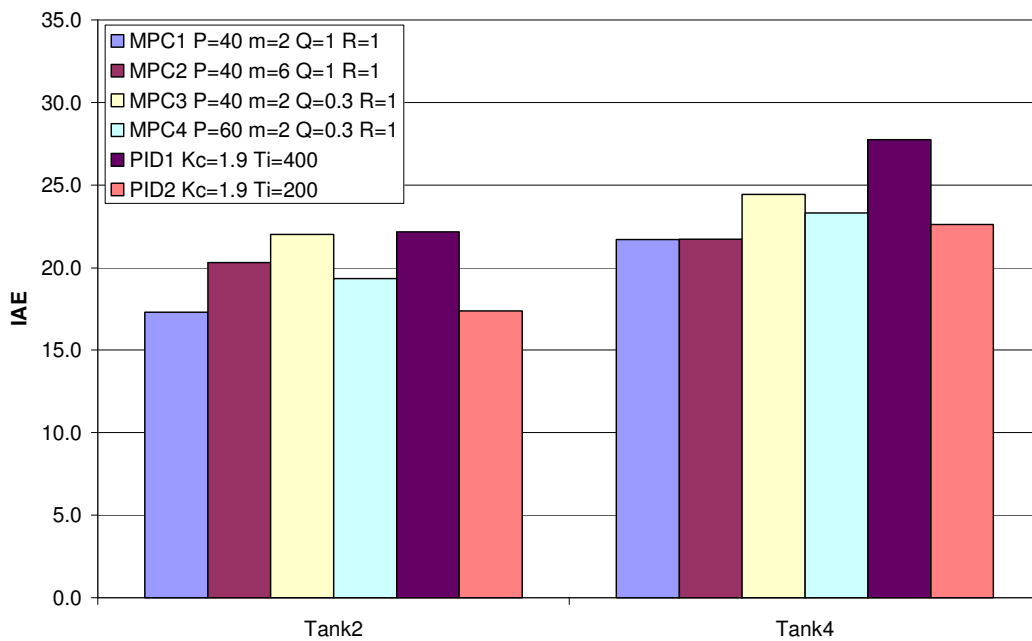
จากรูปที่ 5.20 ถึง 5.21 เป็นผลการควบคุมระดับของน้ำในถังที่ 2 และ ถังที่ 4 ที่มีเวลาหน่วง 60 วินาที ซึ่งพบว่าตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย MPC1 สามารถควบคุมระดับของน้ำทั้งสองถังให้เข้าสู่ค่าเป้าหมาย 0.3 เมตรได้เร็วกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี นอกจากนี้ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายมีสมรรถนะการควบคุมดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี ทั้งนี้พิจารณาจากค่า IAE ซึ่งตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย MPC1 มีค่า IAE น้อยกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี ดังรูปที่ 5.22 และซึ่งในกรณีนี้ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย MPC1 จะให้ค่า IAE น้อยที่สุด เมื่อเทียบกับตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายทั้ง 4



รูปที่ 5.20 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 2 ของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย และตัวควบคุมแบบพีไอดี



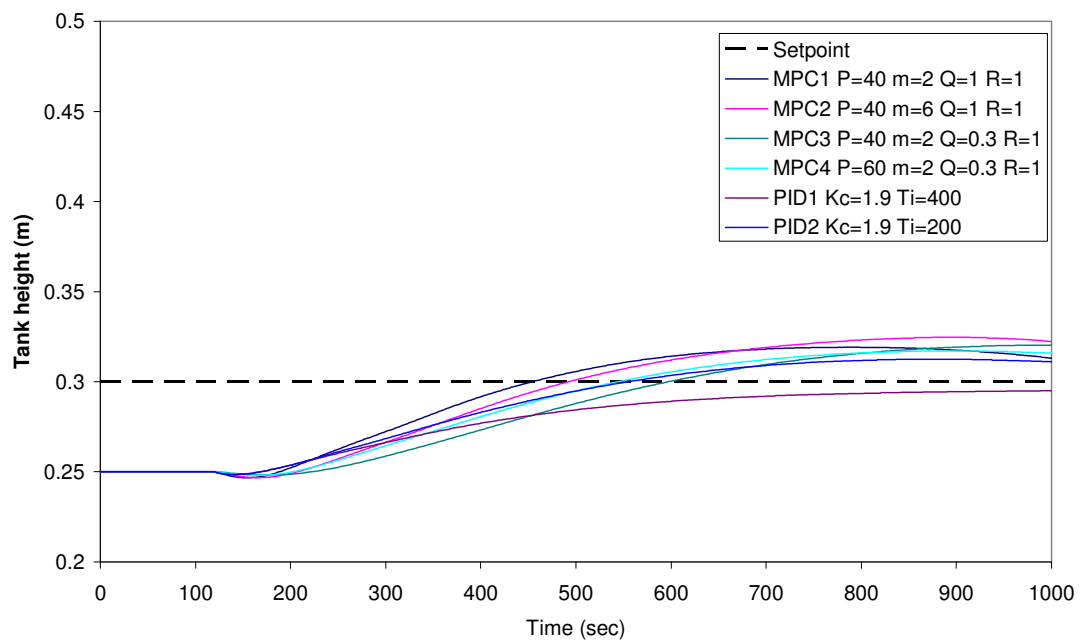
รูปที่ 5.21 ความสูงของระดับของน้ำถึงที่ 4 ของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย และตัวควบคุมแบบพีไอดี



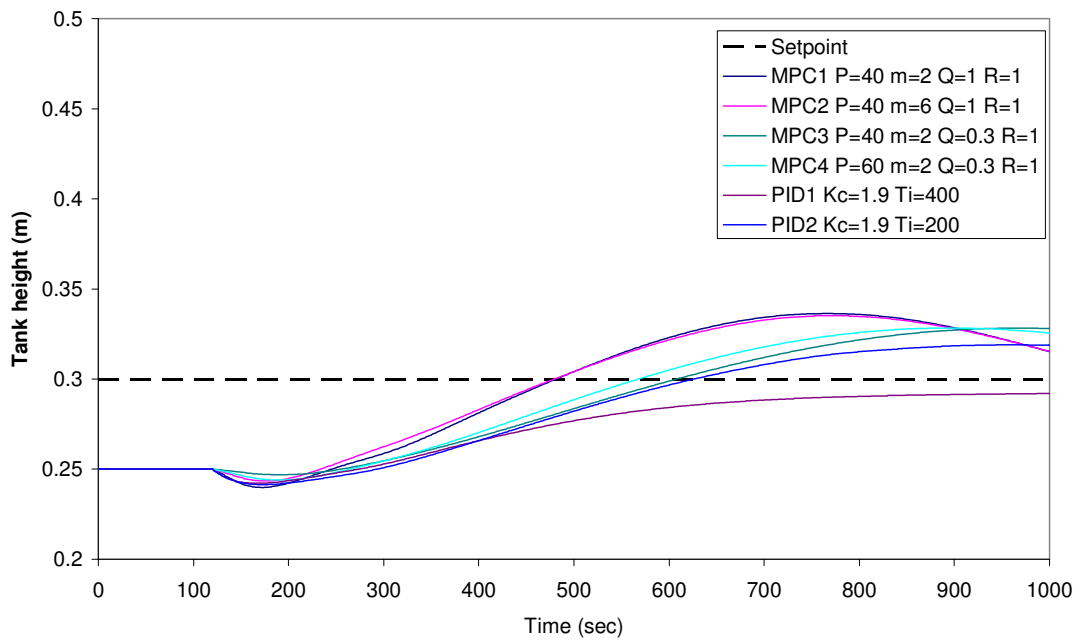
รูปที่ 5.22 ค่า IAE ของการควบคุมระดับของของเหลวถึงที่ 2 กับถึงที่ 4 ด้วยตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายและตัวควบคุมแบบพีไอดี

5.8 กรณีการควบคุมระดับของของเหลวในถังที่ 2 กับถังที่ 4 ที่มีเวลาหน่วง 120 วินาที

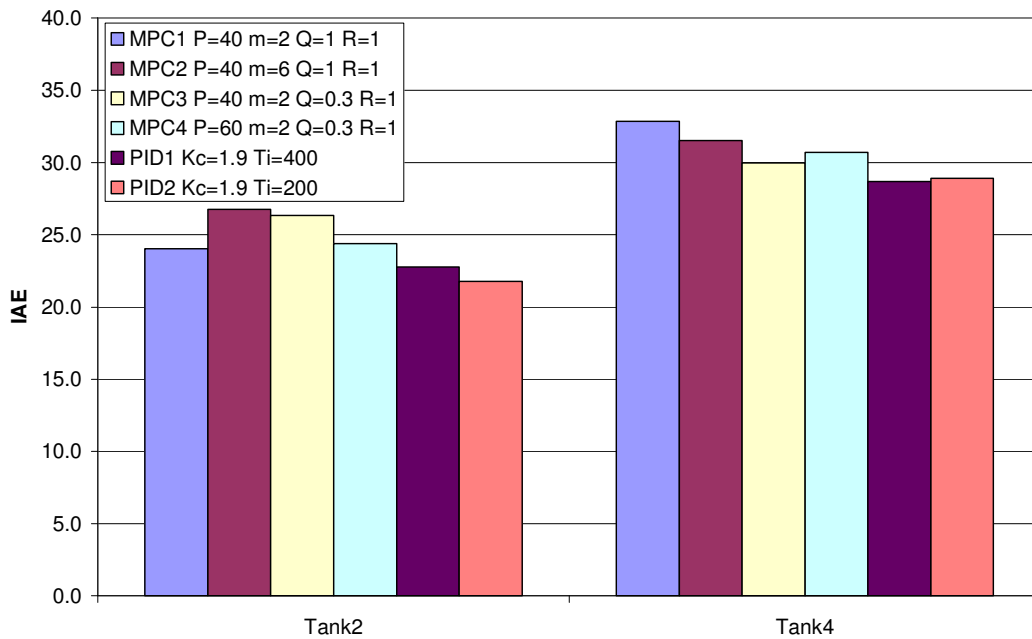
จากรูปที่ 5.23 ถึง 5.24 เป็นผลการทดลองควบคุมระดับของน้ำในถังที่ 2 และถังที่ 4 ที่มีเวลาหน่วง 120 วินาที ซึ่งพบว่าตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายสามารถควบคุมระดับของน้ำทั้งสองถังให้เข้าสู่ค่าเป้าหมาย 0.3 เมตรได้ช้ากว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี นอกจากนี้ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายมีสมรรถนะการควบคุมแยกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี ทั้งนี้พิจารณาจากค่า IAE ซึ่งตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย มีค่า IAE มากกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี ดังรูปที่ 5.25 ในกรณีนี้ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย MPC1 จะให้ค่า IAE น้อยที่สุด เมื่อเทียบกับตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายทั้ง 4 ตัว



รูปที่ 5.23 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 2 ของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย และตัวควบคุมแบบพีไอดี



รูปที่ 5.24 ความสูงของระดับของน้ำถึงที่ 4 ของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย และตัวควบคุมแบบพีไอดี



รูปที่ 5.25 ค่า IAE ของการควบคุมระดับของของเหลวถึงที่ 2 กับถึงที่ 4 ด้วยตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายและตัวควบคุมแบบพีไอดี

บทที่ 6

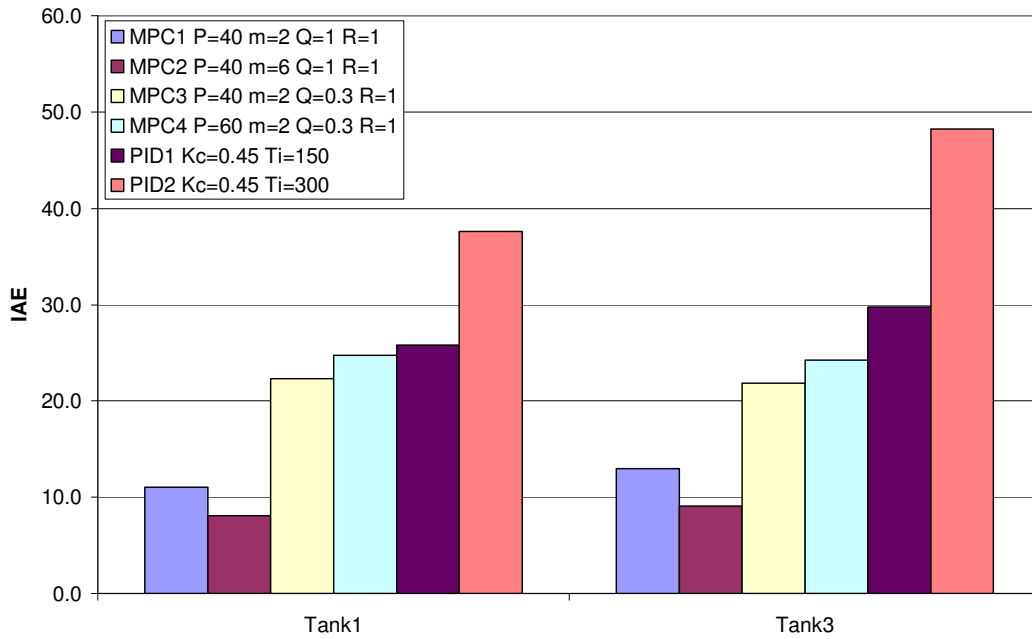
สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

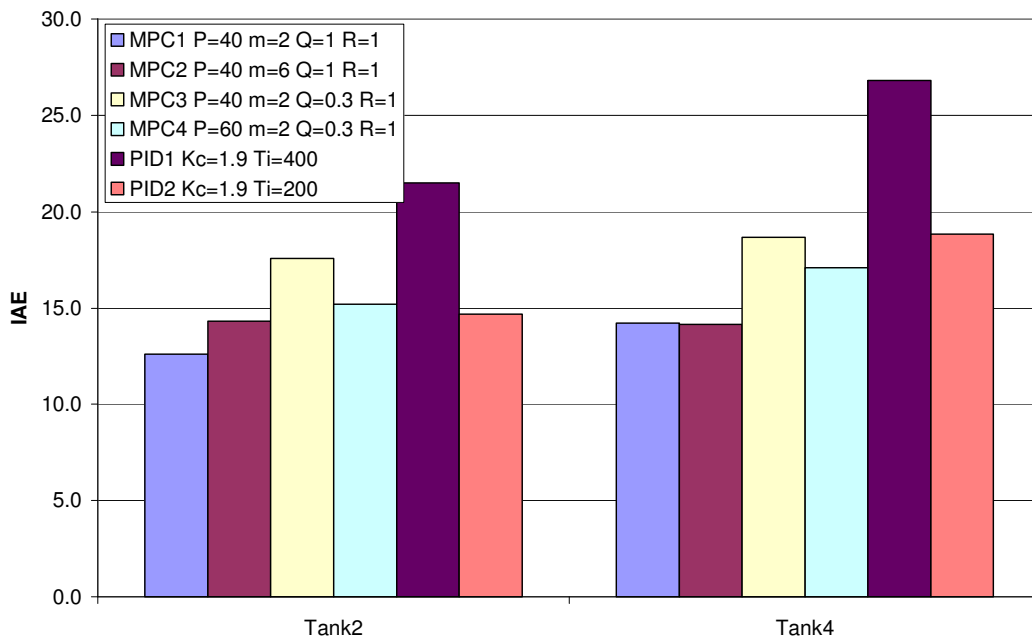
ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายและตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยทำการควบคุมด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย (Setpoint change) โดยแบ่งหัวข้อของกรณีศึกษาดังต่อไปนี้

1) กรณีการควบคุมระดับของของเหลวในถังที่ 1 กับถังที่ 3 และ การควบคุมระดับของของเหลวถังที่ 2 กับถังที่ 4 ที่ไม่มีเวลาหน่วง

ในงานวิจัยได้ทำการทดลองใช้ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายและตัวควบคุมแบบพีไอดี เพื่อควบคุมระดับของน้ำในถังที่ 1 กับถังที่ 3 ให้อยู่ที่ระดับ 0.5 เมตร และควบคุมระดับของน้ำในถังที่ 2 กับถังที่ 4 ให้อยู่ที่ระดับ 0.3 เมตร ในการทดลองใช้ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย จะทำการปรับแต่งตัวควบคุมโดยการปรับค่า P , m และ Q/R จนตัวควบคุมให้สมรรถนะการควบคุมที่ดี และในการทดลองโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี จะทำการปรับแต่งตัวควบคุมโดยการปรับค่า K_c และ τ_I จนตัวควบคุมให้สมรรถนะการควบคุมที่ดี ซึ่งผลการทดลองปรากฏว่าตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายมีสมรรถนะในการควบคุมดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยพิจารณาจากค่าผลรวมของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (IAE) ร่วมกับผลการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรปรับที่ไม่รุนแรงมากของตัวควบคุมทั้งสอง ดังรูปที่ 6.1 และ 6.2 ซึ่งพบว่า ค่า IAE ของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายมีค่าน้อยกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี นอกจากนี้ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายยังสามารถควบคุมให้ตัวแปรควบคุมเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้เร็วกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี ทั้งนี้เพราะตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายคำนวณหาตัวแปรปรับด้วยวิธีการออปติไมซ์



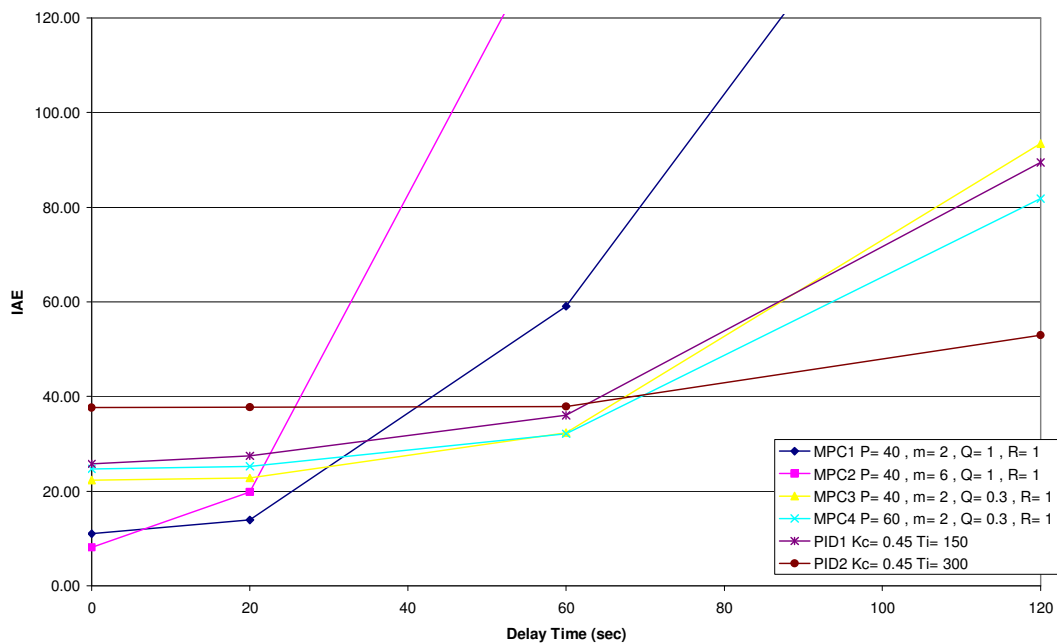
รูปที่ 6.1 ค่า IAE ของการควบคุมระดับของของเหลวถังที่ 1 กับถังที่ 3 ด้วยตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายและตัวควบคุมแบบพีไอดี



รูปที่ 6.2 ค่า IAE ของการควบคุมระดับของของเหลวถังที่ 2 กับถังที่ 4 ด้วยตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายและตัวควบคุมแบบพีไอดี

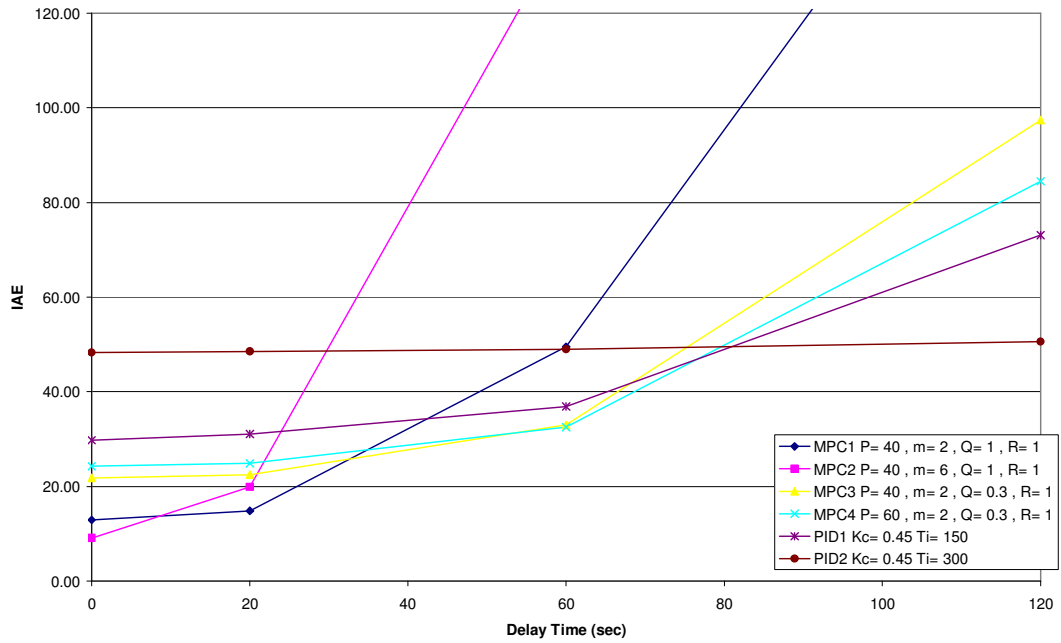
2) กรณีการควบคุมระดับของของเหลวในถังที่ 1 กับถังที่ 3 และ ถังที่ 2 กับถังที่ 4 ที่มีเวลาหน่วงขนาดต่างๆกัน

ในงานวิจัยได้ทำการทดลองใช้ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายและตัวควบคุมแบบพีไอดี เพื่อควบคุมระดับของน้ำในถังที่ 1 กับถังที่ 3 ให้อยู่ที่ระดับ 0.5 เมตร และควบคุมระดับของน้ำในถังที่ 2 กับถังที่ 4 ให้อยู่ที่ระดับ 0.3 เมตร ในการทดลองใช้ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย จะทำการปรับแต่งตัวควบคุมโดยการปรับค่า P , m และ Q/R จนตัวควบคุมให้สมรรถนะการควบคุมที่ดี และในการทดลองโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี จะทำการปรับแต่งตัวควบคุมโดยการปรับค่า K_c และ τ_I จนตัวควบคุมให้สมรรถนะการควบคุมที่ดี ซึ่งผลการทดลองปรากฏว่าตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายมีสมรรถนะในการควบคุมดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี ในกรณีที่มีเวลาหน่วงน้อยกว่า 60 วินาที โดยพิจารณาจากค่าผลรวมของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (IAE) ร่วมกับผลการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรปรับที่ไม่รุนแรงมากของตัวควบคุมทั้งสอง ดังรูปที่ 6.3, 6.4, 6.5 และ 6.6 ซึ่งพบว่าค่า IAE ของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายมีค่าน้อยกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีในกรณีที่มีเวลาหน่วงน้อยกว่า 60 วินาที นอกจากนี้ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายยังสามารถควบคุมให้ตัวแปรควบคุมเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้เร็วกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีในกรณีที่มีเวลาหน่วงน้อยกว่า 60 วินาที ทั้งนี้เพราะผลของเวลาหน่วงที่เพิ่มมากขึ้นได้ทำลายสมรรถนะการควบคุมของตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายมากกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี

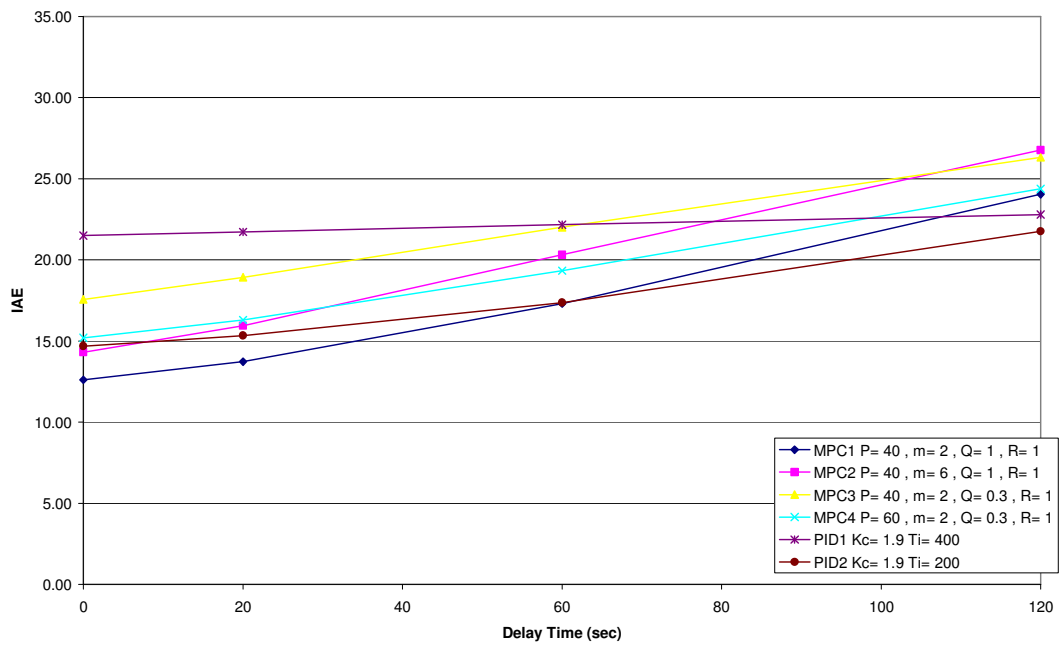


รูปที่ 6.3 ค่า IAE ของการควบคุมระดับของของเหลวถังที่ 1

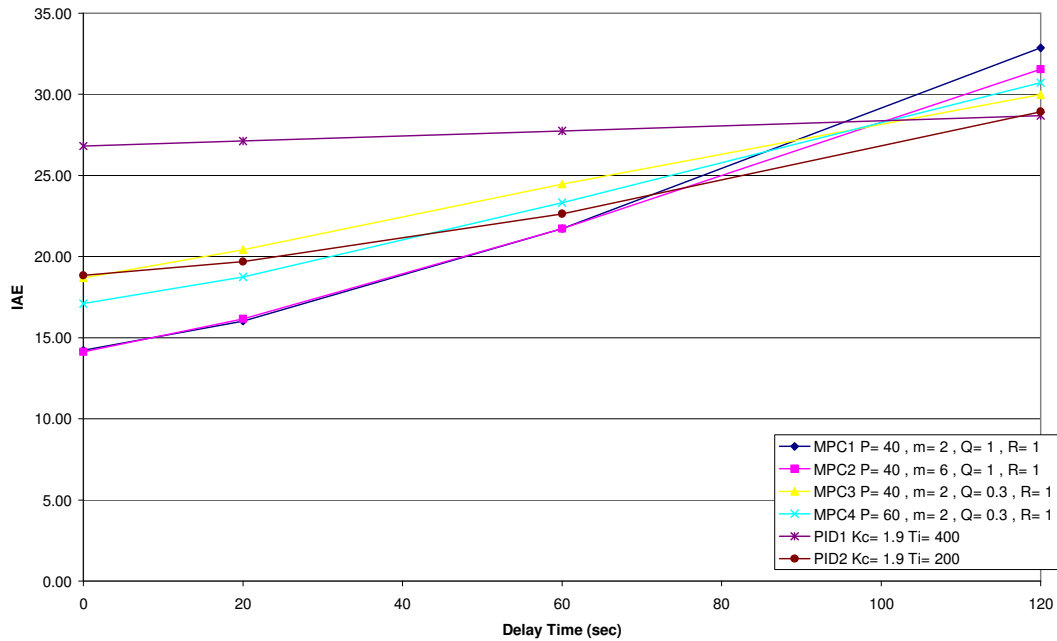
ด้วยตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายและตัวควบคุมแบบพีไอดี



รูปที่ 6.4 ค่า IAE ของการควบคุมระดับของของเหลวถังที่ 3
ด้วยตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายและตัวควบคุมแบบพีไอดี



รูปที่ 6.5 ค่า IAE ของการควบคุมระดับของของเหลวถังที่ 2
ด้วยตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายและตัวควบคุมแบบพีไอดี



รูปที่ 6.6 ค่า IAE ของการควบคุมระดับของของเหลวถังที่ 4
ด้วยตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายและตัวควบคุมแบบพีไอดี

จากผลการทดลองทั้งหมดสรุปได้ว่า

- 1) ในกรณีที่ไม่มีเวลาหน่วงตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายมีสมรรถนะในการควบคุมดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี
- 2) เวลาหน่วงมีผลทำให้สมรรถนะการควบคุมแย่งทั้งตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายและตัวควบคุมแบบพีไอดี
- 3) ในกรณีที่มีเวลาหน่วงน้อยกว่า 60 วินาที ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายมีสมรรถนะในการควบคุมดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี ทั้งนี้เพราะในช่วงเวลาหน่วงไม่มาก ตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนายมีความสามารถในการจัดการเงื่อนไขต่างๆ ของกระบวนการดีกว่า
- 4) ในกรณีที่มีเวลาหน่วงเกิดมากขึ้นในกระบวนการ ควรปรับแต่งตัวควบคุมโดยการลดขนาดการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรปรับของแต่ละครั้งการควบคุม ทั้งนี้เพราะผลของเวลาหน่วงทำให้ผลตอบสนองของการปรับตัวแปรจะส่งผลเมื่อผ่านเวลาหน่วงไปแล้ว ดังนั้นหากตัวควบคุมมีการสั่งการให้ปรับตัวแปรปรับที่รุนแรงจะทำให้ในกระบวนการที่มีเวลาหน่วงยากต่อการควบคุม

6.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) เนื่องจากอัตราการไหลของน้ำไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดการรบกวนขึ้นภายในระบบ จึงควรปรับปรุงระบบควบคุมการไหลของน้ำให้คงที่
- 2) เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่ามีการผิดพลาดเพี้ยนจากค่าจริงทำให้เกิดความผิดพลาดในการควบคุม ควรสอบเทียบอุปกรณ์เครื่องมือวัดอย่างสม่ำเสมอ

รายการอ้างอิง

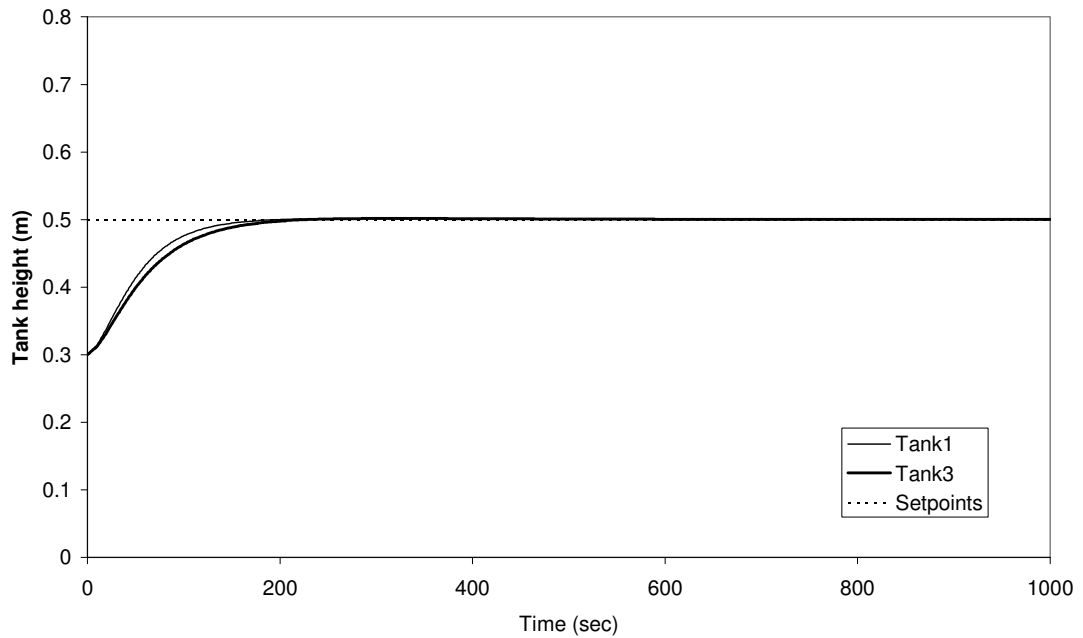
- [1]. Cutler, C. R., and Ramaker, B. L. (1980). Dynamic matrix control a computer control algorithm. Proceedings Joint Automatic Control Conference San Francisco, CA.
- [2]. Prett, D. M., and Gillette, R. D. (1980). Optimization and constrained multivariable control of a catalytic cracking unit. Proceedings of the joint automatic controlConference: WP5-c.
- [3]. Clarke, D. W., and Scattolini, R. (1991). Constrained receding horizon predictive control. Proceedings of the IEE, Part D, Control theory and applications, 138, 347-354.
- [4]. Alex, Z. (1997). Stability of model predictive control with time-varying weights. Computers and Chemical Engineering, 21(12), 1389-1393.
- [5]. ศราวุธ ภูโฬิตร์กุล. การประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟบน MATLAB สำหรับควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่มีปฏิกิริยาชนิดคายความร้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- [6]. Loeblein, C., and Perkins, J. D. (1999). Structural design for on-line process optimization: Dynamic economics of MPC. AIChE Journal, 45(5), 1018–1029.
- [7]. ปริญญาพร รักสวิต. การประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์สำหรับเครื่องปฏิกรณ์เคมีถึงกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนอันดับหนึ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [8]. อธิป ถายานนุวัตร. ตัวควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟแบบง่ายบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลสำหรับควบคุมระดับของเหลวแบบเฉลี่ย. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [9]. Biao, H., Ashish, M. H., and Edgar, C. T. (2003). Model predictive control relevant identification and validation. Chemical Engineering Science, 58(11), 2389–2401.
- [10]. Ramaswamy, S., Cutright, T. J., and Qammar, H. K. (2005). Control of a continuous bioreactor using model predictive control. Process Biochemistry, 40(8), 2763–2770.

- [11]. Adrian, G. W., and William, P. H. (2005), Application of barrier function based model predictive control to an edible oil refining process. Journal of Process Control, 15(2), 183–200.
- [12]. Bingfeng, G., and Yash, P. G. (2008), Control of nonlinear processes by using linear model predictive control algorithms. ISA Transactions, 47(2), 211–216.
- [13]. Adetola, V., and Guay, M. (2010), Integration of real-time optimization and model predictive control. Journal of Process Control, 20(2), 125–133.
- [14]. Edward, P. G., Edward, S. M., Chung, W., and Francis, J. D. III. (2000), Model based control of a four-tank system. Computers and Chemical Engineering, 24 (7), 1503-1509.
- [15]. Tobias, R., Steffen, H., Zoltan, K. N., and Frank, A. (2006), Nonlinear Model Predictive Control of a Four Tank System: An Experimental Stability Study. Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Control Applications Munich. Germany. October 4-6 2006: WeA07.5.
- [16]. Mehmet, M., and Francis, J. D. III. (2007), Distributed model predictive control of an experimental four-tank system. Journal of Process Control, 17(3), 297–308.
- [17]. Pinak, P. B., Rishi, S., Subhabrata, R., and Amar, N. S. (2009), Sliding mode control of quadruple tank process. Mechatronics, 19(4), 548–561.
- [18]. Carlos, E. G., David, M. P., and Manfred, M. (1989), Model predictive control: theory and practice - a survey. Automatica 25(3), 335-348.
- [19]. Shinskey, F.G. (2001), PID-deadtime control of distributed processes. Control Engineering Practice, 9(11), 1177–1183.
- [20]. Vilma, A. O., Lúcia, V. C., Marcelo, C. M. T., and Alexandre, M. F. S. (2009), Synthesis of PID controllers for a class of time delay systems. Automatica, 45(7), 1778-1782.
- [21]. Shneiderman, D., and Palmor, Z. J. (2010), Properties and control of the quadruple-tank process with multivariable dead-times. Journal of Process Control, 20(1), 18–28.
- [22]. ไพศาล กิตติศุภกร. การควบคุมที่อาศัยแบบจำลองสำหรับกระบวนการเคมีแบบเบตซ์. พิมพ์ครั้งที่ 1: โรงงานพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์, 2551.

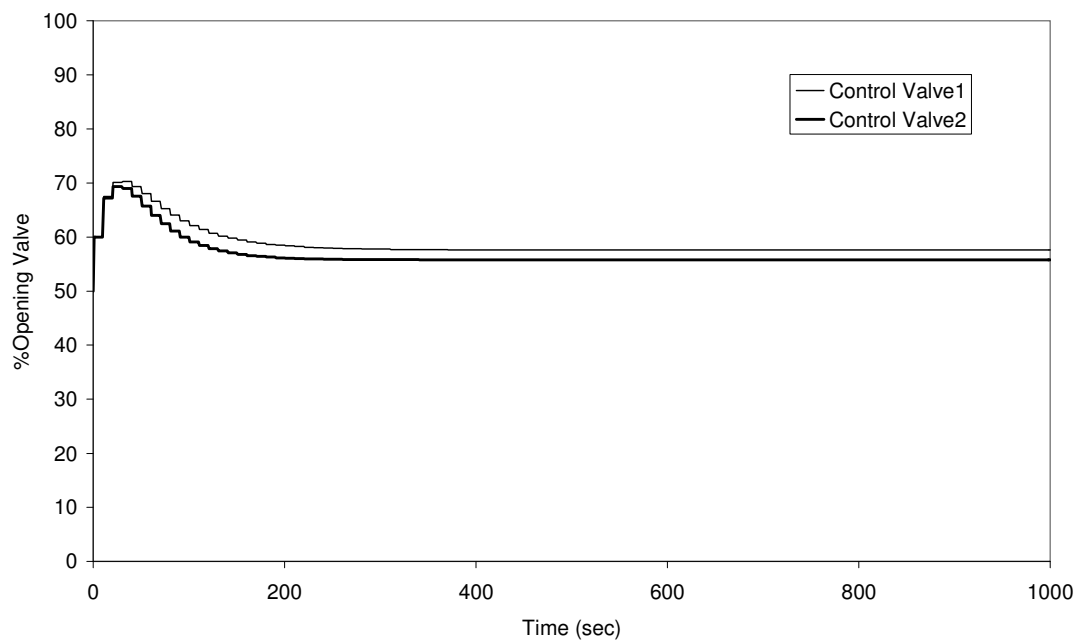
- [23]. Thomas, M. Process Control: Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance : McGraw-Hill, pp 287, 2006

ภาคผนวก

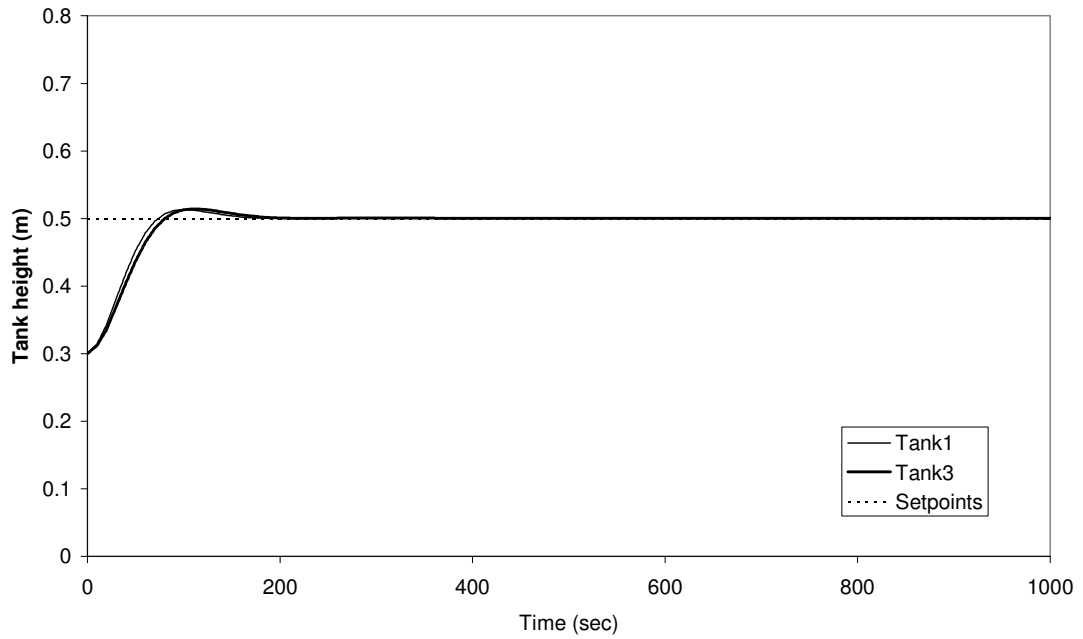
ภาคผนวก ก
ผลการทดลอง



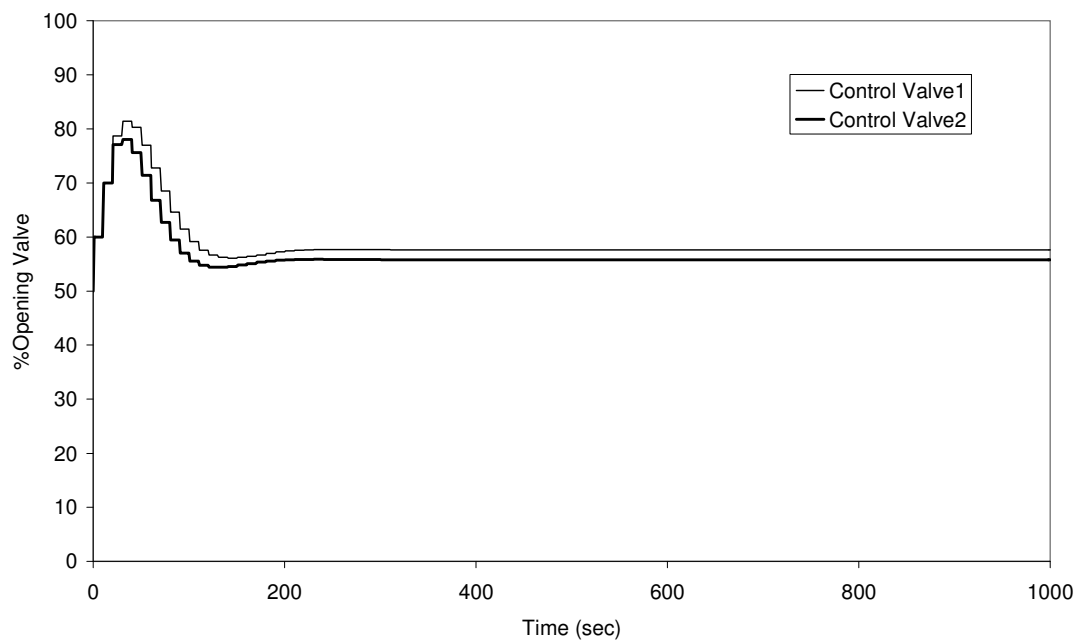
รูปที่ ก-1 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 1 กับถังที่ 3 กรณีไม่มีเวลาหน่วง จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 2$, $Q = 1$, $R = 1$)



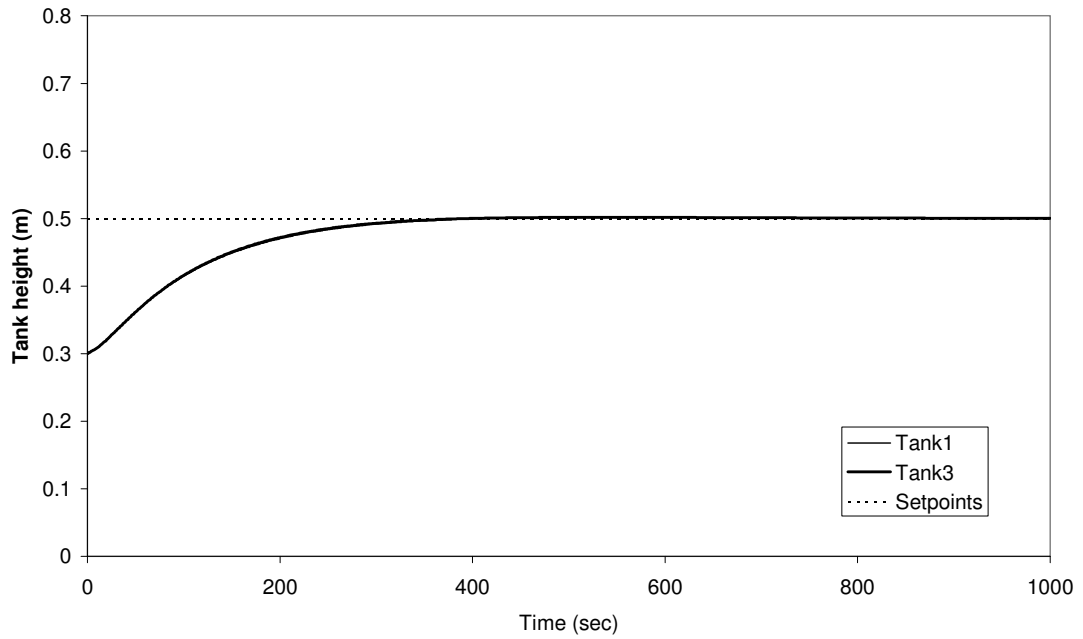
รูปที่ ก-2 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีไม่มีเวลาหน่วง จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 2$, $Q = 1$, $R = 1$)



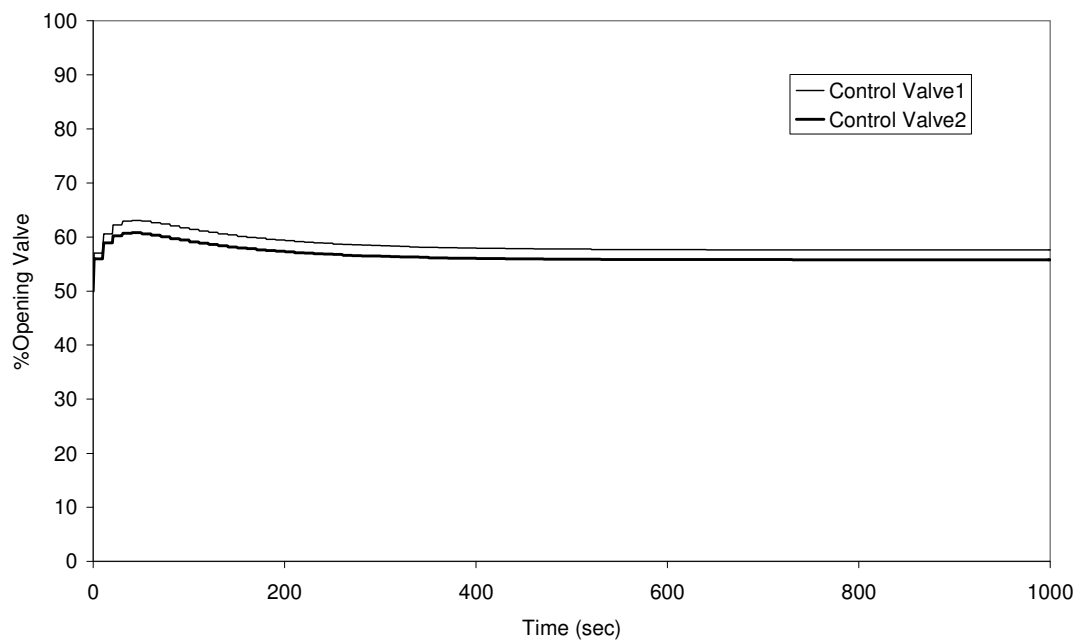
รูปที่ ก-3 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 1 กับถังที่ 3 กรณีไม่มีเวลาหน่วง จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 6$, $Q = 1$, $R = 1$)



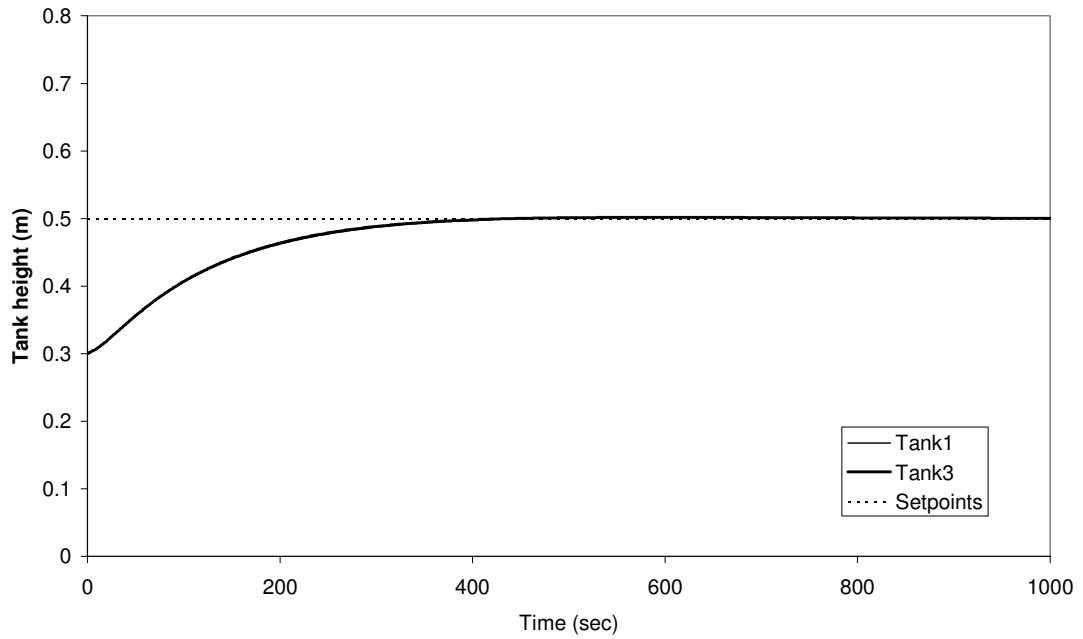
รูปที่ ก-4 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีไม่มีเวลาหน่วง จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 6$, $Q = 1$, $R = 1$)



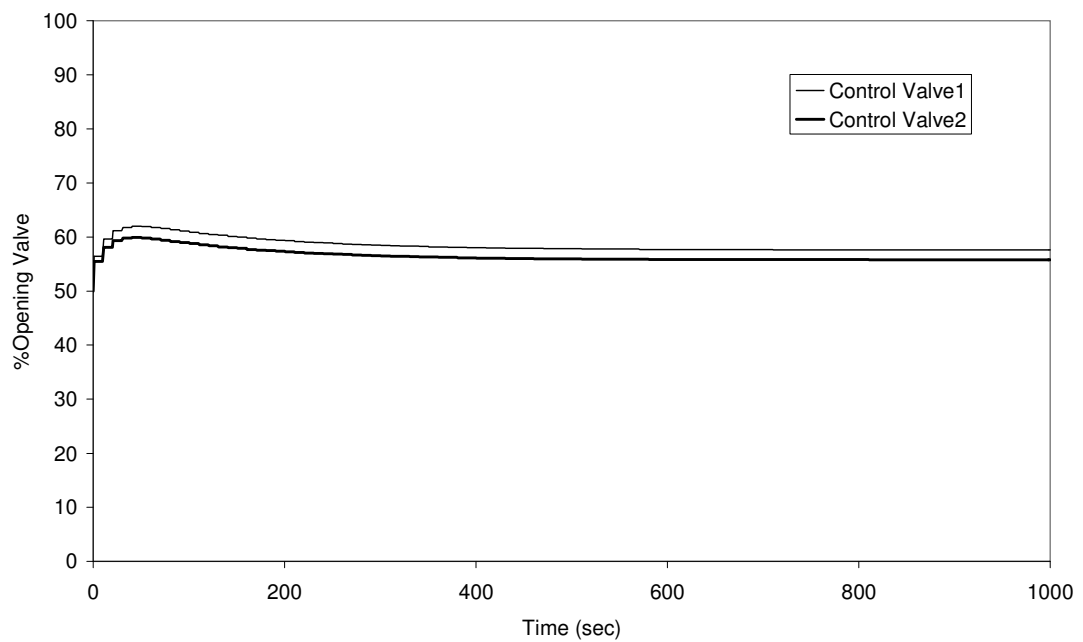
รูปที่ ก-5 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 1 กับถังที่ 3 กรณีไม่มีเวลาหน่วง จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 2$, $Q = 0.3$, $R = 1$)



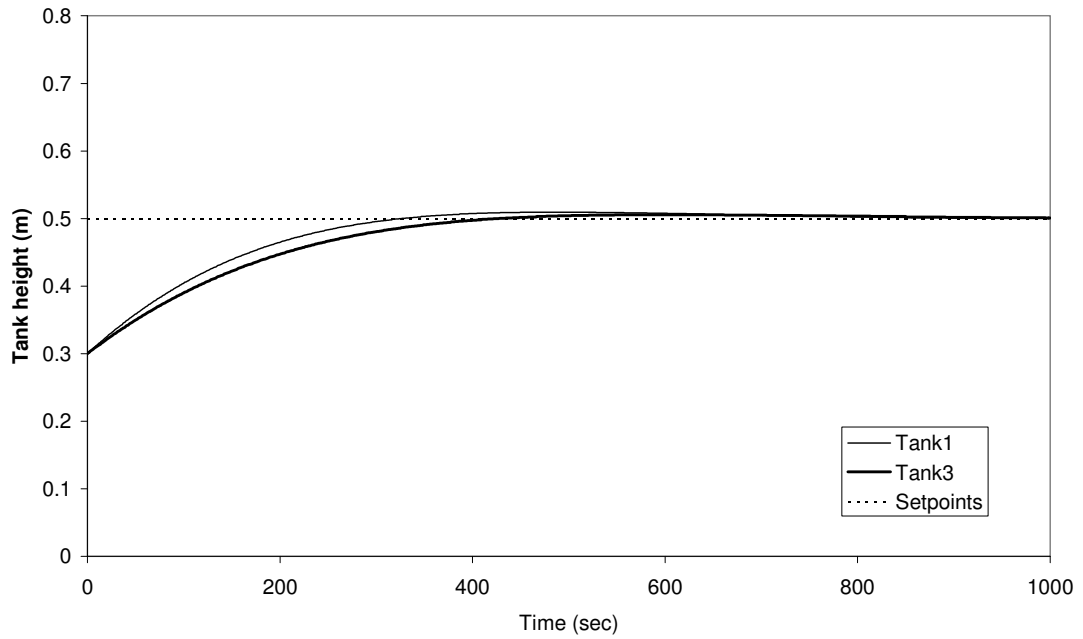
รูปที่ ก-6 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีไม่มีเวลาหน่วง จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 2$, $Q = 0.3$, $R = 1$)



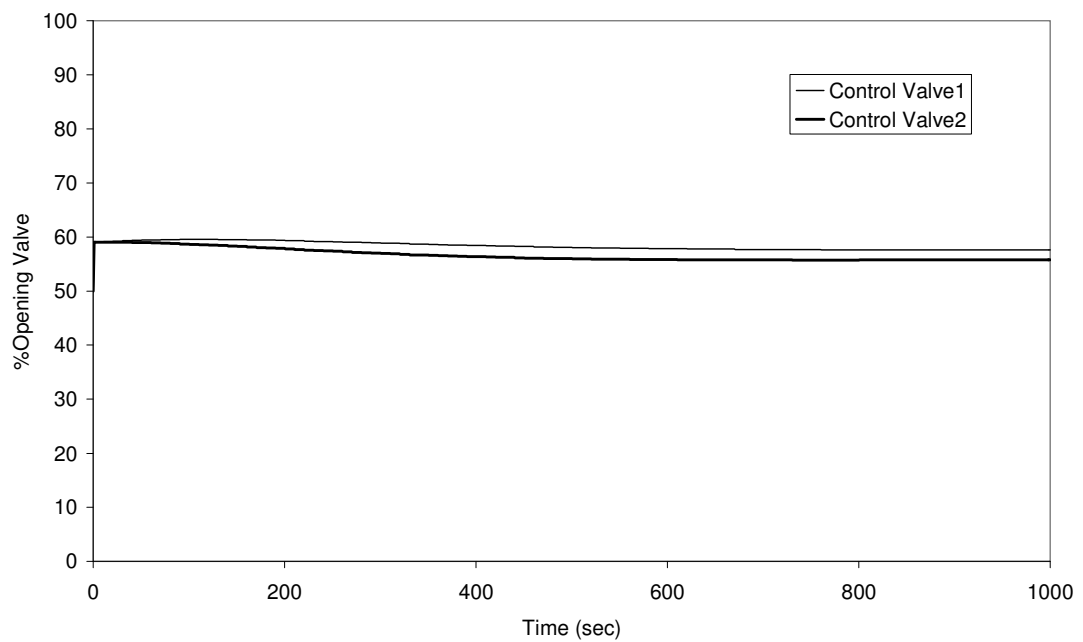
รูปที่ ก-7 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 1 กับถังที่ 3 กรณีไม่มีเวลาหน่วง จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 60$, $M = 2$, $Q = 0.3$, $R = 1$)



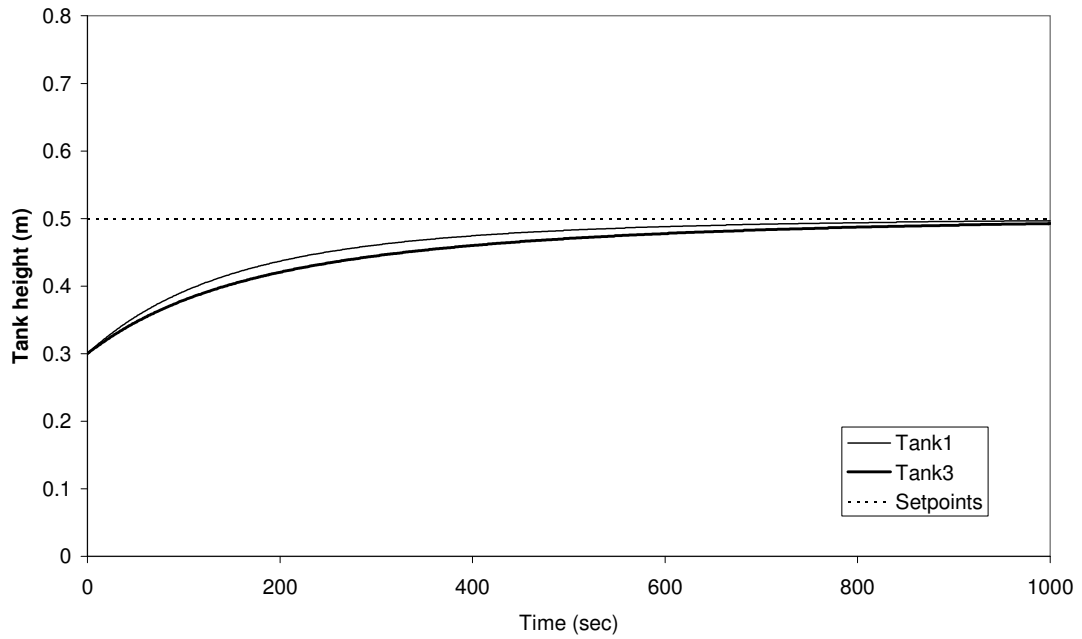
รูปที่ ก-8 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีไม่มีเวลาหน่วง จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 60$, $M = 2$, $Q = 0.3$, $R = 1$)



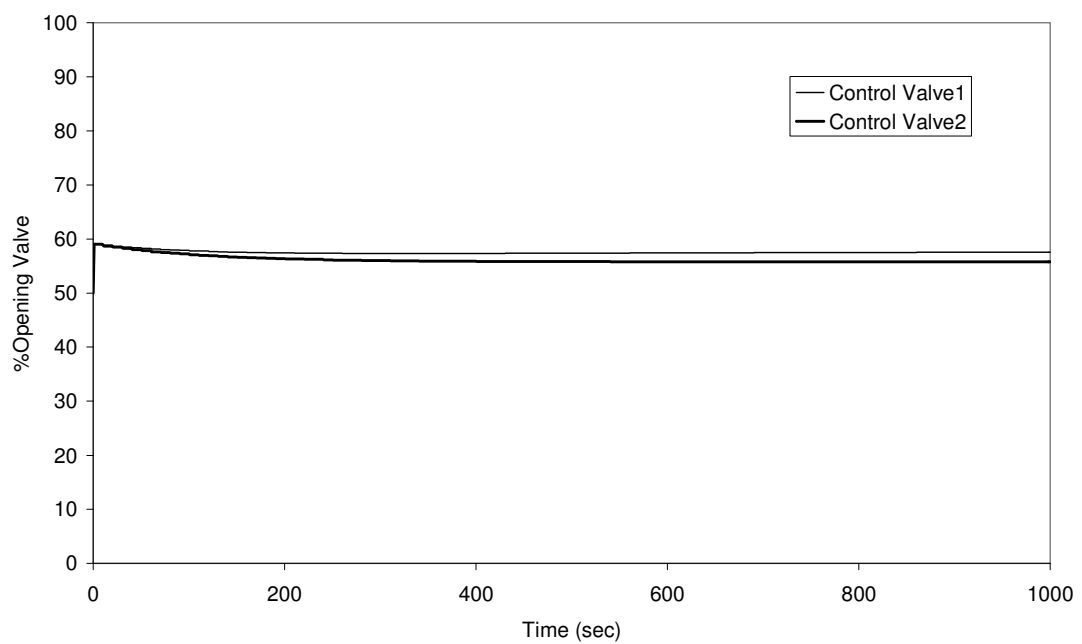
รูปที่ ก-9 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 1 กับถังที่ 3 กรณีไม่มีเวลาหน่วง
จากตัวควบคุมพีไอดี ($K_c = 0.45$, $T_i = 150$)



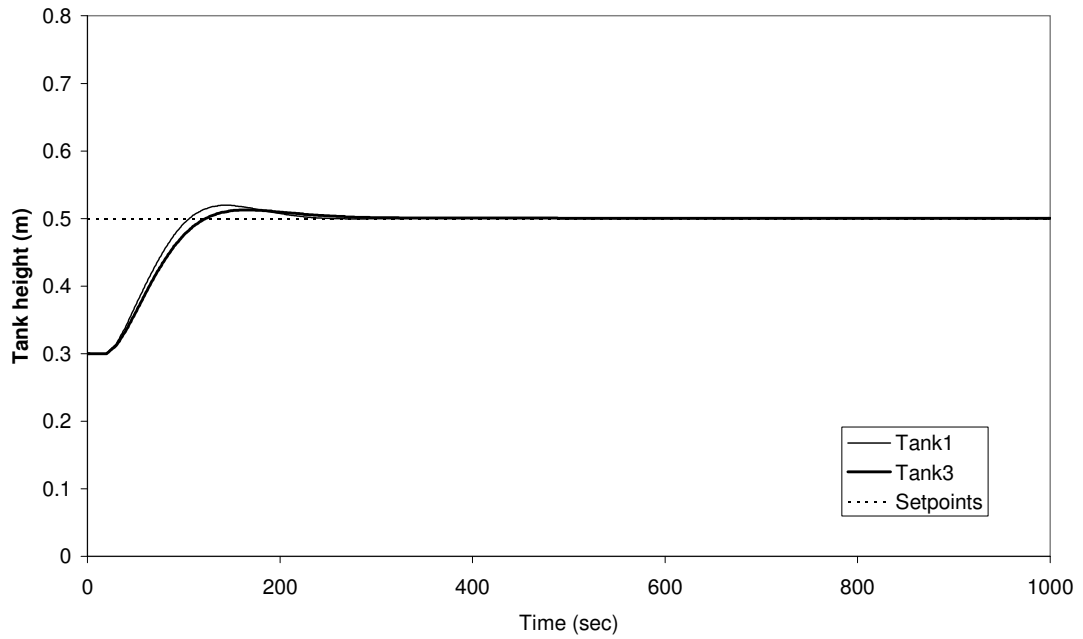
รูปที่ ก-10 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีไม่มีเวลาหน่วง
จากตัวควบคุมพีไอดี ($K_c = 0.45$, $T_i = 150$)



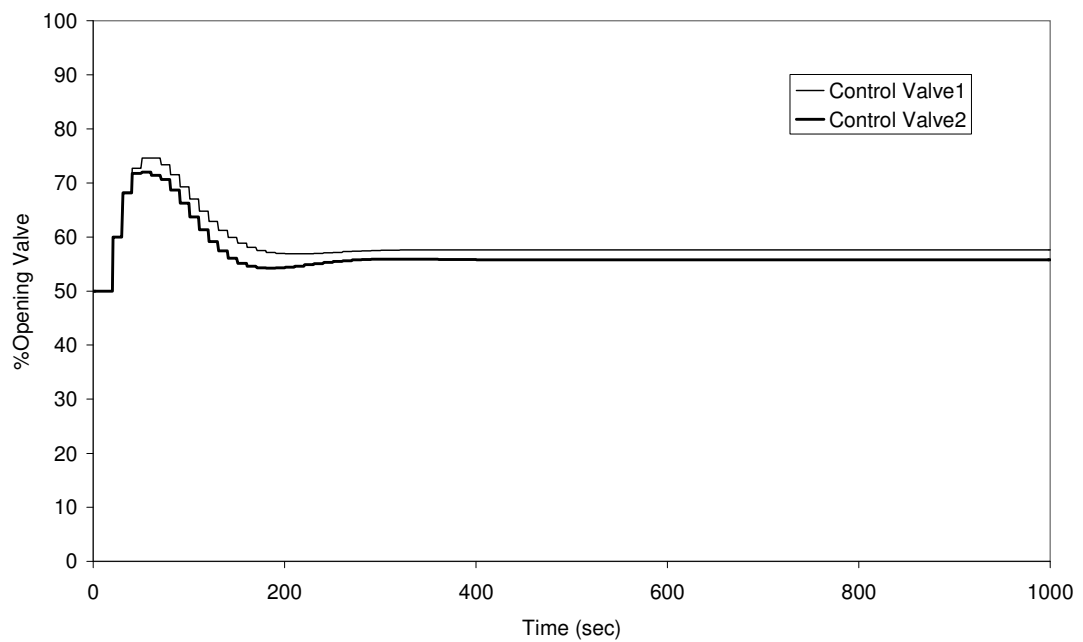
รูปที่ ก-11 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 1 กับถังที่ 3 กรณีไม่มีเวลาหน่วง
จากตัวควบคุมพีไอดี ($K_c = 0.45$, $T_i = 300$)



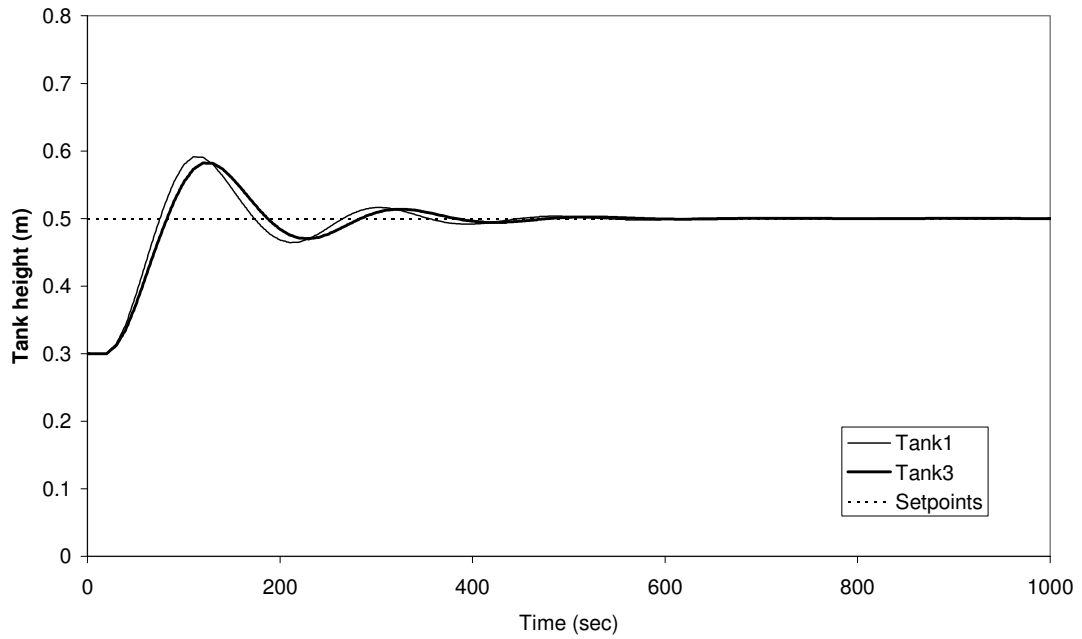
รูปที่ ก-12 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีไม่มีเวลาหน่วง
จากตัวควบคุมพีไอดี ($K_c = 0.45$, $T_i = 300$)



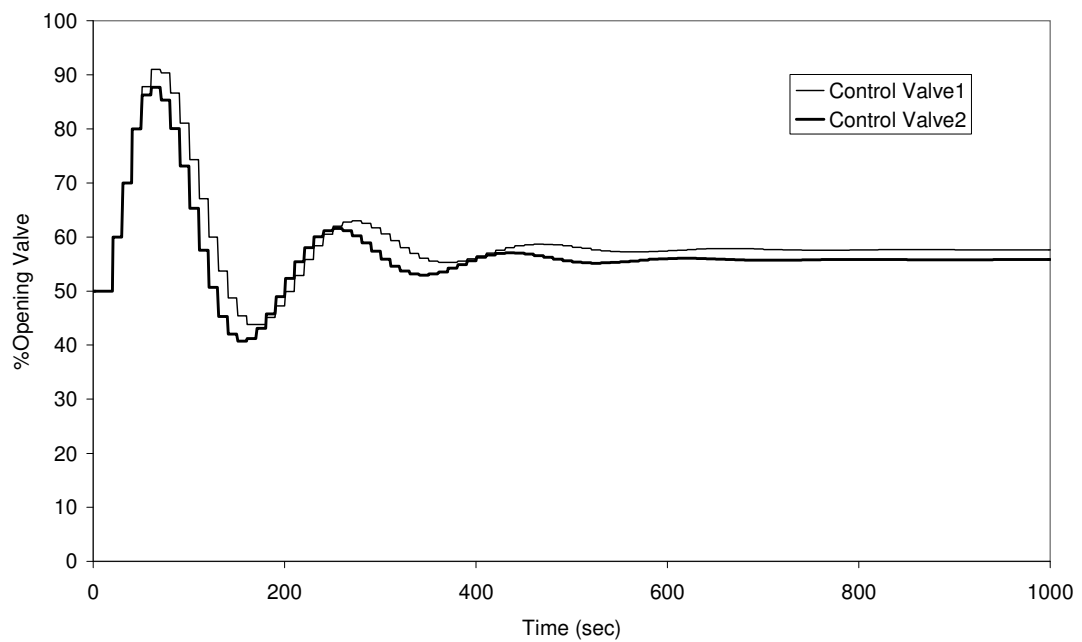
รูปที่ ก-13 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 1 กับถังที่ 3 กรณีมีเวลาหน่วง 20 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 2$, $Q = 1$, $R = 1$)



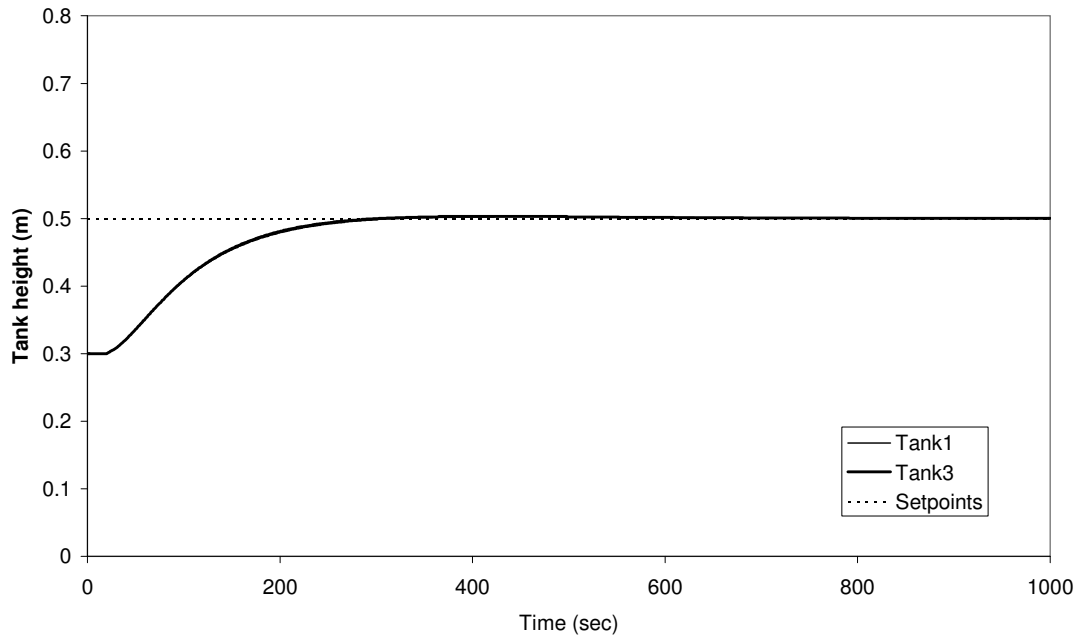
รูปที่ ก-14 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 20 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 2$, $Q = 1$, $R = 1$)



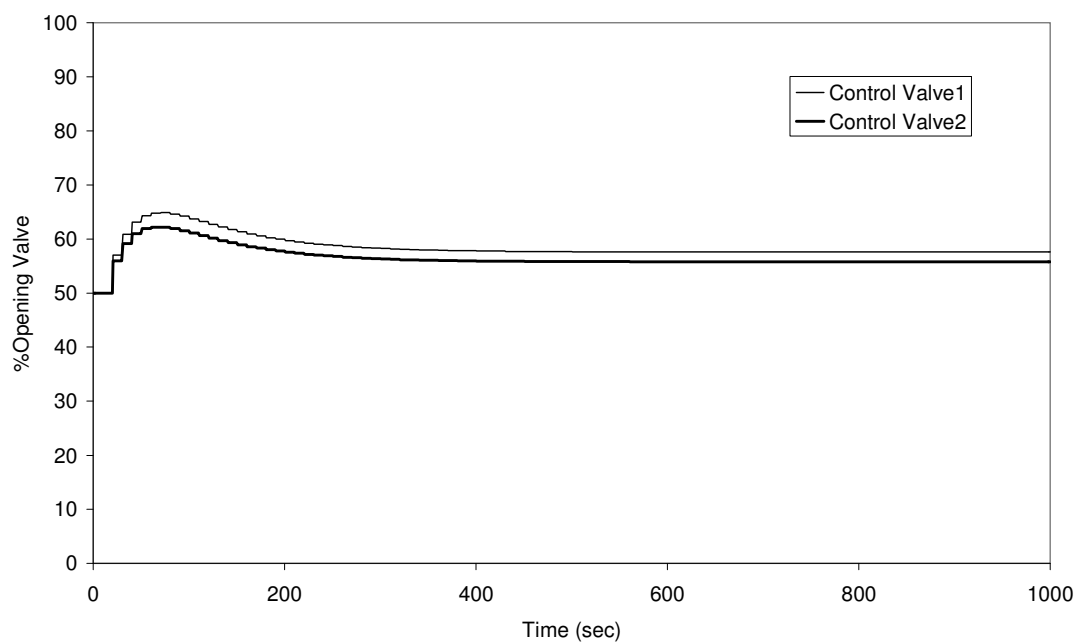
รูปที่ ก-15 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 1 กับถังที่ 3 กรณีมีเวลาหน่วง 20 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 6$, $Q = 1$, $R = 1$)



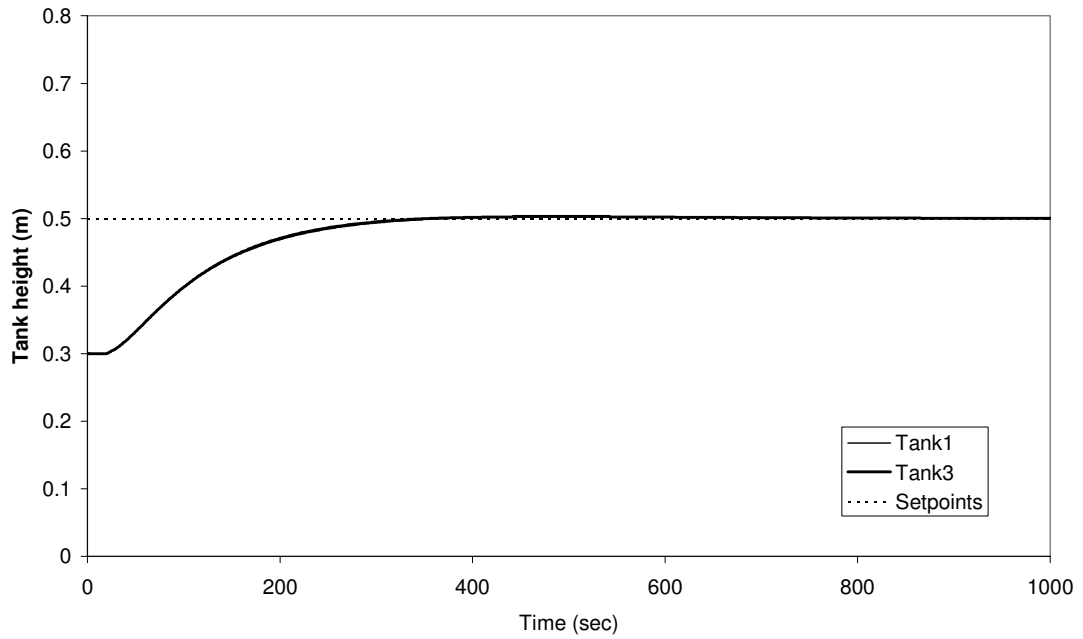
รูปที่ ก-16 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 20 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 6$, $Q = 1$, $R = 1$)



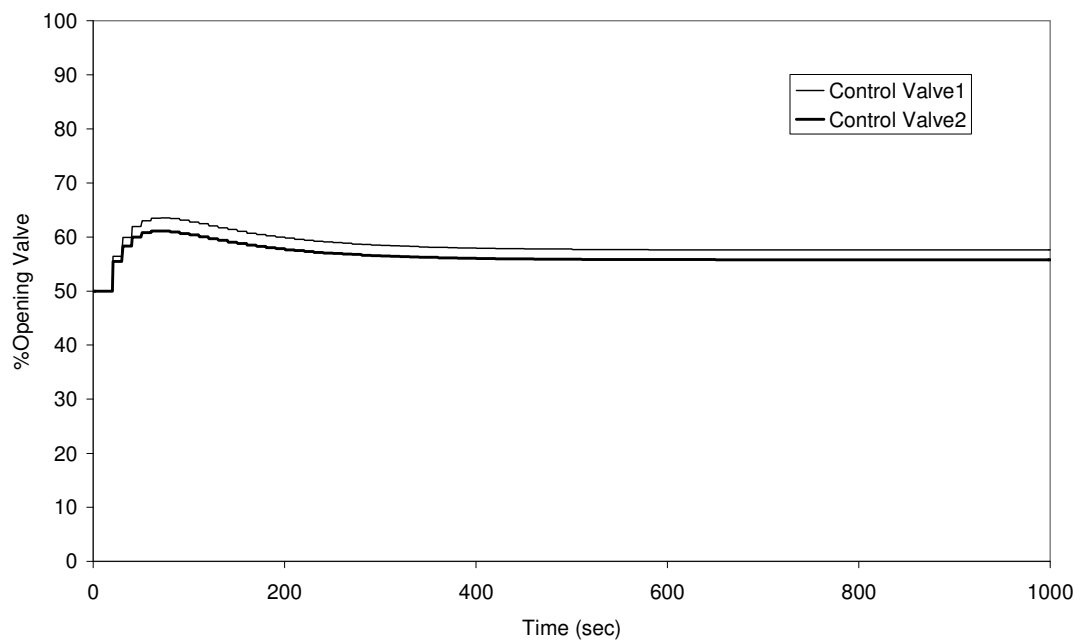
รูปที่ ก-17 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 1 กับถังที่ 3 กรณีมีเวลาหน่วง 20 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 2$, $Q = 0.3$, $R = 1$)



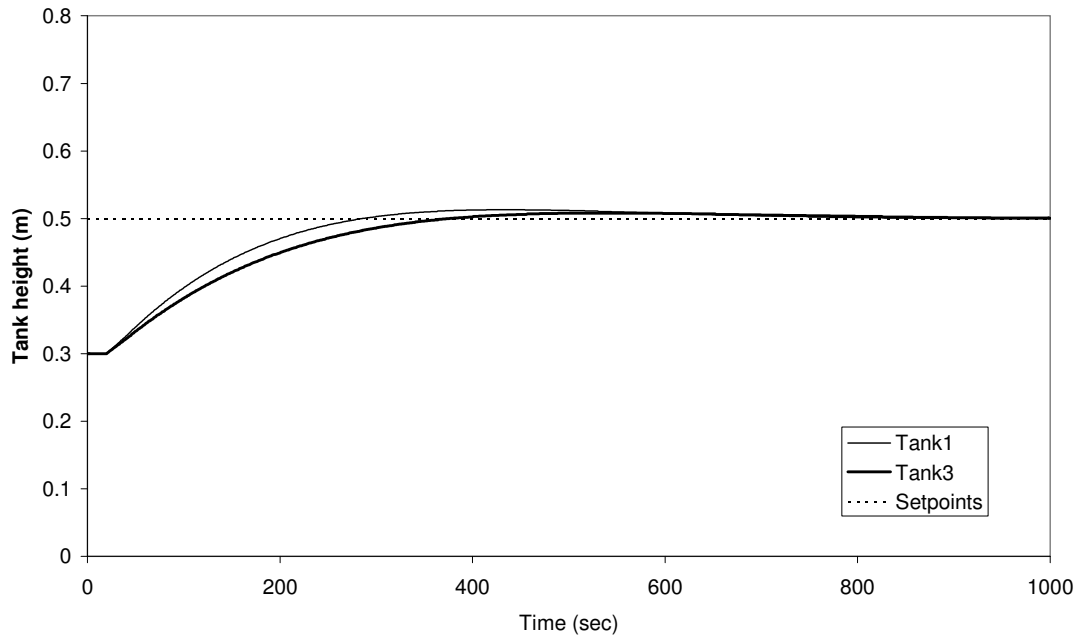
รูปที่ ก-18 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 20 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 2$, $Q = 0.3$, $R = 1$)



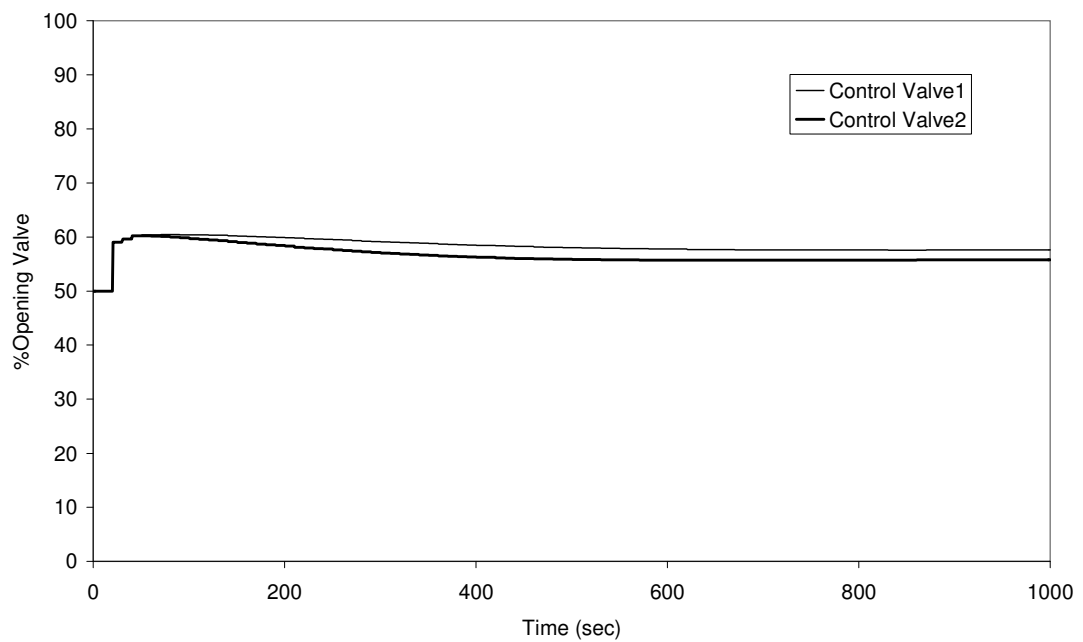
รูปที่ ก-19 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 1 กับถังที่ 3 กรณีมีเวลาหน่วง 20 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 60$, $M = 2$, $Q = 0.3$, $R = 1$)



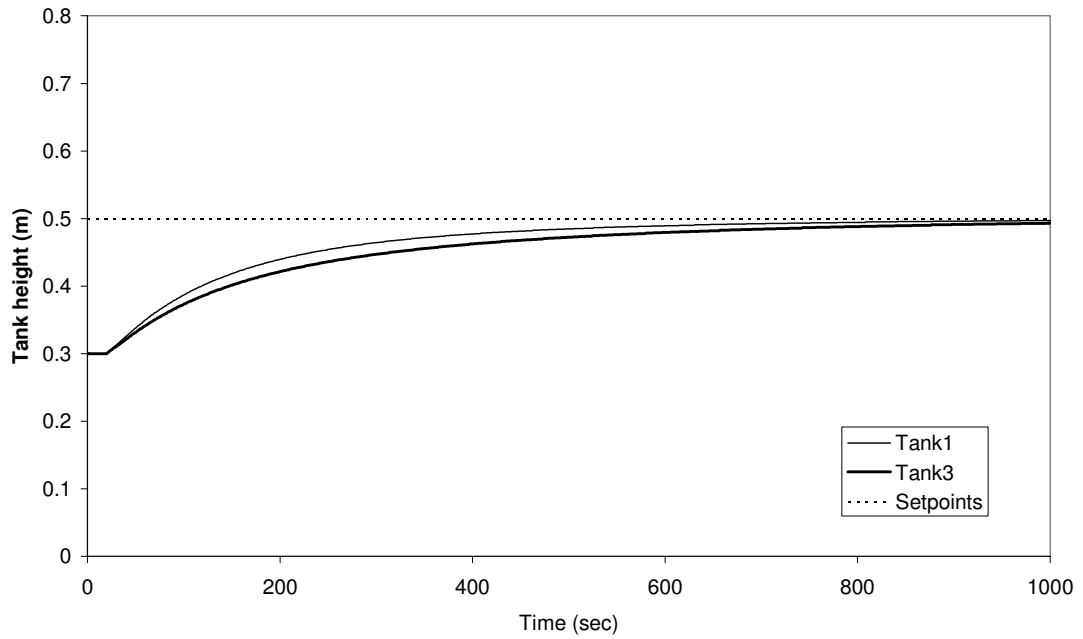
รูปที่ ก-20 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 20 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 60$, $M = 2$, $Q = 0.3$, $R = 1$)



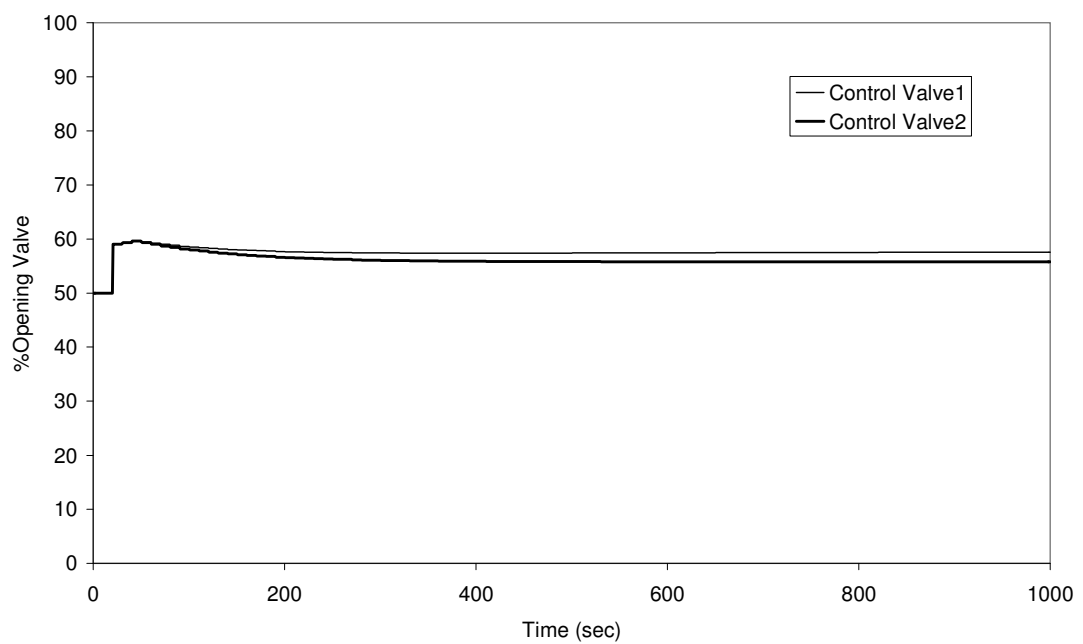
รูปที่ ก-21 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 1 กับถังที่ 3 กรณีมีเวลาหน่วง 20 วินาที
จากตัวควบคุมพีไอดี ($K_c = 0.45$, $T_i = 150$)



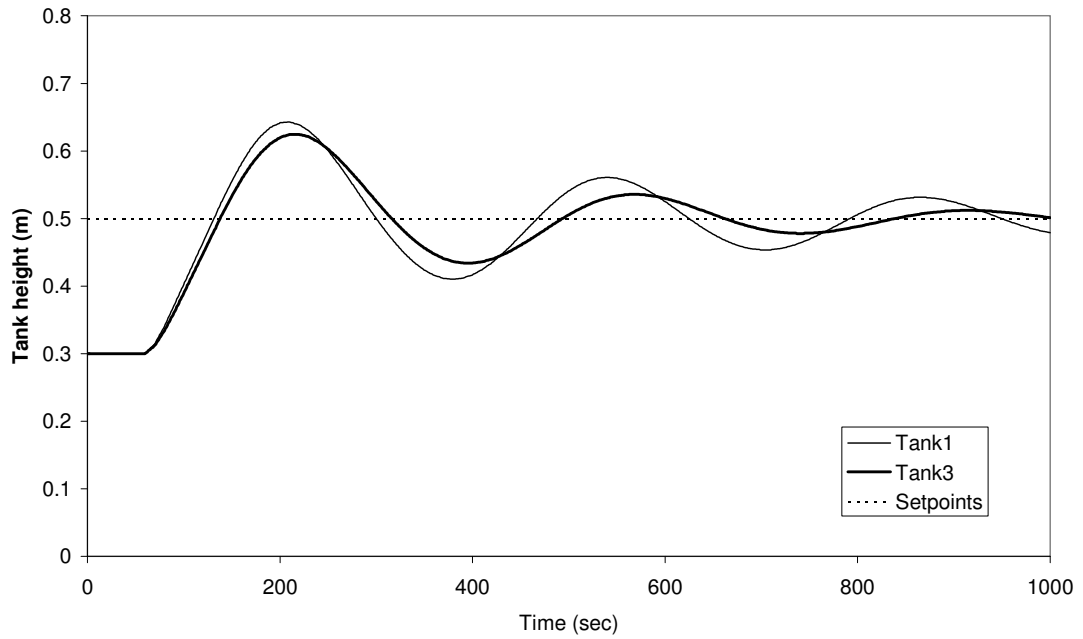
รูปที่ ก-22 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 20 วินาที
จากตัวควบคุมพีไอดี ($K_c = 0.45$, $T_i = 150$)



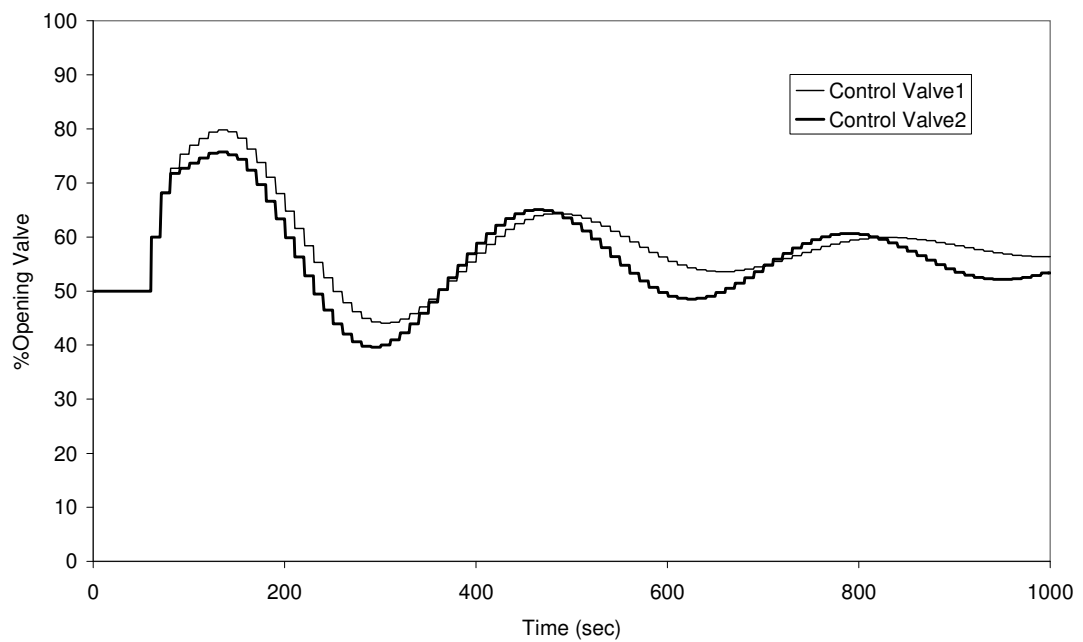
รูปที่ 11-23 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 1 กับถังที่ 3 กรณีมีเวลาหน่วง 20 วินาที
จากตัวควบคุมพีไอดี ($K_c = 0.45$, $T_i = 300$)



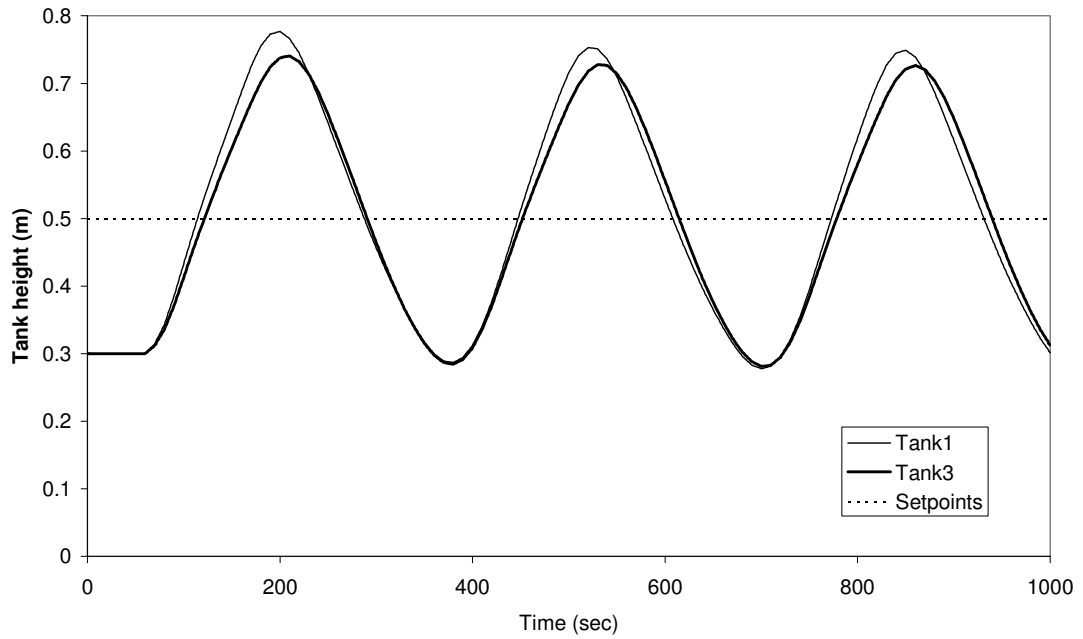
รูปที่ 11-24 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 20 วินาที
จากตัวควบคุมพีไอดี ($K_c = 0.45$, $T_i = 300$)



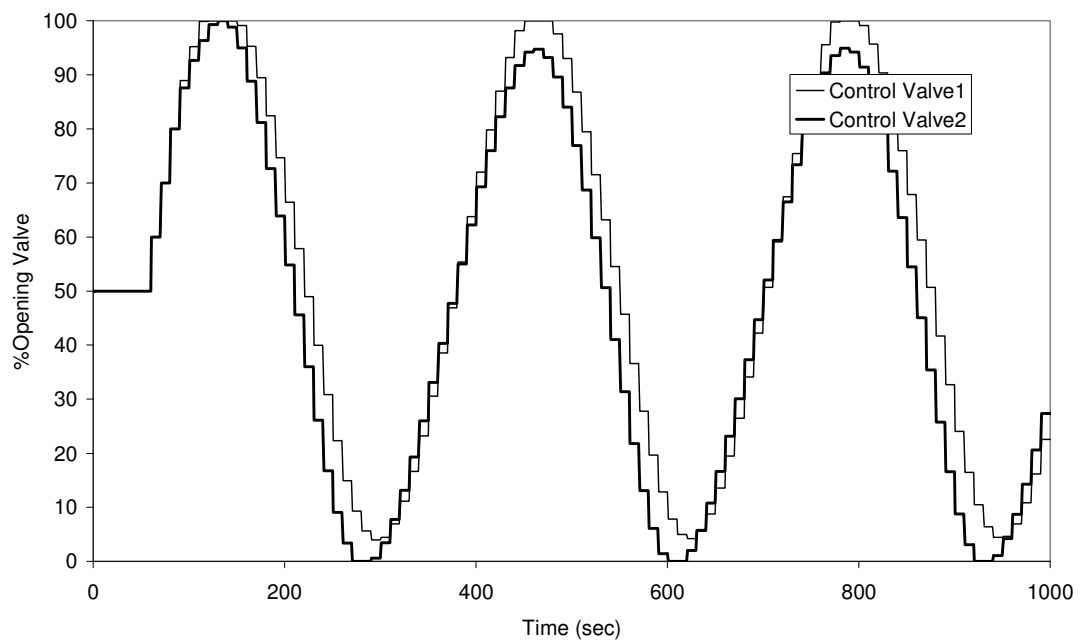
รูปที่ ก-25 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 1 กับถังที่ 3 กรณีมีเวลาหน่วง 60 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 2$, $Q = 1$, $R = 1$)



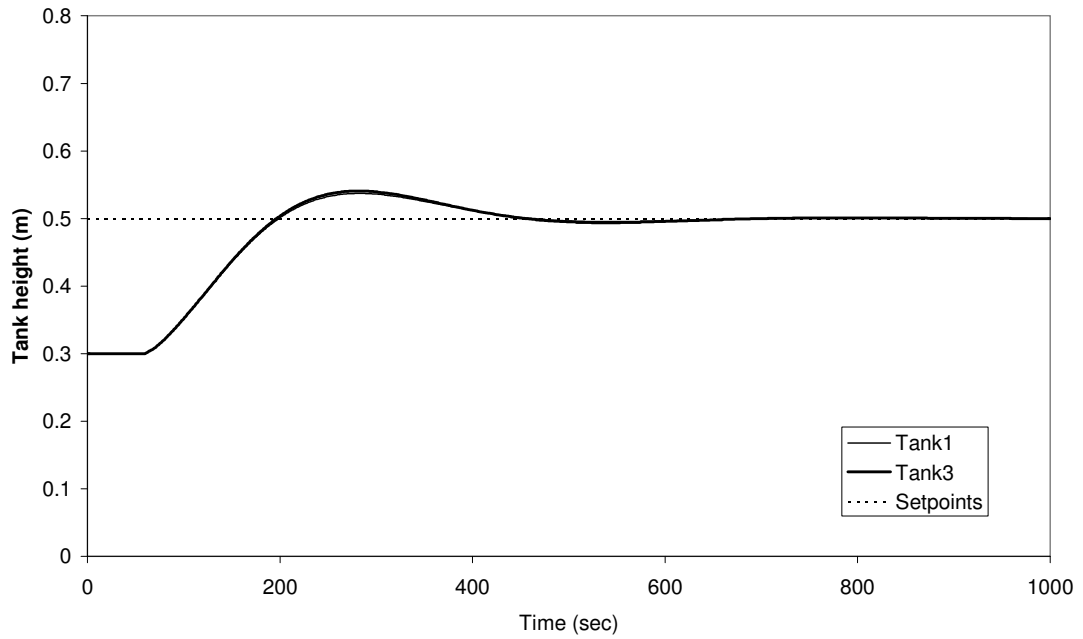
รูปที่ ก-26 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 60 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 2$, $Q = 1$, $R = 1$)



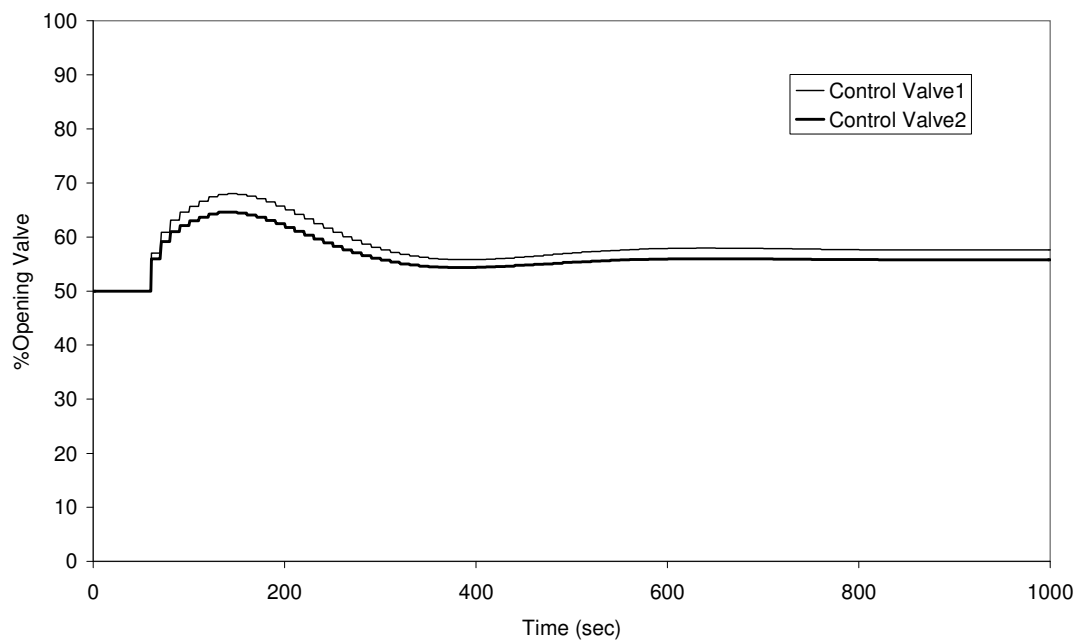
รูปที่ ก-27 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 1 กับถังที่ 3 กรณีมีเวลาหน่วง 60 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 6$, $Q = 1$, $R = 1$)



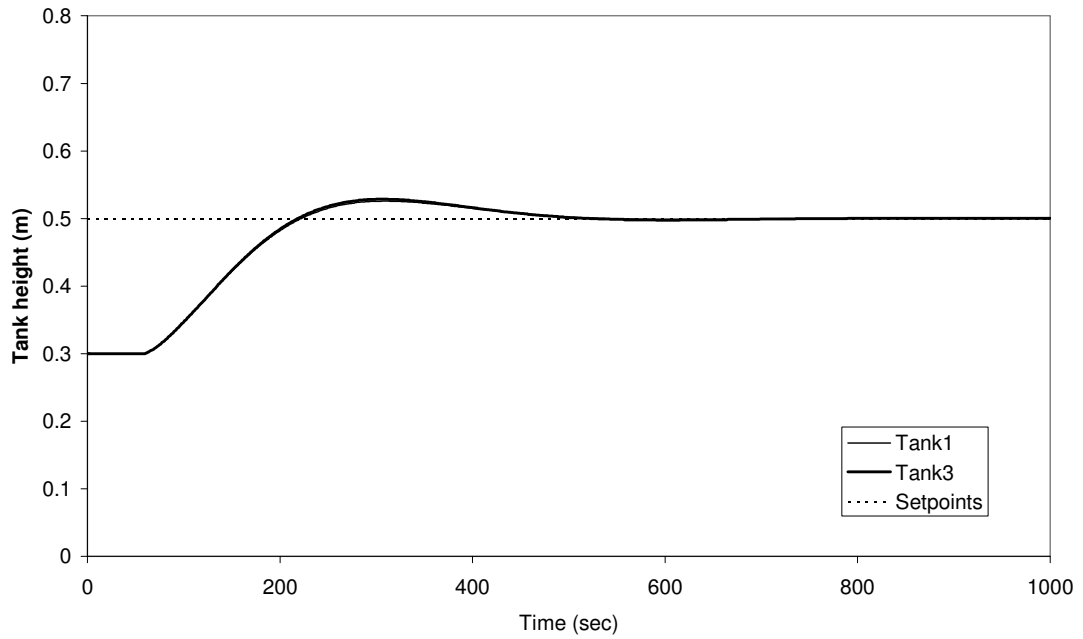
รูปที่ ก-28 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 60 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 6$, $Q = 1$, $R = 1$)



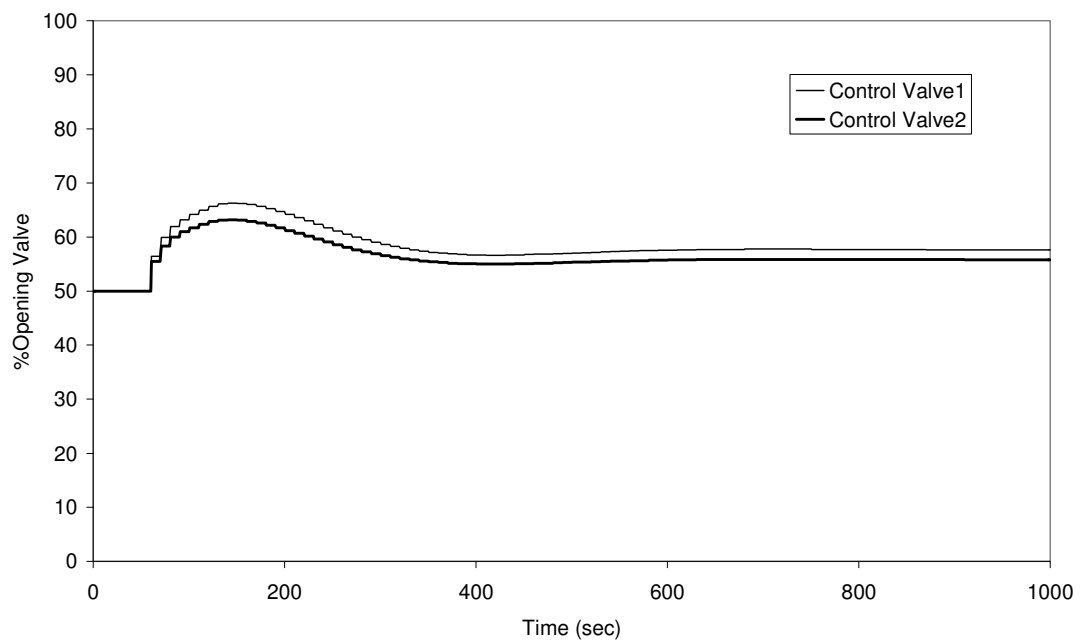
รูปที่ ก-29 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 1 กับถังที่ 3 กรณีมีเวลาหน่วง 60 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 2$, $Q = 0.3$, $R = 1$)



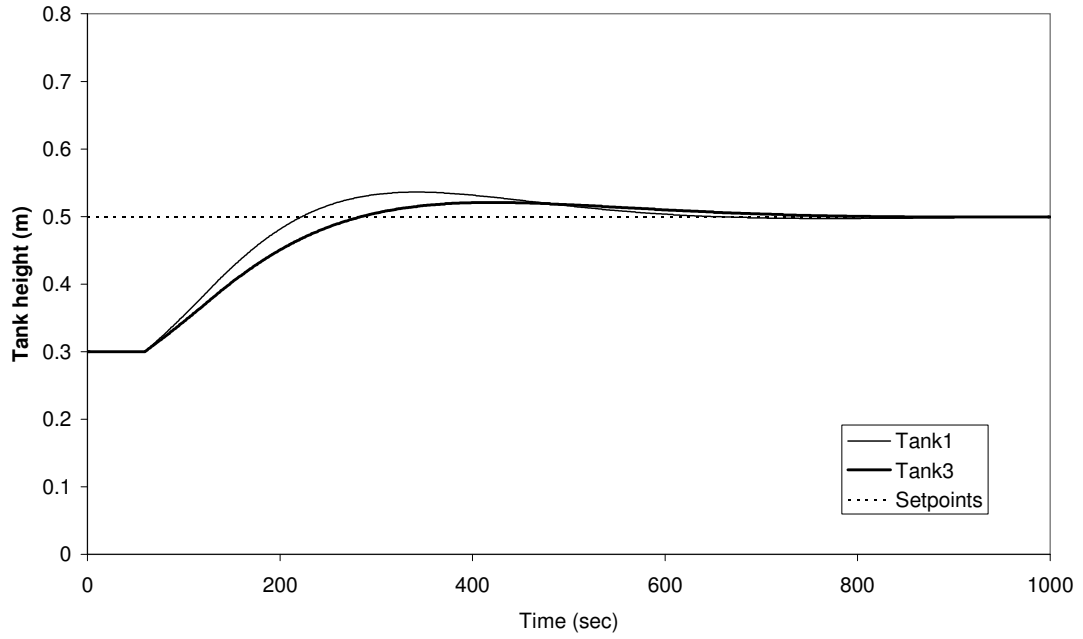
รูปที่ ก-30 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 60 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 2$, $Q = 0.3$, $R = 1$)



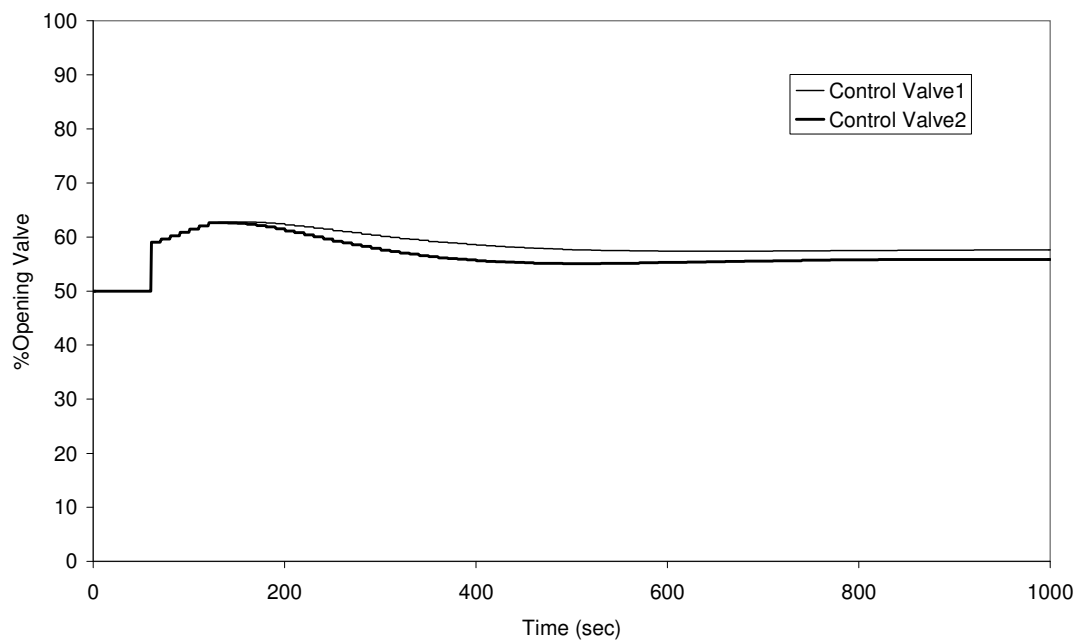
รูปที่ ก-31 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 1 กับถังที่ 3 กรณีมีเวลาหน่วง 60 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 60$, $M = 2$, $Q = 0.3$, $R = 1$)



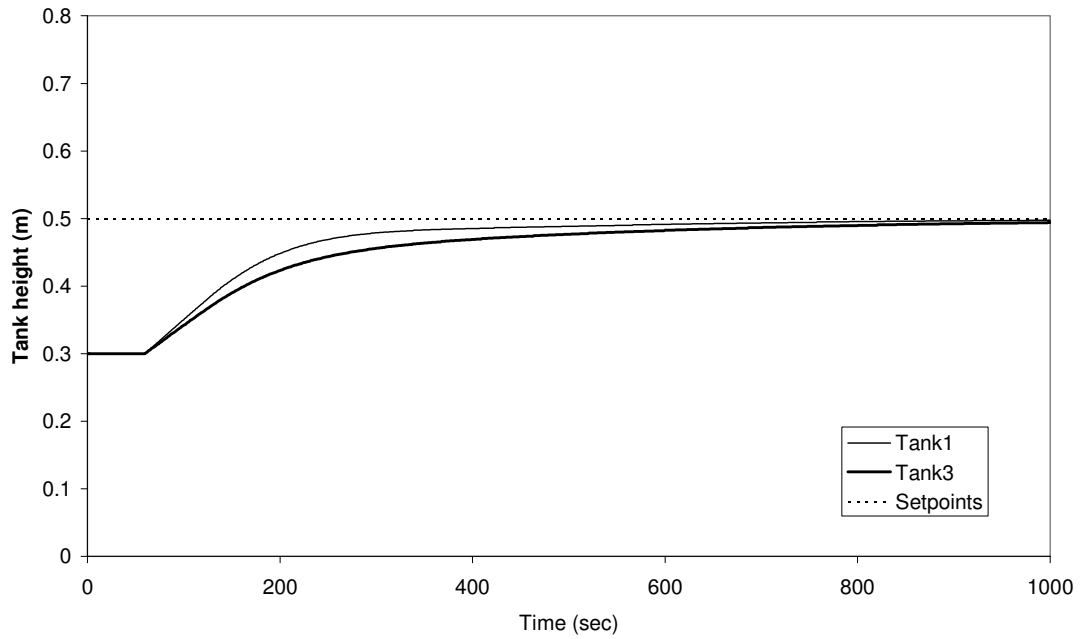
รูปที่ ก-32 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 60 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 60$, $M = 2$, $Q = 0.3$, $R = 1$)



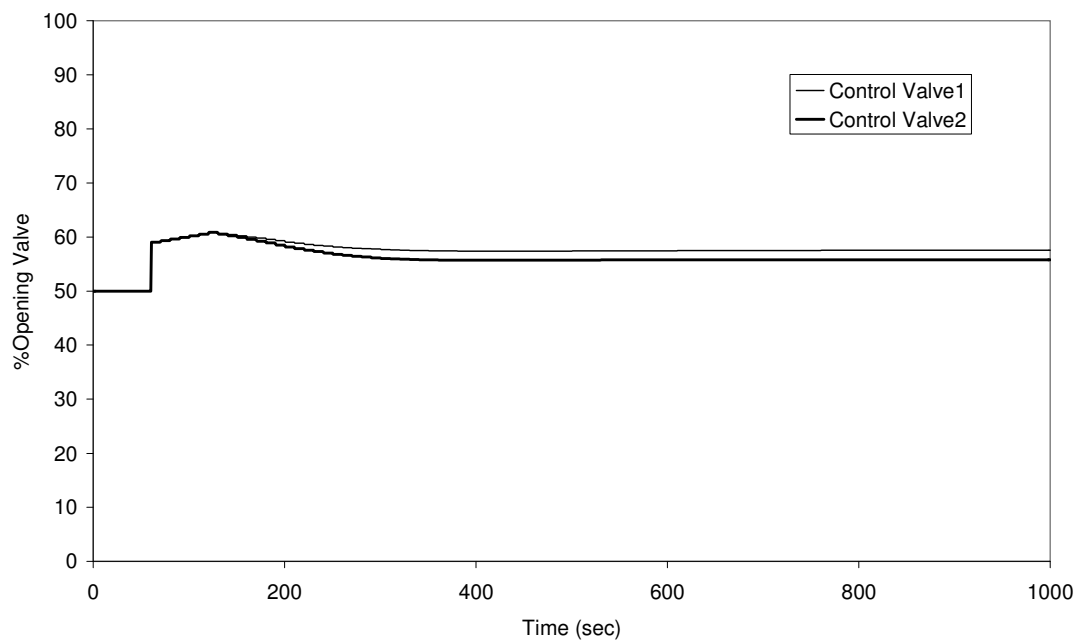
รูปที่ ก-33 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 1 กับถังที่ 3 กรณีมีเวลาหน่วง 60 วินาที
จากตัวควบคุมพีไอดี ($K_c = 0.45$, $T_i = 150$)



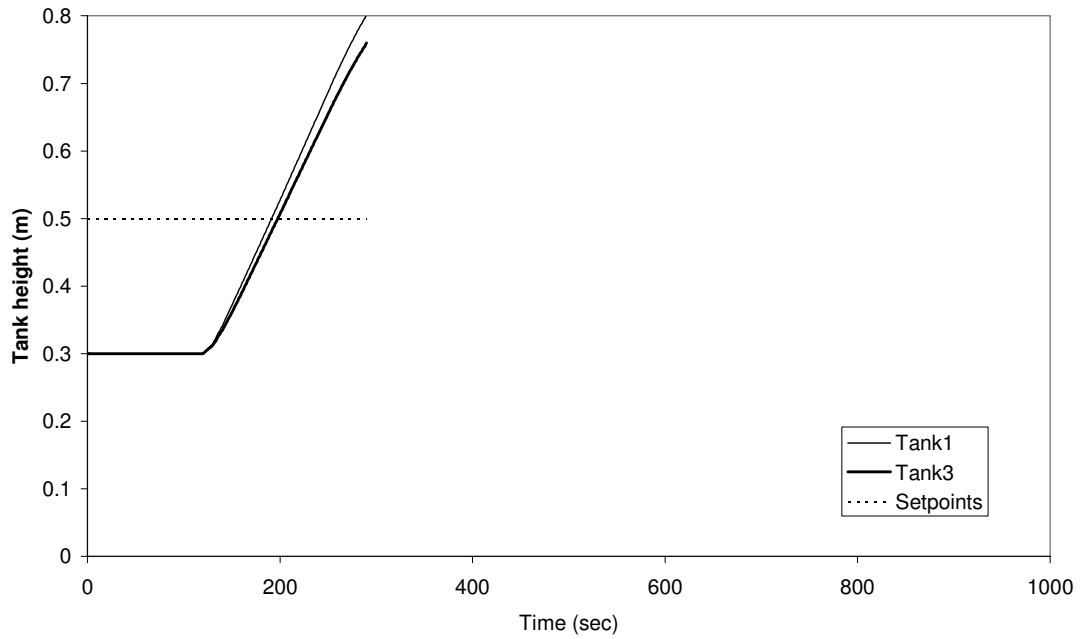
รูปที่ ก-34 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 60 วินาที
จากตัวควบคุมพีไอดี ($K_c = 0.45$, $T_i = 150$)



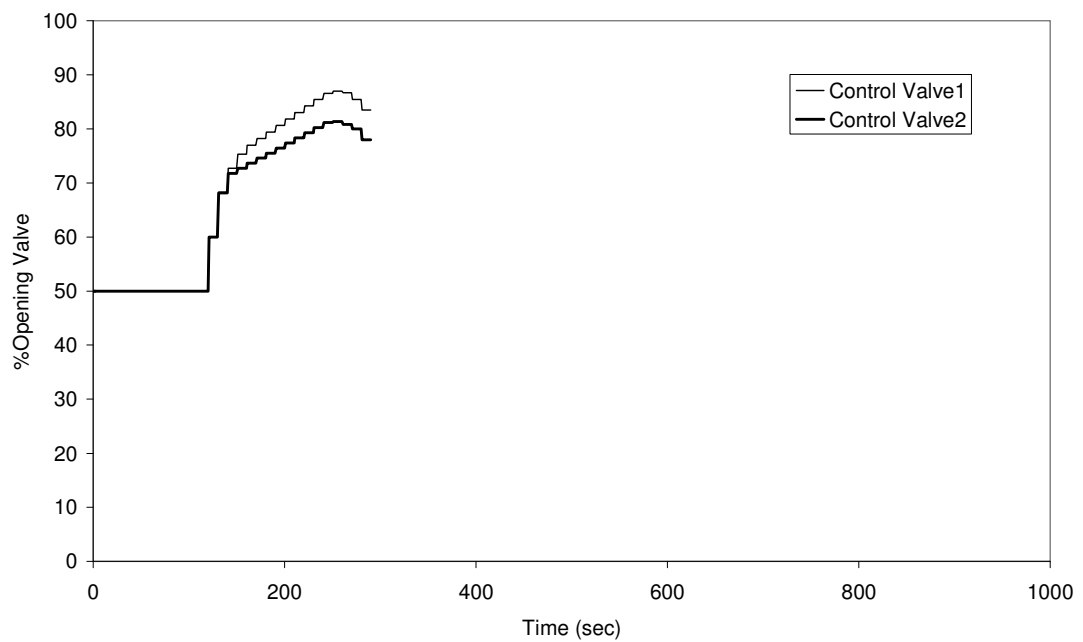
รูปที่ ก-35 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 1 กับถังที่ 3 กรณีมีเวลาหน่วง 60 วินาที
จากตัวควบคุมพีไอดี ($K_c = 0.45$, $T_i = 300$)



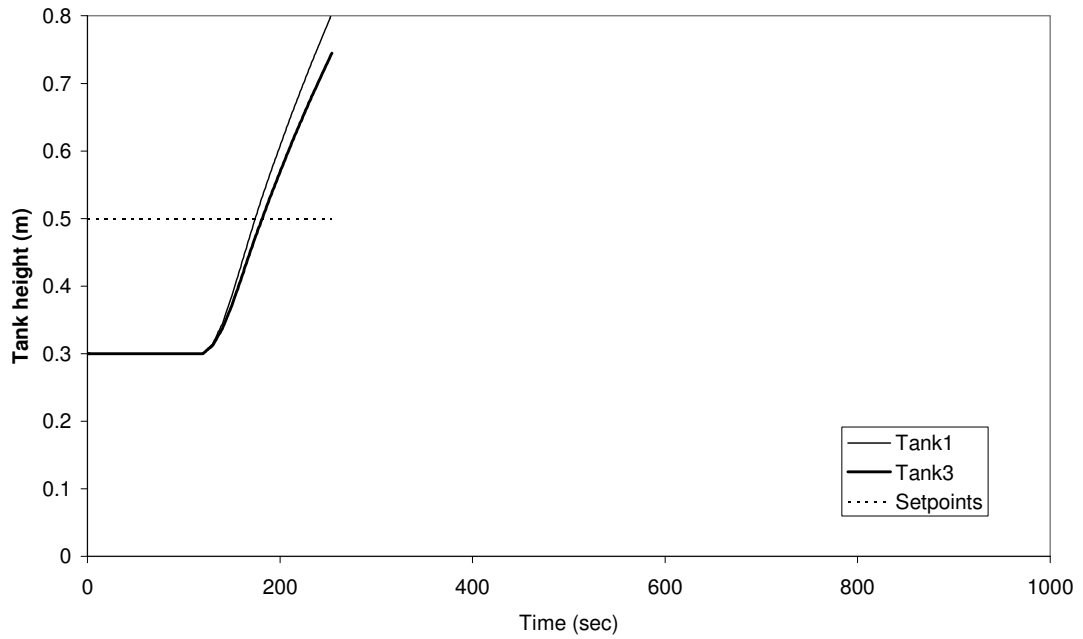
รูปที่ ก-36 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 60 วินาที
จากตัวควบคุมพีไอดี ($K_c = 0.45$, $T_i = 300$)



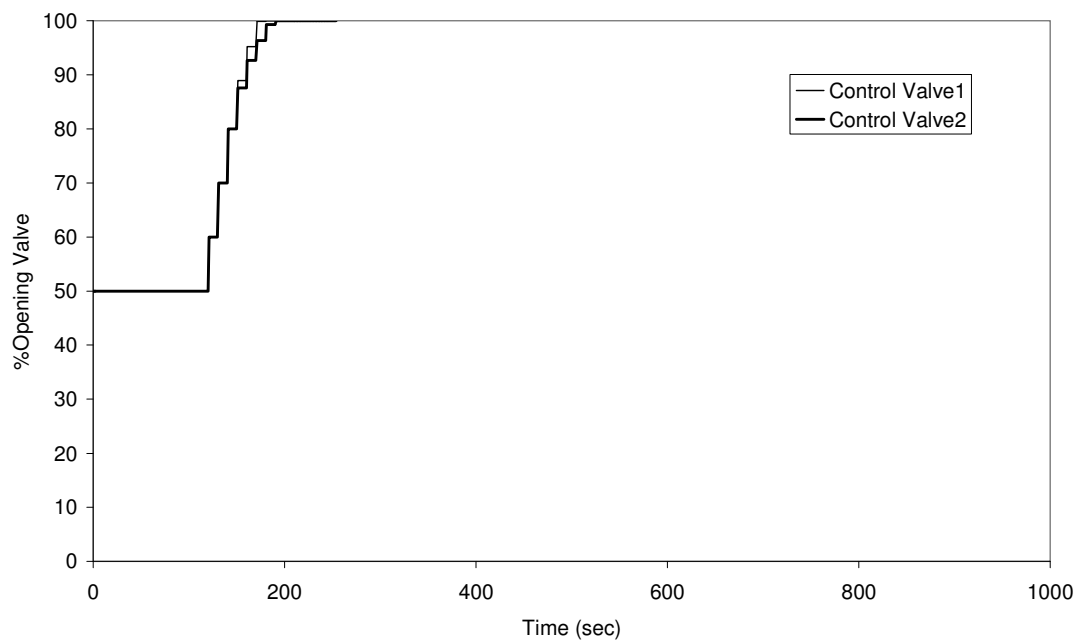
รูปที่ ก-37 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 1 กับถังที่ 3 กรณีมีเวลาหน่วง 120 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 2$, $Q = 1$, $R = 1$)



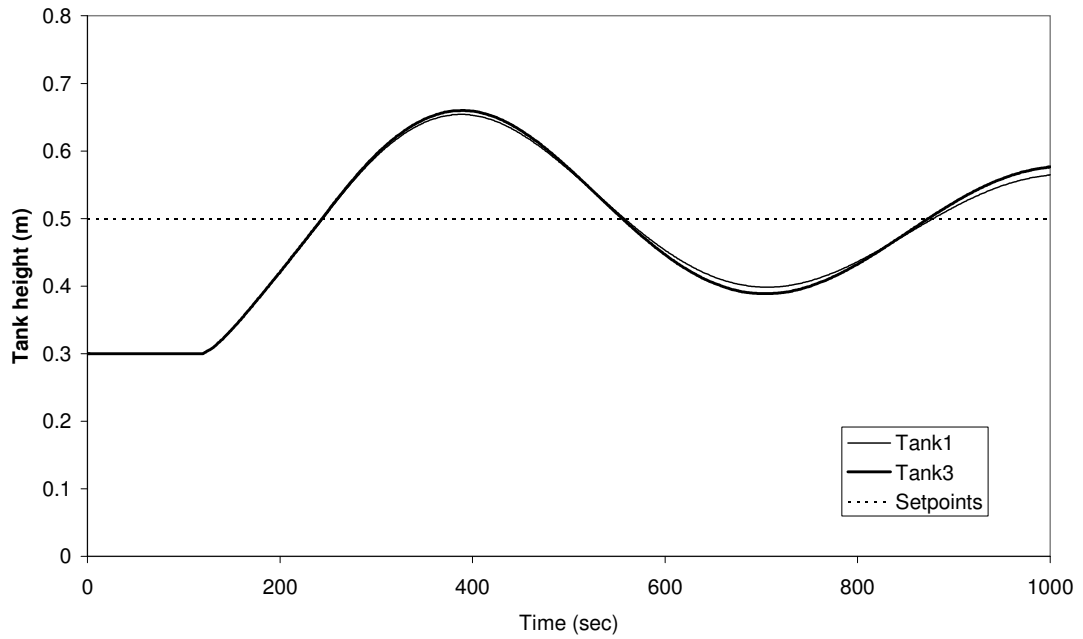
รูปที่ ก-38 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 120 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 2$, $Q = 1$, $R = 1$)



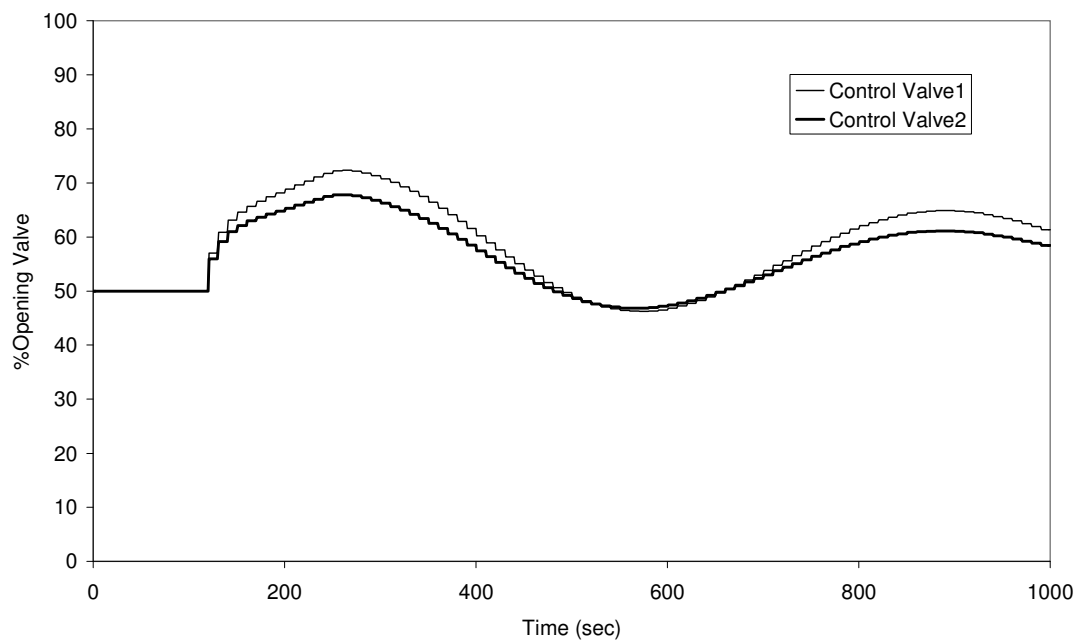
รูปที่ ก-39 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 1 กับถังที่ 3 กรณีมีเวลาหน่วง 120 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 6$, $Q = 1$, $R = 1$)



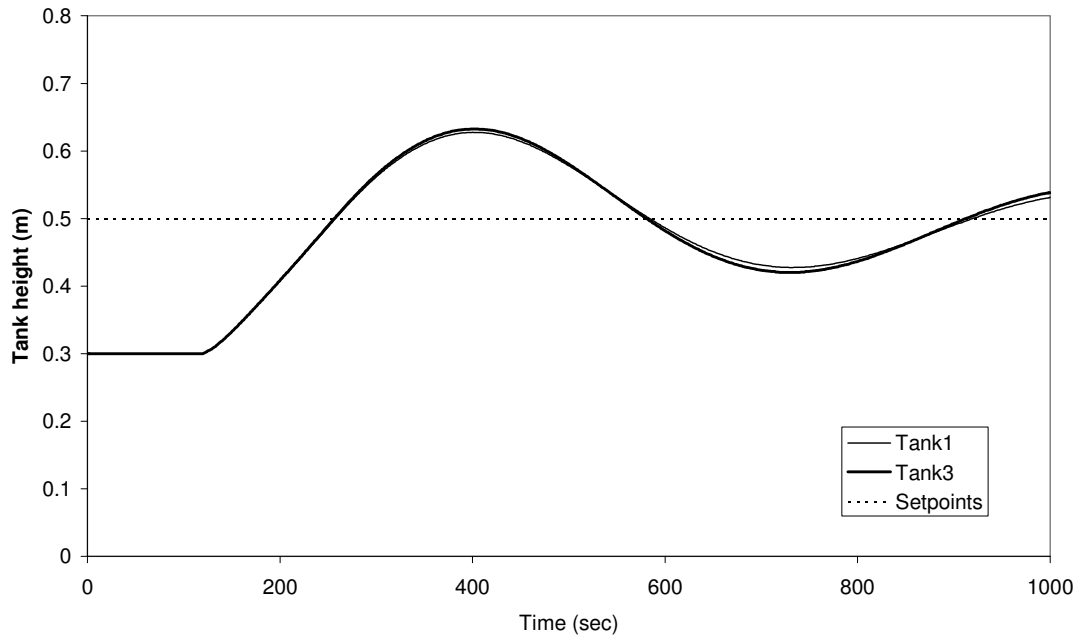
รูปที่ ก-40 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 120 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 6$, $Q = 1$, $R = 1$)



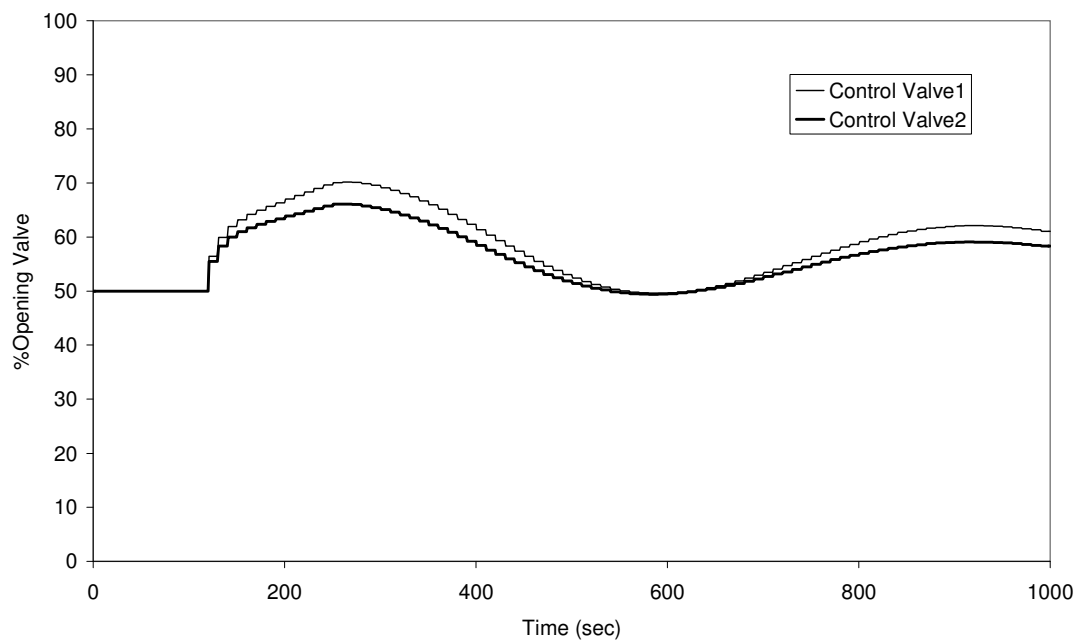
รูปที่ ก-41 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 1 กับถังที่ 3 กรณีมีเวลาหน่วง 120 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 2$, $Q = 0.3$, $R = 1$)



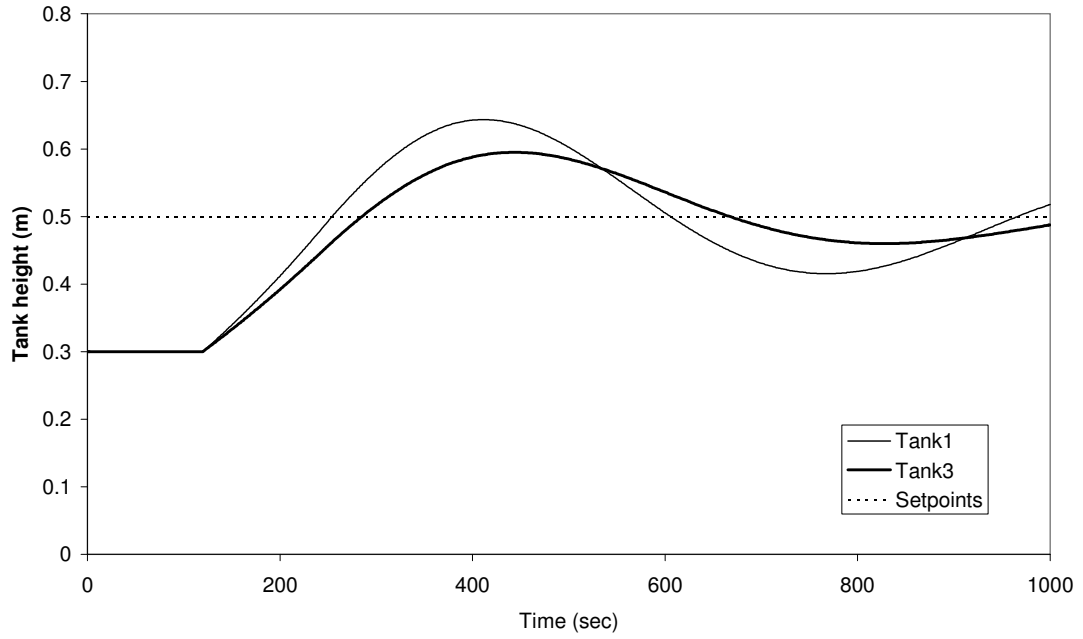
รูปที่ ก-42 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 120 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 2$, $Q = 0.3$, $R = 1$)



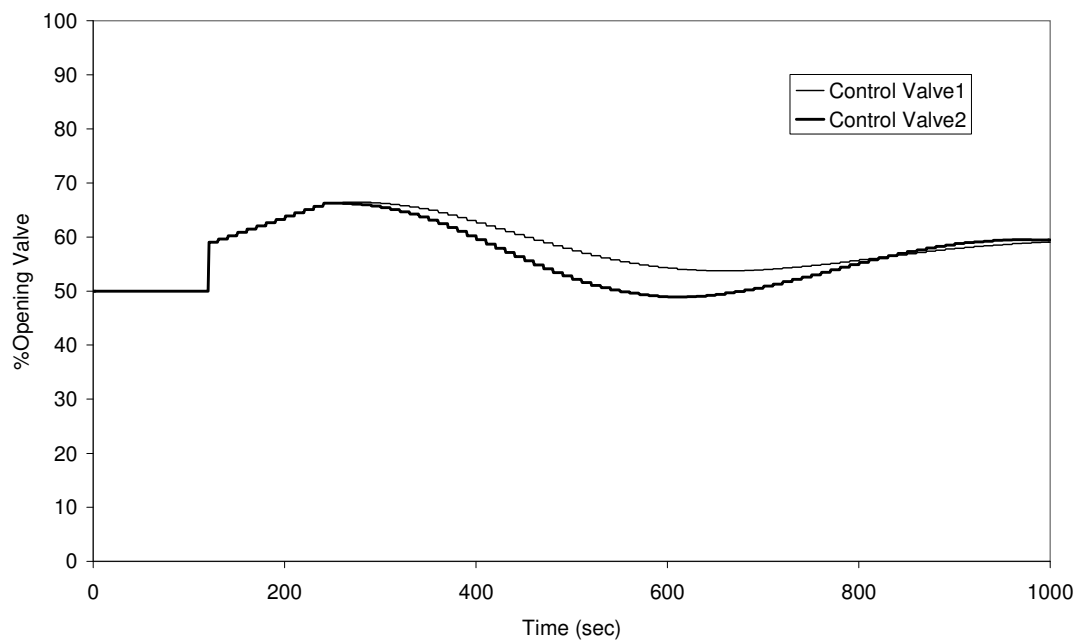
รูปที่ ก-43 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 1 กับถังที่ 3 กรณีมีเวลาหน่วง 120 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 60$, $M = 2$, $Q = 0.3$, $R = 1$)



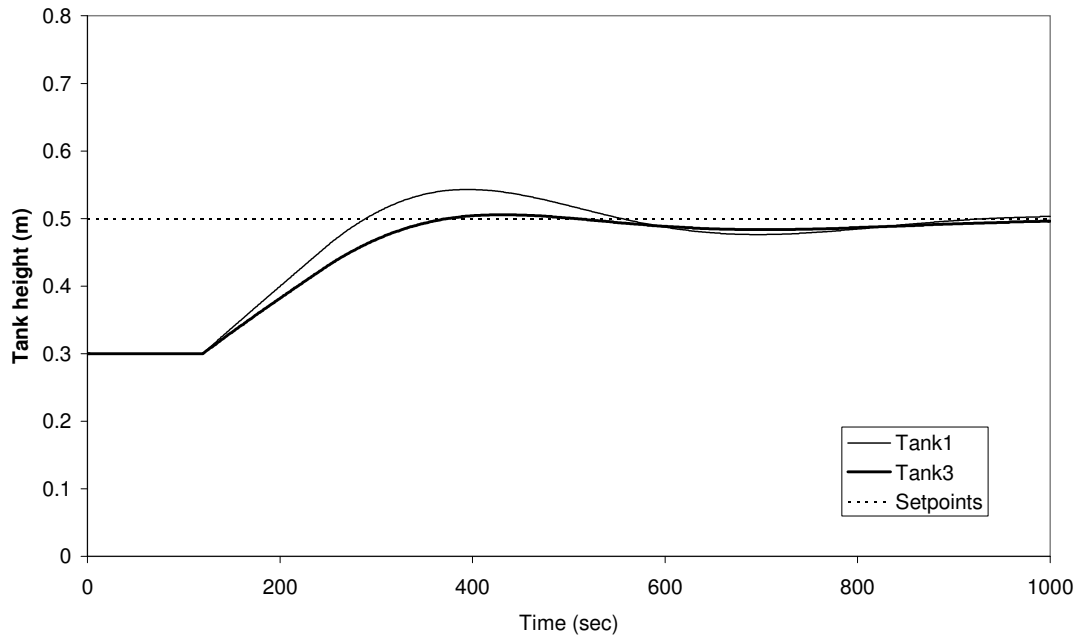
รูปที่ ก-44 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 120 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 60$, $M = 2$, $Q = 0.3$, $R = 1$)



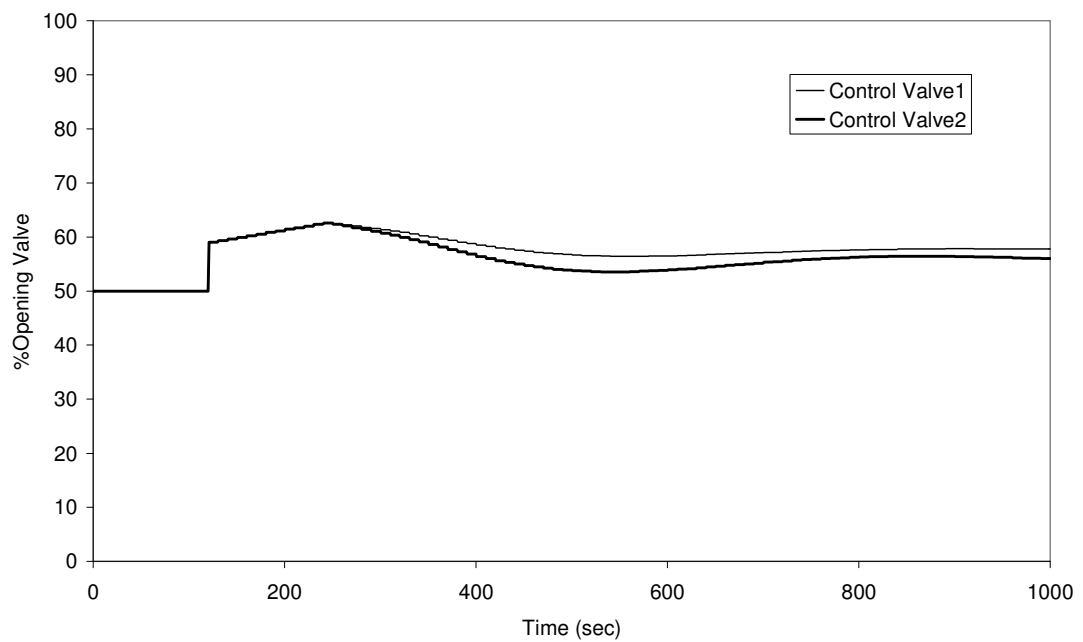
รูปที่ ก-45 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 1 กับถังที่ 3 กรณีมีเวลาหน่วง 120 วินาที
จากตัวควบคุมพีไอดี ($K_c = 0.45$, $T_i = 150$)



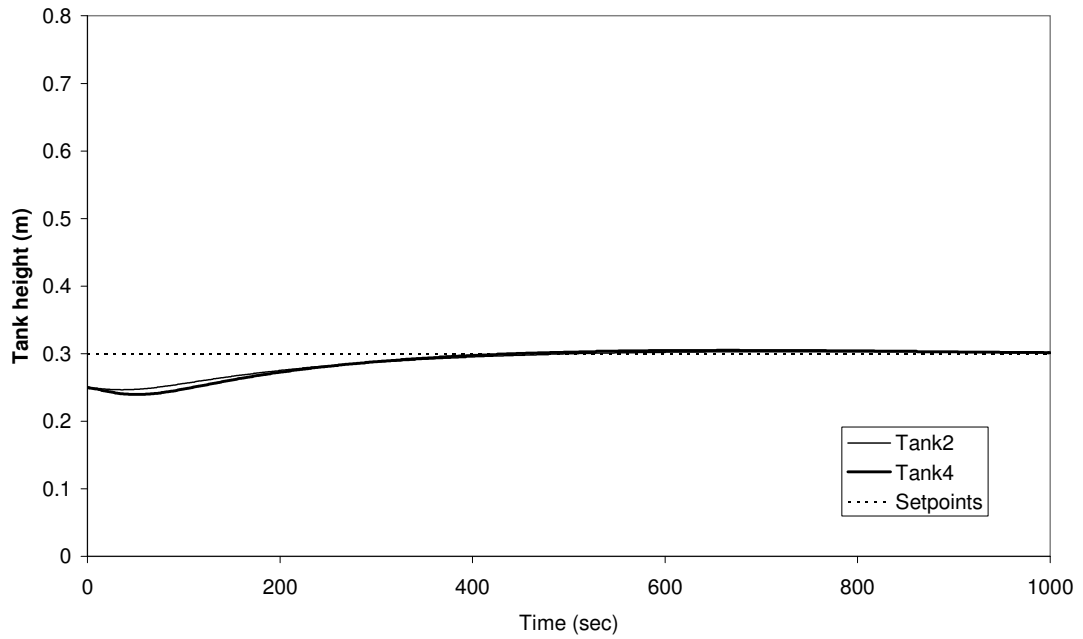
รูปที่ ก-46 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 120 วินาที
จากตัวควบคุมพีไอดี ($K_c = 0.45$, $T_i = 150$)



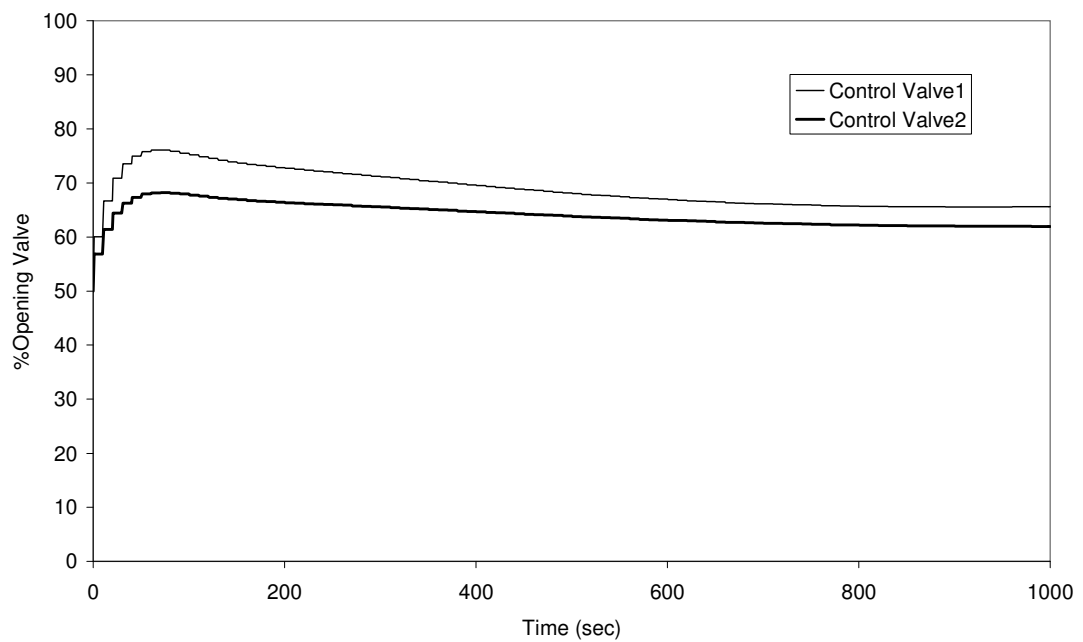
รูปที่ ก-47 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 1 กับถังที่ 3 กรณีมีเวลาหน่วง 120 วินาที
จากตัวควบคุมพีไอดี ($K_c = 0.45$, $T_i = 300$)



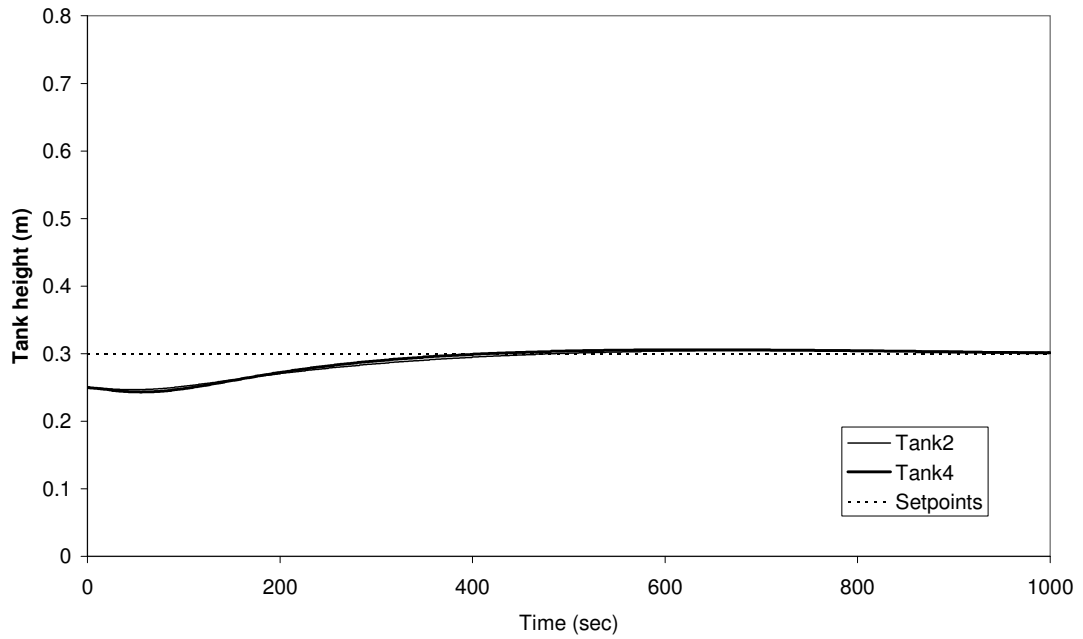
รูปที่ ก-48 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 120 วินาที
จากตัวควบคุมพีไอดี ($K_c = 0.45$, $T_i = 300$)



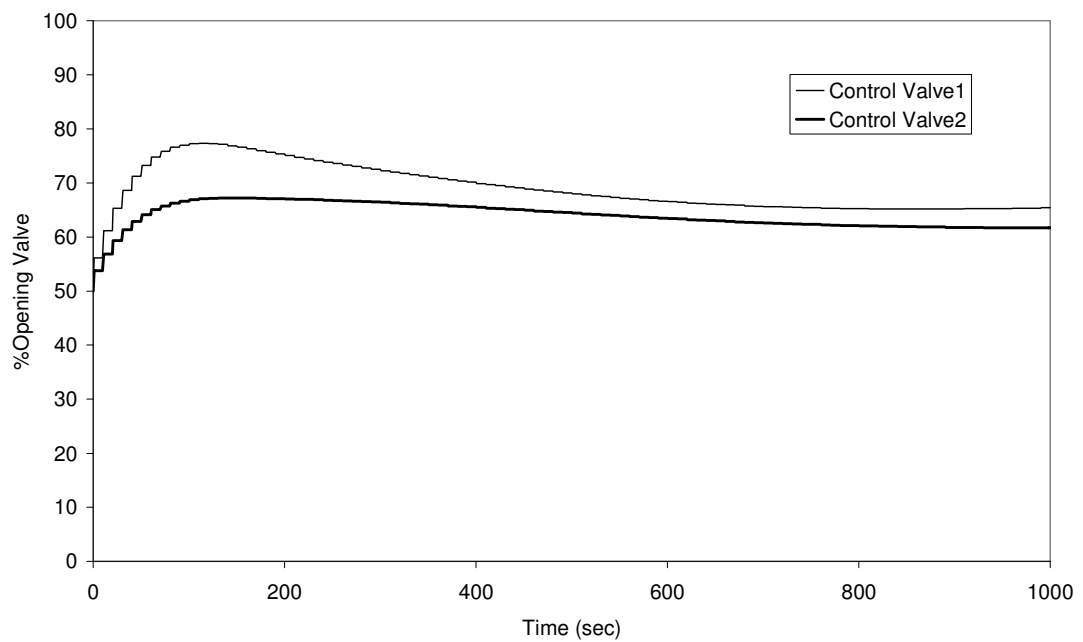
รูปที่ ก-49 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 2 กับถังที่ 4 กรณีไม่มีเวลาหน่วง จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 2$, $Q = 1$, $R = 1$)



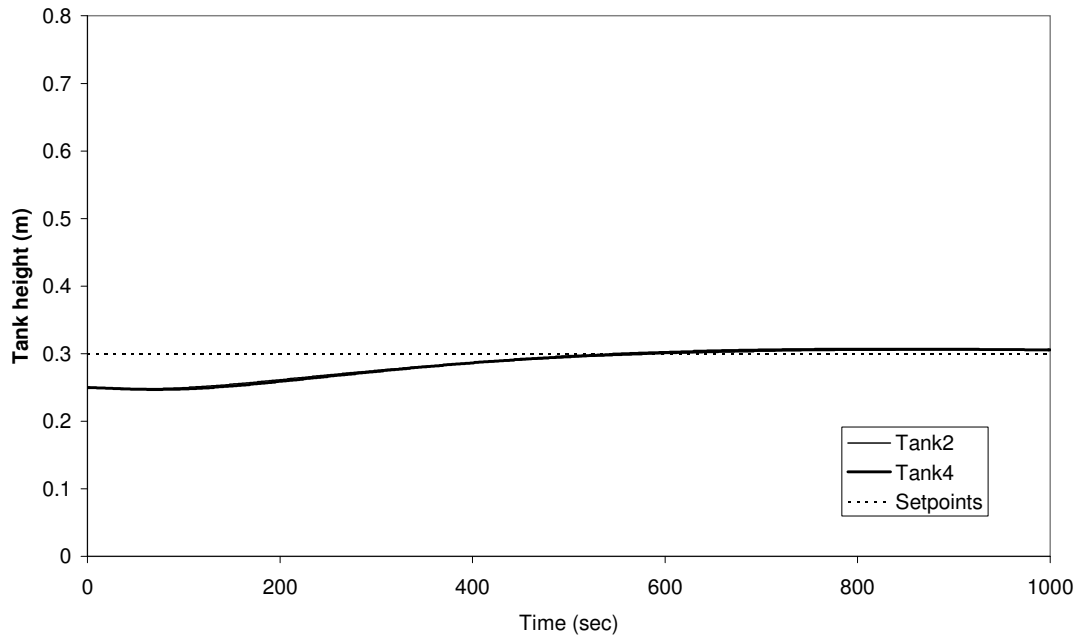
รูปที่ ก-50 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีไม่มีเวลาหน่วง จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 2$, $Q = 1$, $R = 1$)



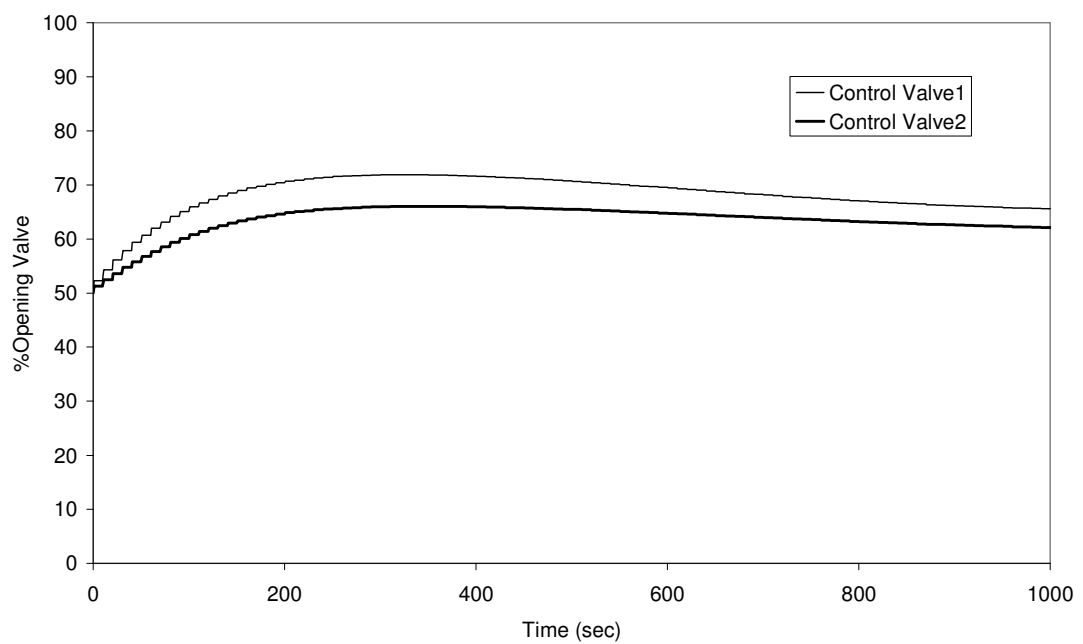
รูปที่ ก-51 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 2 กับถังที่ 4 กรณีไม่มีเวลาหน่วง จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 6$, $Q = 1$, $R = 1$)



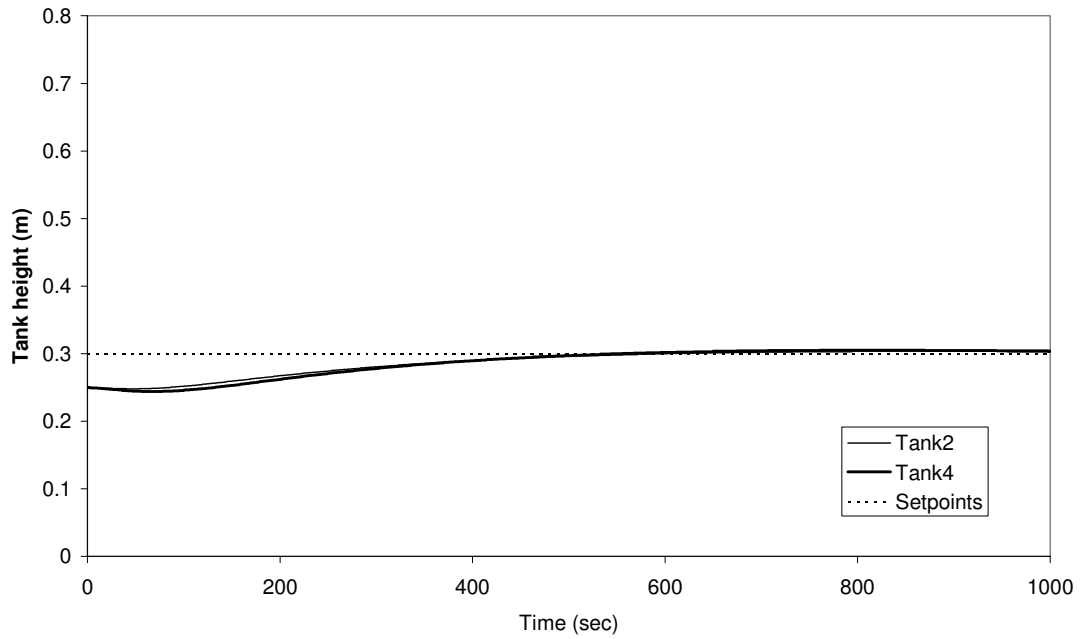
รูปที่ ก-52 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีไม่มีเวลาหน่วง จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 6$, $Q = 1$, $R = 1$)



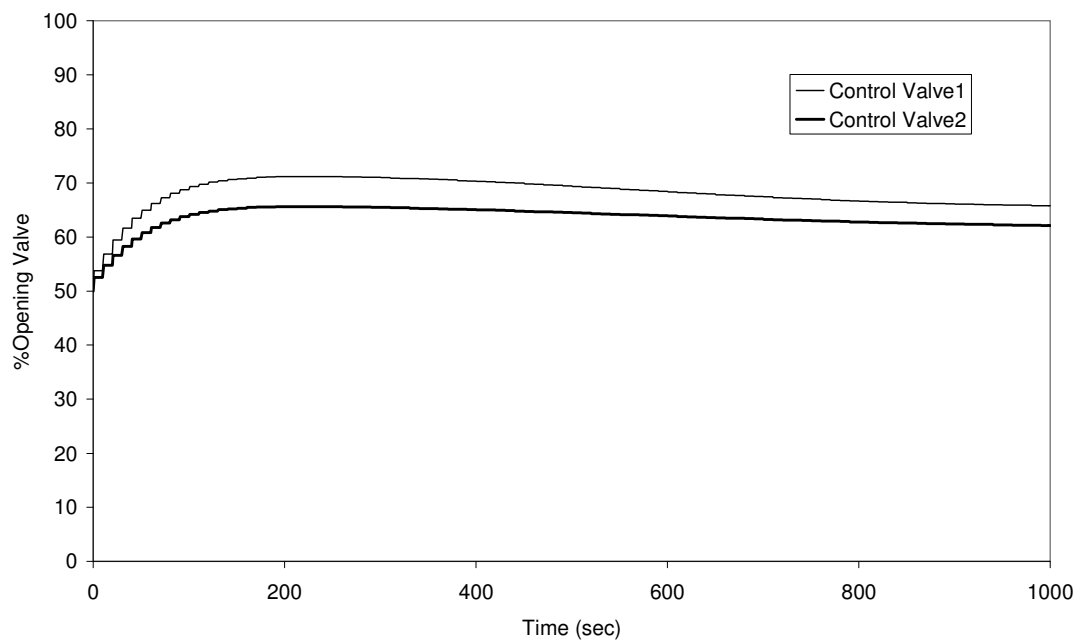
รูปที่ ก-53 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 2 กับถังที่ 4 กรณีไม่มีเวลาหน่วง จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 2$, $Q = 0.3$, $R = 1$)



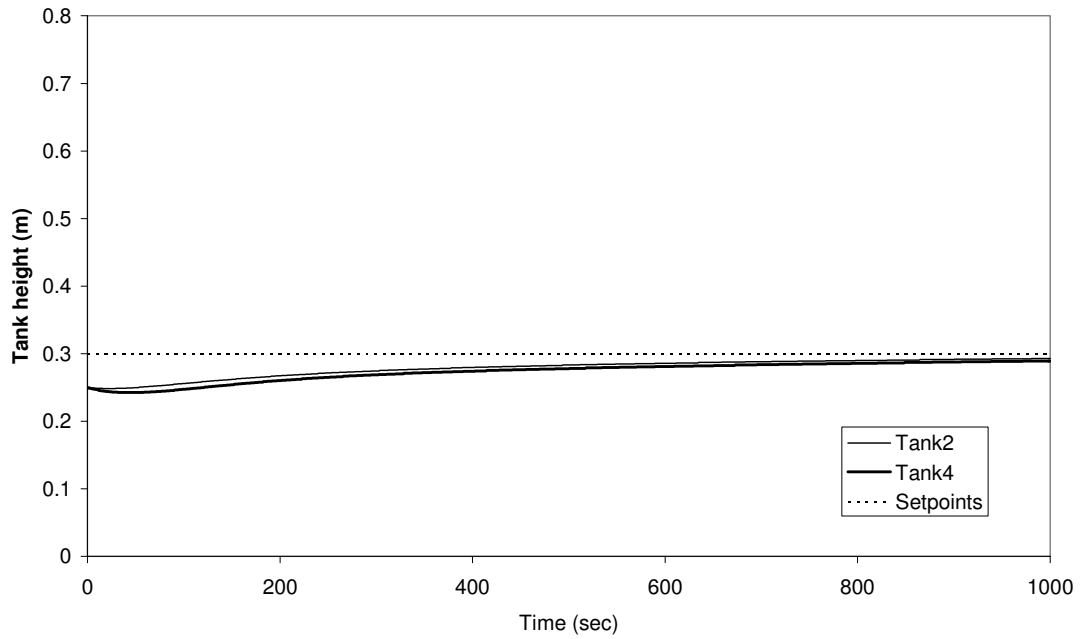
รูปที่ ก-54 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีไม่มีเวลาหน่วง จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 2$, $Q = 0.3$, $R = 1$)



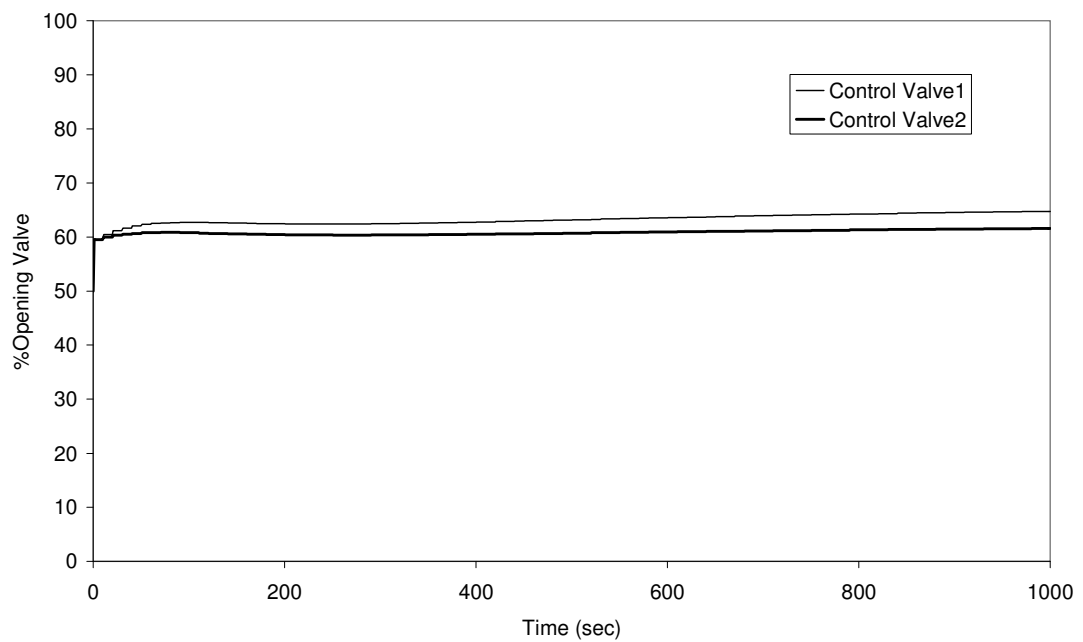
รูปที่ 3-55 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 2 กับถังที่ 4 กรณีไม่มีเวลาหน่วง จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 60$, $M = 2$, $Q = 0.3$, $R = 1$)



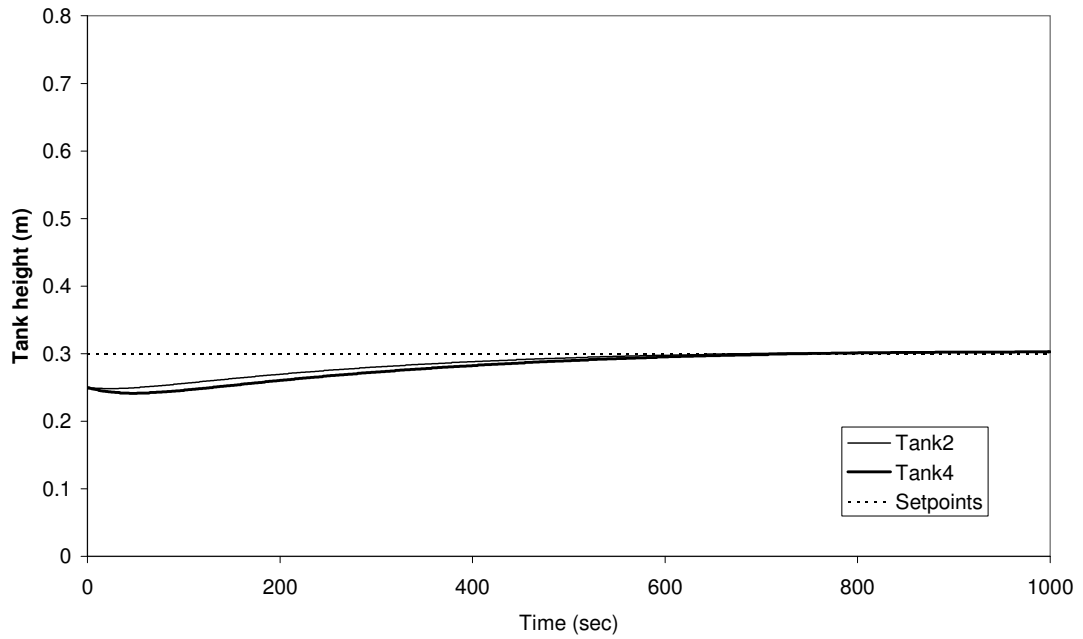
รูปที่ 3-56 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีไม่มีเวลาหน่วง จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 60$, $M = 2$, $Q = 0.3$, $R = 1$)



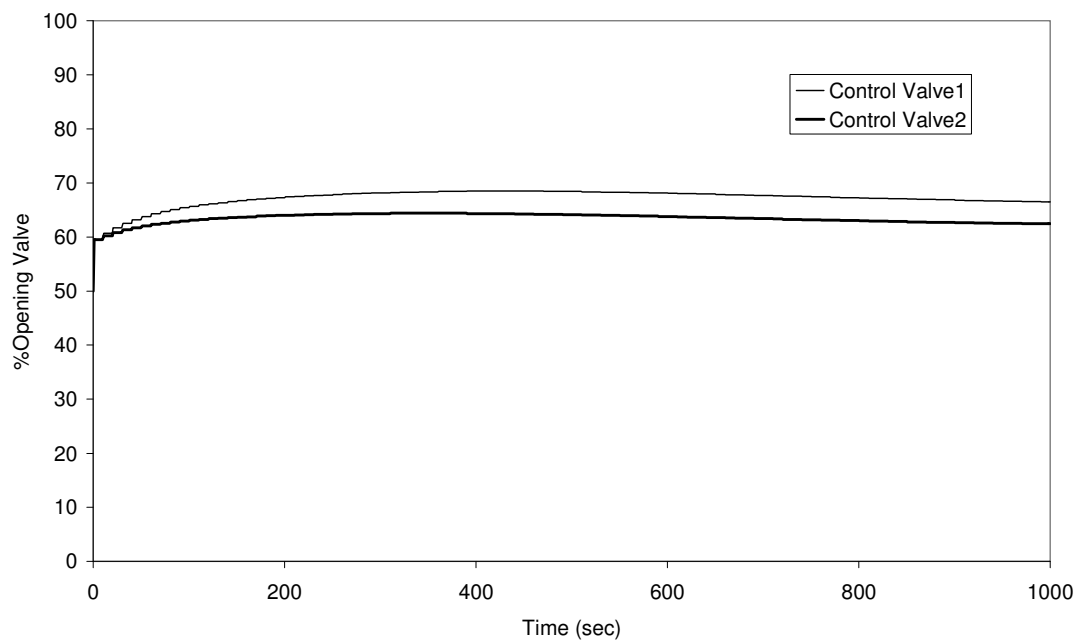
รูปที่ ก-57 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 2 กับถังที่ 4 กรณีไม่มีเวลาหน่วง
จากตัวควบคุมพีไอดี ($K_c = 1.9$, $T_i = 400$)



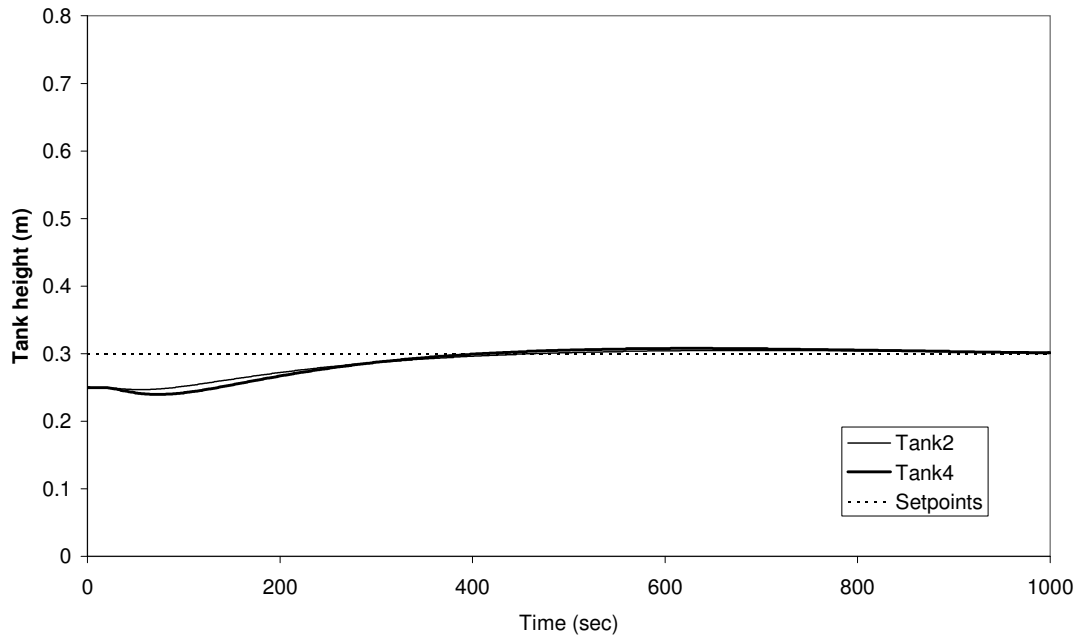
รูปที่ ก-58 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีไม่มีเวลาหน่วง
จากตัวควบคุมพีไอดี ($K_c = 1.9$, $T_i = 400$)



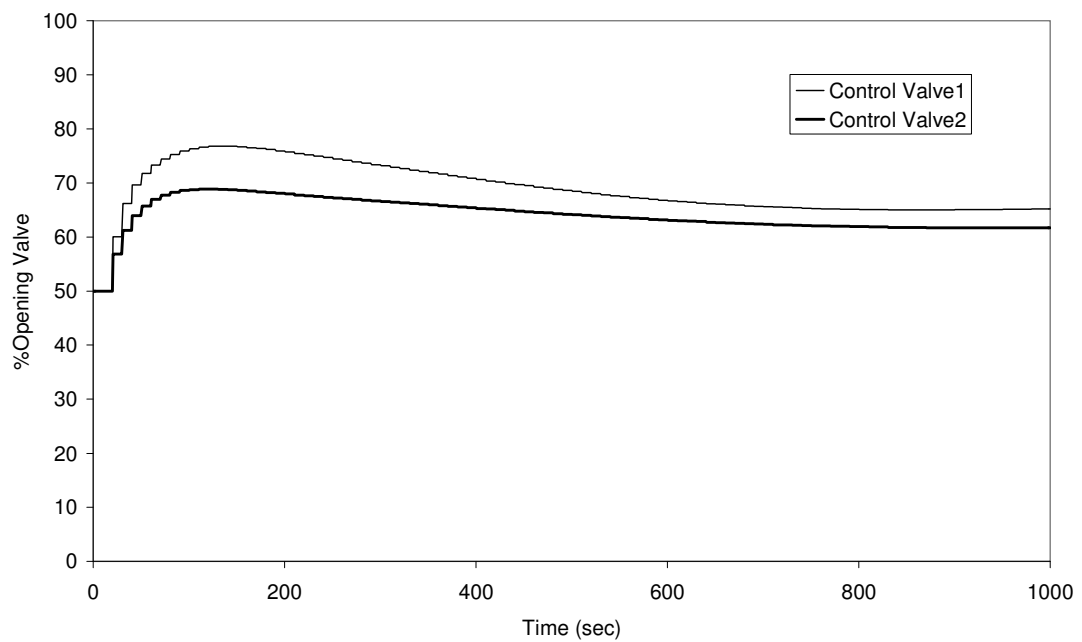
รูปที่ ก-59 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 2 กับถังที่ 4 กรณีไม่มีเวลาหน่วง
จากตัวควบคุมพีไอดี ($K_c = 1.9$, $T_i = 200$)



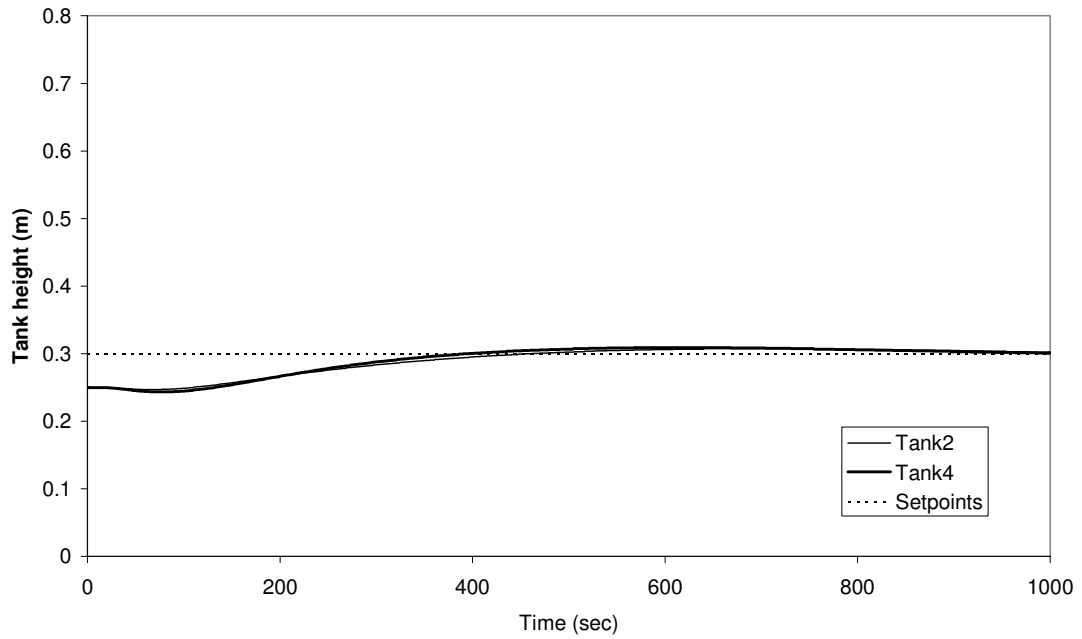
รูปที่ ก-60 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีไม่มีเวลาหน่วง
จากตัวควบคุมพีไอดี ($K_c = 1.9$, $T_i = 200$)



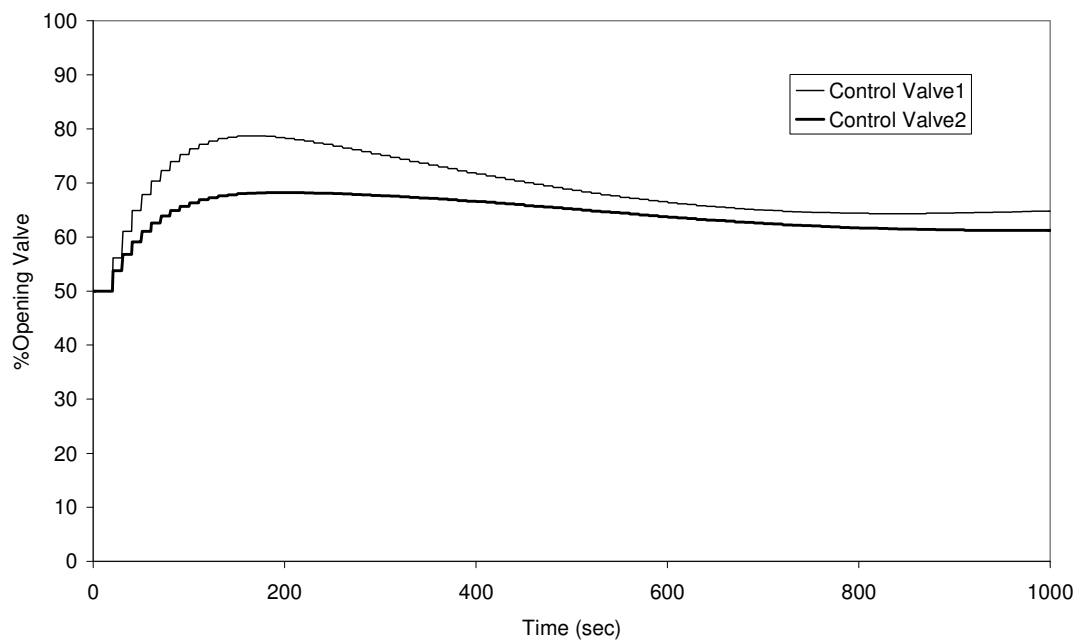
รูปที่ ก-61 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 2 กับถังที่ 4 กรณีมีเวลาหน่วง 20 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 2$, $Q = 1$, $R = 1$)



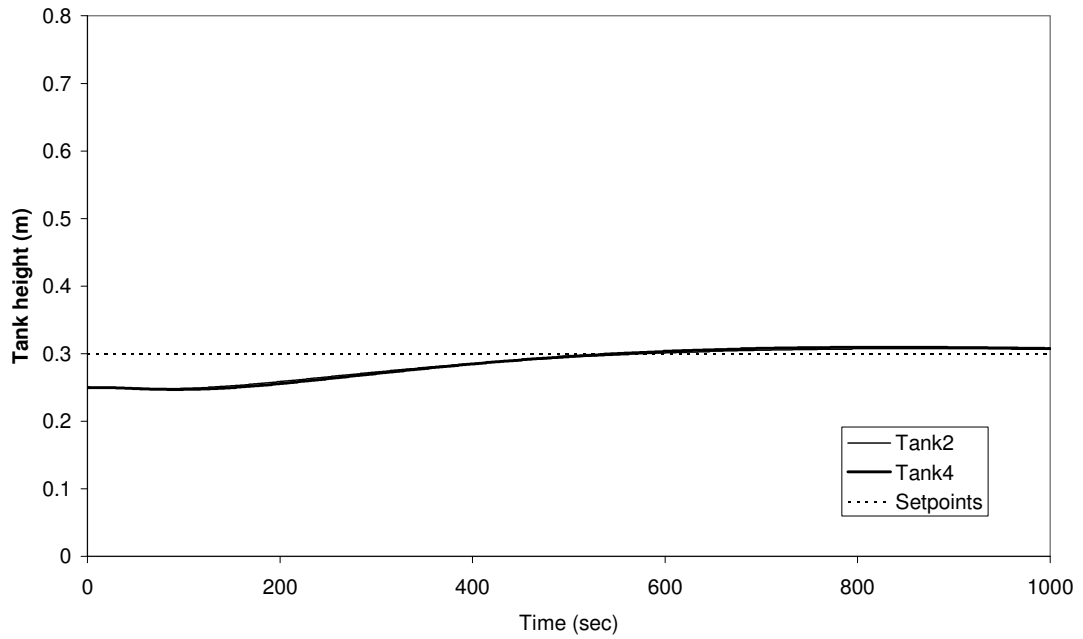
รูปที่ ก-62 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 20 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 2$, $Q = 1$, $R = 1$)



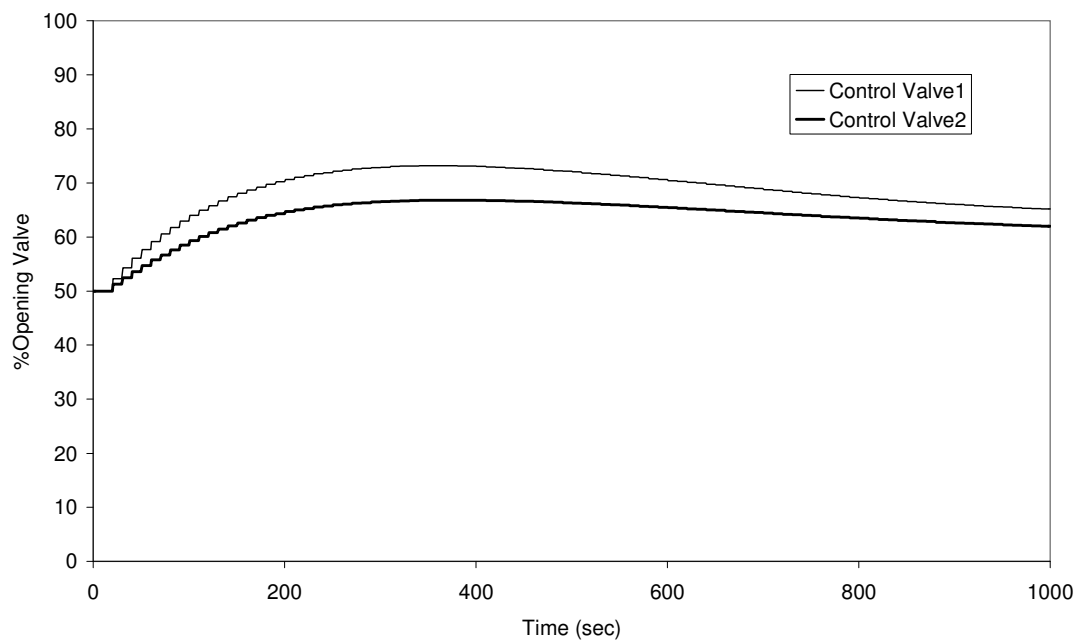
รูปที่ ก-63 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 2 กับถังที่ 4 กรณีมีเวลาหน่วง 20 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 6$, $Q = 1$, $R = 1$)



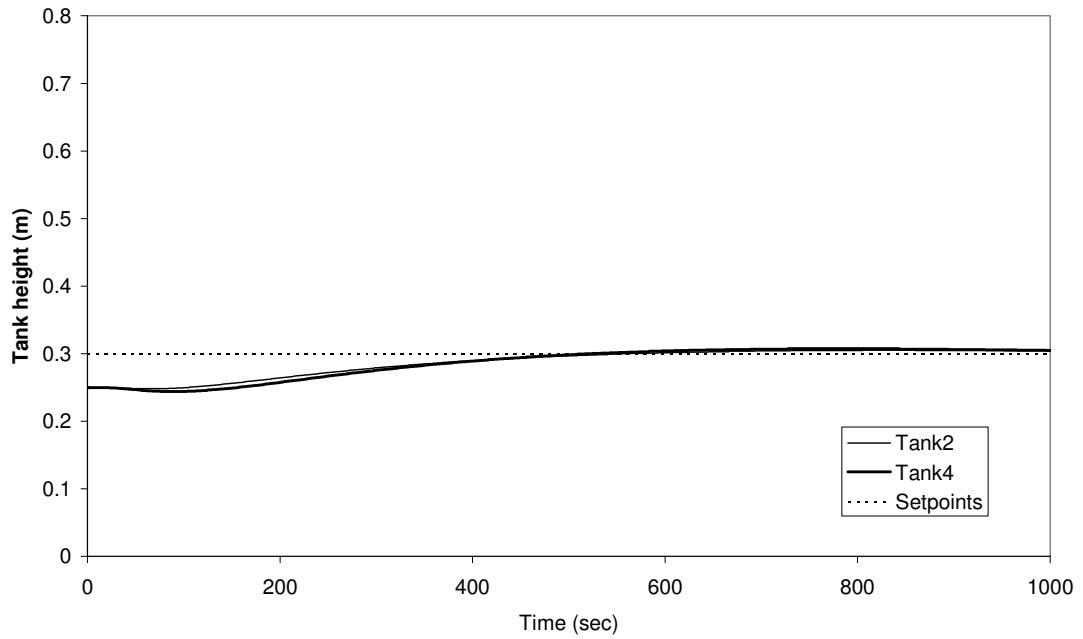
รูปที่ ก-64 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 20 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 6$, $Q = 1$, $R = 1$)



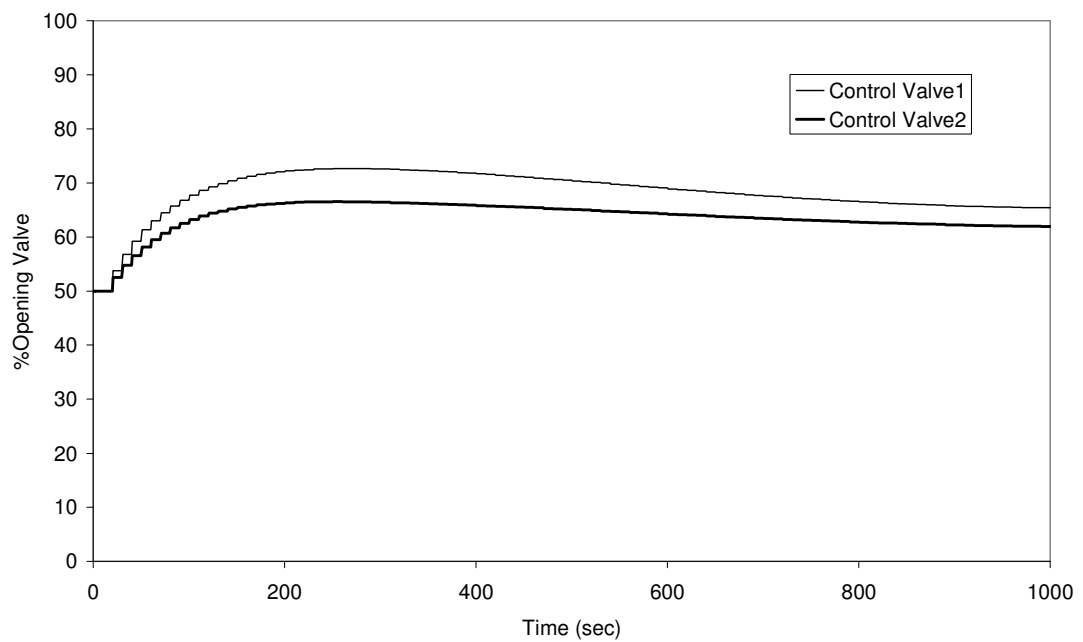
รูปที่ ก-65 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 2 กับถังที่ 4 กรณีมีเวลาหน่วง 20 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 2$, $Q = 0.3$, $R = 1$)



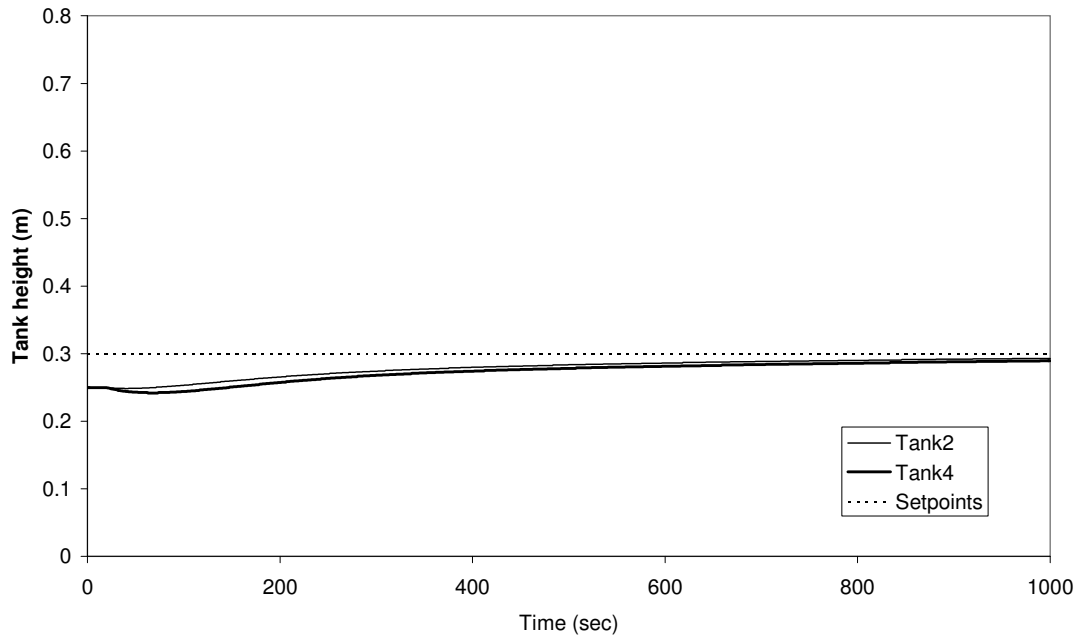
รูปที่ ก-66 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 20 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 2$, $Q = 0.3$, $R = 1$)



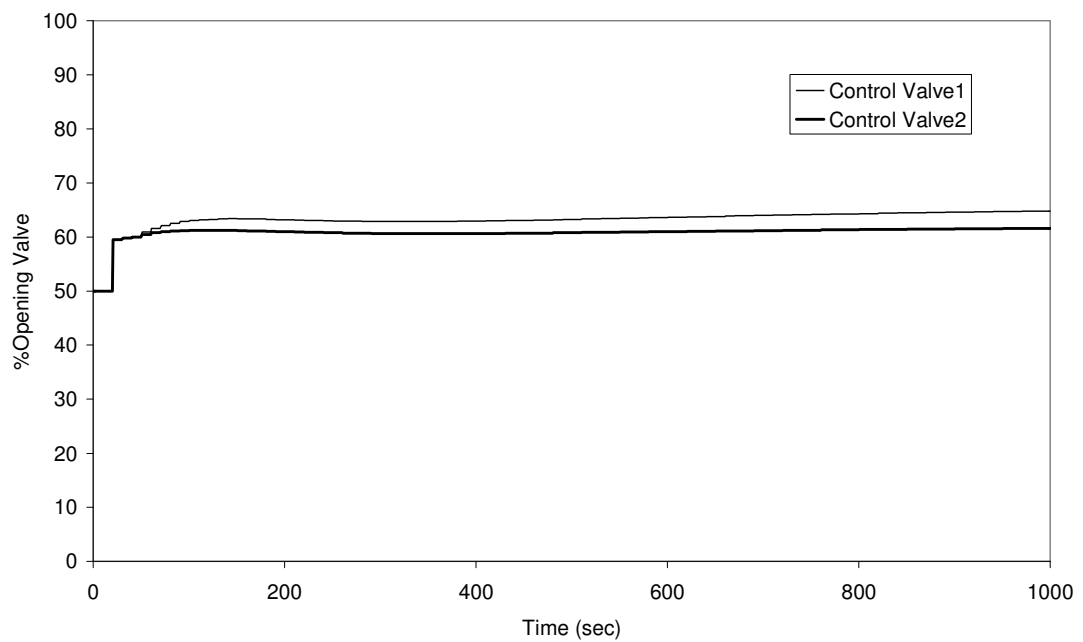
รูปที่ ก-67 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 2 กับถังที่ 4 กรณีมีเวลาหน่วง 20 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 60$, $M = 2$, $Q = 0.3$, $R = 1$)



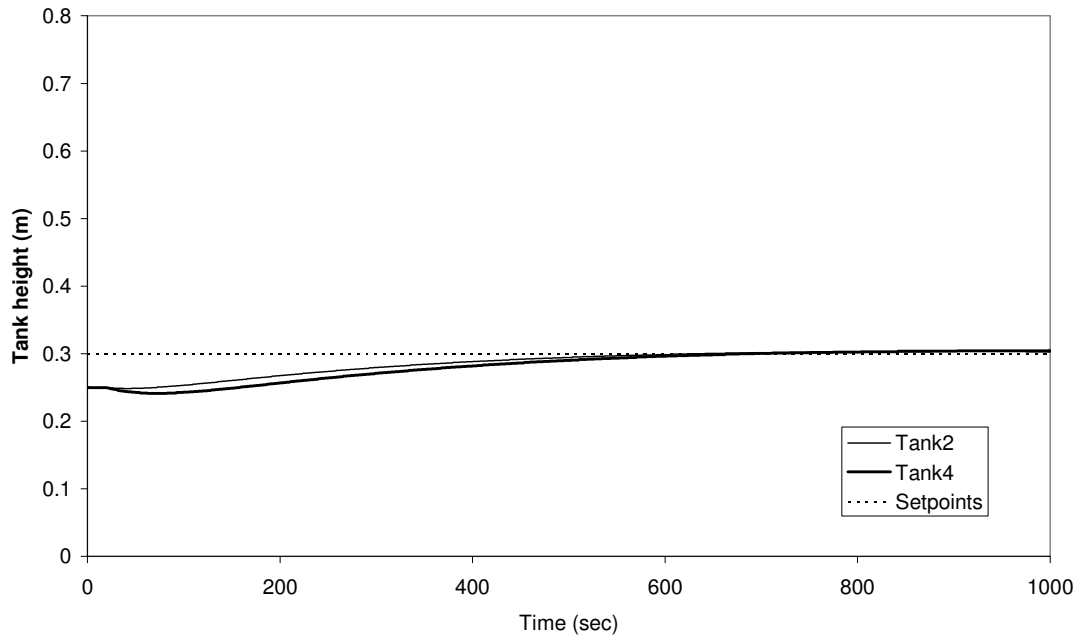
รูปที่ ก-68 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 20 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 60$, $M = 2$, $Q = 0.3$, $R = 1$)



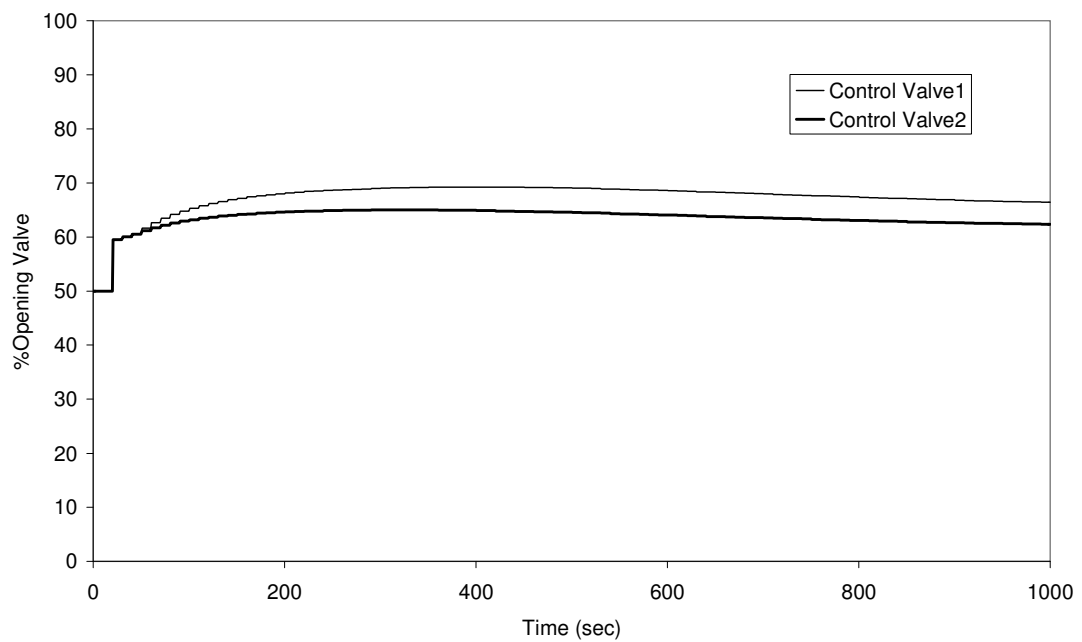
รูปที่ ก-69 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 2 กับถังที่ 4 กรณีมีเวลาหน่วง 20 วินาที
จากตัวควบคุมพีไอดี ($K_c = 1.9$, $T_i = 400$)



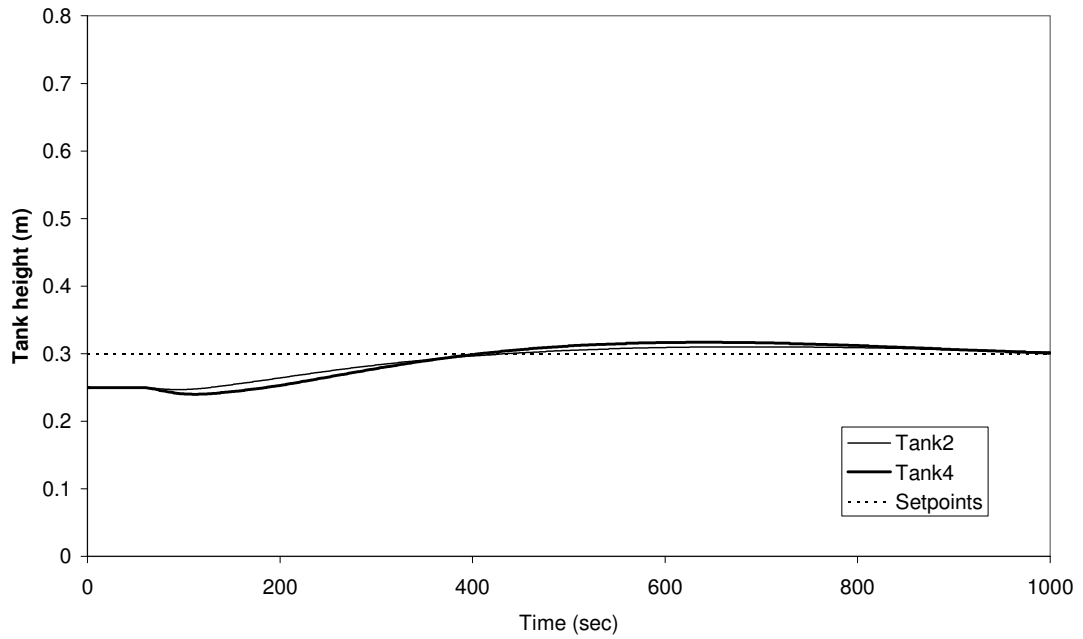
รูปที่ ก-70 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 20 วินาที
จากตัวควบคุมพีไอดี ($K_c = 1.9$, $T_i = 400$)



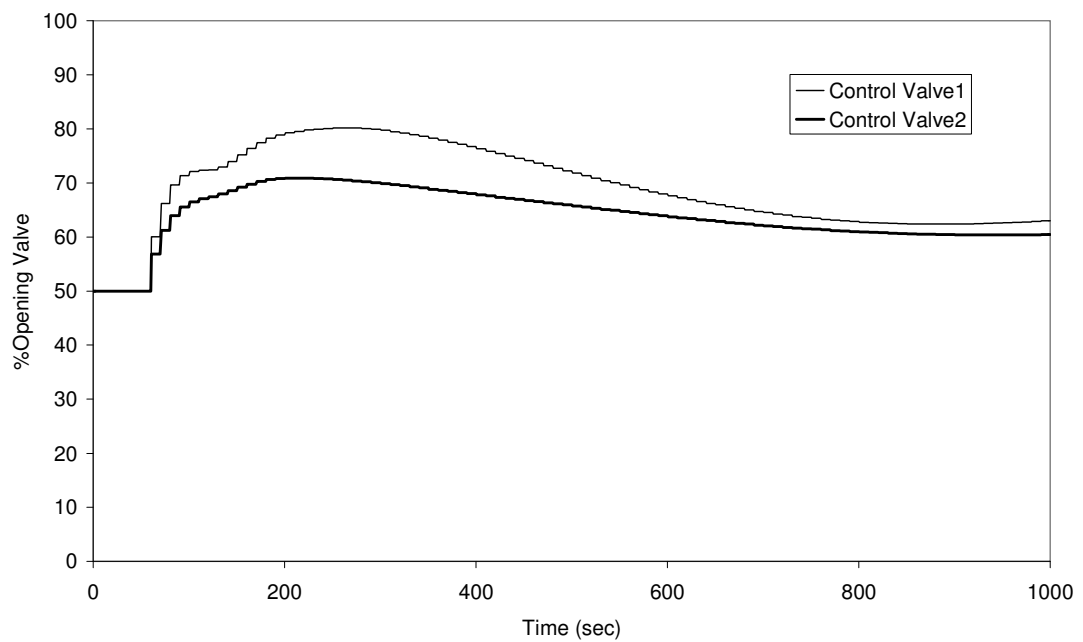
รูปที่ ก-71 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 2 กับถังที่ 4 กรณีมีเวลาหน่วง 20 วินาที
จากตัวควบคุมพีไอดี ($K_c = 1.9$, $T_i = 200$)



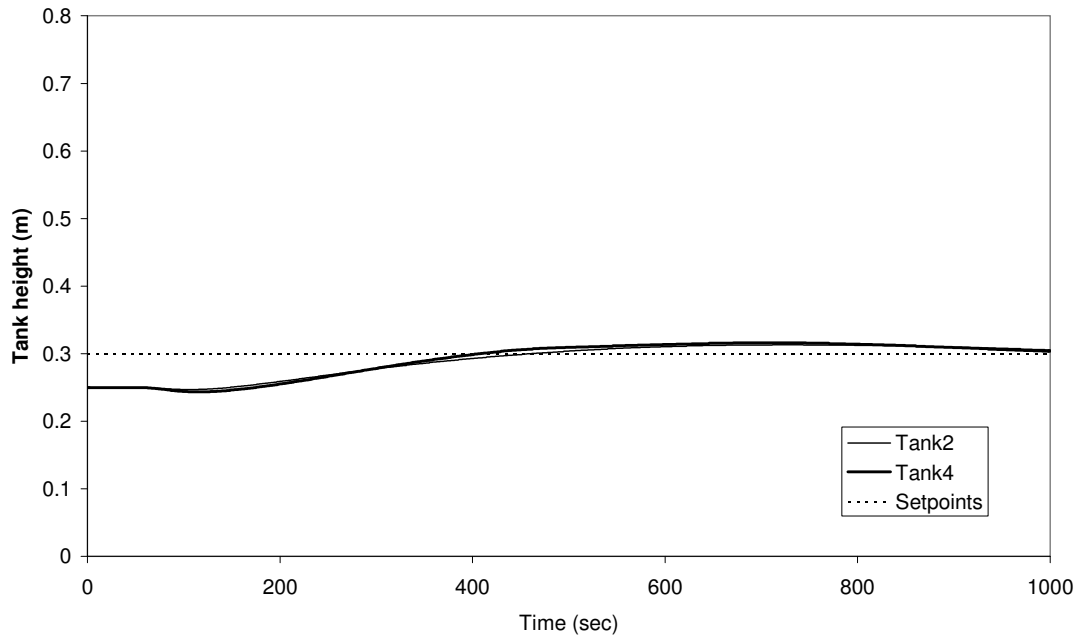
รูปที่ ก-72 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 20 วินาที
จากตัวควบคุมพีไอดี ($K_c = 1.9$, $T_i = 200$)



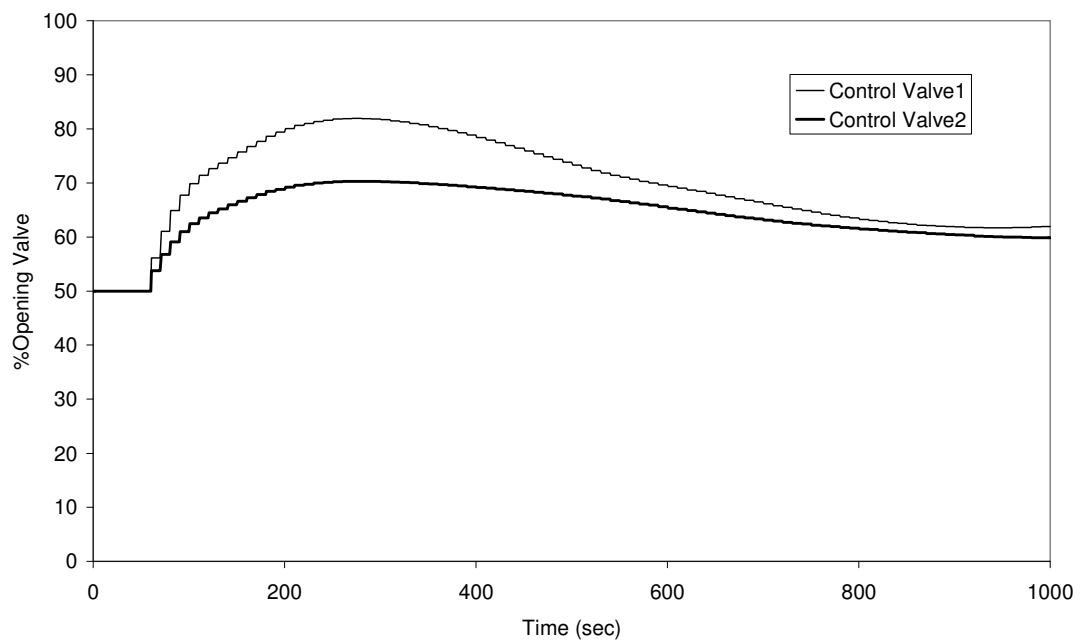
รูปที่ ก-73 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 2 กับถังที่ 4 กรณีมีเวลาหน่วง 60 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 2$, $Q = 1$, $R = 1$)



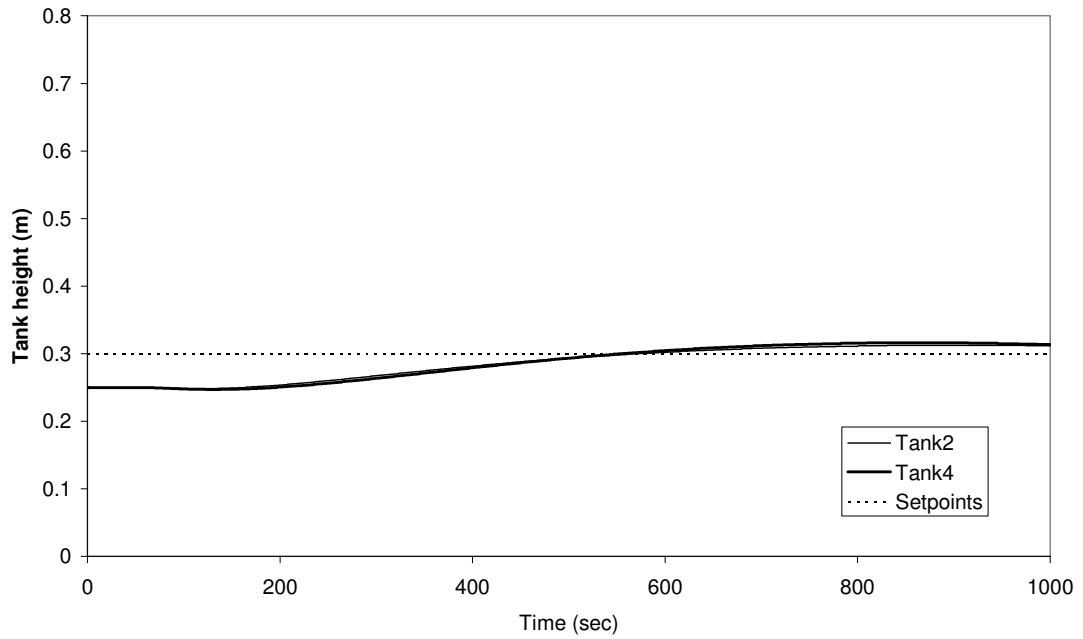
รูปที่ ก-74 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 60 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 2$, $Q = 1$, $R = 1$)



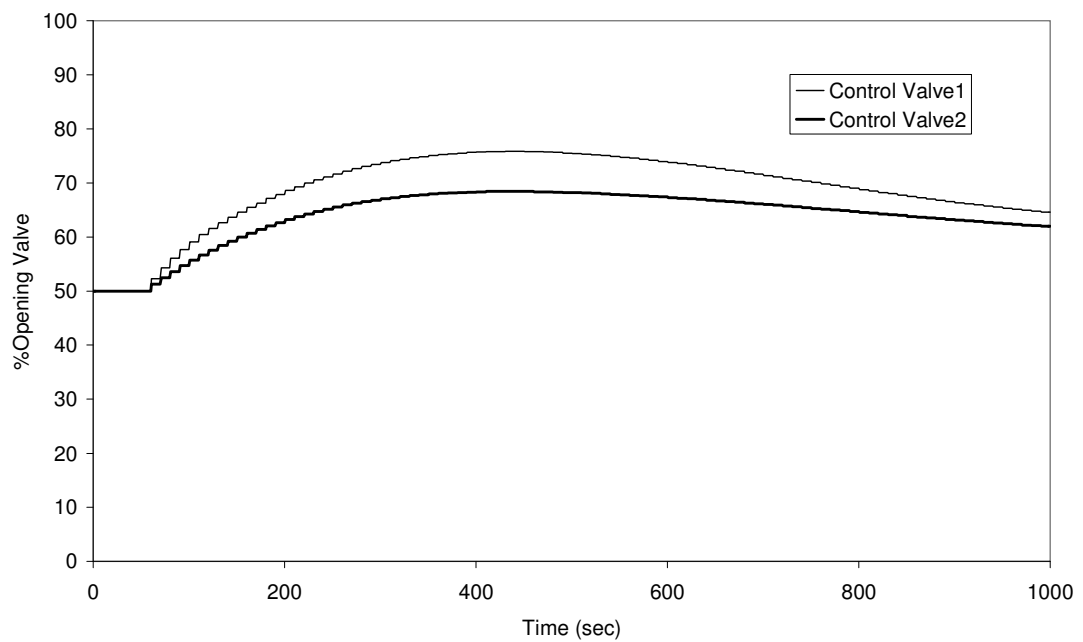
รูปที่ ก-75 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 2 กับถังที่ 4 กรณีมีเวลาหน่วง 60 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 6$, $Q = 1$, $R = 1$)



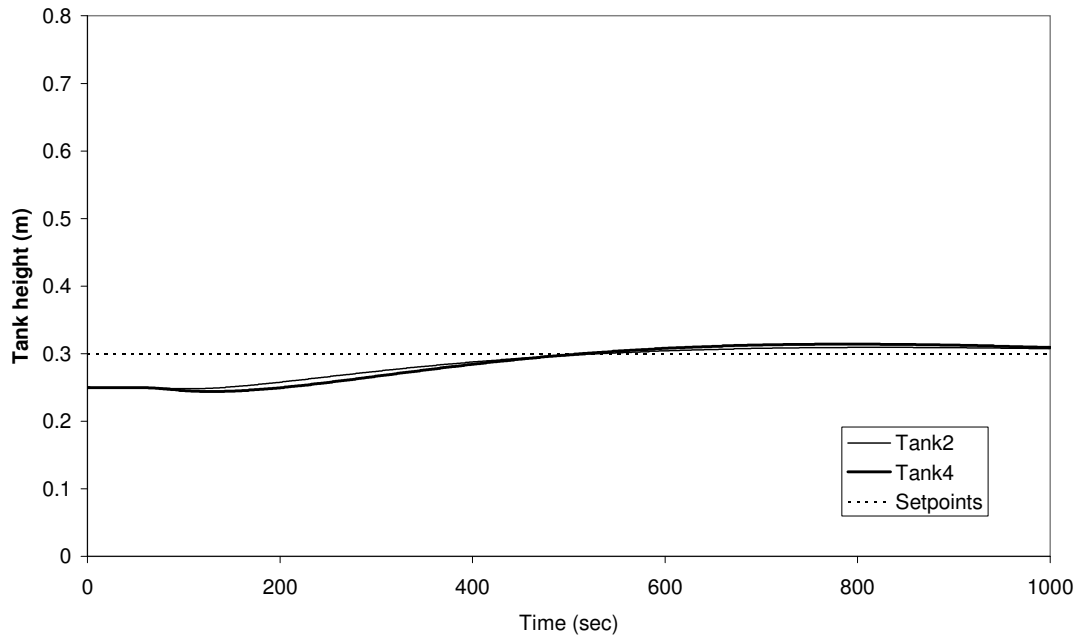
รูปที่ ก-76 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 60 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 6$, $Q = 1$, $R = 1$)



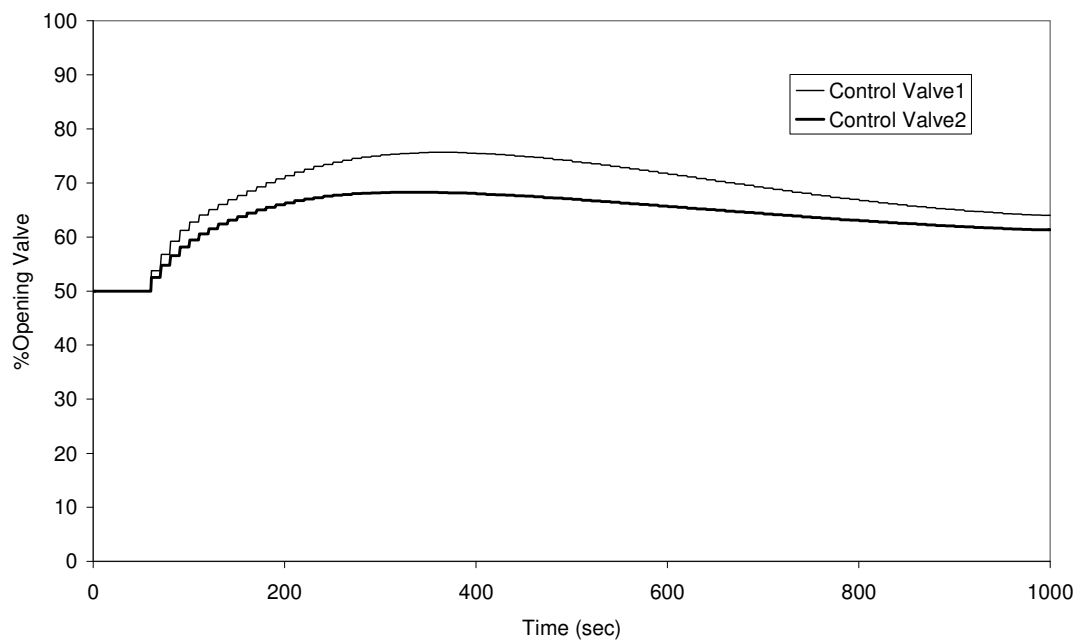
รูปที่ ก-77 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 2 กับถังที่ 4 กรณีมีเวลาหน่วง 60 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 2$, $Q = 0.3$, $R = 1$)



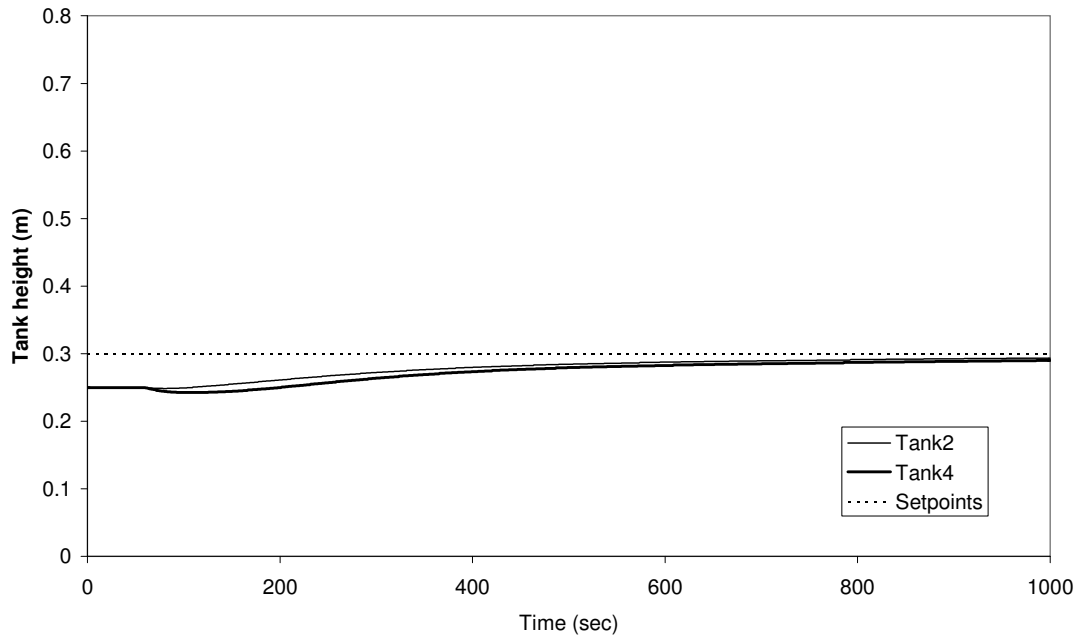
รูปที่ ก-78 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 60 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 2$, $Q = 0.3$, $R = 1$)



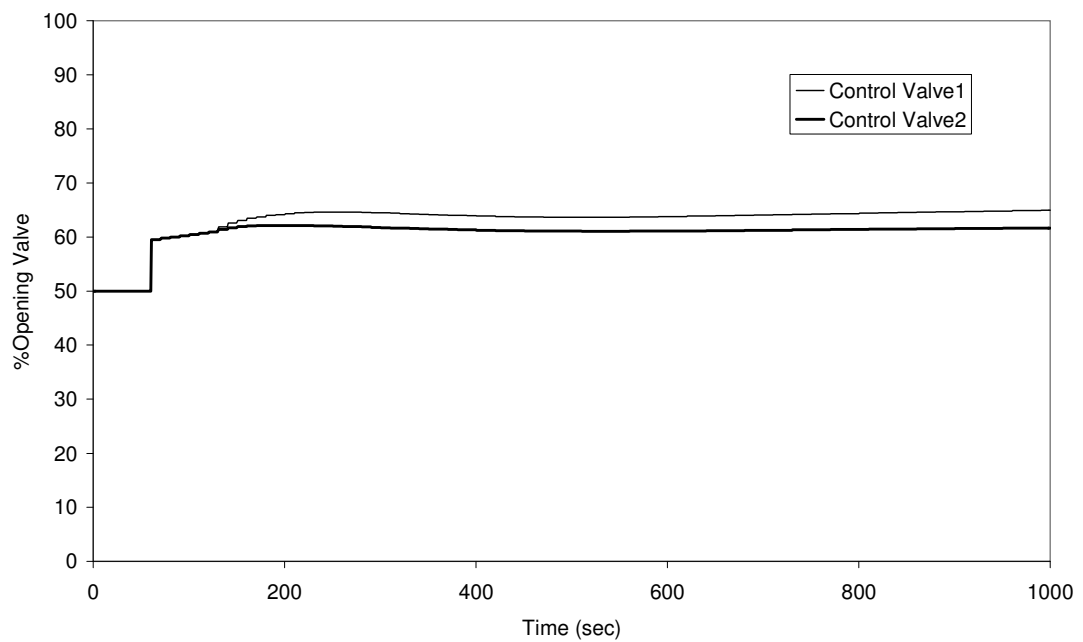
รูปที่ 8-79 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 2 กับถังที่ 4 กรณีมีเวลาหน่วง 60 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 60$, $M = 2$, $Q = 0.3$, $R = 1$)



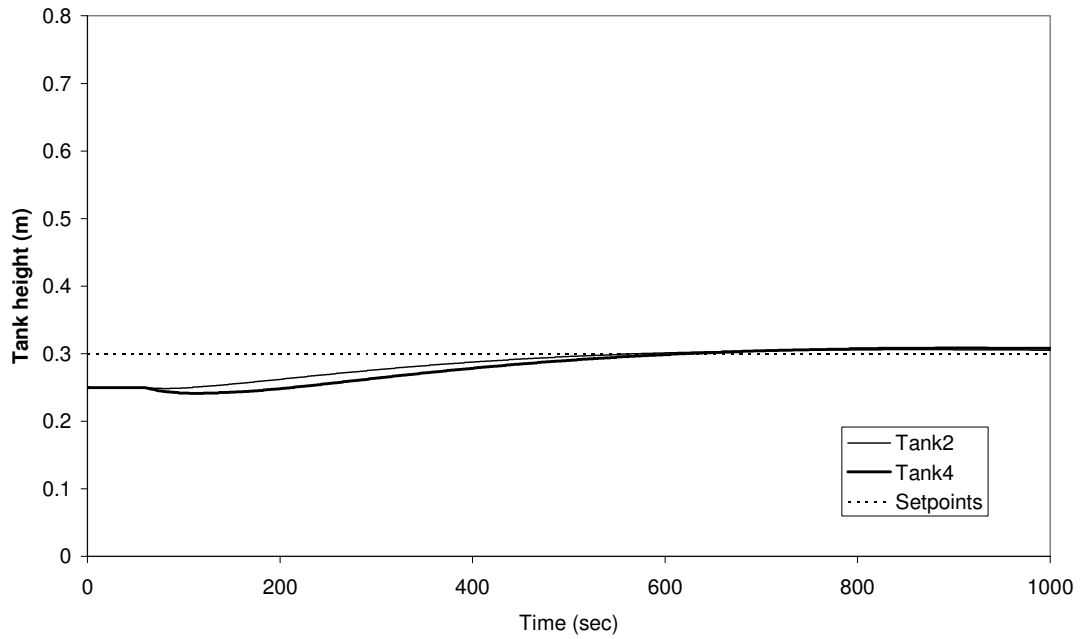
รูปที่ 8-80 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 60 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 60$, $M = 2$, $Q = 0.3$, $R = 1$)



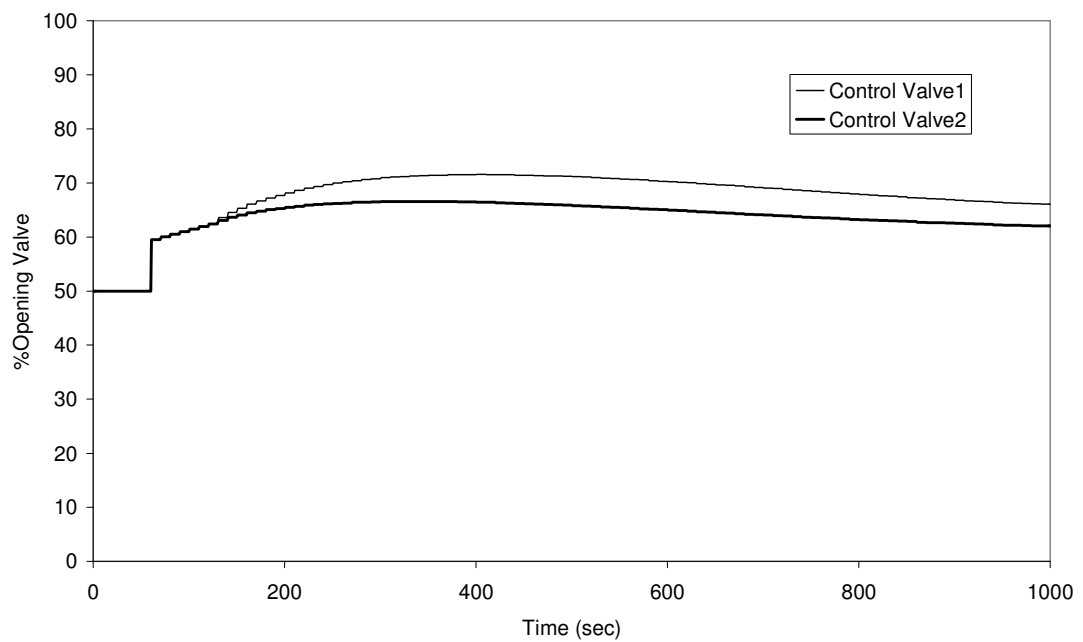
รูปที่ ก-81 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 2 กับถังที่ 4 กรณีมีเวลาหน่วง 60 วินาที
จากตัวควบคุมพีไอดี ($K_c = 1.9$, $T_i = 400$)



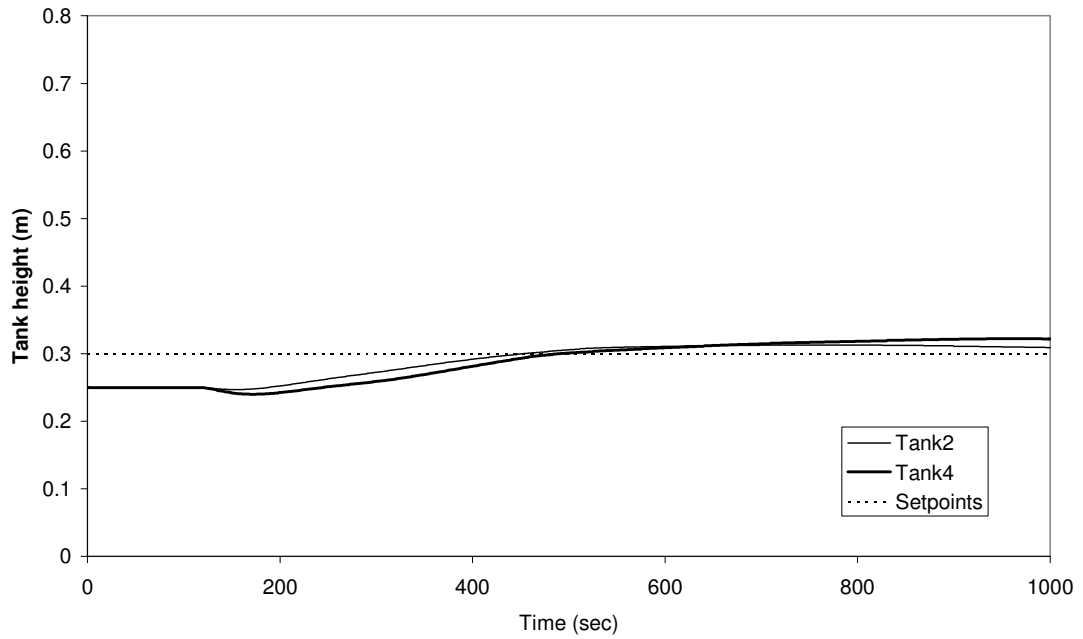
รูปที่ ก-82 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 60 วินาที
จากตัวควบคุมพีไอดี ($K_c = 1.9$, $T_i = 400$)



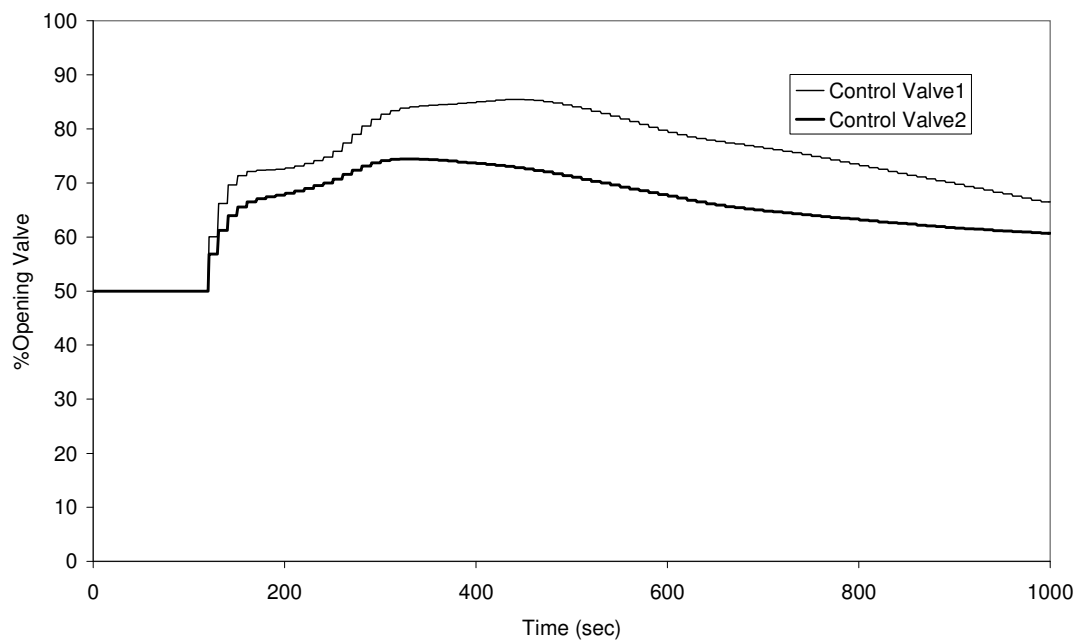
รูปที่ ก-83 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 2 กับถังที่ 4 กรณีมีเวลาหน่วง 60 วินาที
จากตัวควบคุมพีไอดี ($K_c = 1.9$, $T_i = 200$)



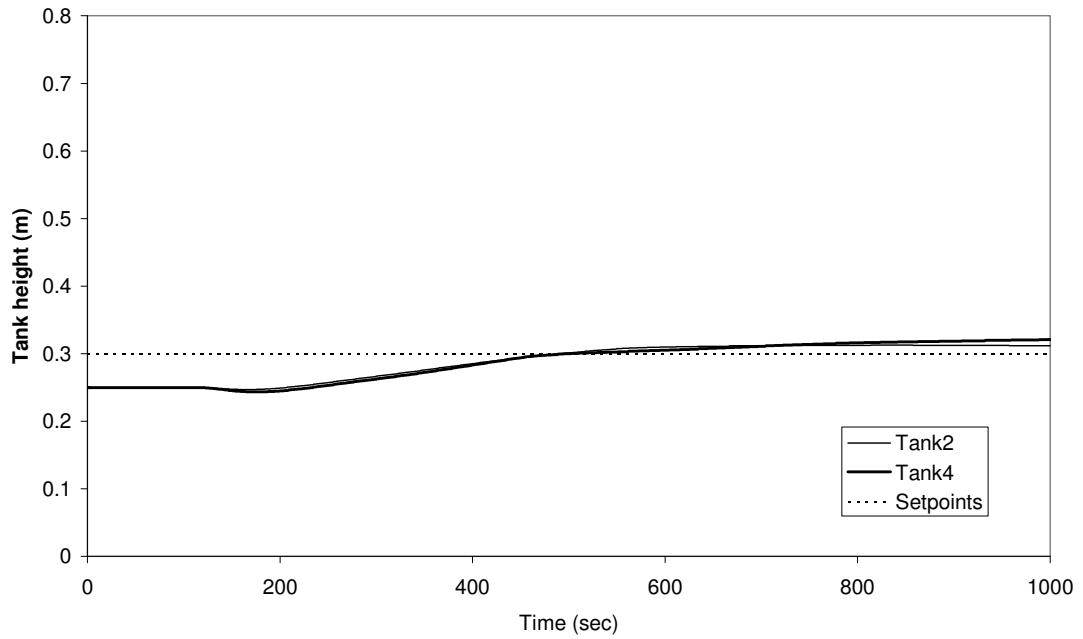
รูปที่ ก-84 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 60 วินาที
จากตัวควบคุมพีไอดี ($K_c = 1.9$, $T_i = 200$)



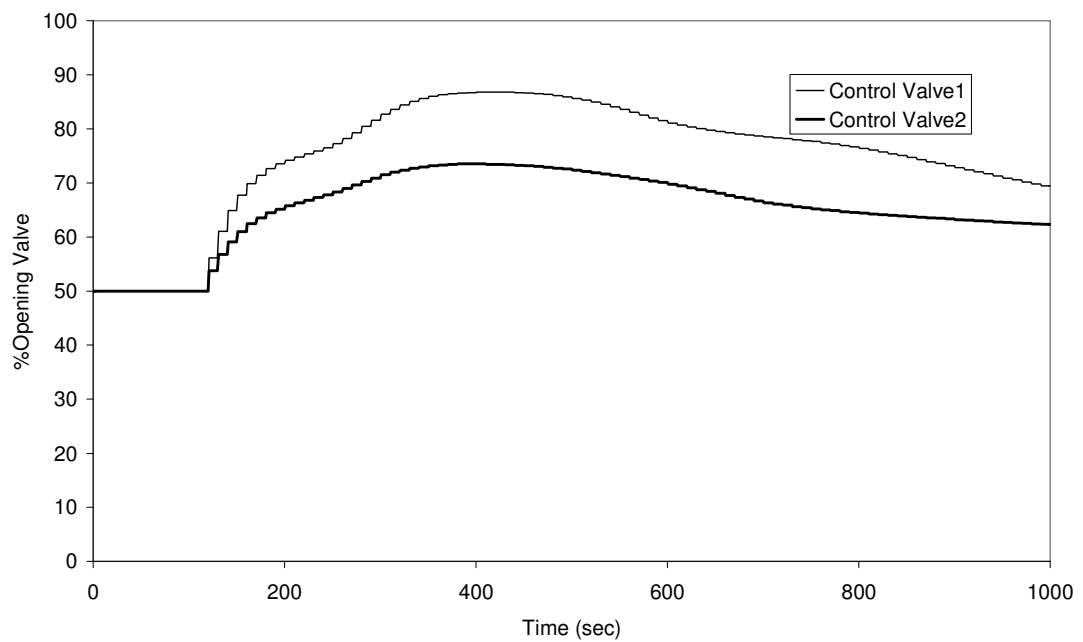
รูปที่ ก-85 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 2 กับถังที่ 4 กรณีมีเวลาหน่วง 120 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 2$, $Q = 1$, $R = 1$)



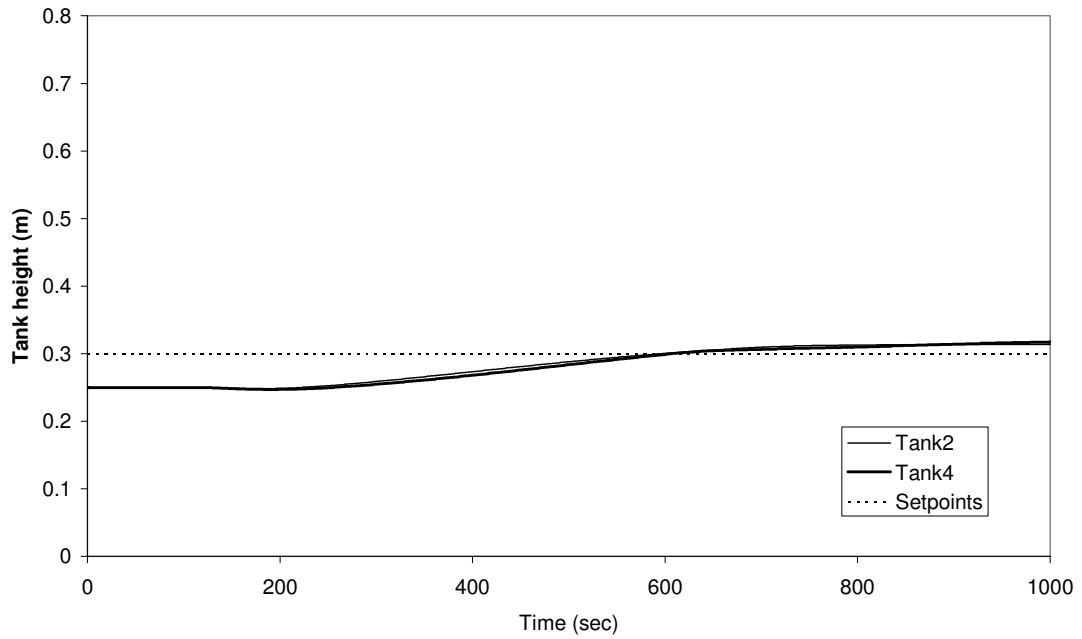
รูปที่ ก-86 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 120 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 2$, $Q = 1$, $R = 1$)



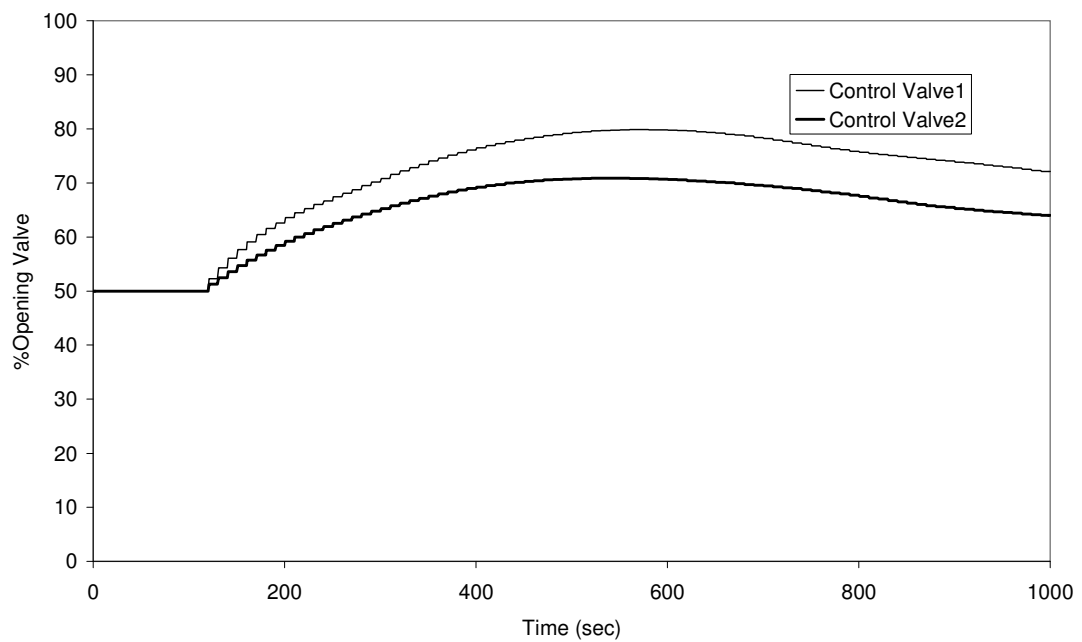
รูปที่ ก-87 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 2 กับถังที่ 4 กรณีมีเวลาหน่วง 120 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 6$, $Q = 1$, $R = 1$)



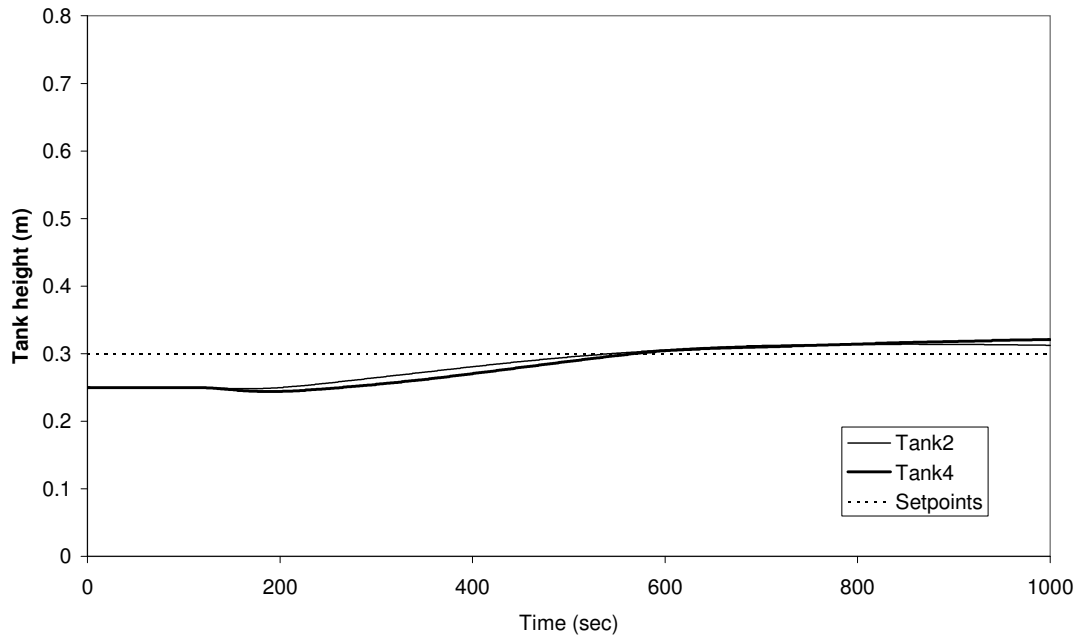
รูปที่ ก-88 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 120 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 6$, $Q = 1$, $R = 1$)



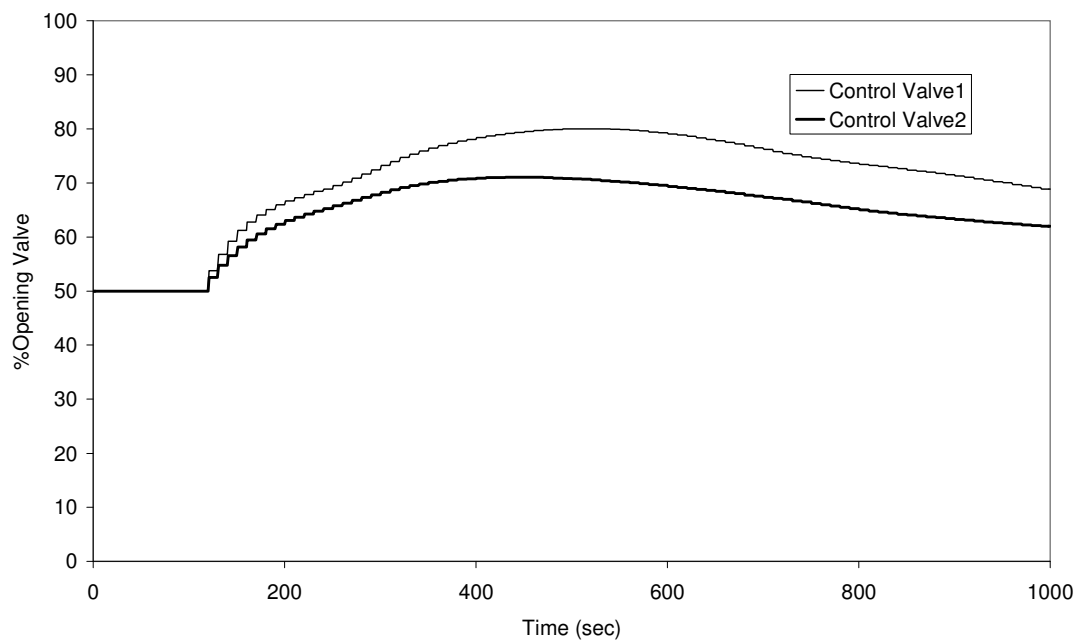
รูปที่ ก-89 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 2 กับถังที่ 4 กรณีมีเวลาหน่วง 120 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 2$, $Q = 0.3$, $R = 1$)



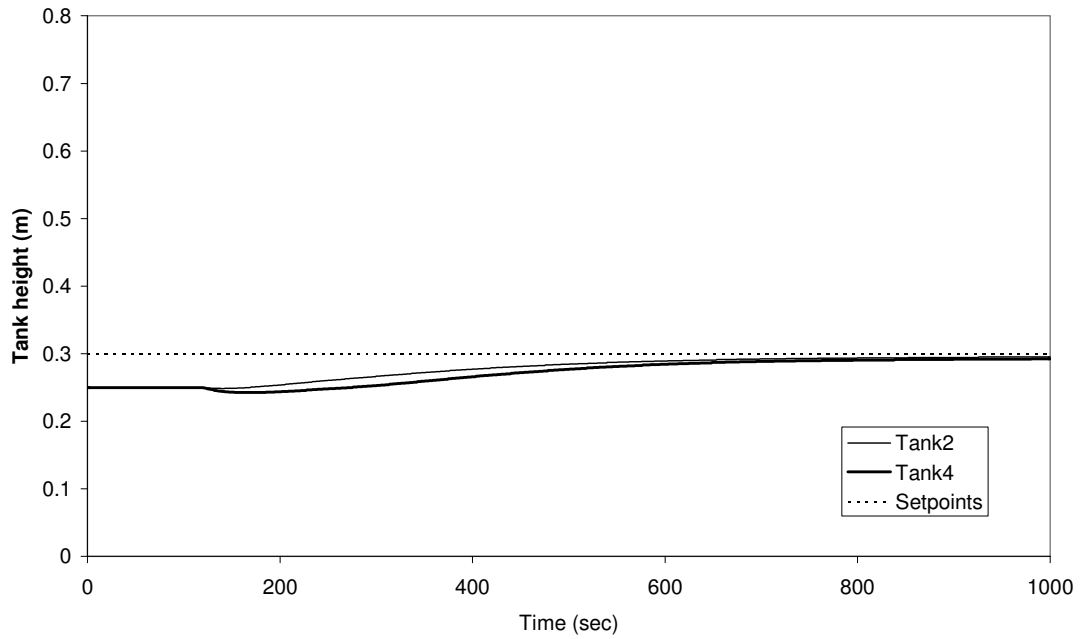
รูปที่ ก-90 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 120 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 40$, $M = 2$, $Q = 0.3$, $R = 1$)



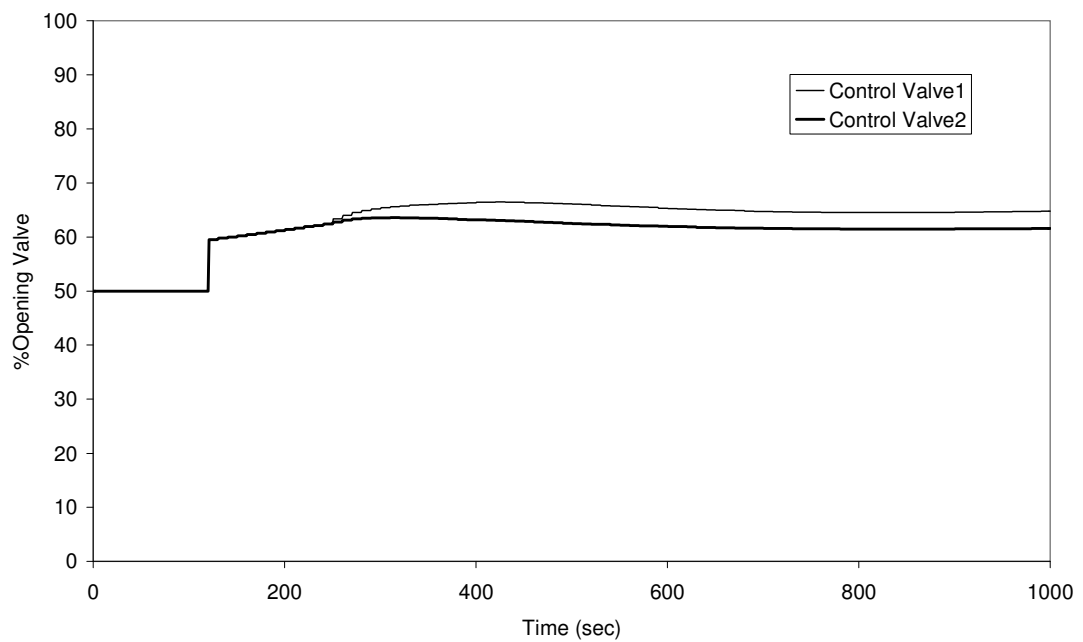
รูปที่ ก-91 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 2 กับถังที่ 4 กรณีมีเวลาหน่วง 120 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 60$, $M = 2$, $Q = 0.3$, $R = 1$)



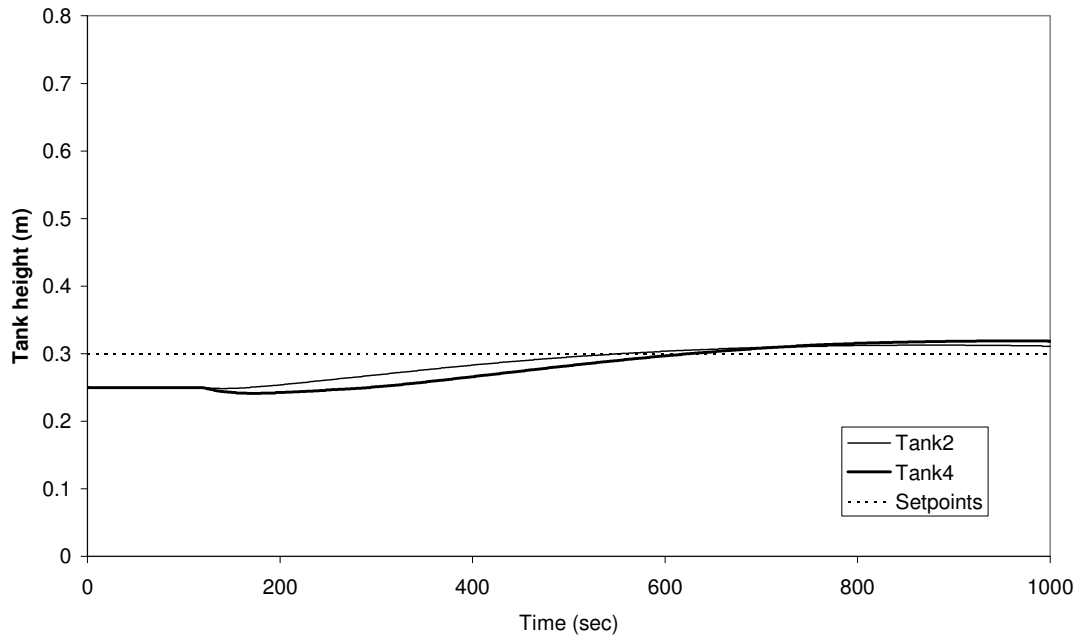
รูปที่ ก-92 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 120 วินาที จากตัวควบคุมซึ่งใช้แบบจำลองในการทำนาย ($P = 60$, $M = 2$, $Q = 0.3$, $R = 1$)



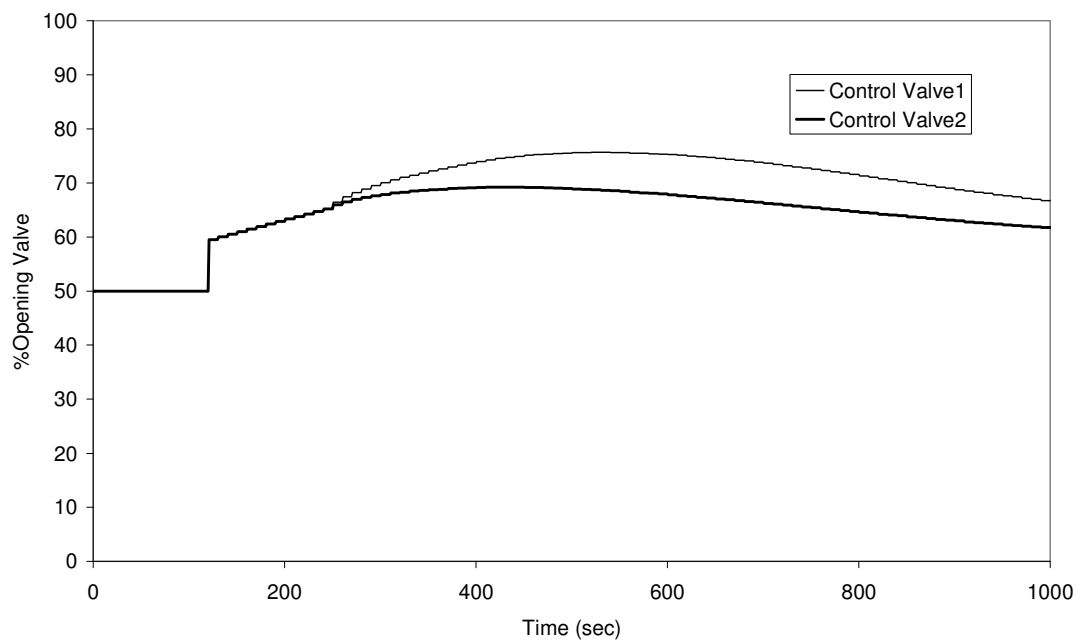
รูปที่ ก-93 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 2 กับถังที่ 4 กรณีมีเวลาหน่วง 120 วินาที
จากตัวควบคุมพีไอดี ($K_c = 1.9$, $T_i = 400$)



รูปที่ ก-94 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 120 วินาที
จากตัวควบคุมพีไอดี ($K_c = 1.9$, $T_i = 400$)



รูปที่ ก-95 ค่าความสูงของระดับน้ำในถังที่ 2 กับถังที่ 4 กรณีมีเวลาหน่วง 120 วินาที
จากตัวควบคุมพีไอดี ($K_c = 1.9$, $T_i = 200$)



รูปที่ ก-96 ค่าปริมาณการเปิด control valve ที่ 1 และ 2 กรณีมีเวลาหน่วง 120 วินาที
จากตัวควบคุมพีไอดี ($K_c = 1.9$, $T_i = 200$)

ภาคผนวก ข

การเขียนคำสั่งโปรแกรม Matlab

```

ข.1 คำสั่งการควบคุมตัวควบคุมแบบพีไอดี
%% Open Signal
% CV
format bank
ai=analoginput('nidaq','Dev1');
addchannel(ai,0:3);
% MV
ao=analogoutput('nidaq','Dev1');
addchannel(ao,0:1);

%% Set Parameter
sp=[50 50];           %metre
Kc=[0.45 0.45];      %From ciancone
Ti=[200 200];
final = 1000;        %final time (step)
delay = 0;           %delayed time (sec)
ct = 10;             %controlling time (sec/time)
cl = ceil(final/ct); %controlling amuount (time)
st = 1;              %sampling time (sec/time)
sl = ceil(final/st); %sampling amuount (time)
c= [16.51 -28.61
    19.38 -23.01
    20.3  -18.25
    23.29 2.734];

%% Set blank variables
%i = zeros(1,1);     %counter variable
%j = zeros(1,1);     %counter variable

```

```

k = 1;          %counter variable
l = 0;          %counter variable
m = 1;          %counter variable
n = 1;          %counter variable
psp = zeros(0,1);
p = zeros(0,4); %actual tank height matrix
q = zeros(0,2); %calculated MV matrix
r = zeros(0,2); %actioned MV matrix
s = zeros(0,2); %actual actioned MV matrix {with process delay}
t = zeros(0,1); %time domain

%% %Store variables at t=0
sum = zeros(1,2);
e = zeros(1,2);
uss =[50 50];
MVss=(uss*4/100)+1
putsample(ao,MVss);
disp('Waiting for a while. ');
pause(1);
for l=1:5
    temp = getsample(ai);
    height(l,1) = c(1,1)*temp(1)+c(1,2);
    height(l,2) = c(2,1)*temp(2)+c(2,2);
    height(l,3) = c(3,1)*temp(3)+c(3,2);
    height(l,4) = c(4,1)*temp(4)+c(4,2);
end
temp=height(4,:)
height=median(height)
psp(1,1)=sp(1);
p(1,:)=height;
q(1,:)=uss;

```

```

r(1,:)=uss;
s(1,:)=uss;
t(1)=0 ;
%% Run lab
for k = 1:final
    k
    %#Measure Tank height
    for l=1:5
        temp = getsample(ai);
        height(l,1) = c(1,1)*temp(1)+c(1,2);
        height(l,2) = c(2,1)*temp(2)+c(2,2);
        height(l,3) = c(3,1)*temp(3)+c(3,2);
        height(l,4) = c(4,1)*temp(4)+c(4,2);
    end
    height=median(height)
    for m=1:4
        if abs(p(k,m)-height(1,m))>1
            for l=1:5
                temp = getsample(ai);
                height(l,m) = c(m,1)*temp(m)+c(m,2);
            end
            height(1,m)=median(height(:,m))
            height=height(1,:);
        end
    end
    end
    p(k+1,:)=height;                %Store CV
    %#Measure Tank height {end}
    psp(k+1,1)=sp(1);

    %# Calculated MV
    e = [sp(1)-height(1) sp(2)-height(3)];    %control tank1 and tank3

```

```

sum = sum + e;
u(1)=uss(1)+ Kc(1)*e(2) + sum(2)*Kc(1)/Ti(1); %ctrl valve1 effect for tank3
u(2)=uss(2)+ Kc(2)*e(1) + sum(1)*Kc(2)/Ti(2); %ctrl valve2 effect for tank1
for m=1:2
    if (u(m)>100)
        u(m)=100;
    elseif (u(m)<0)
        u(m)=0;
    end
end
q(k+1,:)=u; %Store calculated MV
if rem(k-1,ct)<0.02
    r(k+1,:)=u; %Log actioned MV
else r(k+1,:)=r(k,:); %Log actioned MV
end
d = k-delay; %Cal Delayed time
if (d<0)
    d=0;
else ;
end
u=r(d+1,:); %Get MV
s(k+1,:)=r(d+1,:); %Log actual actioned MV
if rem(d-1,ct)<0.02
    MVss=(u*4/100)+1
    putsample(ao,MVss); %Actioned MV
else
end
if height(1)>70
    MV(2)=1;
    putsample(ao,MV);
    pause(100);

```

```

end
if height(3)>70
    MV(1)=1;
    putsample(ao,MV);
    pause(100);
end
t(k+1,1)=k;
subplot(2,1,1);
plot(t,p,t,psp)
legend('Tank1','Tank2','Tank3','Tank4','sp',-1)
title('This is the graph plot between tank height against time')
xlabel('Time')
ylabel('Tank height')
subplot(2,1,2);
plot(t,r)
legend('MV1','MV2',-1)
title('This is the graph plot between %opening valve against time')
xlabel('Time')
ylabel('%Opening valve')
pause(1);
end
save PI_1&3
MVss=[3 3];
putsample(ao,MVss);

ข.2 คำสั่งการควบคุมตัวควบคุมที่ใช้แบบจำลองในการทำนาย
%% Open Signal
% CV
format bank
ai=analoginput('nidaq','Dev1');
addchannel(ai,0:3);

```

```

% MV
ao=analogoutput('nidaq','Dev1');
addchannel(ao,0:1);

%% Set Parameter
% Get plant, internal, and reference models in state-space form.
A= [-0.00466520  0      0      0;
     0.00466520 -0.03079546  0      0;
     0      0      -0.00528390  0;
     0      0      0.00528390 -0.02816094];
B = [ 0      0.01323009;
     -0.00179263  0;
     0.01042381  0;
     0      -0.00434592];

C = [1 0 0 0; 0 0 1 0];
D = [0 0; 0 0];
% Prevent overflow
Tank = [1 3];
Valve = [2 1];
p = 40; %controller parameter
blocks = 2; %M = ...; no need because M = blocks
T = 10; %sampling time

%weighting
ywt = [1 1.5];
uwt = [1 1];
setpts = [0.50 0.50];
ulim = [0 0 1 1 0.1 0.1];
ylim = [0 0 0.8 0.8];
nargin = 10;

```



```

%% Check MPC argument

%Continuous to Discrete state space
[phi,gam] = c2dmp(A,B,T);
minfo = [T,4,2,0,0,2,0];

%minfo(1) = dt, the sampling period.
% (2) = n, the system order (dimension of "a").
% (3) = nu, the number of manipulated inputs.
% (4) = nd, the number of measured disturbances.
% (5) = nw, the number of unmeasured disturbances.
% (6) = nym, the number of measured outputs.
% (7) = nyu, the number of unmeasured outputs.

%From: scmpc.m or scmpcr.m
imod = ss2mod(phi,gam,C,D,minfo);
[phii,gami,ci,di,minfoi] = mod2ss(imod);
ni = minfoi(2);
nui = minfoi(3);
nvi = minfoi(4);
mi = nui+nvi;
nwi = minfo(5);
nymi= minfoi(6);
nyui= minfoi(7);
nyi = nymi+nyui;

% Check for errors and inconsistencies in the models.

if isempty(p)
    p=1;
elseif p < 1
    error('Specified prediction horizon is less than 1')
end

```

```
if isempty(ywt)
    ywt=ones(1,nyi);
    nywt=1;
else
    [nywt,ncol]=size(ywt);
    if ncol ~= nyi | nywt <= 0
        error('YWT is wrong size')
    end
    if any(any(ywt < 0))
        error('One or more elements of YWT are negative')
    end
end
end
```

```
if isempty(uwt),
    uwt=zeros(1,nui);
    nuwt=1;
else
    [nuwt,ncol]=size(uwt);
    if ncol ~= nui | nuwt <= 0
        error('UWT is wrong size')
    end
    if any(any(uwt < 0))
        error('UWT is negative')
    end
end
end
```

```
if isempty(setpts)
    nset=1;
    setpts=zeros(1,nyi);
else
```

```

[nset,ncol]=size(setpts);
if ncol ~= nyi
    error('Setpoint input matrix has incorrect dimensions')
end
end

if isempty(blocks)
    blocks=ones(1,p);
    nb=p;
else
    [nrow,nb]=size(blocks);
    if nrow ~= 1 | nb < 1 | nb > p
        error('M vector is wrong size')
    end
    if any(blocks < 1)
        error('M contains an element that is < 1')
    end

    if nb == 1
        % This section interprets "blocks" as a number of moves, each
        % of one sampling period duration.

        if blocks > p
            disp('WARNING: M > P. Truncated.')
            nb=p;
        elseif blocks <= 0
            disp('WARNING: M <= 0. Set = 1.')
            nb=1;
        else
            nb=blocks;
        end
    end

```

```

    blocks=[ones(1,nb-1) p-nb+1];

else

% This section interprets "blocks" as a vector of blocking factors.

    sumblocks=sum(blocks);
    if sumblocks > p
        disp('WARNING: sum(M) > P.')
        disp('    Moves will be truncated at P.')
        nb=find(cumsum(blocks) > p);
        nb=nb(1);
        blocks=blocks(1,1:nb);
    elseif sumblocks < p
        nb=nb+1;
        blocks(nb)=p-sumblocks;
        disp('WARNING: sum(M) < P. Will extend to P.')
    end
end

end

end

% Check the constraint specifications. First set up some indices to pick out
% certain columns of the ulim and ylim matrices.

iumin=[1:nui]; % Points to columns of ulim containing umin.
iumax=iumin+nui; % Points to columns of ulim containing umax.
idumax=iumax+nui; % Points to columns of ulim containing delta u max.
iymin=[1:nyi]; % Points to columns of ylim containing ymin.
iymax=iymin+nyi; % Points to columns of ylim containing ymax.

% Now check the values supplied by the user for consistency.

```

```

if nargin > 8
    if isempty(ulim)
        ulim=[-inf*ones(1,nui) inf*ones(1,nui) 1e6*ones(1,nui)];
    else
        [nulim,ncol]=size(ulim);
        if ncol ~= 3*nui | nulim <= 0
            error('ULIM matrix is empty or wrong size.')
        elseif any(any(ulim(:,idumax) < 0))
            error('A constraint on DELTA U was < 0')
        elseif any(any(ulim(:,iumax)-ulim(:,iumin) < 0))
            error('A lower bound on U was greater than its upper bound')
        end
    end
end
else
    ulim=[-inf*ones(1,nui) inf*ones(1,nui) 1e6*ones(1,nui)];
end

```

% When using the DANTZGMP routine for the QP problem, we must have all
% bounds on delta u finite. A bound that is finite but large can cause
% numerical problems. Similarly, it can't be too small.
% The following loop checks for this.

```

ichk=0;
for i=idumax
    ifound=find(ulim(:,i) > 1e6);
    if ~ isempty(ifound)
        ichk=1;
        ulim(ifound,i)=1e6*ones(length(ifound),1);
    end
end
ifound=find(ulim(:,i) < 1e-6);

```

```

if ~ isempty(ifound)
    ichk=1;
    ulim(ifound,i)=1e-6*ones(length(ifound),1);
end
end
if ichk
    disp('One or more constraints on delta_u were > 1e6 or < 1e-6.')
    disp('Modified to prevent numerical problems in QP.')
end

if nargin > 9
    if isempty(ylim)
        ylim=[-inf*ones(1,nyi) inf*ones(1,nyi)];
    else
        [nylim,ncol]=size(ylim);
        if ncol ~= 2*nyi | nylim <= 0
            error('YLIM matrix is wrong size')
        elseif any(any(ylim(:,iymin)-ylim(:,iymin) < 0))
            error('A lower bound on y was greater than its upper bound')
        end
    end
end
else
    ylim=[-inf*ones(1,nyi) inf*ones(1,nyi)];
end

if nargin > 10
    if isempty(Kest)
        Kest=[zeros(ni,nymi)
            eye(nymi)
            zeros(nyui,nymi)];
    else

```

```

    [nrow,ncol]=size(Kest);
    if nrow ~= ni+nyi | ncol ~= nymi
        error('Estimator gain matrix is wrong size')
    end
end
else
    Kest=[zeros(ni,nyyi)
        eye(nyiy)
        zeros(nyui,nyyi)];
end

% ++++ Beginning of controller design calculations. ++++

% The following index vectors are used to pick out certain columns
% or rows in the state-space matrices.

iu=[1:nui];      % columns of gami, gamp, di, dp related to delta u.
iv=[nui+1:nui+nvi]; % points to columns for meas. dist. in gamma.
iym=[1:nyyi];   % index of the measured outputs.

% +++ Augment the internal model state with the outputs.

[PHI,GAM,C,D,N]=mpcaugss(phii,gami,ci,di);

% +++ Calculate the basic projection matrices +++

pny=nyy*p;      % Total # of rows in the final projection matrices.
mnu=nb*nui;     % Total number of columns in final Su matrix.

Cphi=C*PHI;
Sx=[  Cphi

```

```

    zeros(pny-nyi,N)];
Su=[ C*GAM(:,iu)
    zeros(pny-nyi,nui)];
if nvi > 0
    Sv0=[ C*GAM(:,iv)
        zeros(pny-nyi,nvi) ];
else
    Sv0=[];
end

r1=nyi+1;
r2=2*nyi;
for i=2:p
    if nvi > 0
        Sv0(r1:r2,:)=Cphi*GAM(:,iv);
    end
    Su(r1:r2,:)=Cphi*GAM(:,iu);
    Cphi=Cphi*PHI;
    Sx(r1:r2,:)=Cphi;
    r1=r1+nyi;
    r2=r2+nyi;
end

Sdel=eye(nui); % Sdel is to be a block-lower-triangular matrix in which each
    % block is an identity matrix. Used in constraint definition.
eyep=eye(nyi); % eyep is a matrix containing P identity matrices (dimension nyi)
    % stacked one on top of the other.
for i=2:p
    eyep=[eyep;eye(nyi)];
end
for i=2:nb

```



```

    Sdel=[Sdel;eye(nui)];
end

% If number of moves > 1, fill the remaining columns of Su and Sdel,
% doing "blocking" at the same time.

if nb > 1
    k = nui;
    blocks=cumsum(blocks);
    for i = 2:nb
        row0=blocks(i-1)*nyi;
        row1=(i-1)*nui;
        Su(row0+1:pnny,k+1:k+nui)=Su(1:pnny-row0,1:nui);
        Sdel(row1+1:mnu,k+1:k+nui)=Sdel(1:mnu-row1,1:nui);
        k=k+nui;
    end
end

% Set up weighting matrix on outputs. Q is a column vector
% containing the diagonal elements of the weighting matrix, SQUARED.

irow=0;
for i=1:p
    Q(irow+1:irow+nyi,1)=ywt(min(i,nywt),:);
    irow=irow+nyi;
end
Q=Q.*Q;

% Set up weighting matrix on manipulated variables. R
% is a column vector containing the diagonal elements, SQUARED.

```

```

uwt=uwt+10*sqrt(eps); %for numerical stability
irow=0;
for i=1:nb
    R(irow+1:irow+nui,1)=uwt(min(i,nuwt),:);
    irow=irow+nui;
end
R=R.*R;

% Usually, some of the general inequality constraints are not used.
% This section sets up index vectors for each type of constraint to
% pick out the ones that are actually needed for the problem. This
% helps to minimize the size of the QP.

% First set up column vectors containing the bounds for each type of
% constraint over the entire prediction horizon. For the inputs, the
% resulting vectors must be length mnu. For outputs, length is pny.

umin=ulim(:,iumin)';
umin=umin(:);    % Stretches the matrix out into one long column
umax=ulim(:,iumax)';
umax=umax(:);
dumax=ulim(:,idumax)';
dumax=dumax(:);
ymin=yylim(:,iymin)';
ymin=ymin(:);
ymax=yylim(:,iymax)';
ymax=ymax(:);
clear ulim ylim    % Releases memory no longer needed.

lenu=length(umin);
if lenu > mnu    % Has user specified more bounds than necessary?

```

```

disp('WARNING: too many rows in ULIM matrix.')
disp('    Extra rows deleted.')
umin=umin(1:mnu);
umax=umax(1:mnu);
dumax=dumax(1:mnu);
elseif lenu < mnu    % If fewer rows than needed, must copy last one.
    r2=[lenu-nui+1:lenu];
    for i=1:round((mnu-lenu)/nui)
        umin=[umin;umin(r2,:)];
        umax=[umax;umax(r2,:)];
        dumax=[dumax;dumax(r2,:)];
    end
end

leny=length(ymin);
if leny > pny    % Has user specified more bounds than necessary?
    disp('WARNING: too many rows in YLIM matrix.')
    disp('    Extra rows deleted.')
    ymin=ymin(1:pny);
    ymax=ymax(1:pny);
elseif leny < pny    % If fewer rows than needed, must copy last one.
    r2=[leny-nyi+1:leny];
    for i=1:round((pny-leny)/nyi)
        ymin=[ymin;ymin(r2,:)];
        ymax=[ymax;ymax(r2,:)];
    end
end

% The bounds on delta u must always be included in the problem. The
% other bounds should only be included as constraints if they're finite.
% Generate vectors that contain a list of the finite constraints.

```

```

iumin=find(umin ~= -inf);
iumax=find(umax ~= inf);
iymin=find(ymin ~= -inf);
iymax=find(ymax ~= inf);

% Delete the infinite values. At the same time, form the coefficient
% matrix for the inequality constraints. Do this by picking out only
% the equations actually needed according to the lists established above.
% Finally, calculate the constant part of the RHS of the inequality
% constraints for these equations.

A=eye(mnu); % These are the equations that are always present.
rhscon=2*dumax; % They are the bounds on delta u. A is the coefficient
               % matrix and rhscon is the constant part of the RHS.

if ~ isempty(iumin) % Add equations for lower bound on u
    umin=umin(iumin);
    A=[A;-Sdel(iumin,:)];
    rhscon=[rhscon;-Sdel(iumin,)*dumax-umin];
else
    umin=[];
end

if ~ isempty(iumax) % Add equations for upper bound on u
    umax=umax(iumax);
    A=[A;Sdel(iumax,:)];
    rhscon=[rhscon;Sdel(iumax,)*dumax+umax];
else
    umax=[];
end

if ~ isempty(iymin) % Add equations for lower bound on y

```

```

ymin=ymin(iymin);
A=[A;-Su(iymin,:)];
rhscon=[rhscon;-Su(iymin,)*dumax-ymin];
else
ymin=[];
end
if ~ isempty(iymax) % Add equations for upper bound on y
ymax=ymax(iymax);
A=[A;Su(iymax,:)];
rhscon=[rhscon;Su(iymax,)*dumax+ymax];
else
ymax=[];
end

[nc,dumdum]=size(A); % Save total number of inequality constraints.

% +++ Define the matrices needed for the QP +++

SuTQ=Su'*diag(Q);
B=SuTQ*Su+diag(R);
clear Su
a=B'*dumax; % This is a constant term that adds to the initial basis
           % in each QP.
B=B\eye(mnu);
TAB=[-B B*A' ;A*B -A*B*A'];
clear A B

%% +++++ Control SECTION +++++

% Initialization of states, etc. {Lonk}
samp = T; % samp = blocks

```

```

sp = setpts;
final = 1000;
delay = 5;
st = 1;          %sampling time (sec/time)
sl = ceil(final/st); %sampling amuount (time)
ct = T;          %controlling time (sec/time)
cl = ceil(final/ct); %controlling amuount (time)
c= [16.51 -28.61
    19.38 -23.01
    20.3  -18.25
    23.29 2.734];

i = zeros(1,1); %counter variable
j = zeros(1,1); %counter variable = 0;
l = 1;          %counter variable
m = 1;          %counter variable
psp = zeros(0,1);
p = [];        %actual tank height matrix
q = [];
r = [];
s = [];
t = [];

%% Store variables at t=0
for l=1:5
    temp = getsample(ai);
    height(l,1) = c(1,1)*temp(1)+c(1,2);
    height(l,2) = c(2,1)*temp(2)+c(2,2);
    height(l,3) = c(3,1)*temp(3)+c(3,2);
    height(l,4) = c(4,1)*temp(4)+c(4,2);
end

```

```

temp=height(4,:)
height=median(height)

MV = [0.5;0.5];
u = [MV(1) MV(2)]*100;

psp(1,1)=sp(1)*100;
p(1,:)=height;
q(1,:)=u;
r(1,:)=u;
s(1,:)=u;
t(1)=0 ;

xi = zeros(ni+nyj,1);
IKC=eye(ni+nyj)-Kest*C;
%%
%Control
for i=1:final
    i
    %#Measure Tank height
    for l=1:5
        temp = getsample(ai);
        height(l,1) = c(1,1)*temp(1)+c(1,2);
        height(l,2) = c(2,1)*temp(2)+c(2,2);
        height(l,3) = c(3,1)*temp(3)+c(3,2);
        height(l,4) = c(4,1)*temp(4)+c(4,2);
    end
    temp=height(5,:)
    height=median(height)
    for m=1:4
        if abs(p(i,m)-height(1,m))>1

```

```

for l=1:5
    temp = getsample(ai);
    height(l,m) = c(m,1)*temp(m)+c(m,2);
end
height(1,m)=median(height(:,m))
height=height(1,:);
end
end
p(i+1,:)=height;          %Store CV
%#Measure Tank height {end}
psp(i+1,1)=sp(1)*100;
%# Calculated MV
if rem(i-1,ct)<0.02
    y=height/100;          %Don't edit
    yp = [y(1); y(3)];     %Don't edit
    yptrue = yp;
    ypnew = yptrue;        % current measured plant outputs
    setpt = setpts(min(i,nset,:)); % current setpoints
    % Calculate starting basis vector for the QP
    xi=IKC*xi+Kest*ypnew; % measurement update for state estimator.
    y0=Sx*xi;
    if nvi > 0
        y0=y0 + Sv0*deltav;
    end
    rhsa=a+SuTQ*(eyep*setpt-y0);

    % Update the RHS of the inequality constraints

    rhsc=zeros(mnu,1);
    del=Sdel(:,1:nui)*MV; % vector of previous value of manip. vars.

```



```

if ~ isempty(iumin) % Equations for lower bound on u
    rhsc=[rhsc;del(iumin,:)];
end
if ~ isempty(iumax) % Equations for upper bound on u
    rhsc=[rhsc;-del(iumax,:)];
end
if ~ isempty(iymin) % Equations for lower bound on y
    rhsc=[rhsc;y0(iymin,:)];
end
if ~ isempty(iymax) % Equations for upper bound on y
    rhsc=[rhsc;-y0(iymax,:)];
end

rhsc=rhsc+rhscon; % Add on the constant part computed earlier.

% Set up and solve the QP;

basisi=[ -TAB(1:mnu,1:mnu)*rhsa
         rhsc-TAB(mnu+1:mnu+nc,1:mnu)*rhsa];
ibi=-[1:mnu+nc]';
ili=-ibi;
basis,ib,il,iter]=dantzgmp(TAB,basisi,ibi,ili);
if iter < 0
    disp('Infeasible QP. Check constraints.');
```

disp(['Step = ',int2str(i)])

disp('Simulation terminating prematurely!')

```

break
end
deltau=[];
for j=1:nui
    if il(j) <= 0
```

```

        deltau(j,1)=-dumax(j,1);
    else
        deltau(j,1)=basis(il(j))-dumax(j,1);
    end
end
MV = deltau + MV;

% State updates
ui=deltau;
xi=PHI*xi+GAM*ui;

u = MV**100;
for m=1:2
    if (u(m)>100)
        u(m)=100;
    elseif (u(m)<0)
        u(m)=0;
    end
end
end
%MVss = 4*u + 1; %volt
%putsample(ao,MVss)
q(i+1,:)=u(1,:);      %Store calculated MV
else q(i+1,:)=q(i,:);      %Store calculated MV
end
end
%# Calculated MV {end}
if rem(i-1,ct)<0.02
    r(i+1,:)=u;          %Log actioned MV
else r(i+1,:)=r(i,:);  %Log actioned MV
end
end

```

```

d = i-delay;           %Cal Delayed time
if (d<0)
    d=0;
else ;
end
u=r(d+1,:);           %Get MV
s(i+1,:)=r(d+1,:);    %Log actual actioned MV
if rem(d-1,ct)<0.02
    MVss=(u*4/100)+1
    putsample(ao,MVss); %Actioned MV
else
end

for l=1:2
    if height(Tank(l))>77
        MVss=[3 3]      %Prevent overflow
        MVss(Valve(l))=1 %Prevent overflow
        putsample(ao,MVss); %Prevent overflow
        pause(100);     %Prevent overflow
    end
end

t(i+1,1)=i;
subplot(2,1,1);
plot(t,p,t,psp)
legend('Tank1','Tank2','Tank3','Tank4','sp',-1)
title('This is the graph plot between tank height against time')
xlabel('Time')
ylabel('Tank height')
subplot(2,1,2);
plot(t,q)

```

```
legend('MV1','MV2',-1)
title('This is the graph plot between %opening valve against time')
xlabel('Time')
ylabel('%Opening valve')
pause(1);
end

save MPC_1&3
MVss=[3 3];
putsample(ao,MVss);
```

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจักรกฤษ รัชแก้วกรพินธุ์ เกิดวันที่ 15 มกราคม พ.ศ. 2524 จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2544 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551