

การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบมัลติพาราเมตริกโมเดลฟรีดิกที่ฟของการทดลองระบบสี่ถัง



นาย อลงกรณ์ จรัญชล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

APPLICATION OF MULTI-PARAMETRIC MODEL PREDICTIVE CONTROL
OF AN EXPERIMENTAL FOUR-TANK SYSTEM



Mr. Alongkorn Jaranchon

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
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 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบมัลติพารามетริก

โมเดลพรีดิกทีฟของการทดลองระบบสี่ถัง

โดย

นายอลงกรณ์ จรัญชล

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คนบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศศิริวงค์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัช มงคลศรี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.กษิตศ หนูทอง)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพล เกียรติกิตติพงษ์)

อลงกรณ์ จรรย์ชล : การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบมัลติพารามेटริกโมเดลพรีดิกทีฟของ
การทดลองระบบสี่ถัง (APPLICATION OF MULTI-PARAMETRIC MODEL
PREDICTIVE CONTROL OF AN EXPERIMENTAL FOUR-TANK SYSTEM)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.สุรเทพ เขียวหอม, 338 หน้า.

งานวิจัยนี้เสนอการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบมัลติพารามेटริกโมเดลพรีดิกทีฟเพื่อ
ควบคุมระดับของของเหลวในกระบวนการระบบสี่ถังซึ่งเป็นกระบวนการที่มีปฏิสัมพันธ์ภายในต่อ
กัน โดยเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกับตัวควบคุมแบบพีไอดี และตัวควบคุมแบบโมเดลพรี
ดิกทีฟ โดยสมรรถนะของตัวควบคุมชี้วัดโดยค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (ไอเออี) และได้
ศึกษาอิทธิพลของความไม่แน่นอนของแบบจำลองต่อสมรรถนะของตัวควบคุม

ผู้วิจัยได้ทำการจำลองกระบวนการเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมและศึกษา
ผลกระทบของความไม่แน่นอนของแบบจำลองโดยวิธีจำลองเทคนิคมอนติคาร์โลเพื่อวิเคราะห์หา
อิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของการควบคุมด้วยวิธีทางสถิติ พบว่าอิทธิพลของปัจจัยที่มี
ผลต่อสมรรถนะการควบคุมคือ ชนิดของตัวควบคุม ร้อยละความผิดพลาดของแบบจำลอง
ตลอดจนอันตรกิริยาระหว่างสองปัจจัยนี้ ในช่วงความผิดพลาดของแบบจำลองต่ำกว่า $\pm 20\%$ ตัว
ควบคุมแบบมัลติพารามेटริกโมเดลพรีดิกทีฟให้สมรรถนะการควบคุมที่ดีที่สุด และในช่วงความผิด
พลาดของแบบจำลองตั้งแต่ $\pm 40\%$ ขึ้นไป ตัวควบคุมแบบพีไอดีให้สมรรถนะการควบคุมที่ดีที่สุด
ในช่วงตั้งแต่ $\pm 20\%$ ถึง $\pm 30\%$ ของความผิดพลาดของแบบจำลองพบว่าสมรรถนะการควบคุม
ของตัวควบคุมทั้งสามแบบไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากนั้นยังทดสอบสมรรถนะการควบคุมโดยใช้การทดลอง ผลการทดลองแสดงให้เห็น
เห็นว่าตัวควบคุมแบบมัลติพารามेटริกโมเดลพรีดิกทีฟให้สมรรถนะการควบคุมดีกว่าตัว
ควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟและพีไอดี และการเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับของตัวควบคุมแบบมัลติ
พารามेटริกโมเดลพรีดิกทีฟไม่รุนแรงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟและพีไอ
ดี

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา..... 2552

ลายมือชื่อนิติ.....
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

5170649321 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : MULTI-PARAMETRIC/ MODEL PREDICTIVE CONTROL/FOUR-TANK
SYSTEM/MONTE CARLO SIMULATION METHOD

ALONGKORN JARANCHON: APPLICATION OF MULTI-PARAMETRIC
MODEL PREDICTIVE CONTROL OF AN EXPERIMENTAL FOUR-TANK
SYSTEM. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. SOORATHEP KHEAWHOM, Ph.D.,
338 pp

This research presents the application of multi-parametric model predictive controller (mp-MPC) to control liquid level in a four-tank system which is an interaction process. The control performance of multi-parametric model predictive control is compared with model predictive controller (MPC) and PID controller. The control performance is indicated by integral of the absolute value of the error (IAE). The impacts of model uncertainty to control performance are also studied.

The control performances are compared using simulation technique, and the impacts of model uncertainty are investigated by Monte Carlo simulation in order to analyze the influence of affecting factors. The results show that the affecting factors are controller type, percent of plant model uncertainty and the interaction between these two factors. In the case that the percent of plant model uncertainty lower than $\pm 20\%$, mp-MPC gives the best control performance. The PID controller yields better performance when the percent of plant model uncertainty greater than $\pm 40\%$. In the range of the percent of plant model uncertainty from $\pm 20\%$ to $\pm 40\%$, significant difference of control performances between each controller cannot be observed.

In addition, the control performance of each controller is investigated by experimental work. The results show that mp-MPC provides a better control performance in comparison with MPC and PID controller. Moreover, the control action of mp-MPC is less drastic compared with MPC and PID controller.

Department : Chemical Engineering

Field of Study : Chemical Engineering

Academic Year : 2009

Student's Signature

Advisor's Signature

Alongkorn Jaranchon

Soorathep Kheawhom

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม เป็นอย่างสูงสำหรับการให้คำปรึกษาแนะนำทางการวิจัย และให้ข้อคิดเห็นในการแก้ไขปัญหาต่างๆตลอดจนความช่วยเหลือด้านต่างๆ อย่างดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธราธร มงคลศรี ดร.กษิติศ หนูทอง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพล เกียรติกิตติพงษ์ ที่กรุณาสละเวลามาร่วมเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์อย่างมากที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้ทำให้งานวิจัยมีคุณภาพมากขึ้น

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนโดยให้ทุนการศึกษาตลอดจนจบการศึกษา

ขอขอบคุณฝ่ายวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย บัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ ซึ่งมีส่วนทำให้วิทยานิพนธ์เป็นไปอย่างด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณกิจชัย กาญจนประภากุล เจ้าหน้าที่ปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่ช่วยเรื่องเทคนิคในการสร้างอุปกรณ์ชุดการทดลองต่างๆ รวมไปถึงคำแนะนำดีๆสำหรับอุปกรณ์ต่างๆ

ขอขอบคุณเพื่อนๆรุ่นพี่และรุ่นน้องและบุคคลอื่นที่ไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้ สำหรับข้อแนะนำและกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดาที่ให้กำเนิด เลี้ยงดูด้วยความรักและมอบการศึกษาอันเป็นทรัพย์ที่ประเมินค่าไม่ได้มาตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ท
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	4
1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟและการควบคุมกระบวนการระบบสี่ถัง.....	6
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับมัลติพาราเมตริก.....	9
บทที่ 3 กระบวนการระบบสี่ถัง.....	11
3.1 อุปกรณ์ชุดการทดลองกระบวนการสี่ถัง.....	11
3.2 อุปกรณ์เชื่อมต่อสั่งการ.....	14
3.3 การปรับตั้งค่าวาล์วแมนนวล.....	14
3.4 ค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการระบบสี่ถัง.....	16
บทที่ 4 ตัวควบคุม.....	23
4.1 ตัวควบคุมแบบ PID.....	23

4.2	ตัวควบคุมแบบโมเดลพีรติกทีฟ.....	24
4.3	ตัวควบคุมแบบมัลติพาราเมตริกโมเดลพีรติกทีฟ.....	35
บทที่ 5	การจำลองแบบเทคนิคมอนติคาร์โล.....	41
5.1	วิธีการจำลองแบบเทคนิคมอนติคาร์โล.....	41
5.2	วิธีการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้แผนแบบแฟกทอเรียล.....	43
บทที่ 6	การสร้างแบบจำลองของระบบสี่ถังและอิทธิพลของความไม่แน่นอนของ แบบจำลองต่อสมรรถนะของการควบคุม.....	51
6.1	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกระบวนการสี่ถัง.....	51
6.2	ผลการจำลองกระบวนการทดสอบตัวควบคุมในกรณีแบบจำลองของ กระบวนการที่มีความไม่แน่นอนวิเคราะห์โดยการจำลองวิธีแบบเทคนิคมอนติ คาร์โล.....	63
บทที่ 7	ผลการทดลอง การวิเคราะห์ข้อมูลของการทดสอบเปรียบเทียบการควบคุม กระบวนการแต่ละตัวควบคุม.....	85
7.1	ผลการทดลองการหาแบบจำลองของกระบวนการระบบสี่ถังโดยใช้วิธีการ ตอบสนองต่อสเต็มพ์ของอินพุตต่อเอาต์พุต.....	85
7.2	ผลของการทดสอบเปรียบเทียบการควบคุมกระบวนการแต่ละตัวควบคุมและ การจำลองกระบวนการ.....	93
บทที่ 8	สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	122
8.1	สรุปผลการวิจัย.....	122
8.2	ข้อเสนอแนะ.....	123
	รายการอ้างอิง.....	125

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ชุดการทดลองกระบวนการระบบสี่ถัง.....	130
ภาคผนวก ข เกณฑ์การวัดความผิดพลาด.....	135
ภาคผนวก ค ทรานสดิวเซอร์.....	137
ภาคผนวก ง วาล์วควบคุม.....	141
ภาคผนวก จ ข้อมูลของหาค่าพารามิเตอร์ของการทดลองระบบสี่ถัง.....	153
ภาคผนวก ฉ ข้อมูลผลการจำลองในกรณีแบบจำลองมีความไม่แน่นอน.....	162
ภาคผนวก ช ข้อมูลการทดลองของการหาแบบจำลองของกระบวนการระบบสี่ถัง โดยใช้วิธีการตอบสนองต่อ สเต็ปของอินพุตต่อเอาต์พุต.....	218
ภาคผนวก ซ ข้อมูลการทดลองของการควบคุมระดับของเหลวในกรณีต่างๆ.....	262
ภาคผนวก ฌ รายละเอียดการเขียนโปรแกรมการจำลองและการปฏิบัติจริง.....	289
ภาคผนวก ญ นิยามศัพท์.....	333
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	338

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญัตราจ

ตารางที่		หน้า
3.1	ร้อยละของการเปิดวาล์วควบคุมเทียบบัญญัติไตรยางศ์เป็นค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์ว.....	15
3.2	ค่าความสูงของน้ำและค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วควบคุมที่สภาวะคงตัว.....	15
3.3	คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์ว.....	19
3.4	คำนวณความดันลดคร่อมของวาล์วควบคุม.....	21
3.5	คำนวณพื้นที่หน้าตัดของถัง.....	22
4.1	สรุปข้อดีข้อเสียของตัวควบคุมแต่ละชนิด.....	40
5.1	ตารางข้อมูลสำหรับแผนแบบแฟกทอเรียลที่มี 2 ปัจจัย.....	49
5.2	ตาราง ANOVA สำหรับแผนแบบแฟกทอเรียลที่มี 2 ปัจจัย.....	50
6.1	ค่าพารามิเตอร์ของการทดลองระบบสี่ถังที่สภาวะคงตัว.....	57
6.2	วิธีการปรับแต่งตัวควบคุมด้วยวิธีการแกว่งต่อเนื่อง	68
6.3	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมแต่ละตัวควบคุมการจำลองกระบวนการของการควบคุมระดับของเหลวถังที่ 2 และถังที่ 4.....	69
6.4	ข้อมูลของค่า IAE: ค่าเฉลี่ยของ treatment combination และของปัจจัยของการควบคุมถังที่ 2.....	73
6.5	ข้อมูลค่า IAE ของการควบคุมถังที่ 2: ตาราง ANOVA.....	74
6.6	ข้อมูลค่า IAEของการควบคุมของถังที่ 2: การทดสอบอิทธิพลเชิงเดี่ยว.....	76
6.7	ข้อมูลของค่า IAE: ค่าเฉลี่ยของ treatment combination และของปัจจัยของการควบคุมถังที่ 4.....	78
6.8	ข้อมูลค่า IAE ของการควบคุมถังที่ 4 : ตาราง ANOVA.....	79
6.9	ข้อมูลค่า IAEของการควบคุมของถังที่ 4: การทดสอบอิทธิพลเชิงเดี่ยว.....	82
7.1	ร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย.....	89
7.2	วิธีการปรับแต่งตัวควบคุมด้วยวิธีการแกว่งต่อเนื่อง.....	95
7.3	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมแต่ละตัวควบคุมทั้งการทดลองจริงและการจำลองกระบวนการของการควบคุมระดับของเหลวถังที่ 1 และถังที่ 3.....	98

ตารางที่		หน้า
7.4	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมแต่ละตัวควบคุมทั้งการทดลองจริงและการจำลองกระบวนการของการควบคุมระดับของเหลวถึงที่ 1 และถึงที่ 2.....	105
7.5	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมแต่ละตัวควบคุมทั้งการทดลองจริงและการจำลองกระบวนการของการควบคุมระดับของเหลวถึงที่ 3 และถึงที่ 4.....	115
ง-1	การหาค่า C_v สำหรับการใช้งานกับของเหลว.....	145
ง-2	Valve characteristics, Rangeability ad Pressure recovery factors.....	146
จ-1	ข้อมูลดิบของอัตราการไหลที่ไหลผ่าน CV1.....	153
จ-2	ข้อมูลดิบของอัตราการไหลที่ไหลผ่าน CV3.....	155
จ-3	ข้อมูลดิบของอัตราการไหลที่ไหลผ่าน CV2.....	157
จ-4	ข้อมูลดิบของอัตราการไหลที่ไหลผ่าน CV4.....	159
จ-5	ข้อมูลดิบของอัตราการไหลที่ไหลผ่าน CVcontrol 1 และ CVcontrol 2 หา $\Delta P...$	161
ฉ-1	ข้อมูลค่า IAE ของผลการจำลองในกรณีแบบจำลองมีความไม่แน่นอน $\pm 10\%$ ของถึงที่ 2.....	162
ฉ-2	ข้อมูลค่า IAE ของผลการจำลองในกรณีแบบจำลองมีความไม่แน่นอน $\pm 10\%$ ของถึงที่ 4.....	166
ฉ-3	ข้อมูลค่า IAE ของผลการจำลองในกรณีแบบจำลองมีความไม่แน่นอน $\pm 20\%$ ของถึงที่ 2.....	170
ฉ-4	ข้อมูลค่า IAE ของผลการจำลองในกรณีแบบจำลองมีความไม่แน่นอน $\pm 20\%$ ของถึงที่ 4.....	174
ฉ-5	ข้อมูลค่า IAE ของผลการจำลองในกรณีแบบจำลองมีความไม่แน่นอน $\pm 30\%$ ของถึงที่ 2.....	178
ฉ-6	ข้อมูลค่า IAE ของผลการจำลองในกรณีแบบจำลองมีความไม่แน่นอน $\pm 30\%$ ของถึงที่ 4.....	182
ฉ-7	ข้อมูลค่า IAE ของผลการจำลองในกรณีแบบจำลองมีความไม่แน่นอน $\pm 40\%$ ของถึงที่ 2.....	186
ฉ-8	ข้อมูลค่า IAE ของผลการจำลองในกรณีแบบจำลองมีความไม่แน่นอน $\pm 40\%$ ของถึงที่ 4.....	190

ตารางที่	หน้า	
ฉ-9	ข้อมูลค่า IAE ของผลการจำลองในกรณีแบบจำลองมีความไม่แน่นอน $\pm 50\%$ ของถึงที่ 2.....	192
ฉ-10	ข้อมูลค่า IAE ของผลการจำลองในกรณีแบบจำลองมีความไม่แน่นอน $\pm 50\%$ ของถึงที่ 4.....	198
ฉ-11	ข้อมูลค่า IAE ของผลการจำลองในกรณีแบบจำลองมีความไม่แน่นอน $\pm 60\%$ ของถึงที่ 2.....	202
ฉ-12	ข้อมูลค่า IAE ของผลการจำลองในกรณีแบบจำลองมีความไม่แน่นอน $\pm 60\%$ ของถึงที่ 4.....	206
ฉ-13	ข้อมูลค่า IAE ของผลการจำลองในกรณีแบบจำลองมีความไม่แน่นอน $\pm 70\%$ ของถึงที่ 2.....	210
ฉ-14	ข้อมูลค่า IAE ของผลการจำลองในกรณีแบบจำลองมีความไม่แน่นอน $\pm 70\%$ ของถึงที่ 4.....	214
ช-1	ข้อมูลการทดลองในการปรับวาล์วทดสอบแบบสเต็ปต์ที่ 1.....	218
ช-2	ข้อมูลการเลียนกระบวนการในการปรับวาล์วทดสอบแบบสเต็ปต์ที่ 1.....	229
ช-3	ข้อมูลการทดลองในการปรับวาล์วทดสอบแบบสเต็ปต์ที่ 2.....	240
ช-4	ข้อมูลการเลียนกระบวนการในการปรับวาล์วทดสอบแบบสเต็ปต์ที่ 2.....	251
ช-1	ข้อมูลการทดลองในการควบคุมแบบ PID กรณีการควบคุมระดับของเหลวถึงที่ 1 และ 3	262
ช-2	ข้อมูลการทดลองในการควบคุมแบบ PID กรณีการควบคุมระดับของเหลวถึงที่ 1 และ 2	265
ช-3	ข้อมูลการทดลองในการควบคุมแบบ PID กรณีการควบคุมระดับของเหลวถึงที่ 3 และ 4	268
ช-4	ข้อมูลการทดลองในการควบคุมแบบ MPC กรณีการควบคุมระดับของเหลวถึงที่ 1 และ 3	271
ช-5	ข้อมูลการทดลองในการควบคุมแบบ MPC กรณีการควบคุมระดับของเหลวถึงที่ 1 และ 2	274
ช-6	ข้อมูลการทดลองในการควบคุมแบบ MPC กรณีการควบคุมระดับของเหลวถึงที่ 3 และ 4	277

ตารางที่	หน้า
๗-7 ข้อมูลการทดลองในการควบคุมแบบ mp-MPC กรณีการควบคุมระดับของเหลว ถึงที่ 1 และ 3	280
๗-8 ข้อมูลการทดลองในการควบคุมแบบ mp-MPC กรณีการควบคุมระดับของเหลว ถึงที่ 1 และ 2.....	283
๗-9 ข้อมูลการทดลองในการควบคุมแบบ mp-MPC กรณีการควบคุมระดับของเหลว ถึงที่ 3 และ 4	286



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	แสดงระหว่าง On-line optimization กับ Multi-Parametric program.....	3
3.1	กระบวนการของระบบสี่ถัง.....	11
3.2	ชุดการทดลองของระบบสี่ถัง.....	13
3.3	ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับ (ความสูงของระดับน้ำของถังที่ 1) ^{0.5}	17
3.4	ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับ (ความสูงของระดับน้ำของถังที่ 3) ^{0.5}	17
3.5	ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับ (ความสูงของระดับน้ำของถังที่ 2) ^{0.5}	18
3.6	ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับ (ความสูงของระดับน้ำของถังที่ 4) ^{0.5}	18
3.7	ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วควบคุมตัวที่ 1..	20
3.8	ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วควบคุมตัวที่ 2..	21
4.1	โครงสร้างของการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ.....	25
4.2	การหาค่าตัวแปรปรับล่วงหน้าจำนวน M ค่าในการทำนาย P.....	26
4.3	แผนภาพการควบคุมโดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นแบบจำลอง.....	28
4.4	แผนภาพของการควบคุมโดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นแบบจำลองพร้อมด้วย สังเกต.....	29
4.5	แผนภาพของอัลกอริทึมของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ.....	34
4.6	แผนภาพของอัลกอริทึมของตัวควบคุมแบบมัลติพาราเมตริกโมเดลพรีดิกทีฟ.....	39
5.1	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	41
5.2	กรณีพื้นฐานของแบบจำลอง.....	42
5.3	เทคนิคมอนติคาร์โล.....	44
6.1	ระบบกระบวนการสี่ถัง.....	51
6.2	การตอบสนองความสูงของน้ำถังที่ 2 มีลักษณะแกว่งอย่างต่อเนื่อง.....	67
6.3	การตอบสนองความสูงของน้ำถังที่ 4 มีลักษณะแกว่งอย่างต่อเนื่อง.....	67
6.4	เปรียบเทียบผลของค่า IAE เหนือได้จากการจำลองกระบวนการของแต่ละตัว ควบคุมตามระดับค่าความผิดพลาดของแบบจำลองกระบวนการ.....	70

ภาพที่	หน้า	
6.5	เปรียบเทียบการกระจายข้อมูลของ ค่า IAE แบบ box plot ซึ่งได้จากการจำลองกระบวนการของแต่ละตัวควบคุมตามระดับค่าความผิดพลาดของแบบจำลองกระบวนการของถังที่ 2.....	71
6.6	เปรียบเทียบการกระจายข้อมูลของ ค่า IAE แบบ box plot ซึ่งได้จากการจำลองกระบวนการของแต่ละตัวควบคุมตามระดับค่าความผิดพลาดของแบบจำลองกระบวนการของถังที่ 4.....	71
6.7	ผลของการคำนวณวิเคราะห์ ANOVA ของโปรแกรม R กรณีการควบคุมถังที่ 2	75
6.8	ผลของการคำนวณวิเคราะห์ ANOVA ของโปรแกรม R กรณีการควบคุมถังที่ 4	78
7.1	เส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการสำหรับการคำนวณ.....	86
7.2	ลักษณะการตอบสนองแบบสเต็ปของการปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 1	87
7.3	ลักษณะการตอบสนองแบบสเต็ปของการปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 2.....	87
7.4	เปรียบเทียบผลตอบสนองของกระบวนการกับผลการจำลองกระบวนการเมื่อปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 1 ของถังที่ 1 และถังที่ 2.....	90
7.5	เปรียบเทียบผลตอบสนองของกระบวนการกับผลการจำลองกระบวนการเมื่อปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 1 ของถังที่ 3 และถังที่ 4.....	90
7.6	เปรียบเทียบผลตอบสนองของกระบวนการกับผลการจำลองกระบวนการเมื่อปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 2 ของถังที่ 1 และถังที่ 2.....	91
7.7	เปรียบเทียบผลตอบสนองของกระบวนการกับผลการจำลองกระบวนการเมื่อปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 2 ของถังที่ 3 และถังที่ 4.....	92
7.8	การตอบสนองความสูงของน้ำถังที่ 1 มีลักษณะแกว่งอย่างต่อเนื่อง.....	96
7.9	การตอบสนองความสูงของน้ำถังที่ 3 มีลักษณะแกว่งอย่างต่อเนื่อง.....	96
7.10	ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 1 ของตัวควบคุมแบบ PID ทั้งผลการทดลองและผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 3.....	99
7.11	ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 3 ของตัวควบคุมแบบ PID ทั้งผลการทดลองและผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของเหลวถังที่ 1 กับถังที่ 3...	99
7.12	การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ ตัวที่ 2 ของตัวควบคุมแบบ PID ในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 3 ของการทดลองกระบวนการจริง..	100

ภาพที่	หน้า
7.13 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 1 ของตัวควบคุมแบบ MPC ทั้งผลการทดลอง และผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 3.....	100
7.14 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 3 ของตัวควบคุมแบบ MPC ทั้งผลการทดลอง และผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 3.....	101
7.15 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ ตัวที่ 2 ของตัวควบคุมแบบ MPC ในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 3 ของการทดลองกระบวนการจริง.....	101
7.16 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 1 ของตัวควบคุมแบบ mp-MPC ทั้งผลการ ทดลองและผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 3.....	102
7.17 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 3 ของตัวควบคุมแบบ mp-MPC ทั้งผลการ ทดลองและผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 3.....	102
7.18 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ ตัวที่ 2 ของตัวควบคุมแบบ mp-MPC ในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 3 ของการทดลอง กระบวนการจริง.....	103
7.19 ผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (IAE) ของการควบคุมระดับของเหลว ถังที่ 1 กับถังที่ 3 แต่ละตัวควบคุม.....	103
7.20 การตอบสนองความสูงของน้ำถังที่ 1 มีลักษณะแกว่งอย่างต่อเนื่อง.....	105
7.21 การตอบสนองความสูงของน้ำถังที่ 2 มีลักษณะแกว่งอย่างต่อเนื่อง.....	105
7.22 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 1 ของตัวควบคุมแบบ PID ทั้งผลการทดลองและ ผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 2.....	107
7.23 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 3 ของตัวควบคุมแบบ PID ทั้งผลการทดลองและ ผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 2.....	108
7.24 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ ตัวที่ 2 ของตัวควบคุมแบบ PID ใน กรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 2 ของการทดลองกระบวนการจริง..	108

ภาพที่	หน้า
7.25 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 1 ของตัวควบคุมแบบ MPC ทั้งผลการทดลอง และผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 2	109
7.26 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 2 ของตัวควบคุมแบบ MPC ทั้งผลการทดลอง และผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 2	109
7.27 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ ตัวที่ 2 ของตัวควบคุมแบบ MPC ในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 2 ของการทดลองกระบวนการจริง.....	110
7.28 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 1 ของตัวควบคุมแบบ mp-MPC ทั้งผลการ ทดลองและผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 2	110
7.29 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 2 ของตัวควบคุมแบบ mp-MPC ทั้งผลการ ทดลองและผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 2	111
7.30 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ ตัวที่ 2 ของตัวควบคุมแบบ mp-MPC ในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 2 ของการทดลอง กระบวนการจริง.....	111
7.31 ผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (IAE) ของการควบคุมระดับของเหลว ถังที่ 1 กับถังที่ 2 แต่ละตัวควบคุม.....	112
7.32 การตอบสนองความสูงของน้ำถังที่ 3 มีลักษณะแกว่งอย่างต่อเนื่อง.....	114
7.33 การตอบสนองความสูงของน้ำถังที่ 4 มีลักษณะแกว่งอย่างต่อเนื่อง.....	114
7.34 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 3 ของตัวควบคุมแบบ PID ทั้งผลการทดลองและ ผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 3 กับถังที่ 4.....	116
7.35 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ PID ทั้งผลการทดลองและ ผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 3 กับถังที่ 4.....	116
7.36 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ ตัวที่ 2 ของตัวควบคุมแบบ PID ใน กรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 3 กับถังที่ 4 ของการทดลองกระบวนการจริง..	117
7.37 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 3 ของตัวควบคุมแบบ MPC ทั้งผลการทดลอง และผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 3 กับถังที่ 4.....	117

ภาพที่	หน้า	
7.38	ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ MPC ทั้งผลการทดลอง และผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 3 กับถังที่ 4	118
7.39	การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ ตัวที่ 2 ของตัวควบคุมแบบ MPC ในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 3 กับถังที่ 4 ของการทดลองกระบวนการจริง.....	118
7.40	ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 3 ของตัวควบคุมแบบ mp-MPC ทั้งผลการทดลองและผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 3 กับถังที่ 4	119
7.41	ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ mp-MPC ทั้งผลการทดลองและผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 3 กับถังที่ 4.....	119
7.42	การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ ตัวที่ 2 ของตัวควบคุมแบบ mp-MPC ในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 3 กับถังที่ 4 ของการทดลองกระบวนการจริง.....	120
7.43	ผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (IAE) ของการควบคุมระดับของเหลว ถังที่ 3 กับถังที่ 4 แต่ละตัวควบคุม.....	120
7.44	อัตราการไหลเข้าสู่ถังที่ 2 และ 4 ต่อเปอร์เซ็นต์ของการเปิดวาล์ว.....	121
ก-1	ชุดการทดลองระบบสี่ถัง.....	130
ก-2	วาล์วควบคุม.....	130
ก-3	ปั้มน้ำ.....	131
ก-4	เซ็นเซอร์วัดระดับของของเหลว.....	131
ก-5	เครื่องวัดอัตราการไหลแบบอุลตราโซนิก.....	132
ก-6	ตู้ควบคุมเครื่อง DCS.....	132
ก-7	อินเวอร์เตอร์.....	133
ก-8	ปั้มนลม.....	133
ก-9	การติดตั้งของบอลวาล์วและเซ็นเซอร์ใต้ถังของชุดทดลอง.....	134
ข-1	แสดงความผิดพลาด.....	135
ค-1	ระบบการวัด (ถัง) น้ำหนัก.....	137
ง-1	Valve Actuator.....	141

ภาพที่		หน้า
ง-2	Valve Body.....	142
ง-3	Valve Positioner.....	143
ง-4	ลักษณะ Globe Valve แบบ Post-Guide.....	144
ง-5	กราฟคุณลักษณะ Equal Percentage.....	147
ง-6	กราฟคุณลักษณะ Linear.....	148
ง-7	กราฟคุณลักษณะ Quick Opening.....	149
ง-8	แสดงไดอะแกรมการทำงานของวาล์ว.....	150
ฉ-1	การจำลองกระบวนการควบคุมแบบ PID.....	289



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์

A	เมตริกซ์ของค่าคงที่
A_i	พื้นที่หน้าตัดของถังแต่ละถังที่ i (m^2)
B	เมตริกซ์ของค่าคงที่
B (t)	ค่าของตัวแปรควบคุม (Controlled Variable) ที่วัดได้
b	เป็น bitmasks ที่เหมาะสมค่าของขนาด
C	เมตริกซ์ของค่าคงที่
C_{VCV_i}	สัมประสิทธิ์การไหลของบอลลวาล์ว i (US gpm / $psi^{0.5}$)
$C_{VCVcontrol_i}$	สัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วควบคุม i (US gpm / $psi^{0.5}$)
$C'_{VCVcontrol}$	รูปของค่าเบี่ยงเบนค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลของวาล์วควบคุม
c	เป็น bitmasks ที่เหมาะสมค่าของขนาด
D	เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของถัง (m)
Exp	ค่าจากการทดลอง
e (t)	ค่าความคลาดเคลื่อน
F_{pump_i}	อัตราการไหลของปั๊มที่ i (L/min)
G_f	ความถ่วงจำเพาะของของเหลว
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง = $9.81 m/s^2$
h_i	ความสูงของน้ำในถัง (m)
h'_i	รูปของค่าเบี่ยงเบนของความสูง
\bar{h}_i	ความสูงของน้ำที่สภาวะคงตัวที่ i
I	เมตริกซ์เอกลักษณ์
J	ดัชนีสมรรถนะ
K	อัตราการขยายของกระบวนการ (Process Gain)
K_c	อัตราการขยายตัวควบคุม (Controller Gain)
K_{cu}	ค่าอัตราขยายค่าสุดท้าย
M	ชุดตัวแปรปรับในอนาคต
N	จำนวนรอบในการทำซ้ำ
P	ชุดตัวแปรควบคุมในอนาคต
P_u	คาบสุดท้าย

$\Delta P_{CVcontroli}$	ความดันลดคร่อมวาล์วควบคุม i (psi)
p	ค่าเบี่ยงเบนหรือค่าเอาท์พุทตัวควบคุมที่สถานะอยู่ตัว
$p(t)$	เอาท์พุทตัวควบคุม
Q	เมตริกซ์นำหนักของตัวแปรสเตท
R	เมตริกซ์นำหนักของตัวแปรปรับ
r	ค่าเป้าหมาย
Sim	ค่าจากการจำลองกระบวนการ
T	คาบของการควบคุม
t	เวลา (วินาที)
Δt	เวลาสุ่มตัวอย่าง (วินาที)
t_d	เวลาเฉื่อย
u	ตัวแปรปรับของกระบวนการ
\hat{w}	ค่าเวกเตอร์นำหนัก
x	ตัวแปรสเตทของกระบวนการ
\hat{y}	ค่าทำนายเอาท์พุทของกระบวนการ

ตัวอักษรกรีก

α	ระดับนัยสำคัญ
γ	อิทธิพลของช่วงเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดของแบบจำลอง
Δ	ขนาดของการเปลี่ยนแปลงของความสูงของน้ำ
δ	ขนาดของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเข้า
λ	ค่า eigenvalues
ϵ	ตัวแปรสุ่มของความคาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น
μ	ค่าเฉลี่ยรวมของค่า IAE
π	3.1416
ρ	ความหนาแน่นของน้ำ (kg / m^3)
τ	อิทธิพลของตัวควบคุม
τ	ค่าคงตัวของเวลา (Time constant)
γ	อิทธิพลของปฏิสัมพันธ์ต่อกันภายในระหว่าง τ_i และ γ_i
τ_i	เวลาปริพันธ์ (Integral Time) หรือ เวลารีเซต (Reset Time)

τ_D เวลาอนุพันธ์ (Derivative, Time)

ตัวอักษรย่อ

DCS	Distributed Control System
df	Degree of freedom
IAE	Integral of the absolute value of error
LP	Linear Programming
MPC	Model predictive control
MS	Mean squares
mp- MPC	Multi – parametric model predictive control
QP	Quadratic Programming
SOV	Source of variation
SS	Sum of squares



คุรุณย์วิทยตรัทยากร
จุพาลงกรณัฒหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันกระบวนการในอุตสาหกรรมเคมีได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและปิโตรเคมี ทั้งนี้เพื่อเพิ่มความสามารถในการแข่งขัน ลดต้นทุนค่าใช้จ่าย เพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากร โดยตระหนักถึงความสำคัญของปัญหาสิ่งแวดล้อมด้วย โดยอุตสาหกรรมเหล่านี้ใช้กระบวนการที่มีความซับซ้อนและเป็นกระบวนการที่มีปฏิสัมพันธ์ต่อกันภายในสูง (Strongly Interaction) ในระบบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพัฒนาตัวควบคุมให้มีสมรรถนะสูงเพื่อให้สามารถควบคุมตัวกระบวนการให้เข้าสู่ค่าเป้าหมาย (Set point) และขณะเดียวกันสามารถกำจัดตัวแปรบกวนต่างภายในระบบได้อย่างรวดเร็วแม่นยำ [1]

ตัวควบคุมแบบ PID ได้ถูกนำมาใช้ในการควบคุมกระบวนการในอุตสาหกรรมตั้งแต่ปี ค.ศ. 1939 ซึ่งเมื่อใช้ในกระบวนการที่มีลักษณะเป็นแบบอินพุท-เอาต์พุตเดี่ยว (Single Input-Single Output, SISO) ให้ผลการควบคุมเป็นที่น่าพอใจ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ในการควบคุมระบบแบบที่มีตัวแปรหลายตัว (Multivariable Systems) ความสามารถในการควบคุมถูกจำกัดลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพัฒนาตัวควบคุมให้มีสมรรถนะสูงขึ้น เพื่อให้สามารถควบคุมกระบวนการที่มีความซับซ้อนมากขึ้นและกระบวนการที่มีปฏิสัมพันธ์ต่อกันภายในสูงได้ ส่งผลให้เทคโนโลยีการควบคุมกระบวนการขั้นสูง (Advance process control) ได้รับความสนใจและนำมาใช้มากขึ้น [2]

ในปัจจุบันความสำคัญของการควบคุมกระบวนการขั้นสูงเริ่มมีความสำคัญมากขึ้นเพราะสามารถที่จะลดต้นทุนได้ถึง 5-10 % ของมูลค่าการผลิตต่อปี โดยเทคโนโลยีด้านการควบคุมกระบวนการขั้นสูงสามารถที่จะดำเนินการในระบบการควบคุมแบบกระจาย (Distributed Control System (DCS)) ได้เป็นอย่างดี และอีกปัจจัยหนึ่งซึ่งเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการพัฒนาของการควบคุมกระบวนการขั้นสูงนี้คือการพัฒนารอยางรวดเร็วของดิจิทัลคอมพิวเตอร์ โดยในช่วง 40 ปี ที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาเกิดขึ้นทั้งในด้านความเร็วในการคำนวณและประสิทธิภาพการทำงานของดิจิทัลคอมพิวเตอร์ จนกระทั่งในตอนนี้ความเร็วในการคำนวณไม่ใช่ปัญหาสำคัญของการควบคุมกระบวนการขั้นสูงอีกต่อไปแล้ว

ตัวควบคุมชนิดหนึ่งซึ่งได้ชื่อว่าเป็นตัวควบคุมกระบวนการขั้นสูงที่มีสมรรถนะดีมากคือ ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ (Model Predictive Controller, MPC) ซึ่งเป็นตัวควบคุมชนิดอาศัยแบบจำลอง (Model Based) โดยใช้แบบจำลองของกระบวนการในการคำนวณค่าตัว

แปรปรับที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการควบคุม และสามารถที่จะใช้กับระบบที่มีค่าจำกัดต่างๆ (Constraint) นอกจากนี้ยังสามารถที่จะกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อให้การควบคุมเป็นไปได้ อย่างราบรื่นและอย่างเหมาะสมได้

แนวโน้มการพัฒนาของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ

1. การพัฒนาอัลกอริทึมของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟเพื่อใช้งานได้สะดวกมากขึ้น และเพิ่มประสิทธิภาพของความเร็วของฮาร์ดแวร์ให้เร็วขึ้นก็ย่อมสามารถที่จะเพิ่มความสามารในการควบคุมให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้รวดเร็วและแม่นยำและตัวแปรปรับเปลี่ยนแปลงไม่รุนแรง

2. ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟจะใช้ในระดับล่างสุดของระบบควบคุมแบบดีซีเอส โดยจะเริ่มมีการใช้ประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแทนการทำงานของตัวควบคุมแบบดั้งเดิมคือพีไอดี

3. การพัฒนาตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ แบบไม่เป็นเชิงเส้น และการพัฒนาการวิเคราะห์แบบจำลองแบบไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อใช้สำหรับควบคุมในระบบที่มีความซับซ้อนและกระบวนการที่มีปฏิสัมพันธ์ภายในต่อกันในภาคอุตสาหกรรม

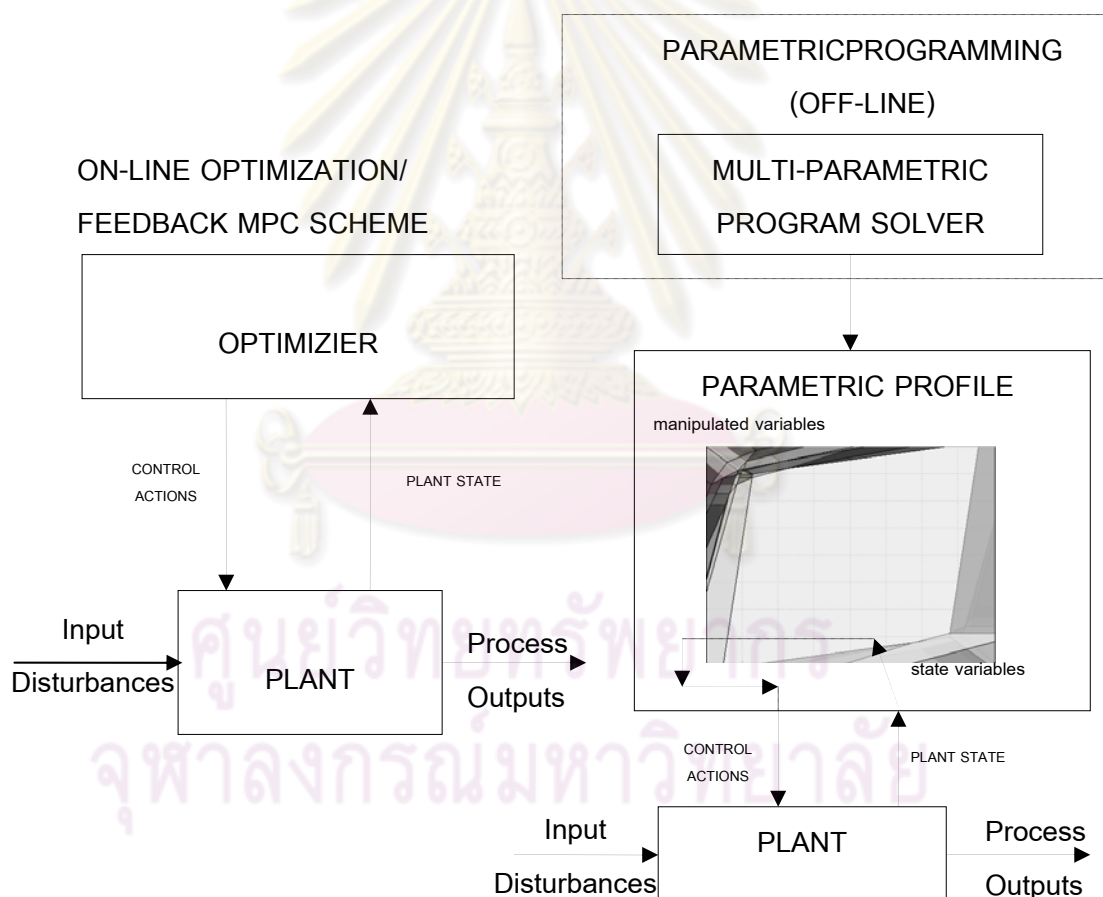
4. การพัฒนาตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟให้มีความทนทานในการควบคุม เพื่อเพิ่มสมรรถนะของการควบคุมของกระบวนการ

อย่างไรก็ตามตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟก็มีข้อจำกัดบางเรื่องเช่น ถ้ากระบวนการมีความซับซ้อนอย่างมาก มีปัญหาในการคำนวณเพื่อใช้ในการปรับตัวแปรปรับเพราะตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟเป็นการคำนวณแบบออนไลน์ (On-line) ส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการควบคุมกระบวนการ Pistikopoulos และคณะ [3] ได้นำเสนออัลกอริทึมใหม่คือ การแก้ปัญหาออนไลน์ออฟติไมซ์เซชันด้วยการคำนวณออฟไลน์ (Off-line) โดยวิธีพาราเมตริกโปรแกรม พื้นฐานของเทคนิคนี้คือจะทำการคำนวณออฟไลน์ก่อน และส่งผลการคำนวณไปใช้ในการปรับกระบวนการ โดยในการคำนวณออฟไลน์นั้นจะหาคำตอบในรูปแบบผลเฉลยแบบเอกซ์พลิต (Explicit Solution) ออกมาเพื่อใช้กำหนดจุดคำตอบที่เหมาะสมในช่วงระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการเมื่อกระบวนการไม่มีความคลาดเคลื่อนโดยใช้มัลติพาราเมตริกโปรแกรม (multi-parametric programming) ส่งผลให้การคำนวณแบบออนไลน์ออฟติไมซ์เซชันของฟังก์ชันลดเพื่อหาชุดตัวแปรปรับในขั้นต่อไปจะกระทำได้ง่ายขึ้น

แผนผังอธิบายการคำนวณแบบพาราเมตริกโปรแกรมและการคำนวณแบบออนไลน์ออฟติไมซ์เซชัน แสดงดังรูปที่ 1.1 ซึ่งการคำนวณแบบพาราเมตริกโปรแกรมจะทำการคำนวณแบบออฟไลน์ไว้ก่อน หลังจากนั้นทำการคำนวณแบบออนไลน์โดยการรับค่าสแตตจากกระบวนการเพื่อส่งต่อไปในส่วนพาราเมตริกโปรแกรมที่คำนวณไว้ก่อน จากนั้นทำการคำนวณตัวแปร

ปรับเพื่อไปปรับกระบวนการเข้าสู่ค่าเป้าหมายต่อไป ซึ่งจะแตกต่างกับการคำนวณแบบออนไลน์ ออกปติไมซ์เซชัน ซึ่งทำการรับค่าสแตทจากกระบวนการเข้าสู่ฟังก์ชันของการออกปติไมซ์เซชัน หลังจากนั้นทำการออกปติไมซ์เซชันแล้วคำนวณหาค่าตัวแปรปรับเพื่อไปปรับกระบวนการเข้าสู่ค่าเป้าหมายต่อไป

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษากระบวนการที่มีความซับซ้อนและมีปฏิสัมพันธ์ภายในโดยทำการสร้างชุดทดลองเป็นระบบสี่ถัง ซึ่งเป็นระบบที่มีความซับซ้อนและมีปฏิสัมพันธ์ภายในต่อกัน ชุดการทดลองแบ่งวงจรควบคุมเป็น 2 วงจร โดยถ้าควบคุมวงจรหนึ่งจะส่งผลกระทบต่ออีกวงจรหนึ่งด้วย ซึ่งกระบวนการประเภทนี้สามารถควบคุมได้ยากกว่ากระบวนการที่ไม่มีปฏิสัมพันธ์ภายในต่อกัน ถ้าใช้ตัวควบคุมแบบ PID สามารถควบคุมให้ค่าตัวแปรควบคุมเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ แต่พบว่าสมรรถนะในการควบคุมไม่ดี ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้การควบคุมกระบวนการขั้นสูง



รูปที่ 1.1 On-line optimization กับ Multi-Parametric program

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ประยุกต์ตัวควบคุมแบบมัลติพารามетริกโมเดลพรีดิกทีฟสำหรับกระบวนการระบบสี่ถัง
- 2) เปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมแบบมัลติพารามетริกโมเดลพรีดิกทีฟ ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟและตัวควบคุมแบบพีไอดีในการควบคุมระบบสี่ถังโดยวิธีการจำลองภายใต้สถานการณ์ซึ่งแบบจำลองมีความผิดพลาดแฝงอยู่
- 3) เปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมแบบมัลติพารามетริกโมเดลพรีดิกทีฟ ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ และตัวควบคุมแบบพีไอดีในการควบคุมชุดทดลองของระบบสี่ถัง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1) ศึกษาการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบมัลติพารามетริกโมเดลพรีดิกทีฟ
- 2) เขียนโปรแกรมควบคุมระดับของของเหลวโดยการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมมัลติพารามетริกโมเดลพรีดิกทีฟ โดยใช้โปรแกรมแมทแล็บ
- 3) ทำการทดสอบโปรแกรมควบคุมระดับของของเหลวกับชุดการทดลองที่สร้างขึ้นจะควบคุมการทำงาน ประมวลผล และแสดงผลโดยเชื่อมต่อกับระบบควบคุมแบบกระจาย (Distributed Control System; DCS) รุ่น Centum CS3000 ของบริษัท yokogawa ซึ่งจะสามารถรับค่าตัวแปรปรับต่างๆของระบบมาและแสดงผลทางจอคอมพิวเตอร์
- 4) ทำการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของแบบจำลองโดยใช้วิธีการจำลองเทคนิคแบบมอนติคาร์โลและวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยโปรแกรม R (โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ)

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

- 1) ชุดการทดลองระบบสี่ถังสำหรับทดสอบการควบคุมระดับของของเหลว
- 2) สร้างประสบการณ์และความชำนาญให้บัณฑิตในการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบพารามетริกโมเดลพรีดิกทีฟเพื่อควบคุมกระบวนการซึ่งมีความซับซ้อน

1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

- 1) ศึกษากระบวนการควบคุมระดับของของเหลวในกระบวนการระบบสี่ถัง
- 2) ออกแบบชุดทดลองระบบการควบคุมระดับของของเหลวในกระบวนการระบบสี่ถัง

- ระบบสี่ถึง
- 3) สร้างชุดการทดลองระบบการควบคุมระดับของของเหลวในกระบวนการ
 - 4) ศึกษาการใช้โปรแกรมแมทแลบ (MATLAB) และการใช้อุปกรณ์ช่วยต่างๆ
 - 5) ศึกษาการควบคุมโมเดลพีร็ดิกทีฟและการประยุกต์ใช้มัลติพาราเมตริก
- โปรแกรม
- 6) ศึกษาความไม่แน่นอนของแบบจำลองที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของการควบคุมโดยใช้การจำลองแบบเทคนิคมอนติคาร์โล
 - 7) เขียนโปรแกรมการจำลองกระบวนการและทำการควบคุมกระบวนการ
 - 8) สรุปผลและเปรียบเทียบผลการทดลอง
 - 9) ทำการรวบรวมข้อมูลและจัดทำรายงานวิทยานิพนธ์



คุนยัวิทยทรรพยากร
จุพาลงกรณ์มหาวิทยาฬัย

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยต่างๆที่เป็นแหล่งข้อมูลที่สำคัญสำหรับการศึกษาทฤษฎีและแนวทางในการวิจัย รวมทั้งหลักการในการตรวจสอบตัวควบคุม ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 เรื่องหลักๆ ผลงานทางด้านระบบควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ ผลงานที่เกี่ยวข้องกับมัลติพาราเมตริกโมเดลพรีดิกทีฟ

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟและการควบคุมกระบวนการเบื้องต้น

จากการรวบรวมพบว่าระบบควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีพื้นฐานจากระบบการควบคุมแบบออปติมัล (Optimal control) ซึ่งเสนอโดย Zadeh และ Halen [4] ในปีค.ศ. 1962 โดยใช้การโปรแกรมออปติไมซ์แบบเชิงเส้น และใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อยู่ในรูปกำลังสองของตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุม โดยทำการออปติไมซ์ให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าน้อยที่สุด หรือเรียกว่า Least Square Method ซึ่งผลที่ได้ยังไม่ดีกว่าระบบควบคุมแบบพีไอดี ต่อมาในปีค.ศ. 1963 Propoi [5] ได้ปรับปรุงให้มีการคำนวณค่าตัวแปรปรับล่วงหน้าเพื่อให้ตัวแปรควบคุมของระบบเข้าสู่ค่าที่ต้องการอันเป็นที่มาของระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟในปัจจุบัน

ในงานวิจัยของ Klienman [6] ในปีค.ศ. 1970 ได้ใช้วิธีการควบคุมที่มีจุดสิ้นสุดของการคำนวณ (finite horizon concept) ในการหาค่าเกณฑ์ของการควบคุมตัวแปรสเตป้อนกลับ (state feedback gain) ต่อมาในงานวิจัยของ Thomas [7] ในปีค.ศ. 1975 ได้นำรูปแบบสมการแบบควอดราติก (Quadratic) มาใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ในปีค.ศ. 1976 Richalet และคณะ [8] ได้พัฒนาระเบียบวิธีการควบคุมแบบโมเดลฮิวริสติก (Model Predictive Heuristic Control, MPHIC) หรือโมเดลอัลกอริทึม (Model Algorithm Control, MAC) โดยใช้ซอฟต์แวร์ IDCOM แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการเป็นสมการอิมพัลส์ ซึ่งอยู่ในรูปแบบระบบสมการเชิงเส้น สามารถกำหนดการทำนายตัวควบคุมในอนาคตและคำนวณชุดของตัวแปรปรับของกระบวนการ และขอบเขตจำกัดต่างๆ เข้าไว้ในแบบจำลองสำหรับการควบคุม โดยได้นำระเบียบวิธีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับหน่วยฟลูอิดคระตะไลติกแครกกิง (Fluid Catalytic Cracking Unit, FCCU) นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้กับการผลิตพอลิไวนิลคลอไรด์ที่มีขอบเขตจำกัดต่างๆในการดำเนินงาน

ในปี ค.ศ.1980 Cutler และ Ramaker [9] ได้เสนอรายละเอียดของการควบคุมแบบไดนามิกเมตริกซ์ (Dynamic Matrix Control, DMC) และในปี ค.ศ.1980 Prett และ Gillette [10] ได้ประยุกต์ใช้การควบคุมแบบไดนามิกเมตริกซ์กับเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดคตะไลติกแครกกิ่ง โดยใช้แบบจำลองแบบเชิงเส้นซึ่งได้จากการทำการทดสอบการตอบสนองแบบสแต็ป พฤติกรรมของเอาต์พุตของกระบวนการในอนาคตกำหนดโดยผลต่างระหว่างตัวแปรควบคุมกับค่าเป้าหมายน้อยที่สุดกำลังสอง และค่าของตัวแปรปรับที่เหมาะสม สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของเตาหลอมโลหะและพบว่ามีความสามารถในการควบคุมดีกว่าการควบคุมแบบพีไอดี

โดยสรุปว่าอาจกล่าวได้ว่าการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟรุ่นแรกมีอยู่ในอัลกอริทึมโมเดลฮิวริสติกและไดนามิกเมตริกซ์ซึ่งเป็นพื้นฐานในการออกแบบการควบคุมในอุตสาหกรรม ต่อมาวิศวกรบริษัทเชลล์ได้พัฒนาอัลกอริทึมของการควบคุมแบบไดนามิกเมตริกซ์ในรูปแบบควอดราติกโปรแกรม(Quadratic Program, QP) เรียกว่า ควอดราติกไดนามิกเมตริกซ์ (Quadratic Dynamic Matrix Control, QDMC) โดยขอบเขตจำกัดต่างๆ จะปรากฏอย่างชัดเจนในอัลกอริทึมสำหรับการควบคุม ซึ่งรูปแบบเหมือนกับการควบคุมแบบไดนามิกเมตริกซ์ แตกต่างเพียงการคำนวณค่าตัวแปรปรับนั้นเป็นผลเฉลยของปัญหาควอดราติกโปรแกรมเท่านั้น

ในปีค.ศ. 1982 Garcia และคณะ [11] ได้เสนออัลกอริทึมการควบคุมแบบอินเทอรัลโมเดล การควบคุมแบบอินเทอรัลโมเดลเป็นการควบคุมสำหรับกระบวนการแบบเชิงเส้นที่มีตัวแปรเข้าออกตัวแปรเดียว (Single Input Single Output, SISO) หรือมีตัวแปรเข้าออกหลายตัวแปร (Multi Input Multi Output, MIMO) ในเบื้องต้นการควบคุมแบบอินเทอรัลโมเดลถูกใช้ในการควบคุมระบบต่างๆที่มีเวลาหน่วง ต่อมาในปีค.ศ. 1991 Clark และคณะ [12] พัฒนาอัลกอริทึมโมเดลเบสพรีดิกทีฟ (Model Base Predictive Control, MBPC) อัลกอริทึมที่ได้รับการยอมรับอย่างมากคือ เจนเนอรัลไลซ์พรีดิกทีฟ (Generalize Predictive) ซึ่งสามารถควบคุมระบบได้ดีมีความทนทาน ลดการคำนวณ และสามารถใช้กับปัญหาการควบคุมกระบวนการต่างๆที่ไม่มีเฟสต่ำสุด (non-minimum phase) และการควบคุมกระบวนการที่ไม่มีเสถียรภาพในรูปเปิดได้ การควบคุมได้ประยุกต์ใช้กับกระบวนการแบบไม่เป็นเชิงเส้น 2 กระบวนการ คือ การควบคุมมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนไม่และการควบคุมพีเอช

ในปีค.ศ. 1997 Qin และ Badgwell [13] ได้พัฒนาการควบคุมโดยใช้แบบจำลองแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear model) เรียกว่าการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Model Predictive, NMPC) โดยสามารถควบคุมโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) ได้มากกว่าหนึ่งฟังก์ชัน แต่ทว่าหาคำตอบได้ยากขึ้น การคำนวณการ

ปรับตัวแปรปรับของการควบคุมทำได้โดยการแก้ปัญหาออปติไมเซชันออนไลน์โดยใช้แบบจำลองแบบไม่เป็นเชิงเส้นในการทำนายเอาท์พุทในอนาคต

ในปีค.ศ. 1998 ศราวูธ [14] ทำการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟสำหรับการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบแบตช์ที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนโดยเปรียบเทียบกันเจเนอริกโมเดล ผลการวิจัยพบว่า การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์สำหรับประมาณค่าความร้อนของปฏิกิริยา ให้ผลการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ได้ดีกว่าเจเนอริกโมเดล รวมทั้งในกรณีที่มีความผิดพลาดของค่าคงที่พารามิเตอร์ และของกระบวนการได้แก่ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน มวลรวมในเครื่องปฏิกรณ์ อัตราการเกิดปฏิกิริยา และความร้อนของปฏิกิริยา โดยโมเดลพรีดิกทีฟสามารถปรับตัวเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้อย่างรวดเร็วกว่า

ในปีค.ศ. 1999 Loeblein และ Perkin [15] ประยุกต์ใช้การควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ สำหรับการปรับปรุงการควบคุมและการออปติไมซ์หน่วยผลิตอะซิโตนของโรงงานแยกแก๊ส ซึ่งมีตัวแปรกระบวนการและความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์มีผลต่อการออปติไมซ์กระบวนการที่จุดปฏิบัติการเช่น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน คุณภาพตัวเร่งปฏิกิริยา คุณภาพของอัตราไหลสายป้อนและความต้องการของตลาดเป็นต้น โดยเมื่อตัวแปรกระบวนการเข้ามากระบวนการ โมเดลพรีดิกทีฟร่วมกับตัวกรองคาลมานจะทำการออปติไมซ์และทำการปรับปรุงการควบคุม แบบจำลองของกระบวนการที่ใช้อยู่ในรูปสเตตสเปซ และการหาผลเฉลยใช้การโปรแกรมควอดราติก

ในปีค.ศ. 1999 ปริญาพร [16] ประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟร่วมกับตัวกรองคาลมานในการควบคุมอุณหภูมิและความเข้มข้นสำหรับเครื่องปฏิกรณ์เคมีถึงกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนอันดับหนึ่ง ซึ่งแสดงพฤติกรรมความไม่เป็นเชิงเส้นสูงพบว่าตัวควบคุมมีสมรรถนะในการควบคุมดี และมีเสถียรของระบบสูงภายใต้ขอบเขตจำกัดต่างๆ ของการดำเนินการเช่น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรกระบวนการระบบ และเมื่อมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์และของกระบวนการทั้งในกรณีที่มีความว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์และกรณีที่มีหลายสภาวะคงตัว

ในปีค.ศ. 2000 Gatzke และ Meadows [17] ได้พัฒนาและประยุกต์ใช้ระบบควบคุมขั้นสูง โดยทดสอบการควบคุมระดับของเหลวในระบบสี่ถังโดยใช้วิธีการควบคุมซึ่งอาศัยแบบจำลอง และพัฒนาแบบจำลองจากการทดลองโดยใช้วิธีอย่างง่ายและเปรียบเทียบกับตัวควบคุม Internal Model Control (IMC) กับ Dynamic Matrix Control (DMC)

ในปีค.ศ. 2002 อธิป ถายานูวัตร [18] ได้ทำการสร้างชุดการทดลอง และตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ สำหรับควบคุมระดับของเหลวแบบเฉลี่ยซึ่งมักใช้เป็นถังพักที่เชื่อมระหว่างหน่วยปฏิบัติการ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้การเปลี่ยนแปลงของอัตราไหลเป็นไปอย่างราบรื่น ซึ่งสรุปได้ว่าการควบคุมของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟสามารถทำงานได้เป็นไปตามแนวทางที่ต้องการเป็นอย่างดีและทำการเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีและพีไอ

ในปีค.ศ. 2006 Raff และคณะ [19] ศึกษาเสถียรภาพของตัวควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยใช้การทดลองควบคุมระดับของเหลวในระบบสี่ถังเป็นกรณีศึกษา โดยกรณีศึกษาแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ Zero terminal state constraint และ Quasi-infinite horizon ทำการเปรียบเทียบกับเวลาในการคำนวณและสมรรถนะในการควบคุม พบว่าตัวควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เป็นเชิงเส้นในกรณีของ Quasi-infinite horizon ใช้เวลาในการคำนวณต่ำกว่าและสมรรถนะในการควบคุมดีกว่ากรณีของ Zero terminal state constraint

ในปีค.ศ. 2006 Mercango และ Doyle [20] ได้นำเสนอกรอบการทำงาน Distributed model predictive control (DMPC) โดยเสนอวิธีการประมาณค่าแบบใหม่ และทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของการควบคุมแบบกระจายส่วนให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ในปีค.ศ. 2009 Biswas และ Srivastava [21] ได้นำเสนอระเบียบวิธีใหม่โดยใช้ตัวควบคุมแบบ Sliding mode และนำไปใช้กับการทดลองระบบสี่ถังและเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบ PI ซึ่งตัวควบคุมแบบ Sliding mode มีความทนทานและสมรรถนะสูงกว่าตัวควบคุมแบบ PI

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับมัลติพารามเมตริก

Pistikopoulos และคณะ [3] ในปีค.ศ. 2001 ได้นำเสนอระเบียบวิธีใหม่คือ การแก้ปัญหาออนไลน์ออฟติไมซ์เซชันด้วยการคำนวณออฟไลน์ (Off-line) โดยวิธีพารามเมตริกโปรแกรม พื้นฐานของเทคนิคนี้คือจะทำการคำนวณออฟไลน์ก่อน และส่งผลการคำนวณไปใช้ในการปรับกระบวนการ โดยในการคำนวณออฟไลน์นั้นจะหาคำตอบในรูปแบบผลเฉลยแบบเอกซ์พลีซิท (Explicit Solution) ออกมาเพื่อใช้กำหนดจุดคำตอบที่เหมาะสมในช่วงระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการเมื่อกระบวนการไม่มีความคลาดเคลื่อนโดยใช้มัลติพารามเมตริกโปรแกรม (multi-parametric programming) ส่งผลให้การคำนวณแบบออนไลน์ออฟติไมซ์เซชันของฟังก์ชันลดเพื่อหาชุดตัวแปรปรับในขั้นต่อไปจะกระทำได้ง่ายขึ้น

ในปีค.ศ. 2001 Tondel และคณะ [22] ได้เสนอการหาผลเฉลยแบบเอกซ์พลีซิท โดยกำหนดข้อจำกัดของปัญหาออฟติไมซ์เซชันเป็นแบบเชิงเส้น โดยการควบคุมแบบโมเดลพรีดิก

ที่พีได้จากวิธีการแก้ปัญหามัลติพาราเมตริกควอดราติกโปรแกรมมิ่ง (mp-QP) และทำการศึกษาคุณสมบัติการแบ่งส่วนของรูปหลายเหลี่ยม (polyhedral partition) ของสเตตสเปซ โดยวิธีการแก้ปัญหามัลติพาราเมตริกแบ่งเป็นหลายๆส่วน และได้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหามาใหม่โดยใช้ mp-QP เปรียบเทียบกับระเบียบวิธีที่มีความคล้ายคลึงกัน และเลือกใช้วิธีการสำหรับแบ่งส่วนพารามิเตอร์สเปซ หลีกเลี่ยงความไม่แน่นอนของการแบ่งส่วนและแก้ปัญหาควอดราติกโปรแกรมมิ่ง ซึ่งระเบียบวิธีนี้สามารถปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมให้ดีขึ้น

ในปีค.ศ. 2003 Borrelli และ Bemporad [23] ได้นำเสนอระเบียบวิธีใหม่สำหรับการแก้ปัญหามัลติพาราเมตริกที่มีขอบเขตแบบเชิงเส้น ซึ่งจะแตกต่างกับการคำนวณออปติไมซ์แบบเชิงเส้น คือ ทำการยัดหลักทางเรขาคณิตในการหาค่าพารามิเตอร์ในสเปซ ซึ่งข้อดีของอัลกอริทึมนี้ คือ ง่ายต่อการคำนวณสามารถแก้ปัญหาล่วงหน้าของเวลา และปัญหาออปติไมซ์คอนโทรลของระบบพลศาสตร์ที่ไม่ต่อเนื่องอยู่ในรูปแบบเชิงเส้นได้

Petter Tondel และ Johansen [24] ในปีค.ศ. 2003 ได้นำเสนอระเบียบวิธีใหม่สำหรับการโปรแกรมมัลติพาราเมตริกของสมการกำลังสองและหาคำตอบของตัวควบคุมโมเดลฟรีดิกที่พีแบบเอกซ์พลีซิท โดยศึกษาสมบัติการแบ่งส่วนรูปหลายเหลี่ยมของตัวแปรสถานะที่กำหนด ซึ่งเป็นคำตอบของการโปรแกรมมัลติพาราเมตริก แล้วเปรียบเทียบกับระเบียบวิธีที่สร้างขึ้นกับระเบียบวิธีที่มีอยู่เดิม พบว่าระเบียบวิธีที่สร้างขึ้นให้การคำนวณที่มีประสิทธิภาพดีกว่าระเบียบวิธีที่มีอยู่เดิม โดยระเบียบวิธีใหม่นั้นจะหลีกเลี่ยงการแบ่งส่วนของปัญหา

จากงานวิจัยที่ผ่านพบว่าได้มีการพัฒนาตัวควบคุมอย่างต่อเนื่อง เริ่มจากการควบคุมอย่างง่าย คือ ตัวควบคุมแบบพีไอดี ไปยังการควบคุมกระบวนการขั้นสูงและนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการต่างๆ โดยเฉพาะกระบวนการที่มีปฏิสัมพันธ์ภายในต่อกัน โดยในงานวิจัยนี้สนใจกระบวนการที่มีปฏิสัมพันธ์ภายในต่อกัน และได้ประยุกต์ใช้ในกระบวนการระบบสี่ถังซึ่งเป็นกระบวนการที่มีปฏิสัมพันธ์ภายในต่อกันและสามารถสร้างชุดทดลองเพื่อทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ ส่วนตัวควบคุมที่นำมาทดสอบในงานวิจัยนี้ได้ใช้อัลกอริทึมของตัวควบคุมแบบมัลติพาราเมตริกโมเดลฟรีดิกที่พีของ Pistipoulos และคณะ [3] นำมาทดสอบประยุกต์ใช้กับกระบวนการระบบสี่ถัง และเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมโดยการจำลองกระบวนการและการทดลองกระบวนการจริง ตัวควบคุมที่พิจารณา คือ ตัวควบคุมแบบพีไอดี, ตัวควบคุมแบบโมเดลฟรีดิกที่พี, ตัวควบคุมแบบมัลติพาราเมตริกโมเดลฟรีดิกที่พี หลังจากนั้นทำการศึกษาสมรรถนะของตัวควบคุมในกรณีแบบจำลองของกระบวนการมีความไม่แน่นอนโดยการจำลองเทคนิคแบบมอนติคาร์โล

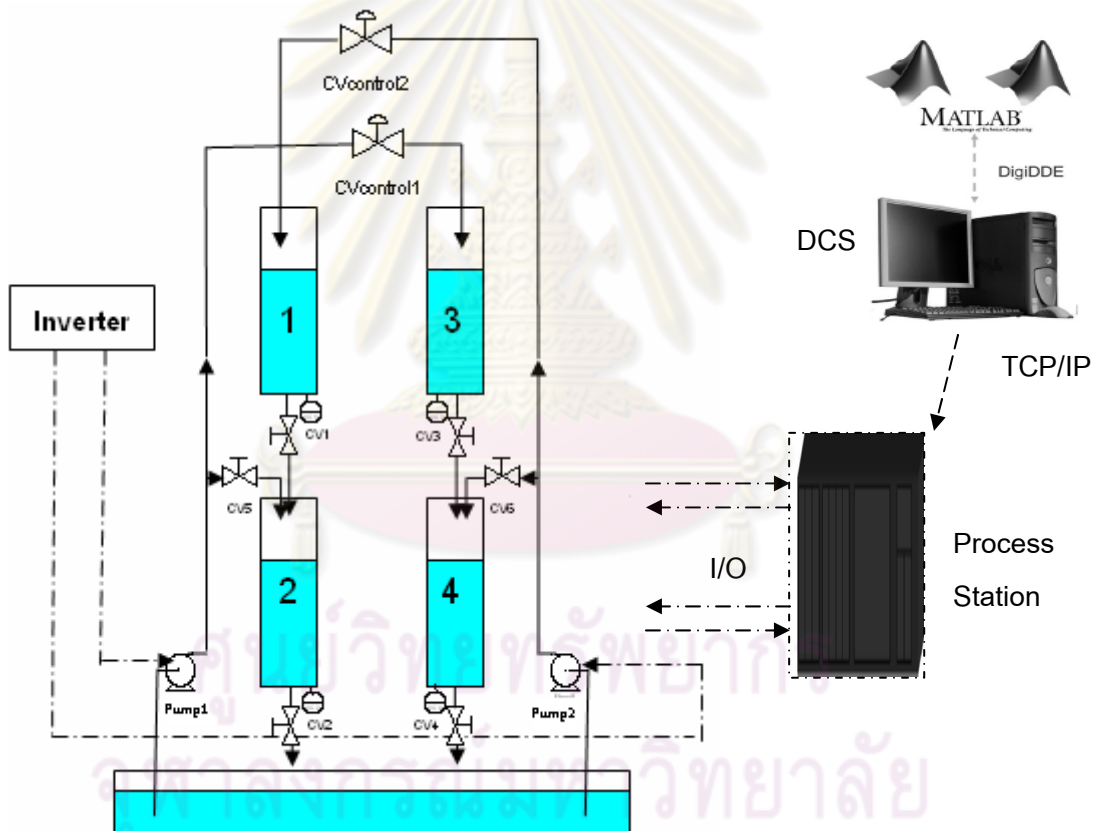
บทที่ 3

กระบวนการระบบสี่ถัง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างชุดการทดลองการควบคุมระดับความสูงของน้ำของกระบวนการระบบสี่ถังโดยบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของอุปกรณ์ชุดการทดลองและการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้กับกระบวนการระบบสี่ถัง

3.1 อุปกรณ์ชุดการทดลองกระบวนการสี่ถัง

ชุดการทดลองกระบวนการควบคุมระดับน้ำแบบ 4 ถัง ประกอบด้วยส่วนประกอบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กระบวนการของระบบสี่ถัง

3.1.1 ถังควบคุมระดับน้ำรูปร่างลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14.5 เซนติเมตร สูง 90 เซนติเมตร ซึ่งผลิตจากอะคริลิค จำนวน 4 ถัง

3.1.2 Pressure transmitter จำนวน 4 ตัว ซึ่งย่านการวัดอยู่ที่ 0 ถึง 100 mbar สัญญาณขาออกเป็นสัญญาณมาตรฐาน 4~20 mA ซึ่งใช้ตรวจวัดระดับความสูงของน้ำในถัง ในงานวิจัยนี้ได้สอบเทียบช่วงของการปฏิบัติการ 0-80 เซนติเมตร (โดยอาศัยความแตกต่างของความดันในถังเทียบกับความดันบรรยากาศแล้วแปลงกลับให้เป็นระดับความสูงของน้ำในถัง)

3.1.3 วาล์วควบคุม (Control Valve) ใช้สำหรับปรับอัตราการไหลของน้ำที่ป้อนเข้าสู่ถังแต่ละใบ โดยวาล์วควบคุมเป็นวาล์วแบบโกลบวาล์ว ยี่ห้อ Samson รุ่น 3241 การตอบสนองของวาล์วมีลักษณะเป็นแบบปกติปิด (Fail Closed) และคุณลักษณะของวาล์วเป็นแบบเชิงเส้น มีค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วสูงสุด $C_{v\max} = 5$ US gallons/min. โดยค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วสูงสุดทั้งสองตัวเท่ากัน รายละเอียดของวาล์วควบคุมมีลักษณะดังนี้

- CVcontrol 1 เป็นวาล์วควบคุม ขนาด 1/2 นิ้ว ใช้ปรับอัตราการไหลของน้ำไหลเข้าถังที่ 3 และถังที่ 2 สำหรับการควบคุมความระดับของความสูงของของเหลวถึงที่ 3 และถึงที่ 2

- CVcontrol 2 เป็นวาล์วควบคุม ขนาด 1/2 นิ้ว ใช้ปรับอัตราการไหลของน้ำไหลเข้าถังที่ 1 และถึงที่ 4 สำหรับการควบคุมความระดับของความสูงของเหลวถึงที่ 1 และถึงที่ 4

3.1.4 ปั๊มน้ำแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Pump) ใช้มอเตอร์ขนาด 1/2 แรงม้า จำนวน 2 ตัว ซึ่งใช้ในการสูบน้ำจากถังพักน้ำไปยังถังควบคุมความสูงของน้ำทั้ง 4 ใบ โดยปั๊มน้ำที่ตัวที่ 1 สูบน้ำป้อนเข้าสู่ถังที่ 2 และถึงที่ 3 และปั๊มน้ำที่ตัวที่ 2 สูบน้ำป้อนเข้าสู่ถังที่ 1 และถึงที่ 4 และปั๊มน้ำทั้ง 2 ตัวจะต่อกับอินเวอร์เตอร์เพื่อใช้ ปรับอัตราการไหลรวมของน้ำในระบบให้ได้ตามอัตราการไหลที่ต้องการ

3.1.5 อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ขนาด 1 แรงม้า จำนวน 2 ตัวต่อเข้ากับปั๊มน้ำโดยอินเวอร์เตอร์ตัวที่ 1 ใช้ปรับแรงดันไฟฟ้าของปั๊มน้ำตัวที่ 1 เพื่อควบคุมอัตราการไหลรวมที่ไหลออกจากปั๊มน้ำตัวที่ 1 และอินเวอร์เตอร์ตัวที่ 2 ใช้ปรับแรงดันไฟฟ้าของปั๊มน้ำตัวที่ 2 เพื่อควบคุมอัตราการไหลรวมที่ไหลออกจากปั๊มน้ำตัวที่ 2

3.1.6 CV1 เป็นบอลวาล์วชนิดทองเหลืองขนาด 1/2 นิ้ว ใช้ปรับตั้งค่าอัตราการไหลออกจากถังที่ 1 ของช่วงที่ทำการทดลอง

3.1.7 CV2 เป็นบอลวาล์วชนิดทองเหลืองขนาด 1/2 นิ้ว ใช้ปรับตั้งค่าอัตราการไหลออกจากถังที่ 2 ของช่วงที่ทำการทดลอง



รูปที่ 3.2 ชุดการทดลองของระบบสั่งถึง

3.1.8 CV3 เป็นบอลวาล์วชนิด ทองเหลืองขนาด 1/2 นิ้ว ใช้ปรับตั้งค่าอัตราการไหลออกจากถังที่ 3 ของช่วงที่ทำการทดลอง

3.1.9 CV4 เป็นบอลวาล์วชนิดทองเหลืองขนาด 1/2 นิ้ว ใช้ปรับตั้งค่าอัตราการไหลออกจากถังที่ 4 ของช่วงที่ทำการทดลอง

3.1.10 CV5 เป็นบอลวาล์วชนิดพลาสติกขนาด 1/2 นิ้ว ใช้ปรับตั้งค่าอัตราการไหลเข้าจากถังที่ 2 ของช่วงที่ทำการทดลอง

3.1.11 CV6 เป็นบอลวาล์วชนิดพลาสติกขนาด 1/2 นิ้ว ใช้ปรับตั้งค่าอัตราการไหลเข้าจากถังที่ 4 ของช่วงที่ทำการทดลอง

3.1.12 ถังพักน้ำเข้ากระบวนการขนาด 180 X 45 X 20 เซนติเมตร

3.1.13 ท่อส่งน้ำ PVC เกรด 13.5 ซึ่งประกอบด้วยท่อขนาด 1/2 นิ้ว, 3/4 นิ้ว และ 1 นิ้ว

3.1.14 โครงสร้างตัวเครื่องมีขนาด 180 X 75 X 240 เซนติเมตร ทำจากเหล็กกล่องขนาด 1 นิ้ว X 1 นิ้ว ทาสีกันสนิม พื้นปูด้วยอะคริลิคความหนา 10 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 3.1 บั๊มน้ำจะสูบน้ำจากถังพัก (Water Reservoir) เพื่อป้อนเข้าสู่ถังที่ 4 ไบ โดยบั๊มตัวที่ 1 สูบน้ำจากถังพักป้อนเข้าสู่ถังที่ 2 และ 3 โดยแบ่งอัตราการไหลเป็นสองสายด้วยการปรับวาล์ว CV5 ซึ่งติดอยู่กับท่อที่ต่อไปยังถังที่ 2 ส่วนวาล์วควบคุมตัวที่ 1 (CVcontrol 1) ทำหน้าที่ปรับอัตราการไหลของน้ำที่มีผลกระทบต่อความสูงของน้ำในถังที่ 2 และถังที่ 3 ส่วนบั๊มตัวที่ 2 จะสูบน้ำจากอ่างน้ำป้อนเข้าสู่ถังที่ 1 และ 4 โดยแบ่งอัตราการไหลเป็นสองสายด้วยการปรับวาล์ว CV6 ซึ่งติดอยู่กับท่อที่ต่อไปยังถังที่ 4 ส่วนวาล์วควบคุมตัวที่ 2 (CVcontrol 2) ทำหน้าที่ปรับ

ที่อัตราการไหลของน้ำที่มีผลกระทบต่อความสูงของน้ำในถังที่ 1 และถังที่ 4 โดยวาล์ว CV1, CV2, CV3, CV4, CV5, CV6 ทำหน้าที่ปรับอัตราการไหลเพื่อปรับระดับความสูงของน้ำในแต่ละถังให้เหมาะสมสำหรับการควบคุม

3.2 อุปกรณ์เชื่อมต่อสั่งการ

3.2.1 เครื่องคอมพิวเตอร์

3.2.2 เครื่องควบคุมแบบกระจายส่วน (Distributed Control System; DCS) รุ่น Centum CS3000 ของบริษัท yokogawa

การแสดงผลและการประมวลผลของการควบคุมกระบวนการโดยเชื่อมต่อกับเครื่องควบคุมแบบกระจายส่วน (Distributed Control System; DCS) รุ่น Centum CS3000 ของบริษัท yokogawa ซึ่งสามารถรับค่าตัวแปรต่างๆของระบบและส่งค่าตัวแปรปรับเพื่อทำการปรับกระบวนการ โปรแกรมที่ใช้คือ โปรแกรม MATLAB สำหรับการคำนวณและการควบคุมกระบวนการ

3.3 การปรับตั้งค่าวาล์วแมนนวล

การปรับระดับความสูงของน้ำในแต่ละถังให้เหมาะสมสำหรับการควบคุมมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เปิดปั๊มตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ปรับอินเวอร์เตอร์ทั้งสองตัวให้ได้อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 30 L/min ด้วยแรงดัน 310 Volt ทั้งสองตัว
2. ทำการปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 1 (CVcontrol1) และตัวที่ 2 (CVcontrol2) อยู่ที่ 50%
3. ปรับระดับความสูงของน้ำถังที่ 1 โดยปรับวาล์ว CV1 ให้ความสูงของน้ำถังที่ 1 มีค่าเท่ากับ 20 เซนติเมตร และปรับระดับความสูงของน้ำถังที่ 2 โดยปรับวาล์ว CV2, CV5 ให้ความสูงของน้ำถังที่ 2 มีค่าเท่ากับ 40 เซนติเมตร
4. ปรับระดับความสูงของน้ำถังที่ 3 โดยปรับวาล์ว CV3 ให้ความสูงของถังที่ 3 มีค่าเท่ากับ 20 เซนติเมตร และปรับระดับความสูงของน้ำถังที่ 4 โดยปรับวาล์ว CV4, CV6 ให้ความสูงของถังที่ 4 มีค่าเท่ากับ 40 เซนติเมตร

โดยค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วสูงสุดของวาล์วควบคุมทั้งสองตัวมีค่า $C_{v\max} = 5$ US gallons/min. เนื่องจากวาล์วมีคุณลักษณะเชิงเส้น ทำการเทียบบัญญัติไตรยางค์ดังตารางที่ 3.1 จะได้ความสูงของน้ำที่สภาวะคงตัวของถังที่ 1 และถังที่ 3 อยู่ที่ 20 เซนติเมตร และ

ความสูงของน้ำที่สภาวะคงตัวของถังที่ 2 และถังที่ 4 อยู่ที่ 40 เซนติเมตร ปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 1 (CVcontrol1) และตัวที่ 2 (CVcontrol2) ให้เปิดที่ 50 % ซึ่งค่าที่สภาวะคงตัวสรุปได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ร้อยละของการเปิดวาล์วควบคุมเทียบบัญญัติไตรยางศ์เป็นค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์ว

ร้อยละของการเปิดวาล์วควบคุม	ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์ว (US gpm / psi ^{0.5})
0%	0
25%	1.25
50%	2.5
75%	3.75
100%	5

ตารางที่ 3.2 ค่าความสูงของน้ำและค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วควบคุมที่สภาวะคงตัว

	ความสูงของน้ำที่ สภาวะคงตัว (m)		ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์ว ควบคุมที่สภาวะคงตัว (US gpm / psi ^{0.5})
ถังที่ 1 (\bar{h}_1)	0.20	วาล์วควบคุมตัวที่ 1 ($C_{CVcontrol1}$)	2.5
ถังที่ 2 (\bar{h}_2)	0.40		
ถังที่ 3 (\bar{h}_3)	0.20	วาล์วควบคุมตัวที่ 2 ($C_{CVcontrol2}$)	2.5
ถังที่ 4 (\bar{h}_4)	0.40		

3.4 ค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการระบบสี่ถัง

การหาค่าพารามิเตอร์กระบวนการของระบบสี่ถัง ได้มาจากการวัดค่าของกระบวนการจริง ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการของระบบสี่ถังมีดังต่อไปนี้

1.ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์ว CV1, CV2, CV3, CV4 หาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$F = C_v \sqrt{\frac{\rho g h}{G_f}} \quad (3.1)$$

C_v = ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์ว (US gpm / psi^{0.5})

F = อัตราการไหลของน้ำ (L/min)

h = ความสูงของน้ำในถัง (m)

g = ค่าแรงโน้มถ่วงเท่ากับ 9.81 m/s²

ρ = ความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 1000 kg/m³

G_f = ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำเท่ากับ 1

กำหนดให้

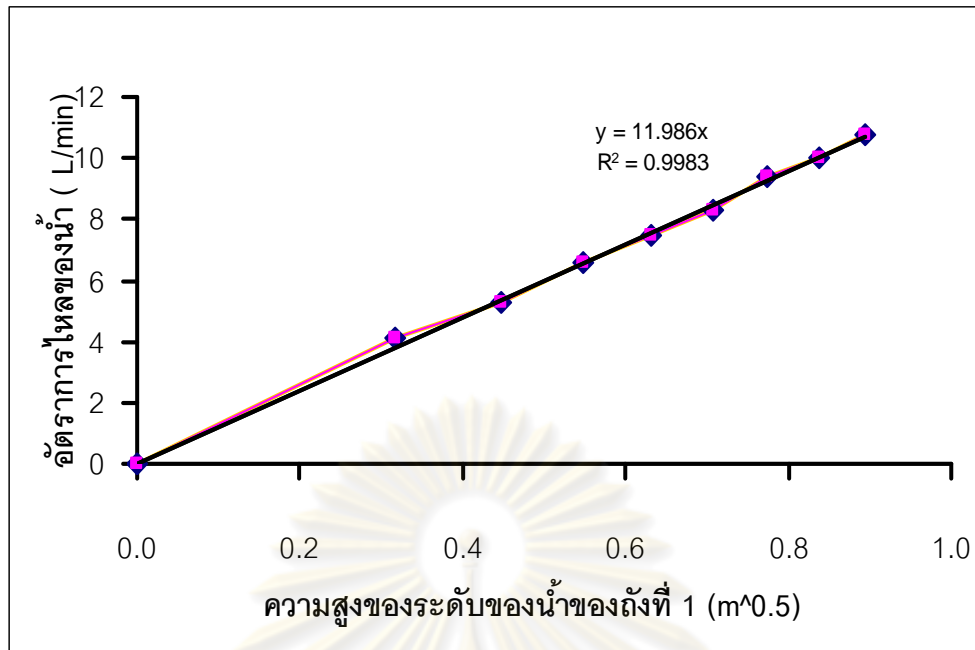
$$m = C_v \sqrt{\frac{\rho g}{G_f}} \quad (3.2)$$

สมการที่ 3.3 แทนสมการที่ 3.1 ได้ดังสมการที่ 3.3

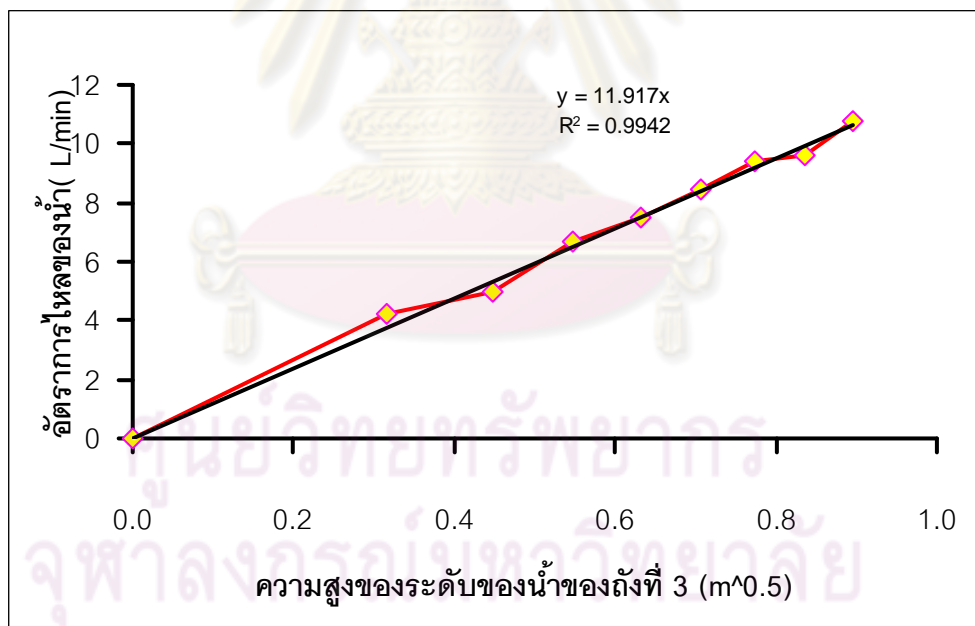
$$F = m \sqrt{h} \quad (3.3)$$

จากสมการที่ 3.3 ทำการวัดอัตราการไหลของน้ำ (F) กับระดับความสูงของน้ำ (h) นำข้อมูลที่วัดได้ทำการพล็อตกราฟหาความชัน นำค่าความชันไปแทนสมการที่ 3.2 เพื่อหา C_v ออกมา

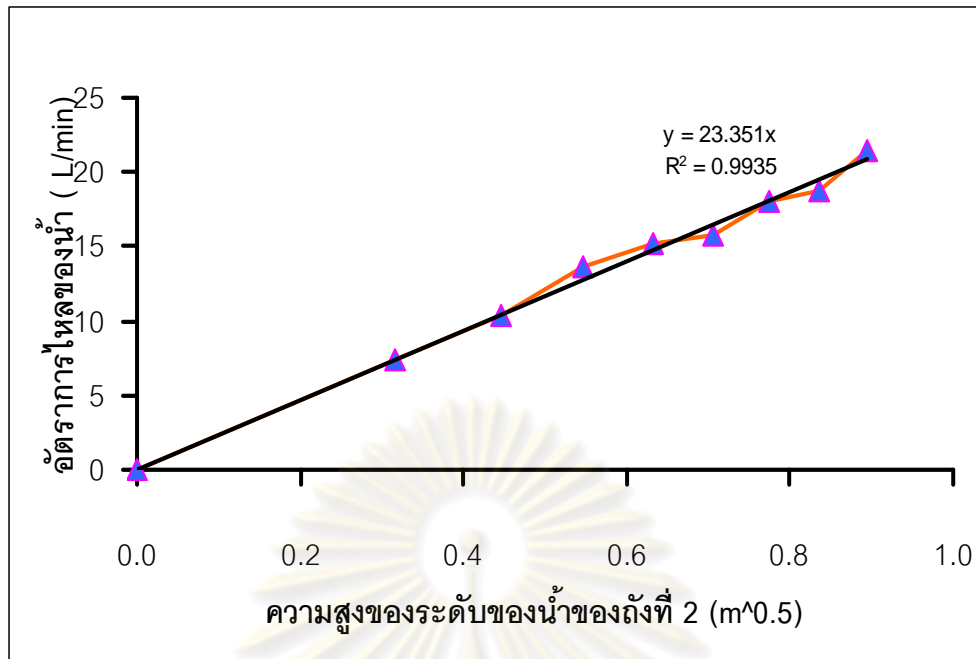
การวัดอัตราการไหลของน้ำโดยใช้วิธีการตวงปริมาณแล้วจับเวลาโดยทำการวัดอัตราการไหลขาออกของวาล์ว ส่วนความสูงของระดับน้ำวัดโดยทำการวัดความสูงของถังหลังจากนั้นกำหนดความสูงระยะที่วัดได้ สังเกตดูระดับของสูงของน้ำตามระยะที่กำหนด ได้ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์ว CV1, CV2, CV3, CV4 โดยได้ความชันจากรูปที่ 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 ดัง และสรุปดังตารางที่ 3.3 (ข้อมูลดิบอยู่ในภาคผนวก จ)



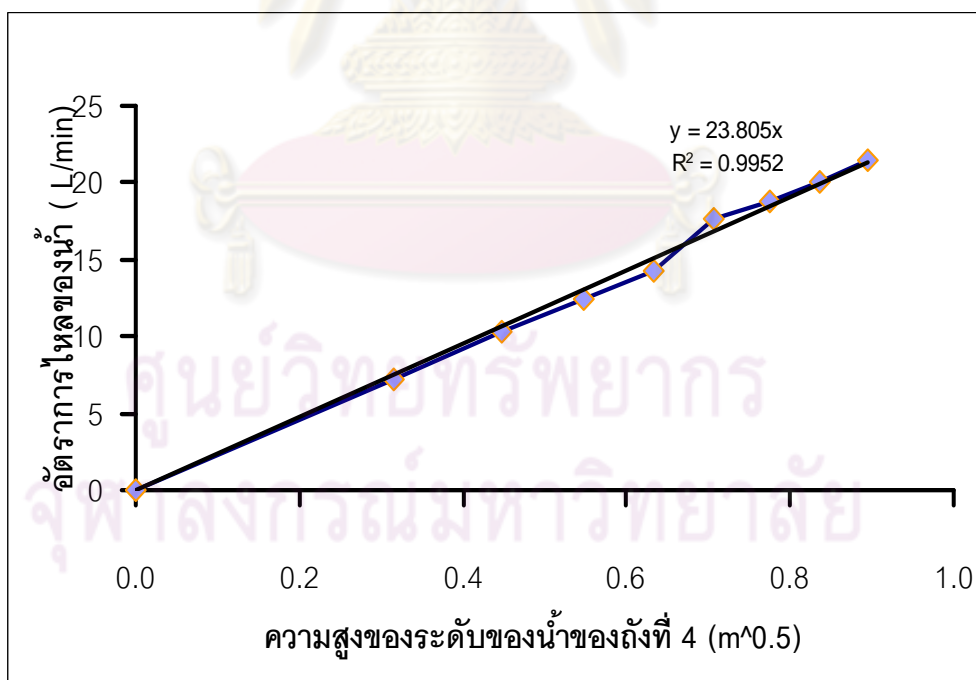
รูปที่ 3.3 ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับ (ความสูงของระดับน้ำของถังที่ 1)^{0.5}



รูปที่ 3.4 ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับ (ความสูงของระดับน้ำของถังที่ 3)^{0.5}



รูปที่ 3.5 ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับ (ความสูงของระดับน้ำของถังที่ 2)^{0.5}



รูปที่ 3.6 ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับ (ความสูงของระดับน้ำของถังที่ 4)^{0.5}

ตารางที่ 3.3 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์ว

	ความชัน (L/(min* \sqrt{m}))	ค่าสัมประสิทธิ์ การไหลของวาล์ว (L/(min* \sqrt{Pa}))	ค่าสัมประสิทธิ์ การไหลของวาล์ว (US gpm/ \sqrt{psi})
วาล์ว CV1	11.98	0.12	2.65
วาล์ว CV3	11.91	0.12	2.65
วาล์ว CV2	23.35	0.24	5.27
วาล์ว CV4	23.80	0.24	5.27

ได้ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์ว CV 1 เท่ากับ 2.65 (US gpm/ \sqrt{psi}) และค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์ว CV 2 เท่ากับ 2.65 (US gpm/ \sqrt{psi}) และค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์ว CV 3 เท่ากับ 5.27 (US gpm/ \sqrt{psi}) และค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์ว CV 4 เท่ากับ 5.27 (US gpm/ \sqrt{psi})

2.ค่าความดันลดคร่อมของวาล์วควบคุม $\Delta P_{CVcontrol1}$ และ $\Delta P_{CVcontrol2}$ หาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$F = C_{VCVcontrol} \sqrt{\frac{\Delta P}{G_f}} \quad (3.4)$$

$C_{VCVcontrol}$ = ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วควบคุม (US gpm / $psi^{0.5}$)

F = อัตราการไหลของน้ำ (L/min)

ΔP = ความดันลดคร่อมของวาล์วควบคุม (psi)

G_f = ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำเท่ากับ 1

กำหนดให้

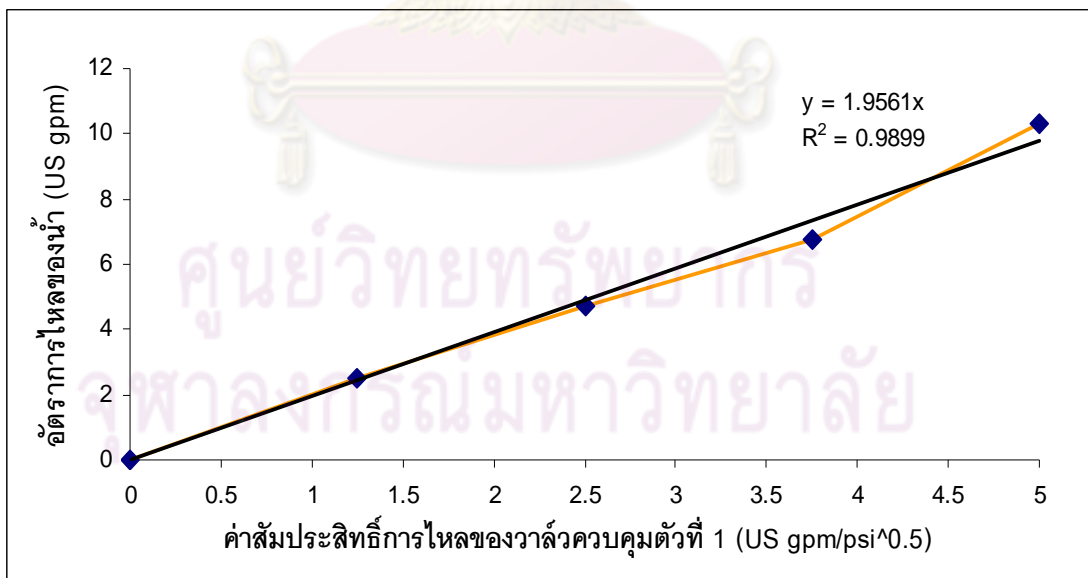
$$m = \sqrt{\frac{\Delta P}{G_f}} \quad (3.5)$$

สมการที่ 3.5 แทนสมการที่ 3.4 ได้ดังสมการที่ 3.6

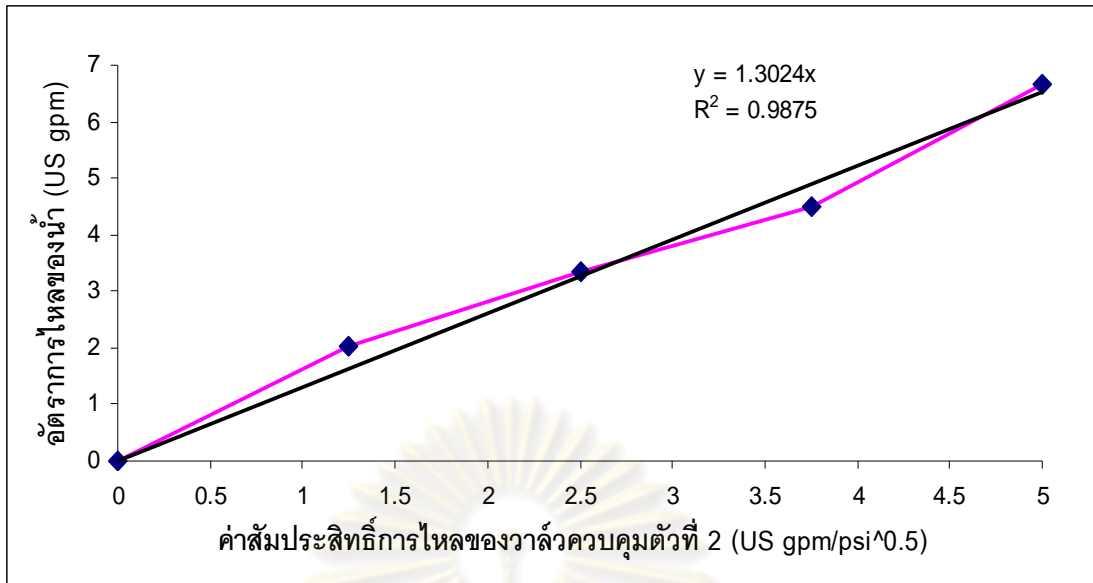
$$F = mC_{VCVcontrol} \quad (3.6)$$

จากสมการที่ 3.3 ทำการวัดอัตราการไหลของน้ำ (F) กับค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วควบคุม $C_{Vcontrol}$ นำข้อมูลที่วัดได้ทำการพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ นำค่าความสัมพันธ์ไปแทนสมการที่ 3.5 เพื่อหา ΔP ออกมา

การวัดอัตราการไหลของน้ำโดยใช้เครื่องวัดอัตราการไหลแบบอัลตราโซนิก ยี่ห้อ 3G Engineering และตั้งค่าหน่วยการวัดเป็น (US gpm) ทำการวัดอัตราการไหลขาออกของวาล์วควบคุม ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วควบคุมทำการเทียบบัญญัติไตรยางศ์กับเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วซึ่งคุณลักษณะของวาล์วควบคุมเป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วควบคุมสูงสุดมีค่า $5 \text{ US gpm} / \text{psi}^{0.5}$ เทียบกับเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วมีค่าเท่ากับ 100 % และค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วควบคุมสูงสุดมีค่า $5 \text{ US gpm} / \text{psi}^{0.5}$ เทียบกับเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วมีค่าเท่ากับ 0 % และ ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วควบคุมสูงสุดมีค่า $2.5 \text{ US gpm} / \text{psi}^{0.5}$ เทียบกับเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วมีค่าเท่ากับ 50 % และค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วควบคุมสูงสุดมีค่า $1.25 \text{ US gpm} / \text{psi}^{0.5}$ เทียบกับเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วมีค่าเท่ากับ 25 % และค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วควบคุมสูงสุดมีค่า $3.25 \text{ US gpm} / \text{psi}^{0.5}$ เทียบกับเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วมีค่าเท่ากับ 75 % ได้ $\Delta P_{CVcontrol1}$ และ $\Delta P_{CVcontrol2}$ ได้ความสัมพันธ์ จากรูปที่ 3.7 และ 3.8 และสรุปตารางการคำนวณหาความดันลดคร่อมของวาล์วตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ดังตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.7 ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วควบคุมตัวที่ 1



รูปที่ 3.8 ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วควบคุมตัวที่ 2

ตารางที่ 3.4 คำนวณความดันลดคร่อมของวาล์วควบคุม

	ความชัน (psi ^{0.5})	ΔP (psi)
วาล์วควบคุมตัวที่ 1	1.96	3.84
วาล์วควบคุมตัวที่ 2	1.30	1.69

ได้ค่าความดันลดคร่อมของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 เท่ากับ 3.84 psi และค่าความดันลดคร่อมของวาล์วควบคุมตัวที่ 2 เท่ากับ 1.69 psi

3. พื้นที่หน้าตัดของถังแต่ละถัง A1, A2, A3, A4 วัดโดยใช้เวอร์เนียคาลิปเปอร์ในการวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของถังแล้วคำนวณพื้นที่หน้าตัดของถังได้ดังนี้

$$A = \pi D^2/4 \quad (3.7)$$

เมื่อ

A = พื้นที่หน้าตัดของถัง (m²)

D = เส้นผ่าศูนย์กลางของถัง (m)

 $\pi = 3.1416$

ตารางที่ 3.5 คำนวณพื้นที่หน้าตัดของถัง

	เส้นผ่าศูนย์กลางของถัง (m)	พื้นที่หน้าตัดของถัง (m ²)
ถังที่1	0.142	0.016
ถังที่2	0.142	0.016
ถังที่3	0.142	0.016
ถังที่4	0.142	0.016

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ตัวควบคุม

ในบทนี้จะนำเสนอความรู้พื้นฐานของตัวควบคุมต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เช่น ตัวควบคุมแบบ PID ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิก ตัวควบคุมแบบมัลติพารามิเตอร์โมเดลพรีดิกทีฟ ซึ่งมีระเบียบวิธีที่แตกต่างกันไป โดยจะมีรายละเอียดดังนี้

4.1 ตัวควบคุมแบบ PID (PID Controller)

ตัวควบคุมแบบ PID พื้นฐานมาจากการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) วัตถุประสงค์ของการควบคุมแบบป้อนกลับ คือ เพื่อลดค่าความผิดพลาด (Error, $e(t)$) ให้เป็นศูนย์โดยที่

$$e(t) = R(t) - B(t) \quad (4.1)$$

เมื่อ $R(t)$ คือ ค่าเป้าหมาย (Set point)

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

วิธีการควบคุมป้อนกลับประกอบด้วย 3 โหมด คือ สัดส่วนหรือพี (Proportional, P) บริพันธ์หรือไอ (Integral, I) และอนุพันธ์หรือดี (Derivative, D) จะให้ Controller Output เป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$p(t) = p + K_c e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int e(t) dt + \tau_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.2)$$

เมื่อ $p(t)$ = เอาท์พุทตัวควบคุม

p = ค่าเบี่ยงเบนหรือค่าเอาท์พุทตัวควบคุมที่สถานะอยู่ตัว

K_c = อัตราการขยายตัวควบคุม (Controller Gain)

τ_i = เวลาบริพันธ์ (Integral Time) หรือ เวลารีเซต (Reset Time)

τ_d = เวลาอนุพันธ์ (Derivative, Time)

ค่าอัตราการขยายตัวควบคุม (K_c) จะใช้เพื่อปรับค่าเอาท์พุทตัวควบคุมให้เปลี่ยนแปลงตามต้องการโดยจะนำไปคูณกับผลต่างระหว่างค่าเป้าหมายกับตัวแปรควบคุม ทั้งนี้ค่า K_c อาจเป็นบวกหรือลบก็ได้ขึ้นอยู่กับต้องการให้ค่าเอาท์พุทตัวควบคุมเพิ่มขึ้นหรือลดลงในขณะที่ค่าผลต่างเพิ่มขึ้น โดยทั่วไป K_c จะไม่มีหน่วย การควบคุมไอให้ผลตอบสนองค่อนข้างช้า

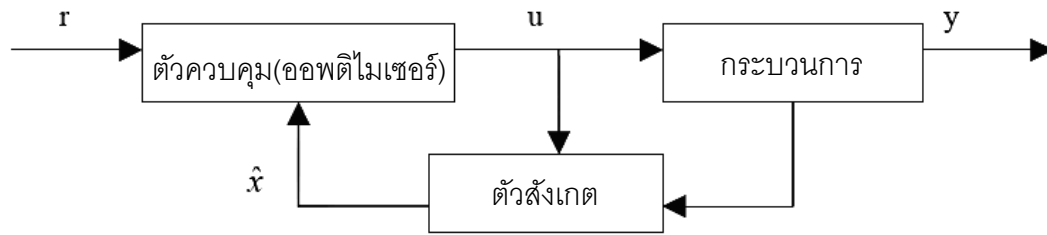
ไม่สามารถทำให้เอาต์พุตของการกระบวนการเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้อย่างรวดเร็ว การควบคุมอัตโนมัติจะให้ผลตอบสนองอย่างรวดเร็วมาก ทำให้ตัวแปรปรับมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างรุนแรง และส่งผลให้ตัวแปรควบคุมเกิดการแกว่ง [26]

4.2 ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ (Model Predictive Control)

ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ (Model Predictive Control, Receding Horizon Control หรือ Moving Horizon Control) [27, 28] เป็นระบบควบคุมที่ใช้แบบจำลองกระบวนการสำหรับประมาณผลตอบสนองของกระบวนการ ร่วมกับเทคนิคการอปติไมเซชันเพื่อหาค่าตัวแปรปรับที่เหมาะสมล่วงหน้า โดยการควบคุมกระบวนการแบบโมเดลพรีดิกทีฟ (MPC) สามารถแบ่งโดยอาศัยลักษณะความเป็นเชิงเส้นของความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ เช่น Dynamic Matrix Control (DMC) กับ MPC ที่อาศัยแบบจำลองที่ไม่เป็นเส้น (มีเทอมของตัวแปรซึ่งคูณกัน, ยกกำลังสอง, เอ็กซ์โปเนนเชียล เป็นต้น) เช่น Receding Horizon Control (RHC) และฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้สามารถประยุกต์ใช้กับกระบวนการต่างๆ ได้ดี ระเบียบวิธีการคำนวณของระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟจะทำการหาค่าตัวแปรปรับใหม่ที่เหมาะสมจากค่าตัวแปรสเตทที่แทนพฤติกรรมของกระบวนการทุกครั้งที่ทำการควบคุม ทำให้ระบบควบคุมสามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในกระบวนการได้แม้แบบจำลองกระบวนการในระบบจะผิดพลาดหรือมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้น และยังสามารถควบคุมกระบวนการให้อยู่บนขอบเขตที่ปลอดภัยได้โดยไม่ต้องปรับปรุงแก้ไขระบบควบคุมบ่อยครั้ง

4.2.1 โครงสร้างของกระบวนการของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ

การควบคุมกระบวนการแบบโมเดลพรีดิกทีฟเป็นการควบคุมที่อาศัยสัญญาณของตัวแปรที่วัดได้ และค่าที่ได้จากการประมาณค่าซึ่งถูกนำไปคำนวณหาตัวแปรปรับที่เหมาะสมตามสถานะของกระบวนการที่เกิดขึ้น ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟอาศัยแบบจำลองของกระบวนการที่ประกอบตัวแปรสเตท ซึ่งบางตัวแปรไม่สามารถทำการวัดค่าได้โดยตรงเพราะฉะนั้นจึงมีการนำตัวสังเกตมาช่วยในการประมาณตัวแปรนั้นๆ ณ เวลาที่ทำการควบคุม โดยอาศัยค่าตัวแปรวัดและตัวแปรปรับ ณ เวลาที่ผ่านมา ทำให้สามารถเขียนโครงสร้างทั่วไปของระบบควบคุมได้ ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ

พิจารณาจากรูปที่ 4.1 ผลกระทบของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในกระบวนการและส่งผลต่อตัวแปรวัดจะถูกกำจัดโดยการประมาณค่าตัวแปรวัดที่ถูกต้องของตัวสังเกต (Observer) ซึ่งนอกจากจะประมาณตัวแปรวัดที่ถูกต้องแล้ว ตัวสังเกตยังสามารถใช้ในการประมาณค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าได้อีกด้วย ในขณะเดียวกันตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟสามารถหาค่าตัวแปรปรับที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการที่มีความผิดพลาดของแบบจำลอง (Model Mismatch) และสัญญาณรบกวน (Disturbance) ที่เกิดในกระบวนการผลิตได้ ตราบเท่าที่แบบจำลองยังสามารถใช้แทนกระบวนการจริงได้

การออปติไมซ์ในระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ ทำเพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการปรับตัวแปรปรับที่ทำให้ตัวแปรควบคุม (y) เข้าสู่ค่าที่ต้องการ (r) โดยทำการควบคุม M ครั้ง ในการออปติไมซ์ล่วงหน้า P ครั้ง ($M < P$) ดังรูปที่ 4.2 เรียกกระบวนการหาค่าตัวแปรปรับค่าแรกที่ได้จากการออปติไมซ์จะถูกนำมาใช้ควบคุมกระบวนการ ณ ปัจจุบัน หลังจากนั้นระบบควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟจะทำการวัดค่าตัวแปรวัดและประมาณค่าตัวแปรสเตทเพื่อนำไปออปติไมซ์หาค่าตัวแปรปรับใหม่ทุกครั้งที่ทำกรวัด

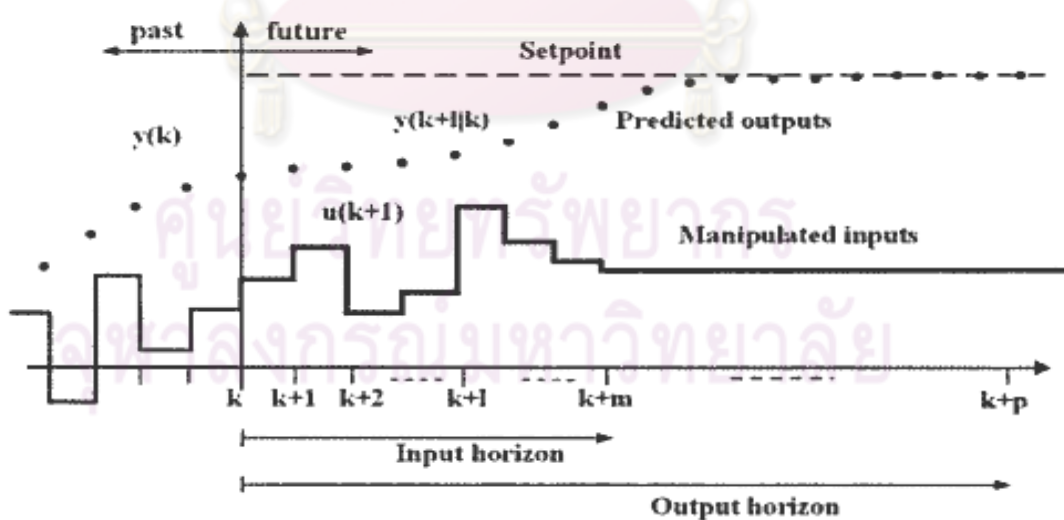
ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีการพัฒนาระเบียบวิธีเป็นหลายรูปแบบ แต่ส่วนประกอบหลักของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนใหญ่ ซึ่งจะเหมือนในทุกระเบียบวิธีคือ

- 1) การหาแนววิถีอ้างอิง (Reference Trajectory Specification) ส่วนประกอบแรกของเอ็มพีซีคือการกำหนดค่าเส้นแนวโน้มของเป้าหมายที่ต้องการสำหรับสัญญาณขาออกของกระบวนการ y_k ซึ่งจะช่วยให้ง่ายในการเปลี่ยนแปลงเข้าไปสู่ค่าเซตพอยต์ใหม่
- 2) การทำนายค่าสัญญาณขาออกของกระบวนการ (Process Output Prediction) เป็นการทำนายค่าเอาต์พุตที่เกิดขึ้นโดยไม่ได้พิจารณาถึงคอนโทรลแอ็กชันที่จะเกิดขึ้นในเวลาต่อไป

- 3) การคำนวณคอนโทรลแ็กชันแบบต่อเนื่อง (Control Action Sequence Computation) โดยการคำนวณแบบต่อเนื่องนี้จะต้องให้เข้ากับเป้าหมายการอปติไมซ์ที่ตั้งไว้เช่น
- ทำให้ค่าการทำนายเอาท์พุทของกระบวนการเบี่ยงเบนจากเป้าหมายในช่วง Prediction horizon น้อยที่สุด
 - ใช้การควบคุมให้น้อยที่สุดในการทำให้ค่าสัญญาณขาออกเข้าสู่ค่าเป้าหมาย
- 4) การทำนายความคลาดเคลื่อนให้ทันกับเหตุการณ์ (Error Prediction Update) โดยการใช้ค่าที่วัดได้จากกระบวนการ y_k เปรียบเทียบกับค่าการทำนายจากแบบจำลอง \hat{y}_k จะได้ค่าทำนายความคลาดเคลื่อน $\hat{\mathcal{E}}_k = y_k - \hat{y}_k$ ซึ่งจะใช้ในการทำนายค่าให้ทันกับเหตุการณ์ต่อไป

4.1.2 ส่วนประกอบของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ

โครงสร้างโดยทั่วไปของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ Clarke และ Scattolini [12] ได้เสนอไว้ประกอบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function - F) ซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ในรูปผลรวมของค่ากำลังสองของความผิดพลาดระหว่างสัญญาณขาออก (Output) กับค่าเป้าหมาย (Set Point) และกำลังสองของค่าตัวแปรปรับ, แบบจำลองของกระบวนการ (Process Model), ฟังก์ชันข้อจำกัดของกระบวนการ (Constraint function) ทั้งในรูปของสมการ (h) และรูปของอสมการ (k) ดังนี้ คือ



รูปที่ 4.2 การหาค่าตัวแปรปรับล่วงหน้าจำนวน M ค่าในการทำนาย P [28]

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $F = f[u(t), x(t), y(t)]$ (4.3)

ดัชนีสมรรถนะ $\min_{u(t)} J; J = \int_{t_0}^{t_0 + PT} F[u(t), x(t), y(t)] dt$ (4.4)

โดยที่

กระบวนการ $\frac{dx}{dt} = f(x, u); y = g(x, u)$ (4.5)

ข้อจำกัดของกระบวนการ $h(x, u) = 0; k(x, u) \geq 0$ (4.6)

ค่าเริ่มต้น $x(t_0) = x_0$ (4.7)

ซึ่งส่วนประกอบสำคัญทั้งสามส่วนอันได้แก่ แบบจำลองของกระบวนการ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และข้อจำกัดของกระบวนการทั้งของตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุม

4.2.3 สมการแบบจำลองของกระบวนการ

ในระบบควบคุมโมเดลพีรีดิกทีฟสมการแบบจำลองกระบวนการสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามกระบวนการที่ใช้งาน จากงานวิจัยที่ผ่านมาพอจะสรุปรูปแบบของแบบจำลองของกระบวนการได้ 3 รูปแบบ ดังนี้

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

ฟังก์ชันพัลส์ (Pulse function)

$$y_k = \sum_{j=0}^p H_j u_{k-j-1} \quad (\text{Finite Impulse Response Model-FIR}) \quad (4.8)$$

ฟังก์ชันสเต็ป (Step function)

$$y_k = \sum_{j=0}^p S_j \Delta u_{k-j-1} \quad (\text{Finite Step Response Model-FSR}) \quad (4.9)$$

โดยที่เมตริกซ์ H และ S เป็นเมตริกซ์ค่าคงที่ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function)

ฟังก์ชันการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรควบคุมกับตัวแปรวัดในรูป z โดเมนโดยสามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนระบบวงเปิดที่เป็นเศษส่วนของพจน์โพลิโนเมียล

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{B(z)}{A(z)} \quad (4.10)$$

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

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

โดยที่ $\alpha(z) = z^n + \alpha_1 z^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} z + \alpha_n$
 $\beta(z) = \beta_0 z^n + \beta_1 z^{n-1} + \dots + \beta_{n-1} z + \beta_n$

จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิด

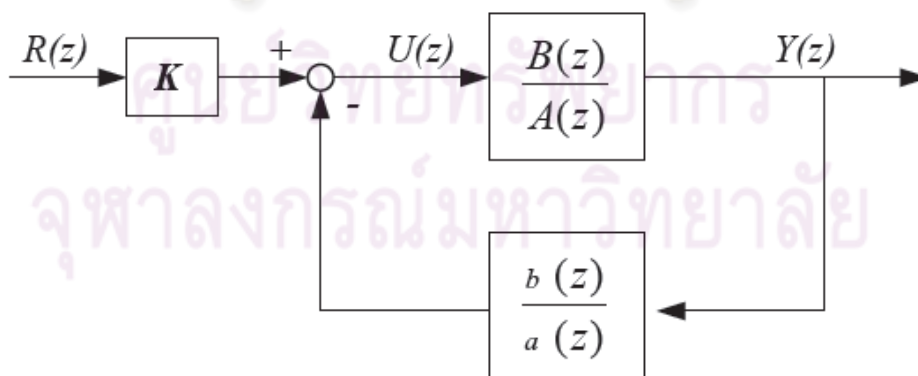
$$\frac{Y(z)}{R(z)} = K \frac{\alpha(z)B(z)}{H(z)F(z)} \quad (4.11)$$

โดยที่ค่า K เป็นค่าเกนของระบบควบคุม

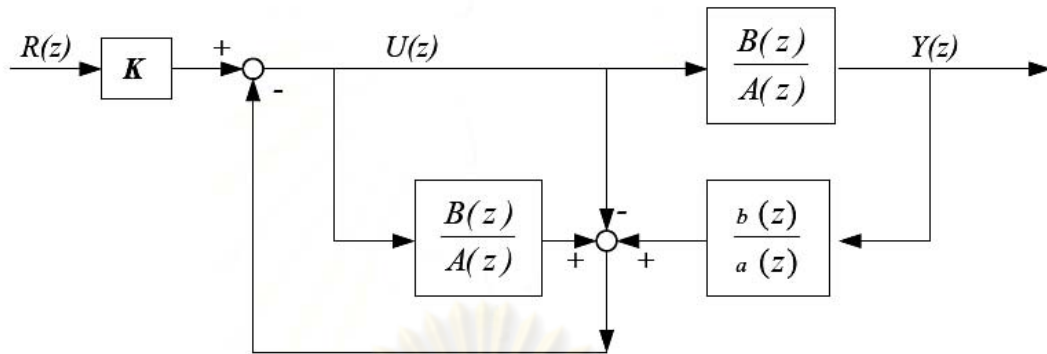
และถ้าระบบควบคุมมีตัวสังเกต (Observer)

$$\frac{Y(z)}{R(z)} = K \frac{B(z)}{H(z)} \quad (4.12)$$

โดยที่ F(z) เป็นฟังก์ชันโพลีโนเมียลของตัวสังเกต



รูปที่ 4.3 แผนภาพการควบคุมโดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นแบบจำลอง



รูปที่ 4.4 แผนภาพของการควบคุมโดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นแบบจำลองพร้อมด้วยสังเกต

2) สมการตัวแปรสแตต (State Equation) เป็นแบบจำลองเชิงเส้นเขียนอยู่ในรูปตัวแปรสแตต (State variable) เช่น ตัวแปรปรับ (แทนสัญลักษณ์ u) ตัวแปรสแตต (แทนด้วยสัญลักษณ์ x) และตัวแปรวัด (แทนด้วยสัญลักษณ์ y) และตัวแปรสแตตบางตัวแปรไม่สามารถวัดโดยตรงได้แต่สามารถประมาณค่าได้จากตัวแปรที่วัดได้ สมการทั่วไปของกระบวนการเพื่อใช้แทนกระบวนการจริงในระบบควบคุมโมเดลพีรีดิกทีฟที่สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (4.13)$$

$$y = g(x, d)$$

โดยที่ \dot{x} คือ เวกเตอร์สถานะ

u คือ เวกเตอร์ของตัวแปรปรับ (สัญญาณขาเข้ากระบวนการ)

กรณีที่แบบจำลองของกระบวนการมีความไม่เป็นเชิงเส้น ในการเขียนสมการสแตตจึงต้องทำการแปลงแบบจำลองให้เป็นสมการเชิงเส้น ซึ่งเรียกเทคนิคนี้ว่าการแปลงเชิงเส้น (Linearization) และถ้าทำการแปลงให้เป็นเชิงเส้นใหม่ทุกค่าของการควบคุมจะเรียกว่า (Locally Linearization) หลังจากการแปลงให้เป็นเชิงเส้นจะได้สมการสแตตของกระบวนการทั้งในรูปของสมการต่อเนื่อง และสมการไม่ต่อเนื่อง (Discrete)

สมการต่อเนื่อง

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (4.14)$$

$$y = Cx$$

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

$$\dot{\hat{x}}_{k+1} = G\hat{x}_k + H\hat{u}_k \quad (4.15)$$

$$y = C\hat{x}_k$$

โดยที่ G , H , และ C เป็นเมตริกซ์ของค่าคงที่

$$G = e^{AT} = I + A\Psi$$

$$H = \Psi B \quad (4.16)$$

$$\Psi = T + \frac{AT^2}{2!} + \frac{A^2T^3}{3!} + \dots + \frac{A^i T^{i+1}}{(i+1)!} + \dots$$

$T =$ คาบของการควบคุม

4.2.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function)

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือฟังก์ชันที่กำหนดสมรรถนะของการออกแบบที่ไม่ใช่ ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ให้ผลเป็นค่าบวกเพียงค่าเดียวในกรณีที่กำลังหาค่าที่น้อยที่สุด (เป็นลบในกรณีที่กำลังหาค่ามากที่สุด) สามารถเปลี่ยนแปลงตามกระบวนการหรือตัวแปรที่ต้องการออกแบบในระบบตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ ส่วนมากจะเขียนฟังก์ชันเป้าหมายในรูปกำลังสองของตัวแปรควบคุมและตัวแปรปรับ โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในรูปของตัวแปรควบคุมและตัวแปรวัดคือ ฟังก์ชัน

เป้าหมายในรูปกำลังสองของตัวแปรควบคุมและตัวแปรปรับหรือสมการควอดราติก โดยกำหนดให้ตัวแปรควบคุมมีความผิดพลาดยกกำลังสองน้อยที่สุด และคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรปรับ โดยกำหนดปัจจัยถ่วงน้ำหนักเพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ต้องการ

$$F = (y_r - \hat{y})^T Q (y_r - \hat{y}) + (u_k - u_{k-1})^T R (u_k - u_{k-1}) \quad (4.17)$$

เมื่อ

y_r	คือ ค่าเป้าหมาย
\hat{y}	คือ ตัวแปรวัดที่ได้จากการทำนาย
Q, R	คือ เมตริกซ์น้ำหนักของตัวแปรสเตทและตัวแปรปรับ
$u_k - u_{k-1}$	คือ การเปลี่ยนแปลงตัวแปรตั้งแต่ ณ เวลาที่ปัจจุบันเป็นต้นไป

เพื่อให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นฟังก์ชันที่เป็นบวกจึงเขียนให้อยู่ในรูปยกกำลังสองของตัวแปรสเตทและตัวแปรปรับ โดยมีเมตริกซ์บวก (Positive definite) Q และ R เป็นเมตริกซ์น้ำหนักของตัวแปรสเตทและตัวแปรปรับตามลำดับ ซึ่งเมตริกซ์น้ำหนัก Q และ R เป็นเมตริกซ์ที่ระบุความสำคัญของตัวแปรในการควบคุมและการปรับจูนของระบบควบคุมเป็นค่าที่สามารถปรับเปลี่ยนได้

เมื่อพิจารณาฟังก์ชันเป้าหมายในระบบควบคุมโมเดลพีรีดิกทีฟตลอดเวลาการควบคุมให้ค่าตัวแปรควบคุมเข้าสู่ค่าที่ต้องการภายในการควบคุม M ค่าและการคำนวณผลตอบสนองกระบวนการ P ค่าทำให้สามารถหาค่าดัชนีสมรรถนะ (J) ได้ดังสมการดังนี้

$$J = \int_0^{t+PT} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad \text{หรือ} \quad (4.18)$$

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

ระบบควบคุมโมเดลพีรีดิกทีฟที่สามารถควบคุมให้ค่าตัวแปรปรับเข้าสู่ค่าที่ต้องการภายในเวลา M ทำให้ค่าตัวแปรปรับและตัวแปรสเตทมีค่าเท่ากับศูนย์ทำให้สามารถเขียนฟังก์ชันดัชนีสมรรถนะ (J) คือ

$$J = \sum_k^{k+M} (x^T Q x + u^T R u) \quad (4.19)$$

ภายใต้เงื่อนไข

$$x_{k+1} = G x_k + H u_k$$

นำหลักการของ Lagrange Multipliers ทำให้รวมสมการ ได้สมการหาตัวชี้สมรรถนะใหม่ในสมการ

$$L(x,u) = \sum_k^{k+M} \left[\frac{1}{2} (x_k^T Q x_k + u_k^T R u_k) + \lambda_{k+1} (G x_k + H u_k - x_{k+1}) \right] \quad (4.20)$$

เมื่อทำการแก้สมการจะได้สมการรีคาติ (Riccati Equation) ช่วยในการแก้สมการเพื่อให้ได้เมตริกซ์น้ำหนัก P สำหรับการคำนวณหาค่าเกณฑ์ของระบบควบคุม และหาชุดตัวแปรปรับสำหรับการควบคุมกระบวนการต่อไป ในกรณีที่เมตริกซ์น้ำหนัก P Q และ R มีค่าคงที่จะเรียกกระบวนการนี้ว่าระบบควบคุมออปติมัดคงตัว (Steady State Optimal Control) จะได้สมการรีคาติ ซึ่งจะทำให้ค่า P_k ที่ได้จะมีค่าเข้าสู่ค่าคงที่

$$P_k = Q + G P_{k+1} G^T - G P_{k+1} H^T (R + H P_{k+1} H^T)^{-1} H P_{k+1} G^T \quad (4.21)$$

และสมการหาค่าเกณฑ์สำหรับวิธีควบคุมป้อนกลับ (State Feedback) จากสมการ ในการควบคุมทำการหาค่าเพียงครั้งเดียวคือ ณ เวลาควบคุม

$$K_k = R^{-1} H^T (G^T)^{-1} (P_k - Q) \quad (4.22)$$

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

$$U_k = -K_k x_k \quad (4.23)$$

ข้อจำกัดของตัวแปรปรับและตัวแปรสถานะ

ในปัจจุบันระบบควบคุมโมเดลพีรีดิกทีฟสามารถควบคุมระบบให้อยู่ภายในข้อจำกัดของตัวแปรปรับและตัวแปรสเตตที่ต้องการได้นอกเหนือจากข้อจำกัดของกระบวนการที่กล่าวมาแล้ว การแบ่งชนิดของข้อจำกัดสามารถแบ่งตามรูปแบบของสมการขอบเขตได้สองชนิดคือ ข้อจำกัดแบบสมการ (equality constraint) และ ข้อจำกัดแบบอสมการ (inequality constraint) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

(1) ข้อจำกัดแบบสมการ (equality constraint) มีลักษณะเป็นสมการที่หาค่าได้ชัดเจนสามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ดังนี้

$$h(x,u) = 0 \quad (4.24)$$

ดังเช่น สมการข้อจำกัดของกระบวนการ

$$Gx_k + Hu_k - x_{k+1} = 0 \quad (4.25)$$

(2) ข้อจำกัดแบบอสมการ (inequality constraint) มีลักษณะเป็นอสมการที่กำหนดข้อจำกัดของตัวแปรภายในกระบวนการซึ่งทั่วไปเขียนได้ดังนี้

$$G(x,u) > 0 \quad (4.26)$$

ในปัจจุบันข้อจำกัดแบบอสมการยังแบ่งได้สองประเภทคือ อสมการที่มีขอบเขตชัดเจนเรียกว่า Hard Constraint และอสมการที่มีขอบเขตไม่ชัดเจนเรียกว่า Soft Constraint

(2.1) ข้อจำกัดแบบอสมการที่มีขอบเขตชัดเจน (Hard Constraint)

$$u_{\min} \leq u \leq u_{\max} \quad (4.27)$$

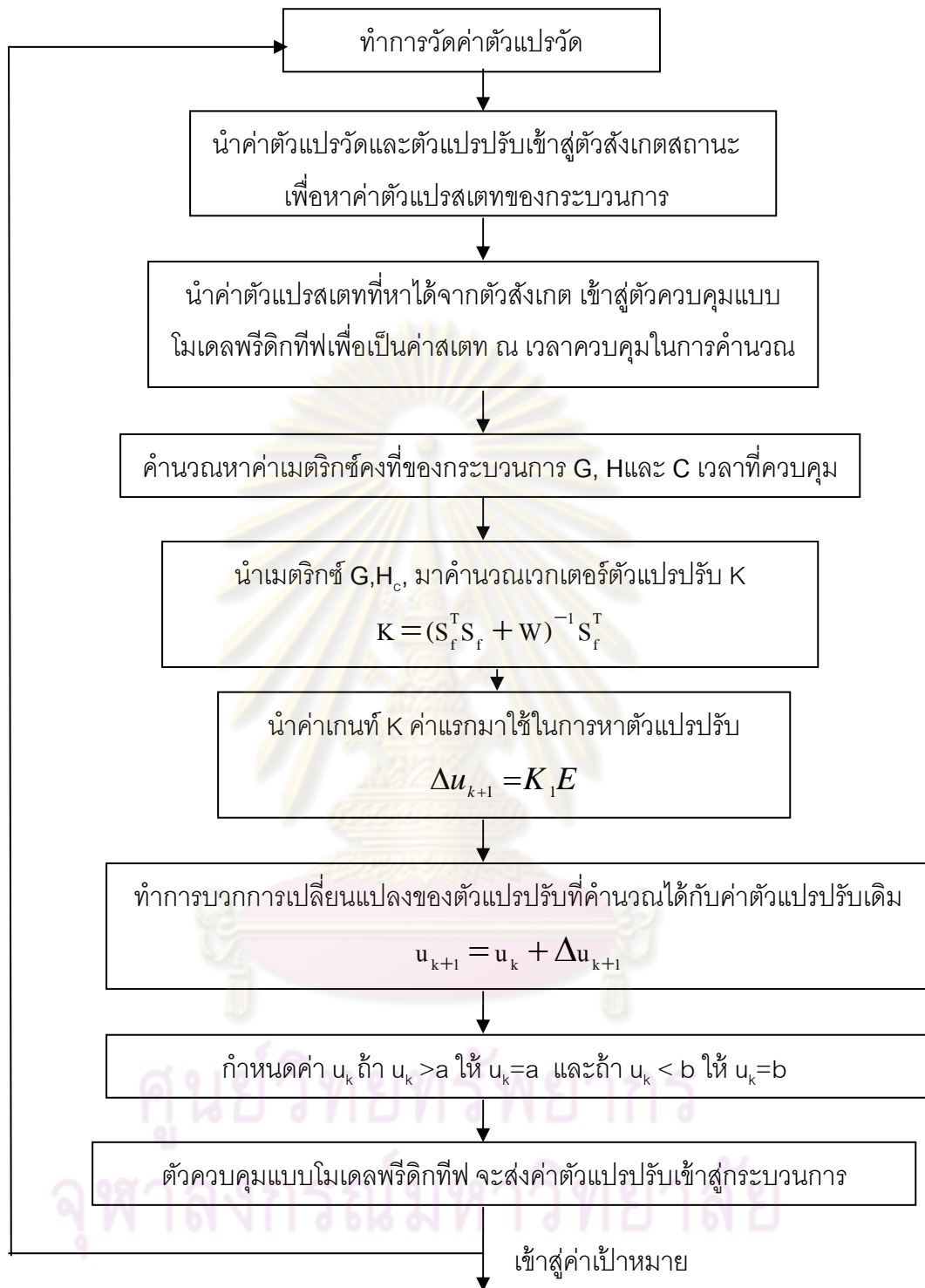
(2.2) ข้อจำกัดแบบอสมการที่มีขอบเขตไม่ชัดเจน (Soft Constraint)

$$\begin{aligned} u_{\min} \pm \varepsilon \leq u \leq u_{\max} \pm \varepsilon \\ 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{\max} \end{aligned} \quad (4.28)$$

ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟสามารถเพิ่มข้อจำกัดทั้งในรูปของสมการและในรูปของอสมการ โดยในการเพิ่มข้อจำกัดแบบอสมการมีความยุ่งยากและซับซ้อนและใช้เวลาในการคำนวณนานทำให้ไม่สะดวกต่อการใช้งานในอุตสาหกรรม ในการศึกษาระบบควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่กำหนดข้อจำกัดของตัวแปรสแตตและตัวแปรปรับจะใช้ข้อจำกัดของตัวแปรปรับของระบบควบคุมระดับล่างแทน (ตัวควบคุมแบบพีไอดี- PID Controller) เพื่อไม่ให้มีการควบคุมอยู่นอกเหนือขอบเขตของตัวแปรปรับที่สามารถทำได้

4.2.5 อัลกอริทึมของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ

ในการศึกษานี้ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟที่ใช้สามารถนำมาเขียนเป็นอัลกอริทึมเป็นขั้นตอนของการทำออปติไมซ์และการคำนวณค่าตัวแปรปรับที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แผนผังของอัลกอริทึมของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ

4.3 ตัวควบคุมแบบมัลติพารามิเตอร์โมเดลพรีดิกทีฟ (Multi-parametric model predictive control)

ตัวควบคุมแบบมัลติพารามิเตอร์โมเดลพรีดิกทีฟ (Multi-parametric model predictive control, Mp-mpc) [29] เป็นเทคนิคการควบคุมที่อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ สามารถควบคุมตัวแปรเอาต์พุต 1 ตัว หรือหลายตัวก็ได้ เทคนิคนี้คล้ายกับตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ แต่ตัวควบคุมแบบมัลติพารามิเตอร์โมเดลพรีดิกทีฟแบ่งการคำนวณเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือส่วนที่คำนวณแบบออฟไลน์ (off-line) โดยส่วนนี้ใช้เทคนิคที่เรียกว่า มัลติพารามิเตอร์โปรแกรมมิ่ง และส่วนที่คำนวณแบบออนไลน์ (on-line) ในส่วนนี้คำนวณเหมือนกับตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ ข้อได้เปรียบเทียบของตัวควบคุมแบบมัลติพารามิเตอร์โมเดลพรีดิกทีฟคือ ตัวควบคุมแบบมัลติพารามิเตอร์โมเดลพรีดิกทีฟจะคำนวณแบบออฟไลน์ ซึ่งคำตอบที่ได้เป็นคำตอบแบบเอกซ์พลิซิท์ซึ่งคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ หลังจากนั้นทำการคำนวณแบบออนไลน์ ในการคำนวณออฟไลน์สามารถช่วยในควบคุมได้เป็นอย่างดีในกระบวนการที่มีความซับซ้อน และสามารถลดเวลาในการคำนวณได้ด้วย ซึ่งแตกต่างจากตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟซึ่งทำการคำนวณออนไลน์อย่างเดียว ถ้ากระบวนการมีความซับซ้อนมากๆ จะทำให้ตัวควบคุมทำการคำนวณล่าช้าได้

4.3.1 จากตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบเชิงเส้นไปยังปัญหาการโปรแกรมมิ่ง

หลักการคำนวณพื้นฐานของตัวควบคุมแบบมัลติพารามิเตอร์โมเดลพรีดิกทีฟมาจากตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ [25] โดยพิจารณาระบบที่เป็นแบบเชิงเส้นดังต่อไปนี้

$$\dot{\hat{x}}(t+1) = A\hat{x}(t) + B\hat{u}(t) \quad (4.29)$$

$$y(t) = C\hat{x}(t) \quad (4.30)$$

เงื่อนไข

$$y_{\min} \leq y_t \leq y_{\max} \quad (4.31)$$

$$u_{\min} \leq u_t \leq u_{\max} \quad (4.32)$$

โดยที่

$$x(t) \in \mathbb{R}^n \text{ เป็นสแตตเวกเตอร์}$$

$$u(t) \in \mathbb{R}^m \text{ เป็นสแตตอินพุต}$$

$$A \in R^{n \times n}$$

$$B \in R^{n \times m}$$

(A; B) เป็นคู่ลำดับที่ควบคุมได้

ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟที่เป็นระบบเชิงเส้น โดยเริ่มต้นการควบคุมที่สภาวะคงตัว (steady state) ให้เป็นไปตามแนววิถีที่ต้องการไปยังค่าเป้าหมาย ในกรณีนี้มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ทำให้ผลต่างระหว่างค่าเป้าหมายกับสัญญาณขาออกที่ออกมาซึ่งฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นฟังก์ชันของเวลา

โดยทั่วไปสร้างฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เปรียบเทียบกับค่าเป้าหมายดังสมการต่อไปนี

$$\min_U J(U, x_t, r_t) = \sum_{k=0}^{N_y} (y_{t+k|t} - r_t)' Q (y_{t+k|t} - r_{t+k}) + \delta u_{t+k}' R \delta u_{t+k} \quad (4.33)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t} \quad & y_{\min} \leq y_{t+k|t} \leq y_{\max}, & k = 1, \dots, N_c \\ & u_{\min} \leq u_{t+k} \leq u_{\max}, & k = 0, 1, \dots, N_c \\ & \delta u_{\min} \leq \delta u_{t+k} \leq \delta u_{\max}, & k=0, 1, \dots, N_u-1 \end{aligned}$$

$$x_{t+k+1|t} = A x_{t+k|t} + B u_{t+k}, \quad k \geq 0$$

$$y_{t+k|t} = C x_{t+k|t}, \quad k \geq 0$$

$$u_{t+k} = u_{t+k-1} + \delta u_{t+k}, \quad k \geq 0$$

$$\delta u_{t+k} = 0, \quad k \geq N_u$$

โดยที่

$U \triangleq \{\delta u_t, \dots, \delta u_{t+N_u-1}\}$ สเตทของเอาต์พุตเป็นตัวแปรปรับ

$r_t \triangleq \{r_t, \dots, r_{t+N_y-1}\}$ ค่าเป้าหมาย

$\delta u \in R^m$ ผลต่างของค่าตัวแปรปรับ

สมการของตัวแปรปรับเป็นดังนี้

$$u_{t+k} = u_{t+k-1} + \delta u_{t+k}, \quad (4.34)$$

โดยกำหนดให้ u_{t-1} เป็นเวกเตอร์ตัวแปรปรับในอดีต

จะได้สมการซึ่งเป็นปัญหาควอราติกโปรแกรมมิ่งดังนี้

$$J(x_t, u_{t-1}, r_t) = \min_U \left\{ \frac{1}{2} U' H U + [x_t' u_{t-1}' r_t'] F U \right\} \quad (4.35)$$

$$\text{s.t.} \quad GU \leq W + E \begin{bmatrix} x_t \\ u_{t-1} \\ r'_t \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

และจากสมการข้างต้นจัดรูปเป็นสมการในรูปของปัญหามัลติพารามิเตอร์โปรแกรม

$$V_z(x_t) = \min_z \frac{1}{2} z' H z \quad (4.37)$$

$$\text{s.t.} \quad GU \leq W + S \begin{bmatrix} x_t \\ u_{t-1} \\ r'_t \end{bmatrix}$$

เมื่อ

$$z = U + H^{-1} F' \begin{bmatrix} x_t \\ u_{t-1} \\ r'_t \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad S = E + GH^{-1} F' \quad (4.38)$$

โดยระเบียบวิธีของตัวควบคุมแบบมัลติพารามิเตอร์โมเดลพรีดิกต์ดังรูปที่ 4.6 สามารถใช้สมการที่ 4.37 ในการคำนวณ และคำตอบที่ได้จากสมการที่ 4.37 คือค่า U เป็นแบบเชิงเส้น, ฟังก์ชัน piecewise affine $U(x_t, u_{t-1}, r_t)$ ของ (x_t, u_{t-1}, r_t) ซึ่งค่า x_t, u_{t-1}, r_t จะกำหนดไว้บน region CR^0 ซึ่งคำตอบที่ได้ต้องสอดคล้องกัน โดยทำการปรับกระบวนการดังสมการต่อไปนี้

$$u_t = u_{t-1} + \delta u_t(x_t, u_{t-1}, r_t) \quad (4.39)$$

เมื่อ

$\delta u_t(x_t, u_{t-1}, r_t)$ เป็นส่วนประกอบของเวกเตอร์ $U(x_t, u_{t-1}, r_t)$

ดังนั้น สามารถใช้ระเบียบวิธีของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกต์ทีฟโดยทำการคำนวณแบบออนไลน์

1. ทำการวัดค่าของตัวแปรสแตทในเวลานั้น
2. ได้ region CR^0 ซึ่งเป็นส่วนหนึ่ง X
3. ได้ control action u_t จากสมการ 4.39 และไปปฏิบัติการของระบบ
4. ซ้ำในทันทีและสลับตัวอย่างถัดไป

ดังนั้นในการทำออนไลน์ออปติไมซ์เซชันของ MPC (4.33) จะลดรูปให้ง่ายลง
ดังต่อไปนี้

$$\text{if } x \in CR^0 \text{ then } u_t = [1 \ 0 \ \dots \ 0] U^*(x_t)$$

4.3.2 ความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ในระบบเชิงเส้น

ในหัวข้อนี้นำเสนอระบบที่มีความไม่แน่นอนเพิ่มเข้าไปในระบบเมตริก A ซึ่งมี
ประโยชน์มากสำหรับในกรณีความไม่แน่นอนของแบบจำลองอธิบายดังต่อไปนี้ [29]

$$x_{t+1} = Ax_t + Bu_t \quad (4.40)$$

$$x_t \in R^n, u_t \in R^m, A \in R^{n \times n}, B \in R^{n \times m}$$

เมื่อ ค่า a_{ij} เพิ่มเข้ามาของเมตริกซ์ A เป็นค่าที่ไม่ทราบค่าแต่สามารถได้จากสมการต่อไปนี้

$$a_{ij} = \bar{a}_{ij} + \delta a_{ij} \quad (4.41)$$

$$\delta a_{ij} \in A_{ij} = \{ \delta a_{ij} \in R \mid -\varepsilon |\bar{a}_{ij}| \leq \delta a_{ij} \leq \varepsilon |\bar{a}_{ij}| \} \quad (4.42)$$

$$i=1, \dots, n \quad j=1, \dots, n$$

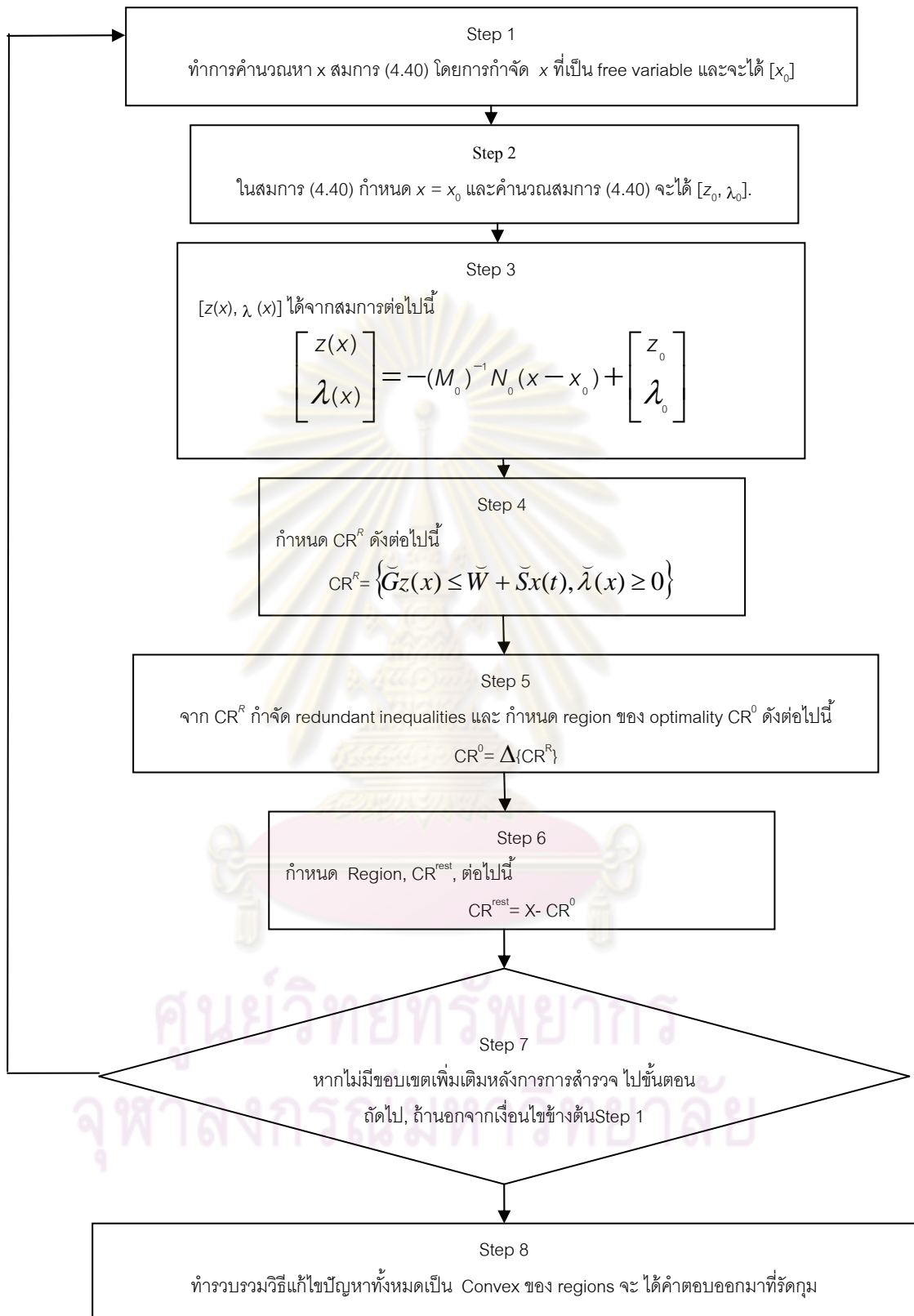
เมื่อ

\bar{a}_{ij} เป็นค่า base case เพิ่มเข้ามาของเมตริกซ์ A

δa_{ij} เป็นค่าความไม่แน่นอนของเมตริกซ์ที่เพิ่มเข้ามา ซึ่งกำหนดขอบเขตสมการ
(4.42) ขอบเขตของ δa_{ij} ขึ้นอยู่กับการกำหนดร้อยละความผิดพลาดของค่า base case $\varepsilon \bar{a}_{ij}$ ที่
 $0 \leq \varepsilon \leq 1$

ในการจัดการปัญหาความไม่แน่นอนของแบบจำลองใช้ การกำจัด ด้วย
feedback min-max algorithms ซึ่งการกำจัดความไม่แน่นอนของสมการที่ 4.42 เหมือนกับ
polytopic model uncertainty และ ลำดับของการควบคุมสามารถยอมรับได้ของความไม่
แน่นอนที่รุนแรงได้ ข้อดีหลักของวิธี against traditional min-max robust MPC สามารถ
ยอมรับได้ของความไม่แน่นอนที่รุนแรงได้

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จะพิจารณาค่าที่เป็นกรณีที่แย่ที่สุด กรณีพื้นฐาน และ
กรณีที่ดีที่สุดของความไม่แน่นอนของแบบจำลอง ซึ่งสมการ 4.40 และ 4.41 นั้นนำมาใช้ศึกษา
ความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ ในการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของแบบจำลองจะใช้วิธีการ
จำลองมอนติคาร์โลเป็นการวิเคราะห์รายละเอียดอยู่ในบทต่อไป



รูปที่ 4.6 แผนภาพของอัลกอริทึมของตัวควบคุมแบบมัลติพาราเมตริกโมเดลพีรีดิกทีฟ

ตารางที่ 4.1 สรุปข้อดีข้อเสียของตัวควบคุมแต่ละชนิด

ชนิดของตัวควบคุม	ข้อดีของตัวควบคุม	ข้อเสียของตัวควบคุม
PID	<ol style="list-style-type: none"> 1. เป็นเทคนิคที่ไม่อาศัยแบบจำลองไม่มีความยุ่งยากในการหาแบบจำลองกระบวนการ 2. เป็นตัวควบคุมที่ไม่มีความซับซ้อนง่ายต่อการใช้งาน 3. ปรับแต่งจูนตัวควบคุมง่าย 4. ถ้ากระบวนการมีสิ่งรบกวนระบบมาก ๆ ตัวควบคุมสามารถควบคุมกระบวนการได้ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ไม่มีขอบเขตในการควบคุม อาจจะควบคุมเกินกว่าสิ่งที่กำหนดทำให้เกิดอันตรายต่อกระบวนการได้ 2. สามารถควบคุมได้ใช้ในกระบวนการที่มีลักษณะเป็นแบบอินพุท-เอาต์พุตเดี่ยว (Single Input-Single Output, SISO)
MPC	<ol style="list-style-type: none"> 1. รับประกันเสถียรภาพของกระบวนการได้และสามารถกำหนดขอบเขตในการควบคุมได้ 2. สามารถควบคุมได้ในกระบวนการที่มีลักษณะเป็นแบบอินพุท-เอาต์พุตหลายตัวแปร (Multivariable Input-Multivariable Output, MIMO) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. เป็นเทคนิคที่อาศัยแบบจำลอง มีความยุ่งยากในการหาแบบจำลองกระบวนการต้องมีความน่าเชื่อถือ 2. ปรับแต่งจูนตัวควบคุมยาก 3. ถ้ากระบวนการมีสิ่งรบกวนระบบมาก ๆ ตัวควบคุมไม่สามารถควบคุมกระบวนการได้ เพราะการควบคุมแบบเทคนิคนี้อาศัยแบบจำลอง
mp-MPC	<ol style="list-style-type: none"> 1. รับประกันเสถียรภาพของกระบวนการได้และสามารถกำหนดขอบเขตในการควบคุมได้ 2. สามารถควบคุมได้ในกระบวนการที่มีลักษณะเป็นแบบอินพุท-เอาต์พุตหลายตัวแปร (Multivariable Input-Multivariable Output, MIMO) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. เป็นเทคนิคที่อาศัยแบบจำลอง มีความยุ่งยากในการหาแบบจำลองกระบวนการต้องมีความน่าเชื่อถือ 2. ปรับแต่งจูนตัวควบคุมยาก 3. ถ้ากระบวนการมีสิ่งรบกวนระบบมาก ๆ ตัวควบคุมไม่สามารถควบคุมกระบวนการได้ เพราะการควบคุมแบบเทคนิคนี้อาศัยแบบจำลอง

บทที่ 5

การจำลองแบบเทคนิคมอนติคาร์โล

บทนี้กล่าวถึงการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของแบบจำลองโดยใช้วิธีทางสถิติและใช้วิธีการจำลองแบบเทคนิคมอนติคาร์โลโดยทำการสุ่มขนาดของความผิดพลาดของแบบจำลอง

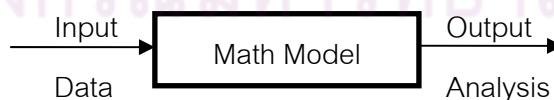
5.1 วิธีการจำลองแบบเทคนิคมอนติคาร์โล

การจำลองแบบเทคนิคมอนติคาร์โลเป็นวิธีการซึ่งโดยทั่วไปใช้สำหรับการตรวจสอบประสิทธิภาพของค่าพารามิเตอร์ทางสถิติภายใต้สถานการณ์ที่แตกต่างกัน [31] นอกจากนี้ยังเป็นเทคนิคหนึ่งสำหรับการจำลองข้อมูลเชิงทฤษฎี

การจำลอง (simulation) เป็นกระบวนการสร้างตัวแบบ (model) เพื่อศึกษาพฤติกรรมของธรรมชาติที่แท้จริงที่อาจมีความสลับซับซ้อนของระบบที่สนใจ ตัวแบบเหล่านี้จะช่วยให้สามารถศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงได้ และเป็นการลดความเสี่ยงโดยยังไม่ต้องไปทำจริง และสามารถวัดสมรรถนะของทางเลือกต่างๆของระบบที่กำลังออกแบบได้

เทคนิคการจำลองข้อมูลแบบมอนติคาร์โล เป็นการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการแก้ปัญหา (Computer simulation) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก การป้อนข้อมูลเข้า จะต้องจัดเตรียมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล โดยอาจจะใช้วิธีการทางสถิติมาช่วยทำการวิเคราะห์ นอกจากนี้ กล่าวได้ว่าการจำลองข้อมูลด้วยเทคนิคมอนติคาร์โลเป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้สำหรับออกแบบจำลองกระบวนการ สำหรับแก้ปัญหาทางด้านคณิตศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ หรือด้านสถิติการจำลองข้อมูล

ในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการในการศึกษาความไม่แน่นอนของแบบจำลอง โดยแบบจำลองขึ้นอยู่กับจำนวนพารามิเตอร์อินพุตซึ่งแบบจำลองจะคำนวณออกเป็นเอาต์พุตหนึ่งตัวหรือมากกว่าหนึ่งตัวดังรูปที่ 5.1



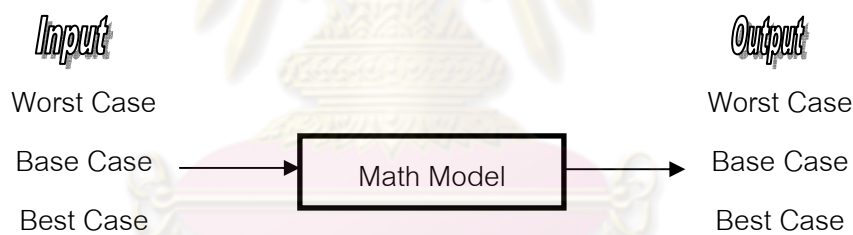
รูปที่ 5.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ตัวแปรอินพุตของแบบจำลองขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอกหลายอย่าง แบบจำลองจะใช้เป็นตัวแทนของระบบได้จริงนั้นขึ้นอยู่กับความไม่แน่นอนของแบบจำลองจากระบบที่เปลี่ยนแปลงตัวแปรอินพุตด้วย ซึ่งโดยปกติจะไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของเทอมที่เป็นกรณี

ฐาน (base case) แต่จะพิจารณาค่าของตัวแปรอินพุทที่เป็นไปได้มากที่สุดซึ่งจะส่งผลให้ความแม่นยำของแบบจำลองเป็นที่ยอมรับได้ ในการพิจารณาความไม่แน่นอนของแบบจำลองที่มีความสัมพันธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงตัวแปรอินพุท ในเหตุการณ์จริงอาจจำเป็นต้องพิจารณาแบบจำลองในหลายๆกรณีซึ่งประกอบด้วยกรณีฐาน กรณีที่ดีที่สุด (best case) และกรณีที่แย่ที่สุด (worst case) ดังรูปที่ 5.2 ซึ่งพิจารณาการค่าเปลี่ยนแปลงของอินพุทซึ่งรวมกรณีฐาน กรณีที่ดีที่สุด และกรณีที่แย่สุดไว้ด้วย

ข้อดีของการใช้ข้อมูลที่ได้จากการจำลองข้อมูลด้วยเทคนิคมอนติคาร์โลมี 4 ประการได้แก่

1. การใช้ข้อมูลจากการจำลองข้อมูลด้วยเทคนิคมอนติคาร์โลจะเป็นการได้มาซึ่งข้อมูลที่สามารถทำซ้ำได้
2. มีประสิทธิภาพในการเก็บข้อมูลที่ใช้ในทฤษฎีของการแจกแจงความน่าจะเป็น
3. เป็นการทำงานที่เปลี่ยนพารามิเตอร์ของทฤษฎีการแจกแจง
4. ได้ข้อมูลตามสถานการณ์ที่กำหนดในหลายสถานการณ์ ซึ่งข้อมูลเชิงประจักษ์ที่ได้จากการเก็บรวบรวมนั้นจะให้รูปแบบของข้อมูลเพียงแบบเดียวเท่านั้น



รูปที่ 5.2 กรณีพื้นฐานของแบบจำลอง

5.1.1 ระเบียบวิธีของการจำลองแบบเทคนิคมอนติคาร์โล

หลักการของเทคนิคมอนติคาร์โล คือการนำเลขสุ่มมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาต่างๆ ที่สนใจศึกษาในผลสรุปของปัญหานั้นๆ โดยมีขั้นตอนที่สำคัญ 3 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การสร้างเลขสุ่ม (generate random number) การสร้างเลขสุ่มจะกำหนดให้มีการแจกแจงแบบยูนิฟอร์มในช่วง $[0,1]$ โดยการสุ่มจะเป็นอิสระซึ่งกันและกัน จากนั้นนำเลขสุ่มนี้ไปสร้างตัวแปร ตามลักษณะการแจกแจงที่ต้องการในปัญหาที่ศึกษา เพื่อเป็นข้อมูลของปัญหานั้นๆ ในการสร้างเลขสุ่ม (generate random number) ของงานวิจัยนี้ จะใช้โปรแกรม MATLAB ในการสร้างเลขสุ่มโดยใช้ฟังก์ชันคำสั่ง rand ซึ่งฟังก์ชันนี้จะกำหนดวิธีการสร้างเลขสุ่มโดยวิธีการสร้างตัวเลขสุ่มแบบเทียม (pseudo-random numbers) ระเบียบวิธีในการสร้างเลขสุ่ม

จะใช้ Mersenne twister [32] ซึ่งเป็นระเบียบวิธีในการสร้างตัวเลขสุ่มแบบเทียมซึ่งมีการแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม

ขั้นตอนที่ 2 การประยุกต์ปัญหาที่ต้องการศึกษาโดยใช้เลขสุ่ม ขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับปัญหาที่ศึกษา ซึ่งเป็นขั้นตอนที่นำเลขสุ่มมาใช้ในการหาค่าต่างๆตามปัญหาที่ต้องการตามสูตรการคำนวณในปัญหาที่ศึกษา (วิธีการต่างๆ กล่าวในบทที่ 6)

ขั้นตอนที่ 3 การทดลอง เมื่อประยุกต์ปัญหาที่ต้องการศึกษาโดยใช้เลขสุ่มแล้วขั้นต่อไปคือ การทำวิธีการนั้นซ้ำๆกัน (replication) จำนวนหลายครั้ง โดยถือว่าการทำซ้ำๆกันนั้นเป็นวิธีการรวบรวมข้อมูลให้มีจำนวนมากเพื่อลดความไม่แน่นอนของคำตอบ

จากหลักของเทคนิคมอนติคาร์โล จะเห็นว่าการใช้เลขสุ่มเพื่อเป็นพื้นฐานในการหาคำตอบของปัญหา เป็นวิธีการที่จะนำไปสู่แนวคิดในทางทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณโดยมีผลกระทบจากเรื่องอื่นๆ เข้ามาเกี่ยวข้องในการทดลองเมื่อทำซ้ำๆ กันเป็นจำนวนมากแล้วความคลาดเคลื่อนอย่างสุ่มที่เกิดขึ้นในการวิเคราะห์หาค่าต่างๆ ในแต่ละครั้งจะหมดไป (Counter balance) จากขั้นตอนเทคนิคมอนติคาร์โล สามารถเขียนแผนผังได้ดังรูปที่ 5.3

5.2 วิธีการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้แผนแบบแฟกทอเรียล

แผนแบบแฟกทอเรียล (Factorial designs) [34] เป็นแผนแบบการทดลองที่มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพล (effects) ของสองปัจจัย (factor) หรือสองทรีตเมนต์ขึ้นไป โดยแต่ละปัจจัยมีหลายระดับ (level) แผนแบบแฟกทอเรียลเป็นแผนแบบที่มีประโยชน์ในการศึกษาเพื่อวิเคราะห์หาระดับ หรือจุดที่ดีที่สุดที่เหมาะสมที่สุดของทรีตเมนต์ใดๆ ช่วยให้สามารถเปรียบเทียบระหว่างระดับในแต่ละทรีตเมนต์ และบอกถึงความสำคัญระหว่างความสัมพันธ์ความเกี่ยวข้องกันหรืออันตรกิริยา (interaction) ระหว่างทรีตเมนต์ได้อีกด้วย

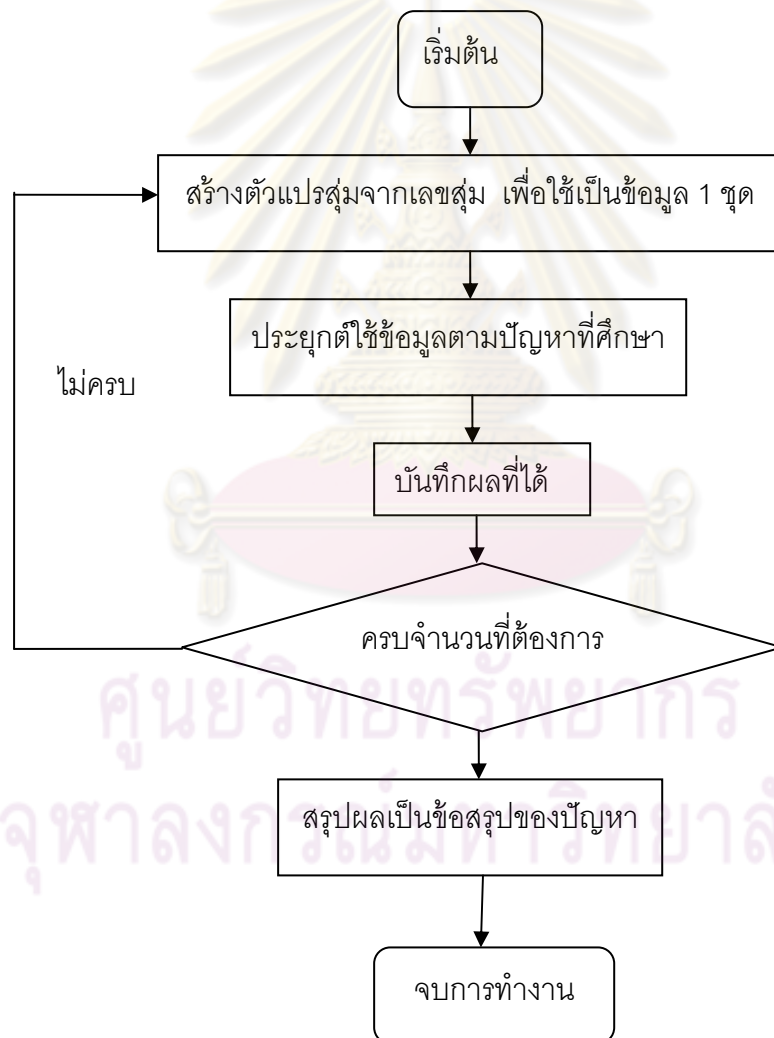
5.2.1 ปัจจัยและระดับของปัจจัย

ปัจจัย (Factor) หมายถึง สิ่งที่น่าสนใจศึกษาว่ามีผลต่อหน่วยทดลองหรือผลตอบสนองหรือไม่

ระดับของปัจจัย (Levels of factor) หมายถึง ความแตกต่างของปัจจัยอาจสามารถจัดเรียงลำดับความมากน้อยได้ ปัจจัยที่มีระดับแตกต่างกันสามารถทำหน้าที่เป็นทรีตเมนต์ได้

ความแตกต่างระหว่างทรีตเมนต์และปัจจัย ตามที่ได้ให้นิยามไว้แล้วว่า ทรีตเมนต์หมายถึง ระเบียบวิธีที่กระทำต่อหน่วยทดลอง ดังนั้น ปัจจัยที่มีระดับต่าง ๆ กัน เช่น ปุ๋ย 30, 40

และ 50 กิโลกรัม ที่นำไปใส่ในแปลงทดลอง ปุ๋ยทั้ง 3 ระดับ จะเป็นทรีตเมนต์ที่ให้กับหน่วยทดลอง ดังนั้น ปัจจัยที่ระดับต่าง ๆ หากนำไปกระทำต่อหน่วยทดลองจะเป็นทรีตเมนต์ แต่ทรีตเมนต์ไม่จำเป็นต้องมาจากปัจจัยในระดับต่าง ๆ กันก็ได้ เช่น ทรีตเมนต์อาจจะเป็นกระบวนการที่ต้นไม่ได้รับแสงแดด และกระบวนการการได้รับน้ำของต้นไม่ในการทดลองเดียวกัน หากการทดลองกระทำโดยใช้หลายปัจจัย แต่ละปัจจัยมีหลายระดับทรีตเมนต์ที่ให้กับหน่วยทดลองจะเป็นทรีตเมนต์ที่เกิดจากระดับของแต่ละปัจจัยร่วมกัน เรียกว่า ทรีตเมนต์ คอมบิเนชัน (Treatment combinations) ซึ่งมีจำนวนเท่ากับผลคูณของระดับของปัจจัยเหล่านั้น เช่น กรณีที่มี 2 ปัจจัย ปัจจัย A มี a ระดับ ปัจจัย B มี b ระดับ ทรีตเมนต์คอมบิเนชัน ที่ เกิด ขึ้น ได้ แก่ $A_1B_1, A_1B_2, \dots, A_1B_b, A_2B_1, A_2B_2, \dots, A_2B_b, \dots, A_aB_1, A_aB_2, \dots, A_aB_b$ ซึ่งมีจำนวน ab ทรีตเมนต์



รูปที่ 5.3 เทคนิคมอนติคาร์โล

การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยทดลองซึ่งมีเพียงปัจจัยเดียวอย่างไรก็ตามการศึกษาในบางเรื่อง อาจจำเป็นต้องเกี่ยวข้องกับปัจจัยมากกว่า 1 ปัจจัย ยกตัวอย่างเช่น ในการศึกษาเกี่ยวกับความเจริญเติบโตของพืชชนิดหนึ่ง อาจตั้งข้อสมมุติฐานว่าทั้งปุ๋ยและพันธุ์ ต่างก็เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลผลิตของพืชชนิดนี้ ดังนั้นจึงสนใจที่จะทำการทดลองเพื่อทดสอบสมมุติฐานดังกล่าว ซึ่งในกรณีนี้การทดลองของจะต้องเกี่ยวข้องกับปัจจัยทั้ง 2 ปัจจัย คือ ปุ๋ยและพันธุ์ สำหรับวิธีที่จะทำการทดลองนั้น อาจทำได้ง่าย ๆ โดยให้ปัจจัยหนึ่งคงที่ที่ระดับหนึ่ง แล้วทำการทดลองที่ระดับต่าง ๆ ของปัจจัยแรก ซึ่งจะเห็นว่าวิธีที่กล่าวมานี้ก็คือการทดลองเมื่อมีปัจจัยเดียว แต่มี 2 การทดลองรวมกันนั่นเอง โดยทั่วไป ถ้ามีปัจจัยมากกว่า 2 ปัจจัย ก็อาจทำการทดลองที่ละปัจจัย โดยกำหนดให้ปัจจัยหนึ่งคงที่ที่ระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตามการทดลองในลักษณะเช่นนี้อาจไม่สะดวก เพราะจะต้องทำการทดลองหลายครั้งและยังไม่สามารถจะศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้ง 2 ได้อีกด้วย ดังนั้นในบทนี้ จะได้พิจารณาวิธีการทดลองที่สามารถช่วยให้ศึกษาปัจจัยหลายปัจจัยได้ภายในการทดลองครั้งเดียวนอกจากนี้ยังสามารถให้ข้อเกี่ยวข้องของอิทธิพลของการกระทำร่วมกัน (Interaction effect) ระหว่างปัจจัยเหล่านี้อีกด้วย ซึ่งเรียกการทดลองแบบดังกล่าวนี้ว่า การทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial experiment)

5.2.2 การทดลองเมื่อมี 2 ปัจจัย

ได้พิจารณาลักษณะของการทดลองแบบแฟคทอเรียลไปแล้วในหัวข้อนี้ จะพิจารณาทดลองเมื่อมี 2 ปัจจัย ถ้าให้ A และ B เป็นปัจจัยทั้งสอง โดยที่จำนวนระดับของ A และ B เท่ากับ a และ b ตามลำดับ การทดลองแบบแฟคทอเรียลจะประกอบด้วยทรีตเมนต์ซึ่งเกิดจากการจัดหมู่ของระดับต่าง ๆ ของ A และ B ดังนี้

$$A_1B_1, A_1B_2, \dots, A_1B_b$$

$$A_2B_1, A_2B_2, \dots, A_2B_b$$

⋮

$$A_aB_1, A_aB_2, \dots, A_aB_b$$

ทรีตเมนต์เหล่านี้เรียกว่า ทรีตเมนต์คอมบิเนชัน (Treatment combination) หรือแฟคทอเรียลทรีตเมนต์จะต้องนำไปทดลองตามแผนแบบที่กำหนด การทดลองที่มี 2 ปัจจัยภายใต้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ ที่มีจำนวนซ้ำเท่ากับ n

สมมุติให้ A และ B เป็นปัจจัย 2 ปัจจัย ที่ต้องการศึกษา โดยที่ปัจจัย A มี a ระดับ ปัจจัย B มี b ระดับ ดังนั้น จำนวน treatment combinations จึงมีค่าเท่ากับ $a \times b$

5.2.3 ตัวแบบเชิงเส้น

ตัวแบบเชิงเส้นของ Y_{ijk} ซึ่งเป็นตัวแปรจากหน่วยทดลองที่ $k = 1, 2, \dots, r$ ที่ได้รับปัจจัย A ที่ระดับที่ $i = 1, 2, \dots, a$ และปัจจัย B ระดับที่ $j = 1, 2, \dots, b$ คือ

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \gamma_j + (\tau\gamma)_{ijk} + \epsilon_{ijk} ; i=1,2,\dots,a ; j = 1,2,\dots,b; k = 1,2,\dots,r \quad (5.1)$$

μ แทน ค่าเฉลี่ยรวม

τ_i แทน อิทธิพลของระดับที่ i ของปัจจัย A

γ_j แทน อิทธิพลของระดับที่ j ของปัจจัย B

$(\tau\gamma)_{ijk}$ แทน อิทธิพลของอันตรกิริยาระหว่าง τ_i และ γ_j

ϵ_{ijk} แทน ตัวแปรสุ่มของความคาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในหน่วยทดลองที่ k ที่ได้รับปัจจัย A ระดับที่ i และได้รับปัจจัย B ระดับที่ j

5.2.4 ตารางข้อมูล

ตารางข้อมูลสำหรับแผนแบบแฟกทอเรียลใน CRD ที่มี 2 ปัจจัย โดยที่ปัจจัย A มี a ระดับ ปัจจัย B มี b ระดับ และสมมุติว่าแต่ละ treatment combination มี 2 ซ้ำ สามารถเขียนได้ดังตารางที่ 5.1

5.2.5 ผลบวกกำลังสองและตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน

ผลบวกกำลังสอง

$$C.T. = \frac{y^2 \dots}{abr} \quad (5.2)$$

ผลบวกกำลังสองของค่าสังเกตทั้งหมด

$$SST = r \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^r (y_{ijk} - \bar{y}_{...})^2 = \sum_i \sum_j \sum_k y_{ijk}^2 - C.T. \quad (5.3)$$

ผลบวกกำลังสองของ treatment combination

$$SSTr = r \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{ij\cdot} - \bar{y}_{...})^2 = \frac{1}{r} \sum_i \sum_j y_{ij\cdot}^2 - C.T. \quad (5.4)$$

ผลบวกกำลังสองของปัจจัย A

$$SSA = ab \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...})^2 = \sum_{i=1}^a \frac{y_{i..}^2}{br} - C.T \quad (5.5)$$

ผลบวกกำลังสองของปัจจัย B

$$SSB = ar \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{.j.} - \bar{y}_{...})^2 = \sum_{j=1}^b \frac{y_{.j.}^2}{ar} - C.T \quad (5.6)$$

ผลบวกกำลังสองของอันตรกิริยา (AB)

$$SSAB = r \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{ij.} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{...})^2 \quad (5.7)$$

$$= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{y_{ij.}^2}{r} - \sum_{i=1}^a \frac{y_{i..}^2}{br} - \sum_{j=1}^b \frac{y_{.j.}^2}{ar} + C.T = SSTr - SSA - SSB \quad (5.8)$$

ผลบวกกำลังสองของความคลาดเคลื่อน

$$SSE = SST - SSA - SSB - SSAB \quad (5.9)$$

โดยค่าที่ได้สรุปดังในตารางที่ 5.2

5.2.6 สมมุติฐานการทดสอบ

1. $H_0: (\tau\gamma)_{ij} = 0, i=1,2,\dots,a, j=1,2,\dots,b$ (ไม่มีอิทธิพลของอันตรกิริยา)

$H_1: (\tau\gamma)_{ij} \neq 0$, สำหรับบาง i, j (อิทธิพลของอันตรกิริยา)

ปฏิเสธ H_0 ถ้า $F_0 = \frac{MS(AB)}{MSE} \geq F_{\alpha, [(a-1)(b-1), ab(r-1)]}$ หรือค่า $p \leq \alpha$

2. $H_0: \tau_i = 0, i=1,2,\dots,a$ (อิทธิพลของปัจจัย A ไม่แตกต่าง)

$H_1: \tau_i \neq 0$, สำหรับบาง i , (อิทธิพลของปัจจัย A แตกต่าง)

ปฏิเสธ H_0 ถ้า $F_0 = \frac{MSA}{MSE} \geq F_{\alpha, [a-1, ab(r-1)]}$ หรือค่า $p \leq \alpha$

3. $H_0: \gamma_j = 0, j=1,2,\dots,b$ (อิทธิพลของปัจจัย B ไม่แตกต่าง)

$H_1: \gamma_j \neq 0$, สำหรับบาง j , (อิทธิพลของปัจจัย B แตกต่าง)

ปฏิเสธ H_0 ถ้า $F_0 = \frac{MSB}{MSE} \geq F_{\alpha, [b-1, ab(r-1)]}$ หรือค่า $p \leq \alpha$

5.2.7 การทดสอบอิทธิพลเชิงเดี่ยว

เนื่องจากอิทธิพลเชิงเดี่ยวเป็นการทดสอบผลต่างของค่าเฉลี่ยของ Treatment combination ดังนั้น จึงเป็นการเปรียบเทียบเชิงตั้งฉาก และการสรุปผลการทดลองทดสอบจะ

พิจารณาจากช่วงความเชื่อมั่น $100(1-\alpha)\%$ ของการเปรียบเทียบโดยใช้สถิติค่าสถิติ Bonferroni t ซึ่งมีสูตรในการคำนวณ คือ $\hat{C} \pm t_{\frac{\alpha}{2}(k, \nu)} (S_c)$ โดยที่ $t_{\frac{\alpha}{2}(k, \nu)}$ คือ ค่าสถิติ Bonferroni t k คือจำนวนการเปรียบเทียบทั้งหมดที่ต้องการทดสอบ และ ν คือ df ของความคาดเคลื่อน และ S_c คือค่าความคาดเคลื่อนมาตรฐาน (S.E) ของการเปรียบเทียบ ถ้าช่วงความเชื่อมั่นที่คำนวณได้รวมค่า 0 แสดงว่าการเปรียบเทียบนั้นเท่ากับ 0 นั่น คือ ความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของระดับของปัจจัยหนึ่งในระดับหนึ่งของอีกปัจจัยหนึ่งไม่มีนัยสำคัญหรืออิทธิพลเชิงเดียวมีค่าเป็น 0 นั่นเอง



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.1 ตารางข้อมูลสำหรับแผนแบบแฟกทอเรียลที่มี 2 ปัจจัย

ปัจจัย A	ปัจจัย B						ยอดรวม
	1	2	...	j	...	b	
1	y_{111}	y_{121}		y_{1j1}		y_{1b1}	
	y_{112}	y_{122}		y_{1j2}		y_{1b2}	
	y_{21^*}	y_{12^*}		y_{1j^*}		y_{1b^*}	$y_{1^*^*}$
2	y_{211}	y_{221}		y_{2j1}		y_{2b1}	
	y_{212}	y_{222}		y_{2j2}		y_{2b2}	
	y_{21^*}	y_{22^*}		y_{2j^*}		y_{2b^*}	$y_{2^*^*}$
⋮							
i	y_{i11}	y_{i21}		y_{ij1}		y_{ib1}	
	y_{i12}	y_{i22}		y_{ij2}		y_{ib2}	
	y_{i1^*}	y_{i2^*}		y_{ij^*}		y_{ib^*}	$y_{i^*^*}$
⋮							
a	y_{a11}	y_{a21}		y_{aj1}		y_{ab1}	
	y_{a12}	y_{a22}		y_{aj2}		y_{ab2}	
	y_{a1^*}	y_{a2^*}		y_{aj^*}		y_{ab^*}	$y_{a^*^*}$
ยอดรวม	$y_{^*1^*}$	$y_{^*2^*}$		$y_{^*j^*}$		$y_{^*b^*}$	$y_{^*^*^*}$

โดยที่

y_{ij^*} คือ ยอดรวมของ treatment combination $ij, i=1,2,\dots,a, j=1,2,\dots,b$

$y_{i^*^*}$ คือ ยอดรวมของปัจจัย A ระดับที่ i

$y_{^*j^*}$ คือ ยอดรวมของปัจจัย B ระดับที่ j

$y_{^*^*^*}$ คือ ยอดรวมทั้งหมด

ตารางที่ 5.2 ตาราง ANOVA สำหรับแผนแบบแฟกทอเรียลที่มี 2 ปัจจัย

SOV	Df	SS	MS	E(MS)
ปัจจัย A	a-1	SSA	MSA	$\sigma^2 + \frac{br \sum_i \tau_i^2}{a-1}$
ปัจจัย B	b-1	SSB	MSB	$\sigma^2 + \frac{ar}{b-1} \sum_i \beta_i^2$
อันตรกิริยา AB	(a-1)(b-1)	SSAB	MS(AB)	$\sigma^2 + \frac{r}{(a-1)(b-1)} \sum_k (\tau\beta)_{ij}^2$
ความคลาดเคลื่อน	ab(r-1)	SSE	MSE	σ^2
รวม	abr-1	SST		

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

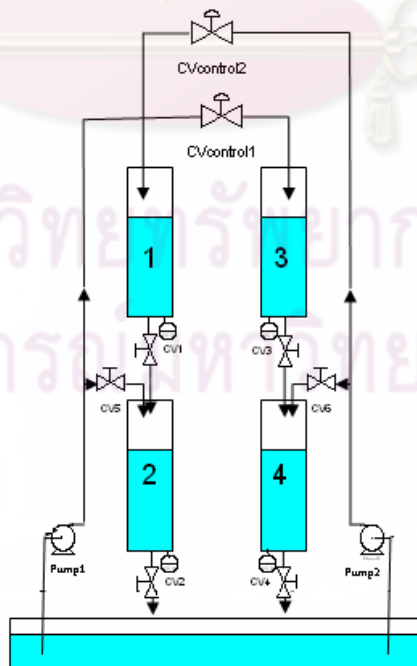
บทที่ 6

การสร้างแบบจำลองของระบบสี่ถังและอิทธิพลของความไม่แน่นอนของแบบจำลองต่อสมรรถนะของการควบคุม

โดยบทนี้จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองของระบบสี่ถังเพื่อนำไปใช้ในการศึกษาอิทธิพลของความไม่แน่นอนของแบบจำลองต่อสมรรถนะการควบคุมโดยใช้การจำลองเทคนิคมอนติคาร์โล และวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อสมรรถนะของการควบคุมด้วยวิธีแผนแบบแฟกทอเรียล

6.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกระบวนการสี่ถัง

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการระบบสี่ถังซึ่งแสดงในรูปที่ 6.1 นั้น ในขั้นแรกจะพิจารณาการทำดุลมวลสารในแต่ละถัง จากนั้นแปลงรูปสมการที่ได้จากการทำดุลมวลสารให้อยู่ในรูปตัวแปรเบี่ยงเบนและแปลงให้อยู่ในรูประบบสมการเชิงเส้น จากนั้นจะเขียนสมการให้อยู่ในรูปเมตริกซ์เพื่อนำไปใช้ในการทดสอบเสถียรภาพของระบบและทดสอบความสามารถควบคุมได้ ซึ่งรายละเอียดในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละขั้นตอนมีดังนี้



รูปที่ 6.1 ระบบกระบวนการสี่ถัง

6.1.1 สมการดุลมวลสาร

ในขั้นตอนแรกจะทำสมดุลมวลสารในแต่ละถังโดยกำหนดสมมติฐานต่างๆตั้งรายละเอียดต่อไปนี้

สมมติฐาน

1. อุณหภูมิของน้ำในแต่ละถังมีค่าคงที่ เนื่องจากอุณหภูมิขณะทำการทดลองในแต่ละถังอยู่ในพื้นที่ใกล้เคียงกันและอุณหภูมิในห้องปฏิบัติการในแต่ละวันไม่มีความแตกต่างกันมากนัก ดังนั้นจึงกำหนดให้อุณหภูมิของน้ำในแต่ละถังมีค่าคงที่

2. ความเร็วเนื่องจากแรงโน้มถ่วงมีค่าคงที่เท่ากับ 9.81 m/s^2

3. พื้นที่หน้าตัดของถังแต่ละถังคงที่ซึ่งถังแต่ละถังมีรูปร่างลักษณะเป็นทรงกระบอก โดยที่พื้นที่หน้าตัดตลอดทั้งถังมีค่าเท่ากัน

4. ความหนาแน่นของน้ำมีค่าคงที่ เนื่องจากความหนาแน่นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป็นหลัก จากสมมติฐานซึ่งกำหนดให้อุณหภูมิมีค่าคงที่ดังนั้นค่าความหนาแน่นของน้ำจึงกำหนดให้มีค่าคงที่ด้วย

5. ค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลของวาล์ว CV1, CV2, CV3, CV4 มีค่าคงที่ วาล์ว CV1, CV2, CV3, CV4 ติดตั้งอยู่ที่ตำแหน่งกั้นถังในแต่ละถัง เมื่อทำการปรับวาล์ว CV1, CV2, CV3, CV4 ให้อัตราการไหลที่ไหลผ่านวาล์วเหมาะสมกับช่วงสำหรับทำการทดลองแล้ว จากนั้นจะกำหนดให้สัดส่วนการเปิดวาล์วทั้งสี่ตัวนี้คงที่ตลอดการทดลองดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลของวาล์ว CV1, CV2, CV3, CV4 มีค่าคงที่ โดยการเปลี่ยนแปลงความสูงของน้ำในถังทั้ง 4 ถังจะมีความสัมพันธ์โดยตรงต่ออัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านวาล์ว CV1, CV2, CV3, CV4

6. ค่าความดันคร่อมของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และตัวที่ 2 มีค่าคงที่ โดยการเปลี่ยนแปลงของความดันลดในระบบท่อที่เชื่อมต่อกันอยู่กับวาล์วควบคุมเมื่ออัตราการไหลของน้ำเปลี่ยนแปลงไปนั้นไม่ถูกนำมาพิจารณาเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความดันลดของระบบท่อดังกล่าวเมื่อเทียบกับความดันลดของวาล์วควบคุมแล้วถือว่ามีค่าน้อยมาก ดังนั้นค่าความดันคร่อมของวาล์วควบคุมของตัวที่ 1 และตัวที่ 2 มีค่าคงที่

7. อัตราการไหลรวมของปั๊มตัวที่ 1 และตัวที่ 2 มีค่าคงที่ เนื่องจากปั๊มทั้งสองตัวมีขนาดแรงม้าเท่ากันและอินเวอร์เตอร์ทำการจ่ายแรงดันเท่ากันทั้งสองตัว ดังนั้นจึงส่งผลให้อัตราการไหลรวมของปั๊มตัวที่ 1 และตัวที่ 2 มีค่าคงที่

สมการดุลมวลสารของถังที่ 1 จะได้ดังนี้

อัตราการสะสม = มวลไหลเข้า - มวลไหลออก + มวลที่เกิดขึ้น - มวลที่สูญหายไป

$$\frac{d(\rho V_1)}{dt} = \rho F_{CVcontrol2} - \rho F_{CV1} \quad (6.1)$$

โดยกำหนด $V = Ah$ (6.2)

$$F = C_v \sqrt{\frac{\rho gh}{G_f}} = C_v \sqrt{\frac{\Delta P}{G_f}} \quad (6.3)$$

แทนค่าตัวแปรจากสมการที่ 6.2 และ 6.3 ลงในสมการที่ 6.1

$$A_1 \frac{dh_1}{dt} = C_{VCVcontrol2} \sqrt{\frac{\Delta P_{CVcontrol2}}{G_f}} - C_{VCV1} \sqrt{\frac{\rho gh_1}{G_f}} \quad (6.4)$$

จากนั้นจัดรูปใหม่จะได้รูปสมการดังสมการที่ 6.5

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{C_{VCVcontrol2}}{A_1} \sqrt{\frac{\Delta P_{CVcontrol2}}{G_f}} - \frac{C_{VCV1}}{A_1} \sqrt{\frac{\rho gh_1}{G_f}} \quad (6.5)$$

สมการดุลมวลสารของถังที่ 2 จะได้ดังนี้

อัตราการสะสม = มวลไหลเข้า - มวลไหลออก + มวลที่เกิดขึ้น - มวลที่สูญหายไป

$$\frac{d(\rho V_2)}{dt} = \rho F_{CV5} + \rho F_{CV1} - \rho F_{CV2} \quad (6.6)$$

โดยกำหนด $V = Ah$ (6.7)

$$F_{pump1} = F_{CVcontrol1} + F_{CV5} \quad (6.8)$$

$$F = C_v \sqrt{\frac{\rho gh}{G_f}} = C_v \sqrt{\frac{\Delta P}{G_f}} \quad (6.9)$$

แทนค่าตัวแปรที่ได้จากสมการที่ 6.7, 6.8, 6.9 ลงในสมการที่ 6.6 จะได้ว่า

$$A_2 \frac{dh_2}{dt} = -C_{VCVcontrol1} \sqrt{\frac{\Delta P_{CVcontrol1}}{G_f}} - C_{VCV2} \sqrt{\frac{\rho gh_2}{G_f}} + C_{VCV1} \sqrt{\frac{\rho gh_1}{G_f}} + F_{pump1} \quad (6.10)$$

เมื่อจัดรูปสมการที่ 6.10 ใหม่จะได้รูปสมการดังสมการที่ 6.11

$$\frac{dh_2}{dt} = -\frac{C_{VCVcontrol1}}{A_2} \sqrt{\frac{\Delta P_{CVcontrol1}}{G_f}} - \frac{C_{VCV2}}{A_2} \sqrt{\frac{\rho gh_2}{G_f}} + \frac{C_{VCV1}}{A_2} \sqrt{\frac{\rho gh_1}{G_f}} + \frac{F_{pump1}}{A_2} \quad (6.11)$$

สมการดุลมวลสารของถังที่ 3 จะได้ดังนี้

อัตราการสะสม = มวลไหลเข้า - มวลไหลออก + มวลที่เกิดขึ้น - มวลที่สูญหายไป

$$\frac{d(\rho V_3)}{dt} = \rho F_{CVcontrol1} - \rho F_{CV3} \quad (6.12)$$

โดยกำหนด $V = Ah$ (6.13)

$$F = C_v \sqrt{\frac{\rho gh}{G_f}} = C_v \sqrt{\frac{\Delta P}{G_f}} \quad (6.14)$$

เมื่อแทนตัวแปรที่ได้จากสมการที่ 6.14 และ 6.15 ลงในสมการที่ 6.12 จะได้

$$A_3 \frac{dh_3}{dt} = C_{VCVcontrol1} \sqrt{\frac{\Delta P_{CVcontrol1}}{G_f}} - C_{VCV3} \sqrt{\frac{\rho gh_3}{G_f}} \quad (6.15)$$

จากนั้นจัดรูปสมการใหม่จะได้รูปสมการดังสมการที่ 6.16

$$\frac{dh_3}{dt} = \frac{C_{VCVcontrol1}}{A_3} \sqrt{\frac{\Delta P_{CVcontrol1}}{G_f}} - \frac{C_{VCV3}}{A_3} \sqrt{\frac{\rho gh_3}{G_f}} \quad (6.16)$$

สมการดุลมวลสารของถังที่ 4 จะได้ดังนี้

อัตราการสะสม = มวลไหลเข้า - มวลไหลออก + มวลที่เกิดขึ้น - มวลที่สูญหายไป

$$\frac{d(\rho V_4)}{dt} = \rho F_{CV6} + \rho F_{CV3} - \rho F_{CV4} \quad (6.17)$$

โดยกำหนด $V = Ah$ (6.18)

$$F_{\text{pump2}} = F_{CV\text{control2}} + F_{CV6} \quad (6.19)$$

$$F = C_v \sqrt{\frac{\rho gh}{G_f}} = C_v \sqrt{\frac{\Delta P}{G_f}} \quad (6.20)$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรจากสมการที่ 6.18, 6.19, 6.20 ลงใน สมการที่ 6.17 จะได้

$$A_4 \frac{dh_4}{dt} = -C_{VCV\text{control2}} \sqrt{\frac{\Delta P_{CV\text{control2}}}{G_f}} - C_{VCV4} \sqrt{\frac{\rho gh_4}{G_f}} + C_{VCV3} \sqrt{\frac{\rho gh_3}{G_f}} + F_{\text{pump2}} \quad (6.21)$$

และเมื่อจัดรูปใหม่จะได้รูปสมการดังสมการที่ 6.22

$$\frac{dh_4}{dt} = -\frac{C_{VCV\text{control2}}}{A_4} \sqrt{\frac{\Delta P_{CV\text{control2}}}{G_f}} - \frac{C_{VCV4}}{A_4} \sqrt{\frac{\rho gh_4}{G_f}} + \frac{C_{VCV3}}{A_4} \sqrt{\frac{\rho gh_3}{G_f}} + \frac{F_{\text{pump2}}}{A_4} \quad (6.22)$$

จากการทำดุลมวลสารทั้งสี่ถัง จะได้ระบบสมการซึ่งเป็นตัวแทนของระบบ ซึ่งสรุปไว้ในสมการที่ 6.23 ถึง 6.26

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{C_{VCV\text{control2}}}{A_1} \sqrt{\frac{\Delta P_{CV\text{control2}}}{G_f}} - \frac{C_{VCV1}}{A_1} \sqrt{\frac{\rho gh_1}{G_f}} = f_1(h, C_{VCV\text{control}}) \quad (6.23)$$

$$\begin{aligned} \frac{dh_2}{dt} &= -\frac{C_{VCV\text{control1}}}{A_2} \sqrt{\frac{\Delta P_{CV\text{control1}}}{G_f}} - \frac{C_{VCV2}}{A_2} \sqrt{\frac{\rho gh_2}{G_f}} + \frac{C_{VCV1}}{A_2} \sqrt{\frac{\rho gh_1}{G_f}} + \frac{F_{\text{pump1}}}{A_2} \\ &= f_2(h, C_{VCV\text{control}}) \end{aligned} \quad (6.24)$$

$$\frac{dh_3}{dt} = \frac{C_{VCVcontrol1}}{A_3} \sqrt{\frac{\Delta P_{CVcontrol1}}{G_f}} - \frac{C_{VCV3}}{A_3} \sqrt{\frac{\rho g h_3}{G_f}} = f_3(h, C_{VCVcontrol}) \quad (6.25)$$

$$\begin{aligned} \frac{dh_4}{dt} &= -\frac{C_{VCVcontrol2}}{A_4} \sqrt{\frac{\Delta P_{CVcontrol2}}{G_f}} - \frac{C_{VCV4}}{A_4} \sqrt{\frac{\rho g h_4}{G_f}} + \frac{C_{VCV3}}{A_4} \sqrt{\frac{\rho g h_3}{G_f}} + \frac{F_{pump2}}{A_4} \\ &= f_4(h, C_{VCVcontrol}) \end{aligned} \quad (6.26)$$

โดยที่	h_i	คือ	ความสูงของน้ำถังที่ i
	A_i	คือ	พื้นที่หน้าตัดของถังที่ i
	C_{VCVi}	คือ	สัมประสิทธิ์การไหลของบอลวาล์ว i
	$C_{VCVcontroli}$	คือ	สัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วควบคุม i
	ΔP_{CVi}	คือ	ความดันลดคร่อมวาล์วควบคุม i
	F_{pumpi}	คือ	อัตราการไหลของปั๊มที่ i
	ρ	คือ	ความหนาแน่นของของเหลว
	G_f	คือ	ความถ่วงจำเพาะของของเหลว
	g	คือ	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง = 9.81 m/s^2

จากสมการที่ 6.3, 6.4, 6.5, 6.6 ตัวแปรสแตต x คือ h_1, h_2, h_3, h_4 ตัวแปรปรับ u คือ $C_{VCVcontrol1}, C_{VCVcontrol2}$ โดยเราจะทำการเปลี่ยนตัวแปรสแตตและตัวแปรปรับให้อยู่ในรูปตัวแปรเบี่ยงเบน (Deviation variable) โดยเทียบกับค่าตัวแปรที่สภาวะคงตัว จากนั้นจะทำการประมาณระบบสมการให้อยู่ในรูปเชิงเส้น

โดยในการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปตัวแปรเบี่ยงเบนนั้นจะได้ว่า

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

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

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

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

$$C'_{VCVcontrol1} = C_{VCVcontrol1} - \bar{C}_{VCVcontrol1}$$

$$C'_{VCVcontrol2} = C_{VCVcontrol2} - \bar{C}_{VCVcontrol2}$$

จะได้ $h'_1, h'_2, h'_3, h'_4, C'_{VCVcontrol1}, C'_{VCVcontrol2}$ อยู่ในรูปตัวแปรเบี่ยงเบนในสมการที่ 6.27 โดยค่าพารามิเตอร์ของระบบสี่ถังที่สภาวะคงตัว นั้นได้จากวิธีการหาค่าดังกล่าวไว้ในบทที่ 3 ค่าพารามิเตอร์เหล่านั้นเป็นไปดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบสี่ถังที่สภาวะคงตัว

A_1, A_2, A_3, A_4	0.016 m ²	$\bar{h}_1(0)$	0.20 m
G_f	1	$\bar{h}_2(0)$	0.40 m
ρ	1000 kg/m ³	$\bar{h}_3(0)$	0.20 m
G	9.81 m/s ²	$\bar{h}_4(0)$	0.40 m
$C_{VCVcontrol1}(0)$	2.5 gpm/ \sqrt{psi}	C_{VCV1}	2.65 gpm/ \sqrt{psi}
$C_{VCVcontrol2}(0)$	2.5 gpm/ \sqrt{psi}	C_{VCV2}	5.27 gpm/ \sqrt{psi}
$\Delta P_{CVcontrol1}$	3.84 psi	C_{VCV3}	2.65 gpm/ \sqrt{psi}
$\Delta P_{CVcontrol2}$	1.69 psi	C_{VCV4}	5.27 gpm/ \sqrt{psi}

โดยมีขอบเขตของตัวแปรปรับและตัวแปรสแตตดังนี้

$$\text{ขอบเขตของตัวแปรปรับ (gpm}/\sqrt{\text{psi}}) : 0 \leq C_{VCVcontrol1}, C_{VCVcontrol2} \leq 5$$

$$\text{ขอบเขตของตัวแปรสแตต (m)} : 0 \leq h_1, h_2, h_3, h_4 \leq 0.8$$

และหากเขียนแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในรูปเมตริกซ์จะได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \frac{dh'_1}{dt} \\ \frac{dh'_2}{dt} \\ \frac{dh'_3}{dt} \\ \frac{dh'_4}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h'_1 \\ h'_2 \\ h'_3 \\ h'_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \\ b_{41} & b_{42} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C'_{VCVcontrol1} \\ C'_{VCVcontrol2} \end{bmatrix} \quad (6.27)$$

หรือ

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + B\hat{u} \quad (6.28)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \\ b_{41} & b_{42} \end{bmatrix}$$

โดยที่

$$a_{11} = \left[\frac{\partial f_1(h, C_{VCVcontrol})}{\partial h_1} \right]_{(h_{1k}, h_{2k}, h_3, h_4, C_{VCVcontrol1}, C_{VCVcontrol2})} = -\frac{C_{VCV1}}{2A_1} \sqrt{\frac{\rho g}{G_f \bar{h}_1}}$$

$$a_{12} = \left[\frac{\partial f_1(h, C_{VCVcontrol})}{\partial h_2} \right]_{(h_{1k}, h_{2k}, h_3, h_4, C_{VCVcontrol1}, C_{VCVcontrol2})} = 0$$

$$a_{13} = \left[\frac{\partial f_1(h, C_{VCVcontrol})}{\partial h_3} \right]_{(h_{1k}, h_{2k}, h_3, h_4, C_{VCVcontrol1}, C_{VCVcontrol2})} = 0$$

$$a_{14} = \left[\frac{\partial f_1(h, C_{VCVcontrol})}{\partial h_4} \right]_{(h_{1k}, h_{2k}, h_3, h_4, C_{VCVcontrol1}, C_{VCVcontrol2})} = 0$$

$$a_{21} = \left[\frac{\partial f_2(h, C_{VCVcontrol})}{\partial h_1} \right]_{(h_{1k}, h_{2k}, h_3, h_4, C_{VCVcontrol1}, C_{VCVcontrol2})} = \frac{C_{VCV1}}{2A_1} \sqrt{\frac{\rho g}{G_f \bar{h}_1}}$$

$$a_{22} = \left[\frac{\partial f_2(h, C_{VCVcontrol})}{\partial h_2} \right]_{(h_{1k}, h_{2k}, h_3, h_4, C_{VCVcontrol1}, C_{VCVcontrol2})} = -\frac{C_{VCV2}}{2A_2} \sqrt{\frac{\rho g}{G_f \bar{h}_2}}$$

$$a_{23} = \left[\frac{\partial f_2(h, C_{VCVcontrol})}{\partial h_3} \right]_{(h_{1k}, h_{2k}, h_3, h_4, C_{VCVcontrol1}, C_{VCVcontrol2})} = 0$$

$$a_{24} = \left[\frac{\partial f_2(h, C_{VCVcontrol})}{\partial h_4} \right]_{(h_{1k}, h_{2k}, h_3, h_4, C_{VCVcontrol1}, C_{VCVcontrol2})} = 0$$

$$a_{31} = \left[\frac{\partial f_3(h, C_{VCVcontrol})}{\partial h_1} \right]_{(h_{1k}, h_{2k}, h_3, h_4, C_{VCVcontrol1}, C_{VCVcontrol2})} = 0$$

$$a_{32} = \left[\frac{\partial f_3(h, C_{VCVcontrol})}{\partial h_2} \right]_{(h_{1k}, h_{2k}, h_3, h_4, C_{VCVcontrol1}, C_{VCVcontrol2})} = 0$$

$$a_{33} = \left[\frac{\partial f_3(h, C_{VCVcontrol})}{\partial h_3} \right]_{(h_{1k}, h_{2k}, h_3, h_4, C_{VCVcontrol1}, C_{VCVcontrol2})} = -\frac{C_{VCV3}}{2A_3} \sqrt{\frac{\rho g}{G_f \bar{h}_3}}$$

$$a_{34} = \left[\frac{\partial f_3(h, C_{VCVcontrol})}{\partial h_4} \right]_{(h_{1k}, h_{2k}, h_3, h_4, C_{VCVcontrol1}, C_{VCVcontrol2})} = 0$$

$$a_{41} = \left[\frac{\partial f_4(h, C_{VCVcontrol})}{\partial h_1} \right]_{(h_{1k}, h_{2k}, h_3, h_4, C_{VCVcontrol1}, C_{VCVcontrol2})} = 0$$

$$a_{42} = \left[\frac{\partial f_4(h, C_{VCVcontrol})}{\partial h_2} \right]_{(h_{1k}, h_{2k}, h_3, h_4, C_{VCVcontrol1}, C_{VCVcontrol2})} = 0$$

$$a_{43} = \left[\frac{\partial f_4(h, C_{VCVcontrol})}{\partial h_3} \right]_{(h_{1k}, h_{2k}, h_3, h_4, C_{VCVcontrol1}, C_{VCVcontrol2})} = \frac{C_{VCV3}}{2A_4} \sqrt{\frac{\rho g}{G_f \bar{h}_4}}$$

$$a_{44} = \left[\frac{\partial f_4(h, C_{VCVcontrol})}{\partial h_4} \right]_{(h_{1k}, h_{2k}, h_3, h_4, C_{VCVcontrol1}, C_{VCVcontrol2})} = -\frac{C_{VCV4}}{2A_4} \sqrt{\frac{\rho g}{G_f \bar{h}_4}}$$

$$b_{11} = \left[\frac{\partial f_1(h, C_{VCVcontrol})}{\partial C_{VCVcontrol1}} \right]_{(h_{1k}, h_{2k}, h_3, h_4, C_{VCVcontrol1}, C_{VCVcontrol2})} = 0$$

$$\begin{aligned}
 b_{12} &= \left[\frac{\partial f_1(h, C_{VCVcontrol})}{\partial C_{VCVcontrol2}} \right]_{(h_{1k}, h_{2k}, h_3, h_4, C_{VCVcontrol1}, C_{VCVcontrol2})} = \frac{1}{A_1} \sqrt{\frac{\Delta P_{CVcontrol2}}{G_f}} \\
 b_{21} &= \left[\frac{\partial f_2(h, C_{VCVcontrol})}{\partial C_{VCVcontrol1}} \right]_{(h_{1k}, h_{2k}, h_3, h_4, C_{VCVcontrol1}, C_{VCVcontrol2})} = 0 \\
 b_{22} &= \left[\frac{\partial f_2(h, C_{VCVcontrol})}{\partial C_{VCVcontrol2}} \right]_{(h_{1k}, h_{2k}, h_3, h_4, C_{VCVcontrol1}, C_{VCVcontrol2})} = -\frac{1}{A_2} \sqrt{\frac{\Delta P_{CVcontrol1}}{G_f}} \\
 b_{31} &= \left[\frac{\partial f_3(h, C_{VCVcontrol})}{\partial C_{VCVcontrol1}} \right]_{(h_{1k}, h_{2k}, h_3, h_4, C_{VCVcontrol1}, C_{VCVcontrol2})} = 0 \\
 b_{32} &= \left[\frac{\partial f_3(h, C_{VCVcontrol})}{\partial C_{VCVcontrol2}} \right]_{(h_{1k}, h_{2k}, h_3, h_4, C_{VCVcontrol1}, C_{VCVcontrol2})} = \frac{1}{A_2} \sqrt{\frac{\Delta P_{CVcontrol1}}{G_f}} \\
 b_{41} &= \left[\frac{\partial f_4(h, C_{VCVcontrol})}{\partial C_{VCVcontrol1}} \right]_{(h_{1k}, h_{2k}, h_3, h_4, C_{VCVcontrol1}, C_{VCVcontrol2})} = 0 \\
 b_{42} &= \left[\frac{\partial f_4(h, C_{VCVcontrol})}{\partial C_{VCVcontrol2}} \right]_{(h_{1k}, h_{2k}, h_3, h_4, C_{VCVcontrol1}, C_{VCVcontrol2})} = -\frac{1}{A_1} \sqrt{\frac{\Delta P_{CVcontrol2}}{G_f}}
 \end{aligned}$$

จะสามารถหาเมตริกซ์ **A** และ เมตริกซ์ **B** ได้จากการแทนจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากบทที่ 3 หรือค่าซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 6.1 และจะได้ค่าเมตริกซ์ **A** และ เมตริกซ์ **B** ดังนี้

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.15 & 0 & 0 & 0 \\ 0.15 & -1.17 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.15 & 0 \\ 0 & 0 & 0.15 & -1.17 \end{bmatrix} \quad (6.29)$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \\ b_{41} & b_{42} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0.07 \\ -0.05 & 0 \\ 0.05 & 0 \\ 0 & -0.07 \end{bmatrix} \quad (6.30)$$

6.1.2 ทดสอบเสถียรภาพของระบบ (System stability)

ในการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบ สามารถทดสอบได้จากค่าของโพลรูปเปิดของระบบนั้นว่าอยู่ทางซ้ายหรือทางขวาของแกนเชิงซ้อน ซึ่งค่า eigenvalues มีค่าเท่ากับโพลรูปเปิดของเมตริกซ์ A ระบบใดๆ จะมีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อ ค่า eigenvalues มีค่าน้อยกว่าศูนย์ทุกตัว ซึ่งค่าของเมตริกซ์ A ของระบบซึ่งได้มาจากการทำดูลมवलสาร มีค่าดังต่อไปนี้

$$A = \begin{bmatrix} -0.15 & 0 & 0 & 0 \\ 0.15 & -1.17 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.15 & 0 \\ 0 & 0 & 0.15 & -1.17 \end{bmatrix}$$

ในการหาค่า eigenvalues จะหาได้จากสมการนี้

$$\det(\lambda I - A) = 0 \quad (6.31)$$

เมื่อ I คือ เมตริกซ์เอกลักษณ์
 λ คือ ค่า eigenvalues
 A คือ เมตริกซ์ที่ได้มาจากการทำดูลมवल

พบว่าค่า eigenvalues ที่ได้มีค่าเป็นลบ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการนี้มีความเสถียร

$$\lambda_1 = -1.17$$

$$\lambda_2 = -0.15$$

$$\lambda_3 = -1.17$$

$$\lambda_4 = -0.15$$

6.1.3 ทดสอบความสามารถควบคุมได้ (Controllability)

การตรวจสอบความสามารถควบคุมได้ของระบบใดๆ สามารถทำได้โดยตรวจสอบเมตริกซ์ความสามารถควบคุมได้ (Controllability Matrix) ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{เมตริกซ์ความสามารถควบคุมได้} = \begin{bmatrix} B & AB & A^2B & \dots & \dots & A^{n-1}B \end{bmatrix} \quad (6.32)$$

โดยที่ n คือ จำนวนของตัวแปรสแตต

กรณีที่เมตริกซ์ความสามารถควบคุมได้เป็นเมตริกซ์จัตุรัส ค่าลำดับชั้นของเมตริกซ์จะหาได้จากค่าดีเทอร์มิแนนต์ของเมตริกซ์นั้น ในกรณีที่ค่าดีเทอร์มิแนนต์ไม่เท่ากับศูนย์ค่าลำดับชั้นจะเท่ากับขนาดของเมตริกซ์ (ลำดับชั้นสูงสุด) ส่วนในกรณีที่เมตริกซ์ความสามารถควบคุมได้ไม่เป็นเมตริกซ์จัตุรัส ระบบจะสามารถควบคุมได้ก็ต่อเมื่อแต่ละแถวใดๆ ของเมตริกซ์ไม่สามารถแทนกันหรือเทียบเท่ากันได้

ซึ่งระบบที่ศึกษามีจำนวนสแตตเท่ากับ 4 หรือ $n=4$ จะสามารถกำหนดเมตริกซ์ความสามารถควบคุมได้ดังนี้

$$\text{เมตริกซ์ความสามารถควบคุมได้} = \begin{bmatrix} B & AB & A^2B & A^3B \end{bmatrix} \quad (6.33)$$

โดยที่ เมตริกซ์ A ได้มาจากสมการที่ 6.29 และเมตริกซ์ B ได้มาจากสมการที่ 6.30 เมื่อแทนสมการที่ 6.29 และ 6.30 ในสมการที่ 6.33 จะได้ดังสมการที่ 6.34

ดังนั้น Controllability matrix =

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.07 & 0 & -0.0105 & 0 & 0.0016 & 0 & -0.0002 \\ -0.05 & 0 & 0.0585 & 0.0105 & -0.0684 & -0.0139 & 0.0801 & 0.0165 \\ 0.05 & 0 & -0.0075 & 0 & 0.0011 & 0 & -0.0002 & 0 \\ 0 & -0.07 & 0.0075 & 0.0819 & -0.0099 & -0.0958 & 0.0118 & 0.1121 \end{bmatrix} \quad (6.34)$$

ซึ่งจะเห็นว่าเมตริกซ์ความควบคุมได้ไม่เป็นเมตริกซ์จัตุรัส ระบบจะสามารถควบคุมได้ก็ต่อเมื่อแต่ละแถวใดๆของเมตริกซ์ไม่สามารถแทนกันหรือเทียบเท่ากัน เมตริกซ์ในสมการที่ 6.34 เป็นเมตริกซ์ 4 แถว 8 หลัก โดยที่ แถวที่ 1 เป็นของถังที่ 1, แถวที่ 2 เป็นของถังที่ 2, แถวที่ 3 เป็นของถังที่ 3 แถวที่ 4 เป็นของถังที่ 4 พบว่าแถวที่ 1 หลักที่ 1 และแถวที่ 4 หลักที่ 1 สามารถแทนกันได้ แสดงว่าการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 และถังที่ 4 ไม่สามารถควบคุมพร้อมกันได้ และแถวที่ 2 หลักที่ 2 และแถวที่ 3 หลักที่ 2 สามารถแทนกันได้ แสดงว่าการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 2 และถังที่ 3 ไม่สามารถควบคุมพร้อมกันได้

สรุปกรณีที่สามารถควบคุมได้

- การควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 และถังที่ 3
- การควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 และถังที่ 2
- การควบคุมระดับของน้ำถังที่ 3 และถังที่ 4
- การควบคุมระดับของน้ำถังที่ 2 และถังที่ 4

จากนั้นนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นไปใช้ในการศึกษาอิทธิพลของความไม่แน่นอนของแบบจำลองที่มีต่อสมรรถนะของการควบคุมโดยใช้วิธีการจำลองแบบเทคนิคมอนติคาร์โล

6.2 ผลการจำลองกระบวนการทดสอบตัวควบคุมในกรณีแบบจำลองของกระบวนการมีความไม่แน่นอนวิเคราะห์โดยการจำลองวิธีแบบเทคนิคมอนติคาร์โล

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมรรถนะของตัวควบคุมในกรณีของแบบจำลองกระบวนการมีความไม่แน่นอน โดยการจำลองแบบเทคนิคมอนติคาร์โล ซึ่งจะเห็นได้ว่าในขั้นตอนการสร้างแบบจำลองนั้นอาจมีความไม่แน่นอนเกิดขึ้นได้ทั้งในขั้นตอนของการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆตลอดจนขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เองเช่น การทำการประมาณเชิงเส้นเป็นต้น ส่งผลให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ อาจแตกต่างไปจาก

กระบวนการจริง ดังนั้นจึงทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมในสภาวะของแบบจำลองที่มีความไม่แน่นอนในระดับความรุนแรงต่างๆ กัน โดยตัวควบคุมที่พิจารณาได้แก่ ตัวควบคุมแบบ PID, ตัวควบคุมแบบ MPC, ตัวควบคุมแบบ mp-MPC ซึ่งในตัวควบคุมทั้ง 3 แบบที่พิจารณานั้นจะเห็นว่า มีตัวควบคุม 2 ชนิดซึ่งทำการควบคุมโดยอาศัยแบบจำลองของกระบวนการ ซึ่งถ้าแบบจำลองมีความไม่แน่นอนแฝงอยู่อาจส่งผลเสียโดยตรงต่อสมรรถนะในการควบคุมได้ โดยพิจารณาความไม่แน่นอนของเมตริกซ์ A และเพิ่มส่วนความไม่แน่นอนของเมตริกซ์ A โดยกำหนดช่วงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแบบจำลองดังสมการต่อไปนี้

เมตริกซ์ A ได้จากการสร้างแบบจำลองด้วยการคูณมวลสาร

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{C_{vcv1}}{2A_1} \sqrt{\frac{\rho g}{G_f \bar{h}_1}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{C_{vcv2}}{2A_2} \sqrt{\frac{\rho g}{G_f \bar{h}_1}} & -\frac{C_{vcv2}}{2A_2} \sqrt{\frac{\rho g}{G_f \bar{h}_2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{C_{vcv3}}{2A_3} \sqrt{\frac{\rho g}{G_f \bar{h}_3}} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{C_{vcv3}}{2A_4} \sqrt{\frac{\rho g}{G_f \bar{h}_3}} & -\frac{C_{vcv4}}{2A_4} \sqrt{\frac{\rho g}{G_f \bar{h}_4}} \end{bmatrix}$$

และเมื่อแทนค่าจากตารางที่ 6.1 จะได้ค่าเมตริกซ์ A ดังนี้

$$A = \begin{bmatrix} -0.15 & 0 & 0 & 0 \\ 0.15 & -1.17 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.15 & 0 \\ 0 & 0 & 0.15 & -1.17 \end{bmatrix}$$

โดยที่ เมตริกซ์ A ได้จากการทำคูณมวลสารดังสมการที่ 6.29 และเมื่อเพิ่มส่วนความไม่แน่นอนของเมตริกซ์ A จะได้เมตริกซ์ A ซึ่งรวมส่วนของความไม่แน่นอนแล้ว เป็นไปตามสมการที่ 6.34

$$A = \begin{bmatrix} -0.15 & 0 & 0 & 0 \\ 0.15 & -1.17 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.15 & 0 \\ 0 & 0 & 0.15 & -1.17 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \pm(ppm) & 0 & 0 & 0 \\ \pm(ppm) & \pm(ppm) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \pm(ppm) & 0 \\ 0 & 0 & \pm(ppm) & \pm(ppm) \end{bmatrix} \quad (6.34)$$

เมื่อ ppm คือค่าความผิดพลาดของแบบจำลอง (percent plant mismatch)

$$ppm = \text{ค่าแบบจำลองไม่มีความผิดพลาด} \times \text{ร้อยละความผิดพลาด} \quad (6.35)$$

ซึ่งร้อยละความผิดพลาดหาได้จากการสุ่มตัวเลขแบบเทียม (Pseudo-random numbers) โดยทำการสุ่มด้วยโปรแกรม MATLAB ด้วยคำสั่ง rand และใช้อัลกอริทึมของ Mersenne twister ในการสุ่ม ซึ่งการสร้างตัวเลขสุ่มแบบเทียมนี้อาจกำหนดการแจกแจงให้เป็นแบบยูนิฟอร์มและมีค่าที่สุ่มได้อยู่ในช่วง [0,1] หลังจากนั้นจะทำการกำหนดช่วงที่ต้องการศึกษา เช่น -20% ถึง +20% ของความผิดพลาดของแบบจำลอง เมื่อทำการสุ่มตัวเลขจาก 0 ถึง 1 ออกมาแล้ว จะนำตัวเลขที่สุ่มได้เทียบบัญญัติไตรยางศ์ให้อยู่ในช่วงที่กำหนดเช่น -20% ถึง +20% ของความผิดพลาดของแบบจำลอง ซึ่งจะได้ร้อยละความผิดพลาดมาค่าหนึ่ง แล้วนำไปแทนในสมการที่ 6.35 และสมการที่ 6.34 ต่อไป หลังจากนั้นนำเมตริกซ์ A ที่เพิ่มส่วนของความไม่แน่นอนไปจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม MATLAB โดยทำการสุ่มจำนวน 100 รอบ ในแต่ละตัวควบคุมและช่วงเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาด สมรรถนะของการควบคุมชี้วัดโดยดัชนี IAE (Integral of the absolute value of error) และค่า IAE เฉลี่ย (Integral of the absolute value of error average) ดังสมการที่ 6.36, 6.37 (รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ข)

$$IAE = \int_0^{\infty} |\text{ค่าเป้าหมาย} - \text{ความสูงของน้ำที่ต้องการควบคุม}| dt \quad (6.36)$$

$$IAE \text{ เฉลี่ย} = \frac{\sum_{i=1}^N (\int_0^{\infty} |\text{ค่าเป้าหมาย} - \text{ความสูงของน้ำที่ต้องการควบคุม}| dt)}{N} \quad (6.37)$$

โดยที่

dt = ผลต่างของเวลาหรือเวลาสุ่มตัวอย่าง

N = จำนวนรอบในการทำซ้ำ

กรณีศึกษาของแบบจำลองมีความไม่แน่นอน โดยศึกษาการควบคุมความสูงของน้ำถังที่ 2 และ ถังที่ 4 ซึ่งการควบคุมในกรณีนี้ ความไม่แน่นอนของแบบจำลองจะมีผลกระทบต่อสมรรถนะในการควบคุมมากที่สุด ซึ่งการควบคุมความสูงของน้ำถังที่ 2 และ ถังที่ 4 มีตัวแปรเข้า 2 สาย จะทำให้ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะในการควบคุมมากที่สุด ตัวควบคุมที่พิจารณา 3 ชนิดคือ ตัวควบคุมแบบ PID ตัวควบคุมแบบ MPC และตัวควบคุมแบบ mp-MPC ส่วนช่วงเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดของแบบจำลองที่พิจารณาคือ $\pm 10\%$, $\pm 20\%$, $\pm 30\%$, $\pm 40\%$, $\pm 50\%$, $\pm 60\%$, $\pm 70\%$ ความผิดพลาดของแบบจำลอง ค่าสถานะคงตัวของการเริ่มต้นของการควบคุมความสูงของน้ำถังที่ 2 และถังที่ 4 มีค่าเท่ากับ 40 เซนติเมตร ศึกษากรณีเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย (Step point) และขจัดผลรบกวนของระบบโดยที่ค่าเป้าหมายอยู่ที่ 50 เซนติเมตร เวลาที่สุ่มตัวอย่าง 4 วินาที ในการปรับแต่งของตัวควบคุมในการจำลองกระบวนการโดยจะทำการปรับแต่งตัวควบคุมกรณีของแบบจำลองไม่มีความผิดพลาดก่อนและนำค่าพารามิเตอร์ไปใช้กับกรณีความไม่แน่นอนของแบบจำลองได้ดังนี้

- การปรับแต่งตัวควบคุมแบบPID

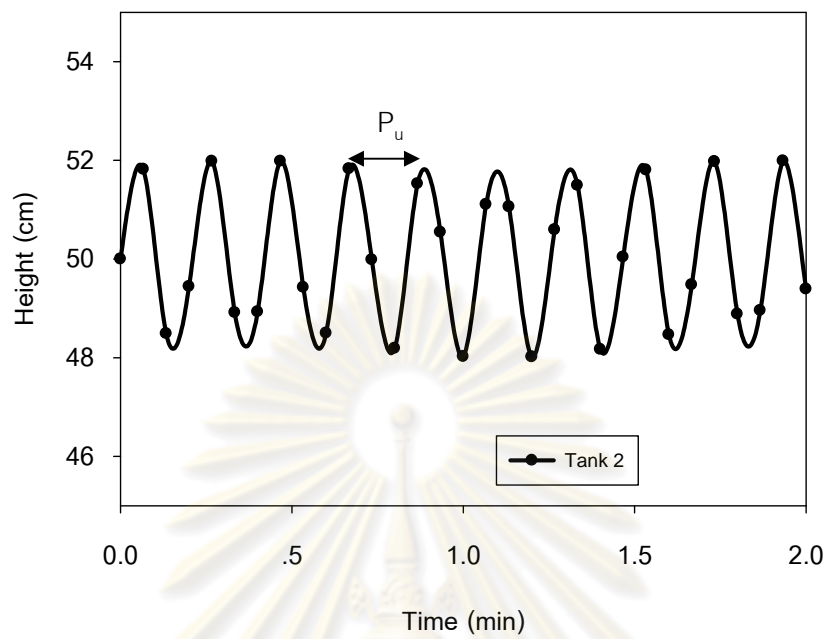
ในงานวิจัยนี้จะปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PID โดยใช้วิธีการปรับแต่งตัวควบคุมด้วยวิธีการแกว่งอย่างต่อเนื่อง (Continuous Cycling Method) ของซิกเลอร์และนิโคลส์ ซึ่งวิธีนี้เหมาะสมกับกระบวนการที่มีการตอบสนองที่ค่อนข้างรวดเร็วและระบบที่มีการแกว่งของตัวแปรควบคุม เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นกระบวนการในการควบคุมความสูงของน้ำซึ่งเป็นกระบวนการที่การตอบสนองเร็ว ดังนั้นจึงเลือกใช้วิธีนี้

การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมPID ทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

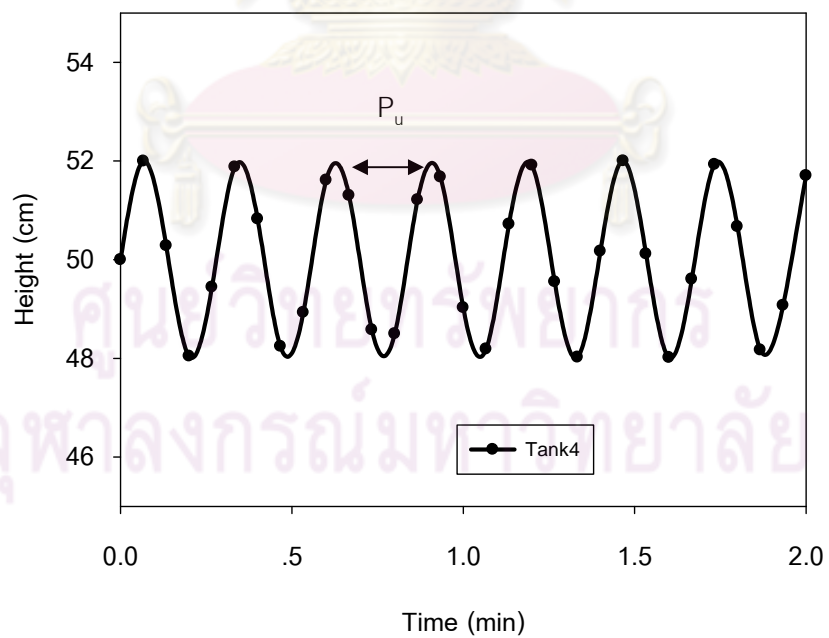
ขั้นที่ 1 ลดผลการควบคุมของโอและดีโดยให้ τ_D น้อยที่สุดและ τ , มากที่สุด

ขั้นที่ 2 ให้ K_c มีค่าน้อยๆ (ประมาณ 0.5) และเริ่มการควบคุมอัตโนมัติ

ขั้นที่ 3 เพิ่มค่า K_c ทีละน้อยจนเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง (Continuous Cycling) (การแกว่งที่มีแอมพลิจูดคงตัว) ภายหลังจากเปลี่ยนแปลงโหลดเพียงเล็กน้อย ค่า K_c ที่ได้จะเรียกว่าค่าอัตราขยายค่าสุดท้าย (Ultimate Gain, K_{cu}) ระยะเวลาที่เกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่องจะเรียกว่า คาบสุดท้าย (Ultimate Period, P_u) ซึ่งในกรณีนี้ K_{cu} ของการควบคุมถังที่ 2 และถังที่ 4 มีค่าเท่ากับ -2 เกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง ดังรูปที่ 6.2 และ 6.3 แล้วใช้การตั้งค่าตัวควบคุม PID ตามตารางที่ 6.2 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 6.2 การตอบสนองของระดับความสูงของน้ำถังที่ 2 มีลักษณะแกว่งอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 6.3 การตอบสนองของระดับความสูงของน้ำถังที่ 4 มีลักษณะแกว่งอย่างต่อเนื่อง

ตารางที่ 6.2 วิธีการปรับแต่งตัวควบคุมด้วยวิธีการแกว่งต่อเนื่อง

ตัวควบคุม	K_c	τ_I	τ_D
P	$0.5K_{cu}$	-	-
PI	$0.45K_{cu}$	$Pu/1.2$	-
PID	$0.6K_{cu}$	$Pu/2$	$Pu/8$

ในงานวิจัยนี้ตัวควบคุมแบบ PID จะใช้โหมดของการควบคุมคือ โหมด P และ โหมด I จะไม่ใช้โหมด D เพราะว่าการตอบสนองของระบบค่อนข้างรวดเร็ว ดังนั้นโหมด D จึงไม่จำเป็นต้องใช้ สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ได้ดังนี้

การควบคุมความสูงของน้ำถังที่ 2 $K_c = -0.9$, $\tau_I = -0.22$ นาที = 13.2 วินาที

การควบคุมความสูงของน้ำถังที่ 4 $K_c = -0.9$, $\tau_I = -0.333$ นาที = 20 วินาที

การควบคุมความสูงของน้ำถังที่ 2 และ 4 ค่า K_c , τ_I มีค่าเป็นลบ เนื่องจากการควบคุมความสูงของน้ำถังที่ 2 และ 4 เป็นการตอบสนองแบบทิศทางตรง คือ ความสูงของน้ำถังที่ 2 และ 4 มีค่าลดลง ดังนั้นวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 จะปรับวาล์วให้ปิดลงเพื่อปรับอัตราการไหลเข้าสู่ถังที่ 2 และ 4 ให้มีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ความสูงของน้ำถังที่ 2 และ 4 มีค่าเพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน ความสูงของน้ำถังที่ 2 และ 4 มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 จะทำปรับวาล์วให้เปิดขึ้นเพื่อปรับอัตราการไหลเข้าสู่ถังที่ 2 และ 4 ให้มีค่าลดลงส่งผลให้ความสูงของน้ำถังที่ 2 และ 4 มีค่าลดลง สรุปได้ว่า K_c เป็นบวกหรือลบขึ้นอยู่กับ การตอบสนองของตัวควบคุมที่มีผลต่อกระบวนการ

ขั้นที่ 4 ทำการปรับแต่งตัวควบคุมแบบละเอียดให้ได้ค่า IAE น้อยที่สุด โดยหลักการในการปรับละเอียดคือ ปรับค่า K_c ลดลงเพื่อลดการโอเวอร์ชูตแต่การทำเช่นนี้จะส่งผลให้การตอบสนองช้าลง และปรับค่า τ_I ลดลงเพื่อกำจัดออฟเซต แต่หากปรับค่า τ_I ต่ำจนเกินไปจะทำให้ผลการตอบสนองรุนแรงและโอเวอร์ชูตสูงขึ้น ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ภายหลังจากปรับแบบละเอียดสรุปดังตารางที่ 6.3

- การปรับแต่งตัวควบคุม MPC และ mp-MPC มีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดปัจจัยถ่วงน้ำหนักเพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ต้องการ ปัจจัยถ่วงน้ำหนักของตัวแปรควบคุม (y_w) เป็นเมตริกซ์ที่เป็น diagonal ที่มีค่าเป็นบวก ค่าเมตริกซ์ปัจจัยถ่วงน้ำหนักของตัวแปรควบคุมพื้นฐานเป็นการวัดความสำคัญของการควบคุมสำหรับแต่ละตัวแปรควบคุม ถ้าค่าเมตริกซ์ปัจจัยถ่วงน้ำหนักของตัวแปรควบคุมเพิ่มขึ้นการเบี่ยงเบนจากค่าเป้าหมายของตัวแปร

ควบคุมจะลดลง ส่วนปัจจัยถ่วงน้ำหนักของตัวแปรปรับ (u_w) เป็นเมตริกซ์ที่เป็น diagonal ที่มีค่าเป็นบวก ปัจจัยถ่วงน้ำหนักของตัวแปรปรับมีผลต่อการเคลื่อนที่ของตัวแปรปรับ ถ้าปัจจัยถ่วงน้ำหนักของตัวแปรปรับเพิ่มขึ้นทำให้การเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับลดลง ซึ่งจะส่งผลให้สมรรถนะในการควบคุมลดลงแต่ความทนทานในการควบคุมจะเพิ่มขึ้น

2. เลือกช่วงเวลาการประมาณ (Prediction Horizon, P)

หลักการเลือกช่วงเวลาการประมาณคือ เลือกช่วงเวลาการประมาณให้มากกว่าค่าโพลลูปเปิดเพื่อรับประกันเสถียรภาพของกระบวนการ อย่างไรก็ตามอาจจะเลือกช่วงเวลาการประมาณน้อยกว่าค่าโพลลูปเปิดก็เป็นได้ ทั้งนี้ต้องตรวจสอบว่าตัวแปรควบคุมสามารถเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ภายในเวลาที่เลือกไว้หรือไม่

3. กำหนดช่วงเวลาการควบคุม (Control Horizon, M)

ปกติจะกำหนดช่วงเวลาการควบคุมให้น้อยกว่าช่วงเวลาการประมาณ ทั้งนี้เพื่อลดเวลาในการประมวลผลโดยวิธีฮอปติไมซ์ ทั้งนี้ช่วงเวลาการควบคุมที่เหมาะสมจะต้องให้สมรรถนะการควบคุมที่ดีและใช้เวลาคำนวณสั้นกว่าเวลาการควบคุมที่ต้องการ จึงจะสามารถนำตัวแปรปรับที่ได้ไปใช้ควบคุมกระบวนการ หลักเกณฑ์ของการปรับแต่งตัวควบคุมคือ ทำการปรับกระบวนการให้มีค่า IAE น้อยที่สุด และคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับไม่มีความรุนแรง โดยค่าพารามิเตอร์ของการปรับแต่งตัวควบคุม MPC และ mp-MPC สรุปดังตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมแต่ละตัวควบคุมการจำลองกระบวนการของการควบคุมระดับของเหลวถึงที่ 2 และถึงที่ 4

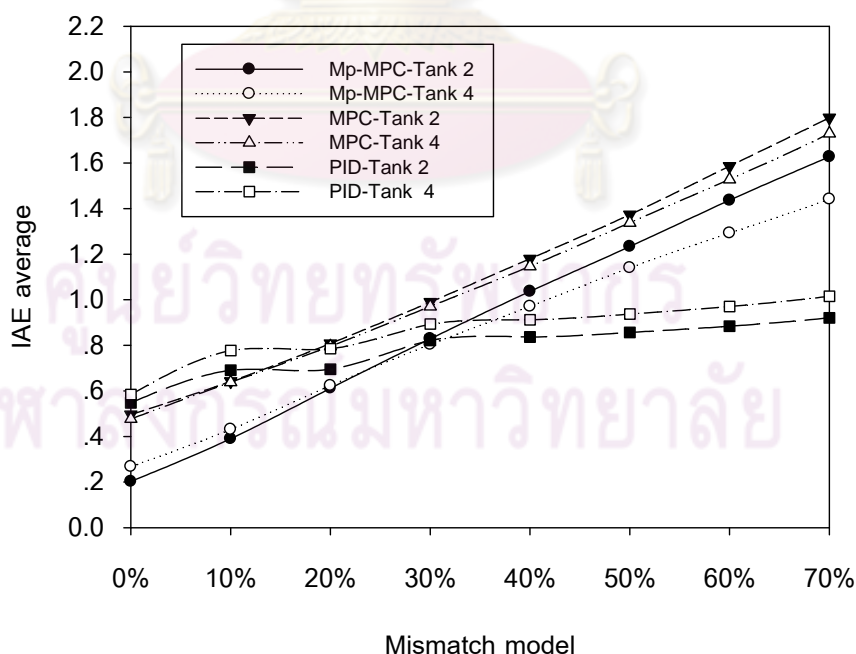
ตัวควบคุม	การควบคุมถึงที่ 2	การควบคุมถึงที่ 4
PID	$K_c = -0.4, \tau_i = 20 \text{ s}, \tau_d = 0 \text{ s}$	$K_c = -0.6, \tau_i = 20 \text{ s}, \tau_d = 0 \text{ s}$
MPC	$P = 20, M = 4, y_{w1} = 20, u_{w1} = 10$	$P = 20, M = 4, y_{w2} = 30, u_{w2} = 10$
mp-MPC	$P = 20, M = 4, y_{w1} = 1, u_{w1} = 1$	$P = 20, M = 4, y_{w2} = 1, u_{w2} = 1$

จากรูปที่ 6.4 เป็นผลการจำลองกระบวนการที่ชี้วัดโดยค่าเฉลี่ยของ IAE ของการควบคุมความสูงของน้ำถึงที่ 2 และถึงที่ 4 ต่อช่วงเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดของแบบจำลอง พบว่าตัวควบคุมแบบ mp-MPC มีค่า IAE เฉลี่ยน้อยกว่า ตัวควบคุมแบบ MPC และตัวควบคุม

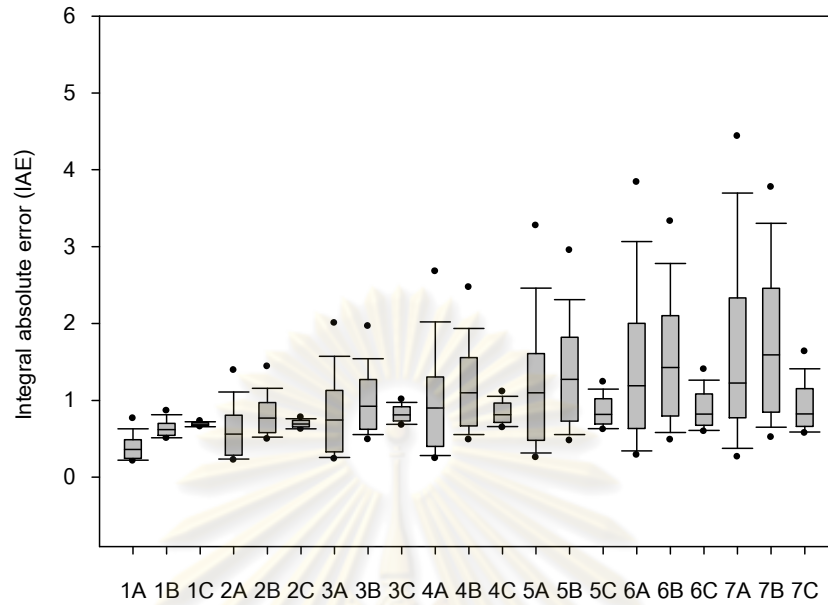
แบบ PID ในช่วงความผิดพลาดของแบบจำลองต่ำกว่า $\pm 40\%$ แสดงว่าตัวควบคุมแบบ mp-MPC มีสมรรถนะในการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบ MPC และ ตัวควบคุมแบบ PID แต่ในช่วงเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดของแบบจำลองมากกว่าตั้งแต่ $\pm 40\%$ ขึ้นไป ตัวควบคุมแบบ PID มีสมรรถนะในการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบ mp-MPC และ ตัวควบคุมแบบ MPC

รูปที่ 6.5 แสดงการกระจายตัวของข้อมูลของค่า IAE ในกรณีการควบคุมถึงที่ 2 พบว่าการกระจายตัวของค่า IAE ของตัวควบคุมแบบ PID มีความกระจายตัวน้อยกว่าตัวควบคุมแบบ MPC และ mp-MPC แสดงว่าตัวควบคุมแบบ PID มีสมรรถนะในการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบ MPC และ mp-MPC เมื่อสนใจในส่วนของการกระจายตัวของข้อมูลของค่า IAE ส่วนในกรณีการควบคุมถึงที่ 4 มีลักษณะคล้ายกับการควบคุมถึงที่ 2 ดังรูปที่ 6.6

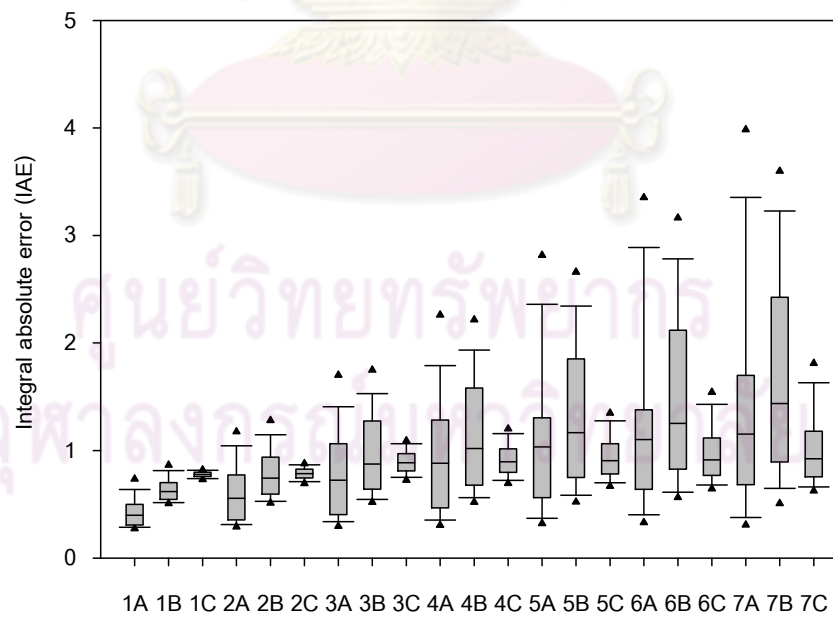
ซึ่งจากรูปที่ 6.4, 6.5, 6.6 ยังไม่สามารถตอบได้ว่าตัวควบคุมแบบใดมีสมรรถนะในการควบคุมที่ดีกว่ากันซึ่งผลจากค่า IAE เฉลี่ยกับการกระจายตัวของข้อมูลของค่า IAE มีความขัดแย้งกัน ดังนั้นจึงใช้แผนแบบแพททอเรียลในการวิเคราะห์หาจุดที่ดีที่สุดและบ่งบอกว่าตัวควบคุมแบบใดและช่วงเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดของแบบจำลองมีสมรรถนะในการควบคุมได้ดีกว่ากัน สามารถเปรียบเทียบระหว่าง ตัวควบคุมแบบในแต่ละช่วงเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดของแบบจำลอง ทำการทดสอบในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 6.4 เปรียบเทียบผลของค่า IAE เฉลี่ยได้จากการจำลองกระบวนการของแต่ละตัวควบคุมตามระดับค่าความผิดพลาดของแบบจำลองกระบวนการ



รูปที่ 6.6 เปรียบเทียบการกระจายข้อมูลของ ค่า IAE แบบ box plot ซึ่งได้จากการจำลองกระบวนการของแต่ละตัวควบคุมตามระดับค่าความผิดพลาดของแบบจำลองกระบวนการของถึงที่ 2



รูปที่ 6.7 เปรียบเทียบการกระจายข้อมูลของ ค่า IAE แบบ box plot ซึ่งได้จากการจำลองกระบวนการของแต่ละตัวควบคุมตามระดับค่าความผิดพลาดของแบบจำลองกระบวนการของถึงที่ 4

- 1 = \pm 10% plant model mismatch
 2 = \pm 20% plant model mismatch
 3 = \pm 30% plant model mismatch
 4 = \pm 40% plant model mismatch
 5 = \pm 50% plant model mismatch
 6 = \pm 60% plant model mismatch
 7 = \pm 70% plant model mismatch
 A = ตัวควบคุมแบบ mp-MPC
 B = ตัวควบคุมแบบ MPC
 C = ตัวควบคุมแบบ PID

6.2.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของตัวควบคุมต่อความผิดพลาดของแบบจำลองโดยใช้แผนแบบแฟกทอเรียล

ศึกษาอิทธิพลของตัวควบคุมต่อความผิดพลาดของแบบจำลอง โดยนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาความไม่แน่นอนของแบบจำลองในหัวข้อข้างต้นทำการวิเคราะห์โดยใช้ โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ด้วยโปรแกรม R

ทำการทดสอบอิทธิพลโดยนำข้อมูล IAE ของการควบคุมระดับของความสูงของน้ำถึงที่ 2

การตั้งสมมุติฐานและทำการกำหนดตัวแปรดังนี้

ตัวแบบเชิงเส้น

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \gamma_j + (\tau\gamma)_{ijk} + \epsilon_{ijk} ; i=1,2,3 ; j = 1,2,\dots,7 ; k = 1,2,\dots,100$$

μ แทน ค่าเฉลี่ยรวมของค่า IAE ของถึงที่ 2

τ_i แทน อิทธิพลของระดับที่ 3 ของปัจจัย ชนิดของตัวควบคุม

γ_j แทน อิทธิพลของระดับที่ 7 ของปัจจัย ช่วงเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาด

ของแบบจำลอง

$(\tau\gamma)_{ijk}$ แทน อิทธิพลของปฏิสัมพันธ์ต่อกันภายในระหว่าง τ_i และ γ_j

ϵ_{ijk} แทน ตัวแปรสุ่มของความคาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในหน่วยทดลองที่ k ที่

ได้รับปัจจัยชนิดของตัวควบคุมระดับที่ i และได้รับปัจจัยช่วงเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดของแบบจำลองระดับที่ j

สร้างตารางค่าเฉลี่ยของค่า IAE จำแนกตามชนิดของตัวควบคุมและช่วงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแบบจำลองของการควบคุมถึงที่ 2 โดยค่าเฉลี่ยของ Treatment combination และของแต่ละปัจจัยได้สรุปดังตารางที่ 6.4 (ข้อมูลดิบอยู่ในภาคผนวก ฉ)

ตารางที่ 6.4 ข้อมูลของค่า IAE: ค่าเฉลี่ยของ treatment combination และของปัจจัยของการควบคุมถึงที่ 2

ตัวควบคุม	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแบบจำลอง								$(\bar{y}_{i..})$
	0%	±10%	±20%	±30%	±40%	±50%	±60%	±70%	
PID	0.548	0.690	0.695	0.821	0.836	0.856	0.883	0.920	6.25
MPC	0.496	0.641	0.808	0.989	1.179	1.373	1.586	1.798	8.87
mp-MPC	0.202	0.390	0.611	0.828	1.036	1.233	1.436	1.627	7.36
$(\bar{y}_{..})$	1.246	1.722	2.114	2.639	3.053	3.463	3.906	4.346	22.48

การวิเคราะห์ด้วยตาราง ANOVA ค่าสถิติของตาราง ANOVA สำหรับข้อมูลนี้สามารถคำนวณโดยโปรแกรม R (โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ) ดังรูปที่ 6.7

```
> summary(I&E.anova)
              Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
controller.type      2   51.11  25.5536   68.046 < 2.2e-16 ***
mismatch             6  179.67  29.9444   79.737 < 2.2e-16 ***
controller.type:mismatch 12   48.71   4.0593   10.809 < 2.2e-16 ***
Residuals          2079  780.74   0.3755
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

รูปที่ 6.7 ผลของการคำนวณวิเคราะห์ ANOVA ของโปรแกรม R กรณีการควบคุมถึงที่ 2

สรุปผลตาราง ANOVA ดังตารางที่ 6.5 และทำการทดสอบอิทธิพลของแต่ละตัวควบคุมและอิทธิพลของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแบบจำลอง และผลกระทบต่อกันระหว่างแต่ละตัวควบคุมและเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแบบจำลอง ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ 6.5 ข้อมูลค่า IAE ของการควบคุมครั้งที่ 2: ตาราง ANOVA

SOV	df	SS	MS	F	P-value
ตัวควบคุม (C)	2	51.11	25.55	68.046	< 2.2e-16
ช่วงเปอร์เซ็นต์ของ(M) ความผิดพลาดของ แบบจำลอง	6	179.67	29.94	79.737	< 2.2e-16
ปฏิสัมพันธ์ต่อกัน ภายใน(C×M)	12	48.71	4.059	10.809	< 2.2e-16
ความคลาดเคลื่อน	2079	780.74	0.3755		
รวม	2099	1060.23			

โดยตั้งสมมุติฐานดังนี้

1. $H_0 : (\tau\gamma)_{ij} = 0$, $i=1,2,\dots,a$, $j=1,2,\dots,b$ (ชนิดของตัวควบคุมกับช่วงเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดของแบบจำลองไม่มีผลต่อกันและไม่มีผลต่อค่า IAE)

$H_1 : (\tau\gamma)_{ij} \neq 0$, สำหรับบาง i,j (ชนิดของตัวควบคุมกับช่วงเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดของแบบจำลองมีผลต่อกันและมีผลต่อค่า IAE)

$$\text{ปฏิเสธ } H_0 \text{ ถ้า } F_0 = \frac{MS(AB)}{MSE} \geq F_{\alpha, [(a-1)(b-1), ab(r-1)]} \text{ หรือค่า } p \leq \alpha$$

ผลทดสอบอิทธิพลของระหว่างตัวควบคุมกับช่วงเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดของแบบจำลองมีผลกระทบต่อค่า IAE พบว่า $F_0 = \frac{MS(C \times M)}{MSE} = 10.809$ มีค่า $p = 2.2e-16$ น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1

2. $H_0 : \tau_i = 0$, $i=1,2,\dots,a$ (อิทธิพลของชนิดของตัวควบคุมไม่มีผลต่อค่า IAE)

$H_1 : \tau_i \neq 0$, สำหรับบาง i , (อิทธิพลของชนิดของตัวควบคุมมีผลต่อค่า IAE)

$$\text{ปฏิเสธ } H_0 \text{ ถ้า } F_0 = \frac{MSA}{MSE} \geq F_{\alpha, [a-1, ab(r-1)]} \text{ หรือค่า } p \leq \alpha$$

ค่าสถิติสำหรับการทดสอบอิทธิพลของชนิดตัวควบคุมที่ทำการทดสอบ พบว่า

$$F_0 = \frac{MSC}{MSE} = 68.046 \text{ มีค่า } p = 2.2e-16 \text{ น้อยกว่า } 0.05 \text{ จึงปฏิเสธ } H_0 \text{ ยอมรับ } H_1$$

3. $H_0: \gamma_j = 0, j=1,2,\dots,b$ (อิทธิพลของช่วงเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดของแบบจำลองไม่มีผลต่อค่า IAE)

$H_1: \gamma_j \neq 0$, สำหรับบาง j , (อิทธิพลของช่วงเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดของแบบจำลองมีผลต่อค่า IAE)

ค่าสถิติสำหรับการทดสอบอิทธิพลของช่วงเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดของแบบจำลองที่ทำการทดสอบ พบว่า $F_0 = \frac{MSM}{MSE} = 79.737$ มีค่า $p = 2.2e-16$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1

ปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1

สรุปได้ว่า ชนิดตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมและเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแบบจำลอง มีอิทธิพลต่อค่า IAE อย่างมีนัยสำคัญ และระหว่างชนิดของตัวควบคุมกับช่วงเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดของแบบจำลองมีผลต่อกันและมีผลต่อค่า IAE

ตรวจสอบอิทธิพลเชิงเดี่ยวของตัวควบคุมในแต่ละช่วงเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดของแบบจำลอง โดยมีความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

$$S_c = \sqrt{\frac{MSE}{r} [1^2 + (-1)^2]} = \sqrt{\frac{0.3755}{100} (2)} = 0.0867$$

และค่าสถิติ Bonferroni $t_{\frac{\alpha}{2}(k,v)} = t_{0.025,(24,2079)} = 3.08$ โดยคำนวณค่าสถิติจากโปรแกรม R

ตารางที่ 6.6 เป็นผลการทดสอบอิทธิพลเชิงเดี่ยว ซึ่งสรุปได้ว่าอิทธิพลเชิงเดี่ยวของตัวควบคุมที่มีต่อช่วงของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแบบจำลอง ที่ช่วง $\pm 20\%$ ถึง $\pm 30\%$ ของความผิดพลาดของแบบจำลองนั้น ค่า IAE เฉลี่ยของการควบคุมที่ควบคุมโดยตัวควบคุมแบบ PID, ตัวควบคุมแบบ MPC และ ตัวควบคุมแบบ mp-MPC ไม่สามารถสรุปได้ว่าสมรรถนะของการควบคุมของตัวควบคุมแบบใดดีกว่ากัน เนื่องจากค่าขอบเขตบนเป็นค่าบวกและค่าขอบเขตล่างเป็นค่าลบทั้งหมด จึงไม่สามารถบ่งบอกได้ว่าสมรรถนะของตัวควบคุมชนิดใดมีสมรรถนะของการควบคุมดีกว่ากันในทางสถิติ ถ้าพิจารณาช่วงความผิดพลาดของแบบจำลองจาก 0% ถึง $\pm 10\%$ ค่า IAE เฉลี่ยของการควบคุมที่ควบคุมโดยตัวควบคุมแบบ mp-MPC ต่ำกว่าตัวควบคุมแบบ MPC และตัวควบคุมแบบ PID อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งบ่งบอกได้ว่าตัวควบคุมแบบ mp-MPC มีสมรรถนะที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบ MPC และ PID ในช่วงนี้ แต่ในช่วง $\pm 40\%$ ถึง $\pm 70\%$ ของความผิดพลาดของแบบจำลอง ค่า IAE เฉลี่ยของการควบคุมที่ควบคุมโดยตัวควบคุมแบบ PID ต่ำกว่าตัวควบคุมแบบ mp-MPC และตัวควบคุมแบบ MPC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติซึ่งบ่งบอกได้ว่าตัวควบคุมแบบ PID มีสมรรถนะที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบ mp-MPC และ MPC ในช่วงนี้

ตารางที่ 6.6 ข้อมูลค่า IAEของการควบคุมของถังที่ 2: การทดสอบอิทธิพลเชิงเดียว

ช่วงเปอร์เซ็นต์ของ ความผิดพลาด ของแบบจำลอง	การเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุม 2 ชนิด		ช่วงความเชื่อมั่น 95%	
			$\hat{C} \pm t_{0.025, (24, 2079)} S_{\hat{c}_i}$	
			ขอบเขตล่าง	ขอบเขตบน
0%	$\hat{C}_1 : \bar{y}_{11^*} - \bar{y}_{21^*} =$	0.052	-0.215	0.319
	$\hat{C}_2 : \bar{y}_{11^*} - \bar{y}_{31^*} =$	0.345	0.078	0.612
	$\hat{C}_3 : \bar{y}_{21^*} - \bar{y}_{31^*} =$	0.293	0.026	0.560
±10%	$\hat{C}_4 : \bar{y}_{12^*} - \bar{y}_{22^*} =$	0.049	-0.218	0.316
	$\hat{C}_5 : \bar{y}_{12^*} - \bar{y}_{32^*} =$	0.301	0.034	0.568
	$\hat{C}_6 : \bar{y}_{22^*} - \bar{y}_{32^*} =$	0.251	-0.016	0.518
±20%	$\hat{C}_7 : \bar{y}_{13^*} - \bar{y}_{23^*} =$	-0.113	-0.380	0.154
	$\hat{C}_8 : \bar{y}_{13^*} - \bar{y}_{33^*} =$	0.083	-0.184	0.350
	$\hat{C}_9 : \bar{y}_{23^*} - \bar{y}_{33^*} =$	0.196	-0.071	0.463
±30%	$\hat{C}_{10} : \bar{y}_{14^*} - \bar{y}_{24^*} =$	-0.168	-0.435	0.099
	$\hat{C}_{11} : \bar{y}_{14^*} - \bar{y}_{34^*} =$	-0.007	-0.274	0.260
	$\hat{C}_{12} : \bar{y}_{24^*} - \bar{y}_{34^*} =$	0.161	-0.106	0.428
±40%	$\hat{C}_{13} : \bar{y}_{15^*} - \bar{y}_{25^*} =$	-0.343	-0.610	-0.076
	$\hat{C}_{14} : \bar{y}_{15^*} - \bar{y}_{35^*} =$	-0.200	-0.467	0.067
	$\hat{C}_{15} : \bar{y}_{25^*} - \bar{y}_{35^*} =$	0.143	-0.124	0.410
±50%	$\hat{C}_{16} : \bar{y}_{16^*} - \bar{y}_{26^*} =$	-0.516	-0.783	-0.249
	$\hat{C}_{17} : \bar{y}_{16^*} - \bar{y}_{36^*} =$	-0.377	-0.644	-0.110
	$\hat{C}_{18} : \bar{y}_{26^*} - \bar{y}_{36^*} =$	0.140	-0.127	0.407
±60%	$\hat{C}_{19} : \bar{y}_{17^*} - \bar{y}_{27^*} =$	-0.702	-0.969	-0.435
	$\hat{C}_{20} : \bar{y}_{17^*} - \bar{y}_{37^*} =$	-0.553	-0.820	-0.286
	$\hat{C}_{21} : \bar{y}_{27^*} - \bar{y}_{37^*} =$	0.149	-0.118	0.416
±70%	$\hat{C}_{22} : \bar{y}_{18^*} - \bar{y}_{28^*} =$	-0.878	-1.145	-0.611
	$\hat{C}_{23} : \bar{y}_{18^*} - \bar{y}_{38^*} =$	-0.706	-0.973	-0.439
	$\hat{C}_{24} : \bar{y}_{28^*} - \bar{y}_{38^*} =$	0.172	-0.095	0.439

โดยที่

$\bar{y}_{i..}$ คือ ค่าเฉลี่ยของ IAE ของชนิดของตัวควบคุมระดับที่ i

1 = ตัวควบคุมแบบ PID

2 = ตัวควบคุมแบบ MPC

3 = ตัวควบคุมแบบ mp-MPC

ระดับที่ j

$\bar{y}_{.j.}$ คือ ค่าเฉลี่ยของ IAE ช่วงเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดของแบบจำลอง

1 = 0%

2 = $\pm 10\%$

3 = $\pm 20\%$

4 = $\pm 30\%$

5 = $\pm 40\%$

6 = $\pm 50\%$

7 = $\pm 60\%$

8 = $\pm 70\%$

ถึงที่ 4

การทดสอบอิทธิพลโดยนำข้อมูล IAE ของการควบคุมระดับของความสูงของน้ำ

ตัวแบบเชิงเส้น

การตั้งสมมุติฐานและทำการกำหนดตัวแปรดังนี้

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \gamma_j + (\tau\gamma)_{ijk} + \epsilon_{ijk} ; i=1,2,3 ; j = 1,2,\dots,7; k = 1,2,\dots,100$$

μ แทน ค่าเฉลี่ยรวมของค่า IAE ของถึงที่ 4

τ_i แทน อิทธิพลของระดับที่ 3 ของปัจจัย ชนิดของตัวควบคุม

γ_j แทน อิทธิพลของระดับที่ 7 ของปัจจัย ช่วงเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาด

ของแบบจำลอง

$(\tau\gamma)_{ijk}$ แทน อิทธิพลของปฏิสัมพันธ์ต่อกันภายในระหว่าง τ_i และ γ_j

ϵ_{ijk} แทน ตัวแปรสุ่มของความคาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในหน่วยทดลองที่ k ที่ได้รับปัจจัยชนิดของตัวควบคุมระดับที่ i และได้รับปัจจัยช่วงเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดของแบบจำลองระดับที่ j

สร้างตารางค่าเฉลี่ยค่า IAE จำแนกตามตัวควบคุมและเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแบบจำลองของการควบคุมถึงที่ 4 โดยค่าเฉลี่ยของ Treatment combination และของปัจจัยปัจจัยได้สรุปดังตารางที่ 6.7 (ข้อมูลดิบอยู่ในภาคผนวก ก) ทำการวิเคราะห์ด้วยตาราง ANOVA ค่าสถิติของตาราง ANOVA สำหรับข้อมูลนี้สามารถคำนวณโดยโปรแกรม R ดังรูปที่ 6.8

```
> summary(IAE1.anova)
              Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
controller.type  2  24.16  12.079   46.569 < 2.2e-16 ***
mismatch         7 225.97  32.282  124.463 < 2.2e-16 ***
controller.type:mismatch 14  42.81   3.058  11.790 < 2.2e-16 ***
Residuals      2376 616.26   0.259
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

รูปที่ 6.8 ผลของการคำนวณวิเคราะห์ ANOVA ของโปรแกรม R กรณีการควบคุมถึงที่ 4

ตารางที่ 6.7 ข้อมูลของค่า IAE: ค่าเฉลี่ยของ treatment combination และของปัจจัยของการควบคุมถึงที่ 4

ตัวควบคุม	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแบบจำลอง								$(\bar{y}_{i..})$
	0%	±10%	±20%	±30%	±40%	±50%	±60%	±70%	
PID	0.584	0.777	0.785	0.893	0.912	0.937	0.970	1.015	6.874
MPC	0.477	0.638	0.796	0.970	1.147	1.338	1.528	1.729	8.623
mp-MPC	0.268	0.431	0.623	0.804	0.971	1.140	1.293	1.441	6.971
$(\bar{y}_{i..})$	1.329	1.846	2.204	2.667	3.030	3.415	3.791	4.186	22.480

สรุปผลตาราง ANOVA ดังตารางที่ 6.8 และทำการทดสอบอิทธิพลของแต่ละตัวควบคุมและอิทธิพลของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแบบจำลอง และผลกระทบต่อกันระหว่างแต่ละตัวควบคุมและเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแบบจำลอง ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ 6.8 ข้อมูลค่า IAE ของการควบคุมครั้งที่ 4: ตาราง ANOVA

SOV	df	SS	MS	F	P-value
ตัวควบคุม (C)	2	24.16	12.079	46.569	< 2.2e-16
เปอร์เซ็นต์ของ(M) ความผิดพลาดของ แบบจำลอง	7	225.67	32.282	124.463	< 2.2e-16
ปฏิสัมพันธ์ต่อกัน ภายใน(C×M)	14	42.81	3.058	11.790	< 2.2e-16
ความคลาดเคลื่อน	2376	616.26	0.259		
รวม	2399	908.9			

โดยตั้งสมมุติฐานดังนี้

1. $H_0 : (\tau\gamma)_{ij} = 0$, $i=1,2,\dots,a$ $j=1,2,\dots,b$ (ชนิดของตัวควบคุมกับช่วงเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดของแบบจำลองไม่มีผลต่อกันและไม่มีผลต่อค่า IAE)

$H_1 : (\tau\gamma)_{ij} \neq 0$, สำหรับบาง i, j (ชนิดของตัวควบคุมกับช่วงเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดของแบบจำลองมีผลต่อกันและมีผลต่อค่า IAE)

ปฏิเสธ H_0 ถ้า $F_0 = \frac{MS(AB)}{MSE} \geq F_{\alpha, [(a-1)(b-1), ab(r-1)]}$ หรือค่า $p \leq \alpha$

ผลทดสอบอิทธิพลของระหว่างตัวควบคุมกับช่วงเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดของแบบจำลองมีผลกระทบต่อค่า IAE พบว่า $F_0 = \frac{MS(C \times M)}{MSE} = 46.569$ มีค่า $p = 2.2e-16$ น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1

2. $H_0 : \tau_i = 0$, $i=1,2,\dots,a$ (ชนิดของตัวควบคุมไม่มีผลต่อค่า IAE)

$H_1 : \tau_i \neq 0$, สำหรับบาง i , (ชนิดของตัวควบคุมมีผลต่อค่า IAE)

ปฏิเสธ H_0 ถ้า $F_0 = \frac{MSA}{MSE} \geq F_{\alpha, [a-1, ab(r-1)]}$ หรือค่า $p \leq \alpha$

พิจารณาค่าสถิติสำหรับการทดสอบอิทธิพลของตัวควบคุมที่ทำการควบคุม พบว่า $F_0 = \frac{MSC}{MSE} = 124.463$ มีค่า $p = 2.2e-16$ น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1

3. $H_0: \gamma_j = 0, j=1,2,\dots,b$ (ช่วงเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดของแบบจำลองไม่มีผลต่อค่า IAE)

$H_1: \gamma_j \neq 0$, สำหรับบาง j , (ช่วงเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดของแบบจำลองมีผลต่อค่า IAE)

พิจารณาค่าสถิติสำหรับการทดสอบอิทธิพลของตัวควบคุมที่ทำการควบคุม

พบว่า $F_0 = \frac{MSM}{MSE} = 11.790$ มีค่า $p = 2.2e-16$ น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1

สรุปได้ว่า ชนิดของตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมและเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแบบจำลอง มีอิทธิพลต่อค่า IAE อย่างมีนัยสำคัญ และชนิดของตัวควบคุมกับช่วงเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดของแบบจำลองมีผลต่อกันและมีผลต่อค่า IAE

ตรวจสอบอิทธิพลเชิงเดียวของตัวควบคุมในแต่ละช่วงเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดของแบบจำลอง โดยมีความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

$$S_c = \sqrt{\frac{MSE}{r} [1^2 + (-1)^2]} = \sqrt{\frac{0.259}{100} (2)} = 0.0719$$

และค่าสถิติ Bonferroni $t_{\frac{\alpha}{2}(k,v)} = t_{0.025,(24,2376)} = 3.08$ โดยค่าสถิติคำนวณด้วยโปรแกรม R

ตารางที่ 6.9 เป็นตารางทดสอบอิทธิพลเชิงเดียวสรุปได้ว่า อิทธิพลเชิงเดียวของตัวควบคุมที่มีต่อช่วงของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแบบจำลองพบว่า ช่วงของความผิดพลาดของแบบจำลอง $\pm 20\%$ ถึง $\pm 30\%$ ค่า IAE เฉลี่ยของการควบคุมที่ควบคุมโดยตัวควบคุมแบบ PID, ตัวควบคุมแบบ MPC และตัวควบคุมแบบ mp-MPC ไม่สามารถสรุปได้ว่าสมรรถนะของการควบคุมชนิดใดให้สมรรถนะดีไปกว่ากัน เนื่องจากค่าขอบเขตบนเป็นค่าบวกและค่าขอบเขตล่างเป็นค่าลบทั้งหมด จึงไม่สามารถบ่งบอกได้ว่าสมรรถนะของตัวควบคุมชนิดไหนมีสมรรถนะของการควบคุมดีไปกว่ากันในทางสถิติ ถ้าพิจารณาความผิดพลาดของแบบจำลองจาก 0% ถึง $\pm 10\%$ ค่า IAE เฉลี่ยของการควบคุมที่ควบคุมโดยตัวควบคุมแบบ mp-MPC ต่ำกว่าตัวควบคุมแบบ MPC และตัวควบคุมแบบ PID อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งบ่งบอกได้ว่าตัวควบคุมแบบ mp-MPC มีสมรรถนะที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบ MPC และ PID ในช่วงนี้ ส่วนในช่วงของความผิดพลาดของแบบจำลอง $\pm 40\%$ ถึง $\pm 70\%$ ค่า IAE เฉลี่ยของการควบคุมที่ควบคุมโดยตัวควบคุมแบบ PID ต่ำกว่าตัวควบคุมแบบ mp-MPC และตัวควบคุมแบบ MPC อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งบ่งบอกได้ว่าตัวควบคุมแบบ PID มีสมรรถนะที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบ mp-MPC และ MPC ในช่วงนี้

จากการทดสอบสรุปได้ว่า ทั้งชนิดตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมและเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแบบจำลอง มีอิทธิพลต่อค่า IAE อย่างมีนัยสำคัญ และระหว่างชนิดของตัว

ควบคุมกับช่วงเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดของแบบจำลองมีผลต่อกันและมีผลต่อค่า IAE ของการควบคุมระดับของความสูงของถังที่ 2 และถังที่ 4 และทำการทดสอบอรรถิพลเชิงเดี่ยว พบว่าช่วงของความผิดพลาดของแบบจำลอง $\pm 20\%$ ถึง $\pm 30\%$ ในทางสถิติไม่สามารถสรุปได้ว่าสมรรถนะของการควบคุมด้วยตัวควบคุมชนิดใดให้สมรรถนะดีไปกว่ากัน ส่วนในช่วงความผิดพลาดของแบบจำลองต่ำกว่า $\pm 20\%$ ค่า IAE เฉลี่ยของการควบคุมที่ควบคุมโดยตัวควบคุมแบบ mp-MPC ต่ำกว่าตัวควบคุมแบบ MPC และตัวควบคุมแบบ PID แสดงว่าตัวควบคุมแบบ mp-MPC มีสมรรถนะในการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบ MPC และตัวควบคุมแบบ PID ส่วนในช่วงความผิดพลาดของแบบจำลองตั้งแต่ $\pm 40\%$ ถึง $\pm 70\%$ ค่า IAE เฉลี่ยของการควบคุมที่ควบคุมโดยตัวควบคุมแบบ PID ต่ำกว่าตัวควบคุมแบบ mp-MPC และตัวควบคุมแบบ MPC แสดงว่าตัวควบคุมแบบ PID มีสมรรถนะในการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบ mp-MPC และตัวควบคุมแบบ MPC ในช่วงนี้



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.9 ข้อมูลค่า IAEของการควบคุมของถังที่ 4: การทดสอบอิทธิพลเชิงเดี่ยว

ช่วงเปอร์เซ็นต์ของ ความผิดพลาด ของแบบจำลอง	การเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุม 2 ชนิด		ช่วงความเชื่อมั่น 95%	
			$\hat{C} \pm t_{0.025, (24, 2079)} S_{\hat{c}_i}$	
			ขอบเขตล่าง	ขอบเขตบน
0%	$\hat{C}_1 : \bar{y}_{11^*} - \bar{y}_{21^*} =$	0.107	-0.113	0.327
	$\hat{C}_2 : \bar{y}_{11^*} - \bar{y}_{31^*} =$	0.316	0.096	0.536
	$\hat{C}_3 : \bar{y}_{21^*} - \bar{y}_{31^*} =$	0.209	-0.011	0.429
±10%	$\hat{C}_4 : \bar{y}_{12^*} - \bar{y}_{22^*} =$	0.139	-0.081	0.359
	$\hat{C}_5 : \bar{y}_{12^*} - \bar{y}_{32^*} =$	0.346	0.126	0.566
	$\hat{C}_6 : \bar{y}_{22^*} - \bar{y}_{32^*} =$	0.207	-0.013	0.427
±20%	$\hat{C}_7 : \bar{y}_{13^*} - \bar{y}_{23^*} =$	-0.011	-0.231	0.209
	$\hat{C}_8 : \bar{y}_{13^*} - \bar{y}_{33^*} =$	0.162	-0.058	0.382
	$\hat{C}_9 : \bar{y}_{23^*} - \bar{y}_{33^*} =$	0.173	-0.047	0.393
±30%	$\hat{C}_{10} : \bar{y}_{14^*} - \bar{y}_{24^*} =$	-0.077	-0.297	0.143
	$\hat{C}_{11} : \bar{y}_{14^*} - \bar{y}_{34^*} =$	0.089	-0.131	0.309
	$\hat{C}_{12} : \bar{y}_{24^*} - \bar{y}_{34^*} =$	0.166	-0.054	0.386
±40%	$\hat{C}_{13} : \bar{y}_{15^*} - \bar{y}_{25^*} =$	-0.235	-0.455	-0.015
	$\hat{C}_{14} : \bar{y}_{15^*} - \bar{y}_{35^*} =$	-0.059	-0.279	0.161
	$\hat{C}_{15} : \bar{y}_{25^*} - \bar{y}_{35^*} =$	0.176	-0.044	0.396
±50%	$\hat{C}_{16} : \bar{y}_{16^*} - \bar{y}_{26^*} =$	-0.401	-0.621	-0.181
	$\hat{C}_{17} : \bar{y}_{16^*} - \bar{y}_{36^*} =$	-0.203	-0.423	0.017
	$\hat{C}_{18} : \bar{y}_{26^*} - \bar{y}_{36^*} =$	0.198	-0.022	0.418
±60%	$\hat{C}_{19} : \bar{y}_{17^*} - \bar{y}_{27^*} =$	-0.558	-0.778	-0.338
	$\hat{C}_{20} : \bar{y}_{17^*} - \bar{y}_{37^*} =$	-0.323	-0.543	-0.103
	$\hat{C}_{21} : \bar{y}_{27^*} - \bar{y}_{37^*} =$	0.235	0.015	0.455
±70%	$\hat{C}_{22} : \bar{y}_{18^*} - \bar{y}_{28^*} =$	-0.714	-0.934	-0.494
	$\hat{C}_{23} : \bar{y}_{18^*} - \bar{y}_{38^*} =$	-0.426	-0.646	-0.206
	$\hat{C}_{24} : \bar{y}_{28^*} - \bar{y}_{38^*} =$	0.288	0.068	0.508

โดยที่

$\bar{y}_{i..}$ คือ ค่าเฉลี่ยของ IAE ของชนิดของตัวควบคุมระดับที่ i

1 = ตัวควบคุมแบบ PID

2 = ตัวควบคุมแบบ MPC

3 = ตัวควบคุมแบบ mp-MPC

ระดับที่ j

$\bar{y}_{.j.}$ คือ ค่าเฉลี่ยของ IAE ช่วงเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดของแบบจำลอง

1 = 0%

2 = $\pm 10\%$

3 = $\pm 20\%$

4 = $\pm 30\%$

5 = $\pm 40\%$

6 = $\pm 50\%$

7 = $\pm 60\%$

8 = $\pm 70\%$



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7

ผลการทดลอง การวิเคราะห์ข้อมูลของการทดสอบเปรียบเทียบ การควบคุมกระบวนการแต่ละตัวควบคุม

บทนี้จากกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการระบบสี่ถังโดยใช้วิธีการตอบสนองของเอาต์พุตต่อสเต็ปของอินพุต ผลการทดลองที่ได้ทำการสร้างแบบจำลองและเปรียบเทียบกับผลการจำลองกระบวนการ หลังจากนั้นทำการทดสอบเปรียบเทียบการควบคุมกระบวนการแต่ละตัวควบคุมและเปรียบเทียบกับผลการจำลองในแต่ละกรณี ก่อนที่จะนำไปสู่การสรุปผลและวิเคราะห์ถึงปัญหาในการวิจัย รวมทั้งข้อเสนอแนะแนวทางการศึกษาต่อไป

7.1 ผลการทดลองการหาแบบจำลองของกระบวนการระบบสี่ถังโดยใช้วิธีการตอบสนองของเอาต์พุตต่อสเต็ปของอินพุต

วิธีการตอบสนองของเอาต์พุตต่อสเต็ปของอินพุตเป็นวิธีที่ค่อนข้างง่ายและเป็นที่ยอมรับใช้อย่างกว้างขวางในการวิเคราะห์หาแบบจำลองกระบวนการเคมี ซึ่งแบบจำลองกระบวนการที่สร้างขึ้นโดยวิธีนี้มีความแม่นยำเพียงพอในการประยุกต์ใช้สำหรับการอธิบายพฤติกรรมของการตอบสนองของกระบวนการได้ โดยตั้งสมมุติฐานให้กระบวนการตอบสนองที่กำลังพิจารณาอยู่นั้นมีลักษณะเป็นแบบ "ระบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาเฉื่อย" โดยการหาค่าของพารามิเตอร์ของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการระบบสี่ถังมีขั้นตอนดังนี้

- ตอนที่ 1 ศึกษาวิธีการตอบสนองของเอาต์พุตต่อสเต็ปของอินพุตของวาล์วตัวที่ 1
 - เปิดปั๊มตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ปรับอินเวอร์เตอร์ทั้งสองตัวให้ได้อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 30 L/min ด้วยแรงดันไฟฟ้า 310 Volt ทั้งสองตัว
 - ทำการปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 1 (CVcontrol1) และตัวที่ 2 (CVcontrol2) อยู่ที่ 50% รอจนกระทั่งกระบวนการเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยที่ความสูงของน้ำถังที่ 1 และถังที่ 3 มีค่าอยู่ที่ 20 เซนติเมตร และความสูงของน้ำถังที่ 2 และถังที่ 3 มีค่าอยู่ที่ 40 เซนติเมตร
 - ทำการปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 1 (CVcontrol1) แบบสเต็ปจาก 50% ของการเปิดวาล์ว ไปยัง 70% ของการเปิดวาล์ว
 - บันทึกข้อมูลของการตอบสนองของการเปิดของวาล์วและความสูงของน้ำในแต่ละถัง
 - ดำเนินการคำนวณหาข้อมูลกระบวนการจากเส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการที่ได้จากขั้นตอนที่ 4

ตอนที่ 2 ศึกษาวิธีการตอบสนองของเอาต์พุตต่อสเต็ปของอินพุตของวาล์วตัวที่ 2

1. เปิดปั๊มตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ปรับอินเวอร์เตอร์ทั้งสองตัวให้ได้อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 30 L/min ด้วยแรงดันไฟฟ้า 310 Volt ทั้งสองตัว

2. ทำการปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 1 (CVcontrol1) และตัวที่ 2 (CVcontrol2) อยู่ที่ 50% รอจนกระทั่งกระบวนการเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยที่ความสูงของน้ำถังที่ 1 และถังที่ 3 มีค่าอยู่ที่ 20 เซนติเมตร และความสูงของน้ำถังที่ 2 และถังที่ 3 มีค่าอยู่ที่ 40 เซนติเมตร

3. ทำการปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 2 (CVcontrol 2) แบบสเต็ปจาก 50% ของการเปิดวาล์ว ไปยัง 70% ของการเปิดวาล์ว

4. บันทึกข้อมูลของการตอบสนองของการเปิดของวาล์วและความสูงของน้ำในแต่ละถัง

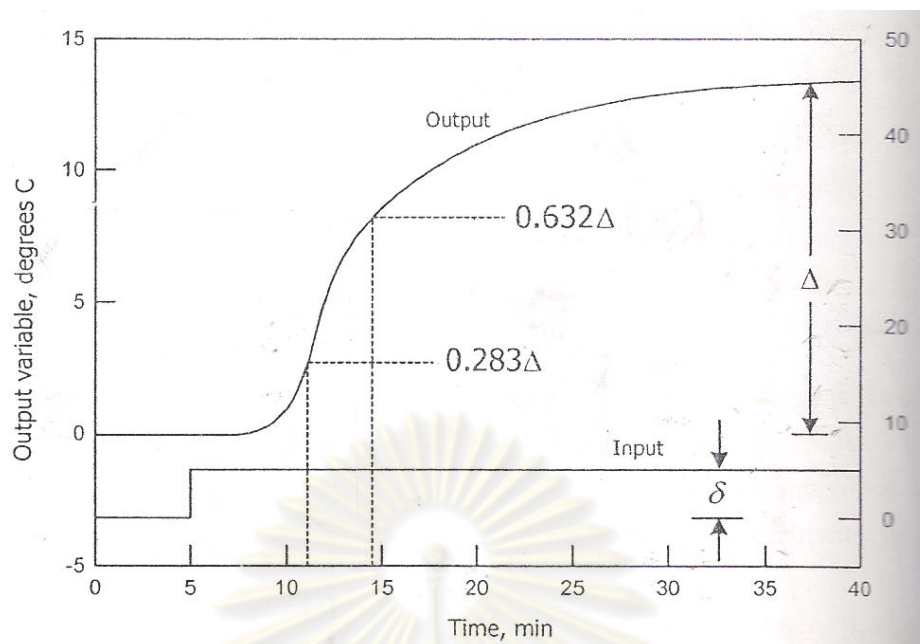
5. ดำเนินการคำนวณหาข้อมูลกระบวนการจากเส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการที่ได้จากขั้นตอนที่ 4

ค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการที่คำนวณได้โดยวิธีเส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการนั้นจะเป็นค่าพารามิเตอร์ของทรานสเฟอ์ฟังก์ชันของกระบวนการอันดับหนึ่งที่มีเวลาเฉื่อยซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของการไหลของวาล์วควบคุม $C'_{VCVcontrol}$ (s) กับ ความสูงของน้ำ $H'(s)$ (ตัวแปรทั้ง 2 พจน์ของกระบวนการนี้จะถูกเขียนให้อยู่ในรูปของตัวแปรเบี่ยงเบน) ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{H'(s)}{C'_{VCVcontrol}(s)} = \frac{Ke^{-t_d s}}{\tau s + 1} \quad (7.1)$$

การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของทรานสเฟอ์ฟังก์ชันของกระบวนการโดยใช้เส้นโค้งการตอบสนองดังรูปที่ 7.1 ซึ่งข้อมูลที่จะได้จากเส้นโค้งตอบสนองกระบวนการคือ

1. ขนาดของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเข้า δ
2. ขนาดของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรออก (ความสูงของน้ำ) Δ
3. เวลาที่ตัวแปรออกมีค่าเท่ากับ 28.3% และ 63.2 % ของค่าสุดท้าย



รูปที่ 7.1 เส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการสำหรับการคำนวณ [35]

จากนั้นนำค่าที่ได้มาหาแทนค่าเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของทรานสเฟอ์ฟังก์ชันของกระบวนการจากสมการดังต่อไปนี้

$$K = \frac{\Delta}{\delta} \quad (7.2)$$

หาเวลาที่ตัวแปรออกมีค่าเท่ากับ 28.3% และ 63.2% ของค่าสุดท้าย

$$\Delta \times 0.283 = \text{ความสูงของน้ำที่ 28.3\% ของค่าสุดท้าย} \quad (7.3)$$

$$\Delta \times 0.632 = \text{ความสูงของน้ำที่ 63.2\% ของค่าสุดท้าย} \quad (7.4)$$

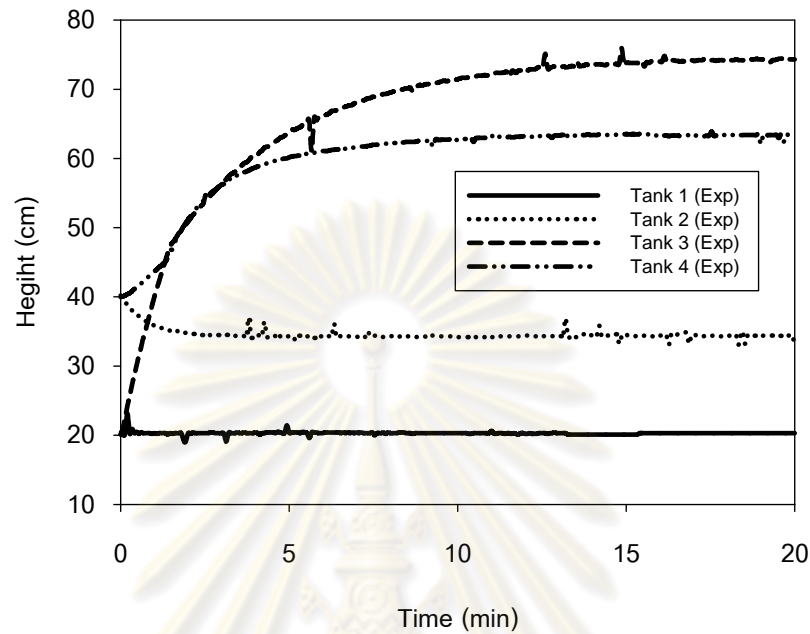
ทำการเทียบความสูงของน้ำที่ 28.3% และ 63.2% ของค่าสุดท้าย จะได้เวลาที่ 28.3% และ 63.2% ของค่าสุดท้ายออกมา นำไปคำนวณหาค่า τ และ t_d ดังสมการที่ 7.5 และ 7.6

$$\tau = 1.5(t_{63.2\%} - t_{28.3\%}) \quad (7.5)$$

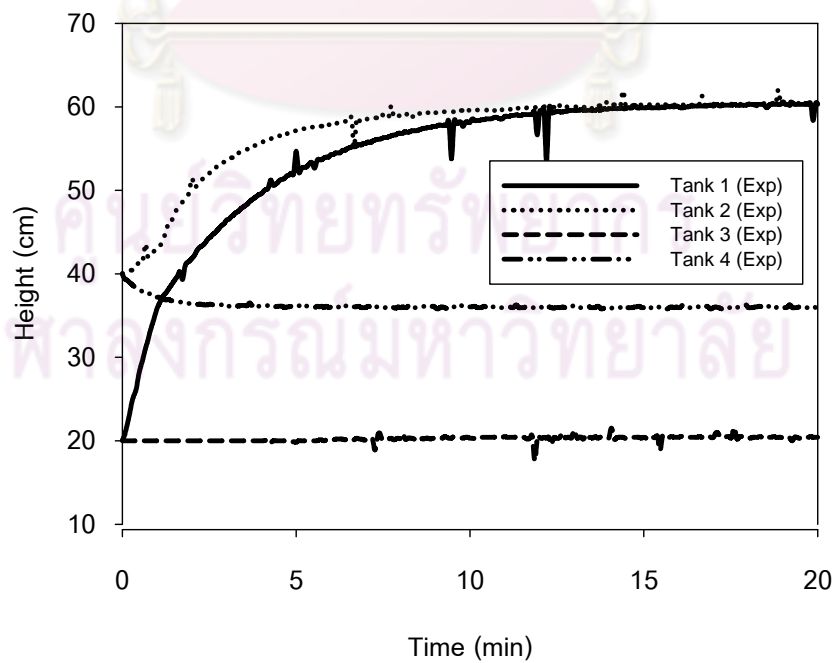
$$t_d = t_{63.2\%} - \tau \quad (7.6)$$

รูปที่ 7.2 และ 7.3 แสดงผลการตอบสนองต่อการปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และตัวที่ 2 แบบสแต็ป สามารถหาค่าพารามิเตอร์ของทรานสเฟอ์ฟังก์ชันด้วยวิธีที่กล่าวมาข้างต้น จะได้ทรานสเฟอ์ฟังก์ชันของผลตอบสนองต่อการปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 1 แบบสแต็ปดังสมการที่ 7.7 -

7.9 และไดทธานสเฟอรฟังกชันของตบสนองต่อการปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 2 แบบสเต็มดัง
สมการที่ 7.10 -7.12



รูปที่ 7.2 ลักษณะการตอบสนองต่อการปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 1 แบบสเต็ม



รูปที่ 7.3 ลักษณะการตอบสนองต่อการปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 2 แบบสเต็ม

ทรานสเฟอ์ฟังก์ชันการตอบสนองของการปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 1

$$\frac{H'_2(s)}{C'_{VCVcontrol1}(s)} = \frac{-0.3}{0.73s + 1} \quad (7.7)$$

$$\frac{H'_3(s)}{C'_{VCVcontrol1}(s)} = \frac{2.7}{3s + 1} \quad (7.8)$$

$$\frac{H'_4(s)}{C'_{VCVcontrol1}(s)} = \frac{1.2e^{-0.76s}}{3.44s + 1} \quad (7.9)$$

ทรานสเฟอ์ฟังก์ชันการตอบสนองของการปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 2

$$\frac{H'_1(s)}{C'_{VCVcontrol2}(s)} = \frac{2}{2.8s + 1} \quad (7.10)$$

$$\frac{H'_2(s)}{C'_{VCVcontrol2}(s)} = \frac{1.01e^{-0.47s}}{2.77s + 1} \quad (7.11)$$

$$\frac{H'_4(s)}{C'_{VCVcontrol2}(s)} = \frac{-0.21}{0.77s + 1} \quad (7.12)$$

โดยที่ $H'_i(s)$ คือ ความสูงของน้ำถังที่ i ในรูปตัวแปรเบี่ยงเบน
 $C'_{VCVcontroli}(s)$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วควบคุมตัวที่ i ในรูปตัวแปรเบี่ยงเบน

เมื่อได้ทรานสเฟอ์ฟังก์ชันการตอบสนองของการปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และตัวที่ 2 แล้ว นำทรานสเฟอ์ฟังก์ชันที่ได้ไปทำการจำลองกระบวนการเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงอีกครั้งด้วยโปรแกรม MATLAB และตัวชี้วัดของการเปรียบเทียบ คือ ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย คำนวณดังสมการที่ 7.13

$$\text{ร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย} = \frac{\sum (m \times \text{ผลต่างของเวลาที่ขณะนั้นกับเวลาที่กำหนด})}{\text{เวลาทั้งหมด}} \times 100 \quad (7.13)$$

โดยที่

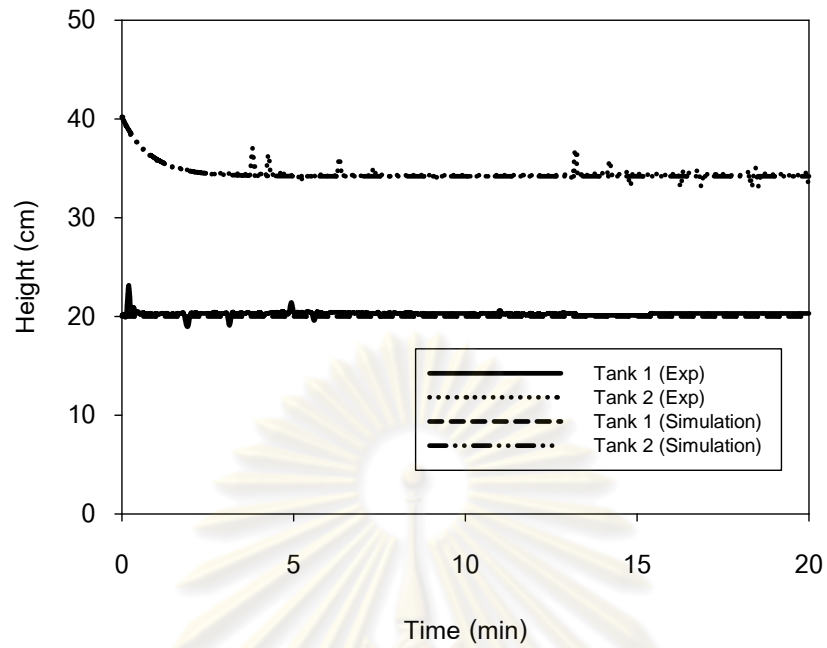
$$m = \frac{|\text{ค่าจากการทดลอง} - \text{ค่าจากการจำลองกระบวนการ}|}{\text{ค่าจากการทดลอง}} \quad (7.14)$$

จากรูปที่ 7.4 และ 7.5 พบว่าเส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการของถึงที่ 2 และถึงที่ 3 มีลักษณะการตอบสนองของกระบวนการเป็นแบบระบบอันดับหนึ่งที่ไม่มีเวลาเฉื่อย เห็นได้จากความสูงของน้ำมีการตอบสนองทันทีเมื่อทำการปรับวาล์วควบคุม ส่วนถึงที่ 4 มีลักษณะกระบวนการแบบระบบอันดับสองซึ่งลักษณะการตอบสนองเป็นรูปตัวเอสหรืออาจประมาณเป็นระบบอันดับหนึ่งมีเวลาเฉื่อย ดังนั้นจึงประมาณให้กระบวนการเป็นระบบอันดับหนึ่งมีเวลาเฉื่อย ผลการเปรียบเทียบการตอบสนองของกระบวนการกับผลการจำลองกระบวนการเมื่อปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 1 พบว่าถ้าพิจารณาร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยจากตารางที่ 7.1 ร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของถึงที่ 2 ,ถึงที่ 3 , ถึงที่ 4 ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยมีค่าน้อยมาก ดังนั้นแบบจำลองที่ได้จากการทดลองสร้างขึ้นนั้นสามารถใช้เป็นตัวแทนของระบบได้

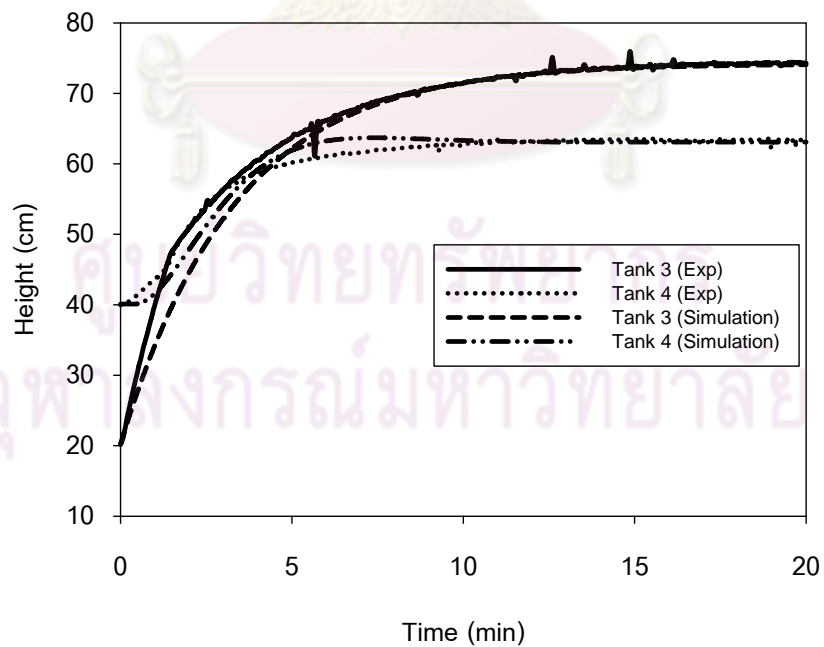
ตารางที่ 7.1 ร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย

ปรับวาล์วควบคุม ตัวที่ 1	ร้อยละความ คลาดเคลื่อนเฉลี่ย	ปรับวาล์วควบคุม ตัวที่ 2	ร้อยละความ คลาดเคลื่อนเฉลี่ย
ถึงที่ 2	0.55	ถึงที่ 1	1.95
ถึงที่ 3	2.44	ถึงที่ 2	1.31
ถึงที่ 4	1.68	ถึงที่ 4	0.54

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

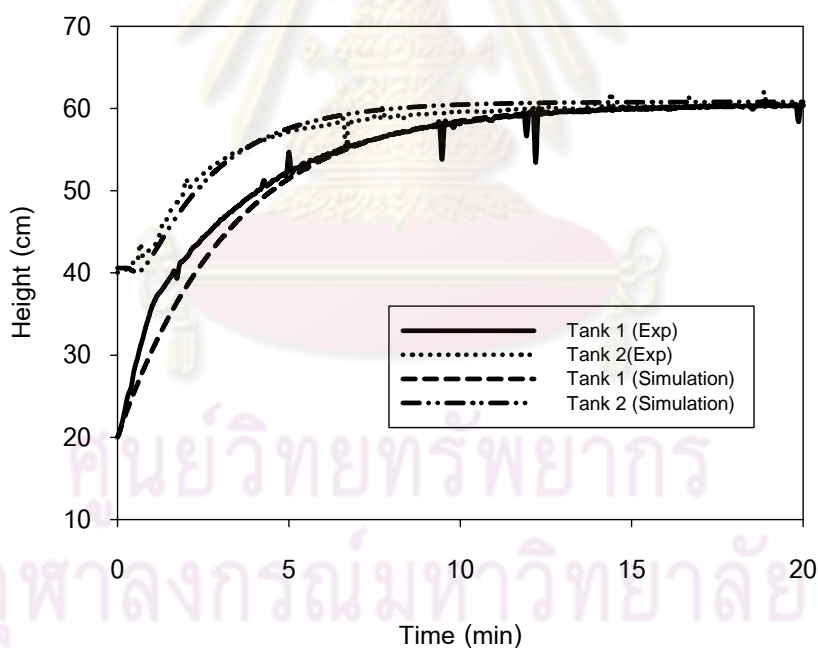


รูปที่ 7.4 เปรียบเทียบผลตอบสนองของกระบวนการกับผลการจำลองกระบวนการเมื่อปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 1 ของถังที่ 1 และถังที่ 2

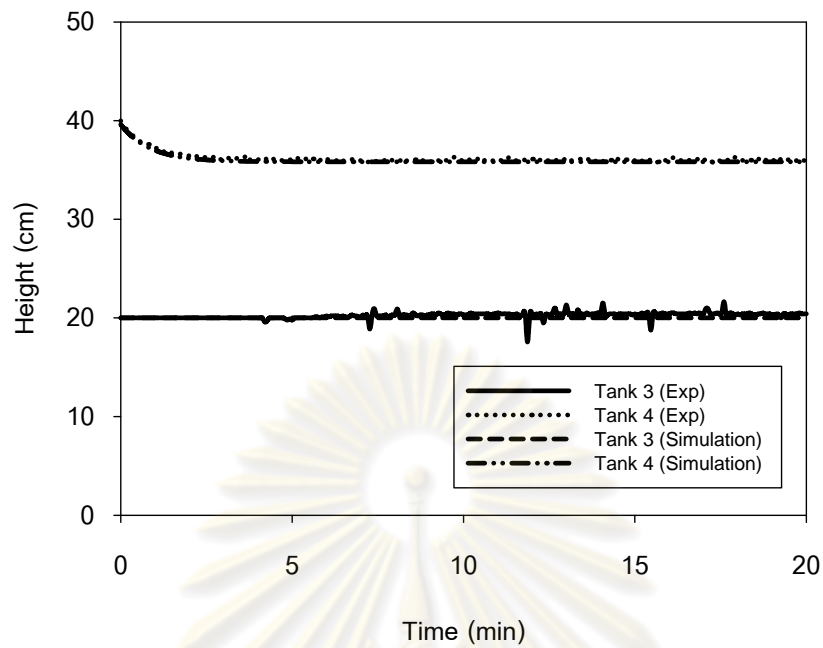


รูปที่ 7.5 เปรียบเทียบผลตอบสนองของกระบวนการกับผลการจำลองกระบวนการเมื่อปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 1 ของถังที่ 3 และถังที่ 4

จากรูปที่ 7.6 และ 7.7 พบว่าเส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการของถังที่ 1 และถังที่ 4 มีลักษณะการตอบสนองของกระบวนการเป็นแบบระบบอันดับหนึ่งที่ไม่มีเวลาเฉื่อย เห็นได้จากความสูงของน้ำมีการตอบสนองทันทีเมื่อทำการปรับวาล์วควบคุม ส่วนถังที่ 2 มีลักษณะเป็นกระบวนการแบบระบบอันดับสองซึ่งลักษณะการตอบสนองเป็นรูปตัวเอสหรืออาจประมาณเป็นระบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาเฉื่อย ดังนั้นจึงประมาณมีลักษณะระบบอันดับหนึ่งที่มีเวลาเฉื่อย ผลการเปรียบเทียบการตอบสนองของกระบวนการจริงกับผลการจำลองกระบวนการเมื่อปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 2 พบว่าถ้าพิจารณาร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย จากตารางที่ 7.1 ร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของถังที่ 1 ,ถังที่ 2 , ถังที่ 4 ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยมีค่าน้อยมาก ดังนั้นแบบจำลองที่สร้างขึ้นนั้นสามารถเป็นตัวแทนของระบบได้



รูปที่ 7.6 เปรียบเทียบผลตอบสนองของกระบวนการกับผลการจำลองกระบวนการเมื่อปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 2 ของถังที่ 1 และถังที่ 2



รูปที่ 7.7 เปรียบเทียบผลตอบสนองของกระบวนการกับผลการจำลองกระบวนการเมื่อปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 2 ของถังที่ 3 และถังที่ 4

จากทรานสเฟอ์ฟังก์ชันระหว่างตัวแปรเข้าและตัวแปรออกแต่ละตัว สามารถนำมาเขียนเป็นทรานสเฟอ์ฟังก์ชันของระบบรวมในรูปเมตริกซ์โดยใช้ตัวแปรเบี่ยงเบนได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} H'_1(s) \\ H'_2(s) \\ H'_3(s) \\ H'_4(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{2}{2.8s+1} \\ -0.3 & \frac{1.01e^{-0.47s}}{1.01e^{-0.47s}} \\ \frac{0.73s+1}{2.7} & \frac{2.27s+1}{2.27s+1} \\ \frac{3s+1}{1.2e^{-0.76s}} & \frac{-0.21}{0.77s+1} \\ 3.44s+1 & 0.77s+1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C'_{VCcontrol1}(s) \\ C'_{VCcontrol2}(s) \end{bmatrix} \quad (7.15)$$

จากสมการที่ 7.15 สามารถแปลงให้อยู่ในสแตทสเปซได้โดยการแปลงลาปลาซผกผันดังสมการที่ 7.16

$$\begin{bmatrix} \frac{dh'_1}{dt} \\ \frac{dh'_2}{dt} \\ \frac{dh'_3}{dt} \\ \frac{dh'_4}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.357 & 0 & 0 & 0 \\ 0.357 & -1.67 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.33 & 0 \\ 0 & 0 & 0.33 & 0.77 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h'_1 \\ h'_2 \\ h'_3 \\ h'_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0.71 \\ -0.90 & 0 \\ 0.90 & 0 \\ 0 & -0.71 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C'_{VCVcontrol1} \\ C'_{VCVcontrol2} \end{bmatrix} \quad (7.16)$$

และเมื่อเทียบกับแบบมาตรฐานจะได้สมการดังนี้

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + B\hat{u} \quad (7.17)$$

จะได้เมตริกซ์ A และ เมตริกซ์ B ดังนี้

$$A = \begin{bmatrix} -0.357 & 0 & 0 & 0 \\ 0.357 & -1.67 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.33 & 0 \\ 0 & 0 & 0.33 & 0.77 \end{bmatrix} \quad (7.18)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0.71 \\ -0.90 & 0 \\ 0.90 & 0 \\ 0 & -0.71 \end{bmatrix} \quad (7.19)$$

7.2 ผลของการทดสอบเปรียบเทียบการควบคุมกระบวนการแต่ละตัวควบคุมและการจำลองกระบวนการ

ผลการควบคุมในกรณีศึกษาซึ่งเปรียบเทียบสมรรถนะทั้งสามตัวควบคุมได้แก่ ตัวควบคุมแบบ PID, ตัวควบคุมแบบ MPC, ตัวควบคุมแบบ mp-MPC ซึ่งโดยทั่วไปแล้วตัวควบคุมแบบ MPC และตัวควบคุมแบบ mp-MPC จะทำการควบคุมด้วยเทคนิคซึ่งอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งในการทดลองนี้ จะใช้แบบจำลองที่สร้างขึ้นจากวิธีการตอบสนองของเอาต์พุตต่อสเต็ปอินพุตที่ได้ในหัวข้อ 7.1 และทำการควบคุมโดยเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย (Setpoint

change) โดยใช้การควบคุมของกระบวนการจริง และการจำลองกระบวนการ โดยแบ่งกรณีศึกษาดังต่อไปนี้

1. กรณีการควบคุมระดับของเหลวถังที่ 1 กับถังที่ 3
2. กรณีการควบคุมระดับของเหลวถังที่ 1 กับถังที่ 2
3. กรณีการควบคุมระดับของเหลวถังที่ 3 กับถังที่ 4
4. กรณีการควบคุมระดับของเหลวถังที่ 2 กับถังที่ 4

ในการทดลองควบคุมกระบวนการจริงมีวิธีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เปิดปั๊มตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ปรับอินเวอร์เตอร์ทั้งสองตัวให้ได้อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 30 L/min ด้วยแรงดันไฟฟ้า 310 Volt ทั้งสองตัว
2. ทำการปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 1 (CVcontrol1) และตัวที่ 2 (CVcontrol2) อยู่ที่ 50% รอจนกระทั่งกระบวนการเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยที่ความสูงของน้ำถังที่ 1 และถังที่ 3 มีค่าอยู่ที่ 20 เซนติเมตร และความสูงของน้ำถังที่ 2 และถังที่ 3 มีค่าอยู่ที่ 40 เซนติเมตร
3. ทำการควบคุมแต่ละตัวควบคุมด้วยโปรแกรม MATLAB โดยตั้งค่าเป้าหมายที่ 50 เซนติเมตร เนื่องจากในการควบคุมเป็นแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง (Discrete time) กำหนดให้เวลาการสุ่มตัวอย่างเท่ากับ 4 วินาที
4. ทำการเก็บข้อมูลความสูงของน้ำของการควบคุมและการตอบสนองของการปรับวาล์วควบคุมแต่ละกรณี
5. คำนวณหาค่า IAE (Integral of the absolute value of error) โดยใช้สมการที่

7.20 (รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ข)

$$IAE = \int_0^{\infty} |\text{ค่าเป้าหมาย} - \text{ความสูงของน้ำที่ต้องการควบคุม}| dt \quad (7.20)$$

โดยที่

dt = ผลต่างของเวลาหรือเวลาสุ่มตัวอย่าง

6. ทำการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมให้เหมาะสมกับการควบคุม โดยให้ค่าของ IAE มีค่าน้อยที่สุด
7. ทำการจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม MATLAB และนำค่าพารามิเตอร์ในการปรับแต่งตัวควบคุมมาใช้ในการจำลองกระบวนการ
8. นำค่า IAE เปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมแต่ละกรณี

7.2.1 กรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 3

ในการควบคุมระดับของเหลวถังที่ 1 และถังที่ 3 โดยมีค่าเป้าหมายอยู่ที่ 50 เซนติเมตร ค่าสภาวะคงตัวของความสูงของระดับของเหลวถังที่ 1 เท่ากับ 20 เซนติเมตร ถังที่ 3 เท่ากับ 20 เซนติเมตร, ถังที่ 2 เท่ากับ 40 เซนติเมตร, ถังที่ 4 เท่ากับ 40 เซนติเมตร ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมแต่ละตัวควบคุมมีขั้นตอนการปรับดังนี้

- การปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PID

ในงานวิจัยนี้จะปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PID โดยใช้วิธีการปรับแต่งตัวควบคุมด้วยวิธีการแกว่งอย่างต่อเนื่อง (Continuous Cycling Method) ของซีกเลอร์และนิโคลส์ ซึ่งวิธีนี้เหมาะสมกับกระบวนการที่มีการตอบสนองที่ค่อนข้างรวดเร็วและระบบที่มีการแกว่งของตัวแปรควบคุม เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นกระบวนการในการควบคุมความสูงของน้ำซึ่งเป็นกระบวนการที่มีการตอบสนองเร็ว ดังนั้นจึงเลือกใช้วิธีนี้

การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

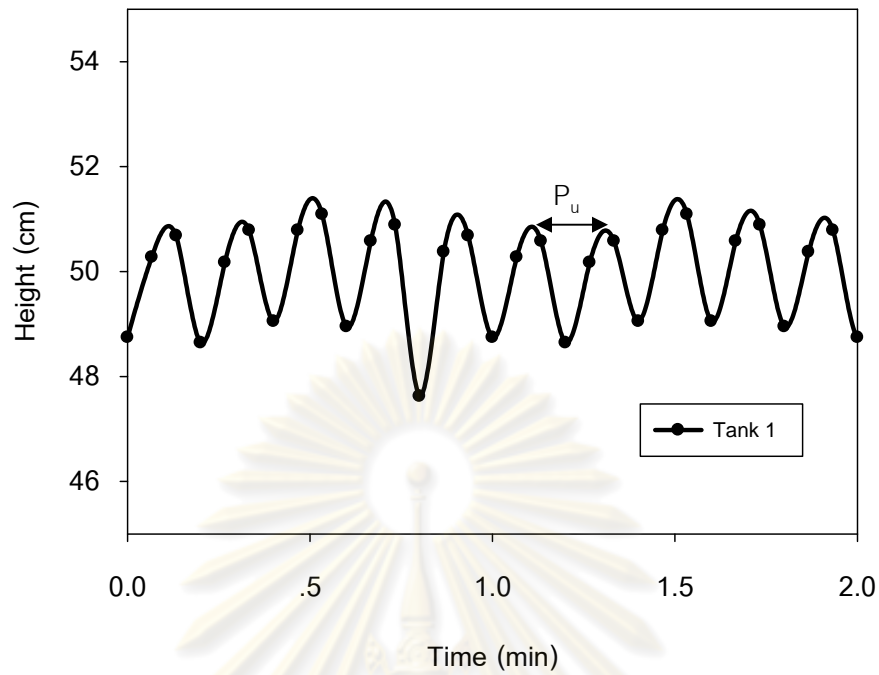
ขั้นที่ 1 ลดผลการควบคุมของไอและดีโดยให้ τ_D น้อยที่สุดและ τ_I มากที่สุด

ขั้นที่ 2 ให้ K_c มีค่าน้อยๆ (ประมาณ 0.5) และเริ่มการควบคุมอัตโนมัติ

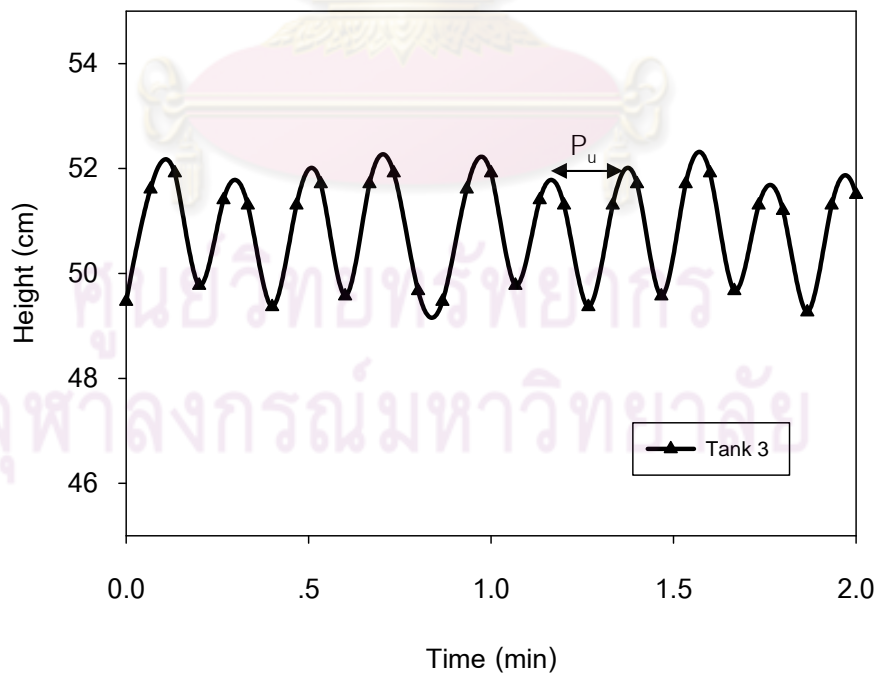
ขั้นที่ 3 เพิ่มค่า K_c ที่ละน้อยจนเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง (Continuous Cycling) (การแกว่งที่มีแอมพลิจูดคงตัว) ภายหลังจากเปลี่ยนแปลงโหลดเพียงเล็กน้อย ค่า K_c ที่ได้จะเรียกว่าค่าอัตราขยายค่าสุดท้าย (Ultimate Gain, K_{cu}) ระยะเวลาที่เกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่องจะเรียกว่า คาบสุดท้าย (Ultimate Period, P_u) ซึ่งในกรณีนี้ K_{cu} ของการควบคุมถังที่ 1 และถังที่ 3 มีค่าเท่ากับ 2 เกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง ดังรูปที่ 7.8 และ 7.9 แล้วใช้การตั้งค่าตัวควบคุม PID ตามตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 วิธีการปรับแต่งตัวควบคุมด้วยวิธีการแกว่งต่อเนื่อง

ตัวควบคุม	K_c	τ_I	τ_D
P	$0.5K_{cu}$	-	-
PI	$0.45K_{cu}$	$P_u/1.2$	-
PID	$0.6K_{cu}$	$P_u/2$	$P_u/8$



รูปที่ 7.8 การตอบสนองของความสูงของน้ำถังที่ 1 มีลักษณะแกว่งอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 7.9 การตอบสนองของความสูงของน้ำถังที่ 3 มีลักษณะแกว่งอย่างต่อเนื่อง

ในงานวิจัยนี้ตัวควบคุมแบบ PID จะใช้โหมดของการควบคุมคือ โหมด P และ โหมด I จะไม่ใช้โหมด D เพราะว่าการตอบสนองของระบบค่อนข้างรวดเร็ว ดังนั้นโหมด D จึงไม่จำเป็นต้องใช้ สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ได้ดังนี้

การควบคุมความสูงของน้ำถังที่ 1 $K_c = 0.9$, $\tau_I = 0.167$ นาที = 10 วินาที

การควบคุมความสูงของน้ำถังที่ 3 $K_c = 0.9$, $\tau_I = 0.167$ นาที = 10 วินาที

ขั้นที่ 4 ทำการปรับแต่งตัวควบคุมแบบละเอียดให้ได้ค่า IAE น้อยที่สุด โดยหลักการในการปรับละเอียดคือ ปรับค่า K_c ลดลงเพื่อลดการโอเวอร์ชูตแต่การทำเช่นนี้จะส่งผลให้การตอบสนองช้าลง และปรับค่า τ_I ลดลงเพื่อกำจัดออฟเซต แต่หากปรับค่า τ_I ต่ำจนเกินไปจะทำให้ผลการตอบสนองรุนแรงและโอเวอร์ชูตสูงขึ้น ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ภายหลังจากการปรับแบบละเอียดสรุปดังตารางที่ 7.3

- การปรับแต่งตัวควบคุมแบบ MPC และ mp – MPC

การปรับแต่งตัวควบคุม MPC และ mp-MPC ทำได้ดังนี้

1. กำหนดปัจจัยถ่วงน้ำหนักเพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ต้องการ ปัจจัยถ่วงน้ำหนักของตัวแปรควบคุม (y_w) เป็นเมตริกซ์ที่เป็น diagonal ที่มีค่าเป็นบวก ค่าเมตริกซ์ปัจจัยถ่วงน้ำหนักของตัวแปรควบคุมพื้นฐานเป็นการวัดความสำคัญของการควบคุมสำหรับแต่ละตัวแปรควบคุม ถ้าค่าเมตริกซ์ปัจจัยถ่วงน้ำหนักของตัวแปรควบคุมเพิ่มขึ้นการเบี่ยงเบนจากค่าเป้าหมายของตัวแปรควบคุมจะลดลง ส่วนปัจจัยถ่วงน้ำหนักของตัวแปรปรับ (u_w) เป็นเมตริกซ์ที่เป็น diagonal ที่มีค่าเป็นบวก ปัจจัยถ่วงน้ำหนักของตัวแปรปรับมีผลต่อการเคลื่อนที่ของตัวแปรปรับ ถ้าปัจจัยถ่วงน้ำหนักของตัวแปรปรับเพิ่มขึ้นทำให้การเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับลดลง ซึ่งจะส่งผลให้สมรรถนะในการควบคุมลดลงแต่ความทนทานในการควบคุมจะเพิ่มขึ้น

2. เลือกช่วงเวลาการประมาณ (Prediction Horizon, P)

หลักการเลือกช่วงเวลาการประมาณคือ เลือกช่วงเวลาการประมาณให้มากกว่าค่าโพลลูปเปิดเพื่อรับประกันเสถียรภาพของกระบวนการ อย่างไรก็ตามอาจจะเลือกช่วงเวลาการประมาณน้อยกว่าค่าโพลลูปเปิดก็ได้ ทั้งนี้ต้องตรวจสอบว่าตัวแปรควบคุมสามารถเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ภายในเวลาที่เลือกไว้หรือไม่

3. กำหนดช่วงเวลาการควบคุม (Control Horizon, M)

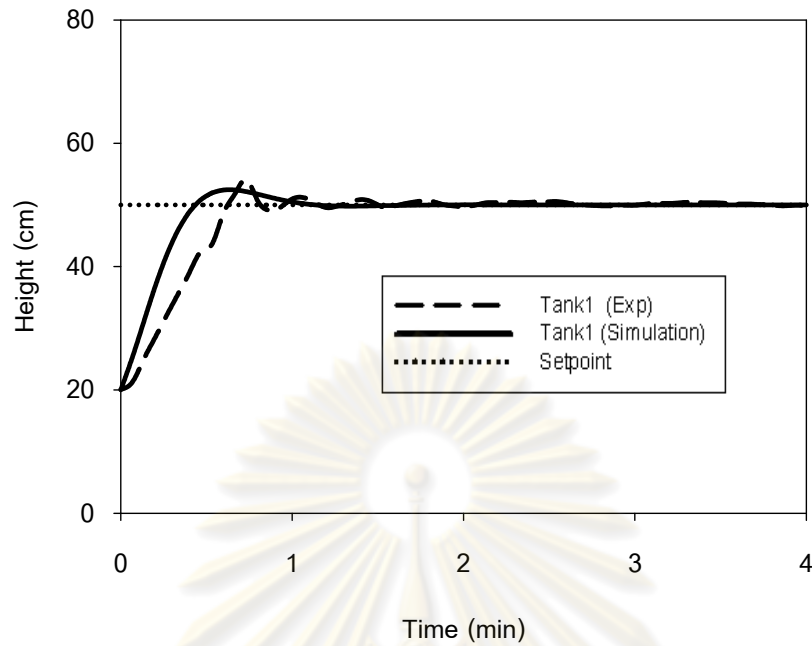
ปกติจะกำหนดช่วงเวลาการควบคุมให้น้อยกว่าช่วงเวลาการประมาณ ทั้งนี้เพื่อลดเวลาในการประมวลผลโดยวิธีฮอปติไมซ์ ทั้งนี้ช่วงเวลาการควบคุมที่เหมาะสมจะต้องให้สมรรถนะการควบคุมที่ดีและใช้เวลาคำนวณสั้นกว่าเวลาการควบคุมที่ต้องการ จึงจะสามารถนำตัวแปรปรับที่ได้ไปใช้ควบคุมกระบวนการ หลักเกณฑ์ของการปรับแต่งตัวควบคุมคือ ทำการปรับ

กระบวนการให้มีค่า IAE น้อยที่สุด และคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับไม่มีความรุนแรง โดยค่าพารามิเตอร์ของการปรับแต่งตัวควบคุม MPC และ mp-MPC สรุปดังตารางที่ 7.3

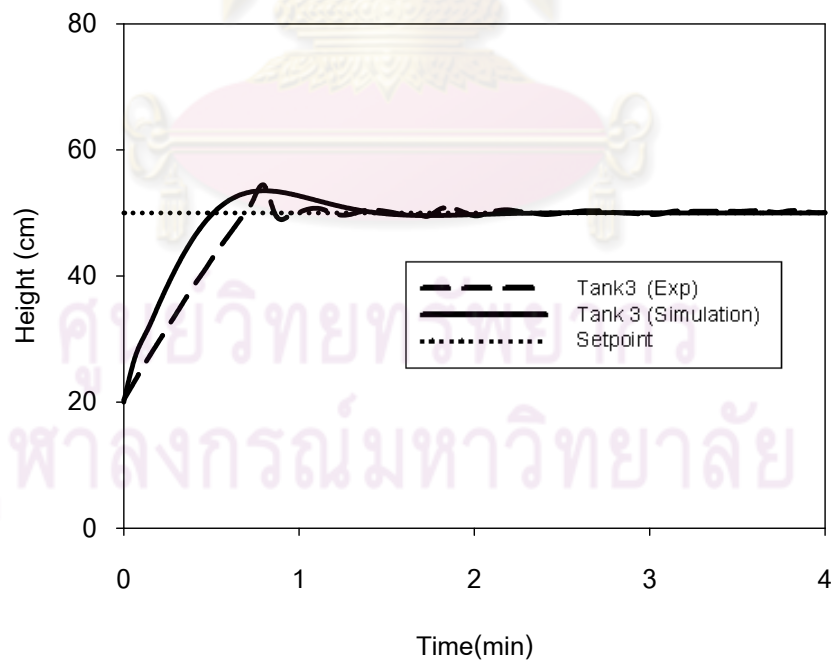
ตารางที่ 7.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมแต่ละตัวควบคุมทั้งการทดลองจริงและการจำลองกระบวนการของการควบคุมระดับของเหลวถังที่ 1 และถังที่ 3

ตัวควบคุม	การควบคุมถังที่ 1	การควบคุมถังที่ 3
PID	$K_c = 0.2, \tau_i = 30 \text{ s}, \tau_d = 0 \text{ s}$	$K_c = 0.2, \tau_i = 30 \text{ s}, \tau_d = 0 \text{ s}$
MPC	$P = 20, M = 4, y_{w1} = 500, u_{w1} = 100$	$P = 20, M = 4, y_{w2} = 400, u_{w2} = 100$
mp-MPC	$P = 20, M = 4, y_{w1} = 100, u_{w1} = 10$	$P = 20, M = 4, y_{w2} = 100, u_{w2} = 10$

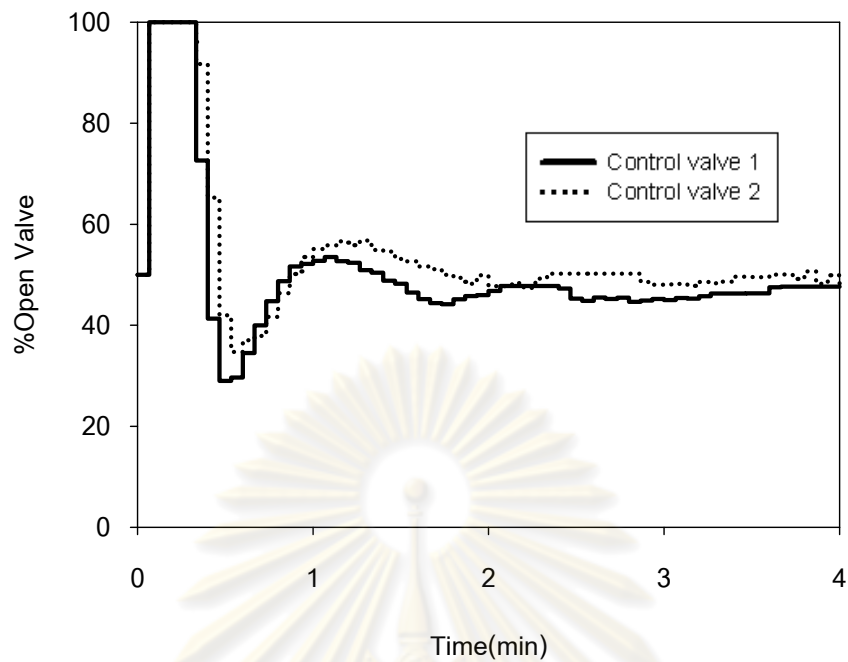
จากรูปที่ 7.10 - 7.11 , 7.13 - 7.14 , 7.16 - 7.17 เป็นผลการควบคุมของแต่ละตัวควบคุม พบว่าทั้งผลการทดลองในกระบวนการจริงกับผลการจำลองกระบวนการ ตัวควบคุมแบบ PID, ตัวควบคุมแบบ MPC , ตัวควบคุมแบบ mp-MPC สามารถควบคุมตัวแปรควบคุมให้เข้าสู่ระดับเป้าหมายได้ทั้งสองถัง โดยที่ตัวควบคุมแบบ mp-MPC มีสมรรถนะในการควบคุมได้ดีกว่าตัวควบคุมแบบ MPC และตัวควบคุมแบบ PID โดยเมื่อพิจารณาจากค่า IAE พบว่า ตัวควบคุมแบบ mp-MPC มีค่า IAE น้อยกว่าตัวควบคุมแบบ MPC และ PID ตามลำดับ ดังรูปที่ 7.19 ส่วนการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองนั้น มีสมรรถนะในการควบคุมแตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบด้วยค่า IAE ซึ่งในการทดลองกระบวนการจริงอาจจะมีสิ่งรบกวนหรืออิทธิพลของตัวแปรอื่นๆ ที่ไม่ได้คำนึงถึงในการควบคุมในงานวิจัยนี้ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับพบว่าตัวควบคุมแบบ mp-MPC มีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับไม่รุนแรงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบ MPC และ PID ทั้งการทดลองในกระบวนการจริงและการจำลองกระบวนการดังแสดงในรูปที่ 7.12 , 7.15 , 7.18



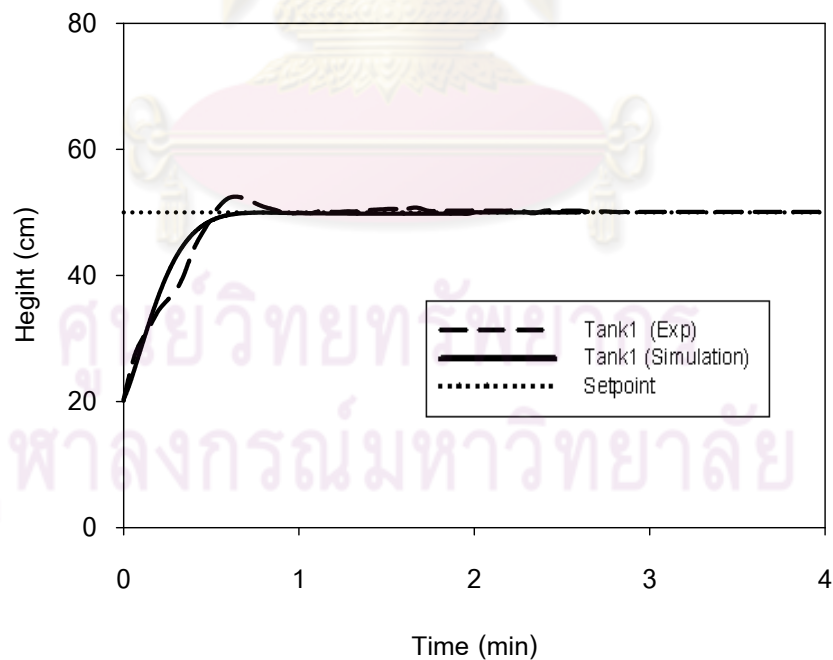
รูปที่ 7.10 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 1 ของตัวควบคุมแบบ PID ทั้งผลการทดลองและผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 3



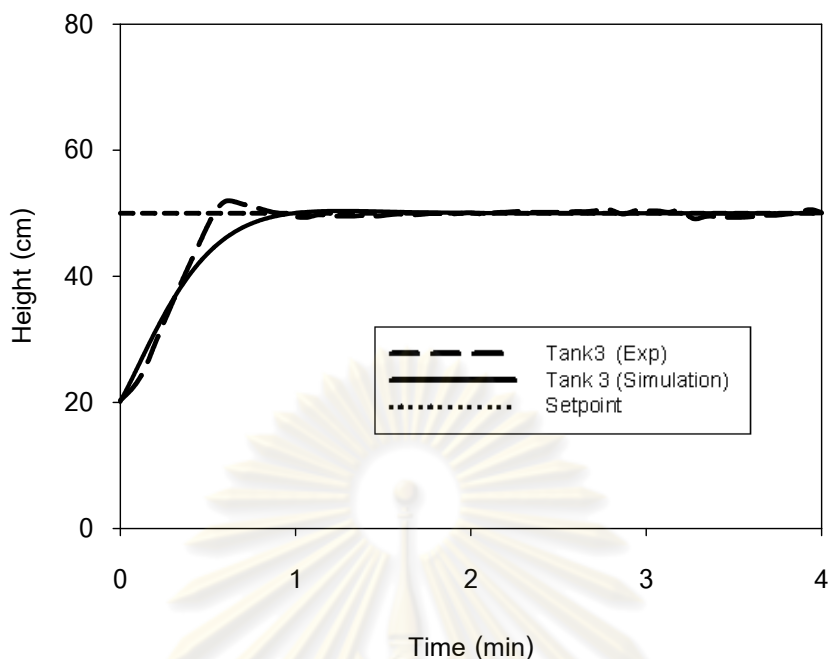
รูปที่ 7.11 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 3 ของตัวควบคุมแบบ PID ทั้งผลการทดลองและผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของเหลวถังที่ 1 กับถังที่ 3



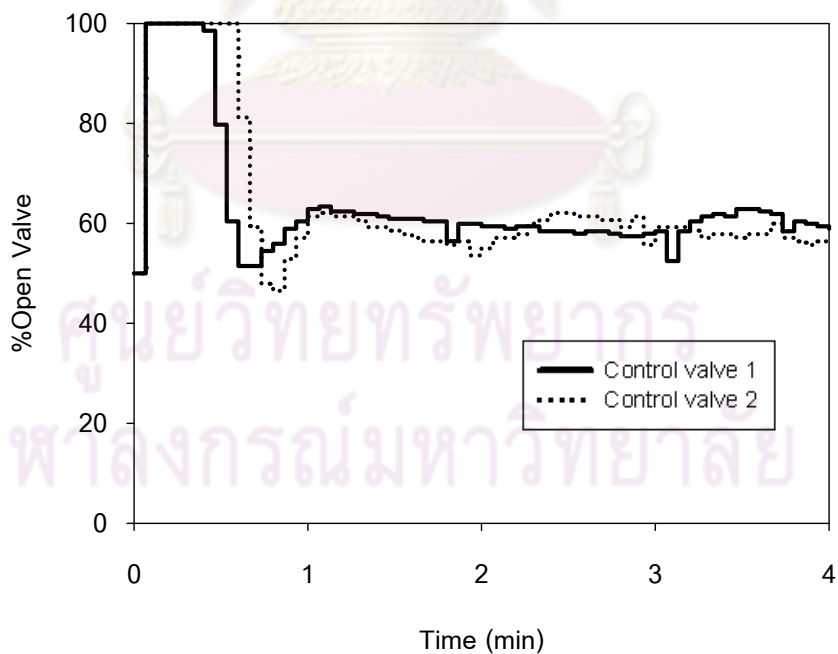
รูปที่ 7.12 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ ตัวที่ 2 ของตัวควบคุมแบบ PID ในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 3 ของการทดลองกระบวนการจริง



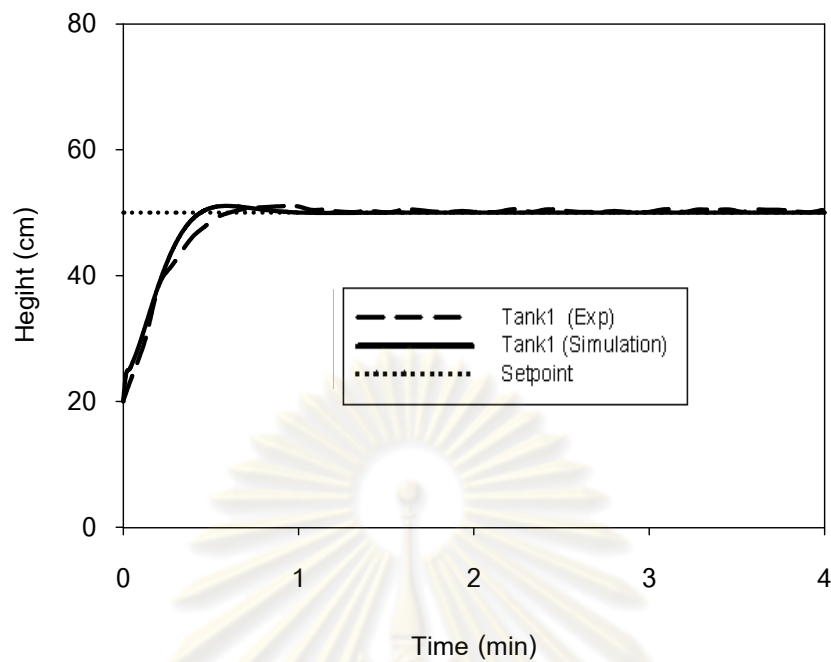
รูปที่ 7.13 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 1 ของตัวควบคุมแบบ MPC ทั้งผลการทดลองและผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 3



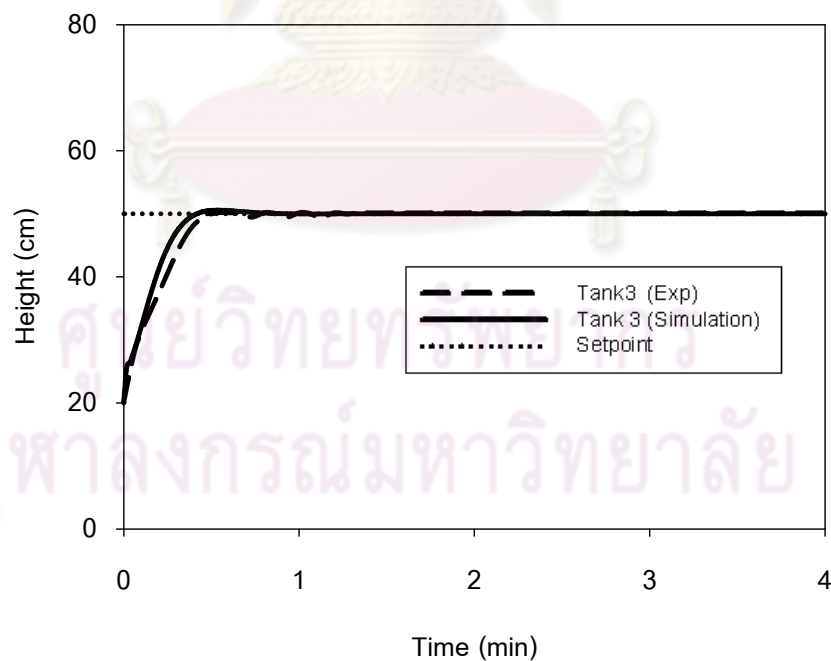
รูปที่ 7.14 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 3 ของตัวควบคุมแบบ MPC ทั้งผลการทดลองและผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 3



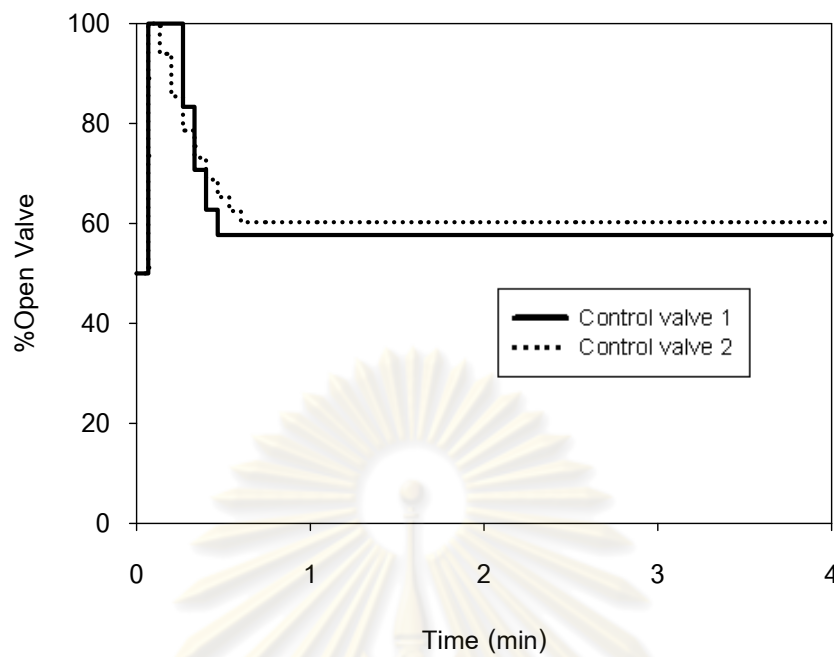
รูปที่ 7.15 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ ตัวที่ 2 ของตัวควบคุมแบบ MPC ในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 3 ของการทดลองกระบวนการจริง



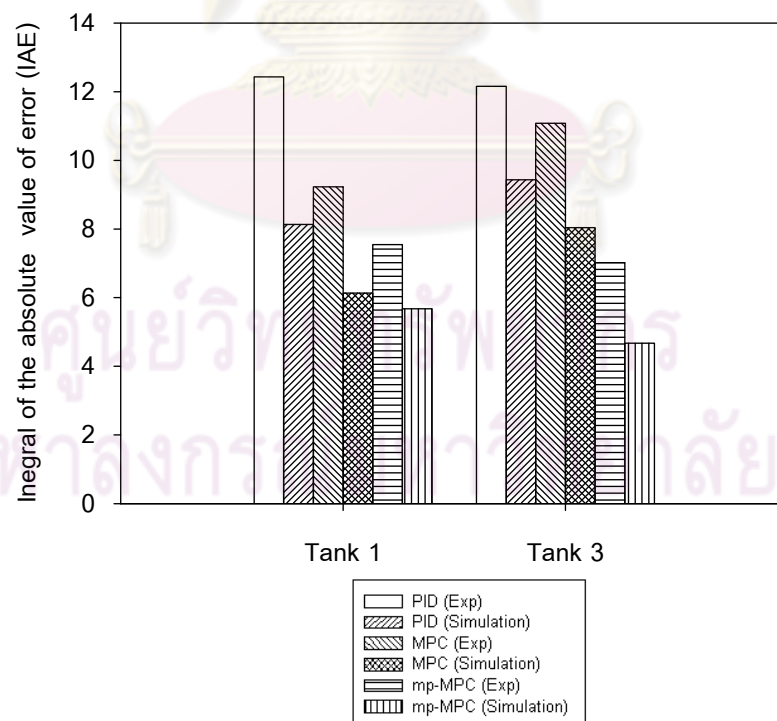
รูปที่ 7.16 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 1 ของตัวควบคุมแบบ mp-MPC ทั้งผลการทดลองและผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 3



รูปที่ 7.17 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 3 ของตัวควบคุมแบบ mp-MPC ทั้งผลการทดลองและผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 3



รูปที่ 7.18 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ ตัวที่ 2 ของตัวควบคุมแบบ mp-MPC ในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 3 ของการทดลองกระบวนการจริง



รูปที่ 7.19 ผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (IAE) ของการควบคุมระดับของเหลวถังที่ 1 กับถังที่ 3 แต่ละตัวควบคุม

7.2.2 กรณีการควบคุมระดับของเหลวถังที่ 1 กับถังที่ 2

ในการควบคุมระดับของเหลวถังที่ 1 และถังที่ 2 โดยมีค่าเป้าหมายอยู่ที่ 50 เซนติเมตร ค่าสภาวะคงตัวของความสูงของระดับของเหลวถังที่ 1 เท่ากับ 20 เซนติเมตร ถังที่ 3 เท่ากับ 20 เซนติเมตร, ถังที่ 2 เท่ากับ 40 เซนติเมตร, ถังที่ 4 เท่ากับ 40 เซนติเมตร ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมแต่ละตัวควบคุมมีขั้นตอนการปรับดังนี้

- การปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PID

ในงานวิจัยนี้จะปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PID โดยใช้วิธีการปรับแต่งตัวควบคุมด้วยวิธีการแกว่งอย่างต่อเนื่อง (Continuous Cycling Method) ของซิกเลอร์และนิโคลส์ ซึ่งวิธีนี้เหมาะสมกับกระบวนการที่มีการตอบสนองที่ค่อนข้างรวดเร็วและระบบที่มีการแกว่งของตัวแปรควบคุม เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นกระบวนการในการควบคุมความสูงของน้ำซึ่งเป็นกระบวนการที่มีการตอบสนองเร็ว ดังนั้นจึงเลือกใช้วิธีนี้

การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 ลดผลการควบคุมของไอและดีโดยให้ τ_D น้อยที่สุดและ τ_I มากที่สุด

ขั้นที่ 2 ให้ K_c มีค่าน้อยๆ (ประมาณ 0.5) และเริ่มการควบคุมอัตโนมัติ

ขั้นที่ 3 เพิ่มค่า K_c ที่ละน้อยจนเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง (Continuous Cycling) (การแกว่งที่มีแอมพลิจูดคงตัว) ภายหลังเปลี่ยนแปลงโหลดเพียงเล็กน้อย ค่า K_c ที่ได้จะเรียกว่าค่าอัตราขยายค่าสุดท้าย (Ultimate Gain, K_{cu}) ระยะเวลาที่เกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่องจะเรียกว่า คาบสุดท้าย (Ultimate Period, P_u) ซึ่งในกรณีนี้ K_{cu} ของการควบคุมถังที่ 1 และถังที่ 2 มีค่าเท่ากับ 2 และ -5 เกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง ดังรูปที่ 7.20 และ 7.21 แล้วใช้การตั้งค่าตัวควบคุม PID ตามตารางที่ 7.2 ในหัวข้อที่ 7.2.1 คำนวณได้ดังต่อไปนี้

ในงานวิจัยนี้ตัวควบคุมแบบ PID จะใช้โหมดของการควบคุมคือ โหมด P และโหมด I จะไม่ใช้โหมด D เพราะว่าการตอบสนองของระบบค่อนข้างรวดเร็ว ดังนั้นโหมด D จึงไม่จำเป็นต้องใช้ สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ได้ดังนี้

การควบคุมความสูงของน้ำถังที่ 1 $K_c = 0.9$, $\tau_I = 0.167$ นาที = 10 วินาที

การควบคุมความสูงของน้ำถังที่ 2 $K_c = -2.25$, $\tau_I = 0.333$ นาที = 19.8 วินาที

การควบคุมความสูงของน้ำถังที่ 2 ค่า K_c , τ_I มีค่าเป็นลบ เนื่องจากการควบคุมความสูงของน้ำถังที่ 2 เป็นการตอบสนองแบบทิศทางตรง คือ ความสูงของน้ำถังที่ 2 มีค่าลดลง ดังนั้นวาล์วควบคุมตัวที่ 1 จะปรับวาล์วให้ปิดลงเพื่อปรับอัตราการไหลเข้าสู่ถังที่ 2 ให้มีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ความสูงของน้ำถังที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันความสูงของน้ำถังที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นวาล์วควบคุมตัวที่ 1 จะทำปรับวาล์วให้เปิดขึ้นเพื่อปรับอัตราการไหลเข้าสู่ถังที่ 2 ให้มีค่า

ลดลงส่งผลให้ความสูงของน้ำถึงที่ 2 มีค่าลดลง สรุปได้ว่า K_c เป็นบวกหรือลบขึ้นอยู่กับการตอบสนองของตัวควบคุมที่มีผลต่อกระบวนการ

ขั้นที่ 4 ทำการปรับแต่งตัวควบคุมแบบละเอียดให้ได้ค่า IAE น้อยที่สุด โดยหลักการในการปรับละเอียดคือ ปรับค่า K_c ลดลงเพื่อลดการโอเวอร์ชูตแต่การทำเช่นนี้จะส่งผลให้การตอบสนองช้าลง และปรับค่า τ_I ลดลงเพื่อกำจัดออฟเซต แต่หากปรับค่า τ_I ต่ำจนเกินไปจะทำให้ผลการตอบสนองรุนแรงและโอเวอร์ชูตสูงขึ้น ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ภายหลังจากปรับแบบละเอียดสรุปดังตารางที่ 7.4

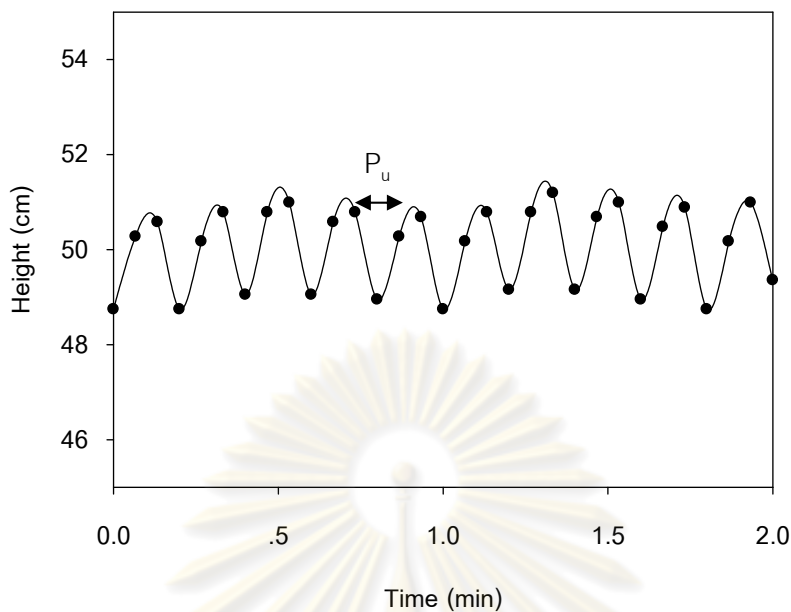
- การปรับแต่งตัวควบคุมแบบ MPC และ mp – MPC

การปรับแต่งตัวควบคุมแบบ MPC และ mp – MPC มีลักษณะเหมือนกับหัวข้อที่ 7.2.1 โดยมีหลักเกณฑ์ดังนี้ ทำการปรับแต่งตัวควบคุมให้มีค่า IAE มีค่าน้อยที่สุดและคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับไม่มีความรุนแรง

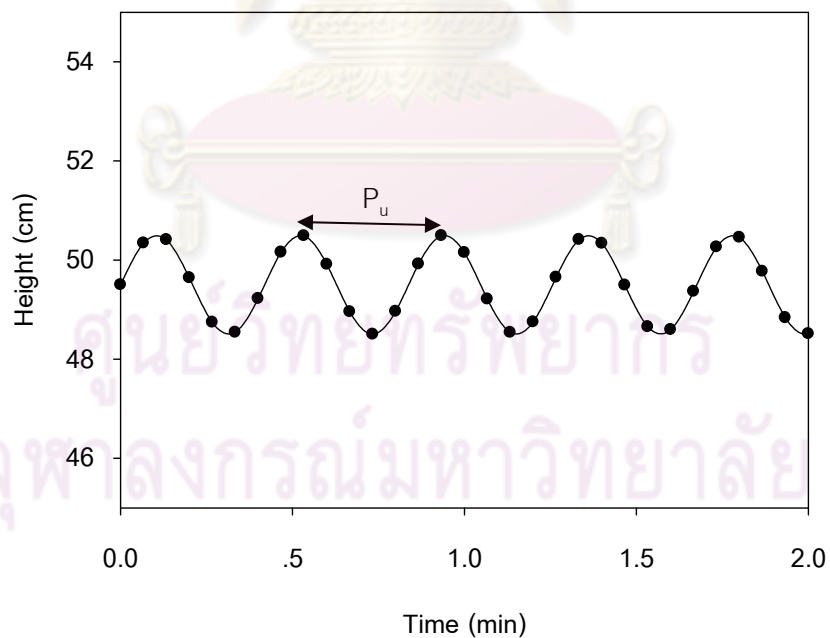
ตารางที่ 7.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมแต่ละตัวควบคุมทั้งการทดลองจริงและการจำลองกระบวนการของการควบคุมระดับของเหลวถึงที่ 1 และถึงที่ 2

ตัวควบคุม	การควบคุมถึงที่ 1	การควบคุมถึงที่ 2
PID	$K_c = 0.3, \tau_I = 30 \text{ s}, \tau_d = 0 \text{ s}$	$K_c = -0.2, \tau_I = -30 \text{ s}, \tau_d = 0 \text{ s}$
MPC	$P = 20, M = 4, y_{w1} = 500, u_{w1} = 100$	$P = 20, M = 4, y_{w2} = 400, u_{w2} = 100$
mp-MPC	$P = 20, M = 4, y_{w1} = 100, u_{w1} = 10$	$P = 20, M = 4, y_{w2} = 100, u_{w2} = 10$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

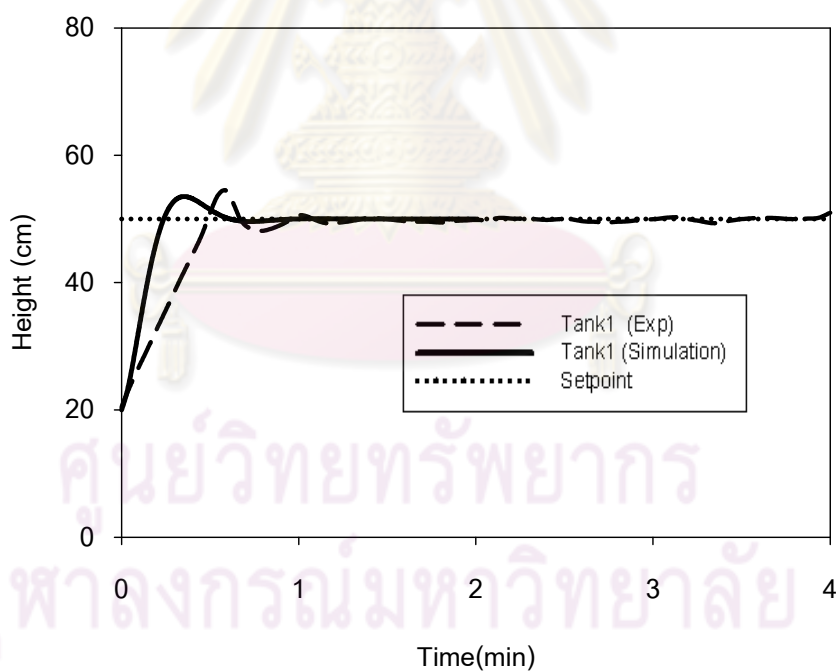


รูปที่ 7.20 การตอบสนองของระดับความสูงของน้ำถังที่ 1 มีลักษณะแกว่งอย่างต่อเนื่อง

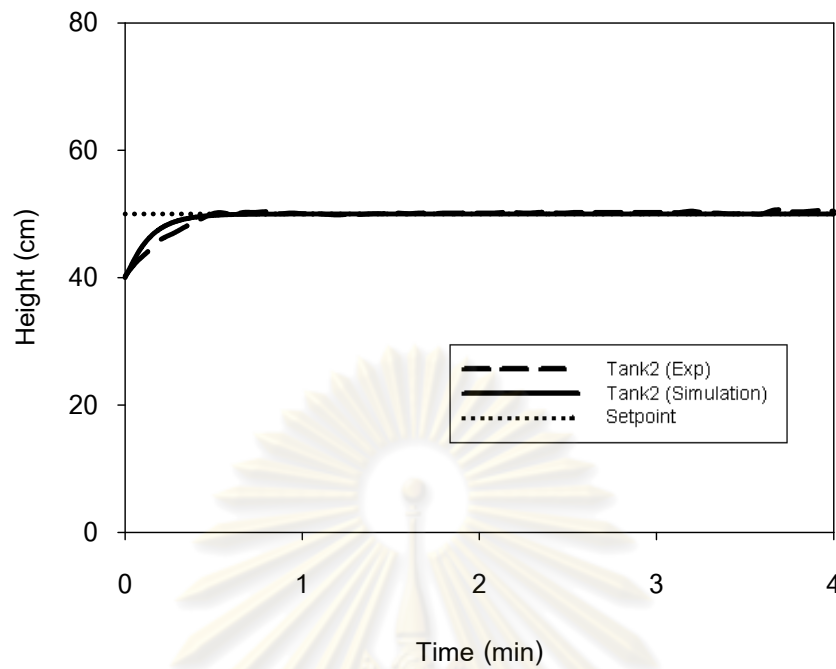


รูปที่ 7.21 การตอบสนองของระดับความสูงของน้ำถังที่ 2 มีลักษณะแกว่งอย่างต่อเนื่อง

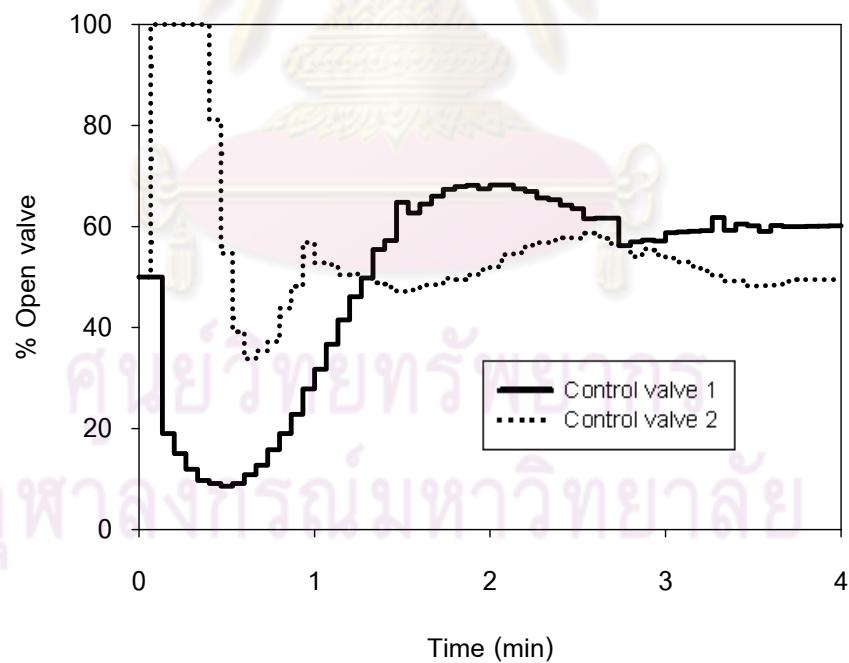
จากรูปที่ 7.22 - 7.23 , 7.25 – 7.26 , 7.28 -7.29 เป็นผลการควบคุมของแต่ละตัวควบคุม พบว่าทั้งผลการทดลองในกระบวนการจริงกับผลการจำลองกระบวนการ ตัวควบคุมแบบ PID, ตัวควบคุมแบบ MPC , ตัวควบคุมแบบ mp-MPC สามารถควบคุมตัวแปรควบคุมให้เข้าสู่ระดับเป้าหมายได้ทั้งสองถึง โดยที่ตัวควบคุมแบบ mp-MPC มีสมรรถนะในการควบคุมได้ดีกว่าตัวควบคุมแบบ MPC และตัวควบคุมแบบ PID โดยเมื่อพิจารณาจากค่า IAE พบว่า ตัวควบคุมแบบ mp-MPC มีค่า IAE น้อยกว่าตัวควบคุมแบบ MPC และ PID ตามลำดับ ดังรูปที่ 7.31 ส่วนการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองนั้น มีสมรรถนะในการควบคุมแตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบด้วยค่า IAE ซึ่งในการทดลองกระบวนการจริงอาจจะมีสิ่งรบกวนหรืออิทธิพลของตัวแปรอื่นๆ ที่ไม่ได้คำนึงถึงในการควบคุมในงานวิจัยนี้ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับพบว่าตัวควบคุมแบบ mp-MPC มีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับไม่รุนแรงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบ MPC และ PID ทั้งการทดลองในกระบวนการจริงและการจำลองกระบวนการดังแสดงในรูปที่ 7.24 , 7.27 , 7.30



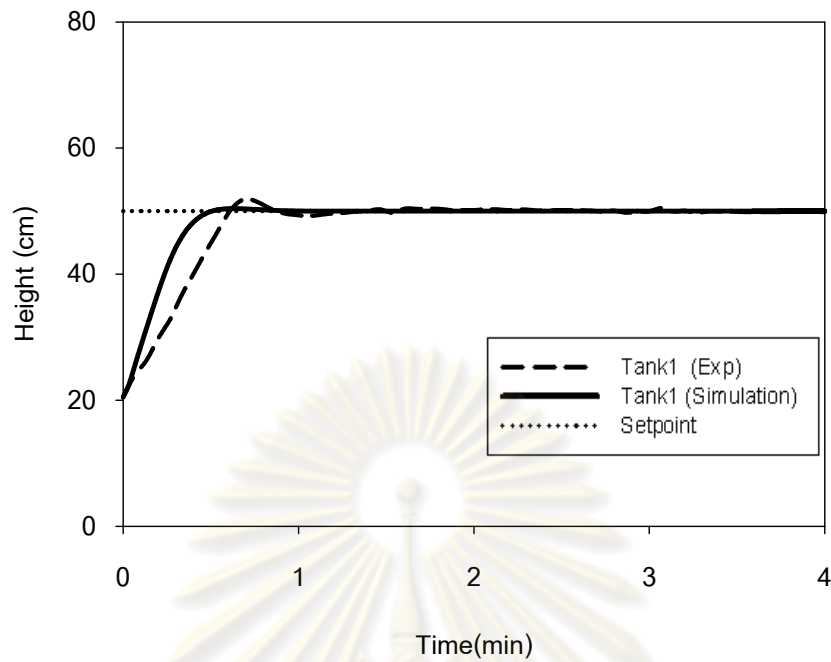
รูปที่ 7.22 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 1 ของตัวควบคุมแบบ PID ทั้งผลการทดลองและผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 2



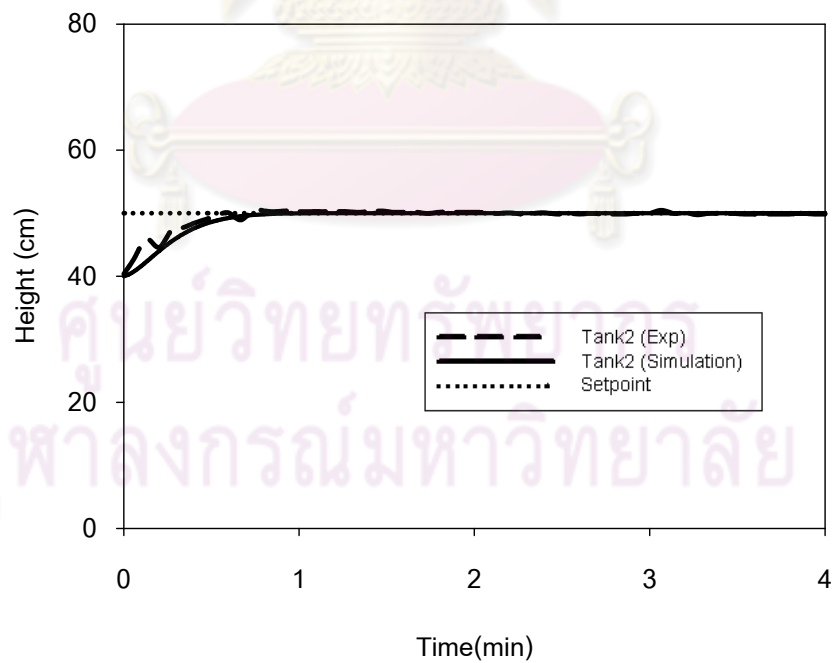
รูปที่ 7.23 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 3 ของตัวควบคุมแบบ PID ทั้งผลการทดลองและผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 2



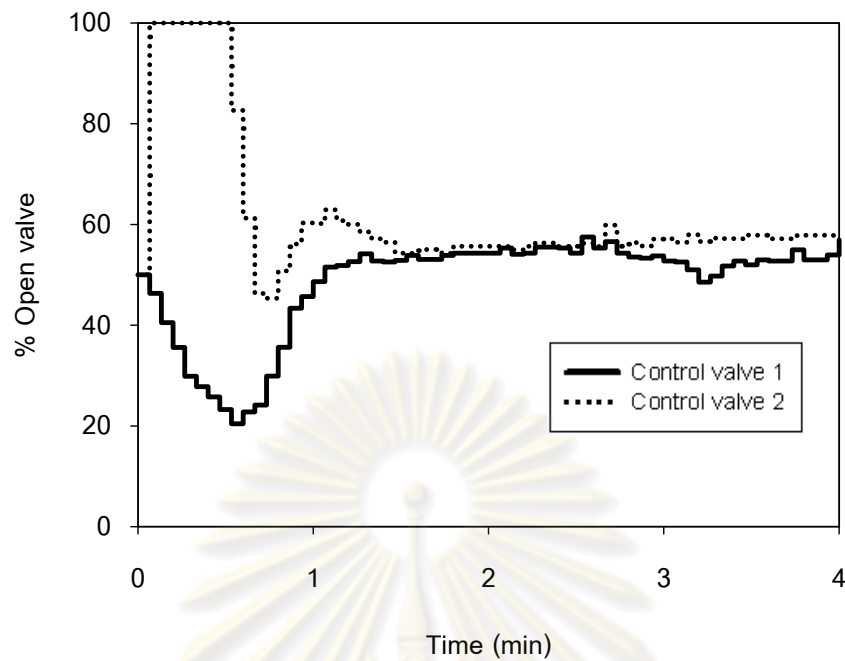
รูปที่ 7.24 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ ตัวที่ 2 ของตัวควบคุมแบบ PID ในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 2 ของการทดลองกระบวนการจริง



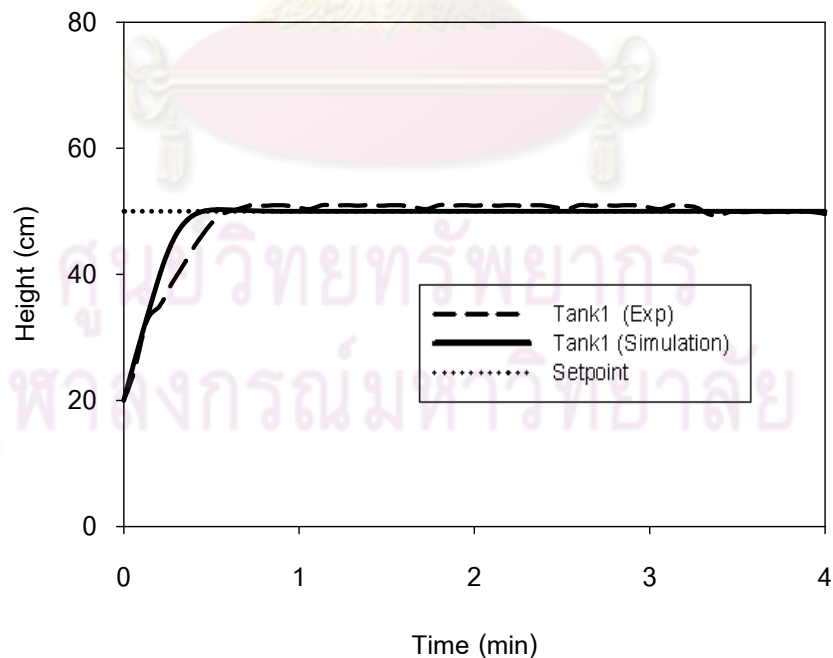
รูปที่ 7.25 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 1 ของตัวควบคุมแบบ MPC ทั้งผลการทดลองและผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 2



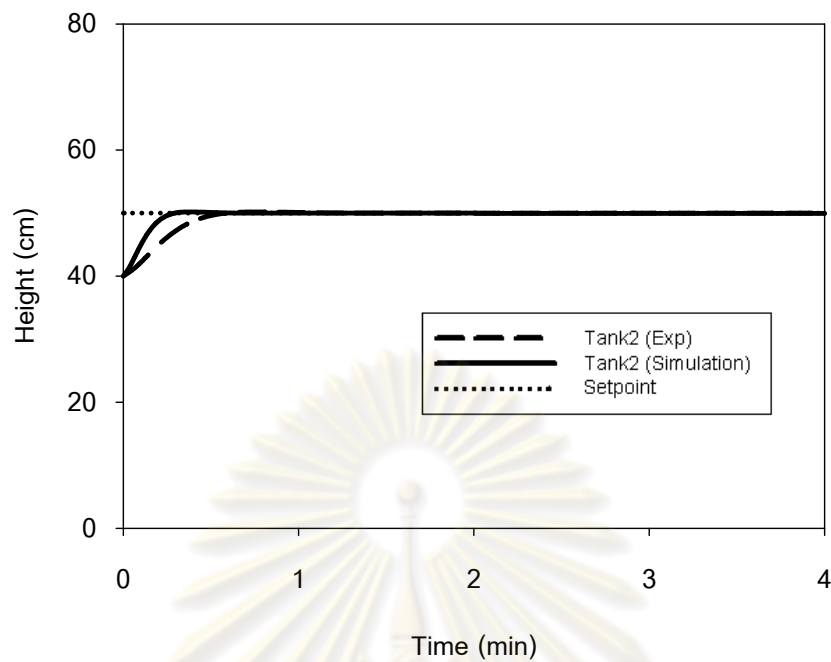
รูปที่ 7.26 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 2 ของตัวควบคุมแบบ MPC ทั้งผลการทดลองและผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 2



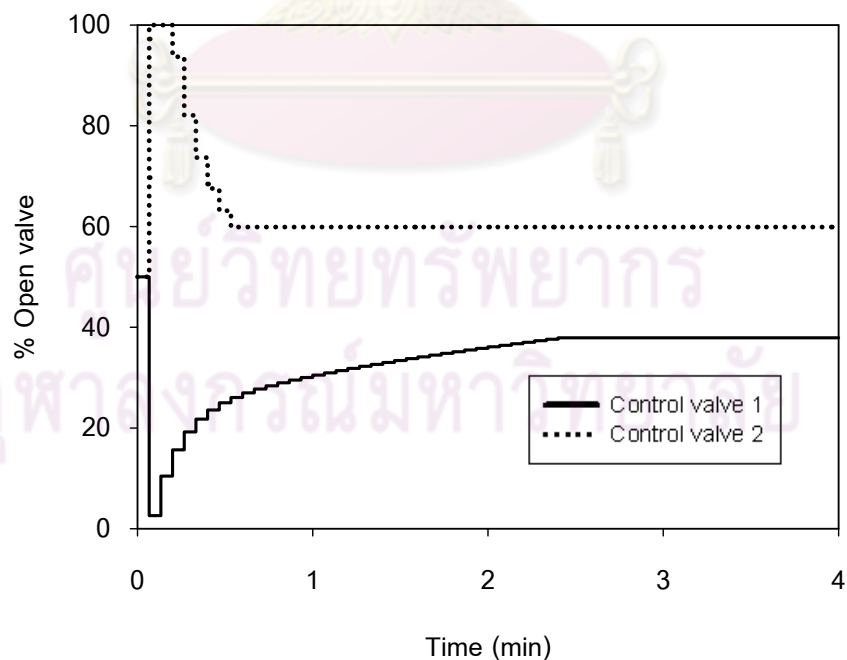
รูปที่ 7.27 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ ตัวที่ 2 ของตัวควบคุมแบบ MPC ในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 2 ของการทดลองกระบวนการจริง



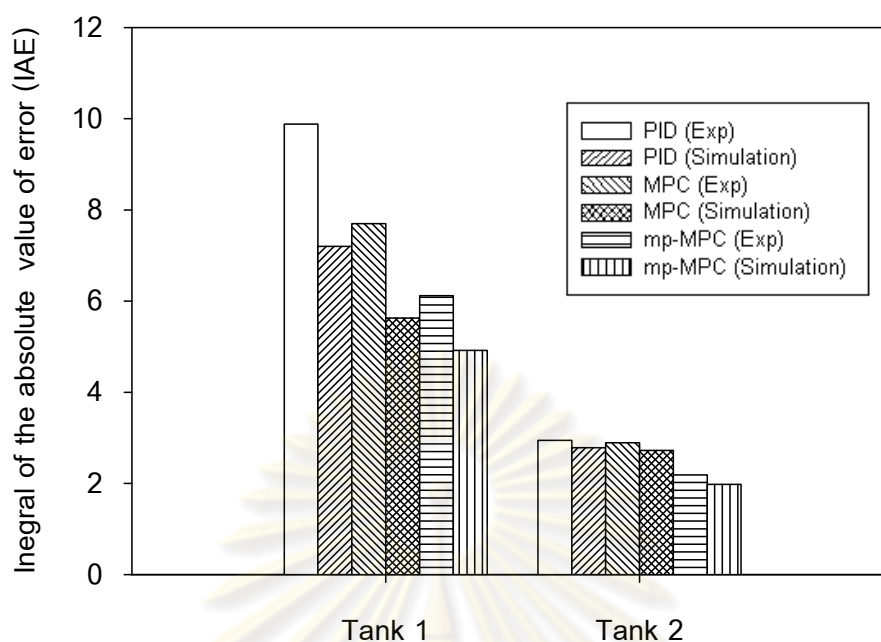
รูปที่ 7.28 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 1 ของตัวควบคุมแบบ mp-MPC ทั้งผลการทดลองและ ผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 2



รูปที่ 7.29 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 2 ของตัวควบคุมแบบ mp-MPC ทั้งผลการทดลองและผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 2



รูปที่ 7.30 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ ตัวที่ 2 ของตัวควบคุมแบบ mp-MPC ในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 1 กับถังที่ 2 ของการทดลองกระบวนการจริง



รูปที่ 7.31 ผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (IAE) ของการควบคุมระดับของเหลวถังที่ 1 กับถังที่ 2 แต่ละตัวควบคุม

7.2.3 กรณีการควบคุมระดับของเหลวถังที่ 3 กับถังที่ 4

ในการควบคุมระดับของเหลวถังที่ 3 และถังที่ 4 โดยมีค่าเป้าหมายอยู่ที่ 50 เซนติเมตร ค่าสภาวะคงตัวของความสูงของระดับของเหลวถังที่ 1 เท่ากับ 20 เซนติเมตร ถังที่ 3 เท่ากับ 20 เซนติเมตร, ถังที่ 2 เท่ากับ 40 เซนติเมตร, ถังที่ 4 เท่ากับ 40 เซนติเมตร ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมแต่ละตัวควบคุมมีขั้นตอนการปรับดังนี้

- การปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PID

ในงานวิจัยนี้จะปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PID โดยใช้วิธีการปรับแต่งตัวควบคุมด้วยวิธีการแกว่งอย่างต่อเนื่อง (Continuous Cycling Method) ของซิกเลอร์และนิโคลส์ ซึ่งวิธีนี้เหมาะสมกับกระบวนการที่มีการตอบสนองที่ค่อนข้างรวดเร็วและระบบที่มีการแกว่งของตัวแปรควบคุม เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นกระบวนการในการควบคุมความสูงของน้ำซึ่งเป็นกระบวนการที่มีการตอบสนองเร็ว ดังนั้นจึงเลือกใช้วิธีนี้

การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 ลดผลการควบคุมของไอและดีโดยให้ τ_D น้อยที่สุดและ τ , มากที่สุด

ขั้นที่ 2 ให้ K_c มีค่าน้อยๆ (ประมาณ 0.5) และเริ่มการควบคุมอัตโนมัติ

ขั้นที่ 3 เพิ่มค่า K_c ที่ล้นน้อยจนเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง (Continuous Cycling) (การแกว่งที่มีแอมพลิจูดคงตัว) ภายหลังเปลี่ยนแปลงโหนดเพียงเล็กน้อย ค่า K_c ที่ได้จะเรียกว่าค่าอัตราขยายค่าสุดท้าย (Ultimate Gain, K_{cu}) ระยะเวลาที่เกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่องจะเรียกว่า คาบสุดท้าย (Ultimate Period, P_u) ซึ่งในกรณีนี้ K_{cu} ของการควบคุมถึงที่ 3 และถึงที่ 4 มีค่าเท่ากับ 2 และ -4 เกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง ดังรูปที่ 7.32 และ 7.33 แล้วใช้การตั้งค่าตัวควบคุม PID ตามตารางที่ 7.2 ในหัวข้อที่ 7.2.1 ดังต่อไปนี้

ในงานวิจัยนี้ตัวควบคุมแบบ PID จะใช้โหมดของการควบคุมคือ โหมด P และโหมด I จะไม่ใช้โหมด D เพราะว่าการตอบสนองของระบบค่อนข้างรวดเร็ว ดังนั้นโหมด D จึงไม่จำเป็นต้องใช้ สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ได้ดังนี้

การควบคุมความสูงของน้ำถังที่ 3 $K_c = 0.9$, $\tau_I = 0.167$ นาที = 10 วินาที

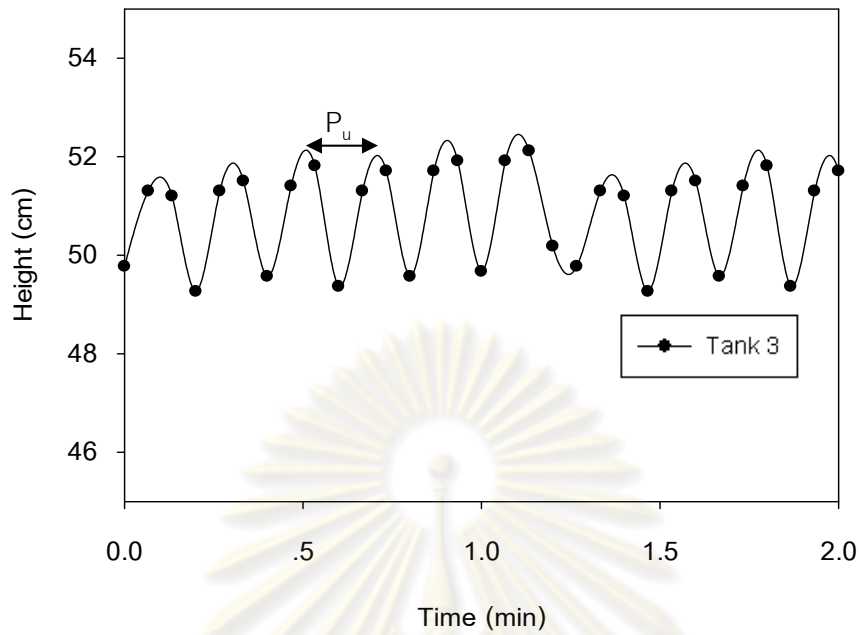
การควบคุมความสูงของน้ำถังที่ 4 $K_c = -1.8$, $\tau_I = -0.389$ นาที = 23.3 วินาที

การควบคุมความสูงของน้ำถังที่ 4 ค่า K_c , τ_I มีค่าเป็นลบ เนื่องจากการควบคุมความสูงของน้ำถังที่ 4 เป็นการตอบสนองแบบทิศทางตรง คือ ความสูงของน้ำถังที่ 4 มีค่าลดลง ดังนั้นวาล์วควบคุมตัวที่ 2 จะปรับวาล์วให้ปิดลงเพื่อปรับอัตราการไหลเข้าสู่ถังที่ 4 ให้มีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ความสูงของน้ำถังที่ 4 มีค่าเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันความสูงของน้ำถังที่ 4 มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นวาล์วควบคุมตัวที่ 2 จะทำปรับวาล์วให้เปิดขึ้นเพื่อปรับอัตราการไหลเข้าสู่ถังที่ 4 ให้มีค่าลดลงส่งผลให้ความสูงของน้ำถังที่ 4 มีค่าลดลง สรุปได้ว่า K_c เป็นบวกหรือลบขึ้นอยู่กับ การตอบสนองของตัวควบคุมที่มีผลต่อกระบวนการ

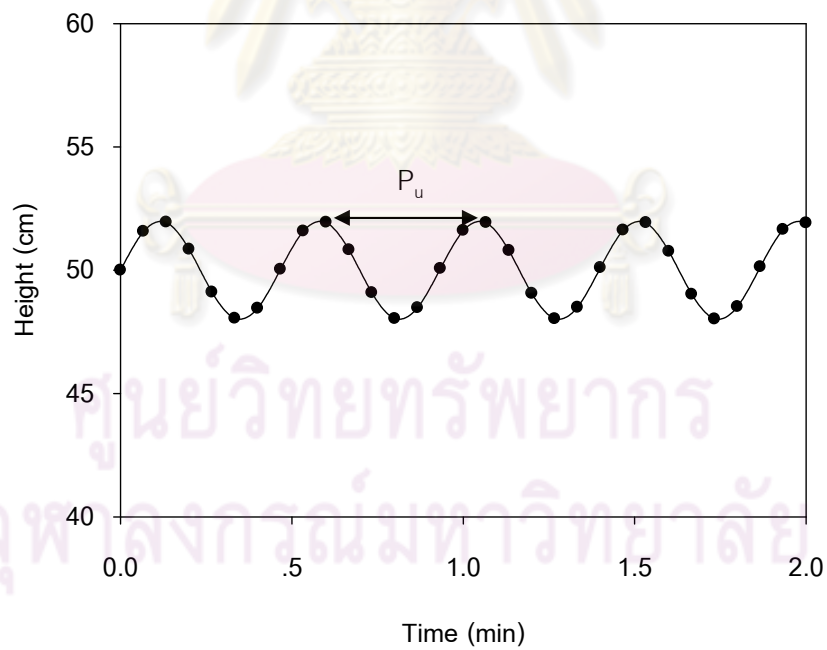
ขั้นที่ 4 ทำการปรับแต่งตัวควบคุมแบบละเอียดให้ได้ค่า IAE น้อยที่สุด โดยหลักการในการปรับละเอียดคือ ปรับค่า K_c ลดลงเพื่อลดการโอเวอร์ชูตแต่การทำเช่นนี้จะส่งผลให้การตอบสนองช้าลง และปรับค่า τ_I ลดลงเพื่อกำจัดออฟเซต แต่หากปรับค่า τ_I ต่ำเกินไปจะทำให้ผลการตอบสนองรุนแรงและโอเวอร์ชูตสูงขึ้น ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ภายหลังการปรับแบบละเอียดสรุปดังตารางที่ 7.5

- การปรับแต่งตัวควบคุมแบบ MPC และ mp – MPC

การปรับแต่งตัวควบคุมแบบ MPC และ mp – MPC มีลักษณะเหมือนกับหัวข้อที่ 7.2.1 โดยมีหลักเกณฑ์ดังนี้ ทำการปรับแต่งตัวควบคุมให้มีค่า IAE มีค่าน้อยที่สุดและคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับไม่มีความรุนแรง



รูปที่ 7.32 การตอบสนองของความสูงของน้ำถังที่ 3 มีลักษณะแกว่งอย่างต่อเนื่อง

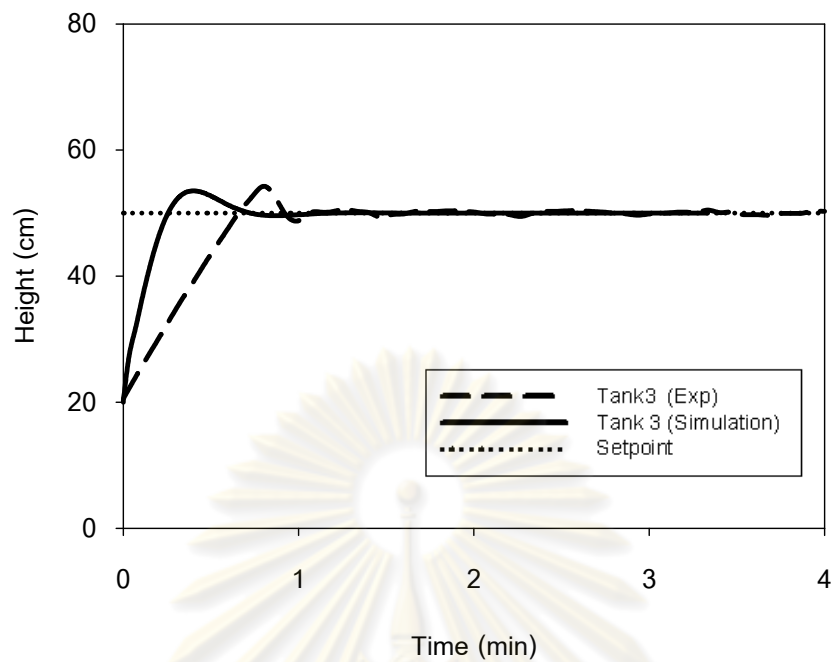


รูปที่ 7.33 การตอบสนองของความสูงของน้ำถังที่ 4 มีลักษณะแกว่งอย่างต่อเนื่อง

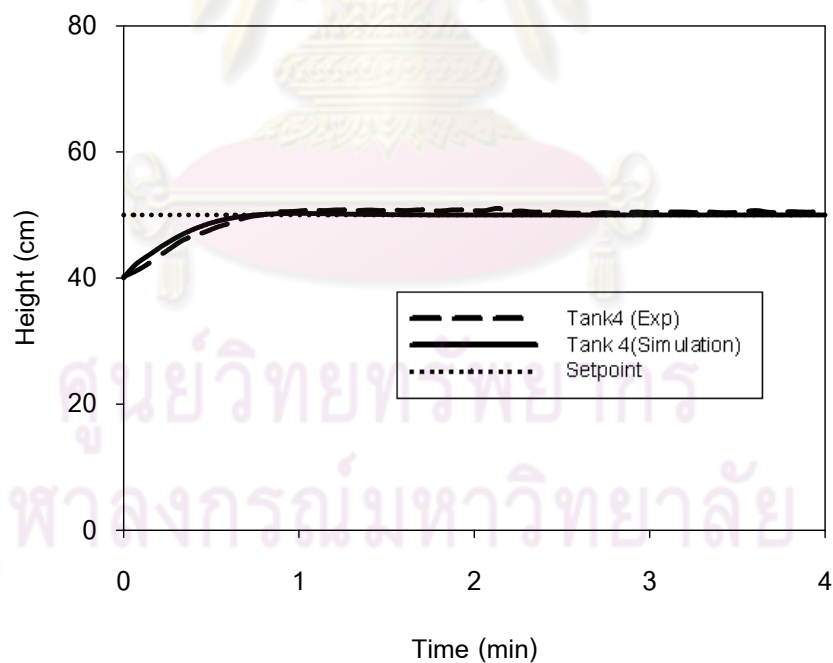
ตารางที่ 7.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมแต่ละตัวควบคุมทั้งการทดลองจริงและการจำลองกระบวนการของการควบคุมระดับของเหลวถังที่ 3 และถังที่ 4

ตัวควบคุม	การควบคุมถังที่ 1	การควบคุมถังที่ 2
PID	$K_c = 0.2, \tau_i = 30 \text{ s}, \tau_d = 0 \text{ s}$	$K_c = -0.1, \tau_i = 40 \text{ s}, \tau_d = 0 \text{ s}$
MPC	$P = 20, M = 4, y_{w1} = 500, u_{w1} = 100$	$P = 20, M = 4, y_{w2} = 400, u_{w2} = 100$
mp-MPC	$P = 20, M = 4, y_{w1} = 100, u_{w1} = 10$	$P = 20, M = 4, y_{w2} = 100, u_{w2} = 10$

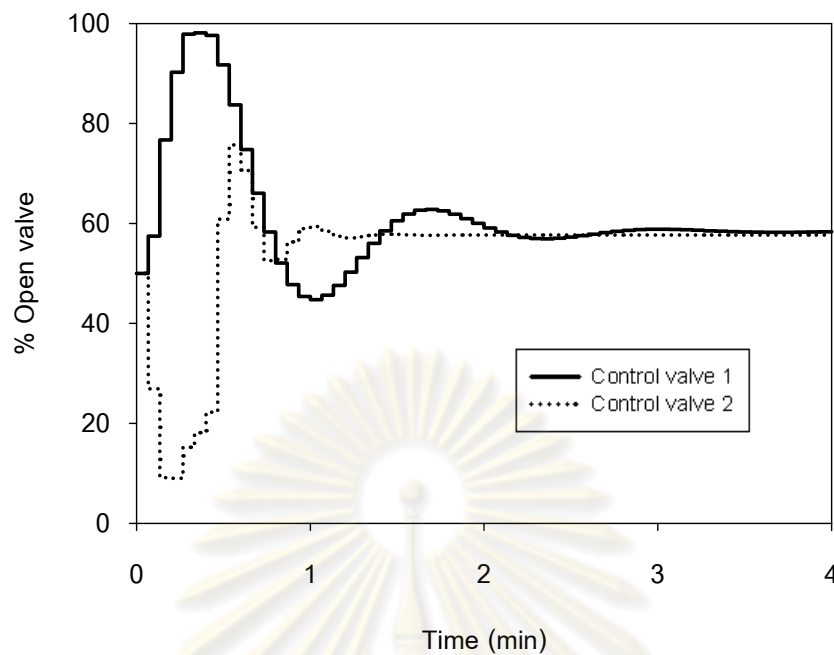
จากรูปที่ 7.34 - 7.35 , 7.37 - 7.38 , 7.40 - 7.41 เป็นผลการควบคุมของแต่ละตัวควบคุม พบว่าทั้งผลการทดลองในกระบวนการจริงกับผลการจำลองกระบวนการ ตัวควบคุมแบบ PID, ตัวควบคุมแบบ MPC , ตัวควบคุมแบบ mp-MPC สามารถควบคุมตัวแปรควบคุมให้เข้าสู่ระดับเป้าหมายได้ทั้งสองถัง โดยที่ตัวควบคุมแบบ mp-MPC มีสมรรถนะในการควบคุมได้ดีกว่าตัวควบคุมแบบ MPC และตัวควบคุมแบบ PID โดยเมื่อพิจารณาจากค่า IAE พบว่า ตัวควบคุมแบบ mp-MPC มีค่า IAE น้อยกว่าตัวควบคุมแบบ MPC และ PID ตามลำดับ ดังรูปที่ 7.43 ส่วนการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลองนั้น มีสมรรถนะในการควบคุมแตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบด้วยค่า IAE ซึ่งในการทดลองกระบวนการจริงอาจจะมีสิ่งรบกวนหรืออิทธิพลของตัวแปรอื่นๆ ที่ไม่ได้คำนึงถึงในการควบคุมในงานวิจัยนี้ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับพบว่าตัวควบคุมแบบ mp-MPC มีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับไม่รุนแรงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบ MPC และ PID ทั้งการทดลองในกระบวนการจริงและการจำลองกระบวนการดังแสดงในรูปที่ 7.36 , 7.39 , 7.42



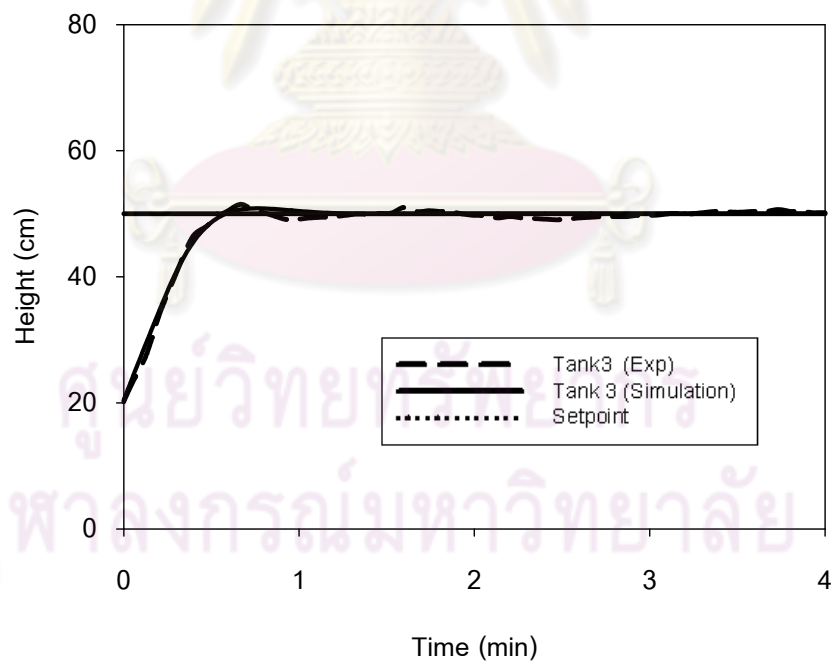
รูปที่ 7.34 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 3 ของตัวควบคุมแบบ PID ทั้งผลการทดลองและผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 3 กับถังที่ 4



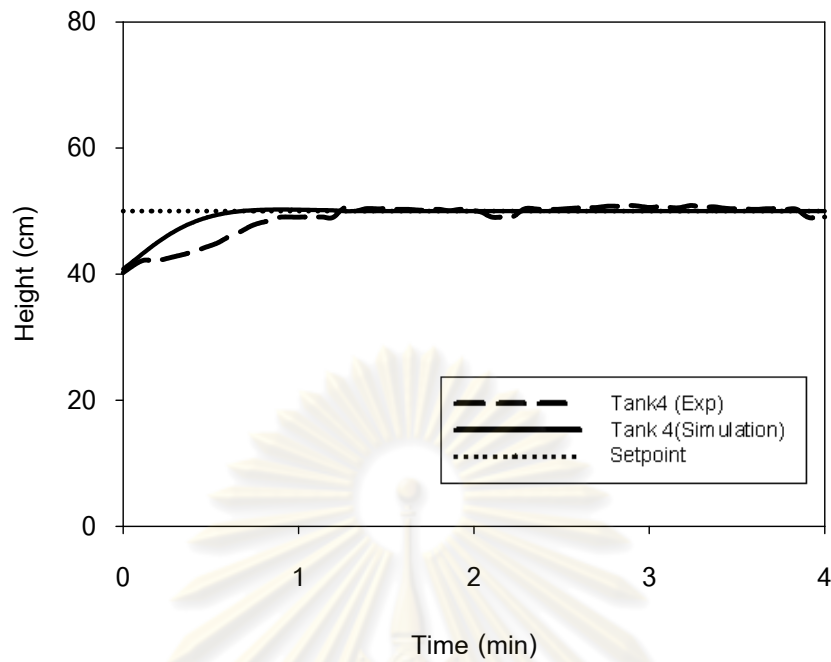
รูปที่ 7.35 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ PID ทั้งผลการทดลองและผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 3 กับถังที่ 4



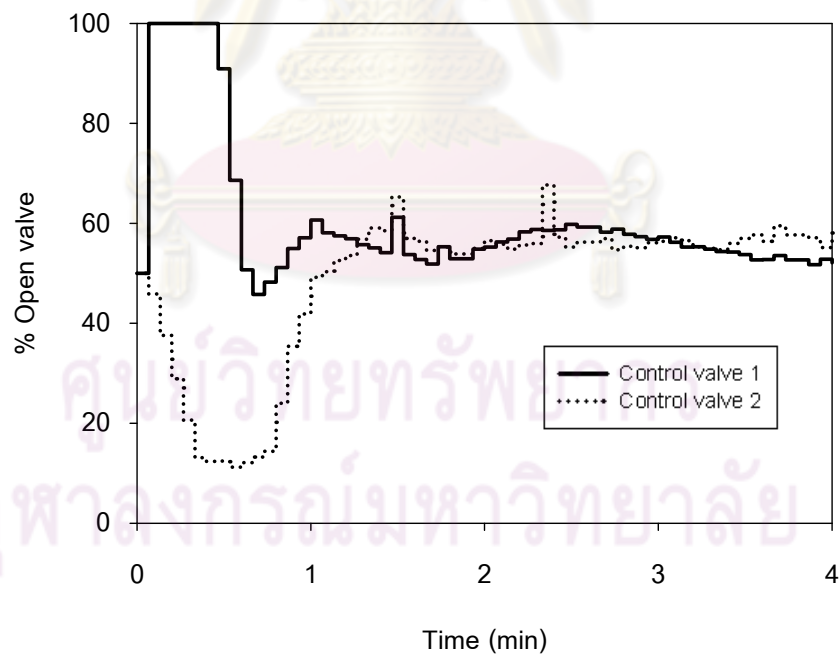
รูปที่ 7.36 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ ตัวที่ 2 ของตัวควบคุมแบบ PID ในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 3 กับถังที่ 4 ของการทดลองกระบวนการจริง



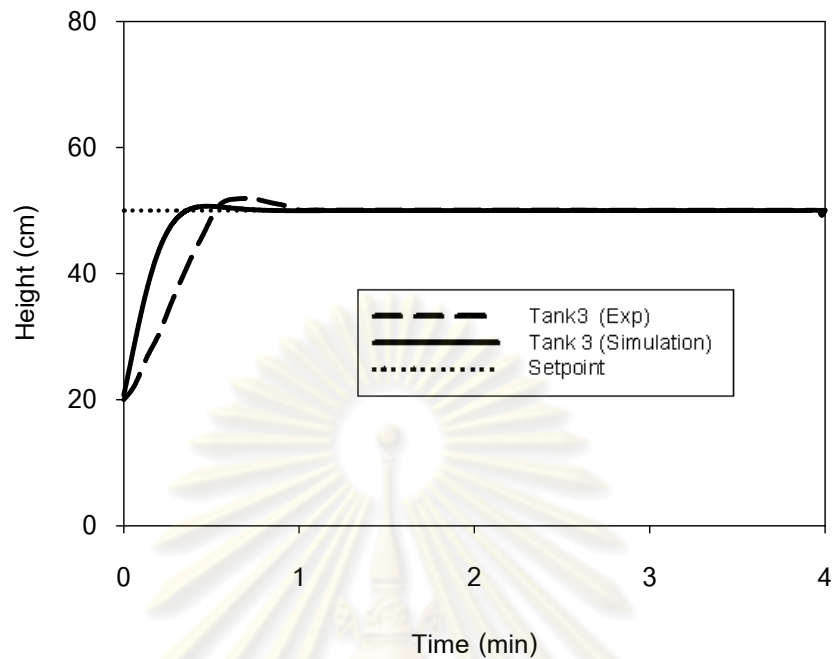
รูปที่ 7.37 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 3 ของตัวควบคุมแบบ MPC ทั้งผลการทดลองและผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 3 กับถังที่ 4



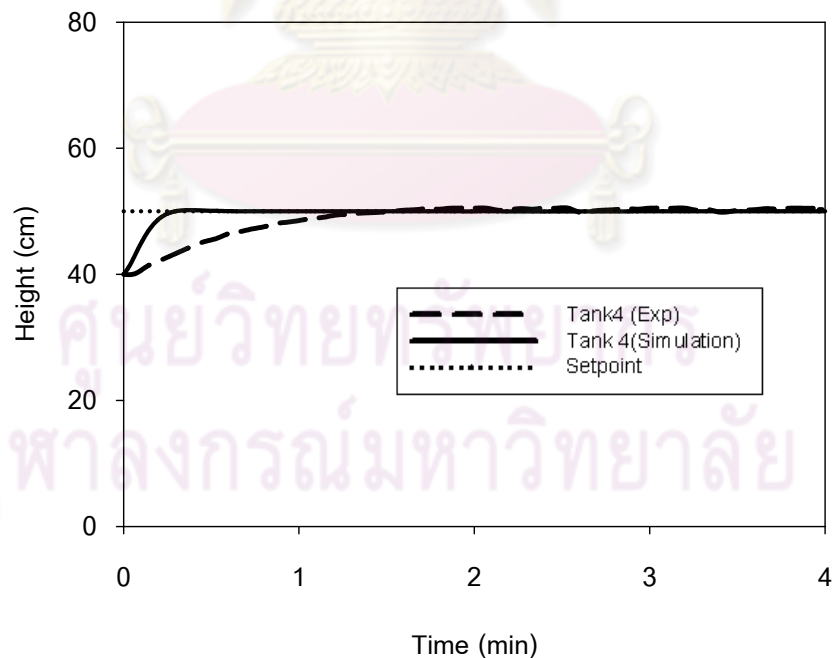
รูปที่ 7.38 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ MPC ทั้งผลการทดลองและผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 3 กับถังที่ 4



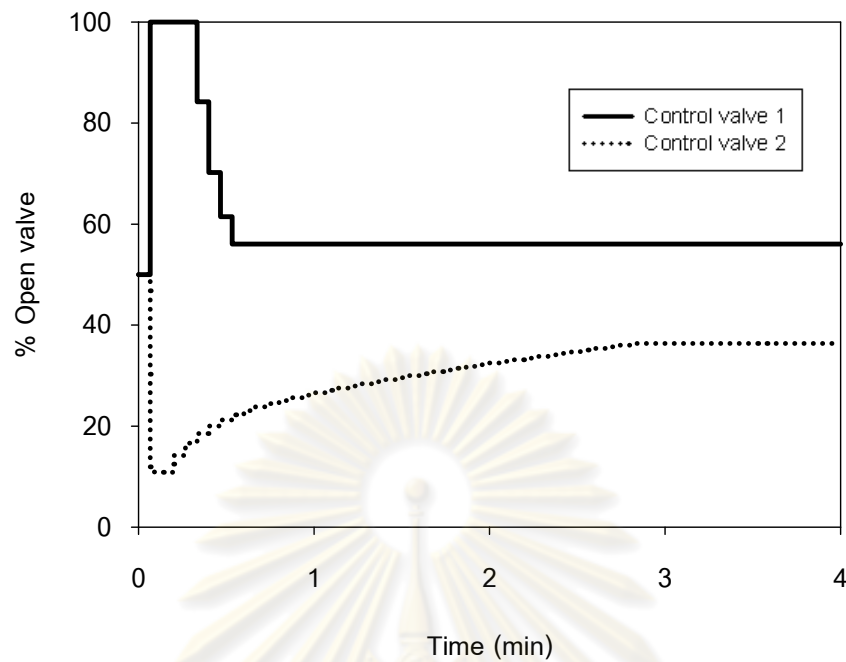
รูปที่ 7.39 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ ตัวที่ 2 ของตัวควบคุมแบบ MPC ในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 3 กับถังที่ 4 ของการทดลองกระบวนการจริง



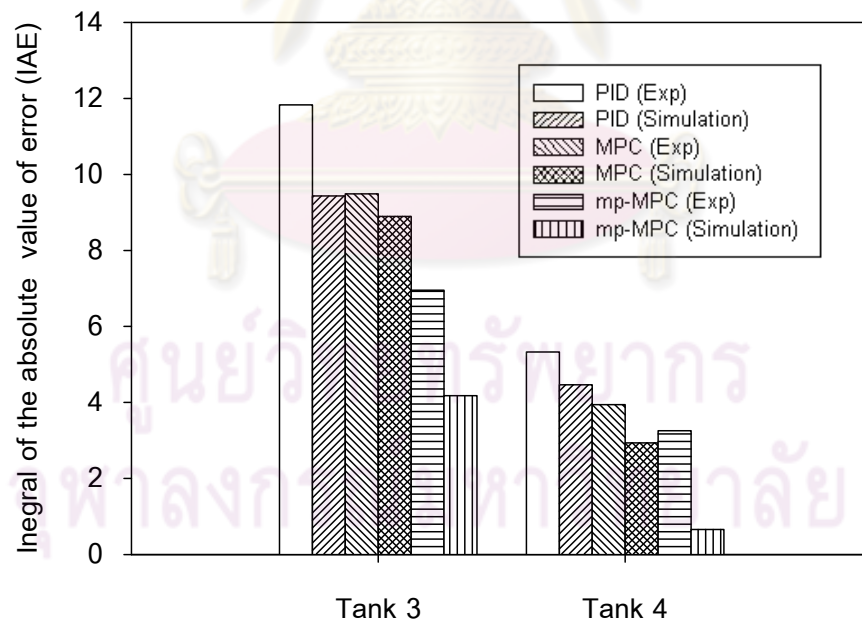
รูปที่ 7.40 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 3 ของตัวควบคุมแบบ mp-MPC ทั้งผลการทดลองและผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 3 กับถังที่ 4



รูปที่ 7.41 ความสูงของระดับของน้ำถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ mp-MPC ทั้งผลการทดลองและผลการจำลองกระบวนการในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 3 กับถังที่ 4



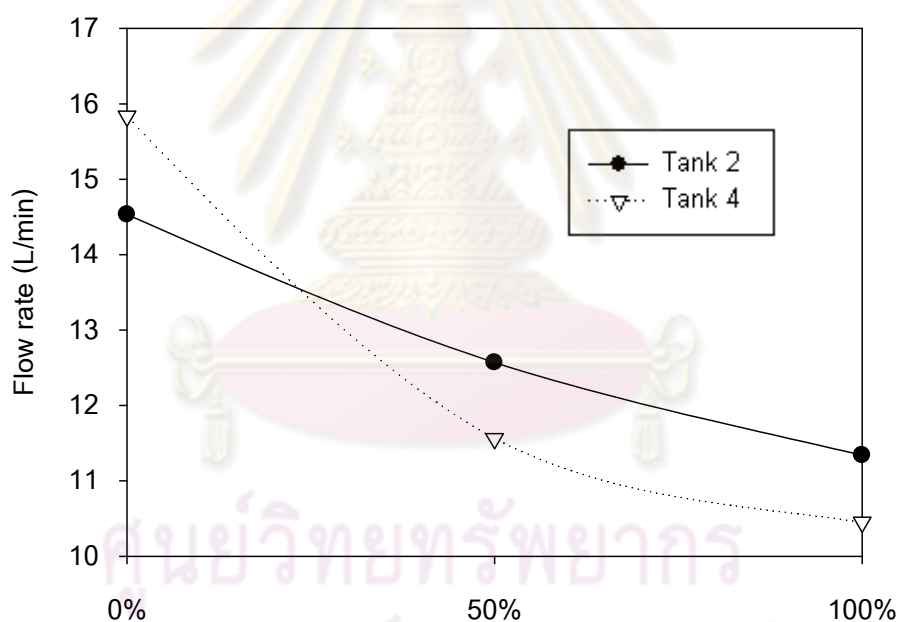
รูปที่ 7.42 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ ตัวที่ 2 ของตัวควบคุมแบบ mp-MPC ในกรณีการควบคุมระดับของน้ำถังที่ 3 กับถังที่ 4 ของการทดลองกระบวนการจริง



รูปที่ 7.43 ผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (IAE) ของการควบคุมระดับของเหลวถังที่ 3 กับถังที่ 4 แต่ละตัวควบคุม

7.2.4 กรณีการควบคุมระดับของเหลวถึงที่ 2 กับถึงที่ 4

จากการทดสอบความสามารถในการควบคุมพบว่าการควบคุมระดับความสูงของน้ำถึงที่ 2 กับ ถึงที่ 4 สามารถควบคุมได้ แต่กระบวนการจริงสามารถควบคุมในช่วงสั้นได้ ไม่สามารถควบคุมในช่วงกว้างได้เพราะในการเปิด-ปิดของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ส่งผลให้อัตราการไหลที่ป้อนของน้ำเข้าสู่ถึงที่ 2 และถึงที่ 4 ไม่แตกต่างกันมากซึ่งส่งผลกระทบต่อการเพิ่มความสูงของน้ำในถังน้อยมาก พิสูจน์โดยการวัดอัตราการไหลของน้ำที่ป้อนเข้าสู่ถึงที่ 2 และถึงที่ 4 โดยทำการเปิดวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ที่ 0%, 50%, 100% ดังรูปที่ 7.44 โดยที่ วาล์วควบคุมตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ปิดที่ 0% อัตราการไหลของน้ำถูกป้อนเข้าสู่ถึงที่ 2 และถึงที่ 4 จะไม่ถูกป้อนเข้าสู่ถึงที่ 1 และถึงที่ 3 แต่เมื่อปรับวาล์วควบคุมที่ 1 และตัวที่ 2 ที่ 50% และ 100% อัตราการไหลของน้ำจะถูกป้อนเข้าสู่ถึงที่ 1 ,ถึงที่ 3 ,ถึงที่ 2 และถึงที่ 4



รูปที่ 7.44 อัตราการไหลของน้ำป้อนเข้าสู่ถึงที่ 2 และ 4 ต่อเปอร์เซ็นต์ของการเปิดวาล์ว

จากรูปที่ 7.44 พบว่าเมื่อวาล์วเปิด 100 % กับวาล์วปิด 0% อัตราการไหลของน้ำไม่แตกต่างกันมาก เพราะฉะนั้นในการควบคุมของของเหลวของถึงที่ 2 และ ถึงที่ 4 ไม่สามารถควบคุมได้ในช่วงเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายในช่วงกว้างได้

บทที่ 8

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

8.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ทำการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบมัลติพาราเมตริกในการควบคุมระดับความสูงของของเหลวในกระบวนการระบบสี่ถัง โดยสร้างชุดทดลองของกระบวนการระบบสี่ถังสำหรับทดสอบแต่ละตัวควบคุมและสามารถควบคุมระดับของของเหลวเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการในกรณีต่างๆ ระบบควบคุมที่ใช้คือ ระบบควบคุมแบบดิจิตอล รุ่น CS3000 ของบริษัทโยโกกาว่า (ประเทศไทย) เป็นระบบสั่งการในการปรับกระบวนการ ตัวควบคุมที่พิจารณาในที่นี้ ได้แก่ ตัวควบคุมแบบ PID, ตัวควบคุม MPC, ตัวควบคุมแบบ mp-MPC ซึ่งแบ่งผลการทดลองเป็น 3 ส่วน ได้แก่

1. การศึกษาการควบคุมภายใต้ความไม่แน่นอนของแบบจำลองโดยใช้วิธีการจำลองเทคนิคมอนติคาร์โล แล้ววิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะและความทนทานของการควบคุมด้วยวิธีทางสถิติ
2. การศึกษาเพื่อหาแบบจำลองของกระบวนการระบบสี่ถังโดยใช้วิธีการตอบสนองของเอาต์พุตต่อสเต็ปอินพุต
3. การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระบวนการของแต่ละตัวควบคุม

1. การศึกษาการควบคุมภายใต้ความไม่แน่นอนของแบบจำลองโดยใช้วิธีการจำลองเทคนิคมอนติคาร์โล แล้ววิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของการควบคุมด้วยวิธีทางสถิติ

อิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะในการควบคุมคือ ชนิดของตัวควบคุม ช่วงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแบบจำลอง และพบว่ามีอันตรกิริยาระหว่างสองปัจจัยนี้ ในช่วงความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองต่ำกว่า $\pm 20\%$ ตัวควบคุมแบบ mp-MPC มีสมรรถนะในการควบคุมที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบ MPC และ PID และช่วงความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองตั้งแต่ $\pm 40\%$ ขึ้นไป ตัวควบคุมแบบ PID มีสมรรถนะในการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบ mp-MPC และ MPC ส่วนในช่วงความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองตั้งแต่ $\pm 20\%$ ถึง \pm

30% พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของสมรรถนะในการควบคุมของตัวควบคุมแบบ PID, ตัวควบคุมแบบ MPC ตัวควบคุมแบบ mp-MPC

2. การศึกษาเพื่อหาแบบจำลองของกระบวนการระบบสี่ถังโดยใช้วิธีการตอบสนองของเอาต์พุตต่อสเต็ปอินพุต

แบบจำลองที่หามาได้จากวิธีตอบสนองของเอาต์พุตต่อสเต็ปอินพุตสามารถใช้เป็นตัวแทนของกระบวนการ ผลการตอบสนองของกระบวนการกับผลการจำลองกระบวนการมีความใกล้เคียงกัน แต่อาจจะมีคลาดเคลื่อนเล็กน้อย

3. การทดสอบเปรียบเทียบการควบคุมกระบวนการแต่ละตัวควบคุม

ในการศึกษาเพื่อทดสอบเปรียบเทียบการควบคุมกระบวนการแต่ละตัวควบคุม และการจำลองกระบวนการแบ่งเป็น 4 กรณี และทำการศึกษาในกรณีควบคุมโดยเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย (Setpoint change) และขจัดผลการรบกวนที่มีผลต่อระบบดังต่อไปนี้

- กรณีการควบคุมระดับของเหลวถังที่ 1 กับถังที่ 3
- กรณีการควบคุมระดับของเหลวถังที่ 1 กับถังที่ 2
- กรณีการควบคุมระดับของเหลวถังที่ 3 กับถังที่ 4
- กรณีการควบคุมระดับของเหลวถังที่ 2 กับถังที่ 4

พบว่า กรณีการควบคุมระดับของเหลวถังที่ 1 กับถังที่ 3, 1 กับถังที่ 2, 3 กับถังที่

4 ตัวควบคุมแบบmp-MPC มีสมรรถนะในการควบคุมดีกว่าตัวควบคุมแบบMPC และ PID การเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับของตัวควบคุมแบบ mp-MPC ไม่รุนแรงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบ MPC และตัวควบคุมแบบ PID ทั้งผลจากการควบคุมกระบวนการจริงและการจำลอง ส่วนกรณีการควบคุมระดับของเหลวถังที่ 2 กับถังที่ 4 พบว่า ไม่สามารถควบคุมในช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายในช่วงกว้างๆ ได้ ดังนั้นจึงไม่สามารถศึกษาในกรณีของการควบคุมระดับของเหลวถังที่ 2 กับถังที่ 4 เนื่องจากในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายในช่วงค่อนข้างกว้าง

8.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาการควบคุมของระบบในกรณีที่มีตัวแปรรบกวนในกระบวนการ ทั้งนี้เพื่อทดสอบความทนทานของระบบด้วย

2. ควรศึกษากรณีซึ่งใช้แบบจำลองแบบข่ายงานนิเวรอน

3. ควรศึกษาการควบคุมกระบวนการแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพราะกระบวนการนี้มีความไม่เป็นเชิงเส้นแฝงอยู่



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1]. W.L. Luyben, Simple regulatory control of the eastman process, Ind.Eng. Chem. Res.35 (10) (1996):3280–3289.
- [2]. Seborg, D.E., Edgar, T.F., and Mellichamp, D.A. Process dynamics and control. USA: John Wiley & Sons, 2004.
- [3]. Efstratios N. Pistikopoulos etc. On-line optimization via off-line parametric optimization tools. Computers and Chemical Engineering 24 (2000):183-188
- [4]. A. Zadeh and B. H. m'halen. On optimal control and linear programming. IRE Trans Automatic Control (Correspondence) vol. 4C-7 July 1962: 4546.
- [5]. Propoi, A. I. (1963). Use of linear programming methods for synthesizing sampled-data automatic systems. Automation and Remote Control, 24(7): 837-844.
- [6]. Kleinman, An easy way to stabilise a linear constant system. IEEE Trans AC 15 6 (1970): 692
- [7]. Thomas, Y. A. (1975). Linear quadratic optimal estimation and control with receding horizon. Electronics Letters 11:19- 21.
- [8]. Richalet, J., Rault, A., Testud, J. L., & Papon, J. (1976). Algorithmic control of industrial processes. Proceedings of the Fourth IFAC symposium on identixcation and system parameter estimation: 1119-1167.
- [9]. Cutler, C. R., & Ramaker, B. L. (1980). Dynamic matrix control a computer control algorithm. Proceedings Joint Automatic Control Conference San Francisco, CA.
- [10]. Prett, D. M., & Gillette, R. D. (1980). Optimization and constrained multivariable control of a catalytic cracking unit. Proceedings of the joint automatic control Conference: WP5-c.
- [11]. GarcmHa, C. E., Prett, D. M., Morari, M. (1989). Model predictive control: theory and practice - a survey. Automatica 25 (3): 335-348.

- [12]. 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.
- [13]. Qin, S. J., and Badgwell, T. A. (1997). An overview of industrial model predictive control technology. In: J. C. Kantor, C. E. Garcia, & B. Carnahan (Eds.), Fifth International Conference on Chemical Process Control, CACHE, AIChE : 232-256.
- [14]. ศราวุธ ภูไพจิตรกุล การประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟบน MATLAB สำหรับควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่มีปฏิกิริยาชนิดคายความร้อน ปรินญูญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- [15]. C. Loeblein, J. D. Perkins, Structural design for on-line process optimization: Dynamic economics of MPC, AIChE Journal 45, 5:1018 –1029.
- [16]. ปรินญูญาพร รักสวิต การประยุกต์ใช้การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์ สำหรับเครื่องปฏิกรณ์เคมีถึงกวนแบบต่อเนื่องที่มีปฏิกิริยาคายความร้อนอันดับหนึ่ง ปรินญูญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [17]. Edward P. Gatzke, Edward S. Meadows, Model based control of a four-tank system. Computers and Chemical Engineering 24 (2000):1503-1509.
- [18]. อธิป ถายานู ตัวควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟแบบง่ายบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลสำหรับควบคุมระดับของเหลวแบบเฉลี่ย ปรินญูญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [19]. Frank Allgöwer. 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.
- [20]. Mehmet Mercango, Francis J. Doyle III, Distributed model predictive control of an experimental four-tank system. Journal of Process Control 17 (2007): 297–308.
- [21]. Pinak Pani Biswas, Rishi Srivastava. Sliding mode control of quadruple tank process. Mechatronics 19 (2009): 548–561.

- [22]. Tondel, P., Johansen, T. A., Bemporad, A. An algorithm for multi-parametric quadratic programming and explicit MPC solutions. Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control. Orlando, FL, 2001: pp. 1199–1204.
- [23]. F.Borrelli, A.Bemporad. Geometric Algorithm for Multiparametric Linear Programming. Journal of optimization theory and application September 2003 Vol. 118, No. 3:515–540.
- [24]. Petter Tondel, Tor Arne Johansen. An algorithm for multi-parametric quadratic programming and explicit MPC solutions. Automatica 39 (2003): 489 – 497.
- [25]. Bemporad, A., Morari, M., Dua, V., and Pistikopoulos, E. N. (2002). The explicit linear quadratic regulator for constrained systems. Automatica 38(1): 3–20.
- [26]. ไพศาล กิตติศุกร. การควบคุมที่อาศัยแบบจำลองสำหรับกระบวนการเคมีแบบเบตซ์. พิมพ์ครั้งที่ 1: โรงงานพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์, 2551.
- [27]. ปิยะพล นันทพรภิมย์. การควบคุมเครื่องปฏิกรณ์เพอร์เวอเรทีฟเมมเบรนด้วยการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [28]. Agachi, Paul Serban. Model based control: case studies in process engineering : Wiley-Vch Verlag GmbH & Co KGaA, Weinhei, 2006
- [29]. Efstratios N.Pistikopoulos. Multi-Parametric Model-Based Control Volume 2: Theory and Applications .Wiley-Vch Verlag GmbH&Co.KGaA, 2007.
- [30]. Samik Raychaudhuri. Introduction to Monte Carlo simulation .Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference.
- [31]. พัชรินทร์ พวงแก้ว. การทดสอบมอนติคาร์โลอัตราส่วนภาวะน่าจะเป็นสำหรับแผนการทดลองแบบบล็อกสุ่มสมบูรณ์ที่มีปัจจัยทดลองและปัจจัยบล็อกคงที่. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต สาขาวิชาสถิติ ภาควิชาสถิติ คณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [32]. Makoto matsumoto, Takuji nishimura. Mersenne Twister A 623 Dimensionally Equidistributed Uniform Pseudo-Random Number Generator. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation, (1998): 3–30.
- [33]. จิราวัลย์ จิตรถเวช. แผนแบบการทดลอง. พิมพ์ครั้งที่ 1: สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์, 2551.

- [34]. นราทิพย์ จันสกุล. แผนแบบการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรม R. พิมพ์ครั้งที่ 1: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2552.
- [35]. ฉัตรชัย กันยาวุธ. พลศาสตร์ของกระบวนการและการควบคุม. พิมพ์ครั้งที่ 1: ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2546.
- [36]. อัจฉรา คงแดง. การเลียนแบบเชิงพลวัตและการควบคุมโครงสร้างดีซีเอสของหอกลิ้น. ปริญญาเอกบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
ชุดการทดลองกระบวนการระบบสี่ถัง



รูปที่ ก-1 ชุดการทดลองระบบสี่ถัง



รูปที่ ก-2 วาล์วควบคุม



รูปที่ ก-3 ปั๊มน้ำ



รูปที่ ก-4 เส้นเซอร์วิวดระดับของของเหลว



รูปที่ ก-5 เครื่องวัดอัตราการไหลแบบอุลตราโซนิก



รูปที่ ก-6 ตู้ควบคุมเครื่อง DCS



รูปที่ ก-7 อินเวอร์เตอร์



รูปที่ ก-8 ป้มลม

คู่มือ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



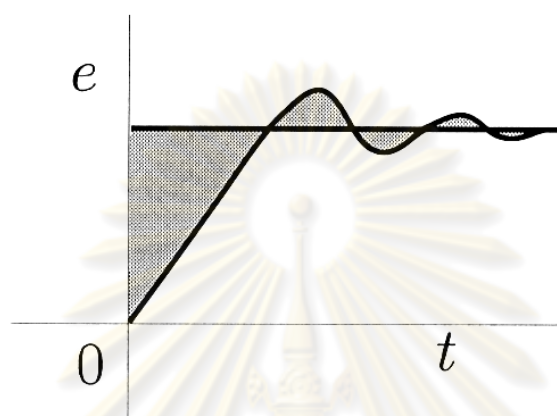
รูปที่ ก-9 การติดตั้งของบอลวาล์วและเซ็นเซอร์ใต้ถังของชุดทดลอง



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข
เกณฑ์การวัดความผิดพลาด

การรวมความผิดพลาดระหว่างค่าที่วัดได้ของการตัวแปรควบคุมกับค่าเป้าหมายที่ต้องการตามรูปแบบการอินทิเกรตสามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ ข-1 แสดงความผิดพลาด

Integral of the absolute value of error (IAE)

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (ข.1)$$

Integral of the square of error (ISE)

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

Integral of time-weighted absolute error (ITAE)

$$ITAE = \int_0^{\infty} |e(t)| t dt \quad (ข.3)$$

Integral of time-weighted Square of error (ITSE)

$$ITSE = \int_0^{\infty} e^2(t) t dt \quad (ข.4)$$

เมื่อ e คือ ค่าความผิดพลาดปกติ

ข้อดีของการวิเคราะห์ทั้งสี่ตั้งสมการ ข.1 ถึง ข.4 นั้นแตกต่างกันไป โดยค่าความผิดที่จากการวิเคราะห์แบบ ISE นั้นมีความเหมาะสมในกรณีที่ความคลาดเคลื่อนของวง

ควบคุมกระบวนการมีขนาดมาก ๆ ซึ่งมักจะเกิดขึ้นในเวลาเริ่มต้นที่วงควบคุมกระบวนการถูกรบกวนและความคลาดเคลื่อนนี้จะมีขนาดลดลงเมื่อเวลาผ่านไปมาก ๆ ส่วนความผิดพลาดแบบ ITAE ของระบบตอบสนองจะได้ค่าความผิดพลาดสำหรับระยะเวลาที่ยาวนาน ส่วนการคำนวณความผิดพลาดของ ITSE จะได้ค่าความผิดพลาดที่รุนแรงและสำหรับระยะเวลาที่ยาวนาน ส่วนตัวสุดท้าย ค่าความคลาดเคลื่อนแบบ IAE มีความเหมาะสมกับกรณีที่มีความคลาดเคลื่อนมีขนาดเล็กน้อย จะเหมาะสมกว่า ISE เพราะการที่ความคลาดเคลื่อนถูกกำหนดให้อยู่ในรูปยกกำลังสอง จะทำให้ขนาดของความคลาดเคลื่อนมีค่านิ่งน้อยลงไปอีกหรือมีขนาดน้อยกว่าที่เป็นจริง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำ IAE วิเคราะห์และใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมแบบต่างๆ เพราะกระบวนการมีความคลาดเคลื่อนจากค่าเป้าหมายมีขนาดเล็กน้อย เป็นการควบคุมแบบการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย ส่วน ISE เหมาะสมกับการควบคุมแบบเปลี่ยนแปลงของค่าที่รบกวนระบบ



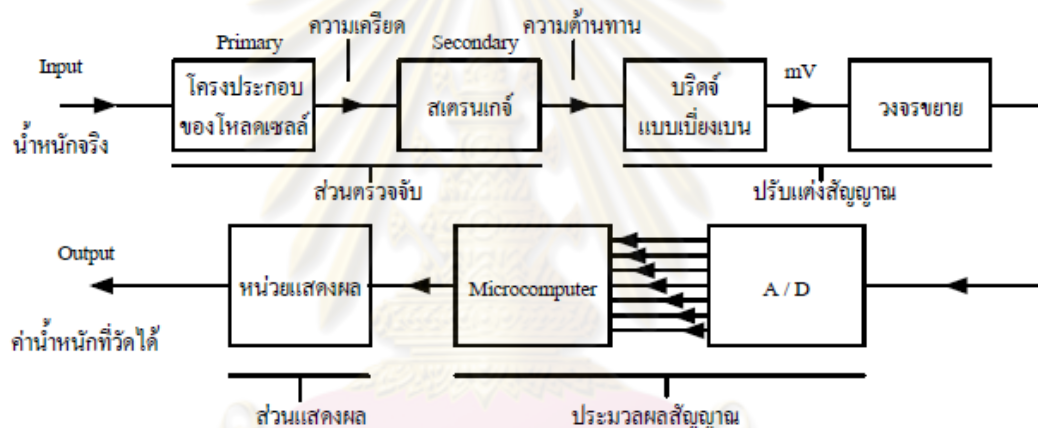
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) และเซนเซอร์ (Sensors)

ค.1 นิยามของทรานสดิวเซอร์

ทรานสดิวเซอร์ คือ อุปกรณ์แปลงข้อมูลหรือพลังงานรูปแบบต่าง ๆ ให้เป็นข้อมูลหรือพลังงานไฟฟ้าหรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจากรูปแบบหนึ่งเป็นอีกรูปแบบหนึ่ง โดยที่ทรานสดิวเซอร์อาจรวมทั้งอุปกรณ์ตรวจจับและส่วนปรับแต่งสัญญาณ เช่น ทรานสดิวเซอร์ซึ่งน้ำหนักจะหมายรวมทั้ง 4 ส่วนคือ ส่วนการตรวจจับ ส่วนปรับแต่งสัญญาณ ส่วนประมวลผล และส่วนแสดงผลดังรูปที่ ค-1



รูปที่ ค-1 ระบบการวัด (ซึ่ง) น้ำหนัก

เซนเซอร์ คือตัวอุปกรณ์ตรวจจับตัวแรกในระบบการวัด ซึ่งใช้ตรวจจับหรือรับรู้การเปลี่ยนแปลงปริมาณทางกายภาพของตัวแปรต่าง ๆ เช่น ความร้อน แสง สี เสียง ระยะทาง การเคลื่อนที่ ความดัน การไหล เป็นต้น แล้วเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสัญญาณหรือข้อมูลที่สอดคล้องและเหมาะสมกับส่วนของการกำหนดเงื่อนไข ทางสัญญาณ ถ้าใช้เซนเซอร์วัดแบบสัมผัสกับตัวแปรโดยตรงเรียก ตัวตรวจจับแบบปฐม (Primary Sensors) หรือตัวตรวจจับขั้นต้น หากมีการตรวจจับโดยผ่านส่วนอื่นก่อน เช่น สเตรนเกจตรวจจับแรงกดที่ต้องรับแรงถ่ายถอดจากแท่งโลหะที่รับแรงโดยตรงอีกทอดโดยใช้สเตรนเกจแปะติดกับแท่งโลหะนั้น เพื่อวัดแรงนั้น เราจะเรียกการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในตัวเซนเซอร์เองที่สามารถตรวจวัดได้ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า เช่น แรงดัน กระแส ความต้านทาน ความจุ และความเหนี่ยวนำ เป็นต้น

เมื่อค่าตัวแปรทางกายภาพเปลี่ยนแปลงแล้วพารามิเตอร์ของตัวเซนเซอร์เหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงตาม เมื่อเราทราบค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตาม อาจวัดได้โดยใช้มิเตอร์ หรือวงจรบริดจ์ต่าง ๆ ซึ่งเป็นการวัดตัวแปรทางอ้อมด้วยวิธีทางไฟฟ้าโดยเราจะทำการเทียบหรือ ปรับแต่งปริมาณทางไฟฟ้านี้แทนค่าตัวแปรที่ทำการวัดอีกทอด เราจึงอาจเรียกว่าเป็นการวัดโดยวิธีอ้อมได้ กระบวนการนี้เรียกว่า การตรวจจักษ์ (Sensing) กรณีนี้คำว่าทรานสดิวเซอร์จะถูกเรียกว่า เซนเซอร์จะเห็นว่าทรานสดิวเซอร์และเซนเซอร์แท้จริง คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เดียวกันต่างตรงที่เราจะกล่าวถึง หลักการทำงานหรือกล่าวถึงลักษณะการใช้งาน ปัจจุบันทรานสดิวเซอร์และเซนเซอร์เป็นคำกลาง ๆ ที่ใช้ร่วมกันโดยทรานสดิวเซอร์อาจจะรวมทั้งตัวเซนเซอร์และวงจรการปรับแต่งสัญญาณต่าง ๆ เข้าเป็นหน่วยเดียวกัน แล้วนำไปใช้ได้ทันที เช่น ทรานสดิวเซอร์ความดัน (Pressure Transducer) เมื่อมีความดันเข้ามาจะทำให้เป็นแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสที่ด้านทางออก (Output) ที่แปรเป็นสัดส่วนกับความดันที่ต้องการวัด เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์วัดระดับโดยหลักการของความดัน นำมาวัดระดับของของเหลวสำหรับการควบคุม

ค.2 อุปกรณ์วัดระดับแบบใช้หลักการของความดัน

ในการควบคุมกระบวนการส่วนใหญ่ ระบบการวัดจะต้องมีความเที่ยงตรง หรือการบอกระดับในถังที่เป็นเชิงเส้น เราพบว่าความดันที่ก้นถังจะเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นเชิงเส้นกับระดับของเหลวในถัง ที่เรียกว่า “เฮด” (pressure head or static head) : ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวมีค่าเป็น

$$P = \rho gh \quad \text{ค.1}$$

เมื่อ P = ความดันสถิต (head) , N/m^2

ρ = ความหนาแน่นของของเหลว, kg/m^3

h = ระดับของของเหลว, m

ดังนั้นเราจึงสามารถวัดระดับของของเหลวในถังได้โดยการวัดความดันที่ก้นถัง

ข้อควรพิจารณาในการวัดระดับแบบดังกล่าวคือ

- (1) ของเหลวจะต้องมีคุณสมบัติเดียวกันตลอด (uniform) นั่นคือความหนาแน่นต้องคงที่
- (2) หากไม่สามารถติดตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ก้นถังได้ จะต้องใช้วงจรปรับสภาพสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อทำการบวกหรือลบค่าออฟเซตบางตัวออก เพื่อให้ได้จุดศูนย์ที่ถูกต้อง

(3) หากใช้ความดันด้านล่างของถังเป็นตัวบอกระดับ ในขณะที่ถังเปิดออกสู่บรรยากาศก็สามารถใช้สมการเฮดพื้นฐานได้ หรือในขณะนี้ทรานสดิวเซอร์ก็จะกลายเป็นเกจวัดความดัน (เทียบกับความดันบรรยากาศ) แต่หากถังดังกล่าวถูกซีลหมด ความดันด้านล่างก็จะไม่แปรผันตามค่าเฮดนั้นเพียงอย่างเดียว โดยจะแปรไปตามความดันด้านบนด้วย

ดังนั้นหากเป็นถังแบบปิด สมการที่ใช้ก็จะเป็น

$$P_{\text{bottom}} = \rho gh + P_{\text{top}} \quad \text{ค.2}$$

หรือ

$$h = \frac{P_{\text{bottom}} - P_{\text{Top}}}{\rho g}$$

แต่งงานวิจัยนี้เป็นถังแบบเปิดใช้สมการที่ ค.1 จากเครื่องมือวัดระดับของของเหลวจากความสูงของของเหลวแปลงกลายเป็นความดัน ต่อไปจากความดันแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าให้เป็น 4-20 mA หรือ 1-5 V ผ่านเครื่องมือคู่มือข้อต่อไป

ค.3 ทรานสมิตเตอร์แบบวัดความดันดิฟเฟอเรนเชียล

ความดันดิฟเฟอเรนเชียล มีที่ประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม เช่น วัดอัตราการไหล วัดระดับของเหลว วัดความหนืดหรือวัดค่าความหนาแน่นของเหลว ในปัจจุบันอุปกรณ์สำหรับวัดความดันดิฟเฟอเรนเชียลพร้อมทรานสมิตเตอร์ (dP Transmitter) ในส่วนที่เป็นตัววัดค่าความดันดิฟเฟอเรนเชียล อาศัยหลักการหลายอย่าง เช่น Force Balanced Resonant Wire ใช้ไดอะแฟรมเปลี่ยนค่าเป็นอินดักแตนซ์ ในส่วนของทรานสมิตเตอร์ส่วนใหญ่จะเป็นแบบอิเล็กทรอนิกส์ให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นกระแสหรือในรูปของโวลเตจซึ่งมีข้อดีคือ สามารถส่งสัญญาณนี้ไปยังเครื่องบันทึก เครื่องควบคุมหรือขึ้นบอกราคาได้หลายอย่างพร้อมกันในระยะที่ห่างออกไปจากจุดที่วัดได้มาก ดีพีทรานสมิตเตอร์ ในปัจจุบันได้รับการออกแบบที่เหมาะสมและสะดวกต่อการใช้งานมากขึ้น เช่น ทนต่อสภาพแวดล้อม การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความชื้นได้ดี ให้ผลการทำงานที่ดี มีความเที่ยงตรงสูง Dead Band ต่ำ เนิยริที่ดี การเปลี่ยนค่าความดันสถิต (Static Pressure) มีผลน้อยต่อการวัดความดันดิฟเฟอเรนเชียลค่าเดียวกัน เอาต์พุตของทรานสมิตเตอร์จะถูกกำหนดให้อยู่ในมาตรฐานเดียวกันโดยสมาคมผู้ผลิตดังนี้

- เอาต์พุต แบบนิวเมตริก 3 – 15 Psia
- เอาต์พุต แบบกระแส 4 – 20 mA
- เอาต์พุต แบบโวลเตจ 1 – 5 Volt

ค่าเอาต์พุตที่อินพุตเป็น 0% ที่ 3 Psia , 4 mA หรือ 1 โวลต์ เรียกว่าค่า Live Zero ผลดีของ Live Zero ก็คือ เป็นการตรวจสอบการทำงานของทรานสมิตเตอร์ ณ จุดที่อินพุต

0% ค่าเอาต์พุตจะต้องมีค่าเท่ากับ Live Zero นี้ถ้าไม่ตรงก็แสดงว่าการทำงานของทรานสมิตเตอร์ ผิดพลาด และผลดีอีกอย่างก็คือสามารถใช้ดีพีทรานสมิตเตอร์ของบริษัทใดก็ได้ที่มี ΔP ย่านเดียวกัน โดยไม่ต้องเปลี่ยนเครื่องบันทึกค่าเครื่องควบคุมหรือตัวขับเคลื่อนค่าในระบบ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

วาล์วควบคุม

(Control Valve)

ง.1 ส่วนประกอบวาล์วควบคุม

วาล์วควบคุมมีส่วนประกอบหลายส่วนและมีชื่อเรียกเฉพาะส่วน ดังนั้นในลำดับแรกจะมาทำความรู้จักชิ้นส่วนหลักๆและหน้าที่การทำงาน ซึ่งส่วนประกอบที่สำคัญของวาล์วควบคุมจะประกอบด้วยส่วนหลักๆ 3 ส่วนดังนี้

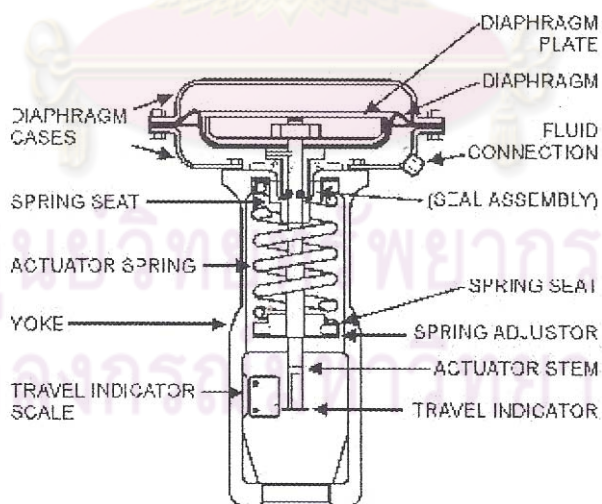
ง.1.1 Valve Actuator

ง.1.2 Valve body

ง.1.3 Valve positioner

ง 1.1 Valve Actuator

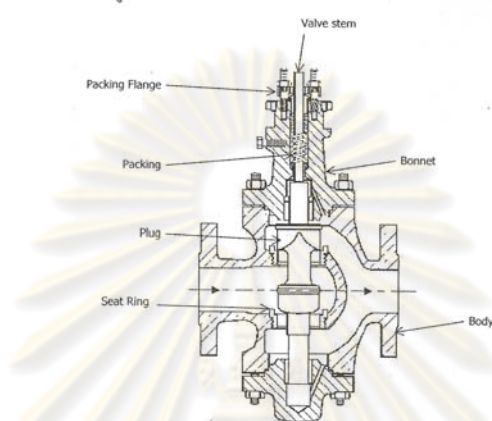
จะเป็นส่วนที่ใช้ในการขับเคลื่อนก้านวาล์ว ให้เคลื่อนที่ตามสัญญาณการควบคุม เพื่อไปใช้ในการปิดหรือเปิดลิ้นวาล์ว การเคลื่อนที่จะเกิดขึ้นจากแรงกดจากความดันของสัญญาณลมที่แผ่นไดอะแฟรม (Diaphragm) ในตัว Actuator แสดงส่วนประกอบได้ดังรูปที่ ง-1



รูปที่ ง-1 Valve Actuator

ง.1.2 Valve body

เป็นส่วนที่ใช้ในการขับเคลื่อนก้านวาล์ว ให้เคลื่อนที่ตามสัญญาณการควบคุมเพื่อไปใช้ในการปิดหรือเปิดลิ้นวาล์ว การเคลื่อนที่จะเกิดขึ้นจากแรงกดจากความดันของสัญญาณลมที่แผ่นไดอะแฟรม (Diaphragm) ในตัว Actuator แสดงส่วนประกอบได้ดังรูปที่ ง-2



รูปที่ ง-2 Valve Body

ง 1.3 Valve Positioner

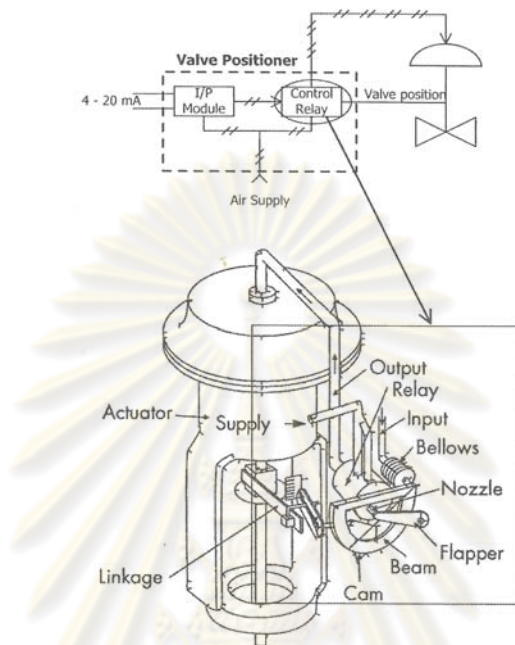
เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเพิ่มหรือลดความดันของสัญญาณลมที่ต่อไปยังวาล์ว Actuator เพื่อทำการขับเคลื่อนก้านวาล์วตามสัญญาณการควบคุม ส่วนประกอบของ Valve Positioner ได้ดังรูปที่ ง-3

รายละเอียดของส่วนประกอบต่างๆที่สำคัญของวาล์วควบคุม จะมีดังนี้

Bonnet	ฝาครอบตัววาล์วเป็นส่วนที่ใช้ประกอบก้านวาล์ว
Diaphragm	เป็นส่วนที่ใช้รับแรงจากความดันอากาศ (Instrument air) เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนก้านวาล์ว (Stem)
Packing	เป็นซีลรอบๆก้านวาล์วเพื่อป้องกันการรั่วไหล
Plug	ลิ้นวาล์วจะเป็นส่วนปิดเปิดเพื่อควบคุมการไหลผ่านตัววาล์ว
Seat ring	บ่าวาล์วจะเป็นส่วนปิดเปิดร่วมกับลิ้นวาล์วเพื่อใช้ในการควบคุมการไหล
Spring	เป็นส่วนที่ใช้ดัน Diaphragm ให้อยู่ในตำแหน่งเดิม เมื่อไม่มีแรงกดจากความดันอากาศ
Stem	ก้านวาล์วที่เชื่อมต่อระหว่าง Diaphragm กับลิ้นวาล์ว (Plug)
Travel indicator	สเกลแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของก้านวาล์ว

Valve body ตัววาล์วจะเป็นส่วนหลักของวาล์วควบคุมที่ต่ออยู่กับท่อ

Yoke เป็นส่วนโครงสร้างที่ใช้ยึดส่วนประกอบของ Diaphragm และอุปกรณ์
เพิ่มเติมต่างๆ



รูปที่ ง-3 Valve Positioner

ง.2 ชนิดวาล์วควบคุม (Valve Type)

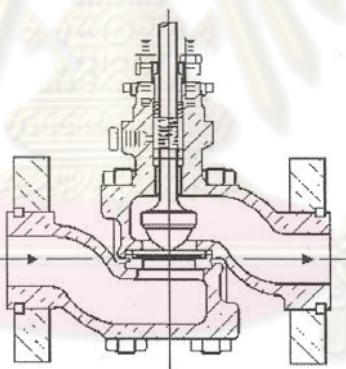
ในการแสดงรายละเอียดวาล์วควบคุมจะแสดงเฉพาะชนิด Globe ที่ใช้ในงานวิจัย

ง 2.1 Globe Valve

Globe Valve จะเป็นชื่อรูปร่างของตัววาล์ว ซึ่งมีลักษณะการควบคุมการไหลผ่านตัววาล์วโดยการปิดเปิดลิ้นวาล์วที่เป็นผลมาจากตำแหน่งของก้านวาล์วที่เคลื่อนที่เป็นเชิงเส้น การเคลื่อนที่เป็นเชิงเส้นในแนวขึ้นลงเกิดจากแรงขับจาก Actuator โดยGlobe Valve ยังสามารถแบ่งแยกตามลักษณะการประคอง (Guide) การเคลื่อนที่ของลิ้นวาล์ว (Plug) กับก้านวาล์ว (Stem) ได้เป็น2แบบคือPost-Guideและ Cage-Guide ในงานวิจัยนี้กล่าวถึง Post-Guide

- Post-Guide

วาล์วในรูปแบบนี้จะใช้การประคองการเคลื่อนขึ้นลงของลิ้นวาล์วที่ก้านวาล์ว โดยส่วนการประคองจะถูกจัดเตรียมอยู่บนฝาครอบวาล์ว (Bonnet) ด้านบน (Top-Guide) หรือทั้งด้านบนและด้านล่าง (Top and Bottom Guide) ส่วนประคองติดอยู่บนฝาครอบวาล์วด้วยบุชชิ่ง (Bushing) ปกติแล้ววาล์วประเภทนี้จะมีป่าวาล์ว (Seat) และช่องผ่านของไหล เดี่ยว (Single port) ส่วนวาล์วที่มีป่าวาล์วคู่ (Double port) จะเป็นแบบที่มีส่วนประคองทั้งด้านบนและด้านล่าง วาล์วที่มีป่าวาล์วเดี่ยวสามารถถูกใช้งานเป็นแบบ Tight Shutoff ได้ แต่เนื่องจากวาล์วที่มีป่าวาล์วเดี่ยวจะเป็นแบบไม่สมดุล (Unbalance) ดังนั้นจึงต้องการแรงขับจาก Actuator มากเพื่อให้วาล์วทำงานในรูปแบบ Tight Shutoff ได้ เนื่องจากไม่สามารถทำการปิดลิ้นวาล์วทั้งคู่ให้พร้อมกันในทันทีทันใดได้ วาล์วที่มีป่าวาล์วคู่สามารถทำให้แรงที่กระทำต่อลิ้นวาล์วมีความสมดุลได้ โดยการแบ่งแรงที่กระทำบนลิ้นวาล์วทั้งสองในทิศทางตรงกันข้ามซึ่งจะเป็นผลทำให้ใช้แรงขับจาก Actuator น้อยกว่าแบบวาล์วที่มีป่าวาล์วเดี่ยว ผลที่ตามมาทำให้ Actuator มีขนาดเล็กลงในขนาดตัววาล์วที่เท่ากัน ลักษณะของวาล์วแบบ Post-Guide แสดงในรูปที่ ง-4



รูปที่ ง-4 ลักษณะ Globe Valve แบบ Post-Guide

ง.3 วิธีการหาสัมประสิทธิ์การไหลและลักษณะคุณลักษณะของวาล์ว (Sizing Methods)

วิธีการหาขนาดตามมาตรฐาน ISA-75.01 เป็นวิธีการที่มีใช้งานกันอย่างแพร่หลายบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ซึ่งจะมีการจัดเตรียมข้อมูลและวิธีการใช้งานต่างๆ สำหรับผู้ใช้งาน สุดท้ายแล้วการเลือกใช้วาล์วก็จะขึ้นอยู่กับผู้ผลิต การหาขนาดวาล์วจะใช้การคำนวณหาค่า C_v หรือค่าสัมประสิทธิ์อัตราการไหลที่ผ่านวาล์ว สำหรับการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การไหลเบื้องต้นสามารถแบ่งออกตามสถานะของไหลได้ดังนี้

การประมาณหาค่า C_v สำหรับการใช้งานกับของเหลวสามารถแสดงได้ดังตารางที่ ง-1 สำหรับปริมาณการไหล ในการใช้งานจริงต้องใช้ในการคำนวณจากผู้ผลิตวาล์วที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ จะคำนวณค่า C_v สำหรับการใช้งานของของเหลว

ตารางที่ ง-1 การหาค่า C_v สำหรับการใช้งานกับของเหลว

Sub critical Flow	Critical Flow Cavitation or Flashing
$\Delta P < F_L^2 (\Delta P_s)$	$\Delta P > F_L^2 (\Delta P_s)$
Volumetric flow $C_v = 1.16q \sqrt{\frac{G_f}{\Delta P}}$	Volumetric flow $C_v = \frac{1.16q}{F_L} \sqrt{\frac{G_f}{\Delta P_s}}$
$\Delta P_s = P_1 - (0.96 - 0.28 \sqrt{\frac{P_v}{P_c}}) P_v$	
For Simplicity, if $P_v < 0.5P_1$, $\Delta P_s = P_1 - P_v$	
<p>เมื่อ C_v = valve flow coefficient F_L = Critical flow factor G_f = Specific gravity at flow temperature P_1 = Upstream pressure ,BarA P_2 = Downstream pressure , BarA P_c = Critical Pressure P_v =Vapor pressure ΔP = Pressure drop $P_1 - P_2$, Bar q =liquid flow rate m^3/hr</p>	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ง.4 ย่านการควบคุมของวาล์ว (Inherent Rangeability)

ย่านการควบคุมของตัววาล์วเป็นอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การไหลสูงสุดกับการไหลต่ำสุด และจะเป็นค่าที่ใช้แสดงการผลิตวาล์วที่ดียังไงจึงสามารถควบคุมสัมประสิทธิ์ของช่องว่างที่เปลี่ยนแปลงตามระยะการเคลื่อนที่ของก้านวาล์ว ซึ่งค่าอัตราส่วนนี้จะเป็นเครื่องมือที่เป็นประโยชน์อย่างมากในการเริ่มต้นเลือกวาล์วตารางที่ ง-2 ได้แสดงย่านการควบคุมและตัวแปรคืนสภาพความดันของวาล์วชนิดต่างๆ

ตารางที่ ง-2 Valve characteristics, Rangeability and Pressure recovery factors

Valve type	Inherent characteristics	Rangeability	Pressure Recovery Factors(F1)
Globe	= %,Lin	20:1to50:1	0.8to0.9
Globe With cavitation trim	Lin	20:1	0.92to0.999
Angle with Venturi	= %,Lin	20:1to50:1	0.5
Ball standard bore	Lin	20:1	0.55to0.6
Segmental ball	Lin	300:1	0.55to0.6
Eccentric rotary plug	Lin	100:1	0.55to0.6
Ball characterized	= %,Lin	100:1to300:1	0.57
Butterfly60degree Open	= %,Lin	20:1	0.3to0.7
Butterfly90degree Open	Lin	20:1	0.55

ง.5 คุณลักษณะการไหล (Flow Characteristic)

คุณลักษณะการไหลเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและการเคลื่อนที่ของวาล์วจากตำแหน่งปิดไปยังตำแหน่งที่กำหนดตามความดันที่ตกคร่อมวาล์วโดยมีอิทธิพลมาจากการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการผลิต

สำหรับผู้ผลิตวาล์วจะกำหนดคุณลักษณะการไหลของวาล์วโดยวัดอัตราการไหลที่ผ่านวาล์วโดยมีการปรับเปลี่ยนการเปิดวาล์ว ในขณะที่ควบคุมความดันตกคร่อมวาล์วให้คงที่

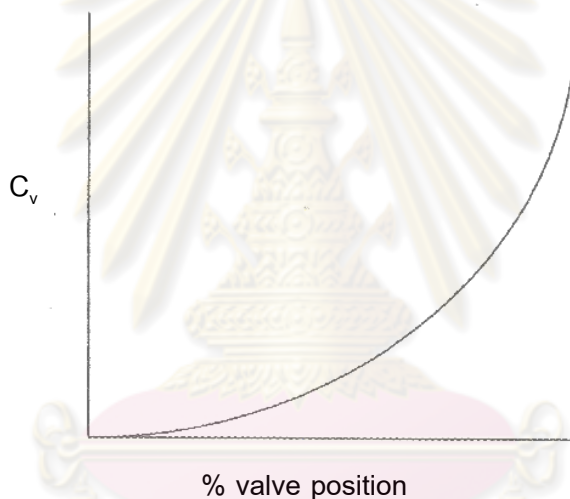
โดยทั่วไปแล้วความดันตกคร่อมวาล์วจะเปลี่ยนแปลงตามการเปิดของวาล์วที่เปลี่ยนไป ด้วยเหตุผลนี้การแสดงผลพฤติกรรมวาล์วทางด้านไดนามิกส์จึงเป็นการแสดงคุณลักษณะ

การไหลในการติดตั้งจริง ในการใช้งานแล้วอัตราการไหลในระบบจะมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงการเปิดของวาล์วและความดันตกคร่อมระบบ อย่างไรก็ตามการรู้คุณลักษณะการไหลเป็นสิ่งจำเป็นในการหาขนาดและการใช้งานที่เหมาะสม

คุณลักษณะการไหลของวาล์วจะมีอยู่ 3 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้ Equal Percentage, Linear และ Quick opening

ง.5.1 Equal Percentage

ถ้าสันนิษฐานว่าความดันตกคร่อมวาล์วมีค่าคงที่ วาล์วที่มีลักษณะแบบนี้ เมื่อวาล์วเปิดจะทำให้อัตราการไหลเพิ่มขึ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้น เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้นจากการเปิดวาล์วเป็นสาเหตุให้อัตราการไหลเดิมที่ผ่านวาล์วเพิ่มขึ้นเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับการเปิดวาล์ว ดังแสดงอัตราการไหลเทียบกับเปอร์เซ็นต์การเปิดในรูปที่ ง-5



รูปที่ ง-5 กราฟคุณลักษณะ Equal Percentage

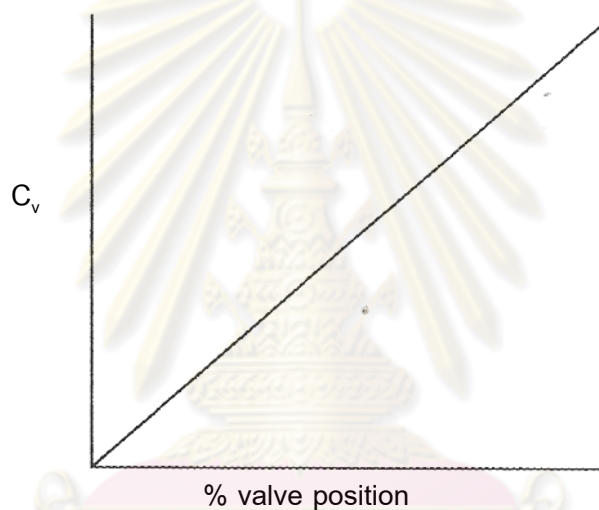
วาล์วแบบ Equal Percentage เป็นวาล์วที่มีอัตราการขยายตามการเปิดและจะถูกแนะนำให้ใช้ สำหรับกระบวนการที่มีอัตราการขยายลดลง เมื่อการไหลของวาล์วเพิ่มขึ้น ถ้าความดันที่ตกคร่อมระหว่างวาล์วมีค่าลดลง วาล์ว Equal Percentage จะแสดงคุณลักษณะการเพิ่มเป็นเชิงเส้น ด้วยเหตุนี้ วาล์วแบบ Equal Percentage เป็นวาล์วที่ถูกแนะนำให้ใช้สำหรับกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงความดันตกคร่อมตัววาล์ว หรือถ้ามีความสัมพันธ์เล็กน้อยกับความดันตกคร่อมของระบบอยู่บนวาล์ว (น้อยกว่า 30 เปอร์เซ็นต์) ตัวอย่างกระบวนการแบบนี้ จะเป็นการควบคุมความดันและการควบคุมอัตราการไหลที่ไม่เป็นเชิงเส้น

หลักการทั่วไปสำหรับการเลือกใช้วาล์วควบคุมแบบ Equal Percentage เป็นดังนี้

- a) ภาระบวณการที่คาดว่าความดันแตกต่างกันระหว่างวาล์วมีการเปลี่ยนแปลงมาก (Large change in pressure drop)
- b) ภาระบวณการที่กำหนดให้มีค่าความดันแตกต่างกันระหว่างวาล์วน้อย (Small percentage of the total pressure drop)
- c) ใช้ในฟังก์ชันควบคุมความดันและอุณหภูมิ (Pressure and Temperature control loops)

ง 5.2 Linear

มีอัตราการไหลผ่านวาล์วเป็นเชิงเส้นกับการเปิดของวาล์ว ดังแสดงอัตราการไหลเทียบกับเปอร์เซ็นต์การเปิดในรูปที่ ง-6



รูปที่ ง-6 กราฟคุณลักษณะ Linear

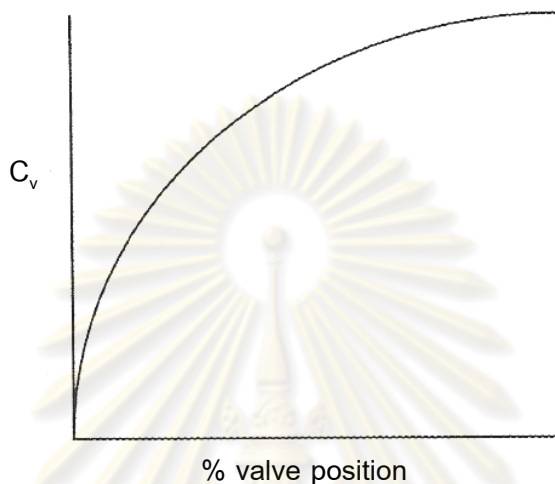
วาล์วที่มีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้นจะถูกใช้งานกับภาระบวณการที่มีค่าความตกดันคร่อมวาล์วมีค่าคงที่ตลอดการเปิดของวาล์ว ตัวอย่างการใช้งานเป็นการควบคุมระดับ, การควบคุมการไหลที่เป็นเชิงเส้น Surge protection ของคอมเพรสเซอร์, การป้องกันการไหลต่ำสุดของปั๊ม, ระเบิดความดัน, การควบคุมการไหลตามแรงโน้มถ่วง, การควบคุมแบบ Split range

หลักการทั่วไปสำหรับการเลือกใช้วาล์วควบคุมแบบ Linear เป็นดังนี้

- a) ใช้ในฟังก์ชันการควบคุมระดับของเหลวหรืออัตราการไหล (Liquid level or flow loops)
- b) ภาระบวณการที่คาดว่าความดันแตกต่างกันระหว่างวาล์วมีค่าคงที่ (Pressure drop across the valve constant)

ง 5.3 Quick Opening

วาล์วคุณลักษณะแบบนี้จะมีการเพิ่มอัตราการไหลอย่างรวดเร็วเมื่อวาล์วเปิด อัตราการไหลเริ่มต้นจะเป็นเชิงเส้น เมื่อวาล์วเปิดจนกระทั่ง 50-70 เปอร์เซ็นต์ อัตราการไหลจะคงที่เมื่อพื้นที่ของลิ้นวาล์วเท่ากับช่องทางออก วาล์วแบบนี้จะถูกใช้งานกับการปิดเปิดที่เกี่ยวข้องกับความดันดังแสดงอัตราการไหลเทียบกับเปอร์เซ็นต์การเปิดในรูปที่ ง-7



รูปที่ ง-7 กราฟคุณลักษณะ Quick Opening

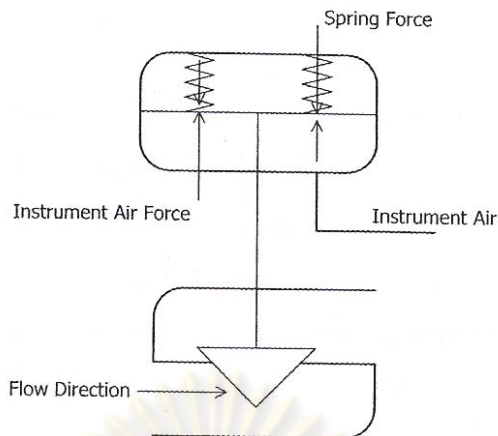
หลักการทั่วไปสำหรับการเลือกใช้วาล์วควบคุมแบบ Quick Opening เป็นดังนี้

- a) ใช้ในฟังก์ชันการควบคุมที่ปิดเปิดบ่อย (Frequent on-off service)
- b) กระบวนการที่ต้องการอัตราการไหลสูง เช่น Safety system or cooling water

water

ข.6 Actuator แบบ Air-to-open กับลิ้นวาล์วแบบ Flow-to-open

สำหรับวาล์วแบบนี้จะมีการทำงานของ Actuator แบบ Air-to-open กับลิ้นวาล์วแบบ Flow-to-open แรงขับที่มาจาก Actuator ที่เกิดจากความดันอากาศกับแรงจากลิ้นวาล์วเป็นแรงบวกกันและจะต้านกับแรงสปริงจาก Actuator ในห้องปฏิบัติการวาล์วแบบนี้ต้องการทำงานเป็นแบบ Fails Close ต้องการความดันจาก Positioner มากกว่า 3 psi เพื่อให้ลิ้นวาล์วเคลื่อนที่ออกจากบ่าวาล์วในห้องปฏิบัติการ แสดงไดอะแกรมการทำงานของวาล์วได้ดังรูปที่ ง-8



รูปที่ ง- 8 แสดงไดอะแกรมการทำงานของวาล์ว

ง.7 การเลือกวาล์วควบคุม (Control Valve Selection)

การเลือกวาล์วควบคุมให้ตรงกับความต้องการสามารถทำให้ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงรักษามีค่าลดลงได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้งานกับบริเวณที่มีเสียหายรุนแรง (Severe application) ซึ่งจำนวนการใช้งานในลักษณะแบบนี้จะมีประมาณ 10% ของการเลือกวาล์วควบคุมที่ต้องการทั้งหมด ในส่วนนี้จะเป็นการแสดงข้อมูลที่ต้องการเพื่อให้แน่ใจว่าวาล์วควบคุมที่ต้องการเหมาะสมกับการใช้งาน

วาล์วควบคุมจะถูกคาดหวังว่าสามารถควบคุมตัวแปรต่างๆได้อย่างแม่นยำ เช่น ความดัน (Pressure), อัตราการไหล (Flow), อุณหภูมิ (Temperature) และระดับ (Level) เป็นต้น บ่อยครั้งในการเลือกใช้วาล์วควบคุมไม่ได้พิจารณาในความต้องการทั้งหมดให้ครบถ้วน เช่น การใช้งานกับความดันแตกต่างบนวาล์วสูงๆ การใช้งานกับอุณหภูมิสูงๆหรือการใช้งานกับของไหลที่ปะปนไปด้วย ทราาย ดินโคลน สิ่งสกปรก ตะกอนต่างๆ ดังนั้นในการเลือกใช้ชนิดและขนาดของวาล์วควบคุมให้เหมาะสม ต้องมีการพิจารณาสิ่งต่างๆ ดังนี้

- ข้อมูลกระบวนการ (Process information)
- วิธีการเลือกและหาขนาด (Selection and sizing criteria)
- วัสดุในการทำวาล์ว
- การออกแบบ Trim

ง 7.1 ข้อมูลกระบวนการ (Process information)

ข้อมูลกระบวนการที่สมบูรณ์จะต้องรวมถึง การทำงานของกระบวนการในสภาวะปกติรวมถึงการเริ่มเดินกระบวนการ และในสภาวะผิดปกติ ในสภาวะการเริ่มเดิน

กระบวนการอาจต้องการเริ่มต้นอย่างช้าๆ เพื่อป้องกันการขยายตัวของโลหะและการเสียหายทางกลของชิ้นส่วนที่เป็นโลหะ

คุณลักษณะของการไหลและตัวแปรต่างๆ ที่ไหลผ่านวาล์วมีดังนี้

ชนิดและคุณลักษณะของไหล (Type of fluid and physical properties)

สถานะของไหลเป็น ก๊าซ, ของเหลว, การผสมของแข็ง, หลายสถานะ (Gas, Liquid, Slurry, Multiphase etc)

ความหนาแน่น (Density), ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity), น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight), น้ำหนักจำเพาะ (Specific weight)

ความดันไอ (Vapor Pressure)

ความหนืด (Viscosity)

ความดันและอุณหภูมิวิกฤติ (Critical pressure and temperature)

ระดับการของ Superheat หรือ Flashing

คุณสมบัติกัดกร่อนเนื่องจากส่วนผสมของสารกำมะถัน (Corrosive properties)

ปริมาณส่วนผสมของแข็ง (Sand, Silica, catalyst, etc)

ตัวแปรอื่นที่ทราบ (Other known properties)

ความดันต่ำสุด, ปกติ และสูงสุดที่ด้านเข้าและออกจากวาล์ว (Minimum, Normal and Maximum inlet and outlet pressure at the valve)

อุณหภูมิทำงานต่ำสุด, ปกติ และสูงสุดที่วาล์ว (Minimum, Normal and Maximum operation temperature at the valve)

อัตราการไหลต่ำสุด, ปกติ และสูงสุด ในการทำงานและการเริ่มเดินกระบวนการ (Minimum, Normal and Maximum flow rate for each operation state including startup and upset situations)

ความดันแตกต่างบนตัววาล์ว ต่ำสุด, ปกติ และสูงสุดที่ด้านเข้าและออกจากวาล์ว (Minimum, Normal and Maximum operating pressure drop at the valve)

ความดันแตกต่างบนตัววาล์วเมื่อวาล์วปิดสนิท (pressure drop at shutoff)

ระดับรั่วไหลที่ต้องการ (Shutoff Leakage requirements)

ขั้นตอนในการเริ่มต้นใช้งาน (Startup conditions/procedures)

ความดันและอุณหภูมิด้านเข้าในสภาวะผิดปกติ (Upset conditions inlet pressure and temperature)

ขนาดท่อและความหนาที่ด้านเข้าและออก (inlet and Outlet pipe size and schedule)

ค่ายอมรับได้ของระดับเสียงดังที่จุดอ้างอิง (Permissive Noise level at reference point)

สภาพแวดล้อมบริเวณที่ติดตั้ง (Environmental conditions)

ชนิดการกัดกร่อนที่คาดว่าจะเกิดขึ้น (Cavitation, erosive-corrosive, or high velocity)

ง 7.2 วิธีการเลือกและหาขนาด (Selection and sizing criteria)

ผู้ผลิตและจำหน่ายวาล์วส่วนมากยังคงดำเนินการพัฒนาออกแบบวาล์วและผลิตด้วยเทคโนโลยีใหม่ๆอย่างต่อเนื่อง เพื่อปรับปรุงการควบคุม, ระดับเสียงดัง, ทำให้เกิดการ Cavitation และ Flashing น้อยที่สุด, ยืดอายุการใช้งานและลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งวาล์ว เพื่อให้ได้ใช้มาซึ่งคุณสมบัติต่างๆเหล่านี้ ผู้ผลิตวาล์วต้องออกแบบและผลิตอยู่ในพื้นฐานของกระบวนการที่จะนำมาใช้ สำหรับการเลือกและหาขนาดวาล์วโดยผู้ผลิตจะมีข้อมูลต่างๆที่ต้องพิจารณาดังต่อไปนี้

Valve body (angle, double-port, butterfly etc)

Body material (316SS, Inconel, Titanium etc)

End connection and rating

Valve plug and Disk style (Quick opening, Liner etc)

Valve disk and plug action (Air to open or close)

Port size (full or restricted)

Valve trim material

Action on signal fall (open, close or fail-in-place)

Flow action (flow tends to open or close)

Input signal type (pneumatic, electrical etc)

Actuator type and size

Environmental requirements

Packing material (Teflon, Graphite, etc)

Area classification

Accessories required (limit switches, hand wheel)

ภาคผนวก จ

ข้อมูลของหาค่าพารามิเตอร์ของการทดลองระบบสี่ถัง

ตารางที่ จ-1 ข้อมูลดิบของอัตราการไหลที่ไหลผ่าน CV1

ความสูงของน้ำ ถังที่ 1 (m)	ปริมาตร (L)	เวลา (min)	เวลา (s)
0.1	5L	1.167	70
	5L	1.250	75
	5L	1.233	74
เฉลี่ย	5L	1.217	73
0.2	5L	0.933	56
	5L	0.967	58
	5L	0.950	57
เฉลี่ย	5L	0.950	57
0.3	5L	0.700	42
	5L	0.817	49
	5L	0.783	47
เฉลี่ย	5L	0.767	46
0.4	5L	0.667	40
	5L	0.700	42
	5L	0.633	38
เฉลี่ย	5L	0.667	40
0.5	5L	0.633	38
	5L	0.583	35
	5L	0.583	35
เฉลี่ย	5L	0.600	36
0.6	5L	0.517	31

ความสูงของน้ำ ถังที่ 1 (m)	ปริมาตร (L)	เวลา (min)	เวลา (s)
	5L	0.517	31
	5L	0.567	34
เฉลี่ย	5L	0.533	32
0.7	5L	0.533	32
	5L	0.500	30
	5L	0.467	28
เฉลี่ย	5L	0.500	30
0.8	5L	0.483	29
	5L	0.467	28
	5L	0.450	27
เฉลี่ย	5L	0.467	28

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ-2 ข้อมูลดิบของอัตราการไหลที่ไหลผ่าน CV3

ความสูงของน้ำ ถังที่ 3 (m)	ปริมาตร (L)	เวลา (min)	เวลา (s)
0.1	5L	1.217	73
	5L	1.167	70
	5L	1.167	70
เฉลี่ย	5L	1.183	71
0.2	5L	1.000	60
	5L	1.017	61
	5L	0.983	59
เฉลี่ย	5L	1.000	60
0.3	5L	0.750	45
	5L	0.683	41
	5L	0.817	49
เฉลี่ย	5L	0.750	45
0.4	5L	0.667	40
	5L	0.700	42
	5L	0.633	38
เฉลี่ย	5L	0.667	40
0.5	5L	0.600	36
	5L	0.567	34
	5L	0.633	38
เฉลี่ย	5L	0.600	36
0.6	5L	0.533	32
	5L	0.550	33
	5L	0.517	31
เฉลี่ย	5L	0.533	32

ความสูงของน้ำ ถังที่ 3 (m)	ปริมาตร (L)	เวลา (min)	เวลา (s)
0.7	5L	0.517	31
	5L	0.550	33
	5L	0.483	29
เฉลี่ย	5L	0.517	31
0.8	5L	0.467	28
	5L	0.450	27
	5L	0.483	29
เฉลี่ย	5L	0.467	28

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ-3 ข้อมูลดิบของอัตราการไหลที่ไหลผ่าน CV2

ความสูงของน้ำ ถังที่ 2 (m)	ปริมาตร (L)	เวลา (min)	เวลา (s)
0.1	5L	0.683	41
	5L	0.700	42
	5L	0.667	40
เฉลี่ย	5L	0.683	41
0.2	5L	0.483	29
	5L	0.517	31
	5L	0.500	30
เฉลี่ย	5L	0.500	30
0.3	5L	0.367	22
	5L	0.367	22
	5L	0.367	22
เฉลี่ย	5L	0.367	22
0.4	5L	0.333	20
	5L	0.350	21
	5L	0.367	22
เฉลี่ย	5L	0.350	21
0.5	5L	0.317	19
	5L	0.317	19
	5L	0.317	19
เฉลี่ย	5L	0.317	19
0.6	5L	0.317	19
	5L	0.300	18
	5L	0.333	20
เฉลี่ย	5L	0.317	19

ความสูงของน้ำ ถังที่ 2 (m)	ปริมาตร (L)	เวลา (min)	เวลา (s)
0.7	5L	0.250	15
	5L	0.250	15
	5L	0.300	18
เฉลี่ย	5L	0.267	16
0.8	5L	0.233	14
	5L	0.267	16
	5L	0.250	15
เฉลี่ย	5L	0.250	15

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑-4 ข้อมูลดิบของอัตราการไหลที่ไหลผ่าน CV4

ความสูงของน้ำ ถังที่ 4 (m)	ปริมาตร (L)	เวลา (min)	เวลา (s)
0.1	5L	0.683	41
	5L	0.717	43
	5L	0.650	39
เฉลี่ย	5L	0.683	41
0.2	5L	0.533	32
	5L	0.467	28
	5L	0.450	27
เฉลี่ย	5L	0.483	29
0.3	5L	0.400	24
	5L	0.417	25
	5L	0.383	23
เฉลี่ย	5L	0.400	24
0.4	5L	0.333	20
	5L	0.333	20
	5L	0.383	23
เฉลี่ย	5L	0.350	21
0.5	5L	0.283	17
	5L	0.283	17
	5L	0.283	17
เฉลี่ย	5L	0.283	17
0.6	5L	0.267	16
	5L	0.283	17
	5L	0.250	15
เฉลี่ย	5L	0.267	16

ความสูงของน้ำ ถังที่ 4 (m)	ปริมาตร (L)	เวลา (min)	เวลา (s)
0.7	5L	0.25	15
	5L	0.25	15
	5L	0.25	15
เฉลี่ย	5L	0.25	15
0.8	5L	0.233	14
	5L	0.267	16
	5L	0.200	12
เฉลี่ย	5L	0.233	14

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑- 5 ข้อมูลดิบของอัตราการไหลที่ไหลผ่าน CVcontrol 1และ CVcontrol 2 หา ΔP

ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของ วาล์วควบคุมตัวที่ 1 และตัวที่ 2 (gpm/psi ^{0.5})	อัตราการไหลที่ไหลผ่าน วาล์วควบคุมตัวที่ 1 (gpm)	อัตราการไหลที่ไหลผ่าน วาล์วควบคุมตัวที่ 2 (gpm)
0	0	0
1.25	9.448584	2.01233
2.5	17.93516	3.349544
3.75	25.58001	4.509393

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ
ข้อมูลผลการจำลองในกรณีแบบจำลองมีความไม่แน่นอน

ตารางที่ จ-1 ข้อมูลค่า IAE ของผลการจำลองในกรณีแบบจำลองมีความไม่แน่นอน $\pm 10\%$ ของ
ถึงที่ 2

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
1	.3774	.6373	.6953
2	.4954	.7268	.6713
3	.2211	.4916	.7320
4	.2194	.5032	.7050
5	.3669	.6184	.7186
6	.5665	.7907	.7235
7	.6561	.7776	.7151
8	.3732	.6531	.7013
9	.3538	.6055	.6970
10	.3216	.6011	.6853
11	.5095	.7071	.6951
12	.2474	.5471	.6740
13	.3116	.5754	.7135
14	.8283	.9297	.6597
15	.4526	.6990	.7295
16	.2425	.5409	.6751
17	.3546	.6437	.6953
18	.2421	.5330	.6838
19	.5809	.7978	.7191
20	.5367	.7163	.7140
21	.4454	.6943	.6653
22	.8848	.9783	.6532
23	.2878	.5663	.7040

	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
24	1.0045	1.0357	.6735
25	.3923	.6643	.6598
26	.3672	.6593	.6585
27	.2486	.5137	.7241
28	.2366	.5095	.7284
29	.3149	.5763	.7165
30	.2124	.5203	.6597
31	.5107	.7427	.7229
32	.4348	.6739	.6949
33	.2355	.5451	.6539
34	.4735	.7288	.6858
35	.2228	.5293	.6735
36	.3972	.6313	.7038
37	.2911	.5785	.6739
38	.3653	.6526	.6628
39	.2313	.4990	.7303
40	.4665	.7065	.6691
41	.2144	.5472	.6518
42	.4076	.6725	.6693
43	.2326	.5181	.7068
44	.3700	.6425	.6662
45	.3946	.6557	.7225
46	.3201	.5887	.6927
47	.5093	.7482	.6575
48	.3800	.6527	.7057
49	.2045	.4926	.7062
50	.4370	.6845	.7201
51	.2410	.5102	.7302
52	.6509	.8056	.6745

	ตัวควบคุมแบบ MP-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
53	.2080	.4861	.7128
54	.3612	.6389	.7081
55	.2407	.5321	.6891
56	.2467	.5162	.7271
57	.4746	.7090	.6826
58	.2731	.5351	.7186
59	.2989	.5775	.6814
60	.4015	.6765	.6729
61	.2628	.5281	.7226
62	.3634	.6328	.6955
63	.2325	.5403	.6733
64	.3061	.5832	.6955
65	.2933	.5533	.7274
66	.4102	.6632	.6856
67	.7076	.8360	.6756
68	.3552	.6136	.6872
69	.3610	.6428	.6549
70	.2679	.5636	.6816
71	.4256	.6978	.6578
72	.2038	.4769	.7194
73	.3136	.5729	.7192
74	.4987	.7323	.6648
75	.6034	.8269	.6969
76	.2227	.5083	.7169
77	.5517	.7587	.6561
78	.6333	.7750	.7011
79	.2880	.5910	.6691
80	.8878	.9550	.6709
81	.3069	.6051	.6593

	ตัวควบคุมแบบ MP-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
82	.2714	.5585	.6787
83	.5364	.7480	.6690
84	.3659	.6273	.7010
85	.3214	.5845	.7077
86	.6388	.8265	.6584
87	.2494	.5278	.6944
88	.7664	.8985	.6535
89	.4742	.7298	.6757
90	.5181	.7407	.6789
91	.2910	.5480	.7214
92	.5196	.7478	.6545
93	.4971	.7420	.6926
94	.2141	.5192	.6822
95	.2387	.5181	.6960
96	.5620	.7906	.7106
97	.2455	.5635	.6579
98	.2229	.5245	.6826
99	.2321	.4937	.7318
100	.2020	.5185	.6792

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ-2 ข้อมูลค่า IAE ของผลการจำลองในกรณีแบบจำลองมีความไม่แน่นอน $\pm 10\%$ ของ
ถึงที่ 4

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
1	.4035	.6058	.7782
2	.4794	.6465	.8227
3	.2907	.5161	.7670
4	.2790	.5070	.7783
5	.4525	.6722	.7798
6	.7075	.8318	.7891
7	.6092	.7616	.8025
8	.4651	.6948	.7603
9	.3880	.5913	.7923
10	.3547	.5684	.7958
11	.5118	.6905	.7601
12	.3069	.5486	.7690
13	.3426	.5525	.8103
14	.7105	.8576	.7705
15	.5542	.7287	.8048
16	.3078	.5641	.7452
17	.4506	.6963	.7391
18	.3026	.5410	.7724
19	.7458	.8818	.7398
20	.5210	.6848	.8165
21	.4534	.6434	.7713
22	.7361	.8646	.8182
23	.3323	.5554	.7790
24	.8104	.9461	.8146
25	.4004	.5949	.8111
26	.4424	.6809	.7624

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
27	.3020	.5200	.8002
28	.3016	.5076	.8134
29	.3539	.5647	.8008
30	.2559	.4963	.7870
31	.6348	.8073	.7751
32	.4421	.6263	.8029
33	.2865	.5447	.7583
34	.5767	.7632	.7735
35	.2797	.5203	.7713
36	.4249	.6188	.7832
37	.3617	.6159	.7444
38	.3909	.6032	.7640
39	.2968	.5059	.8072
40	.4743	.6649	.7528
41	.2764	.5477	.7296
42	.4240	.6225	.7719
43	.3118	.5620	.7360
44	.3919	.5965	.7879
45	.4948	.7173	.7653
46	.3901	.6198	.7791
47	.4959	.6710	.7782
48	.4795	.7168	.7459
49	.2724	.5081	.7684
50	.5552	.7868	.7305
51	.3064	.5323	.7675
52	.5946	.7373	.8163
53	.2715	.4954	.7853
54	.4612	.7045	.7394
55	.2917	.5222	.7812

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
56	.3088	.5123	.8226
57	.4707	.6481	.7979
58	.3344	.5436	.8180
59	.3771	.6389	.7271
60	.4990	.7472	.7291
61	.3443	.5871	.7438
62	.4488	.6816	.7619
63	.2982	.5517	.7470
64	.3375	.5528	.8064
65	.3385	.5552	.7930
66	.4303	.6274	.7695
67	.6376	.7842	.7863
68	.3781	.5779	.8204
69	.4412	.7017	.7280
70	.3150	.5499	.7777
71	.4337	.6292	.7715
72	.2654	.4851	.7898
73	.3857	.6028	.7966
74	.4896	.6648	.7832
75	.7706	.8996	.7410
76	.3024	.5407	.7495
77	.5257	.6923	.7840
78	.5873	.7331	.8242
79	.3395	.5796	.7441
80	.7449	.8833	.7955
82	.3465	.5784	.7638
83	.3026	.5223	.8228
84	.5245	.7013	.7563
85	.4460	.6669	.7831

รอกบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
86	.3982	.6281	.7721
87	.5872	.7422	.7804
88	.3088	.5381	.7869
89	.6716	.8197	.7668
90	.5881	.8132	.7289
91	.4982	.6648	.8128
92	.3613	.5816	.7909
93	.4945	.6568	.8209
94	.6168	.8109	.7494
95	.2730	.5167	.7567
96	.2940	.5155	.8015
97	.7009	.8335	.7802
98	.2928	.5394	.7580
99	.2878	.5337	.7564
100	.2968	.5073	.8063

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ-3 ข้อมูลค่า IAE ของผลการจำลองในกรณีแบบจำลองมีความไม่แน่นอน $\pm 20\%$ ของ
ถึงที่ 2

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
1	.5835	.7615	.7022
2	.8875	.9817	.6552
3	.2084	.4523	.7830
4	.2343	.5051	.7224
5	.5600	.7745	.7521
6	.9328	1.1597	.7632
7	1.1882	1.0930	.7443
8	.6288	.8429	.7146
9	.5853	.7214	.7057
10	.4964	.7109	.6823
11	.9125	.9707	.7019
12	.3022	.6070	.6602
13	.4469	.6512	.7407
14	1.5144	1.5144	.6338
15	.7710	.9727	.7770
16	.2841	.5809	.6624
17	.5637	.7959	.7022
18	.2846	.5712	.6792
19	.9536	1.1419	.7534
20	.9328	.9154	.7420
21	.7437	.8885	.6439
22	1.6543	1.5749	.6225
23	.3938	.6269	.7204
24	1.9330	1.7952	.6592
25	.6252	.8296	.6340
26	.6095	.8609	.6317

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
27	.2893	.5216	.7647
28	.2687	.5392	.7745
29	.4641	.6460	.7475
30	.2307	.5485	.6338
31	.8423	1.0529	.7620
32	.7220	.8471	.7016
33	.2741	.5914	.6238
34	.7863	1.0063	.6832
35	.2556	.5704	.6593
36	.6707	.7652	.7200
37	.3799	.6588	.6600
38	.5659	.8021	.6394
39	.2665	.5197	.7790
40	.7983	.9333	.6509
41	.2297	.5983	.6200
42	.6596	.8426	.6512
43	.2637	.5335	.7264
44	.5761	.7791	.6455
45	.6661	.8552	.7610
46	.4308	.6894	.6970
47	.8599	.9873	.6299
48	.6179	.8248	.7239
49	.2101	.4877	.7250
50	.7221	.8941	.7555
51	.2578	.4949	.7787
52	1.2164	1.2350	.6612
53	.2233	.4820	.7394
54	.5670	.7824	.7291
55	.2843	.5704	.6898

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
56	.2832	.5517	.7714
57	.8050	.9183	.6768
58	.3278	.5809	.7521
59	.3952	.6517	.6745
60	.6325	.8627	.6581
61	.3490	.5770	.7611
62	.5601	.7891	.7028
63	.2640	.5809	.6589
64	.4620	.6807	.7027
65	.3865	.5832	.7721
66	.6607	.8172	.6828
67	1.3316	1.3544	.6634
68	.5755	.7382	.6861
69	.5184	.7845	.6254
70	.3750	.6314	.6749
71	.6854	.8899	.6306
72	.1911	.4415	.7540
73	.4275	.6736	.7536
74	.8493	.9603	.6430
75	.9800	1.1858	.7056
76	.2359	.5114	.7484
77	.9671	1.1137	.6275
78	1.1924	1.1308	.7142
79	.4392	.6950	.6509
80	1.6924	1.6363	.6544
82	.4372	.6976	.6331
83	.3630	.6311	.6693
84	.9467	1.0586	.6508
85	.5440	.7765	.7140

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
86	.4467	.6910	.7283
87	1.1241	1.1774	.6315
88	.2932	.5595	.7004
89	1.3939	1.4451	.6229
90	.7542	.9720	.6634
91	.9169	.9964	.6696
92	.3848	.6247	.7586
93	.8955	1.0028	.6248
94	.8084	1.0188	.6967
95	.2275	.5409	.6762
96	.2688	.5383	.7038
97	.9204	1.1451	.7345
98	.2860	.6244	.6306
99	.2444	.5497	.6769
100	.2755	.5137	.7823

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ-4 ข้อมูลค่า IAE ของผลการจำลองในกรณีแบบจำลองมีความไม่แน่นอน $\pm 20\%$ ของ
ถึงที่ 4

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
1	.5552	.7224	.7847
2	.7298	.8384	.8826
3	.2911	.5062	.7622
4	.2922	.5110	.7849
5	.7023	.8492	.7880
6	1.3270	1.2522	.8074
7	.9154	1.0884	.8366
8	.8187	.9530	.7493
9	.5589	.7109	.8143
10	.4851	.6512	.8218
11	.7679	.9314	.7490
12	.3653	.6085	.7661
13	.4462	.6243	.8540
14	1.0389	1.2257	.7692
15	1.0162	.9722	.8415
16	.3567	.6288	.7208
17	.7407	.9399	.7103
18	.3481	.5858	.7730
19	1.4247	1.4871	.7114
20	.7733	.9202	.8682
21	.6515	.8004	.7708
22	1.0855	1.2805	.8720
23	.4205	.6157	.7864
24	1.1762	1.4447	.8638
25	.5560	.6913	.8559
26	.7523	.9016	.7534

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
27	.3345	.5442	.8315
28	.3394	.5239	.8610
29	.4708	.6446	.8328
30	.2559	.4945	.8031
31	1.1570	1.1214	.7783
32	.6390	.7836	.8373
33	.3195	.5948	.7456
34	1.0437	1.0948	.7752
35	.3114	.5535	.7708
36	.6242	.7740	.7951
37	.4696	.7301	.7195
38	.5362	.7084	.7565
39	.3381	.5254	.8470
40	.6905	.8550	.7350
41	.2893	.5943	.6942
42	.6014	.7558	.7719
43	.3603	.6222	.7050
44	.5349	.6923	.8049
45	.8693	.9457	.7589
46	.5246	.7305	.7865
47	.7196	.8539	.7846
48	.8083	.9449	.7222
49	.2843	.5172	.7649
50	.9763	1.0847	.6957
51	.3297	.5504	.7632
52	.9071	1.0278	.8675
53	.2909	.5024	.7995
54	.7461	.9123	.7108
55	.3238	.5476	.7910

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
56	.3486	.5271	.8822
57	.6894	.8275	.8264
58	.3939	.5756	.8715
59	.4987	.7729	.6900
60	.8177	.9912	.6933
61	.4549	.7000	.7185
62	.7049	.8593	.7525
63	.3358	.6049	.7241
64	.4567	.6272	.8453
65	.4179	.6096	.8158
66	.6101	.7701	.7671
67	.9605	1.1141	.8016
68	.5345	.6740	.8772
69	.6418	.8893	.6915
70	.4012	.6049	.7836
71	.6112	.7629	.7711
72	.2554	.4575	.8089
73	.5243	.7082	.8235
74	.7150	.8482	.7951
75	1.4626	1.5180	.7136
76	.3339	.5739	.7288
77	.7552	.8954	.7967
78	.9095	1.0456	.8861
79	.4499	.6711	.7189
80	1.1001	1.3070	.8212
82	.4307	.6466	.7560
83	.3638	.5552	.8827
84	.7728	.9303	.7417
85	.6724	.8182	.7949

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
86	.5557	.7610	.7724
87	.8668	1.0079	.7891
88	.3549	.5741	.8029
89	.9847	1.1487	.7619
90	1.0117	1.1345	.6930
91	.7503	.8785	.8595
92	.4763	.6756	.8112
93	.7246	.8213	.8783
94	1.1002	1.1640	.7285
95	.2837	.5316	.7425
96	.3206	.5257	.8342
97	1.3020	1.2628	.7887
98	.3201	.5720	.7450
99	.3148	.5691	.7418
100	.3458	.5334	.8450

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ-5 ข้อมูลค่า IAE ของผลการจำลองในกรณีแบบจำลองมีความไม่แน่นอน $\pm 30\%$ ของ
ถึงที่ 2

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
1	.7776	.8703	.8304
2	1.3400	1.2969	.7336
3	.1729	.4053	1.0275
4	.2428	.5001	.8757
5	.7591	.9598	.9471
6	1.1760	1.5444	.9753
7	1.7336	1.4940	.9277
8	.8615	1.0488	.8579
9	.8638	.9269	.8380
10	.6854	.8238	.7879
11	1.3766	1.3774	.8296
12	.3726	.6791	.7433
13	.5932	.7236	.9191
14	2.1684	2.0548	.6934
15	1.0309	1.2815	1.0114
16	.3237	.6186	.7475
17	.7395	.9433	.8303
18	.3265	.6126	.7814
19	1.1895	1.4914	.9503
20	1.3421	1.1313	.9221
21	1.0531	1.1827	.7124
22	2.4081	2.1647	.6732
23	.4971	.6768	.8711
24	2.8345	2.5033	.7413
25	.8591	.9915	.6938
26	.8449	1.0524	.6896

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
27	.3257	.5164	.9792
28	.3086	.5834	1.0047
29	.6076	.7031	.9357
30	.2529	.5791	.6934
31	1.0819	1.3858	.9721
32	1.0216	1.0168	.8289
33	.3145	.6373	.6754
34	1.0317	1.2766	.7898
35	.2975	.6235	.7414
36	.9845	.9884	.8702
37	.4685	.7383	.7429
38	.7603	.9434	.7038
39	.3015	.5606	1.0168
40	1.1572	1.2774	.7256
41	.2580	.6482	.6687
42	.9124	1.0194	.7261
43	.2923	.5442	.8850
44	.7748	.9316	.7153
45	.9049	1.0855	.9695
46	.5599	.7947	.8191
47	1.2032	1.2743	.6864
48	.8220	1.0002	.8794
49	.2159	.4827	.8818
50	.9520	1.1149	.9556
51	.2446	.4567	1.0161
52	1.8367	1.7508	.7451
53	.2465	.4880	.9158
54	.7373	.9218	.8915
55	.3392	.6092	.8038

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
56	.3261	.5968	.9966
57	1.1476	1.1245	.7766
58	.3635	.6252	.9471
59	.4839	.7202	.7718
60	.8215	1.0286	.7392
61	.4532	.6448	.9700
62	.7501	.9578	.8315
63	.2940	.6202	.7407
64	.6449	.7879	.8314
65	.4463	.5837	.9985
66	.9087	.9601	.7889
67	2.0033	1.9174	.7494
68	.8249	.8792	.7958
69	.6698	.9198	.6784
70	.4901	.6975	.7727
71	.9364	1.0714	.6876
72	.1901	.4158	.9518
73	.5821	.7939	.9509
74	1.2031	1.2596	.7107
75	1.2134	1.5326	.8376
76	.2376	.5049	.9379
77	1.4002	1.5284	.6822
78	1.8224	1.6200	.8571
79	.6264	.8561	.7254
80	2.4986	2.2864	.7320
82	.5543	.8121	.6922
83	.4869	.7148	.7613
84	1.3875	1.4647	.7253
85	.7142	.9364	.8566

รอกบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
86	.6064	.8112	.8895
87	1.5946	1.5768	.6893
88	.3320	.5914	.8263
89	2.0045	1.9663	.6739
90	.9597	1.1821	.7495
91	1.3538	1.2700	.7619
92	.5067	.7248	.9634
93	1.2848	1.3445	.6773
94	1.0361	1.2786	.8184
95	.2387	.5600	.7752
96	.2896	.5553	.8337
97	1.1612	1.5002	.9041
98	.3236	.6780	.6876
99	.2639	.5735	.7767
100	.3278	.5629	1.0259

ศูนย์วิทยพัทพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑-6 ข้อมูลค่า IAE ของผลการจำลองในกรณีแบบจำลองมีความไม่แน่นอน $\pm 30\%$ ของ
ถึงที่ 4

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
1	.6815	.8427	
2	.9566	1.0678	.8870
3	.2701	.4682	1.1003
4	.3002	.5112	.8431
5	1.0111	1.0296	.8873
6	1.9836	1.7510	.8935
7	1.1327	1.4179	.9328
8	1.2366	1.3573	.9946
9	.7233	.8554	.8190
10	.6123	.7443	.9471
11	.9807	1.1714	.9629
12	.4429	.6754	.8183
13	.5477	.7100	.8507
14	1.2286	1.5620	1.0331
15	1.5410	1.3635	.8565
16	.4051	.6907	1.0053
17	1.0531	1.2843	.7690
18	.3955	.6305	.7511
19	2.1549	2.1035	.8639
20	.9739	1.1899	.7530
21	.8130	.9549	1.0658
22	1.2750	1.6952	.8596
23	.4998	.6769	1.0747
24	1.3246	1.9452	.8903
25	.6928	.7806	1.0554

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
26	1.1359	1.2848	1.0373
27	.3670	.5657	.8266
28	.3821	.5462	.9835
29	.5728	.7313	1.0492
30	.2606	.4940	.9864
31	1.7079	1.5295	.9240
32	.8115	.9631	.8742
33	.3570	.6455	.9961
34	1.5486	1.5272	.8120
35	.3546	.5975	.8682
36	.8082	.9535	.8596
37	.5837	.8391	.9077
38	.6601	.8113	.7668
39	.3811	.5571	.8323
40	.8665	1.0328	1.0174
41	.3004	.6402	.7932
42	.7525	.8935	.7244
43	.4046	.6768	.8616
44	.6485	.7824	.7422
45	1.3000	1.2885	.9277
46	.6913	.8299	.8369
47	.8993	1.0330	.8905
48	1.1630	1.2814	.8867
49	.2961	.5274	.7714
50	1.4260	1.4683	.8483
51	.3299	.5439	.7268
52	1.1329	1.3392	.8451
53	.3178	.5180	1.0642
54	1.0400	1.2126	.9166

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
55	.3685	.5757	.7519
56	.3912	.5419	.8994
57	.8748	1.0266	1.0994
58	.4358	.5911	.9727
59	.6202	.8988	1.0735
60	1.1427	1.3113	.7184
61	.5952	.8377	.7231
62	.9973	1.0612	.7651
63	.3715	.6560	.8249
64	.5837	.7210	.7745
65	.4647	.6494	1.0136
66	.7628	.9222	.9503
67	1.1757	1.4446	.8525
68	.6868	.7798	.9209
69	.8622	1.0726	1.0873
70	.4822	.6617	.7206
71	.7601	.8941	.8848
72	.2564	.4434	.8601
73	.7253	.8136	.9359
74	.9010	1.0326	.9664
75	2.1850	2.1286	.9077
76	.3516	.5936	.7568
77	.9265	1.0867	.7824
78	1.1529	1.3950	.9110
79	.5515	.7727	1.1090
80	1.2842	1.7239	.7658
82	.4775	.7055	.9617
83	.4452	.5971	.8314
84	.9690	1.1446	1.1005

รอกบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
85	.9228	.9533	.8051
86	.7713	.8953	.9074
87	1.0669	1.2546	.8628
88	.3970	.6046	.8958
89	1.1796	1.4448	.9235
90	1.4166	1.5010	.8427
91	.9653	1.1285	.7227
92	.6289	.7798	1.0457
93	.9113	.9946	.9407
94	1.5868	1.5790	1.0898
95	.2922	.5455	.7819
96	.3379	.5264	.8065
97	1.9275	1.7529	.9893
98	.3474	.5994	.8950
99	.3396	.6023	.8109
100	.4070	.5781	.8053

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ-7 ข้อมูลค่า IAE ของผลการจำลองในกรณีแบบจำลองมีความไม่แน่นอน $\pm 40\%$ ของ
ถึงที่ 2

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
1	.9596	.9661	.8408
2	1.8530	1.6978	.7142
3	.2542	.4535	1.1395
4	.2444	.4885	.9044
5	.9337	1.1712	1.0105
6	1.2955	1.9461	1.0545
7	2.2716	1.8779	.9810
8	1.0528	1.2679	.8792
9	1.2035	1.2316	.8513
10	.8888	.9406	.7837
11	1.8956	1.8149	.8397
12	.4845	.7648	.7264
13	.7446	.7944	.9681
14	2.7599	2.5333	.6655
15	1.2124	1.6207	1.1128
16	.3614	.6540	.7317
17	.8078	1.0630	.8407
18	.3681	.6566	.7753
19	1.2818	1.8423	1.0154
20	1.7590	1.3966	.9725
21	1.3705	1.4788	.6882
22	3.1055	2.7072	.6411
23	.5905	.7169	.8978
24	3.6296	3.1471	.7239
25	1.0948	1.1917	.6660

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
26	1.0474	1.2365	.6609
27	.3443	.5069	1.0607
28	.4058	.6402	1.1018
29	.7417	.7476	.9930
30	.2786	.6122	.6655
31	1.2333	1.7322	1.0494
32	1.3329	1.1875	.8387
33	.3559	.6826	.6438
34	1.2055	1.5447	.7861
35	.3722	.6916	.7241
36	1.3437	1.2903	.8965
37	.5643	.8156	.7260
38	.9474	1.0963	.6780
39	.3793	.6262	1.1216
40	1.5340	1.6233	.7041
41	.2934	.6969	.6362
42	1.1626	1.2444	.7048
43	.3178	.5508	.9178
44	.9653	1.1268	.6917
45	1.0984	1.3356	1.0454
46	.6743	.9032	.8254
47	1.5334	1.5614	.6570
48	.9851	1.1749	.9097
49	.2219	.4777	.9133
50	1.1264	1.3417	1.0236
51	.2035	.4166	1.1205
52	2.4837	2.2677	.7287
53	.2768	.5051	.9631
54	.8654	1.0502	.9272

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
55	.4029	.6485	.8047
56	.4043	.6497	1.0887
57	1.4984	1.3643	.7689
58	.4000	.6628	1.0105
59	.5653	.7826	.7627
60	.9694	1.1738	.7213
61	.5898	.7339	1.0461
62	.9101	1.1213	.8423
63	.3223	.6584	.7232
64	.8538	.9058	.8423
65	.4574	.5551	1.0918
66	1.1513	1.1417	.7849
67	2.6819	2.4713	.7341
68	1.1072	1.1213	.7942
69	.7931	1.0310	.6473
70	.6127	.7737	.7638
71	1.1763	1.2718	.6584
72	.2282	.4314	1.0177
73	.7282	.9333	1.0163
74	1.5526	1.5616	.6862
75	1.3093	1.8665	.8508
76	.2249	.4885	.9964
77	1.8391	1.9274	.6519
78	2.4973	2.1310	.8779
79	.8485	1.1134	.7039
80	3.2436	2.8889	.7122
82	.8107	1.0697	.6640
83	.6353	.8133	.7491
84	1.8431	1.8654	.7038

รอกบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
85	.8532	1.1026	.8773
86	.7535	.9444	.9244
87	2.0368	1.9381	.6605
88	.3651	.6224	.8352
89	2.5700	2.4341	.6420
90	1.1041	1.3687	.7342
91	1.8231	1.6075	.7499
92	.6527	.8514	1.0359
93	1.6872	1.6861	.6460
94	1.1884	1.5258	.8244
95	.2476	.5768	.7671
96	.3013	.5670	.8454
97	1.2897	1.8619	.9458
98	.3573	.7251	.6584
99	.2814	.5958	.7690
100	.4013	.6454	1.1367

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๘-8 ข้อมูลค่า IAE ของผลการจำลองในกรณีแบบจำลองมีความไม่แน่นอน $\pm 40\%$ ของ
ถึงที่ 4

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
1	.7868	.9636	.8959
2	1.1454	1.3324	1.2204
3	.3569	.5529	.8372
4	.3027	.5069	.8962
5	1.3468	1.2183	.9047
6	2.6399	2.2382	.9595
7	1.2629	1.7522	1.0496
8	1.7200	1.7954	.8061
9	.8793	1.0223	.9799
10	.7368	.8455	1.0028
11	1.1453	1.4159	.8053
12	.5809	.7727	.8471
13	.6426	.8097	1.1092
14	1.3170	1.8719	.8548
15	2.1156	1.7808	1.0660
16	.4526	.7498	.7445
17	1.4375	1.6406	.7229
18	.4449	.6750	.8646
19	2.8893	2.7026	.7249
20	1.1243	1.4689	1.1621
21	.9460	1.1011	.8590
22	1.3217	2.1111	1.1771
23	.5666	.7367	.9003
24	1.2949	2.4382	1.1451
25	.8097	.8733	1.1160

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
26	1.5796	1.7048	.8157
27	.3814	.5786	1.0330
28	.4930	.5751	1.1350
29	.6611	.8197	1.0374
30	.2690	.4946	.9471
31	2.2683	1.9409	.8785
32	.9588	1.1623	1.0520
33	.3980	.6963	.7973
34	2.0762	1.9602	.8704
35	.4355	.6517	.8590
36	.9759	1.1441	.9243
37	.7142	.9431	.7417
38	.7659	.9118	.8232
39	.4651	.6038	1.0846
40	1.0111	1.2012	.7738
41	.3112	.6857	.6943
42	.8820	1.0232	.8616
43	.4443	.7264	.7133
44	.7370	.8672	.9523
45	1.7752	1.6710	.8291
46	.8574	.9197	.9006
47	1.0379	1.1972	.8955
48	1.5295	1.6121	.7474
49	.3079	.5387	.8439
50	1.8924	1.8530	.6970
51	.3058	.5030	.8398
52	1.2693	1.6687	1.1596
53	.3529	.5433	.9368
54	1.3240	1.4914	.7237

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
55	.4173	.6061	.9128
56	.4753	.5614	1.2189
57	1.0270	1.2398	1.0171
58	.4723	.5887	1.1751
59	.7390	1.0173	.6873
60	1.4568	1.6105	.6929
61	.7824	1.0034	.7396
62	1.2965	1.3166	.8135
63	.4046	.7053	.7513
64	.7151	.8335	1.0787
65	.4712	.6643	.9845
66	.8922	1.0728	.8496
67	1.2849	1.7745	.9428
68	.8264	.9096	1.1982
69	1.0697	1.2837	.6899
70	.5519	.7216	.8929
71	.8834	1.0199	.8596
72	.2959	.4684	.9640
73	.9462	.9203	1.0079
74	1.0451	1.2075	.9243
75	2.8899	2.7076	.7294
76	.3544	.5964	.7610
77	1.0446	1.2722	.9289
78	1.2956	1.7800	1.2354
79	.6586	.8661	.7405
80	1.3230	2.1289	1.0010
82	.3155	.6142	.8220
83	.5388	.6486	1.2208
84	1.1152	1.3470	.7885

รอกบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
85	1.1659	1.0804	.9239
86	1.0036	1.0315	.8631
87	1.1999	1.4848	.9078
88	.4349	.6296	.9464
89	1.2813	1.7151	.8366
90	1.7923	1.8269	.6923
91	1.1337	1.4040	1.1295
92	.8373	.8966	.9708
93	1.0555	1.1758	1.2025
94	2.0575	1.9622	.7604
95	.2988	.5582	.7904
96	.3454	.5173	1.0418
97	2.5431	2.2215	.9068
98	.3686	.6224	.7959
99	.3621	.6334	.7888
100	.4936	.6465	1.0777

ศูนย์วิทยพัทรพักร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑-9 ข้อมูลค่า IAE ของผลการจำลองในกรณีแบบจำลองมีความไม่แน่นอน $\pm 50\%$ ของ
ถึงที่ 2

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
1	1.1294	1.0511	.8515
2	2.4229	2.1362	.6960
3	.3843	.5529	1.2820
4	.2389	.4701	.9353
5	1.0790	1.4056	1.0841
6	1.3015	2.3579	1.1493
7	2.7858	2.2435	1.0416
8	1.1773	1.5122	.9016
9	1.6115	1.5840	.8651
10	1.1069	1.1042	.7795
11	2.4629	2.2820	.8501
12	.6057	.8495	.7104
13	.9039	.8654	1.0232
14	3.2773	2.9564	.6400
15	1.2983	1.9880	1.2393
16	.3974	.6873	.7167
17	.4475	.6857	.8514
18	.4268	.7037	.7692
19	1.2487	2.1940	1.0913
20	2.1802	1.6655	1.0295
21	1.6892	1.7657	.6661
22	3.7253	3.2082	.6142
23	.6734	.7478	.9264
24	4.2833	3.7213	.7074
25	1.3344	1.4025	.6405

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
26	1.1951	1.4249	.6351
27	.3321	.4962	1.1587
28	.5215	.7095	1.2221
29	.8626	.7788	1.0588
30	.3079	.6480	.6400
31	1.2950	2.0918	1.1417
32	1.6554	1.3889	.8489
33	.3977	.7273	.6171
34	1.3017	1.8128	.7825
35	.4841	.7672	.7076
36	1.7522	1.6220	.9248
37	.6503	.8900	.7098
38	1.1262	1.2664	.6544
39	.5088	.7178	1.2532
40	1.9197	1.9660	.6846
41	.3291	.7447	.6087
42	1.4080	1.4635	.6853
43	.3390	.5537	.9535
44	1.1421	1.3042	.6702
45	1.2327	1.6069	1.1356
46	.7727	1.0128	.8318
47	1.8464	1.8253	.6310
48	1.1078	1.3450	.9425
49	.2291	.4732	.9473
50	1.2405	1.5763	1.1033
51	.1936	.4112	1.2515
52	3.1260	2.7812	.7131
53	.3151	.5354	1.0161
54	.9525	1.1675	.9663

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
55	.4689	.6883	.8057
56	.4785	.7025	1.2016
57	1.8533	1.6220	.7613
58	.4113	.6854	1.0841
59	.6397	.8396	.7538
60	1.0831	1.3050	.7043
61	.7570	.8448	1.1367
62	1.0408	1.2826	.8535
63	.3628	.6960	.7065
64	1.0925	1.0359	.8534
65	.4058	.5225	1.2064
66	1.3867	1.3304	.7811
67	3.3331	3.0079	.7195
68	1.4293	1.3887	.7925
69	.8939	1.1228	.6207
70	.7445	.9147	.7552
71	1.4041	1.4717	.6325
72	.2882	.4759	1.0946
73	.8639	1.0901	1.0926
74	1.8925	1.8451	.6638
75	1.2908	2.1860	.8645
76	.1936	.4614	1.0636
77	2.2799	2.3141	.6256
78	3.1835	2.6586	.9000
79	1.1085	1.3944	.6843
80	3.8920	3.4383	.6938
82	1.6058	1.7568	.6385
83	.8207	.9315	.7375
84	2.3015	2.2573	.6843

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
85	.9655	1.2673	.8991
86	.8856	1.0911	.9625
87	2.4435	2.2628	.6347
88	.3928	.6517	.8443
89	3.0765	2.8533	.6152
90	1.2020	1.5354	.7197
91	2.3169	1.9714	.7384
92	.8030	1.0040	1.1214
93	2.1065	2.0247	.6194
94	1.2780	1.7637	.8306
95	.2544	.5917	.7592
96	.3040	.5705	.8574
97	1.3204	2.2244	.9920
98	.3830	.7663	.6325
99	.2970	.6168	.7616
100	.5505	.7680	1.2776

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ-10 ข้อมูลค่า IAE ของผลการจำลองในกรณีแบบจำลองมีความไม่แน่นอน $\pm 50\%$
ของถึงที่ 4

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
1	.8726	1.0842	.9049
2	1.2709	1.6366	1.3779
3	.5027	.7098	.8314
4	.2996	.4969	.9054
5	1.7098	1.4515	.9162
6	3.2638	2.7111	.9880
7	1.3158	2.0935	1.1126
8	2.2719	2.2677	.7938
9	1.0206	1.2125	1.0153
10	.8545	.9568	1.0466
11	1.2513	1.6715	.7928
12	.7482	.9640	.8435
13	.7324	.9218	1.2009
14	1.3302	2.1537	.8531
15	2.7207	2.2154	1.1364
16	.4989	.8064	.7221
17	2.3684	2.4507	.6997
18	.5113	.7194	.8653
19	3.5857	3.2782	.7021
20	1.2231	1.7579	1.2834
21	1.0520	1.2408	.8583
22	1.2590	2.5250	1.3073
23	.6218	.7933	.9106
24	1.1496	2.9123	1.2565
25	.9089	.9711	1.2113
26	2.0816	2.1511	.8054

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
27	.3684	.5770	1.0888
28	.6374	.6112	1.2406
29	.7334	.9062	1.0950
30	.2820	.4962	.9714
31	2.8213	2.3473	.8828
32	1.0800	1.3748	1.1160
33	.4418	.7469	.7832
34	2.6113	2.3922	.8726
35	.5741	.8172	.8583
36	1.1157	1.3494	.9415
37	.8442	1.0599	.7193
38	.8575	1.0016	.8143
39	.6226	.6695	1.1640
40	1.1222	1.3591	.7561
41	.3251	.7309	.6679
42	.9893	1.1464	.8616
43	.4800	.7711	.6890
44	.8041	.9442	.9783
45	2.2853	2.0670	.8214
46	1.0168	1.0010	.9110
47	1.1416	1.3528	.9044
48	1.9011	1.9331	.7251
49	.3214	.5508	.8397
50	2.3681	2.2303	.6708
51	.3083	.4769	.8346
52	1.3069	2.0111	1.2794
53	.3968	.5795	.9579
54	1.5902	1.7440	.7007
55	.4663	.6381	.9267

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
56	.5582	.5875	1.3755
57	1.1445	1.4579	1.0664
58	.4827	.5859	1.3041
59	.8536	1.1287	.6603
60	1.7562	1.8846	.6663
61	1.0471	1.2012	.7171
62	1.5976	1.5669	.8027
63	.4488	.7559	.7296
64	.8460	.9655	1.1551
65	.4264	.6422	1.0215
66	.9990	1.2120	.8466
67	1.2958	2.1028	.9658
68	.9450	1.0633	1.3415
69	1.2627	1.4812	.6630
70	.6156	.7849	.9011
71	.9839	1.1339	.8591
72	.3591	.5192	.9939
73	1.1883	1.0299	1.0536
74	1.1537	1.3761	.9415
75	3.5426	3.2505	.7066
76	.3395	.5826	.7410
77	1.1135	1.4555	.9476
78	1.3224	2.1951	1.4030
79	.7679	.9639	.7180
80	1.2528	2.5163	1.0441
82	1.0796	1.2351	.8128
83	.6435	.7111	1.3787
84	1.2129	1.5395	.7731
85	1.4002	1.2245	.9411

รอกบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
86	1.2492	1.1865	.8635
87	1.2829	1.7043	.9203
88	.4684	.6496	.9706
89	1.3161	1.9610	.8306
90	2.1350	2.1150	.6657
91	1.2429	1.7019	1.2319
92	1.0838	1.0288	1.0030
93	1.1586	1.3666	1.3485
94	2.4996	2.3139	.7403
95	.3036	.5700	.7752
96	.3427	.4997	1.1013
97	3.1220	2.6670	.9189
98	.3831	.6420	.7815
99	.3823	.6625	.7734
100	.6819	.7455	1.1535

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ-11 ข้อมูลค่า IAE ของผลการจำลองในกรณีแบบจำลองมีความไม่แน่นอน $\pm 60\%$
ของถั่งที่ 2

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
1	1.2875	1.1310	.8626
2	3.0401	2.6120	.6792
3	.5721	.7058	1.4768
4	.2259	.4457	.9687
5	1.1867	1.6545	1.1705
6	1.2124	2.7783	1.2649
7	3.2638	2.5911	1.1109
8	1.2264	1.7806	.9254
9	2.0983	1.9897	.8794
10	1.3394	1.2948	.7755
11	3.0689	2.7811	.8608
12	.7338	.9383	.6952
13	1.0753	.9388	1.0857
14	3.7211	3.3306	.6182
15	1.2744	2.3818	1.4053
16	.4313	.7186	.7023
17	1.3572	1.4163	.8624
18	.4908	.7530	.7632
19	1.1171	2.5497	1.1807
20	2.6036	1.9364	1.0944
21	2.0063	2.0433	.6456
22	4.2603	3.6732	.5899
23	.7451	.7699	.9572
24	4.7944	4.2235	.6919
25	1.5817	1.6111	.6188
26	1.2831	1.6117	.6128

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
27	.2882	.4829	1.2789
28	.6567	.7912	1.3772
29	.9658	.7956	1.1349
30	.3407	.6867	.6182
31	1.2744	2.4713	1.2536
32	1.9886	1.6108	.8593
33	.4394	.7714	.5930
34	1.3252	2.0780	.7790
35	.6119	.8489	.6921
36	2.2082	1.9861	.9550
37	.7271	.9552	.6946
38	1.2968	1.4283	.6331
39	.6724	.8385	1.4282
40	2.3104	2.3027	.6663
41	.6279	.9886	.5839
42	1.6468	1.6706	.6671
43	.3592	.5539	.9924
44	1.3007	1.4626	.6501
45	1.2966	1.8977	1.2447
46	.8568	1.1221	.8384
47	2.1405	2.0673	.6083
48	1.1913	1.5151	.9780
49	.2430	.4693	.9843
50	1.2951	1.8229	1.1978
51	.3122	.5074	1.4254
52	3.7349	3.2859	.6982
53	.3590	.5796	1.0761
54	.9874	1.2727	1.0093
55	.5370	.7287	.8067

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
56	.5399	.7469	1.3446
57	2.2088	1.8805	.7540
58	.3812	.6869	1.1705
59	.7064	.8917	.7451
60	1.1685	1.4222	.6885
61	.9265	.9781	1.2463
62	1.1435	1.4426	.8650
63	.4159	.7301	.6910
64	1.3653	1.1916	.8649
65	.3118	.4841	1.3522
66	1.6138	1.5096	.7773
67	3.9321	3.5245	.7056
68	1.7990	1.6809	.7909
69	.9767	1.2007	.5970
70	.8834	1.0650	.7467
71	1.6190	1.6576	.6100
72	.3675	.5514	1.1855
73	.9889	1.2673	1.1825
74	2.2184	2.1105	.6430
75	1.1906	2.4964	.8786
76	.2019	.4491	1.1416
77	2.9048	2.9675	.6023
78	3.8437	3.1970	.9233
79	1.6846	1.8734	.6660
80	4.4318	3.9322	.6767
82	2.3297	2.4056	.6165
83	1.0645	1.0807	.7263
84	2.7544	2.6382	.6660
85	1.0546	1.4300	.9223

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
86	1.0040	1.2446	1.0043
87	2.8119	2.5550	.6124
88	.4211	.6795	.8537
89	3.5215	3.2289	.5909
90	1.2650	1.6846	.7058
91	2.8258	2.3515	.7274
92	.9487	1.1849	1.2240
93	2.5494	2.3703	.5956
94	1.3180	1.9872	.8368
95	.2594	.6051	.7515
96	.2981	.5647	.8699
97	1.2724	2.5790	1.0434
98	.4018	.8023	.6100
99	.3109	.6364	.7542
100	.7389	.9393	1.4692

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ-12 ข้อมูลค่า IAE ของผลการจำลองในกรณีแบบจำลองมีความไม่แน่นอน $\pm 60\%$
ของถึงที่ 4

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
1	.9422	1.2042	.9142
2	1.3121	1.9809	1.5917
3	.7522	.9579	.8257
4	.2907	.4809	.9148
5	2.0998	1.7188	.9281
6	3.8311	3.1673	1.0183
7	1.3023	2.4338	1.1860
8	2.8924	2.7851	.7819
9	1.1323	1.4350	1.0538
10	.9631	1.0758	1.0951
11	1.2867	1.9395	.7808
12	.9490	1.1855	.8400
13	.8196	1.0459	1.3137
14	1.2930	2.4167	.8514
15	3.3317	2.6659	1.2195
16	.5435	.8608	.7034
17	3.2151	3.2242	.6787
18	.5913	.7636	.8661
19	4.2128	3.8266	.6812
20	1.2691	2.0652	1.4388
21	1.1327	1.3745	.8576
22	1.1188	2.9372	1.4765
23	.6674	.8471	.9211
24	.9479	3.3624	1.3974
25	.9931	1.0746	1.3292
26	2.6355	2.6240	.7954

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
27	.3211	.5525	1.1526
28	.8298	.6539	1.3734
29	.7889	.9849	1.1613
30	.2983	.4991	.9972
31	3.3530	2.7511	.8872
32	1.1714	1.6004	1.1907
33	.4877	.7970	.7703
34	3.1407	2.8224	.8749
35	.7549	1.0362	.8577
36	1.2207	1.5743	.9595
37	.9701	1.1914	.7002
38	.9355	1.0830	.8058
39	.8520	.7631	1.2593
40	1.2006	1.5114	.7393
41	.5967	.9585	.6445
42	1.0774	1.2633	.8616
43	.5121	.8112	.6671
44	.8503	1.0105	1.0060
45	2.8177	2.4760	.8140
46	1.1690	1.0823	.9216
47	1.2185	1.4984	.9135
48	2.2720	2.2444	.7067
49	.3417	.5639	.8354
50	2.8461	2.6034	.6476
51	.4330	.6286	.8294
52	1.2530	2.3589	1.4326
53	.4506	.6280	.9800
54	1.8397	1.9675	.6798
55	.5149	.6722	.9411

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
56	.6284	.6170	1.5877
57	1.2259	1.6809	1.1219
58	.4449	.5820	1.4715
59	.9632	1.2338	.6363
60	2.0390	2.1364	.6427
61	1.3794	1.4356	.6978
62	1.8961	1.8082	.7923
63	.5108	.8520	.7112
64	.9761	1.1184	1.2465
65	.3451	.5655	1.0618
66	1.0860	1.3471	.8437
67	1.2238	2.4272	.9901
68	1.0397	1.2403	1.5315
69	1.4416	1.6613	.6392
70	.6750	.8478	.9095
71	1.0653	1.2406	.8586
72	.4500	.5997	1.0259
73	1.4559	1.1534	1.1046
74	1.2342	1.5407	.9595
75	4.1223	3.7566	.6863
76	.3599	.6130	.7225
77	.7461	.9924	.9671
78	1.2303	2.6357	1.6338
79	.4854	.7900	.6988
80	1.1157	2.8873	1.0918
82	1.9437	2.0063	.8041
83	.7643	.7880	1.5929
84	1.2660	1.7244	.7587
85	1.6245	1.3675	.9589

รอกบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
86	1.5073	1.3735	.8639
87	1.3238	1.9084	.9331
88	.5007	.6645	.9961
89	1.3016	2.1855	.8248
90	2.4443	2.3707	.6421
91	1.2872	2.0208	1.3603
92	1.3774	1.1798	1.0377
93	1.2152	1.5771	1.5430
94	2.9057	2.6364	.7219
95	.3068	.5811	.7612
96	.3294	.4815	1.1701
97	3.6463	3.0881	.9314
98	.3921	.6591	.7684
99	.3997	.6895	.7591
100	.9677	.8857	1.2442

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ-13 ข้อมูลค่า IAE ของผลการจำลองในกรณีแบบจำลองมีความไม่แน่นอน $\pm 70\%$
ของถึงที่ 2

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
1	1.4343	1.2101	.8740
2	3.6877	3.1301	.6634
3	.8809	.9226	1.7582
4	.2056	.4208	1.0049
5	1.2505	1.9318	1.2734
6	1.0520	3.1996	1.4127
7	3.6972	2.9196	1.1912
8	1.1807	1.8419	.9507
9	2.6723	2.4609	.8943
10	1.5860	1.4937	.7714
11	3.6999	3.3160	.8719
12	.8547	1.0352	.6811
13	1.2644	1.0168	1.1572
14	4.0977	3.6616	.5981
15	1.1397	2.8001	1.6378
16	.4631	.7480	.6889
17	2.3120	2.2571	.8737
18	.5541	.8060	.7573
19	.9201	2.8933	1.2879
20	3.0291	2.2146	1.1688
21	2.3186	2.3116	.6274
22	4.7128	4.1070	.5680
23	.8050	.7837	.9903
24	5.1793	4.6532	.6775
25	1.8426	1.8211	.5987
26	1.3000	1.8023	.5923

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
27	.2376	.4670	1.4344
28	.8119	.8888	1.5916
29	1.0453	.7985	1.2239
30	.3770	.7286	.5981
31	1.1812	2.8587	1.3955
32	2.3315	1.8446	.8700
33	.4807	.8147	.5713
34	1.2846	2.3472	.7755
35	.7318	.9457	.6777
36	2.7116	2.3864	.9876
37	.7956	1.0137	.6805
38	1.4592	1.5794	.6142
39	.8690	.9966	1.6760
40	2.6989	2.6343	.6491
41	1.0411	1.3383	.5616
42	1.8772	1.8660	.6500
43	.3763	.5525	1.0350
44	1.4370	1.5984	.6321
45	1.2840	2.2131	1.3818
46	.9284	1.2291	.8450
47	2.4147	2.2896	.5875
48	1.2384	1.6812	1.0167
49	.2602	.4662	1.0247
50	1.2911	2.0763	1.3124
51	.4768	.6520	1.6714
52	4.2876	3.7758	.6845
53	.4121	.6407	1.1443
54	.4775	.7953	1.0567
55	.6074	.7696	.8076

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
56	.5685	.7759	1.5387
57	2.5611	2.1380	.7468
58	.2961	.6501	1.2735
59	.7660	.9394	.7369
60	1.2309	1.5271	.6737
61	1.0830	1.1461	1.3843
62	1.2202	1.6003	.8769
63	.3980	.7378	.6764
64	1.6767	1.4049	.8768
65	.1885	.4333	1.5510
66	1.8315	1.6785	.7735
67	4.4635	4.0166	.6925
68	2.2258	2.0062	.7892
69	1.0449	1.2672	.5755
70	1.0314	1.2207	.7386
71	1.8213	1.8294	.5892
72	.4648	.6606	1.2947
73	1.0958	1.4645	1.2905
74	2.5273	2.3592	.6247
75	1.0363	2.7889	.8933
76	.3538	.5176	1.2332
77	3.5881	3.5938	.5811
78	4.4434	3.7380	.9481
79	2.3354	2.4497	.6488
80	4.8673	4.3709	.6606
82	2.9855	3.0049	.5963
83	1.4042	1.3218	.7155
84	3.1934	3.0098	.6487
85	1.1240	1.5870	.9468

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
86	1.1044	1.4019	1.0502
87	3.1423	2.8184	.5918
88	.4488	.7035	.8633
89	3.9076	3.5655	.5691
90	1.3022	1.8211	.6927
91	3.3386	2.7478	.7167
92	1.0795	1.4045	1.3509
93	3.0270	2.7365	.5739
94	1.3202	2.2031	.8432
95	.2627	.6171	.7439
96	.2838	.5449	.8828
97	1.1678	2.9363	1.1012
98	.4144	.8335	.5892
99	.3234	.6546	.7471
100	.9539	1.1637	1.7452

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ-14 ข้อมูลค่า IAE ของผลการจำลองในกรณีแบบจำลองมีความไม่แน่นอน $\pm 70\%$
ของถึงที่ 4

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
1	.9998	1.3191	.9236
2	1.2479	2.3609	1.8927
3	1.3074	1.3247	.8201
4	.2761	.4577	.9243
5	2.5156	2.0107	.9403
6	4.3274	3.6035	1.0509
7	1.2334	2.7750	1.2723
8	3.5762	3.4315	.7709
9	1.1947	1.6971	1.0959
10	1.0600	1.2023	1.1497
11	1.2407	2.2280	.7698
12	1.1884	1.4337	.8366
13	.9018	1.1897	1.4542
14	1.2243	2.6576	.8497
15	3.9207	3.1289	1.3194
16	.5867	.9130	.6860
17	3.9882	3.9425	.6598
18	.6750	.8081	.8668
19	4.7521	4.3426	.6625
20	1.2600	2.3858	1.6453
21	1.1903	1.5028	.8570
22	.9289	3.3478	1.7044
23	.7032	.8940	.9319
24	.7272	3.7866	1.5811
25	1.0577	1.1850	1.4772
26	3.2279	3.1220	.7857

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
27	.2826	.4924	1.2266
28	1.0947	.7554	1.5440
29	.8262	1.0551	1.2383
30	.3185	.5034	1.0245
31	3.8528	3.1550	.8916
32	1.2320	1.8346	1.2789
33	.5352	.8463	.7579
34	3.6525	3.2509	.8771
35	.9963	1.2962	.8570
36	1.2794	1.8190	.9783
37	1.0918	1.3191	.6826
38	1.0020	1.1589	.7975
39	1.1995	.8938	1.3755
40	1.2458	1.6565	.7236
41	1.0154	1.3129	.6244
42	1.1485	1.3750	.8616
43	.5407	.8470	.6474
44	.8759	1.0675	1.0354
45	3.3571	2.8980	.8068
46	1.3138	1.1696	.9325
47	1.2727	1.6371	.9228
48	2.6372	2.5458	.6897
49	.3628	.5780	.8313
50	3.3198	2.9759	.6275
51	.6397	.8786	.8244
52	1.1225	2.7192	1.6357
53	.5185	.6905	1.0034
54	2.3425	2.4371	.6610
55	.5631	.7078	.9559

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
56	.6598	.6453	1.8859
57	1.2725	1.9104	1.1853
58	.3526	.5691	1.6965
59	1.0673	1.3330	.6163
60	2.3043	2.3685	.6227
61	1.7921	1.7385	.6800
62	2.1884	2.0400	.7822
63	.6427	.9693	.6945
64	1.0960	1.2955	1.3574
65	.2651	.4140	1.1062
66	1.1557	1.4762	.8408
67	1.0926	2.7459	1.0157
68	1.0921	1.4410	1.7930
69	1.6070	1.8256	.6192
70	.7298	.9136	.9180
71	1.1306	1.3396	.8581
72	.5743	.7151	1.0605
73	1.7543	1.3191	1.1622
74	1.2876	1.6986	.9783
75	4.6213	4.2259	.6678
76	.4739	.7062	.7068
77	.3756	.6390	.9875
78	1.0337	3.0985	1.9645
79	.5028	.7577	.6811
80	.9471	3.2364	1.1452
82	2.7861	2.7757	.7956
83	.8932	.9185	1.8947
84	1.2766	1.9015	.7450
85	1.8386	1.5027	.9776

รอบ	ตัวควบคุมแบบ mp-MPC	ตัวควบคุมแบบ MPC	ตัวควบคุมแบบ PID
86	1.7766	1.5718	.8643
87	1.3324	2.1053	.9463
88	.5312	.6747	1.0232
89	1.2554	2.3891	.8191
90	2.7218	2.5985	.6220
91	1.2627	2.3614	1.5241
92	1.7295	1.3604	1.0754
93	1.2185	1.8104	1.8117
94	3.2729	2.9317	.7061
95	.3086	.5916	.7477
96	.3057	.4627	1.2504
97	4.1069	3.4831	.9442
98	.3964	.6743	.7558
99	.4147	.7145	.7454
100	1.4090	1.0875	1.3542

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข
ข้อมูลการทดลองของการหาแบบจำลองของกระบวนการระบบสี่ถังโดย
ใช้วิธีการตอบสนองต่อ สเต็ปของอินพุตต่อเอาต์พุต

ตารางที่ ข-1 ข้อมูลการทดลองในการปรับพารามิเตอร์ทดสอบแบบสเต็ปตัวที่ 1

เวลา (นาที)	ความสูงของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 3 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 2 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 4 (cm)
0.0000	20.1022	20.1929	40.2073	39.9641
.0667	20.2041	21.0082	39.6976	40.0465
.1333	20.3060	22.4349	39.1879	40.2115
.2000	23.1595	24.1674	38.8821	40.3764
.2667	20.3060	25.5942	38.2705	40.5414
.3333	20.9175	27.1228	38.0666	40.7888
.4000	20.3060	28.5496	37.7608	41.1186
.4667	20.5099	29.8744	37.4550	41.2836
.5333	20.2041	31.3012	37.2511	41.6134
.6000	20.4080	32.5241	36.9453	41.8609
.6667	20.3060	33.9508	36.7415	42.1907
.7333	20.3060	35.0719	36.5376	42.2732
.8000	20.3060	36.2948	36.3337	42.7680
.8667	20.3060	37.5177	36.1299	43.0979
.9333	20.2041	38.7406	36.0279	43.3453
1.0000	20.3060	39.9636	35.8241	43.6752
1.0667	20.2041	41.0846	35.7221	43.9226
1.1333	20.3060	42.1037	35.6202	44.2524
1.2000	20.3060	43.2247	35.5183	44.4998
1.2667	20.3060	44.2438	35.4163	44.8297
1.3333	20.3060	45.3648	35.3144	45.0771
1.4000	20.1022	46.3839	35.3144	45.7369
1.4667	20.3060	47.3011	35.1105	46.4791

เวลา (นาที)	ความสูงของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 3 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 2 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 4 (cm)
1.5333	20.2041	47.8107	35.2124	47.1388
1.6000	20.3060	48.2183	35.2124	47.7986
1.6667	20.3060	48.7279	35.1105	48.5408
1.7333	20.3060	49.2374	34.9066	49.1181
1.8000	20.3060	49.6451	35.0086	49.6129
1.8667	19.2869	50.0527	34.9066	50.1902
1.9333	19.0831	50.4604	34.8047	50.6850
2.0000	20.3060	50.8680	34.8047	51.1798
2.0667	20.2041	51.2757	34.7028	51.5922
2.1333	20.4080	51.7852	34.6008	52.0045
2.2000	20.3060	52.0909	34.7028	52.4993
2.2667	20.3060	52.3967	34.7028	52.9116
2.3333	20.3060	52.8043	34.6008	53.2415
2.4000	20.3060	53.2120	34.4989	53.6539
2.4667	20.3060	53.6196	34.4989	53.9013
2.5333	20.3060	54.8425	34.6008	54.3961
2.6000	20.3060	54.2311	34.3970	54.6435
2.6667	20.4080	54.6387	34.4989	54.9734
2.7333	20.4080	54.9445	34.3970	55.2208
2.8000	20.3060	55.3521	34.4989	55.4682
2.8667	20.3060	55.6578	34.4989	55.7156
2.9333	20.3060	56.0655	34.4989	55.9630
3.0000	20.3060	56.3712	34.4989	56.2104
3.0667	20.2041	56.6769	34.3970	56.3753
3.1333	19.0831	56.9827	34.4989	56.6227
3.2000	20.3060	57.3903	34.4989	56.8701
3.2667	20.3060	57.6960	34.4989	57.1175
3.3333	20.3060	57.8999	34.4989	57.2825
3.4000	20.3060	58.1037	34.3970	57.3650

เวลา (นาทื)	ความสูงของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 3 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 2 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 4 (cm)
3.4667	20.4080	58.4094	34.2950	57.6124
3.5333	20.3060	58.8171	34.3970	57.6948
3.6000	20.3060	59.0209	34.3970	58.0247
3.6667	20.4080	59.3266	34.2950	58.0247
3.7333	20.3060	59.4285	34.3970	58.1072
3.8000	20.3060	59.7343	37.0473	58.2721
3.8667	20.3060	60.1419	34.3970	58.4370
3.9333	20.3060	60.3457	34.2950	58.6020
4.0000	20.4080	60.5495	34.3970	58.6845
4.0667	20.3060	60.5495	34.3970	58.8494
4.1333	20.1022	60.9572	34.3970	58.8494
4.2000	20.3060	61.1610	34.3970	59.0968
4.2667	20.3060	61.5687	36.4357	59.2617
4.3333	20.4080	61.6706	34.3970	59.2617
4.4000	20.4080	61.7725	34.3970	59.4267
4.4667	20.4080	62.0782	34.2950	59.4267
4.5333	20.4080	62.2820	34.3970	59.5916
4.6000	20.3060	62.4858	34.3970	59.6741
4.6667	20.5099	62.6897	34.9066	59.7565
4.7333	20.4080	62.9954	34.2950	59.8390
4.8000	20.3060	63.0973	34.3970	59.9215
4.8667	20.4080	63.3011	34.3970	60.0040
4.9333	21.4271	63.5050	34.2950	60.0040
5.0000	20.4080	63.7088	34.2950	60.1689
5.0667	20.4080	64.2183	34.2950	60.2514
5.1333	20.4080	64.1164	34.2950	60.3338
5.2000	20.4080	64.2183	33.5815	60.3338
5.2667	20.4080	64.4222	34.2950	60.4163
5.3333	20.3060	64.5241	34.2950	60.4163

เวลา (นาที)	ความสูงของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 3 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 2 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 4 (cm)
5.4000	20.5099	64.8298	34.1931	60.4988
5.4667	20.4080	64.8298	34.1931	60.6637
5.5333	20.3060	65.1355	34.2950	60.6637
5.6000	19.5927	65.2374	34.1931	60.7462
5.6667	20.4080	61.0591	34.2950	60.9111
5.7333	20.4080	65.5432	33.9892	60.8286
5.8000	20.4080	65.5432	34.3970	60.9111
5.8667	20.3060	65.9508	34.0912	60.9936
5.9333	20.3060	66.0527	34.2950	60.9936
6.0000	20.3060	66.1546	34.1931	61.0760
6.0667	20.4080	66.2565	34.1931	61.0760
6.1333	20.4080	66.3585	34.2950	61.0760
6.2000	20.4080	66.5623	34.2950	61.1585
6.2667	20.4080	66.8680	34.2950	61.2410
6.3333	20.4080	66.8680	36.1299	61.2410
6.4000	20.4080	66.9699	34.2950	61.3234
6.4667	20.4080	67.1737	34.2950	61.3234
6.5333	20.3060	67.2757	34.2950	61.7358
6.6000	20.4080	67.3776	34.1931	61.4059
6.6667	20.3060	67.4795	34.2950	61.4059
6.7333	20.4080	67.5814	34.2950	61.4884
6.8000	20.3060	67.6833	34.2950	61.5709
6.8667	20.4080	67.6833	34.2950	61.5709
6.9333	20.3060	67.9890	34.2950	61.5709
7.0000	20.4080	67.9890	34.1931	61.6533
7.0667	20.3060	68.2948	34.2950	61.7358
7.1333	20.4080	68.2948	34.1931	61.7358
7.2000	20.3060	68.3967	34.2950	61.7358
7.2667	20.3060	68.4986	34.2950	61.7358

เวลา (นาทื)	ความสูงของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 3 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 2 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 4 (cm)
7.3333	20.3060	68.7024	35.1105	61.8183
7.4000	20.3060	68.7024	34.2950	61.8183
7.4667	20.4080	68.9062	34.2950	61.9832
7.5333	20.0003	68.9062	34.3970	61.9832
7.6000	20.3060	69.0081	34.2950	61.9832
7.6667	20.3060	69.1100	34.3970	61.9832
7.7333	20.3060	69.2120	34.2950	62.0657
7.8000	20.4080	69.3139	34.1931	62.0657
7.8667	20.2041	69.3139	34.1931	62.1481
7.9333	20.4080	69.4158	34.2950	62.1481
8.0000	20.3060	69.5177	34.2950	62.0657
8.0667	20.3060	69.6196	34.2950	62.1481
8.1333	20.3060	69.7215	34.1931	62.2306
8.2000	20.3060	69.7215	34.2950	62.2306
8.2667	20.4080	69.8234	34.2950	62.3131
8.3333	20.4080	69.9253	34.1931	62.3131
8.4000	20.4080	70.0272	34.2950	62.3131
8.4667	20.3060	70.1292	34.2950	62.3955
8.5333	20.3060	70.1292	34.2950	62.3955
8.6000	20.3060	70.2311	34.2950	62.3955
8.6667	20.2041	69.7215	34.3970	62.3955
8.7333	20.3060	70.3330	34.2950	62.3955
8.8000	20.3060	70.4349	34.1931	62.4780
8.8667	20.3060	70.6387	34.1931	62.5605
8.9333	20.3060	70.5368	34.2950	62.5605
9.0000	20.3060	70.6387	34.2950	62.5605
9.0667	20.3060	70.7406	34.1931	62.5605
9.1333	20.3060	70.7406	33.9892	62.5605
9.2000	20.3060	70.8425	34.2950	62.6429

เวลา (นาทื)	ความสูงของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 3 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 2 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 4 (cm)
9.2667	20.3060	70.8425	34.3970	61.6533
9.3333	20.3060	70.9444	34.2950	62.6429
9.4000	20.3060	70.9444	34.2950	62.7254
9.4667	20.3060	71.0464	34.2950	62.6429
9.5333	20.3060	71.1483	34.2950	62.7254
9.6000	20.3060	71.2502	34.2950	62.7254
9.6667	20.3060	71.1483	34.2950	62.7254
9.7333	20.3060	71.2502	34.2950	62.7254
9.8000	20.3060	71.3521	34.2950	62.8079
9.8667	20.3060	71.3521	34.2950	62.8079
9.9333	20.3060	71.3521	34.2950	62.4780
10.0000	20.3060	71.4540	34.1931	62.8904
10.0667	20.3060	71.5559	34.1931	62.8904
10.1333	20.3060	71.6578	34.1931	62.8904
10.2000	20.3060	71.6578	34.1931	62.8079
10.2667	20.3060	71.6578	34.1931	62.8079
10.3333	20.2041	71.7597	34.1931	62.8904
10.4000	20.2041	71.8616	34.2950	62.9728
10.4667	20.3060	71.8616	34.1931	62.3955
10.5333	20.3060	71.8616	34.1931	62.8904
10.6000	20.3060	71.9635	34.1931	62.9728
10.6667	20.3060	71.9635	34.1931	62.9728
10.7333	20.3060	71.9635	34.0912	62.9728
10.8000	20.3060	72.0655	34.1931	62.9728
10.8667	20.3060	71.9635	34.2950	62.9728
10.9333	20.3060	72.1674	34.2950	62.9728
11.0000	20.6118	72.3712	34.1931	63.3852
11.0667	20.3060	72.2693	34.1931	62.9728
11.1333	20.2041	72.3712	34.2950	63.0553

เวลา (นาที)	ความสูงของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 3 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 2 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 4 (cm)
11.2000	20.3060	72.3712	34.2950	63.2202
11.2667	20.3060	72.3712	34.2950	63.0553
11.3333	20.3060	72.3712	34.2950	63.0553
11.4000	20.2041	72.4731	34.2950	63.0553
11.4667	20.3060	72.4731	34.2950	63.0553
11.5333	20.3060	71.7597	34.2950	63.1378
11.6000	20.2041	72.5750	34.2950	63.0553
11.6667	20.3060	72.5750	34.2950	63.0553
11.7333	20.2041	72.3712	34.2950	63.1378
11.8000	20.1022	72.6769	34.2950	63.1378
11.8667	20.3060	72.6769	34.2950	63.1378
11.9333	20.3060	72.6769	34.2950	63.2202
12.0000	20.2041	72.7788	34.3970	63.1378
12.0667	20.2041	72.6769	34.3970	63.1378
12.1333	20.3060	72.8807	34.2950	63.2202
12.2000	20.2041	72.8807	34.2950	63.1378
12.2667	20.2041	72.8807	34.2950	63.2202
12.3333	20.2041	72.9827	34.2950	63.1378
12.4000	20.3060	73.1865	34.2950	63.2202
12.4667	20.3060	72.9827	34.1931	63.2202
12.5333	20.3060	73.2884	34.2950	63.2202
12.6000	20.3060	75.1228	34.2950	63.3027
12.6667	20.2041	73.0846	34.2950	63.3027
12.7333	20.3060	73.0846	34.2950	63.2202
12.8000	20.3060	73.1865	34.2950	62.9728
12.8667	20.4080	73.2884	34.3970	63.3027
12.9333	20.3060	73.1865	34.2950	63.3027
13.0000	20.3060	73.2884	34.2950	63.3027
13.0667	20.3060	73.1865	34.2950	63.3852

เวลา (นาที)	ความสูงของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 3 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 2 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 4 (cm)
13.1333	20.3060	73.2884	34.2950	63.3027
13.2000	20.3060	73.1865	36.9453	62.7254
13.2667	20.1022	73.1865	34.3970	63.3852
13.3333	20.1022	73.2884	34.2950	63.3027
13.4000	20.1022	73.3903	34.2950	63.3852
13.4667	20.1022	73.3903	33.9892	63.3027
13.5333	20.1022	74.1037	34.2950	63.3852
13.6000	20.1022	73.3903	34.2950	63.4676
13.6667	20.1022	73.3903	34.3970	63.3852
13.7333	20.1022	73.3903	34.6008	63.3852
13.8000	20.1022	73.5941	34.2950	63.3852
13.8667	20.1022	73.4922	34.3970	63.4676
13.9333	20.1022	73.3903	34.3970	63.3852
14.0000	20.1022	73.4922	34.4989	63.3852
14.0667	20.1022	73.5941	34.2950	63.3852
14.1333	20.1022	73.5941	34.3970	63.3852
14.2000	20.1022	73.5941	35.8241	63.4676
14.2667	20.1022	73.5941	34.3970	63.4676
14.3333	20.1022	73.4922	34.3970	63.3852
14.4000	20.1022	73.4922	34.4989	63.3852
14.4667	20.1022	73.6960	34.3970	63.3852
14.5333	20.1022	73.6960	34.3970	63.3852
14.6000	20.1022	73.5941	34.2950	63.3852
14.6667	20.1022	73.5941	34.3970	63.3852
14.7333	20.1022	73.6960	34.4989	63.4676
14.8000	20.1022	73.7979	33.1738	63.4676
14.8667	20.1022	75.9381	34.3970	63.4676
14.9333	20.1022	73.5941	34.2950	63.4676
15.0000	20.1022	73.7979	34.4989	63.5501

เวลา (นาทื)	ความสูงของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 3 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 2 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 4 (cm)
15.0667	20.1022	73.7979	34.3970	63.4676
15.1333	20.1022	73.7979	34.3970	63.4676
15.2000	20.1022	73.7979	34.3970	63.5501
15.2667	20.1022	73.7979	34.2950	63.4676
15.3333	20.1022	73.7979	34.3970	63.4676
15.4000	20.3060	73.7979	34.3970	63.5501
15.4667	20.3060	74.1037	34.3970	63.5501
15.5333	20.3060	73.2884	34.3970	63.5501
15.6000	20.3060	73.8999	34.3970	63.4676
15.6667	20.3060	73.7979	34.2950	63.4676
15.7333	20.3060	74.0018	34.2950	63.3852
15.8000	20.3060	74.0018	34.2950	63.3852
15.8667	20.3060	73.8999	34.3970	63.3852
15.9333	20.3060	73.8999	34.2950	63.2202
16.0000	20.3060	74.0018	34.3970	63.3027
16.0667	20.3060	74.0018	34.3970	63.3852
16.1333	20.3060	74.8171	34.4989	63.3027
16.2000	20.3060	74.0018	34.3970	63.3027
16.2667	20.3060	74.0018	33.0718	63.2202
16.3333	20.3060	74.1037	34.6008	63.3027
16.4000	20.3060	74.2056	34.8047	63.3027
16.4667	20.3060	74.1037	34.4989	63.3027
16.5333	20.3060	74.1037	34.6008	63.3027
16.6000	20.3060	74.0018	34.6008	63.2202
16.6667	20.3060	74.1037	34.7028	63.2202
16.7333	20.3060	74.0018	34.7028	63.2202
16.8000	20.3060	74.1037	34.7028	63.3027
16.8667	20.3060	74.0018	34.8047	63.3852
16.9333	20.3060	74.2056	34.8047	63.1378

เวลา (นาที)	ความสูงของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 3 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 2 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 4 (cm)
17.0000	20.3060	74.1037	34.8047	63.2202
17.0667	20.3060	74.1037	34.8047	63.3027
17.1333	20.3060	74.2056	34.9066	63.3027
17.2000	20.3060	74.2056	35.0086	63.2202
17.2667	20.3060	74.2056	35.0086	63.2202
17.3333	20.3060	74.4094	34.9066	63.2202
17.4000	20.3060	74.1037	35.0086	63.3027
17.4667	20.3060	74.2056	35.0086	63.3027
17.5333	20.3060	74.2056	35.1105	63.8800
17.6000	20.3060	74.2056	35.1105	63.3027
17.6667	20.3060	74.1037	35.1105	63.3027
17.7333	20.3060	74.2056	33.9892	63.3852
17.8000	20.3060	74.2056	34.6008	63.3027
17.8667	20.3060	74.2056	32.2563	63.3852
17.9333	20.3060	74.0018	35.1105	63.3852
18.0000	20.3060	74.2056	35.2124	63.3027
18.0667	20.3060	74.2056	35.2124	63.3852
18.1333	20.3060	74.2056	35.2124	63.3852
18.2000	20.3060	74.2056	35.2124	63.3852
18.2667	20.3060	74.3075	35.2124	63.3852
18.3333	20.3060	74.2056	35.6202	63.4676
18.4000	20.3060	74.2056	35.1105	63.3852
18.4667	20.3060	74.2056	35.2124	63.3852
18.5333	20.3060	74.3075	35.1105	63.3852
18.6000	20.3060	74.3075	35.2124	63.3852
18.6667	20.3060	74.2056	35.2124	63.3852
18.7333	20.3060	74.3075	35.2124	63.3852
18.8000	20.3060	74.3075	35.2124	63.3852
18.8667	20.3060	74.4094	35.2124	63.3852

เวลา (นาที)	ความสูงของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 3 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 2 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 4 (cm)
18.9333	20.3060	74.3075	35.2124	63.3852
19.0000	20.3060	74.3075	35.1105	62.0657
19.0667	20.3060	74.3075	35.1105	63.4676
19.1333	20.3060	74.3075	35.1105	63.4676
19.2000	20.3060	74.3075	35.1105	63.3852
19.2667	20.3060	73.8999	35.1105	63.3852
19.3333	20.3060	74.2056	35.2124	63.3852
19.4000	20.3060	74.2056	35.1105	63.3852
19.4667	20.3060	74.3075	35.4163	63.3852
19.5333	20.3060	74.4094	35.0086	62.9728
19.6000	20.3060	74.4094	35.1105	63.4676
19.6667	20.3060	74.4094	35.0086	62.3955
19.7333	20.3060	74.3075	35.1105	63.3852
19.8000	20.3060	74.4094	35.1105	63.3852
19.8667	20.3060	74.3075	35.1105	63.3852
19.9333	20.3060	74.3075	35.1105	63.3852
20.0000	20.3060	74.3075	35.1105	63.3852

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ซ-2 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงกระบวนกรในการปรับวาล์วทดสอบแบบสแต็ปตัวที่ 1

เวลา (นาที)	ความสูงของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 3 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 2 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 4 (cm)
0.0000	20.0000	20.0000	40.6000	39.6000
.0667	20.8020	20.0000	40.5999	39.3166
.1333	21.5880	20.0000	40.5995	39.0545
.2000	22.3585	20.0000	40.5976	38.8120
.2667	23.1138	20.0000	40.5881	38.5878
.3333	23.8541	20.0000	40.5418	38.3803
.4000	24.5797	20.0000	40.3471	38.1883
.4667	25.2910	20.0000	40.2226	38.0108
.5333	25.9882	20.0000	40.0697	37.8466
.6000	26.6716	20.0000	40.0879	37.6947
.6667	27.3414	20.0000	40.2356	37.5541
.7333	27.9980	20.0000	40.4803	37.4241
.8000	28.6416	20.0000	40.7971	37.3039
.8667	29.2724	20.0000	41.1663	37.1926
.9333	29.8908	20.0000	41.5728	37.0897
1.0000	30.4969	20.0000	42.0051	36.9946
1.0667	31.0910	20.0000	42.4539	36.9065
1.1333	31.6733	20.0000	42.9125	36.8251
1.2000	32.2441	20.0000	43.3755	36.7497
1.2667	32.8036	20.0000	43.8388	36.6800
1.3333	33.3520	20.0000	44.2994	36.6156
1.4000	33.8896	20.0000	44.7549	36.5559
1.4667	34.4165	20.0000	45.2037	36.5007
1.5333	34.9330	20.0000	45.6444	36.4497
1.6000	35.4393	20.0000	46.0762	36.4025
1.6667	35.9355	20.0000	46.4984	36.3588
1.7333	36.4219	20.0000	46.9107	36.3185

เวลา (นาทีก)	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ
	Tank 1 (cm)	Tank 3 (cm)	Tank 2 (cm)	Tank 4 (cm)
1.8000	36.8987	20.0000	47.3128	36.2811
1.8667	37.3660	20.0000	47.7045	36.2465
1.9333	37.8241	20.0000	48.0858	36.2145
2.0000	38.2731	20.0000	48.4569	36.1850
2.0667	38.7133	20.0000	48.8177	36.1576
2.1333	39.1447	20.0000	49.1685	36.1323
2.2000	39.5675	20.0000	49.5093	36.1089
2.2667	39.9820	20.0000	49.8405	36.0872
2.3333	40.3883	20.0000	50.1622	36.0672
2.4000	40.7865	20.0000	50.4746	36.0487
2.4667	41.1769	20.0000	50.7780	36.0315
2.5333	41.5595	20.0000	51.0726	36.0157
2.6000	41.9346	20.0000	51.3586	36.0010
2.6667	42.3022	20.0000	51.6363	35.9874
2.7333	42.6625	20.0000	51.9059	35.9749
2.8000	43.0157	20.0000	52.1675	35.9633
2.8667	43.3619	20.0000	52.4215	35.9525
2.9333	43.7013	20.0000	52.6681	35.9426
3.0000	44.0339	20.0000	52.9074	35.9334
3.0667	44.3600	20.0000	53.1397	35.9249
3.1333	44.6796	20.0000	53.3651	35.9170
3.2000	44.9928	20.0000	53.5840	35.9098
3.2667	45.2999	20.0000	53.7964	35.9030
3.3333	45.6009	20.0000	54.0025	35.8968
3.4000	45.8959	20.0000	54.2026	35.8911
3.4667	46.1851	20.0000	54.3968	35.8857
3.5333	46.4685	20.0000	54.5853	35.8808
3.6000	46.7464	20.0000	54.7683	35.8762
3.6667	47.0187	20.0000	54.9458	35.8720

เวลา (นาทื)	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ
	Tank 1 (cm)	Tank 3 (cm)	Tank 2 (cm)	Tank 4 (cm)
3.7333	47.2857	20.0000	55.1181	35.8681
3.8000	47.5473	20.0000	55.2854	35.8645
3.8667	47.8038	20.0000	55.4477	35.8612
3.9333	48.0552	20.0000	55.6053	35.8581
4.0000	48.3016	20.0000	55.7582	35.8552
4.0667	48.5432	20.0000	55.9067	35.8526
4.1333	48.7799	20.0000	56.0507	35.8502
4.2000	49.0120	20.0000	56.1905	35.8479
4.2667	49.2395	20.0000	56.3262	35.8458
4.3333	49.4625	20.0000	56.4579	35.8439
4.4000	49.6810	20.0000	56.5857	35.8421
4.4667	49.8953	20.0000	56.7098	35.8404
4.5333	50.1052	20.0000	56.8302	35.8389
4.6000	50.3111	20.0000	56.9471	35.8375
4.6667	50.5128	20.0000	57.0605	35.8362
4.7333	50.7106	20.0000	57.1706	35.8350
4.8000	50.9044	20.0000	57.2774	35.8338
4.8667	51.0944	20.0000	57.3811	35.8328
4.9333	51.2807	20.0000	57.4818	35.8318
5.0000	51.4632	20.0000	57.5795	35.8309
5.0667	51.6422	20.0000	57.6743	35.8301
5.1333	51.8176	20.0000	57.7663	35.8294
5.2000	51.9895	20.0000	57.8556	35.8287
5.2667	52.1580	20.0000	57.9423	35.8280
5.3333	52.3232	20.0000	58.0264	35.8274
5.4000	52.4851	20.0000	58.1081	35.8269
5.4667	52.6438	20.0000	58.1873	35.8263
5.5333	52.7994	20.0000	58.2642	35.8259
5.6000	52.9519	20.0000	58.3389	35.8254

เวลา (นาทื)	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ
	Tank 1 (cm)	Tank 3 (cm)	Tank 2 (cm)	Tank 4 (cm)
5.6667	53.1013	20.0000	58.4113	35.8250
5.7333	53.2478	20.0000	58.4816	35.8246
5.8000	53.3914	20.0000	58.5499	35.8243
5.8667	53.5322	20.0000	58.6161	35.8240
5.9333	53.6702	20.0000	58.6804	35.8237
6.0000	53.8054	20.0000	58.7428	35.8234
6.0667	53.9380	20.0000	58.8034	35.8231
6.1333	54.0679	20.0000	58.8622	35.8229
6.2000	54.1953	20.0000	58.9192	35.8227
6.2667	54.3201	20.0000	58.9746	35.8225
6.3333	54.4425	20.0000	59.0283	35.8223
6.4000	54.5624	20.0000	59.0805	35.8221
6.4667	54.6800	20.0000	59.1311	35.8220
6.5333	54.7952	20.0000	59.1802	35.8218
6.6000	54.9082	20.0000	59.2279	35.8217
6.6667	55.0189	20.0000	59.2742	35.8216
6.7333	55.1275	20.0000	59.3191	35.8214
6.8000	55.2338	20.0000	59.3627	35.8213
6.8667	55.3381	20.0000	59.4050	35.8212
6.9333	55.4403	20.0000	59.4461	35.8211
7.0000	55.5405	20.0000	59.4859	35.8211
7.0667	55.6387	20.0000	59.5246	35.8210
7.1333	55.7350	20.0000	59.5622	35.8209
7.2000	55.8293	20.0000	59.5986	35.8208
7.2667	55.9218	20.0000	59.6340	35.8208
7.3333	56.0125	20.0000	59.6683	35.8207
7.4000	56.1013	20.0000	59.7016	35.8207
7.4667	56.1884	20.0000	59.7339	35.8206
7.5333	56.2738	20.0000	59.7653	35.8206

เวลา (นาทื)	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ
	Tank 1 (cm)	Tank 3 (cm)	Tank 2 (cm)	Tank 4 (cm)
7.6000	56.3575	20.0000	59.7958	35.8205
7.6667	56.4395	20.0000	59.8254	35.8205
7.7333	56.5199	20.0000	59.8540	35.8204
7.8000	56.5987	20.0000	59.8819	35.8204
7.8667	56.6760	20.0000	59.9089	35.8204
7.9333	56.7517	20.0000	59.9352	35.8204
8.0000	56.8259	20.0000	59.9606	35.8203
8.0667	56.8987	20.0000	59.9853	35.8203
8.1333	56.9700	20.0000	60.0093	35.8203
8.2000	57.0399	20.0000	60.0326	35.8203
8.2667	57.1084	20.0000	60.0552	35.8202
8.3333	57.1756	20.0000	60.0771	35.8202
8.4000	57.2414	20.0000	60.0984	35.8202
8.4667	57.3059	20.0000	60.1190	35.8202
8.5333	57.3692	20.0000	60.1391	35.8202
8.6000	57.4312	20.0000	60.1585	35.8202
8.6667	57.4919	20.0000	60.1774	35.8202
8.7333	57.5515	20.0000	60.1958	35.8201
8.8000	57.6099	20.0000	60.2135	35.8201
8.8667	57.6671	20.0000	60.2308	35.8201
8.9333	57.7232	20.0000	60.2476	35.8201
9.0000	57.7782	20.0000	60.2638	35.8201
9.0667	57.8321	20.0000	60.2796	35.8201
9.1333	57.8849	20.0000	60.2949	35.8201
9.2000	57.9367	20.0000	60.3098	35.8201
9.2667	57.9874	20.0000	60.3242	35.8201
9.3333	58.0372	20.0000	60.3382	35.8201
9.4000	58.0860	20.0000	60.3518	35.8201
9.4667	58.1338	20.0000	60.3650	35.8201

เวลา (นาทื)	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ
	Tank 1 (cm)	Tank 3 (cm)	Tank 2 (cm)	Tank 4 (cm)
9.5333	58.1806	20.0000	60.3778	35.8201
9.6000	58.2265	20.0000	60.3903	35.8201
9.6667	58.2716	20.0000	60.4023	35.8200
9.7333	58.3157	20.0000	60.4140	35.8200
9.8000	58.3589	20.0000	60.4254	35.8200
9.8667	58.4013	20.0000	60.4364	35.8200
9.9333	58.4429	20.0000	60.4471	35.8200
10.0000	58.4836	20.0000	60.4575	35.8200
10.0667	58.5236	20.0000	60.4676	35.8200
10.1333	58.5627	20.0000	60.4774	35.8200
10.2000	58.6010	20.0000	60.4869	35.8200
10.2667	58.6387	20.0000	60.4961	35.8200
10.3333	58.6755	20.0000	60.5050	35.8200
10.4000	58.7116	20.0000	60.5137	35.8200
10.4667	58.7470	20.0000	60.5221	35.8200
10.5333	58.7818	20.0000	60.5303	35.8200
10.6000	58.8158	20.0000	60.5383	35.8200
10.6667	58.8491	20.0000	60.5460	35.8200
10.7333	58.8818	20.0000	60.5535	35.8200
10.8000	58.9139	20.0000	60.5607	35.8200
10.8667	58.9453	20.0000	60.5678	35.8200
10.9333	58.9761	20.0000	60.5746	35.8200
11.0000	59.0062	20.0000	60.5812	35.8200
11.0667	59.0358	20.0000	60.5877	35.8200
11.1333	59.0648	20.0000	60.5939	35.8200
11.2000	59.0932	20.0000	60.6000	35.8200
11.2667	59.1211	20.0000	60.6059	35.8200
11.3333	59.1484	20.0000	60.6116	35.8200
11.4000	59.1751	20.0000	60.6171	35.8200

เวลา (นาทื)	ความสูงของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 3 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 2 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 4 (cm)
11.4667	59.2014	20.0000	60.6225	35.8200
11.5333	59.2271	20.0000	60.6277	35.8200
11.6000	59.2523	20.0000	60.6328	35.8200
11.6667	59.2770	20.0000	60.6377	35.8200
11.7333	59.3012	20.0000	60.6425	35.8200
11.8000	59.3250	20.0000	60.6471	35.8200
11.8667	59.3482	20.0000	60.6516	35.8200
11.9333	59.3710	20.0000	60.6560	35.8200
12.0000	59.3934	20.0000	60.6603	35.8200
12.0667	59.4153	20.0000	60.6644	35.8200
12.1333	59.4368	20.0000	60.6684	35.8200
12.2000	59.4578	20.0000	60.6722	35.8200
12.2667	59.4785	20.0000	60.6760	35.8200
12.3333	59.4987	20.0000	60.6796	35.8200
12.4000	59.5185	20.0000	60.6832	35.8200
12.4667	59.5380	20.0000	60.6866	35.8200
12.5333	59.5570	20.0000	60.6900	35.8200
12.6000	59.5757	20.0000	60.6932	35.8200
12.6667	59.5940	20.0000	60.6963	35.8200
12.7333	59.6119	20.0000	60.6994	35.8200
12.8000	59.6295	20.0000	60.7024	35.8200
12.8667	59.6467	20.0000	60.7052	35.8200
12.9333	59.6636	20.0000	60.7080	35.8200
13.0000	59.6802	20.0000	60.7107	35.8200
13.0667	59.6964	20.0000	60.7134	35.8200
13.1333	59.7123	20.0000	60.7159	35.8200
13.2000	59.7279	20.0000	60.7184	35.8200
13.2667	59.7432	20.0000	60.7208	35.8200
13.3333	59.7582	20.0000	60.7231	35.8200

เวลา (นาทื)	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ
	Tank 1 (cm)	Tank 3 (cm)	Tank 2 (cm)	Tank 4 (cm)
13.4000	59.7729	20.0000	60.7254	35.8200
13.4667	59.7873	20.0000	60.7276	35.8200
13.5333	59.8014	20.0000	60.7297	35.8200
13.6000	59.8152	20.0000	60.7318	35.8200
13.6667	59.8288	20.0000	60.7338	35.8200
13.7333	59.8421	20.0000	60.7357	35.8200
13.8000	59.8551	20.0000	60.7376	35.8200
13.8667	59.8679	20.0000	60.7395	35.8200
13.9333	59.8804	20.0000	60.7413	35.8200
14.0000	59.8927	20.0000	60.7430	35.8200
14.0667	59.9047	20.0000	60.7447	35.8200
14.1333	59.9165	20.0000	60.7463	35.8200
14.2000	59.9280	20.0000	60.7479	35.8200
14.2667	59.9394	20.0000	60.7494	35.8200
14.3333	59.9505	20.0000	60.7509	35.8200
14.4000	59.9614	20.0000	60.7523	35.8200
14.4667	59.9720	20.0000	60.7537	35.8200
14.5333	59.9825	20.0000	60.7551	35.8200
14.6000	59.9927	20.0000	60.7564	35.8200
14.6667	60.0028	20.0000	60.7577	35.8200
14.7333	60.0126	20.0000	60.7590	35.8200
14.8000	60.0223	20.0000	60.7602	35.8200
14.8667	60.0317	20.0000	60.7613	35.8200
14.9333	60.0410	20.0000	60.7625	35.8200
15.0000	60.0501	20.0000	60.7636	35.8200
15.0667	60.0590	20.0000	60.7646	35.8200
15.1333	60.0677	20.0000	60.7657	35.8200
15.2000	60.0763	20.0000	60.7667	35.8200
15.2667	60.0847	20.0000	60.7677	35.8200

เวลา (นาทื)	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ
	Tank 1 (cm)	Tank 3 (cm)	Tank 2 (cm)	Tank 4 (cm)
15.3333	60.0929	20.0000	60.7686	35.8200
15.4000	60.1010	20.0000	60.7696	35.8200
15.4667	60.1089	20.0000	60.7705	35.8200
15.5333	60.1166	20.0000	60.7713	35.8200
15.6000	60.1242	20.0000	60.7722	35.8200
15.6667	60.1316	20.0000	60.7730	35.8200
15.7333	60.1389	20.0000	60.7738	35.8200
15.8000	60.1461	20.0000	60.7746	35.8200
15.8667	60.1531	20.0000	60.7753	35.8200
15.9333	60.1600	20.0000	60.7760	35.8200
16.0000	60.1667	20.0000	60.7767	35.8200
16.0667	60.1733	20.0000	60.7774	35.8200
16.1333	60.1798	20.0000	60.7781	35.8200
16.2000	60.1861	20.0000	60.7787	35.8200
16.2667	60.1923	20.0000	60.7794	35.8200
16.3333	60.1984	20.0000	60.7800	35.8200
16.4000	60.2044	20.0000	60.7806	35.8200
16.4667	60.2102	20.0000	60.7811	35.8200
16.5333	60.2160	20.0000	60.7817	35.8200
16.6000	60.2216	20.0000	60.7822	35.8200
16.6667	60.2271	20.0000	60.7827	35.8200
16.7333	60.2325	20.0000	60.7833	35.8200
16.8000	60.2378	20.0000	60.7837	35.8200
16.8667	60.2430	20.0000	60.7842	35.8200
16.9333	60.2481	20.0000	60.7847	35.8200
17.0000	60.2531	20.0000	60.7851	35.8200
17.0667	60.2580	20.0000	60.7856	35.8200
17.1333	60.2628	20.0000	60.7860	35.8200
17.2000	60.2675	20.0000	60.7864	35.8200

เวลา (นาทื)	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ
	Tank 1 (cm)	Tank 3 (cm)	Tank 2 (cm)	Tank 4 (cm)
17.2667	60.2721	20.0000	60.7868	35.8200
17.3333	60.2766	20.0000	60.7872	35.8200
17.4000	60.2810	20.0000	60.7876	35.8200
17.4667	60.2853	20.0000	60.7879	35.8200
17.5333	60.2896	20.0000	60.7883	35.8200
17.6000	60.2938	20.0000	60.7886	35.8200
17.6667	60.2978	20.0000	60.7890	35.8200
17.7333	60.3018	20.0000	60.7893	35.8200
17.8000	60.3058	20.0000	60.7896	35.8200
17.8667	60.3096	20.0000	60.7899	35.8200
17.9333	60.3134	20.0000	60.7902	35.8200
18.0000	60.3171	20.0000	60.7905	35.8200
18.0667	60.3207	20.0000	60.7908	35.8200
18.1333	60.3243	20.0000	60.7911	35.8200
18.2000	60.3277	20.0000	60.7913	35.8200
18.2667	60.3311	20.0000	60.7916	35.8200
18.3333	60.3345	20.0000	60.7918	35.8200
18.4000	60.3378	20.0000	60.7921	35.8200
18.4667	60.3410	20.0000	60.7923	35.8200
18.5333	60.3441	20.0000	60.7925	35.8200
18.6000	60.3472	20.0000	60.7927	35.8200
18.6667	60.3502	20.0000	60.7930	35.8200
18.7333	60.3532	20.0000	60.7932	35.8200
18.8000	60.3561	20.0000	60.7934	35.8200
18.8667	60.3590	20.0000	60.7936	35.8200
18.9333	60.3618	20.0000	60.7938	35.8200
19.0000	60.3645	20.0000	60.7939	35.8200
19.0667	60.3672	20.0000	60.7941	35.8200
19.1333	60.3698	20.0000	60.7943	35.8200

เวลา (นาทื)	ความสูงของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 3 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 2 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 4 (cm)
19.2000	60.3724	20.0000	60.7945	35.8200
19.2667	60.3749	20.0000	60.7946	35.8200
19.3333	60.3774	20.0000	60.7948	35.8200
19.4000	60.3798	20.0000	60.7949	35.8200
19.4667	60.3822	20.0000	60.7951	35.8200
19.5333	60.3845	20.0000	60.7952	35.8200
19.6000	60.3868	20.0000	60.7954	35.8200
19.6667	60.3891	20.0000	60.7955	35.8200
19.7333	60.3912	20.0000	60.7956	35.8200
19.8000	60.3934	20.0000	60.7958	35.8200
19.8667	60.3955	20.0000	60.7959	35.8200
19.9333	60.3976	20.0000	60.7960	35.8200
20.0000	60.3996	20.0000	60.7960	35.8200

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-3 ข้อมูลการทดลองในการปรับวาล์วทดสอบแบบสตีพตัวที่ 2

เวลา (นาที)	ความสูงของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 3 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 2 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 4 (cm)
0.0000	20.0448	20.0000	40.0518	39.9800
.0667	20.6563	20.0000	40.0518	39.4174
.1333	21.7773	20.0000	40.1537	39.2524
.2000	23.0002	20.0000	40.3576	39.0050
.2667	24.4269	20.0000	40.4595	38.7576
.3333	25.4460	20.0000	40.7653	38.5102
.4000	26.1594	20.0000	40.9692	38.4278
.4667	27.7900	20.0000	41.2750	38.1804
.5333	28.9110	20.0000	41.2750	38.0154
.6000	29.9301	20.0000	41.6827	37.7680
.6667	31.0511	20.0000	43.6195	37.6855
.7333	31.9683	20.0000	42.0904	37.6031
.8000	33.0893	20.0000	42.2943	37.6031
.8667	34.0065	20.0000	42.4982	37.4381
.9333	34.9237	20.0000	42.8040	37.2732
1.0000	35.8409	20.0000	43.0079	37.1907
1.0667	36.4523	20.0000	43.2117	37.1907
1.1333	37.0638	20.0000	43.7214	37.0258
1.2000	37.4714	20.0000	44.4349	36.9433
1.2667	37.7771	20.0000	45.1485	36.8609
1.3333	38.1848	20.0000	46.2698	36.9433
1.4000	38.5924	20.0000	46.2698	36.7784
1.4667	39.0001	20.0000	46.8814	36.7784
1.5333	39.4077	20.0000	47.4930	36.6134
1.6000	39.8153	20.0000	47.7988	36.6134
1.6667	40.2230	20.0000	48.2065	36.6134
1.7333	39.3058	20.0000	48.6143	36.6134

เวลา (นาทีก)	ความสูงของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 3 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 2 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 4 (cm)
1.8000	40.8344	20.0000	49.0220	36.5310
1.8667	41.3440	20.0000	49.3278	36.4485
1.9333	41.5478	20.0000	49.9394	36.4485
2.0000	41.8535	20.0000	51.4684	36.4485
2.0667	42.1593	20.0000	50.4491	36.4485
2.1333	42.6688	20.0000	50.5510	36.2836
2.2000	43.0765	20.0000	50.9588	36.3660
2.2667	43.2803	20.0000	51.1626	36.3660
2.3333	43.4841	20.0000	51.4684	36.2836
2.4000	43.7898	20.0000	51.6723	36.2836
2.4667	44.1975	20.0000	51.8762	36.2836
2.5333	44.4013	20.0000	52.1820	36.3660
2.6000	44.7070	20.0000	52.3859	36.2836
2.6667	44.9108	20.0000	52.5897	36.2836
2.7333	45.2166	20.0000	52.8955	36.2836
2.8000	45.5223	20.0000	52.8955	36.2011
2.8667	45.8280	20.0000	53.2013	36.2836
2.9333	46.0319	20.0000	53.4052	36.0362
3.0000	46.4395	20.0000	53.5071	36.2011
3.0667	46.5414	20.0000	53.7110	36.1186
3.1333	46.8471	20.0000	53.9149	36.2011
3.2000	47.0510	20.0000	54.0168	36.2011
3.2667	47.3567	20.0000	54.1187	36.2836
3.3333	47.4586	20.0000	54.4246	36.1186
3.4000	47.7643	20.0000	54.6284	36.2011
3.4667	47.9681	20.0000	54.7304	36.2011
3.5333	48.1720	20.0000	54.8323	36.2011
3.6000	48.3758	20.0000	54.9342	36.2011
3.6667	48.6815	20.0000	55.0362	36.5310

เวลา (นาทีก)	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ
	Tank 1 (cm)	Tank 3 (cm)	Tank 2 (cm)	Tank 4 (cm)
3.7333	48.8853	20.0000	55.1381	36.0362
3.8000	49.0892	20.0000	55.3420	36.1186
3.8667	49.2930	20.0000	55.4439	36.1186
3.9333	49.4968	20.0000	55.6478	36.1186
4.0000	49.5987	20.0000	55.7497	36.0362
4.0667	49.9044	20.0000	55.8516	36.1186
4.1333	50.1083	20.0000	55.9536	36.1186
4.2000	50.3121	19.5942	56.1574	36.2011
4.2667	51.2293	19.6961	56.1574	36.0362
4.3333	50.6178	20.0000	56.3613	35.9537
4.4000	50.7197	20.0000	56.3613	36.0362
4.4667	50.9235	20.0000	56.4632	36.1186
4.5333	51.2293	20.0000	56.5652	36.1186
4.6000	51.3312	20.0000	56.7691	36.1186
4.6667	51.4331	20.0000	56.6671	35.9537
4.7333	51.7388	20.0000	56.7691	36.0362
4.8000	51.8407	19.8999	56.8710	36.0362
4.8667	52.0446	19.7980	56.9729	36.1186
4.9333	52.1465	19.8999	57.0749	36.0362
5.0000	54.6942	19.7980	57.1768	36.1186
5.0667	52.3503	20.0018	57.2787	36.1186
5.1333	52.4522	20.0018	57.2787	36.2836
5.2000	52.7579	20.0018	57.3807	36.0362
5.2667	52.7579	20.0018	57.3807	36.1186
5.3333	52.9617	20.0018	57.3807	36.1186
5.4000	53.2675	20.0018	57.3807	36.1186
5.4667	53.2675	20.0018	57.5845	36.1186
5.5333	52.6560	20.0018	57.6865	35.9537
5.6000	53.5732	20.0018	57.6865	36.1186

เวลา (นาทีก)	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ
	Tank 1 (cm)	Tank 3 (cm)	Tank 2 (cm)	Tank 4 (cm)
5.6667	53.6751	20.1037	57.7884	36.0362
5.7333	53.6751	20.1037	57.6865	36.1186
5.8000	53.8789	20.0018	57.8903	35.9537
5.8667	53.9808	20.1037	57.8903	36.1186
5.9333	53.9808	20.1037	57.8903	35.9537
6.0000	54.2866	20.2056	57.7884	36.0362
6.0667	54.2866	20.1037	57.9923	36.0362
6.1333	54.4904	20.2056	57.9923	35.9537
6.2000	54.4904	20.2056	58.0942	36.0362
6.2667	54.4904	20.2056	58.1961	35.9537
6.3333	54.7961	20.2056	58.1961	36.0362
6.4000	54.7961	20.1037	58.2981	36.2836
6.4667	54.9999	20.2056	58.1961	35.9537
6.5333	55.1019	20.1037	58.4000	35.9537
6.6000	55.2038	20.1037	58.4000	35.9537
6.6667	55.2038	20.1037	55.1381	36.0362
6.7333	55.3057	20.3075	58.2981	36.0362
6.8000	55.5095	20.2056	58.4000	36.1186
6.8667	55.4076	20.2056	58.4000	35.9537
6.9333	55.6114	20.1037	58.5019	35.9537
7.0000	55.6114	20.1037	58.6039	35.9537
7.0667	55.8152	20.3075	58.5019	36.1186
7.1333	55.7133	20.2056	58.6039	35.9537
7.2000	55.9171	20.2056	58.6039	35.7888
7.2667	56.0190	18.8808	58.6039	35.9537
7.3333	56.1210	20.3075	58.8077	36.0362
7.4000	56.1210	20.9190	58.7058	35.9537
7.4667	56.2229	20.2056	59.1135	35.8712
7.5333	56.3248	20.2056	58.7058	35.8712

เวลา (นาทื)	ความสูงของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 3 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 2 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 4 (cm)
7.6000	56.3248	20.2056	58.8077	36.0362
7.6667	56.4267	20.2056	58.8077	35.9537
7.7333	56.5286	20.3075	60.1329	36.0362
7.8000	56.6305	20.1037	58.9097	35.9537
7.8667	56.6305	20.2056	58.9097	35.8712
7.9333	56.8343	20.3075	58.9097	36.0362
8.0000	56.8343	20.3075	59.0116	35.9537
8.0667	56.8343	20.9190	59.1135	36.0362
8.1333	57.0381	20.2056	58.9097	35.9537
8.2000	56.9362	20.3075	59.2155	36.0362
8.2667	57.0381	20.3075	59.3174	36.2836
8.3333	57.1401	20.3075	58.8077	35.9537
8.4000	57.1401	20.2056	59.2155	35.9537
8.4667	57.1401	20.3075	59.3174	35.9537
8.5333	57.2420	20.5113	59.2155	36.0362
8.6000	57.3439	20.3075	59.2155	36.0362
8.6667	57.4458	20.2056	59.3174	36.1186
8.7333	57.4458	20.3075	59.2155	35.9537
8.8000	57.5477	20.3075	59.3174	35.9537
8.8667	57.5477	20.2056	59.3174	35.9537
8.9333	57.6496	20.3075	59.2155	36.1186
9.0000	57.6496	20.3075	59.3174	35.9537
9.0667	57.7515	20.4094	59.2155	35.7888
9.1333	57.8534	20.4094	59.2155	35.9537
9.2000	57.7515	20.3075	59.4194	36.0362
9.2667	57.8534	20.5113	59.4194	35.9537
9.3333	57.8534	20.4094	59.4194	35.8712
9.4000	57.9553	20.3075	59.4194	36.0362
9.4667	53.7770	20.3075	59.5213	35.9537

เวลา (นาทื)	ความสูงของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 3 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 2 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 4 (cm)
9.5333	57.9553	20.5113	59.4194	36.0362
9.6000	58.0572	20.4094	59.6232	35.9537
9.6667	58.1592	20.4094	59.5213	36.0362
9.7333	58.1592	20.4094	59.5213	36.2836
9.8000	57.6496	20.3075	59.7252	35.9537
9.8667	58.1592	20.4094	59.5213	35.9537
9.9333	58.1592	20.4094	59.5213	35.9537
10.0000	58.1592	20.3075	59.6232	36.0362
10.0667	58.5668	20.3075	59.5213	36.0362
10.1333	58.3630	20.3075	59.6232	36.1186
10.2000	58.3630	20.5113	59.6232	35.9537
10.2667	58.3630	20.4094	59.6232	35.9537
10.3333	58.4649	20.4094	59.6232	35.9537
10.4000	58.4649	20.4094	59.6232	36.1186
10.4667	58.5668	20.4094	59.6232	35.9537
10.5333	58.5668	20.4094	59.6232	35.7888
10.6000	58.5668	20.4094	59.7252	35.9537
10.6667	58.6687	20.4094	59.7252	36.0362
10.7333	58.7706	20.4094	59.5213	35.9537
10.8000	58.6687	20.3075	59.7252	35.8712
10.8667	58.5668	20.4094	59.5213	35.9537
10.9333	58.5668	20.4094	59.7252	35.9537
11.0000	58.8725	20.5113	59.9290	36.0362
11.0667	58.8725	20.4094	59.8271	35.9537
11.1333	58.8725	20.4094	59.8271	36.0362
11.2000	58.9744	20.4094	59.5213	35.9537
11.2667	58.9744	20.4094	59.5213	36.0362
11.3333	59.0763	20.4094	59.7252	36.2836
11.4000	58.9744	20.3075	59.8271	35.9537

เวลา (นาทื)	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ
	Tank 1 (cm)	Tank 3 (cm)	Tank 2 (cm)	Tank 4 (cm)
11.4667	58.9744	20.3075	59.7252	35.9537
11.5333	59.0763	20.4094	59.7252	35.9537
11.6000	59.0763	20.3075	59.8271	36.0362
11.6667	59.0763	20.2056	59.9290	36.0362
11.7333	59.0763	20.4094	59.8271	36.1186
11.8000	59.1783	20.3075	59.9290	35.9537
11.8667	59.1783	17.5559	59.9290	35.9537
11.9333	56.6305	20.3075	59.9290	35.9537
12.0000	59.3821	20.4094	59.9290	36.1186
12.0667	59.2802	20.3075	60.0310	35.9537
12.1333	59.2802	20.4094	60.0310	35.7888
12.2000	53.4713	20.3075	60.0310	35.9537
12.2667	59.3821	20.4094	59.9290	36.0362
12.3333	59.3821	19.4922	60.0310	35.9537
12.4000	59.3821	20.3075	59.9290	35.8712
12.4667	59.3821	20.3075	60.0310	35.9537
12.5333	59.4840	20.3075	60.4387	35.9537
12.6000	59.3821	20.5113	60.0310	35.9537
12.6667	59.3821	21.0209	60.1329	36.0362
12.7333	59.4840	20.4094	59.9290	35.9537
12.8000	59.4840	20.4094	60.0310	36.0362
12.8667	59.5859	20.4094	60.0310	35.9537
12.9333	59.5859	20.4094	60.0310	36.0362
13.0000	59.5859	21.3266	60.0310	36.2836
13.0667	59.5859	20.4094	60.0310	35.9537
13.1333	59.5859	20.4094	60.1329	35.9537
13.2000	59.6878	20.4094	60.0310	35.9537
13.2667	59.5859	20.2056	59.9290	36.0362
13.3333	59.5859	20.8171	60.1329	36.0362

เวลา (นาทีก)	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ
	Tank 1 (cm)	Tank 3 (cm)	Tank 2 (cm)	Tank 4 (cm)
13.4000	59.5859	20.4094	60.0310	36.1186
13.4667	59.5859	20.4094	60.0310	35.9537
13.5333	59.5859	20.3075	59.7252	35.9537
13.6000	59.5859	20.5113	60.1329	35.9537
13.6667	59.6878	20.3075	60.0310	36.1186
13.7333	59.5859	20.4094	60.2348	35.9537
13.8000	59.6878	20.4094	60.2348	35.7888
13.8667	59.7897	20.4094	60.2348	35.9537
13.9333	59.6878	20.5113	60.5406	36.0362
14.0000	59.7897	20.4094	60.2348	35.9537
14.0667	59.7897	21.5305	60.4387	35.8712
14.1333	59.7897	20.3075	60.2348	36.0362
14.2000	59.7897	20.3075	60.3368	35.9537
14.2667	59.7897	20.4094	60.3368	36.0362
14.3333	59.8916	20.4094	60.3368	35.9537
14.4000	59.7897	20.4094	61.9677	36.0362
14.4667	59.7897	20.3075	60.3368	36.2836
14.5333	59.8916	20.4094	60.2348	35.9537
14.6000	59.8916	20.4094	60.2348	35.9537
14.6667	59.8916	20.4094	60.1329	35.9537
14.7333	60.1974	20.4094	60.2348	36.0362
14.8000	59.8916	20.4094	60.2348	36.0362
14.8667	59.8916	20.4094	60.2348	36.1186
14.9333	59.8916	20.3075	60.2348	35.9537
15.0000	59.8916	20.4094	60.2348	35.9537
15.0667	59.8916	20.3075	60.3368	35.9537
15.1333	59.9935	20.3075	60.2348	36.1186
15.2000	59.8916	20.5113	60.3368	35.9537
15.2667	59.8916	20.4094	60.3368	35.7888

เวลา (นาทื)	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ
	Tank 1 (cm)	Tank 3 (cm)	Tank 2 (cm)	Tank 4 (cm)
15.3333	59.8916	20.4094	60.3368	35.9537
15.4000	59.8916	20.4094	60.2348	36.0362
15.4667	59.8916	18.7789	60.3368	35.9537
15.5333	59.9935	20.5113	60.2348	35.8712
15.6000	59.8916	20.4094	60.3368	35.9537
15.6667	60.0954	20.4094	60.1329	35.7888
15.7333	59.9935	20.4094	60.2348	35.9537
15.8000	60.0954	20.5113	60.2348	36.0362
15.8667	59.9935	20.4094	60.2348	35.9537
15.9333	60.0954	20.4094	60.2348	36.0362
16.0000	59.9935	20.4094	60.2348	35.9537
16.0667	59.8916	20.5113	60.3368	36.0362
16.1333	59.8916	20.5113	60.2348	36.2836
16.2000	59.9935	20.4094	60.3368	35.9537
16.2667	59.9935	20.4094	60.3368	35.9537
16.3333	60.0954	20.4094	60.2348	35.9537
16.4000	60.0954	20.4094	60.2348	36.0362
16.4667	60.0954	20.4094	60.3368	36.0362
16.5333	60.0954	20.4094	60.3368	36.1186
16.6000	60.0954	20.5113	60.3368	35.9537
16.6667	60.0954	20.4094	61.3561	35.9537
16.7333	60.0954	20.5113	60.3368	35.9537
16.8000	60.0954	20.4094	60.3368	36.1186
16.8667	60.1974	20.5113	60.3368	35.9537
16.9333	60.1974	20.4094	60.4387	35.7888
17.0000	60.0954	20.4094	60.3368	35.9537
17.0667	60.2993	20.9190	60.2348	36.0362
17.1333	60.1974	20.9190	60.3368	35.9537
17.2000	60.0954	20.4094	60.3368	35.8712

เวลา (นาทื)	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ
	Tank 1 (cm)	Tank 3 (cm)	Tank 2 (cm)	Tank 4 (cm)
17.2667	60.1974	20.4094	60.3368	35.7888
17.3333	60.1974	20.4094	60.3368	35.9537
17.4000	60.1974	20.5113	60.3368	36.0362
17.4667	60.1974	20.4094	60.3368	35.9537
17.5333	60.1974	20.5113	60.3368	35.8712
17.6000	60.2993	21.6324	60.3368	36.0362
17.6667	60.1974	20.3075	60.3368	35.9537
17.7333	60.1974	20.4094	60.3368	36.0362
17.8000	60.1974	20.5113	60.3368	35.9537
17.8667	60.1974	20.4094	60.4387	36.0362
17.9333	60.1974	20.3075	60.4387	36.2836
18.0000	60.2993	20.4094	60.3368	35.9537
18.0667	60.2993	20.3075	60.4387	35.9537
18.1333	60.2993	20.4094	60.4387	35.9537
18.2000	60.1974	20.4094	60.4387	36.0362
18.2667	60.2993	20.4094	60.0310	36.0362
18.3333	60.2993	20.5113	60.3368	36.1186
18.4000	60.2993	20.4094	60.3368	35.9537
18.4667	60.1974	20.3075	60.4387	35.9537
18.5333	59.8916	20.3075	60.5406	35.9537
18.6000	60.1974	20.4094	60.4387	36.1186
18.6667	60.2993	20.4094	60.4387	35.9537
18.7333	60.2993	20.5113	60.3368	35.7888
18.8000	60.2993	20.4094	60.4387	35.9537
18.8667	60.2993	20.4094	62.0697	36.0362
18.9333	60.2993	20.4094	60.4387	35.9537
19.0000	60.6050	20.3075	60.5406	36.0362
19.0667	60.2993	20.3075	60.4387	35.9537
19.1333	60.2993	20.4094	60.4387	36.0362

เวลา (นาทื)	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ
	Tank 1 (cm)	Tank 3 (cm)	Tank 2 (cm)	Tank 4 (cm)
19.2000	60.1974	20.3075	60.6426	36.2836
19.2667	60.5031	20.0018	60.3368	35.9537
19.3333	60.2993	20.4094	60.4387	35.9537
19.4000	60.2993	20.4094	60.4387	35.9537
19.4667	60.2993	20.3075	60.4387	36.0362
19.5333	60.2993	20.4094	60.4387	36.0362
19.6000	60.2993	20.4094	60.4387	36.1186
19.6667	60.4012	20.4094	60.4387	35.9537
19.7333	60.2993	20.4094	60.4387	35.9537
19.8000	60.2993	20.5113	60.4387	35.9537
19.8667	58.3630	20.4094	60.4387	36.1186
19.9333	60.2993	20.4094	60.4387	35.9537
20.0000	60.2993	20.4094	60.4387	35.7888

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๙-4 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงกระบวนการณ์ในการปรับวาล์วทดสอบแบบสแต็ปตัวที่ 2

เวลา (นาที)	ความสูงของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 3 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 2 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 4 (cm)
0.0000	20.0000	20.2000	40.2000	40.1000
.0667	20.0000	21.2693	39.7266	40.1000
.1333	20.0000	22.3174	39.2905	40.1000
.2000	20.0000	23.3447	38.8888	40.0999
.2667	20.0000	24.3517	38.5189	40.0997
.3333	20.0000	25.3388	38.1781	40.0988
.4000	20.0000	26.3063	37.8642	40.1010
.4667	20.0000	27.2547	37.5751	40.1115
.5333	20.0000	28.1842	37.3088	40.1692
.6000	20.0000	29.0954	37.0635	40.2699
.6667	20.0000	29.9885	36.8375	40.4105
.7333	20.0000	30.8640	36.6294	40.5879
.8000	20.0000	31.7221	36.4377	40.7994
.8667	20.0000	32.5632	36.2612	41.0422
.9333	20.0000	33.3877	36.0985	41.3137
1.0000	20.0000	34.1958	35.9487	41.6115
1.0667	20.0000	34.9880	35.8107	41.9330
1.1333	20.0000	35.7644	35.6836	42.2761
1.2000	20.0000	36.5255	35.5666	42.6387
1.2667	20.0000	37.2715	35.4587	43.0186
1.3333	20.0000	38.0027	35.3594	43.4139
1.4000	20.0000	38.7195	35.2679	43.8228
1.4667	20.0000	39.4220	35.1837	44.2435
1.5333	20.0000	40.1107	35.1061	44.6743
1.6000	20.0000	40.7857	35.0346	45.1138
1.6667	20.0000	41.4473	34.9687	45.5603
1.7333	20.0000	42.0959	34.9081	46.0126

เวลา (นาทีก)	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ
	Tank 1 (cm)	Tank 3 (cm)	Tank 2 (cm)	Tank 4 (cm)
1.8000	20.0000	42.7316	34.8522	46.4693
1.8667	20.0000	43.3547	34.8007	46.9292
1.9333	20.0000	43.9655	34.7533	47.3911
2.0000	20.0000	44.5642	34.7097	47.8540
2.0667	20.0000	45.1510	34.6695	48.3168
2.1333	20.0000	45.7262	34.6324	48.7786
2.2000	20.0000	46.2900	34.5983	49.2385
2.2667	20.0000	46.8427	34.5669	49.6957
2.3333	20.0000	47.3844	34.5379	50.1494
2.4000	20.0000	47.9154	34.5113	50.5991
2.4667	20.0000	48.4358	34.4867	51.0439
2.5333	20.0000	48.9460	34.4641	51.4834
2.6000	20.0000	49.4461	34.4432	51.9169
2.6667	20.0000	49.9362	34.4240	52.3441
2.7333	20.0000	50.4167	34.4064	52.7645
2.8000	20.0000	50.8876	34.3901	53.1776
2.8667	20.0000	51.3492	34.3751	53.5831
2.9333	20.0000	51.8017	34.3613	53.9807
3.0000	20.0000	52.2452	34.3485	54.3702
3.0667	20.0000	52.6800	34.3368	54.7512
3.1333	20.0000	53.1061	34.3260	55.1235
3.2000	20.0000	53.5238	34.3161	55.4871
3.2667	20.0000	53.9332	34.3069	55.8417
3.3333	20.0000	54.3345	34.2985	56.1872
3.4000	20.0000	54.7279	34.2907	56.5235
3.4667	20.0000	55.1134	34.2836	56.8506
3.5333	20.0000	55.4914	34.2770	57.1684
3.6000	20.0000	55.8618	34.2709	57.4768
3.6667	20.0000	56.2250	34.2653	57.7760

เวลา (นาทื)	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ
	Tank 1 (cm)	Tank 3 (cm)	Tank 2 (cm)	Tank 4 (cm)
3.7333	20.0000	56.5809	34.2601	58.0658
3.8000	20.0000	56.9298	34.2554	58.3464
3.8667	20.0000	57.2717	34.2510	58.6178
3.9333	20.0000	57.6069	34.2470	58.8801
4.0000	20.0000	57.9355	34.2433	59.1332
4.0667	20.0000	58.2576	34.2399	59.3774
4.1333	20.0000	58.5733	34.2367	59.6127
4.2000	20.0000	58.8827	34.2338	59.8393
4.2667	20.0000	59.1860	34.2312	60.0573
4.3333	20.0000	59.4833	34.2287	60.2668
4.4000	20.0000	59.7747	34.2264	60.4679
4.4667	20.0000	60.0603	34.2244	60.6609
4.5333	20.0000	60.3403	34.2224	60.8458
4.6000	20.0000	60.6148	34.2207	61.0228
4.6667	20.0000	60.8838	34.2190	61.1922
4.7333	20.0000	61.1474	34.2175	61.3540
4.8000	20.0000	61.4059	34.2161	61.5085
4.8667	20.0000	61.6592	34.2149	61.6558
4.9333	20.0000	61.9076	34.2137	61.7961
5.0000	20.0000	62.1510	34.2126	61.9297
5.0667	20.0000	62.3896	34.2116	62.0566
5.1333	20.0000	62.6234	34.2107	62.1771
5.2000	20.0000	62.8527	34.2099	62.2913
5.2667	20.0000	63.0773	34.2091	62.3995
5.3333	20.0000	63.2976	34.2084	62.5018
5.4000	20.0000	63.5135	34.2077	62.5984
5.4667	20.0000	63.7251	34.2071	62.6896
5.5333	20.0000	63.9325	34.2065	62.7754
5.6000	20.0000	64.1358	34.2060	62.8561

เวลา (นาทีก)	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ
	Tank 1 (cm)	Tank 3 (cm)	Tank 2 (cm)	Tank 4 (cm)
5.6667	20.0000	64.3351	34.2055	62.9319
5.7333	20.0000	64.5304	34.2051	63.0029
5.8000	20.0000	64.7219	34.2047	63.0693
5.8667	20.0000	64.9096	34.2043	63.1313
5.9333	20.0000	65.0935	34.2040	63.1890
6.0000	20.0000	65.2739	34.2037	63.2427
6.0667	20.0000	65.4506	34.2034	63.2925
6.1333	20.0000	65.6239	34.2031	63.3385
6.2000	20.0000	65.7937	34.2029	63.3809
6.2667	20.0000	65.9601	34.2026	63.4199
6.3333	20.0000	66.1233	34.2024	63.4556
6.4000	20.0000	66.2832	34.2022	63.4881
6.4667	20.0000	66.4400	34.2021	63.5177
6.5333	20.0000	66.5936	34.2019	63.5444
6.6000	20.0000	66.7443	34.2018	63.5684
6.6667	20.0000	66.8919	34.2016	63.5899
6.7333	20.0000	67.0366	34.2015	63.6088
6.8000	20.0000	67.1784	34.2014	63.6255
6.8667	20.0000	67.3175	34.2013	63.6400
6.9333	20.0000	67.4538	34.2012	63.6524
7.0000	20.0000	67.5874	34.2011	63.6628
7.0667	20.0000	67.7183	34.2010	63.6714
7.1333	20.0000	67.8466	34.2009	63.6782
7.2000	20.0000	67.9724	34.2008	63.6834
7.2667	20.0000	68.0958	34.2008	63.6870
7.3333	20.0000	68.2166	34.2007	63.6892
7.4000	20.0000	68.3351	34.2007	63.6900
7.4667	20.0000	68.4512	34.2006	63.6896
7.5333	20.0000	68.5651	34.2006	63.6880

เวลา (นาทีก)	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ
	Tank 1 (cm)	Tank 3 (cm)	Tank 2 (cm)	Tank 4 (cm)
7.6000	20.0000	68.6767	34.2005	63.6853
7.6667	20.0000	68.7860	34.2005	63.6816
7.7333	20.0000	68.8932	34.2004	63.6770
7.8000	20.0000	68.9983	34.2004	63.6715
7.8667	20.0000	69.1013	34.2004	63.6652
7.9333	20.0000	69.2023	34.2003	63.6581
8.0000	20.0000	69.3012	34.2003	63.6504
8.0667	20.0000	69.3982	34.2003	63.6421
8.1333	20.0000	69.4933	34.2003	63.6333
8.2000	20.0000	69.5865	34.2002	63.6239
8.2667	20.0000	69.6779	34.2002	63.6141
8.3333	20.0000	69.7674	34.2002	63.6040
8.4000	20.0000	69.8552	34.2002	63.5934
8.4667	20.0000	69.9412	34.2002	63.5826
8.5333	20.0000	70.0255	34.2002	63.5715
8.6000	20.0000	70.1082	34.2001	63.5602
8.6667	20.0000	70.1892	34.2001	63.5488
8.7333	20.0000	70.2686	34.2001	63.5372
8.8000	20.0000	70.3465	34.2001	63.5254
8.8667	20.0000	70.4228	34.2001	63.5136
8.9333	20.0000	70.4976	34.2001	63.5018
9.0000	20.0000	70.5709	34.2001	63.4899
9.0667	20.0000	70.6428	34.2001	63.4780
9.1333	20.0000	70.7132	34.2001	63.4662
9.2000	20.0000	70.7822	34.2001	63.4544
9.2667	20.0000	70.8499	34.2001	63.4427
9.3333	20.0000	70.9163	34.2001	63.4310
9.4000	20.0000	70.9813	34.2001	63.4195
9.4667	20.0000	71.0450	34.2001	63.4081

เวลา (นาทื)	ความสูงของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 3 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 2 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 4 (cm)
9.5333	20.0000	71.1075	34.2000	63.3969
9.6000	20.0000	71.1687	34.2000	63.3858
9.6667	20.0000	71.2287	34.2000	63.3748
9.7333	20.0000	71.2876	34.2000	63.3641
9.8000	20.0000	71.3453	34.2000	63.3535
9.8667	20.0000	71.4018	34.2000	63.3431
9.9333	20.0000	71.4572	34.2000	63.3329
10.0000	20.0000	71.5115	34.2000	63.3229
10.0667	20.0000	71.5647	34.2000	63.3132
10.1333	20.0000	71.6169	34.2000	63.3037
10.2000	20.0000	71.6681	34.2000	63.2944
10.2667	20.0000	71.7182	34.2000	63.2853
10.3333	20.0000	71.7673	34.2000	63.2764
10.4000	20.0000	71.8155	34.2000	63.2678
10.4667	20.0000	71.8627	34.2000	63.2595
10.5333	20.0000	71.9090	34.2000	63.2514
10.6000	20.0000	71.9544	34.2000	63.2435
10.6667	20.0000	71.9988	34.2000	63.2358
10.7333	20.0000	72.0424	34.2000	63.2284
10.8000	20.0000	72.0851	34.2000	63.2212
10.8667	20.0000	72.1270	34.2000	63.2143
10.9333	20.0000	72.1681	34.2000	63.2076
11.0000	20.0000	72.2083	34.2000	63.2011
11.0667	20.0000	72.2477	34.2000	63.1949
11.1333	20.0000	72.2864	34.2000	63.1889
11.2000	20.0000	72.3243	34.2000	63.1831
11.2667	20.0000	72.3614	34.2000	63.1775
11.3333	20.0000	72.3978	34.2000	63.1721
11.4000	20.0000	72.4335	34.2000	63.1670

เวลา (นาทื)	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ
	Tank 1 (cm)	Tank 3 (cm)	Tank 2 (cm)	Tank 4 (cm)
11.4667	20.0000	72.4685	34.2000	63.1621
11.5333	20.0000	72.5028	34.2000	63.1574
11.6000	20.0000	72.5364	34.2000	63.1528
11.6667	20.0000	72.5693	34.2000	63.1485
11.7333	20.0000	72.6016	34.2000	63.1444
11.8000	20.0000	72.6333	34.2000	63.1404
11.8667	20.0000	72.6643	34.2000	63.1367
11.9333	20.0000	72.6947	34.2000	63.1331
12.0000	20.0000	72.7245	34.2000	63.1297
12.0667	20.0000	72.7537	34.2000	63.1264
12.1333	20.0000	72.7824	34.2000	63.1234
12.2000	20.0000	72.8104	34.2000	63.1205
12.2667	20.0000	72.8380	34.2000	63.1177
12.3333	20.0000	72.8649	34.2000	63.1151
12.4000	20.0000	72.8914	34.2000	63.1126
12.4667	20.0000	72.9173	34.2000	63.1103
12.5333	20.0000	72.9427	34.2000	63.1081
12.6000	20.0000	72.9676	34.2000	63.1061
12.6667	20.0000	72.9920	34.2000	63.1041
12.7333	20.0000	73.0159	34.2000	63.1023
12.8000	20.0000	73.0393	34.2000	63.1006
12.8667	20.0000	73.0623	34.2000	63.0990
12.9333	20.0000	73.0849	34.2000	63.0976
13.0000	20.0000	73.1069	34.2000	63.0962
13.0667	20.0000	73.1286	34.2000	63.0949
13.1333	20.0000	73.1498	34.2000	63.0938
13.2000	20.0000	73.1706	34.2000	63.0927
13.2667	20.0000	73.1910	34.2000	63.0917
13.3333	20.0000	73.2110	34.2000	63.0908

เวลา (นาทื)	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ
	Tank 1 (cm)	Tank 3 (cm)	Tank 2 (cm)	Tank 4 (cm)
13.4000	20.0000	73.2305	34.2000	63.0900
13.4667	20.0000	73.2497	34.2000	63.0892
13.5333	20.0000	73.2686	34.2000	63.0885
13.6000	20.0000	73.2870	34.2000	63.0879
13.6667	20.0000	73.3051	34.2000	63.0874
13.7333	20.0000	73.3228	34.2000	63.0869
13.8000	20.0000	73.3402	34.2000	63.0865
13.8667	20.0000	73.3572	34.2000	63.0861
13.9333	20.0000	73.3739	34.2000	63.0858
14.0000	20.0000	73.3902	34.2000	63.0855
14.0667	20.0000	73.4063	34.2000	63.0853
14.1333	20.0000	73.4220	34.2000	63.0852
14.2000	20.0000	73.4374	34.2000	63.0850
14.2667	20.0000	73.4525	34.2000	63.0849
14.3333	20.0000	73.4673	34.2000	63.0849
14.4000	20.0000	73.4818	34.2000	63.0849
14.4667	20.0000	73.4960	34.2000	63.0849
14.5333	20.0000	73.5100	34.2000	63.0849
14.6000	20.0000	73.5236	34.2000	63.0850
14.6667	20.0000	73.5370	34.2000	63.0851
14.7333	20.0000	73.5502	34.2000	63.0852
14.8000	20.0000	73.5630	34.2000	63.0854
14.8667	20.0000	73.5756	34.2000	63.0855
14.9333	20.0000	73.5880	34.2000	63.0857
15.0000	20.0000	73.6001	34.2000	63.0859
15.0667	20.0000	73.6120	34.2000	63.0861
15.1333	20.0000	73.6236	34.2000	63.0863
15.2000	20.0000	73.6350	34.2000	63.0866
15.2667	20.0000	73.6462	34.2000	63.0868

เวลา (นาทื)	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ
	Tank 1 (cm)	Tank 3 (cm)	Tank 2 (cm)	Tank 4 (cm)
15.3333	20.0000	73.6572	34.2000	63.0871
15.4000	20.0000	73.6679	34.2000	63.0874
15.4667	20.0000	73.6785	34.2000	63.0876
15.5333	20.0000	73.6888	34.2000	63.0879
15.6000	20.0000	73.6989	34.2000	63.0882
15.6667	20.0000	73.7089	34.2000	63.0885
15.7333	20.0000	73.7186	34.2000	63.0888
15.8000	20.0000	73.7281	34.2000	63.0891
15.8667	20.0000	73.7375	34.2000	63.0894
15.9333	20.0000	73.7466	34.2000	63.0897
16.0000	20.0000	73.7556	34.2000	63.0900
16.0667	20.0000	73.7644	34.2000	63.0903
16.1333	20.0000	73.7730	34.2000	63.0906
16.2000	20.0000	73.7815	34.2000	63.0909
16.2667	20.0000	73.7898	34.2000	63.0912
16.3333	20.0000	73.7979	34.2000	63.0915
16.4000	20.0000	73.8058	34.2000	63.0918
16.4667	20.0000	73.8137	34.2000	63.0921
16.5333	20.0000	73.8213	34.2000	63.0924
16.6000	20.0000	73.8288	34.2000	63.0927
16.6667	20.0000	73.8362	34.2000	63.0930
16.7333	20.0000	73.8434	34.2000	63.0933
16.8000	20.0000	73.8504	34.2000	63.0935
16.8667	20.0000	73.8573	34.2000	63.0938
16.9333	20.0000	73.8641	34.2000	63.0941
17.0000	20.0000	73.8708	34.2000	63.0943
17.0667	20.0000	73.8773	34.2000	63.0946
17.1333	20.0000	73.8837	34.2000	63.0948
17.2000	20.0000	73.8899	34.2000	63.0950

เวลา (นาทื)	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ	ความสูงของน้ำ
	Tank 1 (cm)	Tank 3 (cm)	Tank 2 (cm)	Tank 4 (cm)
17.2667	20.0000	73.8961	34.2000	63.0953
17.3333	20.0000	73.9021	34.2000	63.0955
17.4000	20.0000	73.9080	34.2000	63.0957
17.4667	20.0000	73.9138	34.2000	63.0959
17.5333	20.0000	73.9195	34.2000	63.0961
17.6000	20.0000	73.9250	34.2000	63.0963
17.6667	20.0000	73.9305	34.2000	63.0965
17.7333	20.0000	73.9358	34.2000	63.0967
17.8000	20.0000	73.9410	34.2000	63.0969
17.8667	20.0000	73.9462	34.2000	63.0971
17.9333	20.0000	73.9512	34.2000	63.0973
18.0000	20.0000	73.9561	34.2000	63.0974
18.0667	20.0000	73.9609	34.2000	63.0976
18.1333	20.0000	73.9657	34.2000	63.0977
18.2000	20.0000	73.9703	34.2000	63.0979
18.2667	20.0000	73.9749	34.2000	63.0980
18.3333	20.0000	73.9793	34.2000	63.0982
18.4000	20.0000	73.9837	34.2000	63.0983
18.4667	20.0000	73.9880	34.2000	63.0984
18.5333	20.0000	73.9922	34.2000	63.0985
18.6000	20.0000	73.9963	34.2000	63.0987
18.6667	20.0000	74.0003	34.2000	63.0988
18.7333	20.0000	74.0043	34.2000	63.0989
18.8000	20.0000	74.0081	34.2000	63.0990
18.8667	20.0000	74.0119	34.2000	63.0991
18.9333	20.0000	74.0157	34.2000	63.0992
19.0000	20.0000	74.0193	34.2000	63.0992
19.0667	20.0000	74.0229	34.2000	63.0993
19.1333	20.0000	74.0264	34.2000	63.0994

เวลา (นาทื)	ความสูงของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 3 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 2 (cm)	ความสูงของน้ำ Tank 4 (cm)
19.2000	20.0000	74.0298	34.2000	63.0995
19.2667	20.0000	74.0332	34.2000	63.0996
19.3333	20.0000	74.0365	34.2000	63.0996
19.4000	20.0000	74.0397	34.2000	63.0997
19.4667	20.0000	74.0429	34.2000	63.0997
19.5333	20.0000	74.0460	34.2000	63.0998
19.6000	20.0000	74.0491	34.2000	63.0998
19.6667	20.0000	74.0521	34.2000	63.0999
19.7333	20.0000	74.0550	34.2000	63.0999
19.8000	20.0000	74.0579	34.2000	63.1000
19.8667	20.0000	74.0607	34.2000	63.1000
19.9333	20.0000	74.0634	34.2000	63.1001
20.0000	20.0000	74.0661	34.2000	63.1001

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ซ

ข้อมูลการทดลองของการควบคุมระดับของเหลวในกรณีต่างๆ

ตารางที่ ซ-1 ข้อมูลการทดลองในการควบคุมแบบ PID กรณีการควบคุมระดับของเหลวถังที่ 1
และ 3

เวลา (นาที)	ความสูง ของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูง ของน้ำ Tank 3 (cm)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 1 (%Open valve)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 2 (%Open valve)
0.0000	20.1000	20.3075	50.0000	50.0000
.0667	21.2168	23.4668	100.0000	100.0000
.1333	24.8856	26.6260	100.0000	100.0000
.2000	28.4524	29.5814	100.0000	100.0000
.2667	32.0193	32.5368	100.0000	100.0000
.3333	35.4842	35.4922	72.5988	91.7249
.4000	38.9492	38.4476	41.2952	65.2794
.4667	42.4141	41.0973	28.9810	41.9931
.5333	43.6370	43.9508	29.6435	34.7406
.6000	48.7325	46.4986	34.5182	37.0336
.6667	51.7898	49.0464	39.9704	37.9000
.7333	54.1532	51.6960	44.7772	41.6877
.8000	50.6550	54.4345	48.7348	46.3587
.8667	49.1402	49.6578	51.6392	50.1804
.9333	49.6497	49.3521	52.1318	53.5266
1.0000	50.9746	50.0655	52.7603	55.1063
1.0667	51.1784	50.6769	53.5246	55.8028
1.1333	50.3631	50.5750	52.6923	56.6351
1.2000	49.5478	49.8616	52.3696	55.8709
1.2667	49.8535	49.6578	50.8919	56.7712
1.3333	50.3631	50.0655	50.4334	54.9200

เวลา (นาที)	ความสูง ของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูง ของน้ำ Tank 3 (cm)	ตัวแปรปรับ กระบวนการณ์ตัวที่ 1 (%Open valve)	ตัวแปรปรับ กระบวนการณ์ตัวที่ 2 (%Open valve)
1.4000	50.8726	50.4731	48.8198	54.5974
1.4667	50.4650	50.3712	48.2253	53.1198
1.5333	49.6497	50.0655	46.4758	52.6613
1.6000	49.8535	49.7597	45.1680	51.6253
1.6667	50.2612	49.8616	44.3697	51.0989
1.7333	50.5669	49.4540	44.1489	49.9949
1.8000	50.6688	50.5750	45.1510	49.4006
1.8667	50.1593	50.7788	45.7795	48.2287
1.9333	49.8535	50.1674	45.9663	49.8763
2.0000	49.7516	49.5559	46.7986	47.7533
2.0667	49.9555	49.8616	47.7668	47.7364
2.1333	50.3631	50.3712	47.7668	48.3650
2.2000	50.3631	50.4731	47.7668	47.3969
2.2667	50.4650	50.1674	47.7668	49.2484
2.3333	50.3631	49.9636	47.7668	50.2167
2.4000	50.4650	49.7597	47.2743	50.2167
2.4667	50.4650	49.8616	45.2870	50.2167
2.5333	50.5669	50.0655	44.8284	50.2167
2.6000	50.3631	50.2693	45.5248	50.2167
2.6667	50.0574	50.3712	45.2021	50.2167
2.7333	49.9555	50.2693	45.4569	50.2167
2.8000	49.8535	50.0655	44.6246	50.2167
2.8667	49.8535	49.9636	44.8794	48.5562
2.9333	49.9555	49.8616	45.2021	48.0298
3.0000	49.9555	49.7597	45.0153	48.0808
3.0667	50.1593	49.8616	45.4060	48.1998

เวลา (นาที)	ความสูง ของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูง ของน้ำ Tank 3 (cm)	ตัวแปรปรับ กระบวนการณ์ตัวที่ 1 (%Open valve)	ตัวแปรปรับ กระบวนการณ์ตัวที่ 2 (%Open valve)
3.1333	50.2612	50.2693	45.2871	47.8093
3.2000	50.2612	50.2693	45.7457	48.5737
3.2667	50.3631	50.2693	46.2722	48.3190
3.3333	50.4650	50.2693	46.2892	48.6419
3.4000	50.3631	50.2693	46.3062	49.6101
3.4667	50.3631	50.2693	46.3232	49.5592
3.5333	50.2612	50.2693	46.3402	49.5084
3.6000	50.1593	50.3712	47.5122	50.0350
3.6667	50.1593	50.2693	47.6651	50.0521
3.7333	50.0574	50.0655	47.6651	49.1827
3.8000	49.9555	50.3712	47.6651	50.6605
3.8667	49.8535	50.2693	47.6651	48.2287
3.9333	49.9555	50.0655	47.6651	49.8763
4.0000	49.9555	50.0655	47.6651	47.7533

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๗-2 ข้อมูลการทดลองในการควบคุมแบบ PID กรณีการควบคุมระดับของเหลวถึงที่ 1
และ 2

เวลา (นาที)	ความสูง ของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูง ของน้ำ Tank 2 (cm)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 1 (%Open valve)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 2 (%Open valve)
0.0000	20.5000	40.2310	50.0000	50.0000
.0667	24.8856	42.5152	50.0000	100.0000
.1333	28.7582	44.1999	18.9981	100.0000
.2000	32.7327	45.9500	15.0543	100.0000
.2667	36.6052	46.8717	11.9260	100.0000
.3333	40.5797	47.8911	9.7151	100.0000
.4000	44.3504	48.8085	9.1352	81.1094
.4667	48.4268	49.7259	8.5553	54.6978
.5333	53.1566	50.2356	9.0966	39.1567
.6000	54.2312	49.9394	10.8612	33.8065
.6667	50.1654	50.2452	12.7277	35.3862
.7333	48.4569	50.2452	15.8174	37.2037
.8000	48.1321	50.3472	19.0091	43.8110
.8667	48.6779	50.0414	22.8124	48.1762
.9333	49.5546	50.1433	27.8388	56.8217
1.0000	50.5669	50.0414	31.7440	52.8303
1.0667	50.1593	50.0414	36.6686	52.4737
1.1333	49.4459	49.9394	41.4912	50.4526
1.2000	49.3440	49.8375	46.1100	50.6056
1.2667	49.5478	49.9394	49.8113	49.7394
1.3333	49.8535	49.9394	55.4494	48.8733
1.4000	50.1593	50.0414	57.2140	48.0072
1.4667	50.0574	50.0414	64.7888	47.1410

เวลา (นาที)	ความสูง ของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูง ของน้ำ Tank 2 (cm)	ตัวแปรปรับ กระบวนการณ์ตัวที่ 1 (%Open valve)	ตัวแปรปรับ กระบวนการณ์ตัวที่ 2 (%Open valve)
1.5333	49.8535	50.1433	62.6799	47.4299
1.6000	49.6497	50.0414	64.4444	48.4321
1.6667	49.5478	50.1433	66.0051	48.4832
1.7333	49.5478	50.0414	67.3620	49.7571
1.8000	49.4459	50.1433	67.9033	49.5025
1.8667	49.6497	50.1433	68.1389	50.4028
1.9333	49.7516	50.1433	67.4570	51.4390
2.0000	49.8535	50.1433	68.2023	52.0335
2.0667	49.8535	50.1433	68.2339	54.4285
2.1333	50.1593	50.2452	67.4501	54.7853
2.2000	50.0574	50.2452	66.9721	56.2971
2.2667	50.0574	50.1433	65.6787	56.7898
2.3333	49.9555	50.2452	65.3026	57.2824
2.4000	49.8535	50.2452	64.2130	57.7751
2.4667	49.9555	50.1433	63.5312	57.6903
2.5333	49.9555	50.2452	61.5241	58.6925
2.6000	49.6497	50.2452	61.6578	58.0302
2.6667	49.5478	50.2452	61.6578	56.6545
2.7333	49.4459	50.2452	56.2167	56.2300
2.8000	49.5478	50.2452	56.9619	54.0050
2.8667	49.6497	50.2452	57.2994	55.5508
2.9333	49.8535	50.2452	57.1272	54.4129
3.0000	49.9555	50.2452	58.7898	53.7166
3.0667	50.1593	50.2452	58.9234	52.9524
3.1333	50.2612	50.2452	59.0571	52.1202
3.2000	49.9555	50.4491	59.1907	51.2201

เวลา (นาที)	ความสูง ของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูง ของน้ำ Tank 2 (cm)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 1 (%Open valve)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 2 (%Open valve)
3.2667	49.6497	50.1433	61.7707	50.2521
3.3333	49.3440	50.1433	59.2540	49.2161
3.4000	49.5478	50.0317	60.5089	49.2671
3.4667	49.8535	50.0317	60.1329	48.2311
3.5333	50.0574	50.0317	59.0433	48.2822
3.6000	50.1593	50.0317	60.1962	48.4012
3.6667	50.1593	50.6433	59.9527	49.1656
3.7333	50.0574	50.4394	59.9946	49.4884
3.8000	49.9555	50.3375	60.0365	49.4884
3.8667	50.0574	50.4394	60.0783	49.4884
3.9333	50.1593	50.5414	60.1202	49.4884
4.0000	50.9746	50.4394	60.1621	49.4884

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๙-3 ข้อมูลการทดลองในการควบคุมแบบ PID กรณีการควบคุมระดับของเหลวถึงที่ 3
และ 4

เวลา (นาที)	ความสูง ของน้ำ Tank 3 (cm)	ความสูง ของน้ำ Tank 4 (cm)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 1 (%Open valve)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 2 (%Open valve)
0.0000	20.5113	40.2421	50.0000	50.0000
.0667	23.7725	41.0668	57.4494	26.9042
.1333	26.9317	42.1388	76.6956	9.1200
.2000	29.9890	43.4583	90.2345	9.0125
.2667	33.1483	44.6954	97.8650	15.2162
.3333	36.2056	45.9324	98.1213	18.1265
.4000	39.0591	46.6746	97.5767	22.2222
.4667	42.0145	47.3344	91.7156	60.8418
.5333	44.8680	48.0766	83.7070	75.7012
.6000	47.6196	48.6539	74.7828	70.5828
.6667	50.3712	49.3136	66.0182	59.1927
.7333	52.5460	49.8084	58.2558	52.5635
.8000	54.2590	50.0558	52.0684	52.8281
.8667	52.5450	50.4682	47.7560	56.2898
.9333	49.5559	50.5506	45.3714	58.9374
1.0000	48.7899	50.6331	44.7640	59.3647
1.0667	50.0655	50.7981	45.6365	58.4097
1.1333	50.1236	50.7156	47.6035	57.4341
1.2000	50.2693	50.7981	50.2483	57.1195
1.2667	50.5750	50.7981	53.1703	57.3453
1.3333	50.2693	50.7156	56.0220	57.6807
1.4000	50.0655	50.7981	58.5330	57.8391
1.4667	49.3456	50.7156	60.5214	57.8018

เวลา (นาที)	ความสูง ของน้ำ Tank 3 (cm)	ความสูง ของน้ำ Tank 4 (cm)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 1 (%Open valve)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 2 (%Open valve)
1.5333	49.7597	50.7981	61.8940	57.6942
1.6000	49.8616	50.7156	62.6378	57.6262
1.6667	50.2693	50.7981	62.8054	57.6243
1.7333	50.2693	50.7981	62.4961	57.6562
1.8000	50.2693	50.6331	61.8369	57.6827
1.8667	50.3712	50.7981	60.9640	57.6883
1.9333	50.2693	50.7981	60.0077	57.6798
2.0000	50.1674	50.7156	59.0801	57.6703
2.0667	49.8616	50.7156	58.2681	57.6667
2.1333	49.8616	51.0455	57.6294	57.6686
2.2000	49.7597	50.6331	57.1928	57.6718
2.2667	49.4540	50.6331	56.9613	57.6735
2.3333	49.9636	50.4682	56.9165	57.6733
2.4000	50.2693	50.4682	57.0253	57.6722
2.4667	50.2693	50.4682	57.2460	57.6716
2.5333	50.3712	50.3032	57.5339	57.6715
2.6000	50.3712	50.3032	57.8468	57.6718
2.6667	50.2693	50.2208	58.1484	57.6720
2.7333	50.1674	50.3857	58.4109	57.6721
2.8000	49.9636	50.3032	58.6159	57.6720
2.8667	49.8616	50.3857	58.7547	57.6719
2.9333	49.6578	50.4682	58.8266	57.6719
3.0000	49.8616	50.3857	58.8380	57.6719
3.0667	49.9636	50.4682	58.8000	57.6720
3.1333	50.0655	50.4682	58.7262	57.6720
3.2000	50.1674	50.4682	58.6313	57.6720

เวลา (นาที)	ความสูง ของน้ำ Tank 3 (cm)	ความสูง ของน้ำ Tank 4 (cm)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 1 (%Open valve)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 2 (%Open valve)
3.2667	50.0655	50.3857	58.5290	57.6720
3.3333	50.4731	50.4682	58.4309	57.6720
3.4000	50.0655	50.3857	58.3461	57.6720
3.4667	50.1674	50.3857	58.2803	57.6720
3.5333	49.7597	50.4682	58.2362	57.6720
3.6000	49.7597	50.7156	58.2139	57.6720
3.6667	49.6578	50.4682	58.2113	57.6720
3.7333	49.8616	50.3857	58.2245	57.6720
3.8000	49.9636	50.5506	58.2491	57.6720
3.8667	49.9636	50.4682	58.2804	57.6720
3.9333	50.2693	50.4682	58.3139	57.6720
4.0000	50.2693	50.4682	58.3457	57.6720

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๙-4 ข้อมูลการทดลองในการควบคุมแบบ MPC กรณีการควบคุมระดับของเหลวถังที่ 1 และ 3

เวลา (นาที่)	ความสูง ของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูง ของน้ำ Tank 3 (cm)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 1 (%Open valve)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 2 (%Open valve)
0.0000	20.1230	20.3157	50.0000	50.0000
.0667	27.5352	22.1419	100.0000	100.0000
.1333	31.1021	24.8935	100.0000	100.0000
.2000	34.4651	29.3776	100.0000	100.0000
.2667	36.5546	33.7597	100.0000	100.0000
.3333	39.3568	38.0400	100.0000	100.0000
.4000	44.1466	42.1164	98.5569	100.0000
.4667	47.5096	46.0909	79.7254	100.0000
.5333	50.5669	49.8616	60.3983	100.0000
.6000	52.2994	51.8999	51.4781	81.2005
.6667	52.4013	51.6960	51.4781	59.2494
.7333	51.6879	51.1865	54.4515	47.9198
.8000	50.8726	50.6769	55.9382	46.5036
.8667	50.3631	50.1674	58.9116	52.8765
.9333	49.7612	49.8616	60.3983	57.1251
1.0000	49.9650	49.4540	62.8761	61.3737
1.0667	49.8631	49.3521	63.3717	62.0818
1.1333	50.2707	49.7597	62.3805	61.3737
1.2000	50.0669	49.5559	62.3805	61.3737
1.2667	50.1688	49.5559	61.8850	60.6656
1.3333	50.1688	49.5559	61.8850	59.2494
1.4000	50.3726	49.6578	61.3894	59.2494
1.4667	50.4746	49.5559	60.8938	58.5413

เวลา (นาที)	ความสูง ของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูง ของน้ำ Tank 3 (cm)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 1 (%Open valve)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 2 (%Open valve)
1.5333	50.5765	49.7597	60.8938	57.8332
1.6000	50.4746	49.8616	60.8938	57.1251
1.6667	50.7803	49.7597	60.3983	56.4170
1.7333	50.2707	49.8616	60.3983	56.4170
1.8000	50.2707	49.9636	56.4337	55.7089
1.8667	50.2707	49.8616	59.9027	56.4170
1.9333	50.2707	49.9636	59.9027	53.5846
2.0000	50.2707	50.0655	59.4071	55.0008
2.0667	50.2707	49.8616	59.4071	57.1251
2.1333	50.2707	50.0655	58.9116	57.1251
2.2000	50.2707	50.1674	59.4071	57.8332
2.2667	50.2707	50.2693	59.4071	59.9575
2.3333	49.8631	50.1674	58.4160	60.6656
2.4000	50.2707	50.1674	58.4160	62.0818
2.4667	50.2707	50.1674	58.4160	62.0818
2.5333	50.2707	50.1674	57.9204	61.3737
2.6000	50.2707	50.2693	58.4160	61.3737
2.6667	50.0669	50.2693	58.4160	60.6656
2.7333	50.1688	50.4731	57.9204	60.6656
2.8000	50.0669	50.4731	57.4249	59.2494
2.8667	50.0669	49.8616	57.4249	61.3737
2.9333	50.0669	50.3712	57.9204	55.7089
3.0000	50.0669	50.3712	58.4160	59.2494
3.0667	50.0669	50.3712	52.4692	59.2494
3.1333	50.0669	50.1674	58.4160	59.2494
3.2000	50.0669	50.3712	60.3983	58.5413

เวลา (นาที)	ความสูง ของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูง ของน้ำ Tank 3 (cm)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 1 (%Open valve)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 2 (%Open valve)
3.2667	50.0669	49.1483	61.3894	57.1251
3.3333	50.0669	49.4540	61.8850	57.8332
3.4000	50.0669	49.4540	61.3894	57.8332
3.4667	50.0669	49.3521	62.8761	57.1251
3.5333	50.0669	49.3521	62.8761	57.8332
3.6000	50.0669	49.4540	62.3805	57.8332
3.6667	50.0669	49.6578	61.8850	59.9575
3.7333	50.0669	49.6578	58.4160	57.1251
3.8000	50.0669	49.8616	60.3983	56.4170
3.8667	50.0669	50.0655	59.9027	55.7089
3.9333	50.0669	50.5750	59.4071	56.4170
4.0000	50.0669	50.0655	58.9116	55.7089

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๕-5 ข้อมูลการทดลองในการควบคุมแบบ MPC กรณีการควบคุมระดับของเหลวถึงที่ 1 และ 2

เวลา (นาที่)	ความสูง ของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูง ของน้ำ Tank 2 (cm)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 1 (%Open valve)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 2 (%Open valve)
0.0000	20.5000	40.3265	50.0000	50.0000
.0667	23.9684	43.1256	46.3362	100.0000
.1333	26.3123	45.9500	40.5060	100.0000
.2000	29.7773	44.5272	35.5785	100.0000
.2667	32.7327	47.0756	29.8759	100.0000
.3333	36.6052	47.6872	27.8173	100.0000
.4000	39.9683	48.4007	25.7588	100.0000
.4667	43.3313	49.0123	23.2607	100.0000
.5333	46.4905	49.6239	20.4270	82.6694
.6000	49.6497	50.0317	22.7877	61.2650
.6667	51.5860	48.9104	24.1417	46.2946
.7333	51.7898	50.3631	29.8914	45.3424
.8000	50.9746	50.3631	35.6293	50.7822
.8667	50.0574	50.2612	43.3570	56.1382
.9333	49.5478	50.3631	45.6706	60.3019
1.0000	49.3440	50.2612	48.6554	60.1762
1.0667	49.2421	50.2612	51.5243	62.8961
1.1333	49.4459	50.2612	51.8599	60.7515
1.2000	49.6497	50.2612	52.6350	60.0087
1.2667	49.7516	50.2612	54.1853	58.5231
1.3333	49.9555	50.1593	52.7508	57.1632
1.4000	50.0574	50.2612	52.5310	56.4623
1.4667	50.2612	50.3631	52.8665	54.3176

เวลา (นาที)	ความสูง ของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูง ของน้ำ Tank 2 (cm)	ตัวแปรปรับ กระบวนการณ์ตัวที่ 1 (%Open valve)	ตัวแปรปรับ กระบวนการณ์ตัวที่ 2 (%Open valve)
1.5333	49.7516	50.1593	53.8615	54.2758
1.6000	50.3631	50.1593	53.0863	55.0185
1.6667	50.3631	50.1593	53.0863	55.0185
1.7333	50.3631	49.9555	53.8615	54.2758
1.8000	50.3631	50.1593	54.3010	55.6776
1.8667	50.1593	50.1593	54.3010	55.6776
1.9333	50.1593	50.1593	54.3010	55.6776
2.0000	50.1593	50.1593	54.3010	55.6776
2.0667	50.2612	50.0574	55.2959	55.6357
2.1333	50.2612	49.9555	54.0812	54.9767
2.2000	50.1593	50.0574	54.3010	55.6776
2.2667	50.2612	49.8535	55.5157	56.3366
2.3333	50.1593	49.9555	55.5157	56.3366
2.4000	50.0574	50.0574	55.2959	55.6357
2.4667	50.1593	49.8535	54.3010	55.6776
2.5333	50.1593	49.9555	57.5055	56.2529
2.6000	50.1593	49.8535	55.2959	55.6357
2.6667	50.0574	49.9555	56.6146	59.8412
2.7333	49.9555	49.8535	54.3010	55.6776
2.8000	50.0574	49.8535	53.5259	56.4204
2.8667	49.7516	49.8535	53.3061	55.7195
2.9333	49.9555	49.9555	53.7457	57.1213
3.0000	49.9555	49.9555	52.7508	57.1632
3.0667	50.4650	50.4650	52.5310	56.4623
3.1333	49.9555	49.9555	50.9807	57.9478
3.2000	50.0574	50.0574	48.5514	56.6298

เวลา (นาที)	ความสูง ของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูง ของน้ำ Tank 2 (cm)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 1 (%Open valve)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 2 (%Open valve)
3.2667	49.7516	49.7516	49.7660	57.2888
3.3333	49.9555	49.9555	51.7559	57.2050
3.4000	49.9555	49.9555	52.7508	57.1632
3.4667	49.9555	49.9555	51.9756	57.9060
3.5333	49.8535	49.8535	52.9706	57.8641
3.6000	49.8535	49.8535	52.7508	57.1632
3.6667	49.8535	49.8535	52.7508	57.1632
3.7333	49.8535	49.8535	54.9604	57.7803
3.8000	49.8535	49.8535	52.9706	57.8641
3.8667	49.9555	49.9555	52.9706	57.8641
3.9333	49.8535	49.8535	53.9655	57.8222
4.0000	49.8535	49.8535	56.9502	57.6966

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๕-6 ข้อมูลการทดลองในการควบคุมแบบ MPC กรณีการควบคุมระดับของเหลวถังที่ 3 และ 4

เวลา (นาที่)	ความสูง ของน้ำ Tank 3 (cm)	ความสูง ของน้ำ Tank 4 (cm)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 1 (%Open valve)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 2 (%Open valve)
0.0000	20.1545	40.2346	50.0000	50.0000
.0667	24.0782	41.3966	100.0000	45.8486
.1333	27.8489	42.2178	100.0000	37.5536
.2000	33.6578	42.1159	100.0000	28.8909
.2667	38.3457	42.4217	100.0000	20.6412
.3333	42.8298	42.8295	100.0000	13.1153
.4000	46.6005	43.2372	100.0000	12.3833
.4667	47.9000	43.7469	90.9135	12.4294
.5333	49.5150	44.3586	68.6015	11.2230
.6000	50.5447	44.9702	50.7073	12.1331
.6667	51.4950	45.8877	45.7701	13.2233
.7333	50.6565	46.6012	48.2207	14.3918
.8000	50.1330	47.5187	51.1539	23.9714
.8667	49.5559	48.1303	54.9783	35.3813
.9333	49.0464	48.5381	57.0946	41.8612
1.0000	49.1387	49.0478	60.6589	49.1823
1.0667	49.3425	49.0478	58.0973	50.3191
1.1333	49.4445	49.0478	57.4663	52.5776
1.2000	49.5464	49.0478	56.9095	53.5666
1.2667	49.7502	49.0478	55.7216	56.8141
1.3333	49.9540	49.0478	55.0906	59.0726
1.4000	49.9540	50.4749	54.1254	58.5117
1.4667	50.0559	50.0671	61.2165	65.2569

เวลา (นาที)	ความสูง ของน้ำ Tank 3 (cm)	ความสูง ของน้ำ Tank 4 (cm)	ตัวแปรปรับ กระบวนการณ์ตัวที่ 1 (%Open valve)	ตัวแปรปรับ กระบวนการณ์ตัวที่ 2 (%Open valve)
1.5333	50.1578	50.3730	53.7169	56.9619
1.6000	51.0134	50.3730	52.7517	56.4010
1.6667	50.3616	50.3730	51.8606	54.5708
1.7333	50.4636	50.2710	55.3132	55.2642
1.8000	50.3616	50.2710	52.9000	53.8621
1.8667	50.2597	50.1691	52.9000	53.8621
1.9333	49.9540	50.1691	54.8306	54.9838
2.0000	49.7502	50.2710	55.2390	56.5337
2.0667	49.6483	50.0671	56.2785	55.8251
2.1333	49.3425	50.2710	56.8353	54.8360
2.2000	49.5464	50.0671	58.2832	55.6773
2.2667	49.3425	49.8633	58.7658	55.9577
2.3333	49.2406	49.0478	58.5807	67.6632
2.4000	49.1387	49.0478	58.6916	57.2272
2.4667	49.0368	49.0478	59.8053	55.2491
2.5333	49.1387	50.2710	59.2485	56.2381
2.6000	49.3425	50.3730	59.2485	56.2381
2.6667	49.4445	50.2710	58.2090	56.9467
2.7333	49.5464	50.2710	58.8400	54.6883
2.8000	49.5464	50.3730	57.8006	55.3969
2.8667	49.5464	50.4749	57.3179	55.1165
2.9333	49.7502	50.5768	56.7611	56.1055
3.0000	49.7502	50.5768	57.2437	56.3859
3.0667	49.8521	50.7807	56.2043	57.0945
3.1333	50.0559	50.7807	55.2390	56.5337
3.2000	49.9540	50.8827	55.3132	55.2642

เวลา (นาที)	ความสูง ของน้ำ Tank 3 (cm)	ความสูง ของน้ำ Tank 4 (cm)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 1 (%Open valve)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 2 (%Open valve)
3.2667	50.0559	50.7807	54.8306	54.9838
3.3333	50.2597	50.5768	54.3479	54.7034
3.4000	50.3616	50.6788	54.2737	55.9728
3.4667	50.2597	50.5768	53.7169	56.9619
3.5333	50.2597	50.5768	52.6775	57.6705
3.6000	50.3616	50.8827	52.7517	56.4010
3.6667	50.3616	50.5768	53.5685	59.5008
3.7333	50.6674	50.6788	52.6775	57.6705
3.8000	50.3616	50.4749	52.6775	57.6705
3.8667	50.3616	50.3730	51.7122	57.1096
3.9333	50.1578	50.3730	52.8259	55.1316
4.0000	50.1578	50.2710	52.1206	58.6595

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๗-7 ข้อมูลการทดลองในการควบคุมแบบ mp-MPC กรณีการควบคุมระดับของเหลวถึง
ที่ 1 และ 3

เวลา (นาที่)	ความสูง ของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูง ของน้ำ Tank 3 (cm)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 1 (%Open valve)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 2 (%Open valve)
0.0000	20.0000	20.0000	50.0000	50.0000
.0667	25.1660	28.5450	100.0000	100.0000
.1333	30.5150	33.3521	100.0000	93.9253
.2000	38.1403	37.4285	100.0000	85.4053
.2667	41.1976	41.6069	83.3447	78.5901
.3333	43.8473	45.4795	70.7108	73.1375
.4000	46.2931	48.2311	62.7276	68.7741
.4667	47.8218	49.6578	57.6860	65.2813
.5333	49.2485	50.1674	57.6860	62.4843
.6000	49.9619	50.1674	57.6860	60.2437
.6667	50.4714	49.9636	57.6860	60.2437
.7333	50.7771	49.4540	57.6860	60.2437
.8000	50.8791	50.1674	57.6860	60.2437
.8667	50.9810	49.9636	57.6860	60.2437
.9333	51.0829	49.4540	57.6860	60.2437
1.0000	50.9810	50.1674	57.6860	60.2437
1.0667	50.4714	49.9636	57.6860	60.2437
1.1333	50.4714	49.4540	57.6860	60.2437
1.2000	50.2676	50.1674	57.6860	60.2437
1.2667	50.1181	49.9636	57.6860	60.2437
1.3333	50.1181	50.1674	57.6860	60.2437
1.4000	50.2676	50.1674	57.6860	60.2437
1.4667	50.1181	50.1674	57.6860	60.2437

เวลา (นาที)	ความสูง ของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูง ของน้ำ Tank 3 (cm)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 1 (%Open valve)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 2 (%Open valve)
1.5333	50.1181	50.1674	57.6860	60.2437
1.6000	50.4795	50.1674	57.6860	60.2437
1.6667	50.4714	50.1674	57.6860	60.2437
1.7333	50.2676	50.1674	57.6860	60.2437
1.8000	50.1181	50.1674	57.6860	60.2437
1.8667	50.1181	50.1674	57.6860	60.2437
1.9333	50.2676	50.1674	57.6860	60.2437
2.0000	50.1181	50.1674	57.6860	60.2437
2.0667	50.1181	50.1674	57.6860	60.2437
2.1333	50.1181	50.1674	57.6860	60.2437
2.2000	50.4795	50.1674	57.6860	60.2437
2.2667	50.4714	50.1674	57.6860	60.2437
2.3333	50.1181	50.1677	57.6860	60.2437
2.4000	50.4795	50.1677	57.6860	60.2437
2.4667	50.4714	50.1677	57.6860	60.2437
2.5333	50.2676	50.1679	57.6860	60.2437
2.6000	50.1181	50.1679	57.6860	60.2437
2.6667	50.1181	50.1679	57.6860	60.2437
2.7333	50.1181	50.1682	57.6860	60.2437
2.8000	50.2676	50.1682	57.6860	60.2437
2.8667	50.1181	50.1682	57.6860	60.2437
2.9333	50.1181	50.1685	57.6860	60.2437
3.0000	50.1181	50.1685	57.6860	60.2437
3.0667	50.4795	50.1685	57.6860	60.2437
3.1333	50.4714	50.1688	57.6860	60.2437
3.2000	50.1181	50.1688	57.6860	60.2437

เวลา (นาที)	ความสูง ของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูง ของน้ำ Tank 3 (cm)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 1 (%Open valve)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 2 (%Open valve)
3.2667	50.4795	50.1688	57.6860	60.2437
3.3333	50.4714	50.1690	57.6860	60.2437
3.4000	50.4795	50.1690	57.6860	60.2437
3.4667	50.4714	50.1690	57.6860	60.2437
3.5333	50.1181	50.1693	57.6860	60.2437
3.6000	50.4795	50.1693	57.6860	60.2437
3.6667	50.4714	50.1693	57.6860	60.2437
3.7333	50.4714	50.1696	57.6860	60.2437
3.8000	50.2676	50.1696	57.6860	60.2437
3.8667	50.1181	50.1696	57.6860	60.2437
3.9333	50.1181	50.1699	57.6860	60.2437
4.0000	50.4795	50.1699	57.6860	60.2437

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๗-8 ข้อมูลการทดลองในการควบคุมแบบ mp-MPC กรณีการควบคุมระดับของเหลวถึง
ที่ 1 และ 2

เวลา (นาทีก)	ความสูง ของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูง ของน้ำ Tank 2 (cm)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 1 (%Open valve)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 2 (%Open valve)
0.0000	20.0000	40.0000	50.0000	50.0000
.0667	25.2000	44.5272	2.5993	100.0000
.1333	32.6372	45.9543	10.4486	100.0000
.2000	34.7773	46.3620	15.6571	93.7065
.2667	38.1403	47.4833	19.2279	82.1034
.3333	41.0957	48.0949	21.7521	73.6828
.4000	44.2549	49.0123	23.5928	67.5692
.4667	46.9046	50.7452	24.9838	63.1283
.5333	49.0447	51.1530	26.0758	59.9002
.6000	49.9619	51.4588	26.9667	59.9002
.6667	50.4714	51.1530	27.7207	59.9002
.7333	50.9810	51.4588	28.3796	59.9002
.8000	50.8791	50.8859	28.9714	59.9002
.8667	50.9810	50.8859	29.5146	59.9002
.9333	50.8791	50.8859	30.0217	59.9002
1.0000	50.5733	50.8859	30.5010	59.9002
1.0667	50.3695	50.8859	30.9584	59.9002
1.1333	50.9810	51.0897	31.3978	59.9002
1.2000	50.8791	51.0897	31.8221	59.9002
1.2667	50.9810	50.7839	32.2333	59.9002
1.3333	50.8791	51.1917	32.6327	59.9002
1.4000	50.9810	51.2936	33.0214	59.9002
1.4667	50.8791	51.3955	33.4002	59.9002

เวลา (นาที)	ความสูง ของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูง ของน้ำ Tank 2 (cm)	ตัวแปรปรับ กระบวนการณ์ตัวที่ 1 (%Open valve)	ตัวแปรปรับ กระบวนการณ์ตัวที่ 2 (%Open valve)
1.5333	50.9810	51.0897	33.7697	59.9002
1.6000	50.8791	51.4975	34.1305	59.9002
1.6667	50.5733	51.2936	34.4828	59.9002
1.7333	50.3695	51.3955	34.8270	59.9002
1.8000	50.9810	50.5801	35.1634	59.9002
1.8667	50.8791	51.1917	35.4922	59.9002
1.9333	50.9810	50.2936	35.8136	59.9002
2.0000	50.8791	50.0897	36.1278	59.9002
2.0667	50.9810	49.5801	36.4351	59.9002
2.1333	50.8791	49.1723	36.7356	59.9002
2.2000	50.9810	49.2742	37.0294	59.9002
2.2667	50.8791	49.3762	37.3167	59.9002
2.3333	50.9810	49.5801	37.5976	59.9002
2.4000	50.8791	49.8859	37.9024	59.9002
2.4667	50.5733	49.8859	37.9024	59.9002
2.5333	50.3695	50.0897	37.9024	59.9002
2.6000	50.9810	50.0897	37.9024	59.9002
2.6667	50.8791	49.7839	37.9024	59.9002
2.7333	50.9810	50.1917	37.9024	59.9002
2.8000	50.8791	50.2936	37.9024	59.9002
2.8667	50.9810	49.5801	37.9024	59.9002
2.9333	50.8791	49.8859	37.9024	59.9002
3.0000	50.5733	49.8859	37.9024	59.9002
3.0667	50.3695	50.0897	37.9024	59.9002
3.1333	50.9810	50.0897	37.9024	59.9002
3.2000	50.8791	50.7839	37.9024	59.9002

เวลา (นาที)	ความสูง ของน้ำ Tank 1 (cm)	ความสูง ของน้ำ Tank 2 (cm)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 1 (%Open valve)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 2 (%Open valve)
3.2667	50.5733	51.1917	37.9024	59.9002
3.3333	49.5606	51.2936	37.9024	59.9002
3.4000	49.3613	51.3955	37.9024	59.9002
3.4667	49.9592	51.0897	37.9024	59.9002
3.5333	49.8595	51.4975	37.9024	59.9002
3.6000	49.9592	51.2936	37.9024	59.9002
3.6667	49.8595	51.3955	37.9024	59.9002
3.7333	49.9592	50.5801	37.9024	59.9002
3.8000	49.8595	51.1917	37.9024	59.9002
3.8667	49.9592	51.2936	37.9024	59.9002
3.9333	49.8595	51.0897	37.9024	59.9002
4.0000	49.5606	50.5801	37.9024	59.9002

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๙-9 ข้อมูลการทดลองในการควบคุมแบบ mp-MPC กรณีการควบคุมระดับของเหลวถึง
ที่ 3 และ 4

เวลา (นาที่)	ความสูง ของน้ำ Tank 3 (cm)	ความสูง ของน้ำ Tank 4 (cm)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 1 (%Open valve)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 2 (%Open valve)
0.0000	20.0000	40.0000	50.0000	50.0000
.0667	22.4678	40.1186	100.0000	10.9245
.1333	26.7279	41.2732	100.0000	10.8388
.2000	30.2948	42.0979	100.0000	14.1730
.2667	34.9827	42.9226	100.0000	16.6324
.3333	39.2629	43.7473	84.2111	18.5282
.4000	43.3394	44.5719	70.1991	20.0207
.4667	46.9062	45.2317	61.4461	21.2239
.5333	50.4731	45.7265	56.0345	22.2190
.6000	51.6960	46.4687	56.0345	23.0638
.6667	51.8999	46.7986	56.0345	23.7991
.7333	51.8999	47.2109	56.0345	24.4542
.8000	51.4922	47.5408	56.0345	25.0500
.8667	51.0846	48.0356	56.0345	25.6011
.9333	50.6769	48.2830	56.0345	26.1181
1.0000	50.0693	48.5304	56.0345	26.6087
1.0667	50.0693	48.8603	56.0345	27.0781
1.1333	50.0693	49.0252	56.0345	27.5302
1.2000	50.0693	49.3551	56.0345	27.9679
1.2667	50.0693	49.5201	56.0345	28.3930
1.3333	50.0693	49.6850	56.0345	28.8072
1.4000	50.0693	49.7675	56.0345	29.2115
1.4667	50.0693	49.8499	56.0345	29.6067

เวลา (นาที)	ความสูง ของน้ำ Tank 3 (cm)	ความสูง ของน้ำ Tank 4 (cm)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 1 (%Open valve)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 2 (%Open valve)
1.5333	50.0693	50.0149	56.0345	29.9934
1.6000	50.0693	50.1798	56.0345	30.3721
1.6667	50.0693	50.2623	56.0345	30.7432
1.7333	50.0693	50.4272	56.0345	31.1069
1.8000	50.0693	50.3447	56.0345	31.4635
1.8667	50.0690	50.5097	56.0345	31.8133
1.9333	50.0690	50.5097	56.0345	32.1563
2.0000	50.0690	50.5097	56.0345	32.4929
2.0667	50.0690	50.5097	56.0345	32.8230
2.1333	50.0690	50.1798	56.0345	33.1469
2.2000	50.0690	50.2623	56.0345	33.4647
2.2667	50.0690	50.4272	56.0345	33.7866
2.3333	50.0690	50.3447	56.0345	34.1074
2.4000	50.0690	50.5097	56.0345	34.4283
2.4667	50.0690	50.5097	56.0345	34.7491
2.5333	50.0687	50.5097	56.0345	35.0700
2.6000	50.0687	49.8499	56.0345	35.3908
2.6667	50.0466	50.0149	56.0345	35.7117
2.7333	50.0466	50.1798	56.0345	36.0325
2.8000	50.0466	50.2623	56.0345	36.3534
2.8667	50.0466	50.4272	56.0345	36.3534
2.9333	50.0466	50.3447	56.0345	36.3534
3.0000	50.0466	50.5097	56.0345	36.3534
3.0667	50.0466	50.5097	56.0345	36.3534
3.1333	50.0466	50.5097	56.0345	36.3534
3.2000	50.0466	50.5097	56.0345	36.3534

เวลา (นาที)	ความสูง ของน้ำ Tank 3 (cm)	ความสูง ของน้ำ Tank 4 (cm)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 1 (%Open valve)	ตัวแปรปรับ กระบวนการตัวที่ 2 (%Open valve)
3.2667	50.0466	50.1798	56.0345	36.3534
3.3333	50.0466	50.2623	56.0345	36.3534
3.4000	50.0466	49.8499	56.0345	36.3534
3.4667	50.0466	50.0149	56.0345	36.3534
3.5333	50.0463	50.1798	56.0345	36.3534
3.6000	50.0463	50.2623	56.0345	36.3534
3.6667	50.0463	50.4272	56.0345	36.3534
3.7333	50.0463	50.3447	56.0345	36.3534
3.8000	50.0463	50.5097	56.0345	36.3534
3.8667	50.0463	50.5097	56.0345	36.3534
3.9333	50.0463	50.5097	56.0345	36.3534
4.0000	50.0463	50.5097	56.0345	36.3534

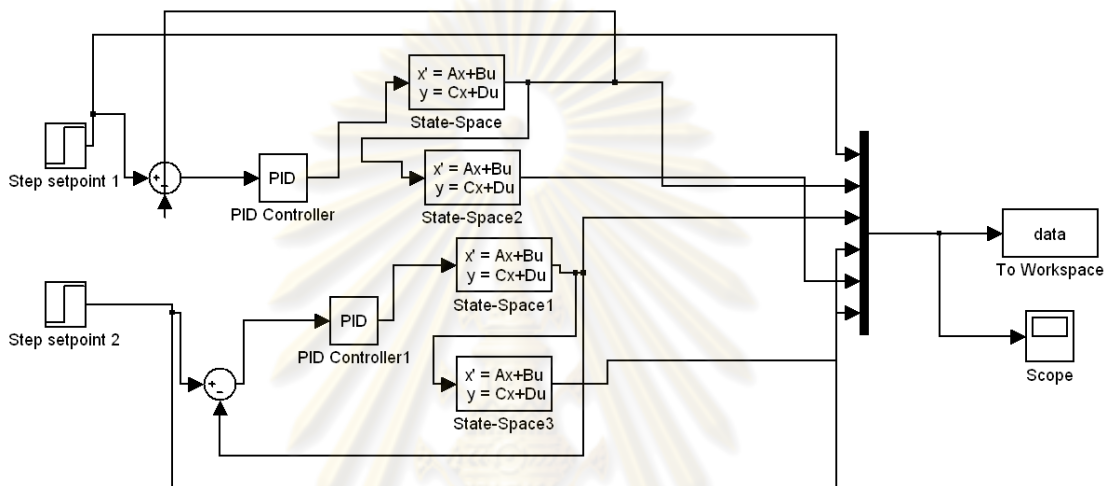
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ฅ

รายละเอียดการเขียนโปรแกรมการจำลองและการปฏิบัติจริง

ฅ.1 การควบคุมแบบPID ในการจำลองกระบวนการ

การควบคุมกระบวนการแบบ PID ใช้โปรแกรม Matlab/simulink ดังรูปที่ ฅ-1 เป็นการจำลองกระบวนการ



รูปที่ ฅ-1 การจำลองกระบวนการตัวควบคุมแบบ PID

ฅ.2 การควบคุมแบบPID ในการปฏิบัติกับกระบวนการจริง

```

%%%%%%%%%%
%%PID Controller%%
%%Control level tank 3,4
%%By Alongkorn
format bank
ai=analoginput('nidaq','Dev1');
addchannel(ai,0:3);

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

```

SP=[50 50]; % Setpoint
Kc=[-0.1 0.2]; % Controller Gain
Ti=[40 30];% Integral Time
st=4; %sampling time
final=300; %final time
MVss=[3 3];
putsample(ao,MVss);
disp('Waiting for a while. ');
pause(100);
Temp = getsample(ai);
Temp(1) = 20*(Temp(1)-1);
Temp(2) = 20*(Temp(2)-1);
Temp(3) = 20*(Temp(3)-1);
Temp(4) = 16.18*Temp(4)-0.84;
CVss = [Temp(4) Temp(3) Temp(1) Temp(2)];
CVss
MVss
sum(1)=0;
sum(2)=0;
j=zeros(final,1);%Tank 1%
k=zeros(final,1);%Tank 3%
l=zeros(final,1);%Tank 2%
m=zeros(final,1);%Tank 4%
n=zeros(final,1);%MV 1%
o=zeros(final,1);%MV 2%
for i=1:final
    Temp = getsample(ai);
    Temp(1) = 20*(Temp(1)-1);
    Temp(3) = 20*(Temp(3)-1);
    Temp(2) = 20*(Temp(2)-1);
    Temp(4) = 16.18*Temp(4)-0.84;

```



```

CV = [Temp(4) Temp(3) Temp(1) Temp(2)]; % Control variable
e = [SP(1)-CV(1) SP(2)-CV(2)]; %error
sum(1) =sum(1)+ e(1)*st;
sum(2) =sum(2)+ e(2)*st;
MV (1)=MVss(1)+ Kc(1)*e(2) + sum(2)*Kc(1)/Ti(1); % Controller 1
MV (2)=MVss(2)+ Kc(2)*e(1) + sum(1)*Kc(2)/Ti(2); % Controller 2
if (MV(1)>5)
    MV(1)=5;
elseif (MV(1)<1)
    MV(1)=1;
end
if (MV(2)>5)
    MV(2)=5;
elseif (MV(2)<1)
    MV(2)=1;
end
putsample (ao,MV);
MVp(1)=25*(MV(1)-1);
MVp(2)=25*(MV(2)-1);
MVo=[MVp(1) MVp(2)];
j(i)=CV(1);
k(i)=CV(2);
l(i)=CV(3);
m(i)=CV(4);
n(i)=MVp(1);
o(i)=MVp(2);
pause(st);
end
MV=[3 3];
t=0:st:final;

```

%%%

ณ.3 การควบคุมแบบMPC ในการจำลองกระบวนการ

clc

clear

%%%

%%%

%%By Alongkorn

%Control level tank 3,4

%state=[h1 h2 h3 h4]

%manipulated variable=[CV1 CV2]'

%state space parameter

A=[-0.15 0 0 0; 0.15 -1.17 0 0; 0 0 -0.15 0; 0 0 0.15 -1.17];

B =[0 0.07;-0.05 0; 0.05 0;0 -0.07];

C = eye(4);

D = [0 0;0 0;0 0;0 0];

%%%

%%%

%sampling time

delt=0.06; %(min)

%Continuous to Discrete state space

[phi,gam]=c2dmp (A, B, delt);

minfo=[delt,4,2,0,0,4,0];

pmod=ss2mod(phi,gam,C,D,minfo);

%controller parameter

P=20; %PREDICTION HORIZON

M=4;

%weighting

ywt=[0 500 0 400]; %default weight on output

uwt=[100 100];

```

%constrain
iumin=[1:2]; % Points to columns of ulim containing umin.
iumax=iumin+2; % Points to columns of ulim containing umax.
iymin=[1:4]; % Points to columns of ylim containing ymin.
iymax=iymin+4; % Points to columns of ylim containing ymax.
ulim=[-2.5*ones(1,2) 2.5*ones(1,2) 1e6*ones(1,2)];
ylim=[-0.4*ones(1,4) 0.4*ones(1,4)];
%simulation
imod=pmod;
r=[0 0.11 0 0.377]; %setpoint (m)
tend=4; %time period for simulation (min)
Kest=[zeros(8,0)];
[y,u]=scmpc(pmod,imod,ywt,uwt,M,P,tend,r,ulim,ylim,Kest);
Plotall(y, u, delt)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

ณ.4 การควบคุมแบบMPC ในการปฏิบัติกับกระบวนการจริง

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%By Alongkorn
%%Control level tank 3,4
ai=analoginput('nidaq','Dev1');
addchannel(ai,0:3);
ao=analogoutput('nidaq','Dev1');
addchannel(ao,0:1);
MVss=[3 3];
putsample (ao,MVss);
disp('Waiting for a while.');
```

```

pause (100);
% Get plant, internal, and reference models in state-space form.
A=[-0.15 0 0 0; 0.15 -1.17 0 0; 0 0 -0.15 0; 0 0 0.15 -1.17];
B =[0 0.07;-0.05 0; 0.05 0;0 -0.07];
C =[0 1 0 0;0 0 0 1];
D = [0 0;0 0];
%controller parameter
p=20;      %PREDICTION HORIZON
blocks=4;  %CONTROL HORIZON
ywt=[500 400]; %default weight on output
uwt=[100 100];
setpts=[0.50 0.50]; %Setpoint (m)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%sampling time
T=0.06; %(min)
%Continuous to Discrete state space
[phi,gam]=c2dmp(A,B,T);
minfo=[T,4,2,0,0,2,0];
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
```

```
if isempty(uwt),
```

```
    uwt=zeros(1,nui);
```

```
    nuwt=1;
```

```
else
```

```
    [nuwt,ncol]=size(uwt);
```

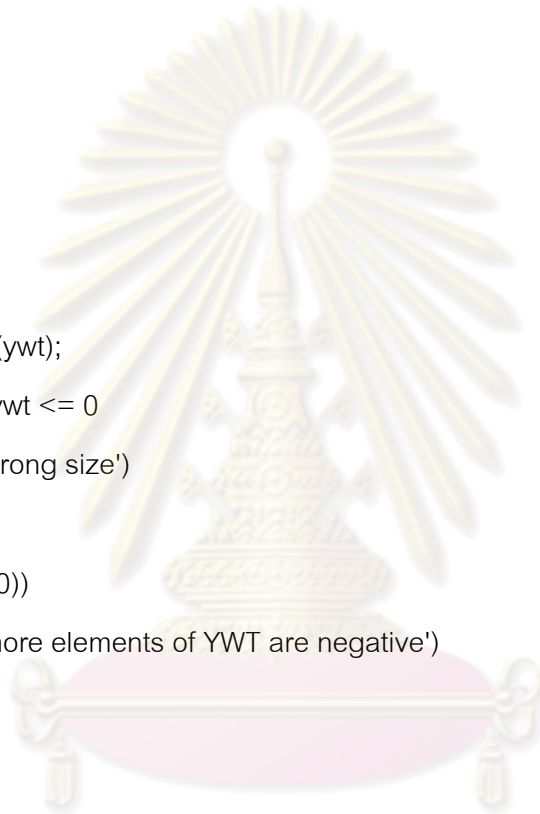
```
    if ncol ~= nui | nuwt <= 0
```

```
        error('UWT is wrong size')
```

```
    end
```

```
    if any(any(uwt < 0))
```

```
        error('UWT is negative')
```



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```

    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
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

% 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:nyj]; % Points to columns of ylim containing ymin.
iymax=iymin+nyj; % 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
    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(:,iymax) < 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
end
else
    Kest=[zeros(ni,nymi)
          eye(nymi)
          zeros(nyui,nymi)];
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:nymi]; % 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=nyi*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,:))';
    end

```

```

    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=ylim(:,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.

st = 4;
final=300;
Temp = getsample(ai);
Temp(1) = 0.20*(Temp(1)-1);
Temp(2) = 0.20*(Temp(2)-1);
Temp(3) = 0.20*(Temp(3)-1);
Temp(4) = 0.1618*Temp(4)-0.0084;
CVss = [Temp(2); Temp(4) ;Temp(1) ;Temp(3)];
Ys=[Temp(3);Temp(4)];
xi=[0;0;0;0]; % States of the augmented internal model.
xp=CVss; % States of the plant.
MVss=[3 3];
putsample(ao,MVss);% Previous values of the manipulated variables.
MV=[MVss(1);MVss(2)];
ff=zeros(final,1);%tank 1%
k=zeros(final,1);%tank 3%
l=zeros(final,1);%tank 2%
m=zeros(final,1);%tank 4%
n=zeros(final,1);%Valve 1%
o=zeros(final,1);%Valve 2%
U=zeros(2,1);

%Control
IKC=[1 0 0 0 0 0;0 1 0 0 0 0;0 0 1 0 0 0;0 0 0 1 0 0;0 0 0 0 0 0;0 0 0 0 0 0];
for i=1:final

```

```

Temp = getsample(ai);
Temp(1) = 0.20*(Temp(1)-1);
Temp(2) = 0.20*(Temp(2)-1);
Temp(4) = 0.1618*Temp(4)-0.0084;
Temp(3) = 0.20*(Temp(3)-1);
CV = [Temp(2) Temp(4) Temp(1) Temp(3)];
Cv = [Temp(2); Temp(4) ;Temp(1) ;Temp(3)];
ytrue=[CV(4);CV(2)];

ypnew=ypnew;    % current measured plant outputs
setpt=setpts(min(i,nset),:);    % current setpoints

% Calculate starting basis vector for the QP
xi=[0;0;0;0;0;0];
xi=IKC*xi+Kest*ypnew;% measurement update for state estimator.
y0=Sx*xi;
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,:)];

```

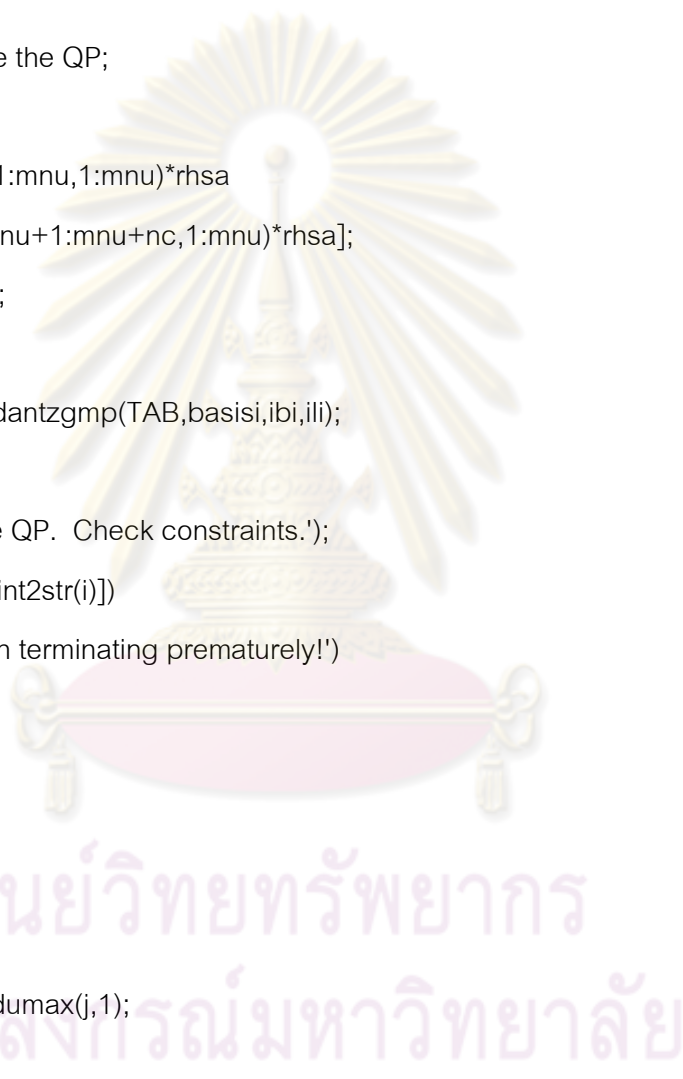
```

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)*rhsc
          rhsc-TAB(mnu+1:mnu+nc,1:mnu)*rhsc];
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
deltai=[];
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
end

U=deltau;
```

```

MV(1)=MVss(1)+ U(1) ;
MV(2)=MVss(2)+ U(2) ;

Mv=[MV(1) MV(2)];
if (Mv(1)>5)
    Mv(1)=5;
elseif (Mv(1)<1)
    Mv(1)=1;
end
if (Mv(2)>5)
    Mv(2)=5;
elseif (Mv(2)<1)
    Mv(2)=1;
end
putsample(ao,Mv);
ui=deltau
xi=PHI*xi+GAM*ui
Temp = getsample(ai);
Temp(1) = 0.20*(Temp(1)-1);
Temp(2) = 0.20*(Temp(2)-1);
Temp(4) = 0.1618*Temp(4)-0.0084;
Temp(3) = 0.20*(Temp(3)-1);
CV = [Temp(2) Temp(4) Temp(1) Temp(3)];
MVp(1)=25*(Mv(1)-1);
MVp(2)=25*(Mv(2)-1);
MVo=[MVp(1) MVp(2)];
ff(i)=CV(1);
k(i)=CV(2);
l(i)=CV(3);
m(i)=CV(4);
n(i)=MVp(1);

```

```

o(i)=MVp(2);
pause (st)
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

ฅ.5 การควบคุมแบบ mp-MPC ในการจำลองกระบวนการ

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%mp-MPC controller
%%Control level tank 3,4
A=[-0.15 0 0 0; 0.15 -1.17 0 0; 0 0 -0.15 0; 0 0 0.15 -1.17];
B =[0 0.07;-0.05 0; 0.05 0;0 -0.07];
C =[0 1 0 0;0 0 0 1];
D = [0 0;0 0];

% sampling time
Ts = 0.066;

% define the model by discretizing a corresponding state-space representation
sysStruct = mpt_sys(ss(A, B, C, D), Ts)
% state constraints
sysStruct.xmax = [0.4; 0.4; 0.4; 0.4];
sysStruct.xmin = [-0.4; -0.4; -0.4; -0.4];

% input constraints
sysStruct.umax = [2.5;2.5];
sysStruct.umin = [-2.5; -2.5];

% output constraints
sysStruct.ymax = [0.4; 0.4];

```

```

sysStruct.ymin = [-0.4; -0.4];
% prediction horizon
probStruct.N = 20;
% control horizon
probStruct.Nc = 4;
% quadratic performance index
probStruct.norm = 2;
% penalty on states
probStruct.Q = eye(4);
% penalty on outputs
probStruct.Qy = [100 0;0 100];
% penalty on inputs
probStruct.R = [10;0 10];
% the controller must track a given reference
probStruct.tracking = 1;
% compute on-line controller
probStruct.subopt_lev=0;
onlinec= mpt_control(sysStruct, probStruct, 'online');
% simulate closed-loop for reference trajectory yref = [0.08; 0.348]%Setpoint
x0 = [0; 0; 0; 0];
[X,Y,U]=mpt_plotTimeTrajectory (onlinec, x0, [240], struct ('reference',[0.08; 0.348]))
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

ณ.6 การควบคุมแบบmp-MPC ในการปฏิบัติกับกระบวนการจริง

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%mp-MPC controller
%Control level Tank 3,4
ai=analoginput('nidaq','Dev1');
addchannel(ai,0:3);

```

```

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

MVss=[3 3];
putsample(ao,MVss);
disp('Waiting for a while. ');
pause(1);

A=[-0.15 0 0 0; 0.15 -1.17 0 0; 0 0 -0.15 0; 0 0 0.15 -1.17];
B=[0 0.07;-0.05 0; 0.05 0;0 -0.07];
C=[0 0 0 1;0 1 0 0];
D=[0 0;0 0];

% sampling time
Ts = 0.06;

% define the model by discretizing a corresponding state-space representation
sysStruct = mpt_sys(ss(A, B, C, D), Ts)

% state constraints
sysStruct.xmax = [0.8; 0.8; 0.8; 0.8];
sysStruct.xmin = [-0.8; -0.8; -0.8; -0.8];

% input constraints
sysStruct.umax = [2.5;2.5];
sysStruct.umin = [-2.5; -2.5];

% output constraints
sysStruct.ymax = [0.8; 0.8];
sysStruct.ymin = [-0.8; -0.8];

% prediction horizon

```

```

probStruct.N = 20;

% control horizon
probStruct.Nc = 4;

% quadratic performance index
probStruct.norm = 2;

% penalty on states
probStruct.Q = eye(4);

% penalty on outputs
probStruct.Qy = [100 0;0 100];

% penalty on inputs
probStruct.R = [10 0;0 10];

% the controller must track a given reference
probStruct.tracking = 1;

% compute on-line controller
probStruct.subopt_lev=0;

ctrlStruct= mpt_control(sysStruct, probStruct, 'online');

Temp = getsample(ai);
Temp(4) = 0.1669*Temp(4)-0.0247;
Temp(2) = 0.20*(Temp(2)-1);
Temp(3) = 0.20*(Temp(3)-1);
Temp(1) = 0.20*(Temp(1)-1);
CVss = [Temp(2) ;Temp(4);Temp(1); Temp(3)];

```



```

x0 = CVss;
z=[CVss(4);CVss(3)];
s=0.5;
f=0.5;
Q1=0.50;
Q2=0.50;
yref=[Q1;Q2];%Setpoint
xref=yref;
Options.reference=yref;

%Online -Section

%error(nargchk(2,4,nargin));

global mptOptions;

if ~isstruct(mptOptions),
    mpt_error;
end

horizon=Inf; % if no horizon given, we assume infinity (evolution will be stopped if
norm of the state vector drops below certain tolerance

if nargin<4,
    Options=[];
    if ~isa(horizon,'double'),
        error('mpt_computeTrajectory: Horizon must be an integer!');
    end
end
end

```

```
reason = '';
```

```
reason = '';
```

```
details = {};
```

```
givedetails = (nargout==10);
```

```
ctrl = ctrlStruct;
```

```
if ~isexplicit(ctrlStruct)
```

```
    % to supress non-important output from mpc_mip
```

```
    Options.verbose = 0;
```

```
end
```

```
if ~mpt_isValidCS(ctrlStruct)
```

```
    error('mpt_computeTrajectory: First argument has to be a valid controller structure!
```

```
See mpt_control for details.');
```

```
end
```

```
if horizon<1,
```

```
    error('mpt_computeTrajectory: horizon MUST be a positive integer!');
```

```
end
```

```
X = [];
```

```
U = [];
```

```
Y = [];
```

```
D = [];
```

```
cost = -Inf;
```

```
trajectory = [];
```

```
feasible = 0;
```

```

dysns = [];
reason = 'error';

sysStruct = ctrlStruct.sysStruct;
probStruct = ctrlStruct.probStruct;

if iscell(sysStruct.A) & ~isfield(ctrlStruct.details,'Horizon')
    % don't check OL cost if open-loop solution is not stored in ctrlStruct
    Options.checkOLcost = 0;
end

if (~isfield(probStruct,'Qy') | isempty(probStruct.Qy) | all(all(probStruct.Qy==0)))
    ycost=0;
else
    ycost=1;
    Qy=probStruct.Qy;
end

if iscell(sysStruct.C),
    ny = size(sysStruct.C{1},1);
else
    ny = size(sysStruct.C,1);
end

if isfield(sysStruct, 'Cy')
    if iscell(sysStruct.Cy),
        ny = size(sysStruct.Cy{1}, 1);
    else
        ny = size(sysStruct.Cy, 1);
    end
end
end

```

```

if(isfield(probStruct,'yref'))
    yref=probStruct.yref;
else
    yref=zeros(ny,1);

end

opt.verbose=0;
if ~isfield(sysStruct,'verified'),
    sysStruct=mpt_verifySysStruct(sysStruct,opt);
end

if ~isfield(probStruct,'verified'),
    probStruct=mpt_verifyProbStruct(probStruct,opt);
end

userHorizon = 0;
if ~isinf(horizon),
    Options.minnorm=-1; % enforce norm stopping criterion
    Options.maxCtr=horizon;
    userHorizon = 1;
end

if isfield(ctrlStruct.sysStruct,'dumode'),
    % if this flag is set, solution has been computed for extended state-space
    % to guarantee fulfillment of deltaU constraints in closed-loop
    [nx,nu,ny] = mpt_sysStructInfo(ctrlStruct.sysStruct);
    if length(x0)<nx,
        % add 0 to the augmented state vector. keep in mind that for deltaU
        % constraints the state vector is augmented to include past input u(k-1)

```

```

    x0 = [x0; zeros(nu,1)];
end
ny = length(yref);
end

x0=x0(:);
nx=length(x0);
reason = "";

% get system description:
[A,B,C,D,Q,R,ymin,ymax,umin,umax,dumin,dumax,bndA,bndb]=mpt_evalSystem(sysStr
uct,probStruct);
if isfield(sysStruct, 'Cy') %& ((ycost & probStruct.tracking) | (ycost &
isfield(probStruct,'yref')))
    Cy=sysStruct.Cy;
    Dy=sysStruct.Dy;
else
    Cy=sysStruct.C;
    Dy=sysStruct.D;
    sysStruct.Cy=Cy;
    sysStruct.Dy=Dy;
end

if givedetails,
    Options.fastbreak = 0;
end

%initial condition
X_CL{1} = x0;    %closed loop
cost_CL = 0;

```

```

cost_CL_exp = 0;
nyd = ny;
if probStruct.tracking,
    if iscell(sysStruct.B),
        if isfield(sysStruct,'Dy') & ycost
            nu = size(sysStruct.B{1},2);
            nx = size(sysStruct.A{1},2)-size(sysStruct.Dy{1},1);
        else
            nu = size(sysStruct.B{1},2);
            if probStruct.tracking==1,
                nx = (size(sysStruct.A{1},2)-nu)/2;
            else
                nx = size(sysStruct.A{1},2)/2;
            end
        end
    end
else
    if isfield(sysStruct,'Dy') & ycost
        nu = size(sysStruct.B,2);
        nx = size(sysStruct.A,2)-size(sysStruct.Dy,1);
    else
        nu = size(sysStruct.B,2);
        if probStruct.tracking==1,
            nx = (size(sysStruct.A,2)-nu)/2;
        else
            nx = size(sysStruct.A,2)/2;
        end
    end
end
end
xref=Options.reference;
if probStruct.tracking==1,
    X_CL{1} = [x0; zeros(nu,1); xref];

```

```

else
    X_CL{1} = [x0; xref];
end
X_OL{1} = X_CL{1};
end

dynamics = [];
cost = -Inf;
trajectory = [];

feasible=1;
%+++++
% COMPUTE CLOSED LOOP SOLUTION
%+++++
if probStruct.tracking,
    if isfield(sysStruct, 'dims')
        nx = sysStruct.dims.nx;
        ny = sysStruct.dims.ny;
        nu = sysStruct.dims.nu;
    else
        if iscell(sysStruct.B),
            if isfield(sysStruct,'Dy') & ycost
                nu = size(sysStruct.B{1},2);
                nx = size(sysStruct.A{1},2)-size(sysStruct.Dy{1},1);
            elseif ycost
                nu = size(sysStruct.B{1},2);
                nx = size(sysStruct.A{1},2) - nu - (size(sysStruct.C{1},1)-nu)/2;
            else
                nu = size(sysStruct.B{1},2);

```

```

        nx = (size(sysStruct.A{1},2)-nu)/2;
    end
else
    if isfield(sysStruct,'Dy') & ycost
        nu = size(sysStruct.B,2);
        nx = size(sysStruct.A,2)-size(sysStruct.Dy,1);
    elseif ycost,
        nu = size(sysStruct.B,2);
        nx = size(sysStruct.A,2) - nu - (size(sysStruct.C,1)-nu)/2;
    else
        nu = size(sysStruct.B,2);
        nx = (size(sysStruct.A,2)-nu)/2;
    end
end
end
end
else
    [nx,nu,nyprev] = mpt_sysStructInfo(sysStruct);
end

if isfield(probStruct,'yref')
    ny = length(probStruct.yref);
end
uprev = zeros(nu,1);

% if iterative solution was computed, regions are already order in such a way,
% that the first region found is in fact the one with least step distance to the origin,
% thus we can break in mpt_getInput as soon as at least one region is found
% (results in much faster run-time!
locOpt.fastbreak = (probStruct.subopt_lev>0);

finalbox = polytope;

```



```

finalbox_track = polytope;

% repeat evolution until norm of state is higher than certain value or maximum number
iterations is reached

if isfield(probStruct,'xref') & isinf(horizon),
    [Hf,Kf] = double(finalbox);
    finalbox = polytope(Hf, Kf + Hf*probStruct.xref);
end

boxtype = 1;

if isfield(probStruct,'Qy') & isinf(horizon) & ~probStruct.tracking,
    finalbox_y = unitbox(ny,Options.minnorm);
    if isfield(probStruct,'yref'),
        finalbox_y = finalbox_y + probStruct.yref;
    end
    boxtype = 2;
end

boxctr=0;

st = 4;
final=300;
Temp = getsample(ai);
Temp(4) = 0.20*(Temp(4)-1);
Temp(2) = 0.20*(Temp(2)-1);
Temp(3) = 0.20*(Temp(3)-1);
Temp(1) = 0.1618*Temp(1)-0.0084;
MVss=[3 3];

putsample(ao,MVss);% Previous values of the manipulated variables.
MV=[MVss(1);MVss(2)];

ff=zeros(final,1);%tank 1%
k=zeros(final,1);%tank 3%
l=zeros(final,1);%tank 2%
m=zeros(final,1);%tank 4%

```

```
n=zeros(final,1);%Valve 1%
```

```
o=zeros(final,1);%Valve 2%
```

```
for i=1:final
```

```
    reason = 'not converged';
```

```
    if boxtype==1 & isfullim(finalbox),
```

```
        if(isinside(finalbox, X_CL{i}))
```

```
            boxctr=boxctr+1;
```

```
            if isfield(probStruct,'xref'),
```

```
                reason = 'converged to fixed state reference';
```

```
            else
```

```
                if Options.stopInTset,
```

```
                    reason = 'target set reached';
```

```
                else
```

```
                    reason = 'converged to origin';
```

```
                end
```

```
            end
```

```
        else
```

```
            boxctr=0;
```

```
        end
```

```
    elseif boxtype==2 & isfullim(finalbox_y)
```

```
        if i>1,
```

```
            if ycost,
```

```
                Ycheck = Y_CLy{end};
```

```
            else
```

```
                Ycheck = Y_CL{end}(1:ny);
```

```
            end
```

```

if isinside(finalbox_y, Ycheck),
    boxctr = boxctr + 1;
    reason = 'converged to fixed output reference';
else
    boxctr = 0;
end
else
    boxctr = 0;
end
end

if probStruct.tracking,
    if (ycost & i>1 & isinside(finalbox_track, Y_CL{i-1}(1:nyd))) | ...
        (~ycost & isinside(finalbox_track, X_CL{i}(1:nx))),
        reason = 'converged to free state reference';
        break
    end
end

%identify to which region x0 belongs to and extract the control input
if isfield(Options,'manualU'),
    U = Options.manualU(i,:);
    feasible = 1;
    region = 0;
    cost = 0;
    dynamics = 0;
    if isfield(ctrlStruct.sysStruct,'guardX')
        for ii=1:length(ctrlStruct.sysStruct.guardX),
            if all(ctrlStruct.sysStruct.guardX{ii}*X_CL{i} +
ctrlStruct.sysStruct.guardU{ii}*U <= ctrlStruct.sysStruct.guardC{ii}),
                dynamics = ii;

```

```

        break
    end
end
else
    dynamics = 1;
end
regions = find(ctrlStruct.dynamics == dynamics);
if isempty(regions),
    error('mpt_computeTrajectory: no associated dynamics found!');
end
region = regions(1);
else
    if givedetails,
        [U,feasible,region,cost,gi_details]=mpt_getInput(ctrlStruct,X_CL{i},locOpt);
        if givedetails,
            details{end+1} = gi_details.inwhich;
        end
    else
        [U,feasible,region,cost]=mpt_getInput(ctrlStruct,X_CL{i},locOpt);
    end
    cost_CL_exp = cost_CL_exp + cost;
end

if ~feasible,
    % if no region found, the controller does not guarantee feasibility for all time, thus
    we abort
    if Options.verbose >= 0
        disp(sprintf('mpt_computeTrajectory: NO REGION FOUND FOR STATE x =
[%s]',num2str(X_CL{i})));
        if boxctr==1,

```

```

disp('State trajectory entered user defined target set, but no associated
control law exists.');
```

```

elseif boxctr>1,
    disp('State trajectory went through user defined target set but didn"nt stop
there.');
```

```

    end
end
break
end

% pick up dynamics active for given x0 and optimal U
dyn = ctrlStruct.dynamics(region);
if dyn==0,
    % no dynamics associated to this point, go through all and determine
    % active dynamics
    if ~iscell(sysStruct.A),
        % LTI system,
        dyn = 1;
    else
        for dd=1:nPWA,
            if max(sysStruct.guardX{dd}*X_CL{i}+sysStruct.guardU{dd}*U-
sysStruct.guardC{dd})<Options.abs_tol,
                % check which dynamics is active in the region
                dyn = dd;
                break
            end
        end
    end
end
end
end

A=[-1.37 0 0.357 0; 0 -1.3 0 0.33; 0 0 -0.357 0; 0 0 0 -0.33];
B =[-0.3 0;0 -0.21; 0 0.21;0.3 0];

```

```
C =[0 0 1 0;1 0 0 0];
```

```
D = [0 0;0 0];
```

```
% sampling time
```

```
Ts = 0.06;
```

```
% define the model by discretizing a corresponding state-space representation
```

```
sysStruct = mpt_sys(ss(A, B, C, D), Ts)
```

```
if iscell(sysStruct.A),
```

```
    A=sysStruct.A;
```

```
    B=sysStruct.B;
```

```
    C=sysStruct.C;
```

```
    D=sysStruct.D;
```

```
    if isfield(sysStruct,'f'),
```

```
        f = sysStruct.f;
```

```
    else
```

```
        f=zeros(size(A,1),1);
```

```
    end
```

```
    if isfield(sysStruct,'g'),
```

```
        g = sysStruct.g;
```

```
    else
```

```
        g=zeros(size(C,1),1);
```

```
    end
```

```
    if isfield(sysStruct, 'Cy'),
```

```
        Cy = sysStruct.Cy;
```

```
        Dy = sysStruct.Dy;
```

```
        gy = g(1:size(Cy,1));
```

```
    else
```

```
        Cy = C;
```

```
        Dy = D;
```

```

    end
end

Temp = getsample(ai);
Temp(1) = 0.20*(Temp(1)-1);
Temp(2) = 0.20*(Temp(2)-1);
Temp(4) = 0.1618*Temp(4)-0.0084;
Temp(3) = 0.20*(Temp(3)-1);
CV = [Temp(2) Temp(4) Temp(1) Temp(3)];
    % state update function
    U
    dyns = [dyns; dyn];
    deltaU = U - uprev
    uprev=U
    MV(1)=MVss(1)+ U(1)
    MV(2)=MVss(2)+ U(2)

    Mv=[MV(1) MV(2)];
if (Mv(1)>5)
    Mv(1)=5;
elseif (Mv(1)<1)
    Mv(1)=1;
end
if (Mv(2)>5)
    Mv(2)=5;
elseif (Mv(2)<1)
    Mv(2)=1;
end
putsample(ao,Mv);

constrviol=1.01;

```

```

A1=[0.9211 0 0.0203 0 0 0 0 0];
A2=[0 0.9250 0 0.0189 0 0 0 0];
A3=[0 0 0.9788 0 0 0 0 0];
A4=[0 0 0 0.9804 0 0 0 0];
A5=[0 0 0 0 0 0 0 0];
A6=[0 0 0 0 0 0 0 0];
A7=[0 0 0 0 0 0 0.9788 0];
A8=[0 0 0 0 0 0 0 0.9804];
A=[A1;A2;A3;A4;A5;A6;A7;A8];
B=[-0.0173 0.0001;0.0002 -0.0121;0 0.0125;0.0178 0;0 0;0 0;0 0];
Temp = getsample(ai);
Temp(1) = 0.20*(Temp(1)-1);
Temp(2) = 0.20*(Temp(2)-1);
Temp(4) = 0.1618*Temp(4)-0.0084;
Temp(3) = 0.20*(Temp(3)-1);
CV = [Temp(2) Temp(4) Temp(1) Temp(3)];
% state update function
X_CL{i+1} = A*X_CL{i}+B*U ;
% output equation
Y_CL{i} = [0;CV(2);0;CV(4);0;0;CV(2);CV(4)];

% check fulfillment of input constraints
% if any(max(U(1:nu))>constrviol*(umax+(constrviol-1)/100)) |
any(min(U(1:nu))<constrviol*(umin-(constrviol-1)/100))
if any(U(1:nu)>constrviol*(umax+(constrviol-1)/100)) | any(U(1:nu)<constrviol*(umin-
(constrviol-1)/100))
disp(sprintf('mpt_computeTrajectory: INPUT CONSTRAINTS EXCEEDED FOR
STATE x = [%s]',num2str(X_CL{i}')) %#ok<DSPS>
disp(num2str(U'))
end

```



```

% check fulfillment of output constraints
if i>1,
    if probStruct.tracking,
        if any(Y_CL{i}(1:nx)>constrviol*(ymax(1:nx)+(constrviol-1)/100)) | ...
            any(Y_CL{i}(1:nx)<constrviol*(ymin(1:nx)-(constrviol-1)/100))
            disp(sprintf('mpt_computeTrajectory: OUTPUT CONSTRAINTS EXCEEDED
FOR STATE x = [%s]',num2str(X_CL{i}')))) %#ok<DSPS>
            disp(num2str(Y_CL{i}'))
        end
    else
        % if any(max(Y_CL{i})>constrviol*(ymax+(constrviol-1)/100)) |
any(min(Y_CL{i})<constrviol*(ymin-(constrviol-1)/100))
        if any(Y_CL{i}>constrviol*(ymax+(constrviol-1)/100)) |
any(Y_CL{i}<constrviol*(ymin-(constrviol-1)/100))
            disp(sprintf('mpt_computeTrajectory: OUTPUT CONSTRAINTS EXCEEDED
FOR STATE x = [%s]',num2str(X_CL{i}'))))
            disp(num2str(Y_CL{i}'))
        end
    end
end
end
% update the closed-loop cost
if probStruct.norm==2,
    if(ycost)
        %%%cost_CL = cost_CL + (Cy*X_CL{i}+Dy*U(1:nu)-
yref)*Qy*(Cy*X_CL{i}+Dy*U(1:nu)-yref) + U(1:nu)*R*U(1:nu);
        cost_CL = cost_CL;
    else
        cost_CL = cost_CL + X_CL{i}'*Q*X_CL{i} + U(1:nu)*R*U(1:nu);
    end
end
else

```


ภาคผนวก ญ นิยามศัพท์เกี่ยวกับการควบคุม

Algorithm

ขั้นตอนวิธี

Automatic control

การควบคุมที่ทำงานอัตโนมัติ

Automatic Process control

การควบคุมกระบวนการที่ทำงานอัตโนมัติ

Bias

ค่าที่เบี่ยงเบนหรือความผิดพลาด(Error) ของระบบหรือค่าตรวจวัด

Block Diagram

แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ทำงานร่วมกันในกระบวนการ ซึ่งช่วยให้สามารถเห็นภาพรวมของกระบวนการหรือระบบควบคุมได้ชัดเจน

Closed-Loop Control

การควบคุมลูปปิดโดยป้อนกลับตัวแปรเอาต์พุตเพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการคำนวณการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรปรับ

Controller Action

การทำงานของตัวควบคุมเพื่อปรับเปลี่ยนตัวแปรปรับ

Constraint

ขอบเขตข้อจำกัดของตัวแปรเอาต์พุต ตัวแปรสแตต หรือตัวแปรปรับ เป็นต้น

Continuous process

กระบวนการที่ป้อนวัตถุดิบเข้าและถ่ายผลิตภัณฑ์ออกอย่างต่อเนื่อง

Controllability

ตัวแปรปรับที่เลือกไว้สามารถควบคุมกระบวนการให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการภายในช่วงเวลาได้ ซึ่งตรวจสอบได้จากเมทริกซ์ความควบคุมได้

Controller

อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ประมวลผลจากข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์วัดตรวจวัดค่าเพื่อปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรปรับสำหรับควบคุมกระบวนการ

Control Loop

การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดและควบคุมเพื่อนำสัญญาณจากเครื่องตรวจวัดมาสร้างสัญญาณควบคุมเพื่อควบคุมกระบวนการให้เข้าสู่เป้าหมายที่ต้องการ

Control Performance

สมรรถนะของการควบคุมตัวแปรควบคุมเป็นไปตามที่ต้องการ เมื่อมีตัวแปรรบกวนหรือสัญญาณรบกวน (Noise)

Degree of Freedom

จำนวนตัวแปรเสรี คำนวณจากจำนวนตัวแปรที่ไม่ทราบค่าทั้งหมดลบด้วยจำนวนสมการ

Disturbance

การเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นภายนอกกระบวนการหรือการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการเอง ที่ไม่สามารถควบคุมได้และส่งผลกระทบต่อตัวแปรสแตตหรือตัวแปรเอาต์พุตของกระบวนการให้เปลี่ยนแปลงไป

Disturbance Variables

ตัวแปรอินพุตที่ไม่สามารถปรับได้ และเข้ามารบกวนกระบวนการส่งผลให้ภาวะการดำเนินงานของกระบวนการเปลี่ยนแปลงไปจากสถานะอยู่ตัว

Dynamic Model

แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่แสดงถึงพลวัตของตัวแปรเอาต์พุตของระบบ

Error

ผลต่างของค่าเป้าหมายกับค่าตรวจวัด โดยตัวควบคุมจะคำนวณตัวแปรปรับโดยใช้ค่าผลต่างนี้เพื่อปรับให้ตัวแปรเอาต์พุตเข้าสู่ค่าเป้าหมาย

Final Control Element

อุปกรณ์ควบคุมขั้นสุดท้าย เช่น วาล์วควบคุม เป็นต้น

First Order Process

กระบวนการที่มีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุตและตัวแปรเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงแบบฟังก์ชันไฮโปซูอยด์

Gain

อัตราขยายของตัวแปรเอาต์พุตเมื่อตัวแปรอินพุตเปลี่ยนแปลงไป 1 หน่วย

Homogeneous experimental unit

ความเป็นเอกพันธ์ของหน่วยทดลอง

I (Integra) Mode

รูปแบบการควบคุมปริพันธ์ที่ช่วยลดออฟเซต

Input – Output Model

แบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุตและตัวแปรเอาท์พุต

Input Variables

ตัวแปรอินพุตซึ่งเป็นตัวแปรอิสระที่ส่งผลต่อพฤติกรรมพลวัตของเอาต์พุต

Integral Error Measure

ค่าบ่งชี้ความผิดพลาดปริพันธ์ตัวแปรควบคุมจากค่าเป้าหมายระหว่างการควบคุมด้วยตัวควบคุม
ค่าบ่งชี้แบ่งได้ 4 กลุ่ม คือ ไอเออี (LAE), ไอเอสอี (ISE), ไอทีเออี (ITAE), และไอทีเอสอี (ITSE)

Integral of Absolute value of Error (LAE)

ผลรวมค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด

Interacting process

กระบวนการที่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างกัน

Linearization

การประมาณสมบัติไม่เชิงเส้นของกระบวนการให้เป็นเชิงเส้น

Linear System Equation

สมการระบบเชิงเส้น

Manipulated

ตัวแปรอินพุตที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้และใช้สำหรับควบคุมกระบวนการให้อยู่ในภาวะที่ต้องการ

Mathematical Model

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ของตัวแปรในกระบวนการ โดยจะอธิบายความเชื่อมโยงระหว่างตัวแปรต่างๆ หรืออธิบายพฤติกรรมของระบบ

Plant/Model Mismatch

ความผิดพลาดของแบบจำลองกระบวนการ อันเนื่องมาจากการตั้งสมมติฐานต่างๆ ในการพัฒนาแบบจำลองผิดพลาดจากกระบวนการ

Model Predictive Control (MPC)

การควบคุมที่อาศัยแบบจำลองของกระบวนการ โดยออกแบบหาค่าการปรับเลี่ยนตัวแปรปรับเพื่อให้ได้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการภายใต้แบบจำลองของกระบวนการและขอบเขตข้อจำกัดของตัวแปรปรับควบคุม

Obverration

ค่าของตัวแปรที่วัดได้จากการทดลอง

Offset

ความแตกต่างระหว่างค่าเป้าหมายกับค่าตรวจวัดของตัวแปรควบคุมที่สถานะอยู่ตัว (Steady State)

Open-Loop

ระบบที่ยังได้ควบคุม

Process Dynamics

พลวัตกระบวนการแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเอาต์พุตเทียบกับเวลา

Process Model

แบบจำลองของกระบวนการแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรสแตตกับตัวแปรอินพุต

Randaization

การจัดทรีตเมนต์ให้กับหน่วยทดลองโดยวิธีสุ่ม

Random variable

ตัวแปรหรือลักษณะที่ใช้ศึกษาผลที่ได้จากการทดลอง

Replication

การจัดทรีตเมนต์หนึ่งๆให้กับหน่วยทดลองมากกว่า 1 หน่วย

Response

การตอบสนองของเอาต์พุตเมื่อตัวแปรอินพุตเปลี่ยนแปลงไป

Robustness

สมรรถนะของระบบควบคุมในการควบคุมกระบวนการในภาวะที่แบบจำลองผิดพลาด

Sample Interval

ช่วงการสุ่มตัวอย่างหรือการตรวจวัดค่าตัวแปรสแตตหรือตัวแปรเอาต์พุต

Set point

ค่าเป้าหมาย เป็นค่าที่ต้องการ เช่น ค่าเป้าหมายของตัวแปรควบคุม เป็นต้น

Stability

เสถียรภาพจะแสดงภาวะของตัวแปรสแตตจะลู่อู่เข้าสู่ค่าคงตัวเมื่อตัวแปรอินพุตเปลี่ยนแปลงไป

State Variable

ตัวแปรสแตต

Steady State

สถานะอยู่ตัวจะแสดงภาวะอนุพันธ์ของตัวแปรสแตตเทียบกับเวลามีค่าเท่ากับศูนย์

Time Delay

เวลาหน่วง

Treatment

วิธีต่างๆซึ่งกระทำต่อหน่วยทดลองหรือเกิดขึ้นกับหน่วยทดลอง

Transfer Function

ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างตัวแปรเอาต์พุตกับตัวแปรอินพุตในโดเมนลาปลาซ

Ziegler-Nichols Method

วิธีซีเกอร์-นิโกลส์เป็นวิธีวิเคราะห์ปรับแต่งตัวควบคุมพีไอดี



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอลงกรณ์ จรรย์ชล เกิดวันที่ 28 กรกฎาคม พ.ศ. 2529 จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ในปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2551



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย