

การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบโมเดลพีรดิคทีฟแบบไม่เป็นเชิงเส้นของระบบสี่ถัง



นางสาว ธรรม์กมล คำณูนเศรษฐ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

APPLICATION OF NONLINEAR MODEL PREDICTIVE CONTROL OF A QUADRUPLE
TANK SYSTEM



Miss Tankamol Kumnoonsate

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 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เป็นเชิงเส้นของระบบสี่ถัง

โดย

นางสาว ธรรม์กมล คำบุญเศรษฐ์


สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

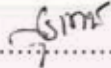
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


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


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


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรชัย อารณวิชานพ)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.วิรัช เลิศบำรุงสุข)

ธรรม์กมล คำณูณเศรษฐ์ : การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เป็นเชิงเส้นของระบบสี่ถัง. (APPLICATION OF NONLINEAR MODEL PREDICTIVE CONTROL OF A QUADRUPLE TANK SYSTEM) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.สุรเทพ เขียวหอม, 153 หน้า.

ในงานวิจัยนี้ได้เสนอการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อควบคุมระดับของเหลวในกระบวนการระบบสี่ถัง โดยได้สร้างชุดทดลองระบบสี่ถังซึ่งเป็นตัวแทนของระบบที่มีลักษณะแบบไม่เป็นเชิงเส้น ที่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆในระบบ และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นขึ้นมาเพื่อศึกษาระบบ จากนั้นศึกษาการควบคุมระดับของเหลวโดยการปรับการเปิด-ปิดของวาล์วควบคุมในกรณีมีการรบกวนระบบโดยการเพิ่มระดับของเหลวในถังแบบอิมพัลส์ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีและตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟในการควบคุมระบบอีกด้วย ในการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมแต่ละกรณีทำได้โดยการวิเคราะห์ค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ หรือไอเออี

การเปรียบเทียบสมรรถนะของการควบคุมของตัวควบคุมทั้งสามแบบ พบว่าตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เป็นเชิงเส้นให้สมรรถนะการควบคุมที่ดีที่สุด แสดงให้เห็นว่าการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความใกล้เคียงระบบจริงเหมาะสมสำหรับการควบคุมระบบที่มีความซับซ้อน

ในกรณีการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี และตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟได้ทำการทดลองโดยการเปลี่ยนค่าเวลาในการสุ่มตัวอย่างต่างๆ พบว่าการใช้เวลาในการสุ่มตัวอย่างน้อยลงจะให้สมรรถนะในการควบคุมที่ดียิ่งขึ้นในทั้งสองตัวควบคุม นอกจากนี้ยังได้ทดลองเปลี่ยนค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุมในกรณีการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่เวลาต่างๆ พบว่าค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุมมากขึ้นจะให้สมรรถนะในการควบคุมดีขึ้น

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อนิสิต ธรรม์กมล คำณูณเศรษฐ์
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.....2553.....

5270332421 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : NONLINEAR MODEL PREDICTIVE CONTROL / MODEL PREDICTIVE CONTROL / QUADRUPLE TANK SYSTEM / MULTIVARIABLE SYSTEM

TANKAMOL KUMNOONSATE : APPLICATION OF NONLINEAR MODEL PREDICTIVE CONTROL OF A QUADRUPLE TANK SYSTEM. THESIS
ADVISOR: ASST. PROF.SOORATHEP KHEAWHOM, Ph.D., 153 pp.

This research presents the application of nonlinear model predictive control (NMPC) to control liquid level in the quadruple tank system. The quadruple tank system which is the representative of the nonlinear process model with strong process variables interaction is devised. The nonlinear mathematical model of the system is developed to study the system. The liquid level of the tanks is controlled by changing the valves opening of control valves in case of impulse disturbance input by suddenly increasing liquid level. Furthermore PID controller and model predictive controller (MPC) are also implemented to control the system. Integral of the absolute value of error (IAE) is used to compare the control performance.

The performances of three controllers are compared. The results show that NMPC give the best control performance. It indicated that using nonlinear mathematical model which close to the real system is preferable to control the complex system.

In PID controller and MPC case, the effect of sampling time is investigated. The lower sampling time gives the better control performance for both controllers. In addition, prediction and control horizon are investigated in NMPC case. The result shows that long prediction and control horizon give higher control performance.

Department :Chemical Engineering.....
Field of Study : ...Chemical Engineering....
Academic Year : ..2010.....

Student's Signature Tankamol Kumnoonsate
Advisor's Signature Soorathep Kheawhom

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้จะสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับการให้คำแนะนำ ดูแล ตลอดจนข้อคิดเห็นในการแก้ไขปัญหาต่างๆ จากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี ปรธการในการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรชัย อภรณ์วิชานพ และ อาจารย์ ดร.วีรยุทธ เลิศบำรุงสุข กรรมการในสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาเพื่อให้ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์แก่งานวิจัยนี้

ขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้เงินทุนอุดหนุนค่าเล่าเรียนตลอดจนจบการศึกษา

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ และประสบการณ์ทางวิชาชีพตลอดระยะเวลาที่ได้ศึกษาเล่าเรียนมา

ขอขอบคุณ คุณครู อาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ ความเข้าใจในสรรพวิชา และอบรมสั่งสอนในเรื่องต่างๆ

ขอบคุณเพื่อนพ้องพี่น้องในห้องปฏิบัติการ รวมถึงบุคคลอื่นอีกมากมาย ที่คอยให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำที่ดีเสมอมา

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้มีพระคุณที่ทำให้ทำงานได้ประสบความสำเร็จและมีทุกวันนี้ได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ถ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 แผนการดำเนินงาน.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
บทที่ 3 แนวคิดและทฤษฎี.....	10
3.1 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนปริพันธ์อนุพันธ์.....	10
3.2 ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ.....	14
3.3 ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เป็นเชิงเส้น.....	19
บทที่ 4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	26
4.1 ชุดทดลองระบบสี่ถัง.....	26
4.2 อุปกรณ์การทดลอง.....	27
4.3 การหาเสถียรภาพของระบบ.....	32
4.4 วิธีการควบคุมระบบ.....	32

บทที่ 5 แบบจำลองระบบสี่ถังและตัวควบคุม.....	34
5.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสี่ถัง.....	34
5.2 การทดสอบความถูกต้องแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสี่ถัง.....	47
5.3 การทดสอบเสถียรภาพของระบบ.....	51
5.4 การทดสอบความสามารถควบคุมได้ของระบบ.....	52
5.5 การพิจารณาการควบคุมระบบ.....	53
5.6 ผลการทดสอบการตอบสนองของกระบวนการ.....	54
5.7 การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดี.....	55
5.8 การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบเป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น.....	59
บทที่ 6 ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	64
6.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมระดับน้ำของถังในกรณีต่างๆ.....	64
6.2 ผลการควบคุมในกรณีต่างๆ.....	66
6.3 วิเคราะห์ผลการควบคุมในกรณีต่างๆ.....	100
บทที่ 7 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	111
7.1 สรุปผลการทดลอง.....	111
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	113
รายการอ้างอิง.....	114
ภาคผนวก.....	117
ภาคผนวก ก การสอบเทียบอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดัน.....	118
ภาคผนวก ข การสอบเทียบเครื่องมือวัดอัตราการไหล.....	121
ภาคผนวก ค ข้อมูลการหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วได้ถัง.....	123
ภาคผนวก ง วิธีการทำแบบจำลองให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น.....	125
ภาคผนวก จ วิธีหาค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์.....	129
ภาคผนวก ฉ ข้อมูลผลการวิเคราะห์ผลรวมความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์.....	131
ฉ.1 การควบคุมระดับน้ำของถังที่ 1 และถังที่ 2.....	131
ฉ.2 การควบคุมระดับน้ำของถังที่ 3 และถังที่ 4.....	131
ฉ.3 การควบคุมระดับน้ำของถังที่ 2 และถังที่ 4.....	133

ภาคผนวก ข ชุดคำสั่งที่ใช้ในการควบคุมระบบสี่ถังด้วยตัวควบคุมต่างๆ.....	135
ข.1 ชุดคำสั่งของตัวควบคุมแบบ PID ในการควบคุมระดับน้ำของ ถังที่ 1 และถังที่ 2.....	135
ข.2 ชุดคำสั่งของตัวควบคุมแบบ MPC ในการควบคุมระดับน้ำของ ถังที่ 3 และถังที่ 4.....	137
ข.3 ชุดคำสั่งของตัวควบคุมแบบ NMPC ในการควบคุมระดับน้ำของ ถังที่ 2 และถังที่ 4.....	148
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	153



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญัตราสาร

ตารางที่		หน้า
3.1	ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการ Minimum IAE ในกรณีที่มีการรบกวนระบบ.....	13
3.2	แสดงค่าพารามิเตอร์สำหรับ Adams-Moulton ตั้งแต่ Two-step ถึง Five-step.....	21
3.3	ตารางเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของตัวควบคุมแต่ละชนิด.....	25
5.1	สัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วได้ดัง.....	43
5.2	ความสูงของน้ำในถังแต่ละใบที่สภาวะคงตัวเมื่อเปิดวาล์วควบคุมทั้งสองตัวที่ 50%.....	44
5.3	ค่าคงที่ต่างๆของกระบวนการ.....	44
5.4	ค่าคงที่สำหรับสมการที่ (5.23) ถึง (5.26).....	45
5.5	ค่าคงที่สำหรับสมการตัวแปรสเตรท.....	47
5.6	ค่าคงที่จากการทดสอบการตอบสนองของกระบวนการ.....	55
6.1	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมระดับน้ำของถังที่ 1 และถังที่ 2 ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 10 วินาที.....	64
6.2	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมระดับน้ำของถังที่ 3 และถังที่ 4 ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 6 วินาที.....	64
6.3	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมระดับน้ำของถังที่ 3 และถังที่ 4 ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 8 วินาที.....	64
6.4	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมระดับน้ำของถังที่ 3 และถังที่ 4 ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 10 วินาที.....	65
6.5	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมระดับน้ำของถังที่ 2 และถังที่ 4 ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 6 วินาที.....	65
6.6	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมระดับน้ำของถังที่ 2 และถังที่ 4 ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 8 วินาที.....	65
6.7	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมระดับน้ำของถังที่ 2 และถังที่ 4 ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 10 วินาที.....	65
ค.1	ค่าอัตราการไหลของน้ำที่ระดับน้ำต่างๆผ่านวาล์วได้ดัง.....	124
จ.1	ค่า IAE ของการควบคุมแบบ PID, MPC และ NMPC ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 10 วินาที ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 1 และถังที่ 2.....	131

ตารางที่		หน้า
ฉ.2	ค่า IAE ของการควบคุมแบบ PID ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างต่างๆ ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 3 และถึงที่ 4.....	131
ฉ.3	ค่า IAE ของการควบคุมแบบ MPC ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างต่างๆ ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 3 และถึงที่ 4.....	132
ฉ.4	ค่า IAE ของการควบคุมแบบ PID, MPC และ NMPC ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 10 วินาที ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 3 และถึงที่ 4.....	132
ฉ.5	ค่า IAE ของการควบคุมแบบ NMPC ที่ค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุมต่างๆ ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 3 และถึงที่ 4.....	132
ฉ.6	ค่า IAE ของการควบคุมแบบ NMPC ที่ค่าการแบ่งช่วงเวลาในการหอปกติไมซ์ต่างๆ ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 3 และถึงที่ 4.....	132
ฉ.7	ค่า IAE ของการควบคุมแบบ PID ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างต่างๆ ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 2 และถึงที่ 4.....	133
ฉ.8	ค่า IAE ของการควบคุมแบบ MPC ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างต่างๆ ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 2 และถึงที่ 4.....	133
ฉ.9	ค่า IAE ของการควบคุมแบบ PID, MPC และ NMPC ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 10 วินาที ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 2 และถึงที่ 4.....	133
ฉ.10	ค่า IAE ของการควบคุมแบบ NMPC ที่ค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุมต่างๆ ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 2 และถึงที่ 4.....	133
ฉ.11	ค่า IAE ของการควบคุมแบบ NMPC ที่ค่าการแบ่งช่วงเวลาในการหอปกติไมซ์ต่างๆ ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 2 และถึงที่ 4.....	134

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
3.1	เส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการที่เป็นระบบเปิด.....	12
3.2	เส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการสำหรับการคำนวณ.....	13
3.3	โครงสร้างของระบบที่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุม.....	15
3.4	กราฟแสดงพฤติกรรมกรรมการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ.....	16
3.5	แผนภาพขั้นตอนการคำนวณของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เป็นเชิงเส้น.....	24
4.1	แผนภาพชุดทดลองระบบสี่ถัง.....	27
4.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	29
5.1	ระบบสี่ถังและตัวแปรที่เกี่ยวข้อง.....	34
5.2	อัตราการไหลของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการปรับเปอร์เซ็นต์การเปิดปิดวาล์วควบคุม.....	38
5.3	อัตราการไหลของน้ำในถังที่ 1 ที่เปลี่ยนแปลงไปที่เปอร์เซ็นต์วาล์วต่างๆ ที่เปรียบเทียบระหว่างค่าจากการทดลอง และการอธิบายด้วยสมการพหุนาม.....	38
5.4	อัตราการไหลของน้ำในถังที่ 2 ที่เปลี่ยนแปลงไปที่เปอร์เซ็นต์วาล์วต่างๆ ที่เปรียบเทียบระหว่างค่าจากการทดลอง และการอธิบายด้วยสมการพหุนาม.....	39
5.5	อัตราการไหลของน้ำในถังที่ 3 ที่เปลี่ยนแปลงไปที่เปอร์เซ็นต์วาล์วต่างๆ ที่เปรียบเทียบระหว่างค่าจากการทดลอง และการอธิบายด้วยสมการพหุนาม.....	39
5.6	อัตราการไหลของน้ำในถังที่ 4 ที่เปลี่ยนแปลงไปที่เปอร์เซ็นต์วาล์วต่างๆ ที่เปรียบเทียบระหว่างค่าจากการทดลอง และการอธิบายด้วยสมการพหุนาม.....	40
5.7	อัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปต่อความสูง ^{0.5} ที่ผ่านวาล์วตัวที่ 1.....	41
5.8	อัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปต่อความสูง ^{0.5} ที่ผ่านวาล์วตัวที่ 2.....	42
5.9	อัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปต่อความสูง ^{0.5} ที่ผ่านวาล์วตัวที่ 3.....	42
5.10	อัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปต่อความสูง ^{0.5} ที่ผ่านวาล์วตัวที่ 4.....	43
5.11	การปรับเปอร์เซ็นต์วาล์วควบคุมตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ที่เวลาต่างๆ.....	48
5.12	ระดับน้ำในถังที่ 1 ที่เปลี่ยนแปลงไปที่เปอร์เซ็นต์วาล์วต่างๆ.....	49
5.13	ระดับน้ำในถังที่ 2 ที่เปลี่ยนแปลงไปที่เปอร์เซ็นต์วาล์วต่างๆ.....	49
5.14	ระดับน้ำในถังที่ 3 ที่เปลี่ยนแปลงไปที่เปอร์เซ็นต์วาล์วต่างๆ.....	50

ภาพที่	หน้า	
5.15	ระดับน้ำในถังที่ 4 ที่เปลี่ยนแปลงไปที่เปอร์เซ็นต์วาล์วต่างๆ.....	50
5.16	ลักษณะการตอบสนองต่อการปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 1.....	54
5.17	ลักษณะการตอบสนองต่อการปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 2.....	54
5.18	ลักษณะของการปรับวาล์วควบคุมในหนึ่งรอบการอปติไมซ์ ที่ช่วงเวลาในการ อปติไมซ์ 8 ช่วง.....	62
5.19	ลักษณะของการปรับวาล์วควบคุมในหนึ่งรอบการอปติไมซ์ ที่ช่วงเวลาในการ อปติไมซ์ 12 ช่วง.....	63
5.20	ลักษณะของการปรับวาล์วควบคุมในหนึ่งรอบการอปติไมซ์ ที่ช่วงเวลาในการ อปติไมซ์ 16 ช่วง.....	63
6.1	ระดับน้ำถังที่ 1 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 1 และถังที่ 2 ของตัวควบคุม แบบ PID, MPC และ NMPC ที่ $S = 10$	67
6.2	ระดับน้ำถังที่ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 1 และถังที่ 2 ของตัวควบคุม แบบ PID, MPC และ NMPC ที่ $S = 10$	67
6.3	การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 1 และถังที่ 2 ของตัวควบคุมแบบ PID ที่ $S = 10$	68
6.4	การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 1 และถังที่ 2 ของตัวควบคุมแบบ MPC ที่ $S = 10$	68
6.5	การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 1 และถังที่ 2 ของตัวควบคุมแบบ NMPC ที่ $S = 10$	69
6.6	ระดับน้ำถังที่ 3 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 3 และถังที่ 4 ของตัวควบคุม แบบ PID ที่เวลาในการสูมตัวอย่างต่างๆ.....	70
6.7	ระดับน้ำถังที่ 4 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 3 และถังที่ 4 ของตัวควบคุม แบบ PID ที่เวลาในการสูมตัวอย่างต่างๆ.....	70
6.8	การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 3 และถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ PID ที่ $S = 6$	71
6.9	การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 3 และถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ PID ที่ $S = 8$	71
6.10	การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 3 และถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ PID ที่ $S = 10$	72

ภาพที่	หน้า
6.25	81
6.26	82
6.27	82
6.28	83
6.29	83
6.30	84
6.31	85
6.32	85
6.33	86
6.34	87
6.35	87
6.36	88
6.37	89
6.38	89

ภาพที่	หน้า
6.53 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 2 และถึงที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ NMPC ที่ interval = 8.....	98
6.54 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 2 และถึงที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ NMPC ที่ interval = 12.....	99
6.55 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 2 และถึงที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ NMPC ที่ interval = 16.....	99
6.56 ค่า IAE ของการควบคุมแบบ PID, MPC และ NMPC ที่ S = 10 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 1 และถึงที่ 2.....	100
6.57 ค่า IAE ของการควบคุมแบบ PID ที่เวลาในการสูมตัวอย่างต่างๆ ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 3 และถึงที่ 4.....	101
6.58 ค่า IAE ของการควบคุมแบบ MPC ที่เวลาในการสูมตัวอย่างต่างๆ ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 3 และถึงที่ 4.....	102
6.59 ค่า IAE ของการควบคุมแบบ PID, MPC และ NMPC ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 3 และถึงที่ 4.....	103
6.60 ค่า IAE ของการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ NMPC ที่ค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุมต่างๆ ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 3 และถึงที่ 4.....	104
6.61 ค่า IAE ของการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ NMPC ที่การแบ่งช่วงเวลาในการอุปติไมซ์ต่างๆ ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 3 และถึงที่ 4.....	105
6.62 ค่า IAE ของการควบคุมแบบ PID ที่เวลาในการสูมตัวอย่างต่างๆ ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 2 และถึงที่ 4.....	106
6.63 ค่า IAE ของการควบคุมแบบ MPC ที่เวลาในการสูมตัวอย่างต่างๆ ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 2 และถึงที่ 4.....	107
6.64 ค่า IAE ของการควบคุมแบบ PID, MPC และ NMPC ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 2 และถึงที่ 4.....	108
6.65 ค่า IAE ของการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ NMPC ที่ค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุมต่างๆ ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 2 และถึงที่ 4.....	109
6.66 ค่า IAE ของการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ NMPC ที่การแบ่งช่วงเวลาในการอุปติไมซ์ต่างๆ ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 2 และถึงที่ 4.....	110

ภาพที่	หน้า
ก.1	ความสัมพันธระหว่างระดับน้ำในถังที่ 1 กับค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จาก อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดัน..... 118
ก.2	ความสัมพันธระหว่างระดับน้ำในถังที่ 2 กับค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จาก อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดัน..... 119
ก.3	ความสัมพันธระหว่างระดับน้ำในถังที่ 3 กับค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จาก อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดัน..... 119
ก.4	ความสัมพันธระหว่างระดับน้ำในถังที่ 4 กับค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จาก อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดัน..... 120
ข.1	ความสัมพันธระหว่างอัตราการไหลสู่ถังที่ 1 กับค่าจากเครื่องมือวัด..... 121
ข.2	ความสัมพันธระหว่างอัตราการไหลสู่ถังที่ 2 กับค่าจากเครื่องมือวัด..... 121
ข.3	ความสัมพันธระหว่างอัตราการไหลสู่ถังที่ 3 กับค่าจากเครื่องมือวัด..... 122
ข.4	ความสัมพันธระหว่างอัตราการไหลสู่ถังที่ 4 กับค่าจากเครื่องมือวัด..... 122
จ.1	ค่าความผิดพลาดในกรณีที่มีการบวกรระบบ..... 129
จ.2	การอินทิเกรตฟังก์ชัน $f(x)$ ด้วยหลักเกณฑ์ซิมป์สัน 1/3..... 130

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	ค่าคงที่ในรูปเมตริกซ์
A_i	พื้นที่หน้าตัดของถังที่ i
B	ค่าคงที่ในรูปเมตริกซ์
C	ค่าคงที่ในรูปเมตริกซ์
$c(t)$	ค่าของตัวแปรควบคุมที่วัดได้ (controlled variable)
$C_{v, cvi}$	สัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วตัวที่ i
$e(t)$	ค่าความผิดพลาด (error)
exp.	ค่าจากการทดลอง (experiment)
$F_{cv,i}$	อัตราการไหลของน้ำผ่านวาล์วตัวที่ i
F_i	อัตราการไหลของน้ำที่เข้าสู่ถังที่ i
$F_{in,i}$	อัตราการไหลของน้ำขาเข้าระบบถังที่ i
$F_{out,i}$	อัตราการไหลของน้ำขาออกจากระบบถังที่ i
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
G	เมตริกซ์ของค่าเกณฑ์สภาวะคงที่ (Steady state gain matrix)
$g(x)$	อสมการข้อจำกัด (constraints)
G_f	ความถ่วงจำเพาะของของเหลว
h_i	ความสูงของน้ำในถังที่ i
I	เมตริกซ์เอกลักษณ์
K	อัตราการขยายของกระบวนการ (Process gain)
K_c	อัตราการขยายตัวควบคุม (controller gain)
Lin. model	ค่าจากแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น (Linear model)
m	ตัวควบคุมขาออกที่ค่าความผิดพลาดเป็นศูนย์
$m(t)$	ตัวควบคุมขาออก (controller output)
Nonlin. model	ค่าจากแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear model)

R	อินเวิร์สของทรานสโพสของเมทริกซ์
$r(t)$	ค่าเป้าหมาย (set point)
T	เวลาในการสุ่มตัวอย่าง (Sampling time)
t_0	เดดไทม์ (Dead time) ของระบบ
t_f	เวลาสุดท้ายที่ต้องการควบคุม
u	ตัวแปรปรับ (Manipulated variable)
uwt	เวกเตอร์น้ำหนักของการเปิดปิดวาล์วควบคุม
V_i	ปริมาตรของน้ำในถังที่ i
w	เวกเตอร์น้ำหนัก
x	ตัวแปรควบคุม (State variable)
y	ตัวแปรเอาต์พุต (Output variable, Measurable)
ywt	เวกเตอร์น้ำหนักของระดับน้ำในถังที่ต้องการควบคุม
z	ตัวแปรที่ต้องการออปติไมซ์ (optimization variables)

ตัวอักษรกรีก

ϕ_i	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของถังที่ i
λ	ค่ารากของระบบ
Λ	เมทริกซ์สำหรับหาค่า Relative Gain Array
ρ	ความหนาแน่นของน้ำ
τ	ค่าคงตัวของเวลา (time constant)
τ_d	เวลาอนุพันธ์ (derivative time)
τ_i	เวลาปริพันธ์ (integral time)

ตัวอักษรย่อ

DMC	Dynamic Matrix Control
DMPC	distributed model predictive control
GMC	Generic model control
IAE	Integral of the absolute value of the error
IMC	Internal Model Control
IVPs	Initial value problems
LMPC	Linear model predictive control,
MPC	Model predictive control
mp-MPC	Multi-parametric model predictive control
NLP	Nonlinear programming
NMPC	Nonlinear model predictive control,
ODE	Ordinary differential equation
PID	Proportional Integral Derivative control
SQP	sequential quadratic programming

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการในโรงงานอุตสาหกรรมโดยเฉพาะอุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเคมี จำเป็นต้องมีการควบคุมอัตโนมัติเพื่อให้สามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพและผลผลิตตามที่ต้องการ โดยการควบคุมระบบมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน การควบคุมแบบแรกที่ถูกนำมาใช้คือการควบคุมแบบสัดส่วนปริพันธ์อนุพันธ์ หรือพีไอดี (Proportional Integral Derivative control, PID) ได้มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวางในช่วง 70 ปีมานี้สามารถนำมาควบคุมกระบวนการอย่างง่ายได้โดยใช้หลักการของการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control) ที่ไม่ต้องอาศัยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ แต่เมื่อโรงงานอุตสาหกรรมได้มีการพัฒนาไปมากขึ้น เพื่อให้รองรับกับการอุปโภคบริโภคของประชากรที่เพิ่มขึ้น และการขยายตัวของเศรษฐกิจในปัจจุบัน ทำให้กระบวนการในอุตสาหกรรมมีความซับซ้อนมากขึ้น คือมีลักษณะเป็นระบบหลายตัวแปรแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear multivariable system) ซึ่งจะมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างการควบคุมแต่ละตัวแปร ทำให้การควบคุมแบบพีไอดีไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ควบคุมกระบวนการ [1] จึงได้มีการพัฒนาการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟขึ้นมา ซึ่งการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ (Model predictive control, MPC) เป็นการควบคุมที่อาศัยแบบจำลองของระบบ ซึ่งจะสามารถควบคุมระบบที่มีตัวแปรที่ต้องการควบคุมหลายตัว ระบบที่มีข้อจำกัดของการทำงาน และมีตัวแปรรบกวน โดยมีหลักการคือทำนายการตอบสนองของระบบในอนาคตแล้วทำการคำนวณหาตัวแปรปรับสำหรับการควบคุม ซึ่งได้นำมาใช้งานในการควบคุมระบบหลากหลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโรงงานอุตสาหกรรมเคมี เช่น การควบคุมหอกลิ้น ควบคุมถังปฏิกรณ์ หรือควบคุมเครื่องจักรต่างๆ รวมไปถึงการใช้ในด้านชีวกระบวนการ เป็นต้น

ในการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการควบคุมระดับน้ำในระบบสี่ถังซึ่งเป็นตัวแทนของระบบที่มีหลายตัวแปร ที่แบบจำลองของระบบแสดงพฤติกรรมของความไม่เป็นเชิงเส้นสูง โดยตัวแปรปรับของกระบวนการนี้คือการเปิด-ปิดของวาล์วควบคุมซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำ และตัวแปรควบคุมคือระดับน้ำในถังสี่ใบ รายละเอียดของชุดทดลองระบบสี่ถังจะอธิบายไว้ในหัวข้อวิธีดำเนินการวิจัย ในการควบคุมระบบจะใช้ตัวควบคุมแบบอาศัยแบบจำลอง ได้แก่ ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear model predictive control, NMPC) และตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบเชิงเส้น (Linear model predictive control, LMPC) โดยตัวควบคุมแบบ NMPC [2] มีข้อดีกว่าตัวควบคุมแบบ LMPC คือแบบจำลองที่

นำไปใช้ควบคุมสร้างขึ้นมาจากระบบการจริงซึ่งจะอยู่ในรูปไม่เป็นเชิงเส้น ในขณะที่ LMPC จะใช้แบบจำลองที่อยู่ในรูปเชิงเส้นซึ่งส่งผลให้แบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนไปจากระบบการจริง อย่างไรก็ตามการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ NMPC มีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงในการควบคุมระบบคือเวลาที่ใช้ในการคำนวณค่า (Computation time) ซึ่งหากมีการเลือกใช้ค่าขอบเขตเวลาในการทำนาย (Prediction horizon) ขอบเขตเวลาในการควบคุม (Control horizon) และการแบ่งช่วงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ (Interval time) ที่ไม่เหมาะสมจะส่งผลต่อสมรรถนะการควบคุมได้ นอกจากนี้ในการวิจัยนี้ยังได้ศึกษาการควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีซึ่งเป็นตัวควบคุมที่ไม่อาศัยแบบจำลองอีกด้วย จากนั้นเปรียบเทียบความสามารถในการควบคุมของตัวควบคุมทั้งสามวิธีด้วยการเปรียบเทียบสมรรถนะ (Performance) ในการควบคุมระบบ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เปรียบเทียบสมรรถนะของการควบคุมระบบสี่ถึง โดยการใช้ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear model predictive control, NMPC) ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ (Model predictive control, MPC) และตัวควบคุมแบบพีไอดี (Proportional Integral Derivative control, PID)
- 2) ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆต่อสมรรถนะในการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เป็นเชิงเส้น NMPC ได้แก่ ค่าขอบเขตเวลาในการทำนาย (Prediction horizon) ขอบเขตเวลาในการควบคุม (Control horizon) และการแบ่งช่วงเวลา (Interval time) ในการออกแบบ ซึ่งต้องคำนึงถึงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ (Computation time) ให้เหมาะสมแก่การนำไปควบคุมระบบการทดลองจริง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) สร้างแบบจำลองระบบสี่ถึงจากทฤษฎี ร่วมกับการสร้างแบบจำลองจากการทดลอง
- 2) สร้างชุดคำสั่งสำหรับการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear model predictive control, NMPC) โดยใช้วิธีการของ Adams-Moulton ร่วมกับ Interior-point filter line-search

- 3) สร้างตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบเป็นเชิงเส้น (Model predictive control, MPC) โดยพัฒนาจากชุดคำสั่ง Model Predictive Control Toolbox Version 3.2 ในโปรแกรม MATLAB
- 4) สร้างชุดคำสั่งสำหรับตัวควบคุมแบบพีไอดี (Proportional Integral Derivative control, PID) และปรับแต่งค่าตัวแปรปรับ (Tuning parameter) ด้วยวิธีการ Minimum Error Integral Criteria (Minimum IAE)
- 5) ควบคุมระดับน้ำของระบบสี่ถัง ในกรณีที่มีการรบกวนระบบ (Disturbance input) โดยใช้ตัวควบคุมทั้งสามแบบคือ NMPC, MPC และ PID แล้วเปรียบเทียบสมรรถนะของการใช้ตัวควบคุมแบบต่างๆ
- 6) สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอดีและตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบเป็นเชิงเส้น ศึกษาการความแตกต่างของเวลาในการสุ่มตัวอย่าง (Sampling time) ที่เวลา 6 วินาที, 8 วินาที และ 10 วินาที
- 7) สำหรับตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เป็นเชิงเส้น NMPC ศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ค่าขอบเขตเวลาในการทำนาย (Prediction horizon) และขอบเขตเวลาในการควบคุม (Control horizon) โดยทำการศึกษาที่เวลา 20 วินาที, 30 วินาที และ 40 วินาที ศึกษาการแบ่งช่วงเวลา (Interval time) ในการออปติไมซ์ โดยศึกษาที่ 8 ช่วง, 12 ช่วง และ 16 ช่วง โดยการมีสมรรถนะในการควบคุมที่ดีต้องคำนึงถึงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ (Computation time) ให้เหมาะสมกับกระบวนการที่ทำการทดลอง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) วิธีการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เป็นเชิงเส้น (NMPC) ในการควบคุมระบบสี่ถัง
- 2) ทราบถึงผลกระทบการเปลี่ยนแปลงค่าขอบเขตเวลาในการทำนาย (Prediction horizon) ค่าขอบเขตเวลาในการควบคุม (Control horizon) และการแบ่งช่วงเวลา (Interval time) ในการออปติไมซ์ ต่อสมรรถนะของการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ NMPC

1.5 แผนการดำเนินงาน

	(เริ่มทำวิทยานิพนธ์เมื่อเดือนตุลาคม 2552)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1	ศึกษารรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระบวนการ	←————→																		
2	สร้างชุดอุปกรณ์ระบบสั่งถึง		←————→																	
3	สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการควบคุมระบบสั่งถึง				↔															
4	ทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่สภาวะต่างๆ						←————→													
5	สร้างชุดคำสั่งสำหรับการควบคุมระบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป							←————→												
6	ทำการทดลองควบคุมระบบโดยใช้ตัวควบคุมแบบต่างๆ									←————→										
7	เปรียบเทียบสมรรถนะของการควบคุม															←————→				
8	วิเคราะห์ สรุปผล และจัดทำวิทยานิพนธ์																←————→			

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ (Model predictive control, MPC) เป็นการควบคุมที่มีการพัฒนาไปมากกว่าการควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี (Proportional Integral Derivative control, PID) โดยประสบความสำเร็จในการประยุกต์ใช้ในกระบวนการต่างๆ เนื่องจากความสามารถของตัวควบคุมในการจัดการกับปัญหาที่ต้องการการควบคุมหลายตัวแปร การควบคุมปัญหาให้อยู่ในขอบเขตของข้อจำกัด รวมไปถึงสามารถควบคุมระบบที่ไม่มีเสถียรภาพหรือมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของระบบได้ [3] รูปแบบการควบคุมระบบจะมีการรับค่าเริ่มต้นจากระบบการจากนั้นนำไปทำการอบติไม่ซับซ้อนทำให้มีความคลาดเคลื่อนจากค่าเป้าหมายน้อยที่สุด แล้วนำค่าที่ได้ไปควบคุมระบบเช่นนี้ไปเรื่อยๆ เป็นการทำการทำนายค่าในอนาคต เพื่อคำนวณค่าปรับแต่งระบบในเวลาปัจจุบัน แนวคิดของการควบคุมแบบ MPC นี้จัดเป็นปัญหาแบบวงเปิดแบบป้อนกลับ (open-loop optimal feedback) ดังจะอธิบายหลักการในบทที่ 3

ความเป็นมาของการควบคุมแบบ MPC นั้นแรกเริ่มการควบคุมแบบ MPC มีลักษณะเป็นแบบฮิวริสติก (Heuristic) [4-6] การควบคุมที่กล่าวถึงนี้คือการควบคุมแบบไดนามิกเมทริกซ์ (Dynamic Matrix Control, DMC) และการควบคุมแบบโมเดลอัลกอริทึม (Model algorithmic control, MAC) [7] การควบคุมแบบ DMC จะใช้หลักการของการตอบสนองแบบสเต็ป (step response test) เพื่อสร้างแบบจำลอง ส่วนการควบคุมแบบ MAC จะสร้างแบบจำลองจากการตอบสนองอิมพัลส์ (impulse response test) โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์อยู่ในรูปอัลกอริทึมแบบโปรแกรมกำลังสอง (Quadratic program) การควบคุมด้วยฮิวริสติกนี้เป็นวิธีการพื้นฐานสำหรับการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการมานานหลายปี ต่อมามีการนำรูปแบบสมการตัวแปรสแตต (state space form) มาใช้ซึ่งสมการที่ได้จะอยู่ในรูปสมการเชิงเส้น

การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ (Model predictive control, MPC) แบ่งออกเป็นการควบคุมโดยอาศัยแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นและการควบคุมโดยอาศัยแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบเชิงเส้น (Linear model predictive control, LMPC) ได้มีการศึกษากันมายาวนานกว่า 40 ปี โดย LMPC นี้จะมีส่วนของการทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ส่วนใหญ่ที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นเป็นเชิงเส้น (linearization) ก่อน จากนั้นจึงนำไปทำการคำนวณค่าและทำการควบคุมระบบ ส่วนการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear model predictive control, NMPC) ที่กำลังได้รับความสนใจในมากขึ้นในช่วง

20 ปีที่ผ่านมาวิธีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อยู่ในรูปไม่เป็นเชิงเส้นสามารถนำไปแก้ปัญหาได้ทันทีด้วยปัญหาโปรแกรมที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear programming, NLP) ซึ่ง Allgower [8] ได้บรรยายถึงทฤษฎีของการควบคุมแบบ NMPC รวมถึงงานวิจัยที่ศึกษาในด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นเสถียรภาพของการควบคุม ความทนทานของการควบคุม การป้อนกลับของเอาต์พุต NMPC ที่ต้องการการคำนวณปัญหาแบบออนไลน์ จากนั้นนำไปแก้ปัญหาแบบไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งจะใช้เวลาในการคำนวณมาก นับเป็นข้อจำกัดหนึ่งของการควบคุมแบบ NMPC ทำให้นำไปควบคุมระบบที่ต้องการความเร็วสูงไม่ได้ ทำให้มีการเสนอการปรับการคำนวณให้มีความเร็วมากขึ้น [9] โดยประยุกต์ใช้ Multiple shooting สำหรับการเปลี่ยนปัญหา NMPC ให้อยู่ในรูปปัญหาโปรแกรมที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear program problem, NLP) ด้วยวิธี Collocation on finite elements ซึ่งจะให้สมรรถนะที่ดีในการควบคุม รวมทั้งยังใช้เวลาในการคำนวณน้อยอีกด้วย

การปรับแต่งระบบและการปรับค่าตัวควบคุม ได้มีการเสนอวิธีการไว้ทั้ง Wojsznis [10], Nikolaou [11] และ Henson [12] โดยสรุปได้ว่า มีการเสนอการปรับแต่งช่วงการเก็บข้อมูล (Sampling interval) แขนงการควบคุม (Control horizon) แขนงการทำนาย (Prediction horizon) และเมทริกซ์ถ่วงน้ำหนัก (Weighting matrices) มีผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณ การตอบสนองต่อการควบคุม และสมรรถนะของการควบคุมกระบวนการ ซึ่งจะต้องมีการปรับค่าให้สมดุลกัน เพื่อการควบคุมที่มีสมรรถนะสูงสุดโดยใช้เวลาในการควบคุมไม่มากเกินไป ซึ่งฮิลริสติกสำหรับการปรับแต่ง MPC จะต้องคำนึงถึงเสถียรภาพของตัวควบคุม ความทนทาน รวมไปถึงสมรรถนะของตัวควบคุม สามารถประยุกต์ใช้กับการควบคุมระบบอื่นได้

ตัวอย่างกระบวนการที่มีการควบคุมด้วยการควบคุมแบบ MPC และ NMPC มีการนำไปใช้งานที่หลากหลายในงานอุตสาหกรรม ทั้งการควบคุมในอุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเคมี เช่น ควบคุมเครื่องปฏิกรณ์เคมี เครื่องปฏิกรณ์ชีวเคมี กระบวนการโพลีเมอร์ไรเซชัน การกลั่น การกลั่นน้ำมันดิบ หรือเครื่องฟลูอิดไดซ์เบด เป็นต้น และการควบคุมกระบวนการในแขนงอื่น เช่น การผลิตเยื่อกระดาษ อุตสาหกรรมเหมืองแร่ เต้าเผา อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น [12-14] นอกจากนี้ยังมีการใช้ตัวควบคุมแบบ MPC สำหรับการควบคุมระดับของเหลวแบบเฉื่อย โดย อธิป [15] ซึ่งจะมีการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ รวมถึงทดสอบความทนทานของตัวควบคุม และผลของการมีตัวรบกวนระบบ พบว่าตัวควบคุมแบบ MPC สามารถจัดการกับปัญหาได้ดี ส่วนการศึกษาปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์เพอร์เวเพอเรทีฟเมมเบรน [16] มีการศึกษาตัวแปรอุณหภูมิซึ่งจะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาในระบบ จึงได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วทำการควบคุมอุณหภูมิด้วยการควบคุมแบบ MPC และการควบคุม MPC ร่วมกับการประมาณค่า

ด้วยตัวกรองคาลมาน (Kalman filter) ซึ่งให้ผลการควบคุมที่ดีเทียบกับการควบคุมแบบเจเนอริกโมเดล (Generic model control, GMC)

การสร้างแบบจำลองเป็นสิ่งจำเป็นต้องทำสำหรับใช้เป็นโครงสร้างในการควบคุมกระบวนการต่างๆที่อาศัยแบบจำลอง เราอาจหาแบบจำลองด้วยวิธีการต่างๆได้ วิธีการอย่างง่าย เช่นการตอบสนองแบบสเต็ป (step response) ของอินพุทและเอาต์พุท หรือวิธีการหาแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งแบ่งออกเป็นสามวิธีด้วยกัน [12] คือ วิธีการสร้างแบบจำลองพื้นฐานจากสมการทางคณิตศาสตร์ โดยการคูณสมการสมมูลมวล โมเมนตัม และพลังงาน ซึ่งเป็นรูปแบบที่อาศัยข้อมูลจากระบบน้อย แต่ก็มีข้อเสียก็คือหากระบวนการที่ถูกปรับปรุงใหม่มีการเพิ่มเติมแต่งสิ่งใดๆเข้าไป จะทำให้แบบจำลองมีความผิดพลาดไป ต้องสร้างแบบจำลองขึ้นมาใหม่ วิธีการสร้างแบบจำลองจากการทดลอง คือสร้างขึ้นมาจากข้อมูลของกระบวนการที่มี เหมาะสำหรับการที่ไม่ทราบค่ารายละเอียดของกระบวนการ หรือรายละเอียดมากและซับซ้อนเกินกว่าจะนำมาจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ได้ กระบวนการเหล่านี้มักทำการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ นิวรอนเน็ตเวิร์ก (Artificial neural network) หรือโครงสร้างโพลีโนเมียลแบบ ARMAX (polynomial ARMAX models) และวิธีการสุดท้าย ซึ่งจะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับการทำการทดลองเพื่อหาค่ากลุ่มฟังก์ชันที่ไม่ทราบค่า ดังเช่นทำการทดลองเพื่อหาค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยา สำหรับกระบวนการที่เกิดในเครื่องปฏิกรณ์เคมี เป็นต้น

ในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบ MPC และ NMPC กับการควบคุมระดับน้ำในถังสี่ใบ การควบคุมระดับน้ำในถังสี่ใบจะพิจารณาถึงระดับน้ำในถังที่มีการเปลี่ยนแปลงโดยแบ่งออกเป็นวงจรควบคุมสองวงจร (control loop) ซึ่งมีปฏิสัมพันธ์ภายในต่อกันทั้งสิ้นได้มีผู้ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องนี้ไว้ รวมถึงใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับทดลองในห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรมเคมี [17,18] ซึ่งนำมาใช้เป็นตัวแทนในการศึกษาระบบการควบคุมที่กระบวนการมีหลายตัวแปร รวมถึงมีขอบเขตของการควบคุมที่ต้องพิจารณา [19] การควบคุมระดับน้ำในระบบสี่ถังได้แสดงตัวอย่างการควบคุมแบบหลายตัวแปรไว้ และได้อธิบายการทำงานของระบบการควบคุมระดับน้ำสี่ถังไว้อย่างละเอียดอีกด้วย โดยได้ศึกษาว่าเสถียรภาพของกระบวนการระบบสามารถปรับเปลี่ยนได้จากการปรับสัดส่วนการไหลของน้ำผ่านวาล์วซึ่งอาจทำให้ค่าซีโร่ (zero) ของระบบมีเสถียรภาพ หรือไม่มีเสถียรภาพได้ ส่วน Raff [20] พบว่าการใช้ค่าการทำนายที่เหมาะสม prediction horizon จะควบคุมระบบที่แม้จะไม่มีเสถียรภาพของข้อจำกัด (constraints) ให้มีเสถียรภาพได้

การทดลองระบบสี่ถังที่มีผู้ศึกษาไว้ส่วนใหญ่ [20-22] จะมีรูปแบบเป็นอัตราการไหลของน้ำเกิดจากการขับเคลื่อนโดยเปลี่ยนความเร็วของปั๊มทำให้ระดับน้ำที่ไหลสู่ถังสองถังบนกับการไหลสู่สองถังล่าง มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน และทำการควบคุมโดยการปรับสัดส่วนการไหลของน้ำก่อนเข้าแยกเข้าถังด้านบนและด้านล่าง ข้อแตกต่างจากงานวิจัยนี้คืองานวิจัยนี้ใช้วาล์วควบคุมเป็นตัวควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่เข้าสู่ถังต่างๆ ดังจะอธิบายลักษณะของการจัดวางชุดทดลองและวิธีการทดลองในบทที่ 3 ซึ่งการปรับวาล์วควบคุมจะทำให้อัตราการไหลของน้ำที่เข้าสู่สองถังด้านบนกับสองถังด้านล่างเป็นไปในทิศทางตรงข้ามกัน ชุดทดลองระบบสี่ถังในงานวิจัยนี้เมื่อนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะแสดงพฤติกรรมความไม่เป็นเชิงเส้นสูงกว่าชุดทดลองที่มีการควบคุมโดยการเปลี่ยนความเร็วของปั๊มเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของวาล์วควบคุมนั่นเอง

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ชุดการทดลองเดียวกับ นายอลงกรณ์ [23] นี้ได้ศึกษาการควบคุมระบบโดยใช้ตัวควบคุมแบบมัลติพารามิเตอร์ิกโมเดลพรีดิกทีฟ (Multi-parametric model predictive control, mp-MPC) [24] ซึ่งเป็นเทคนิคในการคำนวณแบบออฟไลน์ก่อนด้วยเทคนิคมัลติพารามิเตอร์ิกโปรแกรมมิ่ง แล้วจึงส่งผลการคำนวณไปปรับค่าของกระบวนการแบบออนไลน์ ในช่วงการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการ ซึ่งจากนั้นทำการเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอดี และการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ แล้วพบว่า การควบคุมแบบมัลติพารามิเตอร์ิกมีสมรรถนะในการควบคุมที่ดีและมีการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรปรับที่ไม่รุนแรง ส่วนในงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาจะมีการสร้างโครงสร้างของแบบจำลองใหม่ รวมทั้งมีการหาค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่าที่เกี่ยวข้องใหม่ทั้งหมด

การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบต่างๆ เพื่อควบคุมระบบสี่ถังมีดังต่อไปนี้

- การใช้ตัวควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองภายใน (Internal Model Control, IMC) และตัวควบคุมแบบไดนามิกซ์เมทริกซ์ (Dynamic Matrix Control, DMC) [18]
- การควบคุมแบบนิรอรล พีชชี และ นิรอรล-พีชชี [22] โดยการโครงสร้างของโครงข่ายนิรอรลจากค่าอินพุทและค่าเอาท์พุทของกระบวนการเป็นค่าตัวอย่าง แล้วนำมาสอนให้ระบบเครือข่ายเพื่อเป็นข้อมูลในการสร้างแบบจำลองของระบบ ซึ่งผลการจำลองพบว่าสามารถนำวิธีการเหล่านี้ไปสร้างแบบจำลองได้
- การใช้ตัวควบคุมแบบดิสทริบิวทีฟโมเดลพรีดิกทีฟ (distributed model predictive control, DMPC) [25]

ตัวควบคุมแบบ NMPC ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบ PI ซึ่งเป็นตัวควบคุมที่ไม่อาศัยแบบจำลองและพบว่า การควบคุมระบบที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองหรือกรณีที่มีตัวแปรกระบวนการระบบมากขึ้น NMPC ยังรับมือได้ไม่ได้นัก [14] ซึ่งมีการสรุปไว้ว่า การควบคุมแบบ NMPC ให้ผลการควบคุมที่ดีกว่า PI ในกรณีเปลี่ยนค่าเป้าหมาย (set point) แต่อย่างไรก็ตาม PI ก็มีข้อดีในเรื่องของการควบคุมระบบที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองที่สามารถควบคุมให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ดีกว่าแบบ NMPC คือมีความทนทานที่มากกว่า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระบบที่แต่ละงานวิจัยทำการศึกษาและพารามิเตอร์ที่ใช้

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้มีการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบ NMPC นั้นไม่ได้มีการศึกษาในกรณีที่มีการนำไปควบคุมระบบปฏิบัติการจริง [14,19] ซึ่งการนำไปควบคุมระบบจริงจะมีผลของตัวแปรกระบวนการภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งมีผลต่อการควบคุมระบบด้วย รวมไปถึงการควบคุมระบบจริงต้องคำนึงถึงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ (Computation time) ให้เสร็จสิ้นภายในเวลาที่ใช้ในการสุ่มตัวอย่าง (Sampling time) รอบถัดไป ซึ่งเป็นข้อจำกัดหนึ่งของการควบคุมแบบ NMPC ซึ่งใช้เวลาในการคำนวณช้า โดยเวลาในการคำนวณที่กล่าวถึงนี้คือเวลาที่ตัวควบคุมแบบ NMPC ใช้ในการแปลงสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่อยู่ในรูปอนุพันธ์สามัญที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้อยู่ในรูปแบบโปรแกรมที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear program problem, NLP) และเวลาที่ตัวควบคุมใช้ในการแก้ปัญหาโปรแกรมที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยวิธีการฮอปติไมซ์ (Optimization) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) นั้นเอง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้คัดเลือกวิธีการควบคุมที่ใช้เวลาในการคำนวณที่รวดเร็วและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมระบบปฏิบัติการจริงได้ โดยวิธีที่เลือกใช้ได้แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 3 ในหัวข้อตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เป็นเชิงเส้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

แนวคิดและทฤษฎี

3.1 ตัวควบคุมแบบสัดส่วนปริพันธ์อนุพันธ์

การควบคุมแบบสัดส่วนปริพันธ์อนุพันธ์ หรือพีไอดี (Proportional Integral Derivative control, PID) เป็นวิธีการควบคุมแบบหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เป็นการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control) ซึ่งมีหลักการคือการควบคุมกระบวนการเริ่มต้นจะทำการวัดค่าตัวแปรควบคุม (control variable) จากนั้นนำค่าที่วัดได้ไปเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมาย (set point) จะได้เป็นค่าความผิดพลาด (error) ที่เกิดขึ้น วัตถุประสงค์ของการควบคุมคือต้องการลดค่าความผิดพลาดให้เป็นศูนย์ โดยการคำนวณค่าตัวแปรปรับ (manipulated variable) เพื่อให้ตัวแปรควบคุมมีค่าตามที่ต้องการ ดังแสดงในสมการที่ (3.1)

$$e(t) = r(t) - c(t) \quad (3.1)$$

โดยที่ $r(t)$ คือ ค่าเป้าหมาย (set point) เป็นค่าที่ต้องการสำหรับตัวแปรควบคุม
 $c(t)$ คือ ค่าของตัวแปรควบคุมที่วัดได้ (controlled variable)
 $e(t)$ คือ ค่าความผิดพลาด (error)

ตัวควบคุมแบบพีไอดีประกอบด้วย 3 ส่วน คือ สัดส่วน หรือพี (Proportional, P) ปริพันธ์ หรือไอ (Integral, I) และอนุพันธ์ หรือดี (Derivative, D) โดยทั้ง 3 ส่วนนี้จะทำหน้าที่หลักต่างกัน และทำงานร่วมกัน เพื่อให้การควบคุมของระบบเป็นไปได้โดยมีเสถียรภาพที่ดีที่สุด สมการการควบคุมแสดงได้ดังสมการที่ (3.2)

$$m(t) = \bar{m} + K_c e(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int e(t) dt + K_c \tau_D \frac{de(t)}{dt} \quad (3.2)$$

โดยที่ $m(t)$ คือ ตัวควบคุมขาออก (controller output) หรือตัวแปรปรับ
 \bar{m} คือ ตัวควบคุมขาออกที่ค่าความผิดพลาดเป็นศูนย์
 K_c คือ อัตราการขยายตัวควบคุม (controller gain)
 τ_I คือ เวลาปริพันธ์ (integral time) หรือ เวลารีเซต (reset time)
 τ_D คือ เวลาอนุพันธ์ (derivative time)

การใช้โหมด P จะเป็นการลดผลของสิ่งรบกวนต่อระบบที่ทำการควบคุม แต่จะมีข้อเสียคือมีค่าออฟเซต (offset) หรือเรียกว่าค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัว (steady-state error) ซึ่งมีผลคือการควบคุมจะไม่เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการ ส่วนการใช้โหมด I ควบคู่ไปกับโหมด P จะช่วยเพิ่มหรือลดการควบคุมให้เข้าใกล้ค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ แต่การเพิ่มการควบคุมในโหมด I มากเกินไปจะทำให้เกิดการควบคุมที่เกินค่าเป้าหมายแบบ overshoot และหากมีการใช้โหมด D มาเสริม จะลดการเกิด overshoot ทำให้การควบคุมมีสมรรถนะดีขึ้น

การควบคุมแบบ PID นิยมใช้ในระบบที่ไม่ต้องการความรวดเร็วในการควบคุม เช่นการควบคุมอุณหภูมิ เนื่องจากการควบคุมระบบที่มีความรวดเร็ว เช่นการควบคุมอัตราการไหล จะทำให้เกิดการรบกวน (noise) ขึ้นได้ง่าย

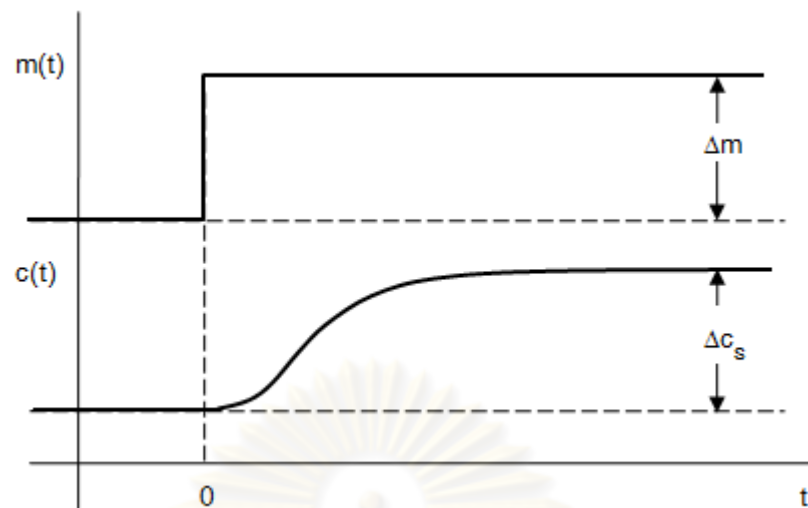
3.1.1 การทดสอบการตอบสนองของกระบวนการ

การทดสอบการตอบสนองของกระบวนการหรือที่เรียกว่าการทดสอบแบบสเต็ป (Process step testing) เป็นวิธีทดสอบการเปลี่ยนแปลงแบบสเต็ปของตัวควบคุม ในกรณี ระบบเปิด (Open loop system) ที่ยังไม่มี การควบคุม แล้วบันทึกค่าของตัวแปรควบคุมที่วัดได้ที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการปรับค่าตัวควบคุมแบบสเต็ปนั้น จากนั้นนำมาสร้างกราฟระหว่างตัวแปรควบคุมและเวลา โดยช่วงกราฟที่สร้างจะต้องครอบคลุมช่วงเวลาทั้งหมดจากสภาวะคงตัวแรกไปสู่สภาวะคงตัวใหม่ การทดสอบแบบสเต็ปนี้ใช้เวลามากหรือน้อยนั้นจะขึ้นอยู่กับความเร็วในการตอบสนองของกระบวนการนั้นๆ ในกรณีที่ระบบไม่มีตัวแปรรบกวนกราฟการตอบสนองแบบสเต็ปจะแสดงได้ดังภาพที่ 3.1 เมื่อ $m(t)$ คือตัวควบคุมขาออก ซึ่งมีขนาดการเปลี่ยนแปลง Δm และ $c(t)$ คือตัวแปรควบคุมที่วัดได้ ซึ่งมีขนาด Δc ,

สมการที่ (3.3) เป็นสมการอธิบายการตอบสนองแบบสเต็ปสำหรับระบบอันดับหนึ่งแบบ first-order-plus dead-time (FOPDT) model โดยเมื่อแปลง Laplace transform จะได้สมการที่ (3.4) [26]

$$C(s) = \frac{K e^{-t_0 s}}{\tau s + 1} \cdot \frac{\Delta m}{s} \quad (3.3)$$

$$C(t) = K \Delta m u(t - t_0) \left(1 - e^{-(t-t_0)/\tau}\right) \quad (3.4)$$



ภาพที่ 3.1 เส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการที่เป็นระบบเปิด

การหาค่าอัตราขยายของกระบวนการ (Process gain)

จากภาพที่ 3.1 ค่า Δc_s เป็นค่าที่สภาวะคงตัวใหม่ของระบบ ดังนั้นจากสมการที่ (3.4) จะสามารถหาค่าของ Δc_s ได้ดังสมการที่ (3.5) และจัดรูปเพื่อหาค่าเกณฑ์ของระบบที่สภาวะคงตัวได้ดังสมการที่ (3.6)

$$\Delta c_s = \lim_{t \rightarrow \infty} C(t) = K \Delta m \quad (3.5)$$

$$K = \frac{\Delta c_s}{\Delta m} \quad (3.6)$$

การหาค่าคงตัวของเวลา (Time constant, τ) และเดดไทม์ (Dead time, t_0)

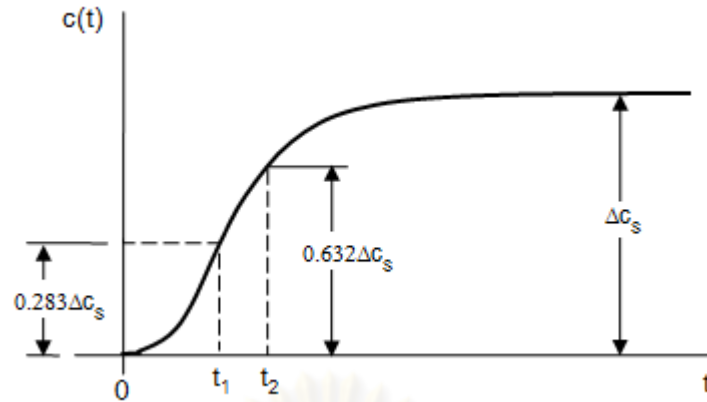
เวลา t_1 และ t_2 เป็นเวลาที่ค่าของตัวแปรควบคุม มีค่าเท่ากับ 28.3% และ 63.2% ของค่าสุดท้ายตามลำดับดังภาพที่ 3.2 ซึ่งนำไปใช้คำนวณค่า ค่าคงตัวของเวลา (Time constant, τ) และ Dead time (t_0) ดังสมการ (3.7) และ (3.8)

$$\tau = \frac{3}{2}(t_2 - t_1) \quad (3.7)$$

$$t_0 = t_2 - \tau \quad (3.8)$$

$$\text{เมื่อ } t_1 \text{ คือเวลาที่ } C = 0.283\Delta c_s \quad (3.9)$$

$$t_2 \text{ คือเวลาที่ } C = 0.632\Delta c_s \quad (3.10)$$



ภาพที่ 3.2 เส้นโค้งการตอบสนองของกระบวนการสำหรับการคำนวณ

3.1.2 วิธีการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดี

วิธีการปรับแต่งตัวควบคุมแบบพีไอดีที่จะกล่าวถึงนี้คือวิธีการ Minimum Error Integral Criteria (Minimum IAE) ของ Lopez et al. (1967) [31] ซึ่งกำหนดสมมุติฐานเบื้องต้นคือ ฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) ของระบบที่มีการรบกวน (Disturbance input) ระบบกับสัญญาณขาออกของตัวควบคุม มีฟังก์ชันถ่ายโอนเหมือนกัน ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับแต่งในกรณีที่มีการรบกวนระบบสรุปได้ดังตารางที่ 3.1 เมื่อ t_0/τ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 1.0 ซึ่งค่า τ และ t_0 นี้หาได้ดังแสดงในหัวข้อก่อนหน้านี้

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของวิธีการ Minimum IAE ในกรณีที่มีการรบกวนระบบ

ตัวควบคุม	ค่าสัดส่วน (P)	ค่าปริพันธ์ (I)	ค่าอนุพันธ์ (D)
P	$K_c = \frac{0.902}{K} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{-0.985}$	-	-
PI	$K_c = \frac{0.984}{K} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{-0.986}$	$\tau_I = \frac{\tau}{0.608} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{0.707}$	-
PID	$K_c = \frac{1.435}{K} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{-0.921}$	$\tau_I = \frac{\tau}{0.878} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{0.749}$	$\tau_D = 0.482\tau \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{1.137}$

3.2 ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ

การควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ (Model predictive control, MPC) สามารถแบ่งออกเป็น แบบอาศัยแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น และอาศัยแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น การควบคุมแบบ MPC ที่เป็นที่รู้จักกันดีเช่น Dynamic Matrix Control (DMC), Model Algorithmic Control (MAC) และ Generalized Predictive Control (GPC) เป็นต้น [7,27]

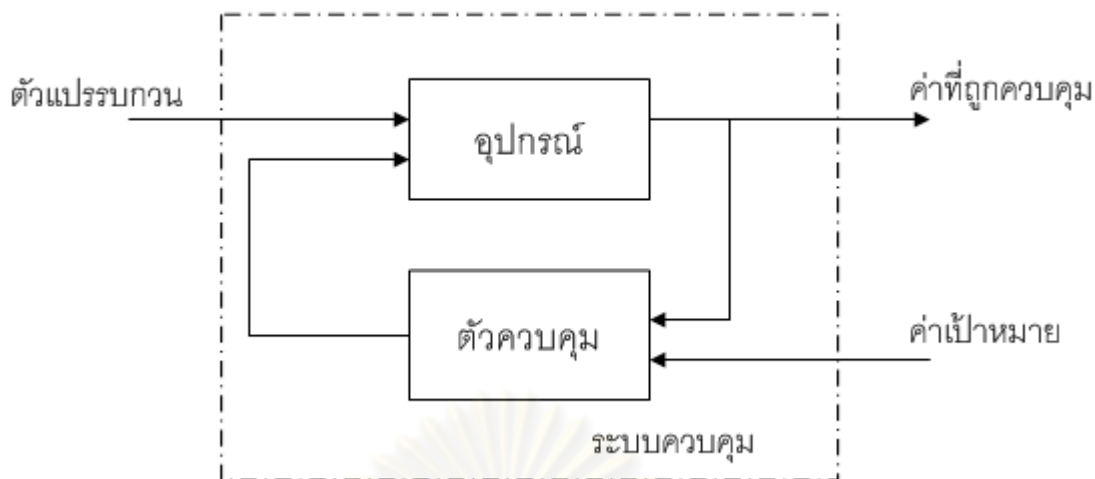
ระบบที่สามารถควบคุมได้ด้วยการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ

- 1) มีตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุมหลายตัว
- 2) ขอบเขตทั้งตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุม
- 3) มีความผิดพลาดของแบบจำลอง (model mismatch) หรือสัญญาณรบกวน (disturbance)
- 4) มีตัวหน่วงเวลา

คำตอบสนองของกระบวนการสามารถหาได้จากการทำออปติไมซ์ (Optimization) ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) โดยการกำหนดเป็นค่าต่ำสุดของกำลังสองของความคลาดเคลื่อน จากนั้นจึงคำนวณหาการควบคุมที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าน้อยที่สุด (หรือมากที่สุดแล้วแต่กรณี) เพื่อให้ตัวแปรควบคุมอยู่ที่ค่าเป้าหมายที่ต้องการ

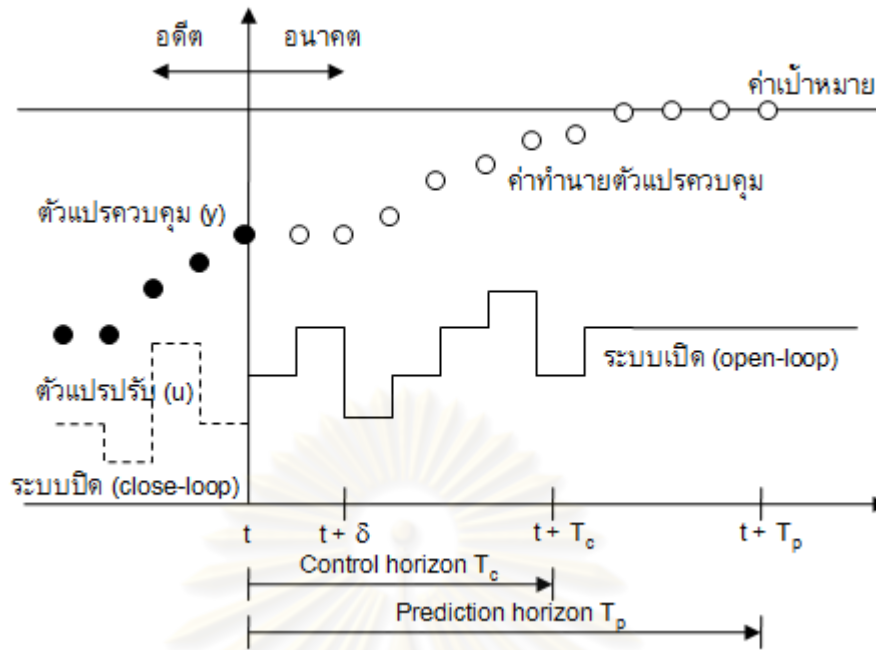
3.2.1 หลักการของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ

โครงสร้างของระบบที่มีการควบคุมด้วย ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ แสดงได้ดังภาพที่ 3.3 ระบบควบคุมประกอบด้วย 2 ส่วนคือ อุปกรณ์ที่ถูกควบคุม และตัวควบคุม ค่าเอาต์พุตคือตัวแปรที่วัดค่าได้ซึ่งออกจากอุปกรณ์จะถูกป้อนเข้าสู่ตัวควบคุม เรียกส่วนนี้ว่าตัวแปรควบคุม และจะมีค่าที่ต้องการควบคุมหรือค่าเป้าหมายเป็นอินพุตอีกตัวหนึ่ง ตัวควบคุมจะนำค่าที่ได้มาคำนวณหาตัวแปรปรับที่เหมาะสมกับกระบวนการ จากนั้นจึงส่งค่าตัวแปรปรับไปเป็นอินพุตของอุปกรณ์ โดยจะมีตัวแปรภายนอกคือตัวแปรรบกวนอีกตัวหนึ่งที่เข้าสู่อุปกรณ์ด้วย โดยผลกระทบจากตัวแปรรบกวนจะถูกกำจัดไปในที่สุด เนื่องจากการประมาณค่าตัวแปรวัดที่เหมาะสมของตัวควบคุม



ภาพที่ 3.3 โครงสร้างของระบบที่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุม

พฤติกรรมของการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟสามารถแสดงได้ดังกราฟในภาพที่ 3.4 ส่วนทางด้านซ้ายของแกนแนวนตั้งคือส่วนที่ได้ทำการควบคุมไปแล้วในอดีต ส่วนทางด้านขวาของแกนคือส่วนที่มีการทำนายการควบคุมค่าในอนาคต โดยจะทำการวัดค่าที่เวลา t หนึ่งๆ จากนั้นตัวควบคุมจะทำนายพฤติกรรมพลวัตในอนาคตของระบบโดยการวัดค่าตัวแปรควบคุมเพื่อทำการคำนวณค่าที่เหมาะสมเพื่อให้เข้าสู่ค่าเป้าหมาย โดยการทำนายค่าบนแกนการทำนาย เรียกชื่อว่า prediction horizon (T_p) และทำการควบคุมบนแกนการควบคุม เรียกชื่อว่า control horizon (T_c) โดยที่ $T_c \leq T_p$ คือจะมีจำนวนครั้งของการควบคุมน้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนครั้งของการทำนายเสมอ จากนั้นนำตัวแปรปรับค่าแรกที่ได้จากการคำนวณมาทำการควบคุมกระบวนการ โดยที่หากระบวนการที่พิจารณาไม่มีตัวแปรรบกวนและไม่มีคามผิดพลาดของแบบจำลองเลย การคำนวณเพียงครั้งเดียวก็สามารถควบคุมระบบจากเวลาแรกเริ่มที่ $t = 0$ ไปจนถึงเวลาที่ $T \geq 0$ ใดๆได้ แต่อย่างไรก็ตามระบบโดยทั่วไปจะมีตัวแปรรบกวนและความผิดพลาดของแบบจำลองด้วยเสมอ คือพฤติกรรมของระบบจริงจะไม่ตรงกับที่ทำนายไว้ จึงต้องมีการคำนวณใหม่เป็นรอบๆไปด้วยช่วงเวลาที่กำหนดขึ้นให้เท่ากัน โดยทำการวัดค่าใหม่และทำซ้ำพฤติกรรมข้างต้นคือเปลี่ยนค่าตัวแปรปรับใหม่ทุกครั้งที่วัดเพื่อให้ตัวแปรควบคุมเข้าสู่ค่าเป้าหมายในที่สุด [2]



ภาพที่ 3.4 กราฟแสดงพฤติกรรมของการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ

3.2.2 ปัญหาและขั้นตอนของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ

ปัญหาที่ทำการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟมีรูปแบบเป็นสมการไม่เชิงเส้น ดังแสดงในสมการที่ (3.11) เรียกสมการนี้ว่าสมการสเตตซึ่งจะอยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (Ordinary differential equation, ODE) และรูปแบบทั่วไปของการควบคุมเขียนได้ดังสมการที่ 3.12 และ 3.13 สามารถแสดงการควบคุมในหนึ่งรอบการคำนวณ ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับการควบคุมออปติมอล สมการที่ 3.14 ถึง 3.16 แสดงเงื่อนไขของการควบคุมอันได้แก่ขอบเขตของการควบคุมและข้อกำหนดต่างๆ

แบบจำลองไม่เชิงเส้นของกระบวนการสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\dot{x} = f(x(t), u(t)) \quad (3.11)$$

ปัญหาสำหรับตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ

$$\text{ฟังก์ชันวัตถุประสงค์} \quad \min \int_0^{t_f} \{w_1(x - x_{sp})^2 + w_2(\Delta u)^2\} dt \quad (3.12)$$

$$\text{สมการสเตต} \quad \dot{x} = f(x(t), u(t)) \quad (3.13)$$

$$\text{ขอบเขตของตัวแปรปรับ} \quad u_{\min} < u(t) < u_{\max} \quad (3.14)$$

$$\text{ขอบเขตของตัวแปรควบคุม} \quad x_{\min} < x(t) < x_{\max} \quad (3.15)$$

$$\text{ข้อกำหนดของตัวแปรควบคุม} \quad x(t + t_f) = x_{sp} \quad (3.16)$$

โดยที่ w_1 และ w_2 คือ เวกเตอร์น้ำหนัก

t_f คือ เวลาสุดท้ายที่ต้องการควบคุม

u_{\min} และ u_{\max} คือ ค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของตัวแปรปรับตามลำดับ

x_{\min} และ x_{\max} คือ ค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของตัวแปรควบคุมตามลำดับ

เวกเตอร์น้ำหนัก w_1 และ w_2 จะมีผลต่อการตอบสนองของกระบวนการที่ควบคุม ซึ่งสามารถกำหนดให้มีค่าไม่เท่ากันได้ ขึ้นกับความสำคัญของตัวแปรที่ต้องการพิจารณา

ขั้นตอนในการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ

- 1) กำหนดตัวแปรควบคุม ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ รวมถึงขอบเขตและข้อกำหนดต่างๆที่ต้องการสำหรับการควบคุม
- 2) คำนวณสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยให้มีค่าน้อยที่สุด สำหรับค่าเป้าหมายที่กำหนด เพื่อหาชุดของตัวแปรปรับใหม่ขึ้นมา
- 3) นำค่าตัวแปรปรับที่ได้ชุดแรก (อาจมีตัวแปรปรับหลายตัวในกระบวนการ) มาควบคุมกระบวนการจนกว่าจะถึงเวลาที่วัดค่าตัวแปรใหม่
- 4) วัดค่าตัวแปรควบคุมที่เปลี่ยนไปจากการปรับค่าตัวแปรปรับ

ทำซ้ำจากขั้นตอนที่ 2 ถึง 4 จนถึงเวลาสุดท้ายที่ต้องการควบคุม

ข้อดีของการควบคุมแบบนี้คือกระบวนการที่ทำการควบคุมจะรับประกันความมีเสถียรภาพ รวมถึงตัวควบคุมสามารถควบคุมระบบที่มีขอบเขตจำกัดได้ แต่หากแบบจำลองกระบวนการมีความผิดพลาดคลาดเคลื่อนไปจากกระบวนการจริงก็จะทำให้การควบคุมให้ผลได้ไม่ดี ดังนั้นการนำการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟไปใช้นั้นต้องมีแบบจำลองที่ถูกต้อง และค่าพารามิเตอร์ต่างๆของกระบวนการต้องมีความถูกต้องด้วยเช่นกัน หากเป็นเช่นนี้แล้วการควบคุมแบบนี้จะให้สมรรถนะที่ดีกว่าการควบคุมแบบดั้งเดิมคือการควบคุมแบบพีไอดี

3.2.3 สมการแบบจำลองของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบเชิงเส้น

สมการแบบจำลองของกระบวนการของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบเชิงเส้นและตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เป็นเชิงเส้นจะมีความแตกต่างกัน โดยการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบเชิงเส้นนั้นหากสมการแบบจำลองกระบวนการไม่เป็นเชิงเส้นจะต้อง

แปลงโดยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น (Linearization) เสียก่อน ส่วนการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เป็นเชิงเส้นสามารถจำลองมาใช้งานได้ทันที

สมการที่เขียนขึ้นในรูปเชิงเส้นจากสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นมีรูปทั่วไป ดังแสดงในสมการที่ (3.17) และ (3.18)

$$\dot{x} = f(x(t), u(t)) \quad (3.17)$$

$$y = g(x(t)) \quad (3.18)$$

สมการตัวแปรสเทท (State space form) เขียนได้สมการที่ 3.19 และ 3.20 ดังนี้

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad (3.19)$$

$$y = Cx \quad (3.20)$$

โดยที่	x	คือ ตัวแปรควบคุม (State variable)
	u	คือ ตัวแปรปรับ (Manipulated variable)
	y	คือ ตัวแปรเอาต์พุต (Output variable, Measurable)
	A, B และ C	คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการแทนค่าตัวแปรต่างๆในสมการแบบจำลอง

x, u และ y จะอยู่ในรูปเวกเตอร์ ส่วน A, B และ C จะอยู่ในรูปเมตริกซ์ ซึ่งจากสมการแบบจำลองของกระบวนการสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการตัวแปรสเททต้องเขียนให้อยู่ในรูป deviation form ซึ่งมีข้อดีคือจะทำให้ทราบว่าค่าตัวแปรที่พิจารณาที่มีความเบี่ยงเบนไปจากค่าที่ภาวะคงที่หรือไม่

ทำการทำให้เป็นเชิงเส้น (Linearization) รอบจุดที่ภาวะคงที่หรือจุดใดๆที่กำหนดขึ้น โดยใช้อนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor series) ดังสมการที่ (3.21)

$$\frac{dx}{dt} \approx f(x^s, u^s) + \left. \frac{df}{dx} \right|_{(x_s, u_s)} (x - x^s) + \left. \frac{df}{du} \right|_{(x_s, u_s)} (u - u^s) \quad (3.21)$$

กำหนดให้รูป Deviation form ของ $\delta x = x - x_s$ และ $\delta u = u - u_s$
 จะได้ $\delta \dot{x} = \dot{x} - \dot{x}_s$ และ $\dot{x}_s = f(x_s, u_s)$
 ดังนั้นจากสมการ (3.21) จัดรูปได้เป็นดังสมการที่ (3.22)

$$\delta x = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{(x_s, u_s)} \delta x + \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{(x_s, u_s)} \delta u \quad (3.22)$$

$$\text{โดยที่ } A = \frac{\partial f}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$

$$B = \frac{\partial f}{\partial u} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \frac{\partial f_1}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u_1} & \frac{\partial f_2}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial u_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \frac{\partial f_n}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial u_n} \end{bmatrix}$$

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

3.3 ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เป็นเชิงเส้น

ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เป็นเชิงเส้นเป็นการควบคุมที่อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ ซึ่งจะมีโครงสร้างรวมไปถึงพฤติกรรมกรรมการควบคุม คล้ายคลึงกับการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ จากแบบจำลองไม่เชิงเส้นในสมการที่ (3.11) ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์สามัญจะถูกนำมาแก้ปัญหาดัวยาระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) โดยนำมาเปลี่ยนให้อยู่ในรูปปัญหาโปรแกรมที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear program problem, NLP) ซึ่งเป็นการแก้ปัญหที่ไม่อยู่ในรูปสมการเชิงพลวัตคือไม่ขึ้นกับเวลา ด้วยวิธีการต่างๆ เช่น sequential quadratic programming (SQP), Direct Single Shooting, Direct Multiple Shooting และ Direct Collocation เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธี linear multistep method ที่เรียกว่า Adams-Moulton จากนั้นจึงนำปัญหาที่ไม่อยู่ในรูปสมการเชิงพลวัตคือไม่ขึ้นกับเวลานี้ไปแก้ปัญหาคออปติมอลตัวควบคุมด้วยวิธี interior point line search filter method ที่ใช้วิธีการของนิวตัน (Newton method) [8,28]

คุณสมบัติของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เป็นเชิงเส้น

- 1) สามารถทำนายค่าโดยใช้แบบจำลองกระบวนการไม่เป็นเชิงเส้นได้โดยตรง
- 2) สามารถพิจารณาระบบที่มีขอบเขตของตัวแปรสแตตและอินพุตได้อย่างชัดเจน
- 3) เสถียรภาพของการควบคุมจะถูกทำมิไนมิซึ่มแบบออนไลน์ในระบบที่มีขอบเขตเวลาระบุ
- 4) ตัวแปรสแตตของระบบจะต้องมีการวัดค่าหรือประมาณค่าเสียก่อนที่จะทำการทำนายค่าการควบคุม
- 5) สามารถควบคุมระบบที่มีความผิดพลาดของแบบจำลองรวมถึงระบบที่มีตัวแปรรบกวนได้

3.3.1 การแปลงสมการเชิงอนุพันธ์สามัญให้อยู่ในรูปโปรแกรมที่ไม่เป็นเชิงเส้น

เราสามารถใช่วิธีการ Adams-Moulton ใช้แก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (Ordinary differential equation, ODE) แบบปัญหาค่าเริ่มต้น (Initial value problems, IVPs) แล้วคำนวณค่าต่อเนื่องไปเป็นขั้นๆเพื่อหาค่าตอบของจุดถัดไป ลักษณะของวิธีการนี้เป็นแบบวิธี implicit คือจะใช้การคำนวณขั้นในอนาคตรวมกับค่าปัจจุบันเพื่อการปรับแต่งค่าที่อยู่ในอนาคต การคำนวณจะต้องมีการกำหนดค่าเริ่มต้น จากนั้นจะดำเนินการไปโดยจะมีการอ้างอิงค่าในอดีตหลายค่ารวมถึงค่าอนุพันธ์จนกว่าจะพบคำตอบที่ต้องการ วิธีที่ใช้นี้เรียกววิธี Multi-step ส่วนวิธี Single-step เช่นวิธี Euler's method หรือ Runge-Kutta method จะใช้เพียงค่าจากขั้นต่อนก่อนหน้าเท่านั้น เมื่อจะทำในขั้นต่อนถัดไปก็จะไม่นำข้อมูลก่อนหน้ามาใช้งานอีก [29] ด้วยวิธีการนี้เราจะได้สมการที่อยู่ในรูปปัญหาโปรแกรมที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear programming, NLP) ซึ่งจะแสดงวิธีการแก้ปัญหาในหัวข้อถัดไป

กำหนดให้ปัญหาค่าเริ่มต้นแสดงด้วยสมการที่ (3.23)

$$\dot{y} = f(y, t), \quad y(t_0) = y_0 \quad (3.23)$$

โดยที่ $y \in R^N$ และ t แทนเวลา

รูปทั่วไปของระบบ Multi-step มีลักษณะดังแสดงในสมการที่ 3.24

$$\sum_{i=0}^{K_1} \alpha_{n,i} y^{n-1} + h_n \sum_{i=0}^{K_2} \beta_{n,i} \dot{y}^{n-1} = y^n \quad (3.24)$$

โดยที่ y'' เป็นค่าประมาณของ $y(t_n)$ และ $h_n = t_n - t_{n-1}$ เป็น Step size สำหรับวิธีการ Adams-Moulton เป็นระบบปัญหาแบบ nonstiff problem จะมีค่า $K_1 = 1$ และ $K_2 = q$ โดยที่ q เป็นค่าคงที่ใดๆตั้งแต่ 1 ถึง 12 ในตารางที่ 3.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ α_i และ β_i ต่างๆ โดยแสดงค่าพารามิเตอร์สำหรับ Two-step Adams-Moulton ไปจนถึง Five-step Adams-Moulton

ตัวอย่างการหาค่าสำหรับ Two-step Adams-Moulton

จากสมการที่ (3.24) แทนค่า $n = 2$ จะได้

$$y^{n+1} = \alpha_1 y^n + \alpha_2 y^{n-1} + h[\beta_0 \dot{y}^{n+1} + \beta_1 \dot{y}^n + \beta_2 \dot{y}^{n-1}]$$

จากตารางแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ดังนี้

$$y_{i+1} = y_i + h\left[\frac{5}{12} \dot{y}^{n+1} + \frac{8}{12} \dot{y}^n - \frac{1}{12} \dot{y}^{n-1}\right]$$

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าพารามิเตอร์สำหรับ Adams-Moulton ตั้งแต่ Two-step ถึง Five-step

Method Parameters	Two-step	Three-step	Four-step	Five-step
α_1	1	1	1	1
α_2	0	0	0	0
β_0	5/12	9/24	251/720	475/1440
β_1	8/12	19/24	646/720	1427/1440
β_2	-1/12	-5/24	-264/720	-798/1440
β_3	-	1/24	106/720	482/1440
β_4	-	-	-19/720	-173/1440
β_5	-	-	-	27/1440

3.3.2 การแก้ปัญหาโปรแกรมที่ไม่เป็นเชิงเส้น

วิธีการ Interior-point filter line-search เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการหาค่าเหมาะที่สุด ปัญหาวิธีหนึ่ง โดยสามารถใช้ได้กับปัญหาโปรแกรมที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear programming, NLP) ขนาดใหญ่รวมไปถึงปัญหาที่มีข้อจำกัดแบบอสมการ (inequality constraints) จำนวนมาก วิธีการนี้เป็นการพัฒนาวิธีการ Interior point (เรียกอีกชื่อหนึ่งว่าวิธี barrier) โดยใช้ line search

filter แก้ปัญหา ซึ่งจะรับประกันการลู่เข้าแบบโกลบอล (global convergence) ของอัลกอริทึม ปัญหาจะเขียนอยู่ในรูปแบบดังสมการที่ (3.25) ถึง (3.27) [30,31]

$$\min_{x \in R^n} f(x) \quad (3.25)$$

$$\text{s.t.} \quad g^L \leq g(x) \leq g^U \quad (3.26)$$

$$x^L \leq x \leq x^U \quad (3.27)$$

โดยที่ $x \in R^n$	คือ	ตัวแปรที่ต้องการหาค่าที่ดีที่สุด (optimization variables)
$x^L \in [-\infty, \infty)^n$	คือ	ค่าขอบเขตล่างของตัวแปร x
$x^U \in (-\infty, \infty]^n$	คือ	ค่าขอบเขตบนของตัวแปร x
$x^L \leq x^U$	คือ	ขอบเขตล่างต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับขอบเขตบน ณ ตำแหน่งใดๆ
$g(x) \in R^m$	คือ	สมการข้อจำกัด (constraints)
$g^L \in [-\infty, \infty)^m$	คือ	ค่าขอบเขตล่างของข้อจำกัด (constraints)
$g^U \in (-\infty, \infty]^m$	คือ	ค่าขอบเขตบนของข้อจำกัด (constraints)

จากนั้นประยุกต์ใช้วิธีของนิวตันกับปัญหา Interior point โดยการเปลี่ยนข้อจำกัดที่อยู่ในรูปแบบสมการให้อยู่ในรูปแบบสมการ โดยใช้ตัวแปรสลัค (slack variable) ที่เป็นการเปลี่ยนรูปสมการจากรูปเครื่องหมายน้อยกว่าหรือเท่ากับให้อยู่ในรูปสมการเครื่องหมายเท่ากับ จากการเพิ่มค่าส่วนที่ขาดเข้าไปหรือลดค่าส่วนที่เกินออกไป

$$\text{กำหนดให้} \quad s^L = g(x) - g^L \quad (3.28)$$

$$s^U = g^U - g(x) \quad (3.29)$$

$$s^L, s^U \geq 0 \quad (3.30)$$

$$z^T = [x^T (s^U)^T (s^L)^T] \quad (3.31)$$

โดยที่ s^L, s^U คือ ตัวแปรสลัค (slack variable)

จากการนิยามสมการที่ (3.28) ถึง (3.31) จะทำให้เราเขียนปัญหาโปรแกรมที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ใหม่สมการที่ (3.32) ถึง (3.34) ดังนี้

$$\min_{z \in R^n} f(z) \quad (3.32)$$

$$\text{s.t.} \quad c(z) = 0 \quad (3.33)$$

$$z^L \leq z \leq z^U \quad (3.34)$$

โดยที่	z	คือ	ตัวแปรที่ต้องการหาค่า (optimization variables)
	z^L	คือ	ค่าขอบเขตล่างของตัวแปร z
	z^U	คือ	ค่าขอบเขตบนของตัวแปร z
	$c(z)$	คือ	ข้อจำกัด (constraints) ต่างๆ ซึ่งข้อจำกัดในรูปแบบสมการคือ $d(x) \leq 0$

จากนั้นแปลงส่วนของขอบเขตระบบในสมการที่ (3.34) ให้อยู่ในรูปของ barrier จะได้ปัญหาที่มีข้อจำกัดในรูปแบบสมการ แต่ไม่มีส่วนของค่าขอบเขต ดังสมการที่ (3.35) เมื่อ μ คือค่าพารามิเตอร์ของ barrier

$$\min \quad \varphi(z) = f(z) + \mu \left(\sum_i \ln(z_i^U - z_i) + \sum_j \ln(z_j - z_j^L) \right) \quad (3.35)$$

$$\text{s.t.} \quad c(z) = 0 \quad (3.36)$$

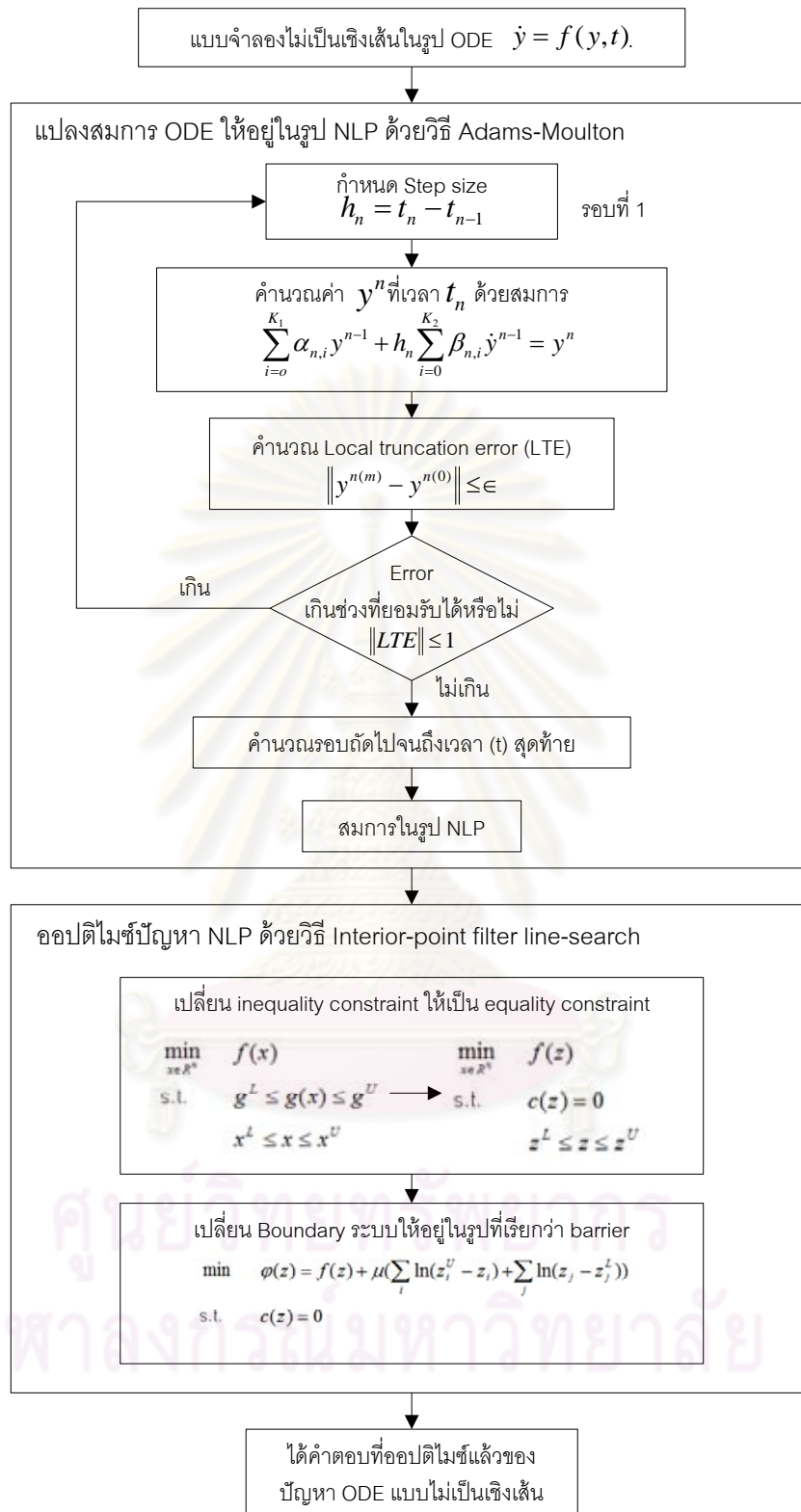
วิธีการคำนวณด้วยการทำซ้ำโดยวิธีของนิวตัน (Newton iterations) จะถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาที่จัดในรูปของ Karush-Kuhn-Tucker (KKT) ดังสมการที่ (3.37) ซึ่งจะมีพจน์ของตัวคูณลากรองจ์ (Lagrange multipliers, λ) โดยที่ตัวห้อย k แทนการนับครั้งของการทำซ้ำ

$$\begin{bmatrix} W_k + \sum_k A_k & A_k \\ A_k^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z_k \\ \lambda \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \nabla \varphi(z_k) \\ c(z_k) \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

เมื่อ $A_k = \nabla c$ และ $W_k = \nabla^2 (\varphi + c^T \lambda)$

จากนั้นทำการแก้ปัญหาโดยใช้วิธี line search filter นี้มีหลักการคือจะมองปัญหา barrier ให้เหมือนกับการทำหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยมีสองประเด็นที่พิจารณา คือ หาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และหาค่าต่ำสุดของการรบกวนของข้อจำกัด (constraint violation) จากนั้นจะกำหนดจุดทดลองเพื่อทำ line search แบบย้อนรอย (backtracking) แต่ละจุดที่คำนวณจะมีการเปรียบเทียบกับค่าคำนวณในรอบปัจจุบัน โดยวิธี line search filter จะรับประกันการลู่เข้าแบบไกลบอล การควบคุมจะมีสมรรถนะและเชื่อถือได้

ในภาพที่ 3.5 จะแสดงขั้นตอนการคำนวณของตัวควบคุมแบบ NMPC ที่ใช้งานวิจัยนี้ ซึ่งแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนของการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์สามมิติให้อยู่ในรูปโปรแกรมที่ไม่เป็นเชิงเส้น และส่วนของการแก้ปัญหาโปรแกรมที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยการหาค่าต่ำสุดตามลำดับดังแสดง



ภาพที่ 3.5 แผนภาพขั้นตอนการคำนวณของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เป็นเชิงเส้น

การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของตัวควบคุมแบบต่างๆแสดงไว้ในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตารางเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของตัวควบคุมแต่ละชนิด

ชนิดของ ตัวควบคุม	ข้อดี	ข้อเสีย
PID	<ol style="list-style-type: none"> 1. เป็นการควบคุมที่ไม่อาศัยแบบจำลอง 2. เป็นตัวควบคุมที่ไม่มีความซับซ้อน 3. การควบคุมมีความทนทานสามารถควบคุมกระบวนการได้แม้มีตัวรบกวนระบบมาก 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ไม่สามารถกำหนดขอบเขตสำหรับการควบคุมกระบวนการได้ 2. ประยุกต์ใช้ได้กับกระบวนการที่มีหลายตัวแปรได้ไม่ดี 3. การปรับแต่งค่าตัวควบคุมต้องอาศัยความชำนาญ
MPC	<ol style="list-style-type: none"> 1. รับประกันเสถียรภาพของกระบวนการ 2. กำหนดขอบเขตสำหรับการควบคุมกระบวนการได้ 3. สามารถควบคุมกระบวนการที่มีหลายตัวแปรได้ดี 	<ol style="list-style-type: none"> 1. แบบจำลองกระบวนการที่นำมาใช้ต้องมีความน่าเชื่อถือ 2. ควบคุมกระบวนการที่มีตัวรบกวนระบบมากหรือมีความผิดพลาดของแบบจำลองได้ไม่ดี 3. การคำนวณจะใช้เวลามากกว่าแบบ PID
NMPC	<ol style="list-style-type: none"> 1. รับประกันเสถียรภาพของกระบวนการ 2. กำหนดขอบเขตสำหรับการควบคุมกระบวนการได้ 3. สามารถควบคุมกระบวนการที่มีหลายตัวแปรได้ดี 4. แบบจำลองกระบวนการที่นำมาใช้ไม่ต้องผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้น 	<ol style="list-style-type: none"> 1. แบบจำลองกระบวนการที่นำมาใช้ต้องมีความน่าเชื่อถือ 2. ควบคุมกระบวนการที่มีตัวรบกวนระบบมากหรือมีความผิดพลาดของแบบจำลองได้ไม่ดี 3. การคำนวณจะใช้เวลามากกว่าแบบ PID และ MPC

บทที่ 4

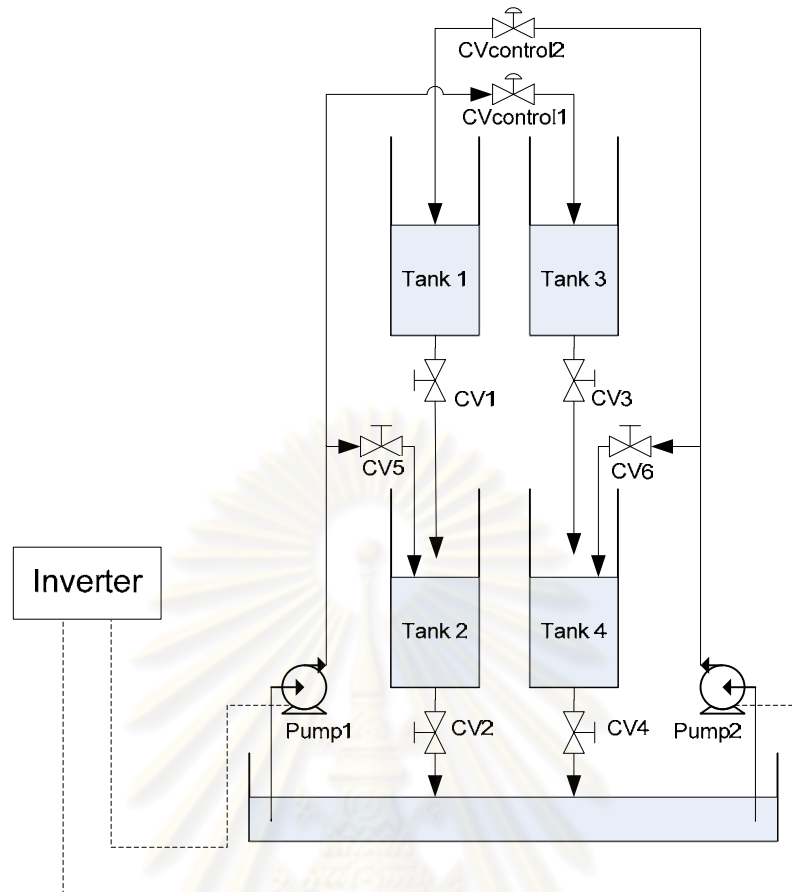
วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 ชุดทดลองระบบสี่ถัง

ชุดทดลองระบบสี่ถังสามารถเขียนเป็นแผนภาพดังแสดงในภาพที่ 4.1 ระดับน้ำในถังทั้งสี่ใบจะมีความสัมพันธ์กันทั้งโดยน้ำจะถูกสูบจากบิ๊มขึ้นมาแยกสู่อ่างใบต่างๆ และโดยการที่น้ำในถังด้านบนไหลลงสู่อ่างด้านล่าง ซึ่งบิ๊มตัวที่ 1 (Pump 1) จะสูบน้ำเข้าสู่ถังที่ 2 (Tank 2) และ 3 (Tank 3) โดยแบ่งส่วนกันจากการเปิดวาล์วตัวที่ 5 (CV5) ส่วนบิ๊มตัวที่ 2 (Pump 2) จะสูบน้ำเข้าสู่ถังที่ 1 (Tank 1) และ 4 (Tank 4) โดยมีวาล์วตัวที่ 6 (CV6) แบ่งอัตราการไหล ซึ่งบิ๊มทั้งสองตัวจะถูกปรับให้มีอัตราการไหลเท่ากันโดยใช้อินเวอร์เตอร์ ส่วนสายที่ออกจากวาล์วตัวที่ 5 และ 6 ก็จะถูกปรับให้มีอัตราการไหลเท่ากันเช่นกัน น้ำในถังด้านบนคือถังที่ 1 และ 3 จะไหลผ่านวาล์วตัวที่ 1 (CV1) และ 3 (CV3) ตามลำดับ ลงสู่อ่างด้านล่างคือถังที่ 2 และ 4 ซึ่งจะไหลผ่านวาล์วตัวที่ 2 (CV2) และ 4 (CV4) ตามลำดับลงสู่อ่างพักน้ำ จากนั้นน้ำจะถูกบิ๊มสูบขึ้นไปอีกครั้งและเข้าสู่กระบวนการดังที่กล่าวไปข้างต้น

จากภาพที่ 4.1 การควบคุมระดับน้ำในถังของระบบนี้จะเกิดขึ้นโดยการปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 1 (CVcontrol 1) และ 2 (CVcontrol 2) ซึ่งจะทำให้อัตราการไหลของน้ำที่ออกจากท่อด้านบนเข้าสู่ถังที่ 1 และ 3 เปลี่ยนไป รวมไปถึงอัตราการไหลของน้ำที่เข้าสู่ถังที่ 2 และ 4 เปลี่ยนไปด้วยในทิศทางตรงกันข้าม เช่น หากเราปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 1 ให้มีการเปิด-ปิดวาล์วลดลง จะมีผลทำให้อัตราการไหลของน้ำสู่ถังที่ 3 ลดลง ทำให้ระดับน้ำในถังนี้ลดลง แต่จะทำให้อัตราการไหลสู่ถังที่ 2 เพิ่มขึ้น ทำให้ระดับน้ำในถังนี้เพิ่มขึ้น เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้จะทำการควบคุมระบบโดยมีการรบกวนระบบ (Disturbance input) เข้ามา และจะต้องควบคุมระบบให้อยู่ที่สภาวะคงตัวเดิมได้ โดยจะทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID) ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ (MPC) และตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เป็นเชิงเส้น (NMPC) โดยตัวควบคุมแบบ MPC และตัวควบคุมแบบ NMPC ต้องอาศัยแบบจำลองของระบบที่จะทำการควบคุมด้วย



ภาพที่ 4.1 แผนภาพชุดทดลองระบบสี่ถัง

4.2 อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยมีดังต่อไปนี้

- 1) ถังใส่น้ำทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 14.5 เซนติเมตร สูง 90 เซนติเมตร จำนวน 4 ใบ วัสดุทำจากอะคริลิก
- 2) วาล์วควบคุม (Control valve) ขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้วและ $\frac{3}{4}$ นิ้ว ของ Samson ซึ่งมีการตอบสนองแบบปกติปิด จำนวน 2 ตัว สำหรับควบคุมระดับความสูงของน้ำโดยการปรับเปอร์เซ็นต์การเปิดปิดวาล์ว
- 3) ปั๊มน้ำแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal pump) ขนาด $\frac{1}{2}$ แรงม้า จำนวน 2 ตัว ยี่ห้อ Bruno ใช้กระแสไฟฟ้าแบบ 3 เฟส
- 4) ปั๊มลม 1 ตัว สำหรับส่งลมที่ความดันคงที่ เพื่อการควบคุมระดับการเปิดปิดของวาล์วควบคุม

- 5) อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดัน (Pressure transmitter) ของ ADZ Nagono ที่สามารถวัดได้ในย่าน 0 ถึง 100 mbar และส่งสัญญาณขาออกเป็น 4 – 20 mA สำหรับเทียบค่าเพื่อวัดความสูงของน้ำในถัง ใช้จำนวน 4 ตัว
- 6) อินเวอร์เตอร์ (Inverter) จำนวน 2 ตัว สำหรับปรับความถี่ของสัญญาณ ซึ่งจะเป็นการปรับแรงดันไฟฟ้าของปั๊ม ซึ่งจะสามารถปรับอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านปั๊มออกมาได้ โดยใช้อินเวอร์เตอร์ของ Hitachi และ Omron
- 7) เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow meter) ยี่ห้อ ifm electronic จำนวน 4 ตัว สำหรับวัดอัตราการไหลของน้ำที่เข้าสู่ถังแต่ละใบ โดยเชื่อมต่อกับท่อที่จะเข้าสู่ถังแต่ละใบ
- 8) อ่างพักน้ำ ขนาดกว้าง 180 เซนติเมตร ยาว 45 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร วัสดุทำจากอะคริลิก
- 9) บอลวาล์วขนาด 1/2 นิ้ว จำนวน 6 ตัว วัสดุทำจากพีวีซี
- 10) ท่อที่ใช้ส่งน้ำเป็นท่อพีวีซี ขนาด 1/2 นิ้ว, 3/4 นิ้ว และ 1 นิ้ว โดยท่อที่ใช้ต่อท่อกันไปในระบบเป็นท่อขนาด 1/2 นิ้ว ท่อที่ออกจากวาล์วควบคุมตัวหนึ่งเป็นท่อขนาด 3/4 นิ้ว และท่อที่ออกจากปั๊มเป็นท่อขนาด 1 นิ้ว
- 11) อุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้า (Current transmitter) มีหน้าที่สำหรับรับค่าสัญญาณไฟฟ้า 4 – 20 mA จากอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันเพื่อแปลงเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าสำหรับส่งเข้าเครื่องควบคุมแบบกระจายส่วน
- 12) อุปกรณ์แปลงแรงดันไฟฟ้า (Voltage transmitter) ใช้รับค่าแรงดันไฟฟ้าเพื่อแปลงเป็นค่ากระแสไฟฟ้า 4 – 20 mA เพื่อไปควบคุมวาล์วควบคุม
- 13) ระบบเก็บตัวอย่างข้อมูล (Data acquisition system, DAQ) ของ National instruments มีหน้าที่รับ-ส่งตัวแปรควบคุมและตัวแปรปรับของระบบ
- 14) เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับประมวลผลตัวควบคุม และติดตั้งโปรแกรม MATLAB R2008b ใช้ควบคุมระบบนี้

ภาพอุปกรณ์การทดลองแสดงไว้ในภาพที่ 4.2 ตั้งแต่ภาพที่ 1. ถึง XI.

ภาพที่ 4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



I. ชุดทดลองระบบสั้ถั้



II. วาล์วควบคุม



III. ปั้มน้้า



IV. ปั๊มลม



V. อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดัน



VI. อินเวอร์เตอร์



VII. เครื่องวัดอัตราการใช้



VIII. อุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า



IX. ระบบเก็บตัวอย่างข้อมูล



X. เครื่องคอมพิวเตอร์



XI. ตู้คอนโทรล

4.3 การหาสภาวะคงตัวเริ่มต้นของระบบ

- 1) ปรับอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านปั๊มตัวที่ 1 และ 2 ให้เท่ากันด้วยการปรับความถี่บนอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับปั๊มแต่ละตัว โดยดูค่าอัตราการไหลของน้ำจากเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ
- 2) กำหนดให้ที่เวลาเริ่มต้น วาล์วควบคุมทั้งสองตัวอยู่ที่เปิด 50%
- 3) แบ่งอัตราการไหลของน้ำที่เข้าสู่ถังต่างๆ โดยให้อัตราการไหลของน้ำเข้าถังที่ 1 เท่ากับถังที่ 3 และอัตราการไหลของน้ำเข้าถังที่ 2 เท่ากับถังที่ 4 ซึ่งจะทำให้การปรับวาล์วตัวที่ 5 และ 6 ให้เหมาะสมไม่ให้น้ำไหลเข้าถังล่างมากจนล้นได้
- 4) ปรับวาล์วได้ถังทั้ง 4 ใบ ให้ระดับน้ำในถังอยู่ที่ประมาณ 30 เซนติเมตร สำหรับถังที่ 1, ถังที่ 2, ถังที่ 3 และถังที่ 4
- 5) รอให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว แล้วบันทึกค่าระดับน้ำในถังแต่ละใบ

4.4 วิธีการควบคุมระบบ

- 1) สร้างแบบจำลองของระบบสี่ถังโดยการสร้างแบบจำลองจากทฤษฎี ด้วยการคูณมวลสาร จากนั้นจะหาสมการอธิบายอัตราการไหลของน้ำผ่านวาล์วควบคุม และหาค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่าจากการทดลอง
- 2) เปิดปั๊มทั้ง 2 ตัว ปล่อยให้ระบบสี่ถังเข้าสู่เสถียรภาพของระบบ เพื่อให้การควบคุมไม่มีผลของตัวแปรรบกวน
- 3) ใส่การรบกวนระบบเข้าไป โดยการเติมน้ำลงในถังหนึ่งในสองใบที่ต้องการควบคุมแบบอิมพัลส์ (Impulse)
- 4) โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมคือโปรแกรม MATLAB ซึ่งทำการเชื่อมต่อกับระบบสี่ถังผ่านเครื่อง DCS เพื่อควบคุมระดับน้ำให้อยู่ที่ค่าเป้าหมายที่ต้องการ
- 5) ทำการควบคุมด้วยชุดคำสั่งสำหรับควบคุมแบบ PID, MPC และ NMPC ที่เขียนขึ้นไว้ ตามเงื่อนไขต่างๆ

- 6) เก็บข้อมูลความสูงของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป ดูการตอบสนองของตัวแปรปรับ
ของระบบ
- 7) เปรียบเทียบสมรรถนะของการควบคุมทั้งสามแบบด้วยการวิเคราะห์ค่า
ผลรวมความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Integral of the absolute value of the
error, IAE)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

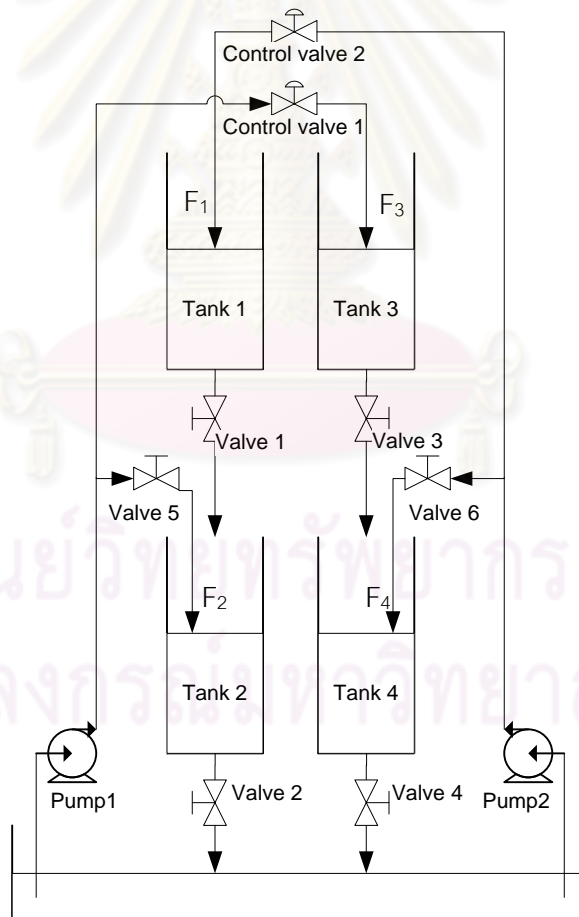
บทที่ 5

แบบจำลองระบบสี่ถังและตัวควบคุม

ในบทนี้จะแสดงการสร้างแบบจำลองของระบบสี่ถัง โดยการสร้างแบบจำลองจากทางทฤษฎี จากนั้นจะหาสมการอธิบายอัตราการไหลของน้ำผ่านวาล์วควบคุม และหาค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่าจากการทดลอง เพื่อนำแบบจำลองที่ได้ไปใช้เป็นแบบจำลองในการควบคุมระบบสี่ถังด้วยการควบคุมแบบต่างๆ

5.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสี่ถัง

สำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสี่ถังนี้ เมื่อพิจารณาจากแผนภาพของชุดทดลองระบบสี่ถังในภาพที่ 5.1 สามารถสร้างสมการสมดุลมวลเพื่อใช้แสดงความสัมพันธ์ของการไหลของน้ำในระบบที่เข้าสู่ถึงแต่ละใบได้ดังจะอธิบายต่อไป



ภาพที่ 5.1 ระบบสี่ถังและตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

5.1.1 สมการสมดุลมวล

มีการกำหนดสมมุติฐานต่างๆสำหรับกระบวนการขึ้นมอดังต่อไปนี้

- 1) อุณหภูมิของระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการทดลองทำที่อุณหภูมิห้องในห้องปฏิบัติการ
- 2) ความหนาแน่นของน้ำมีค่าคงที่ เท่ากับ 1000 kg/m^3
- 3) อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านปั๊มตัวที่ 1 และ 2 เท่ากัน จากการปรับความถี่บนอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์ สามารถตรวจได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ
- 4) ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกมีค่าคงที่โดยเท่ากับ 9.81 m/s^2
- 5) เนื่องจากค่าความดันคร่อมของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ที่ไม่คงที่เมื่ออัตราการไหลของน้ำมีการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำที่เข้าสู่ถัง ในกรณีปรับเปอร์เซ็นต์การเปิดปิดวาล์วมีการตอบสนองแบบไม่เป็นเชิงเส้นดังจะพิจารณาในหัวข้อ 5.1.2
- 6) ในระหว่างการทดลองไม่มีการปรับวาล์วได้ถึง ดังนั้นกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วตัวที่ 1 (CV1) ตัวที่ 2 (CV2) ตัวที่ 3 (CV3) และตัวที่ 4 (CV4) มีค่าคงที่ตลอดการทดลอง

จากกฎการอนุรักษ์มวลสารจะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{อัตราการสะสม} &= \text{มวลสาร} - \text{มวลสารที่} + \text{มวลสารที่} - \text{มวลสารที่} \\ \text{มวลสารในระบบ} & \quad \text{เข้าระบบ} \quad \text{ออกจากระบบ} \quad \text{เกิดในระบบ} \quad \text{หายไปในระบบ} \end{aligned}$$

เมื่อระบบไม่มีการเกิดสารเพิ่ม และไม่มีสารที่หายไปในระบบจะได้ว่า

$$\frac{d(\rho V_i)}{dt} = \rho F_{in,i} - \rho F_{out,i} \quad (5.1)$$

$$\text{กำหนดให้} \quad V_i = Ah_i \quad (5.2)$$

และอัตราการไหลของน้ำขาออกจากถังถึงที่ผ่านวาล์วได้ถึงต่างๆอธิบายได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$F_{cv,i} = C_{v,cv,i} \sqrt{\frac{\rho g h_i}{G_f}} \quad (5.3)$$

สำหรับถังที่ 1 จากสมการที่ 6.1 ถึง 6.3 จะได้ว่า

$$\rho A_1 \frac{d(h_1)}{dt} = \rho F_1 - \rho F_{cv,1} \quad (5.4)$$

จัดรูปได้เป็น

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{F_1}{A_1} - \frac{C_{vcv1}}{A_1} \sqrt{\frac{\rho g h_1}{G_f}} \quad (5.5)$$

สำหรับถังที่ 2 จากสมการที่ 5.1 จะได้ว่า

$$\rho A_2 \frac{d(h_2)}{dt} = \rho F_2 + \rho F_{cv,1} - \rho F_{cv,2} \quad (5.6)$$

จัดรูปได้เป็น

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{F_2}{A_2} + \frac{C_{vcv1}}{A_2} \sqrt{\frac{\rho g h_1}{G_f}} - \frac{C_{vcv2}}{A_2} \sqrt{\frac{\rho g h_2}{G_f}} \quad (5.7)$$

สำหรับถังที่ 3 จากสมการที่ 5.1 จะได้ว่า

$$\rho A_3 \frac{d(h_3)}{dt} = \rho F_3 - \rho F_{cv,3} \quad (5.8)$$

จัดรูปได้เป็น

$$\frac{dh_3}{dt} = \frac{F_3}{A_3} - \frac{C_{vcv3}}{A_3} \sqrt{\frac{\rho g h_3}{G_f}} \quad (5.9)$$

สำหรับถังที่ 4 จากสมการที่ 5.1 จะได้ว่า

$$\rho A_4 \frac{d(h_4)}{dt} = \rho F_4 + \rho F_{cv,3} - \rho F_{cv,4} \quad (5.10)$$

จัดรูปได้เป็น

$$\frac{dh_4}{dt} = \frac{F_4}{A_4} + \frac{C_{vcv3}}{A_4} \sqrt{\frac{\rho g h_3}{G_f}} - \frac{C_{vcv4}}{A_4} \sqrt{\frac{\rho g h_4}{G_f}} \quad (5.11)$$

สรุปสมการสมดุลมวลของระบบกระบวนการสี่ถังจากสมการที่ (5.5), (5.7), (5.9) และ (5.11)

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{F_1}{A_1} - \frac{C_{vcv1}}{A_1} \sqrt{\frac{\rho g h_1}{G_f}} \quad (5.5)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{F_2}{A_2} + \frac{C_{vcv1}}{A_2} \sqrt{\frac{\rho g h_1}{G_f}} - \frac{C_{vcv2}}{A_2} \sqrt{\frac{\rho g h_2}{G_f}} \quad (5.7)$$

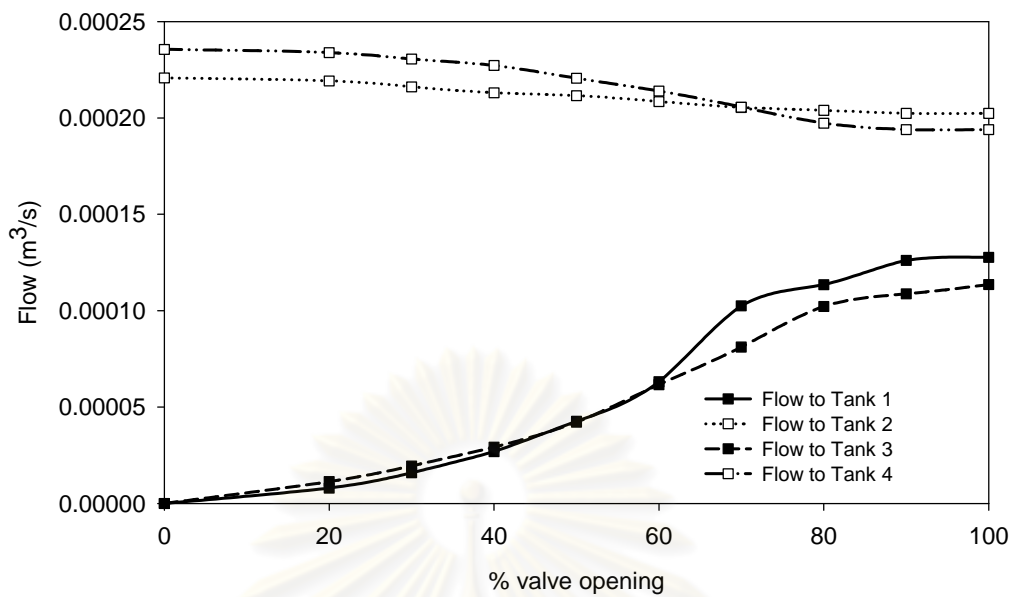
$$\frac{dh_3}{dt} = \frac{F_3}{A_3} - \frac{C_{VCV3}}{A_3} \sqrt{\frac{\rho gh_3}{G_f}} \quad (5.9)$$

$$\frac{dh_4}{dt} = \frac{F_4}{A_4} + \frac{C_{VCV3}}{A_4} \sqrt{\frac{\rho gh_3}{G_f}} - \frac{C_{VCV4}}{A_4} \sqrt{\frac{\rho gh_4}{G_f}} \quad (5.11)$$

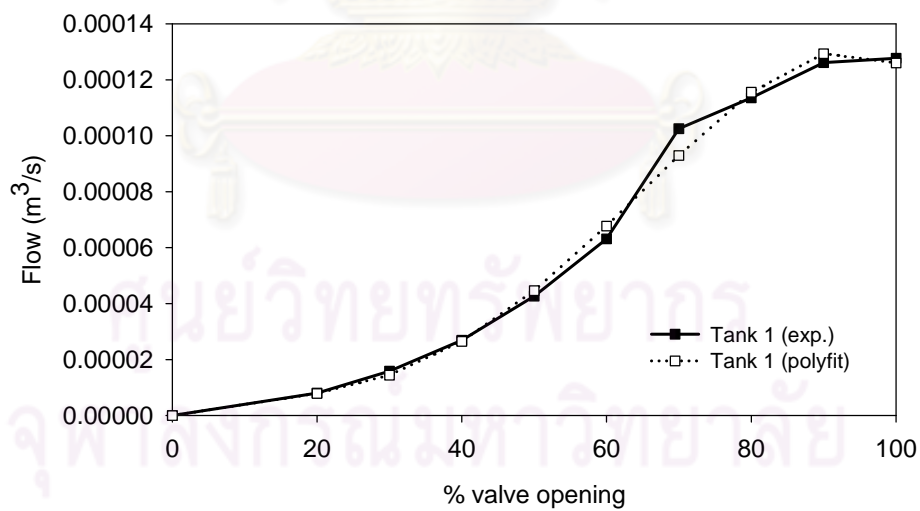
โดยที่	ρ	คือ ความหนาแน่นของน้ำ
	V_i	คือ ปริมาตรของน้ำในถังที่ i
	A_i	คือ พื้นที่หน้าตัดของถังที่ i
	h_i	คือ ความสูงของน้ำในถังที่ i
	$F_{in,i}$	คือ อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบถังที่ i
	$F_{out,i}$	คือ อัตราการไหลของน้ำออกจากระบบถังที่ i
	$F_{cv,i}$	คือ อัตราการไหลของน้ำผ่านวาล์วตัวที่ i
	F_i	คือ อัตราการไหลของน้ำที่เข้าสู่ถังที่ i
	$C_{v,cvi}$	คือ สัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วตัวที่ i
	g	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
	G_f	คือ ความถ่วงจำเพาะของของเหลว

5.1.2 การสร้างสมการสำหรับอธิบายผลการตอบสนองของวาล์วควบคุม

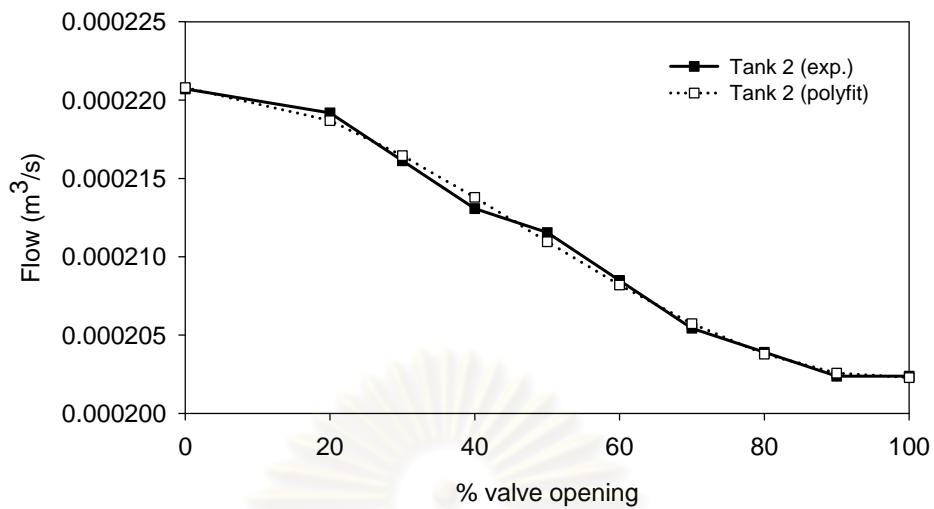
วาล์วควบคุมมีคุณลักษณะเป็นแบบ Equal percentage ดังนั้นอัตราการไหลของน้ำที่เข้าสู่ถังแต่ละใบจะได้รับอิทธิพลจากวาล์วควบคุม โดยมีการไหลแบบไม่เป็นเชิงเส้นเมื่อเทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์การเปิดปิดวาล์ว ด้วยสาเหตุนี้ในงานวิจัยจึงได้ทำการทดลองเพื่อหาอัตราการไหลของน้ำที่เข้าสู่ถังแต่ละใบ ที่ค่าเปอร์เซ็นต์การเปิดปิดวาล์วต่างๆ จากนั้นนำมาสร้างกราฟได้ดังแสดงในภาพที่ 5.2 และใช้คำสั่ง polyfit ในโปรแกรม MATLAB เพื่อสร้างสมการในรูปสมการพหุนาม (polynomial equation) จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทำการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.3 ถึง 5.6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมการที่ได้สามารถนำไปอธิบายอัตราการไหลของน้ำที่ค่าเปอร์เซ็นต์วาล์วต่างๆได้



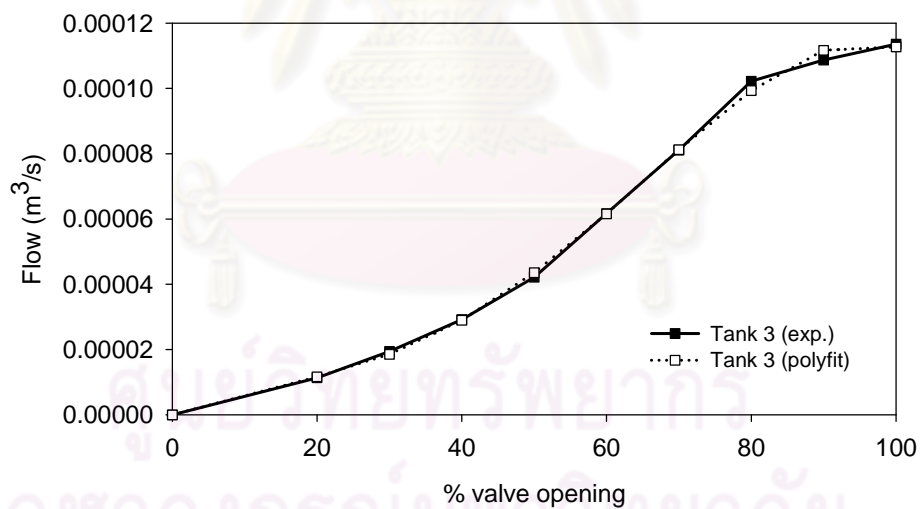
ภาพที่ 5.2 อัตราการไหลของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป
เนื่องจากการปรับเปอร์เซ็นต์การเปิดปิดวาล์วควบคุม



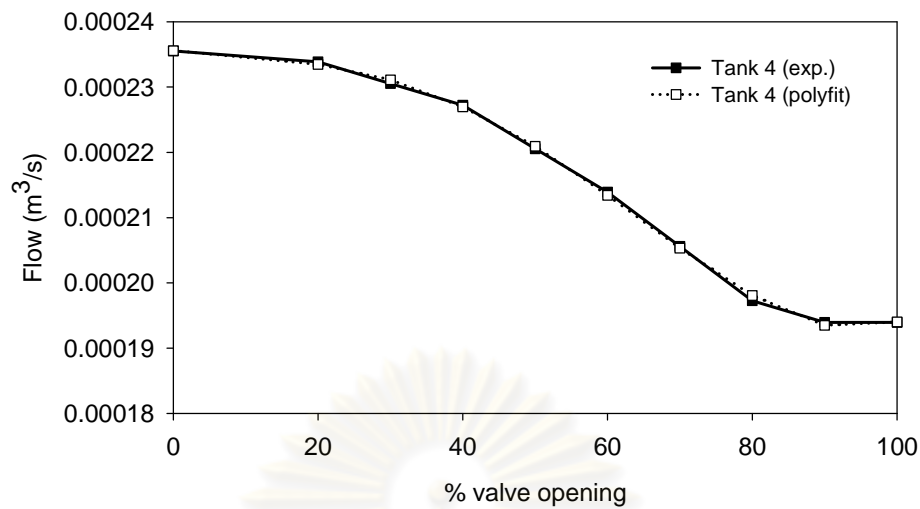
ภาพที่ 5.3 อัตราการไหลของน้ำในถังที่ 1 ที่เปลี่ยนแปลงไปที่เปอร์เซ็นต์วาล์วต่างๆ
ที่เปรียบเทียบระหว่างค่าจากการทดลอง (exp.) และการอธิบายด้วยสมการพหุนาม (polyfit)



ภาพที่ 5.4 อัตราการไหลของน้ำในถังที่ 2 ที่เปลี่ยนแปลงไปที่เปอร์เซ็นต์วาล์วต่างๆ ที่เปรียบเทียบระหว่างค่าจากการทดลอง (exp.) และการอธิบายด้วยสมการพหุนาม (polyfit)



ภาพที่ 5.5 อัตราการไหลของน้ำในถังที่ 3 ที่เปลี่ยนแปลงไปที่เปอร์เซ็นต์วาล์วต่างๆ ที่เปรียบเทียบระหว่างค่าจากการทดลอง (exp.) และการอธิบายด้วยสมการพหุนาม (polyfit)



ภาพที่ 5.6 อัตราการไหลของน้ำในถังที่ 4 ที่เปลี่ยนแปลงไปที่เปอร์เซ็นต์วาล์วต่างๆ ที่เปรียบเทียบระหว่างค่าจากการทดลอง (exp.) และการอธิบายด้วยสมการพหุนาม (polyfit)

สมการพหุนาม (Polynomial equation) ที่สร้างขึ้นแสดงได้ดังสมการที่ (5.12) ถึง (5.15) โดยสมการนี้แสดงอัตราการไหลของน้ำที่เข้าสู่ถังใบต่างๆเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์การเปิดปิดวาล์วควบคุม เมื่อพิจารณาจากแผนภาพชุดทดลองระบบสี่ถังในภาพที่ 5.1 จะเห็นว่าอัตราการไหลของน้ำที่เข้าสู่ถังใบต่างๆนอกจากจะมีผลมาจากความดันลด (Pressure drop) ของการเปิดปิดวาล์วควบคุมแล้ว ยังมีผลมาจากความดันลด (Pressure drop) ในท่อ รวมถึงบอลวาล์วที่ตัวที่ 5 และวาล์วตัวที่ 6 อีกด้วย ซึ่งในสมการที่ (5.12) ถึง (5.15) ได้แสดงผลกระทบของพฤติกรรมเหล่านี้ลงไปด้วย

$$F_1 = -0.000727u_2^4 + 0.001120u_2^3 - 0.000334u_2^2 + 0.000067u_2 \quad (5.12)$$

$$F_2 = -0.000005u_1^4 + 0.000049u_1^3 - 0.000063u_1^2 + 0.00000009u_1 + 0.000221 \quad (5.13)$$

$$F_3 = -0.000511u_1^4 + 0.000812u_1^3 - 0.000273u_1^2 + 0.000084u_1 \quad (5.14)$$

$$F_4 = 0.000205u_2^4 - 0.000302u_2^3 + 0.000069u_2^2 - 0.000014u_2 + 0.000236 \quad (5.15)$$

โดยที่ F_i คือ อัตราการไหลของน้ำที่เข้าสู่ถังที่ i ในหน่วย m^3/s
 u_i คือ การเปิดปิดวาล์วควบคุมตัวที่ i ในช่วง $0 - 1$
 ใช้เป็นตัวแทนแสดงการเปิดปิดวาล์วที่ $0 - 100\%$

5.1.3 ค่าคงที่ของกระบวนการระบบสี่ถัง

จากสมการแบบจำลองอธิบายระบบ สมการที่ (5.5), (5.7), (5.9) และ (5.11) พบว่าค่าคงที่ของระบบไม่ครบถ้วน โดยมีทั้งค่าคงที่ที่ทราบค่าได้แก่ ความหนาแน่นของน้ำ (ρ), พื้นที่หน้าตัดของถัง (A), ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (g), ความถ่วงจำเพาะของของเหลว (G_f) และค่าคงที่ที่ต้องการหาจากการทดลองคือสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์ว (C_{vcv}) ได้ถึงใบต่างๆ ในหัวข้อนี้จึงแสดงการหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์ว C_{vcv1} , C_{vcv2} , C_{vcv3} , และ C_{vcv4} สามารถหาได้จากสมการที่ (5.3) ดังยกมาแสดง

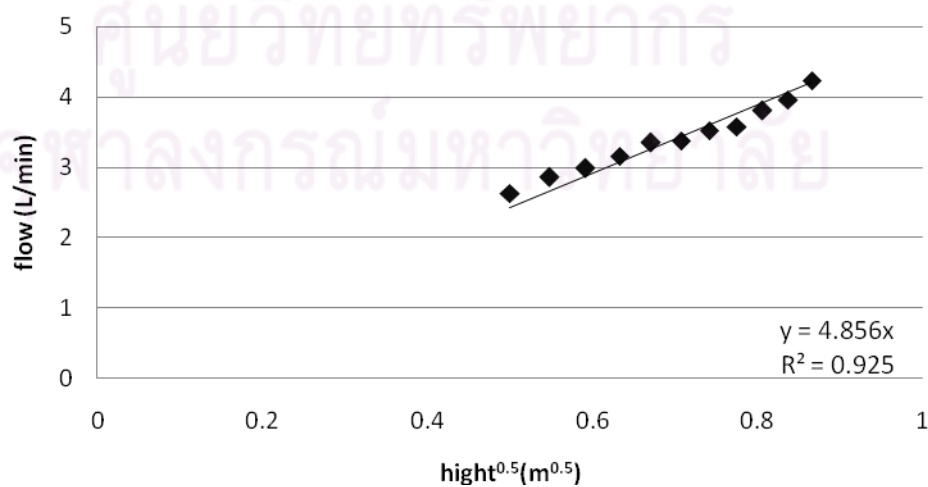
$$F_{cv,i} = C_{v,cvi} \sqrt{\frac{\rho g h_i}{G_f}} \quad (5.3)$$

$$y = mx + c \quad (5.16)$$

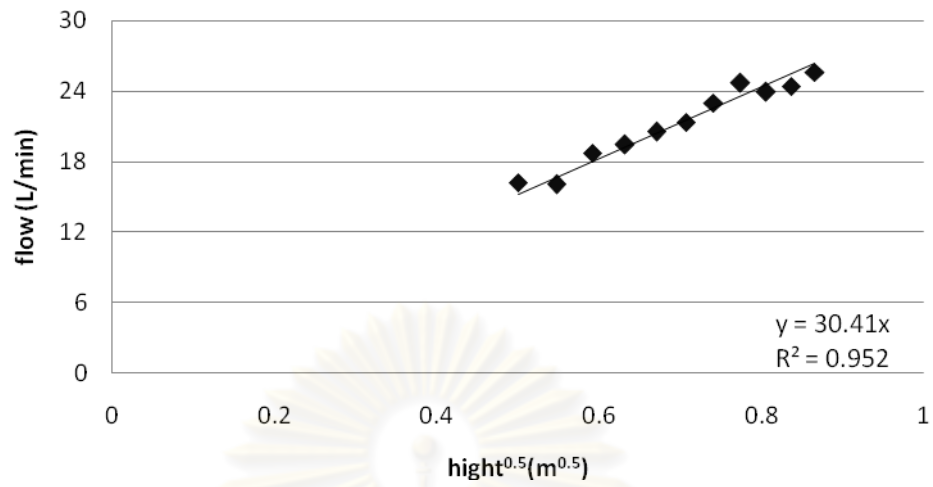
เมื่อเทียบรูปแบบสมการที่ (5.3) กับสมการเชิงเส้นในเทอมความสัมพันธ์ระหว่าง x กับ y ที่มีความชันเป็น m และจุดตัดแกน y เป็น c ดังสมการที่ (5.16) พบว่าเมื่อเราสร้างสมการเชิงเส้นโดยกำหนดให้ F_{cv} เป็นแกน y และ \sqrt{h} เป็นแกน x ดังสมการ (5.17) จะได้สมการสำหรับหา C_{vcv} ที่อยู่ในพจน์ของความชันดังสมการที่ (5.18) ซึ่งสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำและค่า \sqrt{h} ของวาล์วได้ตั้งแต่ละตัว แสดงดังภาพที่ 5.7 ถึง 5.10 และนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วได้ทั้งสี่ตัวได้ดังตารางที่ 5.1

$$F_{cv,i} = m\sqrt{h_i} \quad (5.17)$$

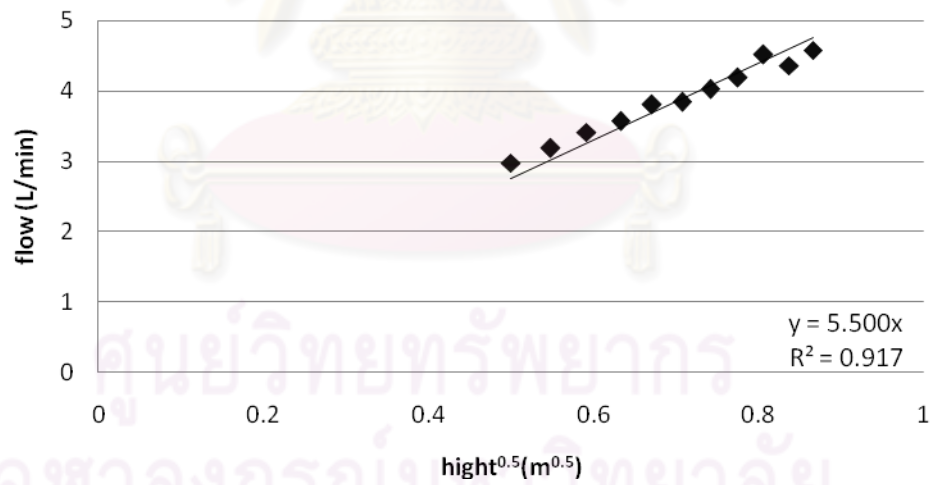
$$m = C_{v,cvi} \sqrt{\frac{\rho g}{G_f}} \quad (5.18)$$



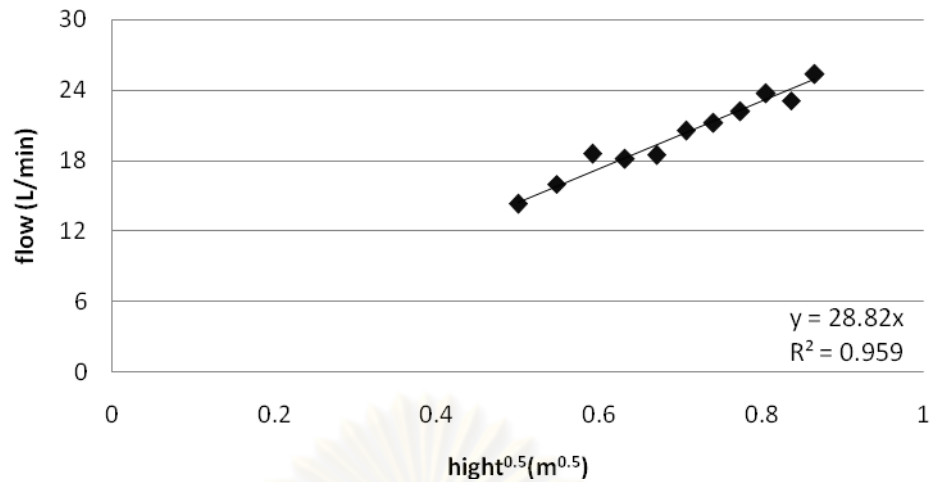
ภาพที่ 5.7 อัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปต่อความสูง^{0.5} ที่ผ่านวาล์วตัวที่ 1



ภาพที่ 5.8 อัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปต่อความสูง^{0.5} ที่ผ่านวาล์วตัวที่ 2



ภาพที่ 5.9 อัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปต่อความสูง^{0.5} ที่ผ่านวาล์วตัวที่ 3



ภาพที่ 5.10 อัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปต่อความสูง^{0.5} ที่ผ่านวาล์วตัวที่ 4

ตารางที่ 5.1 สัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วได้ถึง

ถึงที่	วาล์ว	สัมประสิทธิ์การไหลของวาล์ว (gpm / \sqrt{psi})
1	C_{vcv1}	1.0755
2	C_{vcv2}	6.7349
3	C_{vcv3}	1.2181
4	C_{vcv4}	6.3827

ความสูงของน้ำในถังของระบบที่สภาวะคงตัว ของถึงที่ 1 และถึงที่ 3 จะตั้งไว้ใกล้เคียงกัน เช่นเดียวกับ ถึงที่ 2 และถึงที่ 4 เมื่อเปิดวาล์วควบคุมทั้งสองตัวที่ 50% ได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 5.2 ซึ่งวิธีการหาสภาวะคงตัวเริ่มต้นของระบบแสดงไว้ในบทที่ 4 หัวข้อ 4.3 ส่วนค่าคงที่อื่นๆได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.2 ความสูงของน้ำในถังแต่ละใบที่สภาวะคงตัวเมื่อเปิดวาล์วควบคุมทั้งสองตัวที่ 50%

ถังที่	ความสูงของน้ำที่สภาวะคงตัว (เมตร)
1	0.30
2	0.27
3	0.30
4	0.29

ตารางที่ 5.3 ค่าคงที่ต่างๆของกระบวนการ

	สัญลักษณ์	ค่าคงที่	หน่วย
เส้นผ่านศูนย์กลางของถัง	ϕ_i	0.1420	m
พื้นที่หน้าตัดของถัง	A_i	0.0158	m ²
ความถ่วงจำเพาะของของเหลว	G_f	1	-
ความหนาแน่นของน้ำ	ρ	1000	kg/m ³
ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก	g	9.81	m/s ²

เมื่อแทนค่าสมการที่ (5.12) ถึง (5.15) ลงในสมการที่ (5.5), (5.7), (5.9) และ (5.11) จะได้แบบจำลองดังสมการที่ (5.19) ถึง (5.22)

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{1}{A_1} \left(-0.000727 \times u_2^4 + 0.001120 \times u_2^3 - 0.000334 \times u_2^2 + 0.000067 \times u_2 \right) - \frac{C_{vcv1}}{A_1} \sqrt{\frac{\rho g h_1}{G_f}} \quad (5.19)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{A_2} \left(-0.000005u_1^4 + 0.000049u_1^3 - 0.000063u_1^2 + 0.00000009u_1 + 0.000221 \right) + \frac{C_{vcv1}}{A_2} \sqrt{\frac{\rho g h_1}{G_f}} - \frac{C_{vcv2}}{A_2} \sqrt{\frac{\rho g h_2}{G_f}} \quad (5.20)$$

$$\frac{dh_3}{dt} = \frac{1}{A_3} \left(-0.000511u_1^4 + 0.000812u_1^3 - 0.000273u_1^2 + 0.000084u_1 \right) - \frac{C_{vcv3}}{A_3} \sqrt{\frac{\rho g h_3}{G_f}} \quad (5.21)$$

$$\frac{dh_4}{dt} = \frac{1}{A_4} (0.000205u_2^4 - 0.000302u_2^3 + 0.000069u_2^2 - 0.000014u_2 + 0.000236) + \frac{C_{VCV3}}{A_4} \sqrt{\frac{\rho gh_3}{G_f}} - \frac{C_{VCV4}}{A_4} \sqrt{\frac{\rho gh_4}{G_f}} \quad (5.22)$$

เมื่อแทนค่าคงที่จากตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.3 ลงไปจะได้ดังสมการที่ (5.23) ถึง (5.26) ในที่นี้จะแทนค่าค่าคงที่ให้อยู่ในรูปตัวแปร a_i , b_i , c_i และ d_i สำหรับชุดสมการแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงความสูงน้ำถึงที่ 1, ถึงที่ 2, ถึงที่ 3 และถึงที่ 4 ตามลำดับ โดยค่าคงที่นี้จะแสดงอยู่ในตารางที่ 5.4 เมื่อสมการชุดนี้แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงความสูงของน้ำในถังต่างๆในหน่วยเมตรต่อวินาที (m/s) ที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์วาล์วที่ใช้ช่วง 0 – 1 เป็นตัวแทนการปรับวาล์วที่ 0 – 100% จากสมการจะได้ว่าตัวแปรสเตทหรือตัวแปรควบคุมคือ h_1 , h_2 , h_3 และ h_4 ส่วนตัวแปรปรับคือ u_1 และ u_2

$$\frac{dh_1}{dt} = a_1u_2^4 + a_2u_2^3 + a_3u_2^2 + a_4u_2 - a_5\sqrt{h_1} \quad (5.23)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = b_1u_1^4 + b_2u_1^3 + b_3u_1^2 + b_4u_1 + b_5 + b_6\sqrt{h_1} - b_7\sqrt{h_2} \quad (5.24)$$

$$\frac{dh_3}{dt} = c_1u_1^4 + c_2u_1^3 + c_3u_1^2 + c_4u_1 - c_5\sqrt{h_3} \quad (5.25)$$

$$\frac{dh_4}{dt} = d_1u_2^4 + d_2u_2^3 + d_3u_2^2 + d_4u_2 + d_5 + d_6\sqrt{h_3} - d_7\sqrt{h_4} \quad (5.26)$$

ตารางที่ 5.4 ค่าคงที่สำหรับสมการที่ (5.23) ถึง (5.26)

ตัวแปร	ตัวแปร	ตัวแปร	ตัวแปร
a_1	-0.045919	b_1	-0.000299
a_2	0.070745	b_2	0.003093
a_3	-0.021112	b_3	-0.003969
a_4	0.004243	b_4	0.000006
a_5	0.005110	b_5	0.013942
		b_6	0.005110
		b_7	0.032004
		c_1	-0.032241
		c_2	0.051244
		c_3	-0.017212
		c_4	0.005323
		c_5	0.005788
		d_1	0.012970
		d_2	-0.019054
		d_3	0.004336
		d_4	-0.000877
		d_5	0.014875
		d_6	0.005788
		d_7	0.030330

5.1.4 การสร้างสมการตัวแปรสเตรท (State space form)

ก่อนการสร้างสมการตัวแปรสเตรทต้องแปลงสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อยู่ในรูปไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้นเสียก่อนด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น (Linearization) รอบจุดที่ภาวะคงที่ค่าหนึ่งๆ ในที่นี้จะใช้ภาวะคงที่คือ จุดที่มีการเปิดวาล์วควบคุมทั้งสองตัวที่ 50% และระดับน้ำอยู่ที่สภาวะคงที่ดังแสดงในตารางที่ 5.2 ดังนั้นจะกำหนดให้ตัวแปรสเตรทและตัวแปรปรับอยู่ในรูปตัวแปรเบี่ยงเบน (deviation form) ดังต่อไปนี้

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

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

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

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

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

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

โดยที่ $\delta h_1, \delta h_2, \delta h_3, \delta h_4, \delta u_1$ และ δu_2 คือรูปตัวแปรเบี่ยงเบน ส่วน $\bar{h}_1, \bar{h}_2, \bar{h}_3, \bar{h}_4, \bar{u}_1$ และ \bar{u}_2 คือตัวแปรในสภาวะคงที่

สมการที่ใช้สำหรับวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น (Linearization) ของแบบจำลองนี้เป็นดังสมการที่ (5.27) โดยรูปแบบสมการตัวแปรสเตรทจะเป็นดังสมการที่ (5.28)

$$\begin{aligned} \frac{df}{dt}[h_1(t), h_2(t), h_3(t), h_4(t), u_1(t), u_2(t)] &\approx \bar{f} + \frac{\partial f}{\partial h_1}(h_1 - \bar{h}_1) + \frac{\partial f}{\partial h_2}(h_2 - \bar{h}_2) \\ &+ \frac{\partial f}{\partial h_3}(h_3 - \bar{h}_3) + \frac{\partial f}{\partial h_4}(h_4 - \bar{h}_4) + \frac{\partial f}{\partial u_1}(u_1 - \bar{u}_1) + \frac{\partial f}{\partial u_2}(u_2 - \bar{u}_2) \end{aligned} \quad (5.27)$$

$$\frac{dh}{dt} = Ah + Bu \quad (5.28)$$

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

และ h คือ เวกเตอร์ขนาด 4 ของตัวแปรสเตรท

u คือ เวกเตอร์ขนาด 2 ของตัวแปรปรับตามลำดับ

เมื่อทำการแปลงสมการแบบจำลองระบบสี่ถังให้อยู่ในรูปเชิงเส้นแล้ว แบบจำลองในรูปสมการตัวแปรสแตทจะเขียนในรูปเมตริกซ์ดังสมการที่ (5.29) ซึ่งสมการในรูปเมตริกซ์นี้จะใช้ในการทดสอบเสถียรภาพของระบบรวมถึงความสามารถควบคุมได้ของระบบ รวมถึงนำไปใช้ในการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบเชิงเส้นซึ่งใช้แบบจำลองในรูปสมการตัวแปรสแตทในการคำนวณ ในที่นี้จะแทนค่าค่าคงที่ให้อยู่ในรูปตัวแปร a_{ij} และ b_{ij} สำหรับค่าคงที่ในเมตริกซ์ A และ B ค่าคงที่เหล่านี้จะแสดงอยู่ในตารางที่ 5.5

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \\ \dot{h}_3 \\ \dot{h}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & b_{12} \\ b_{21} & 0 \\ b_{31} & 0 \\ 0 & b_{42} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta u_1 \\ \delta u_2 \end{bmatrix} \quad (5.29)$$

$$\text{โดยที่ } A = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & b_{12} \\ b_{21} & 0 \\ b_{31} & 0 \\ 0 & b_{42} \end{bmatrix}$$

ตารางที่ 5.5 ค่าคงที่สำหรับสมการตัวแปรสแตท

ตัวแปร	ตัวแปร	ตัวแปร	ตัวแปร
a_{11}	-0.004665	a_{33}	-0.005284
b_{12}	0.013230	b_{31}	0.010424
a_{21}	0.004665	a_{43}	0.005284
a_{22}	-0.030795	a_{44}	-0.028161
b_{21}	-0.001793	b_{42}	-0.004346

5.2 การทดสอบความถูกต้องแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสี่ถัง

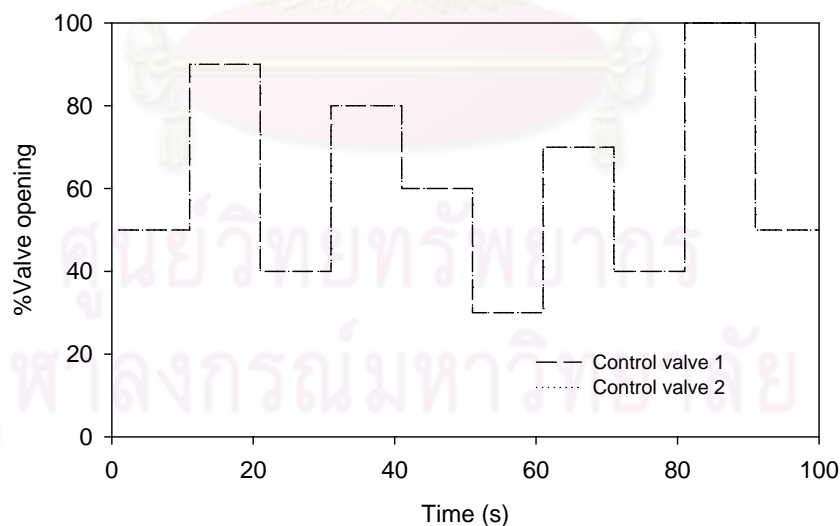
ในหัวข้อนี้จะทำการทดสอบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นนั้นสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในถังในการทดลองจริงได้หรือไม่ โดยจะทำการปรับเปอร์เซ็นต์การเปิดปิดวาล์วควบคุมทุกๆ 10 วินาทีดังแสดงในภาพที่ 5.11 จาก 50% ไปเป็น 90%, 40%, 80%, 60%, 30%, 70%, 40%, 100% และ 50% ตามลำดับแล้วบันทึกระดับความสูงของน้ำที่วัดได้จากถังแต่ละใบ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีสองแบบจำลองด้วยกันคือแบบจำลองแบบไม่เป็นเชิงเส้นจากสมการที่ (5.23) ถึง (5.26) ซึ่งจะใช้กับตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เป็นเชิงเส้น และแบบจำลองที่ถูกทำให้เป็นเชิงเส้นแล้วคือแบบจำลองสมการตัวแปรสเตรท (5.29) ที่ใช้กับตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบเชิงเส้นนั่นเอง

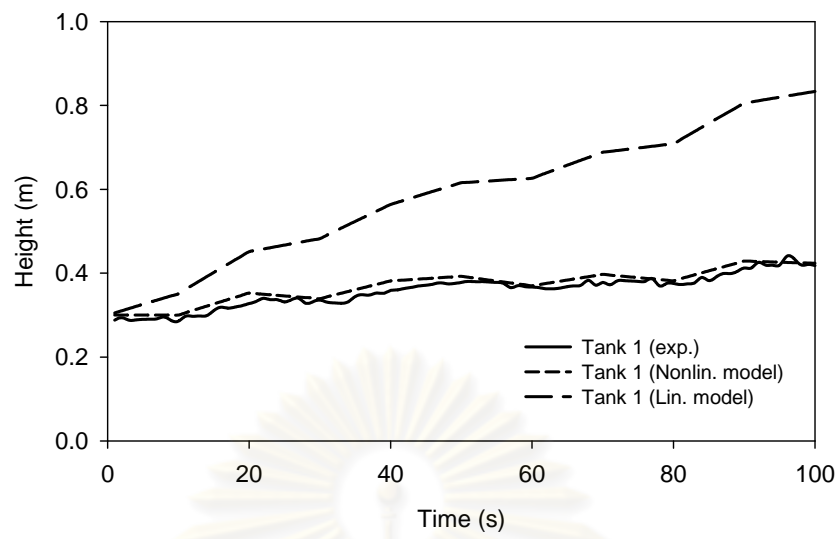
ในภาพที่ 5.12 ถึงภาพที่ 5.15 จะแสดงการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในถังที่ 1 ถึงถังที่ 4 ตามลำดับ

โดยที่	exp.	แสดงระดับน้ำจากการทดลองจริง
	Nonlin. model	แสดงระดับน้ำจากแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้น
	Lin. model	แสดงระดับน้ำจากแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น

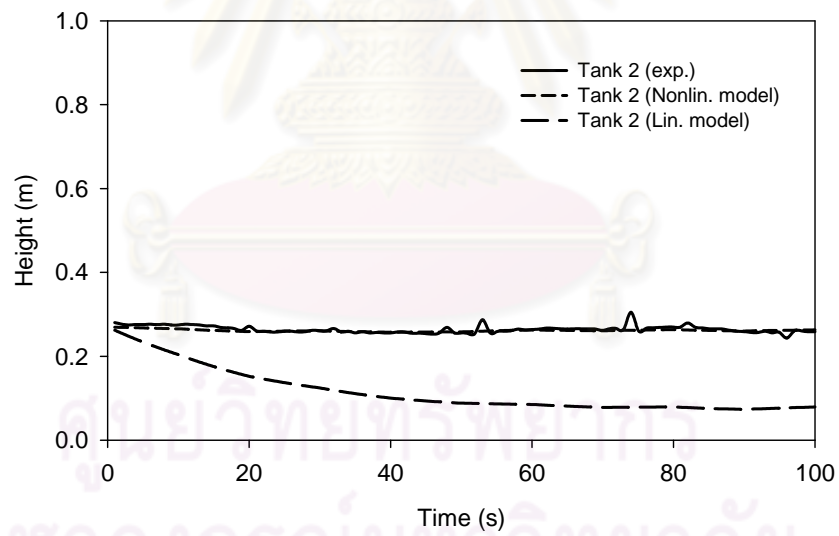
เมื่อมีการปรับเปอร์เซ็นต์การเปิดปิดวาล์วควบคุม ระดับน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงจากการเปลี่ยนแปลงการเปิดปิดวาล์วควบคุม จะเห็นได้ว่าระดับน้ำในถังจากการจำลองด้วยแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะมีความใกล้เคียงกับระดับน้ำจากการทดลองจริง ในขณะที่ระดับน้ำจากการแบบจำลองแบบเป็นเชิงเส้นจะมีผลการสะสมของความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง ทำให้ระดับน้ำสูงหรือต่ำกว่าความเป็นจริงไปมาก ดังนั้นแบบจำลองแบบไม่เป็นเชิงเส้นจึงสามารถนำไปใช้อธิบายระบบนี้ได้ดีกว่าแบบจำลองแบบเป็นเชิงเส้น



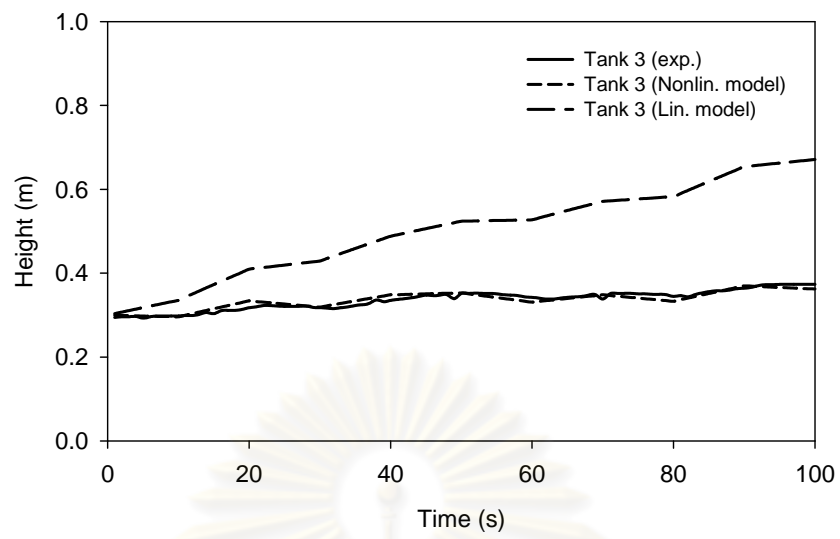
ภาพที่ 5.11 การปรับเปอร์เซ็นต์วาล์วควบคุมตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ที่เวลาต่างๆ



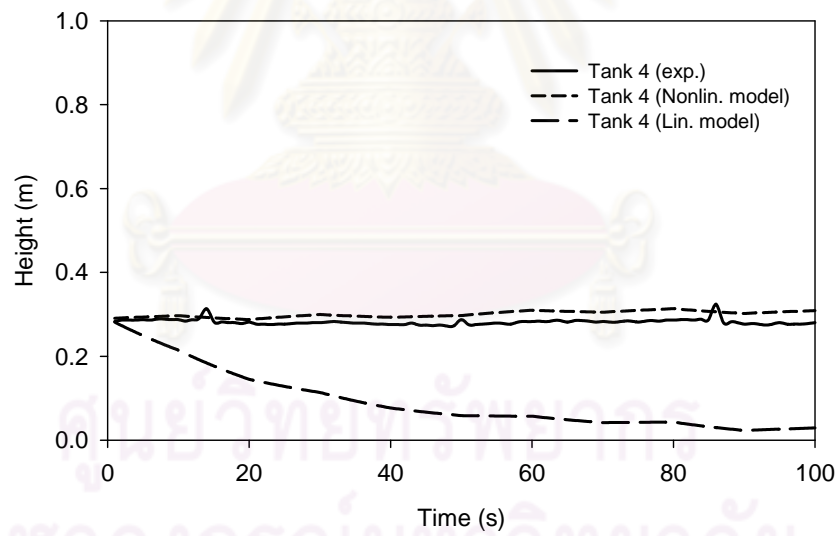
ภาพที่ 5.12 ระดับน้ำในถังที่ 1 ที่เปลี่ยนแปลงไปที่เปอร์เซ็นต์วาล์วต่างๆ



ภาพที่ 5.13 ระดับน้ำในถังที่ 2 ที่เปลี่ยนแปลงไปที่เปอร์เซ็นต์วาล์วต่างๆ



ภาพที่ 5.14 ระดับน้ำในถังที่ 3 ที่เปลี่ยนแปลงไปที่เปอร์เซ็นต์วาล์วต่างๆ



ภาพที่ 5.15 ระดับน้ำในถังที่ 4 ที่เปลี่ยนแปลงไปที่เปอร์เซ็นต์วาล์วต่างๆ

5.3 การทดสอบเสถียรภาพของระบบ

ในการจะทราบว่าระบบมีเสถียรภาพหรือไม่ ทำได้โดยการตรวจสอบว่าค่าโพล (Poles) ของระบบเปิด (Open loop system) ที่ยังไม่มีการควบคุมว่ามีค่าเท่าใด หากค่าโพลที่หามาเป็นลบ (อยู่ทางซ้ายของแกนจินตภาพ) แสดงว่าระบบมีความเสถียร แต่ถ้าค่าโพลเป็นบวก (อยู่ทางขวาของแกนจินตภาพ) แสดงว่าไม่มีเสถียรภาพของระบบ

ค่าโพลของระบบหาได้จากสมการ (5.30) ดังนี้

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (5.30)$$

เมื่อ	I	คือ	เมตริกซ์เอกลักษณ์
	λ	คือ	ค่าโพลของระบบ
	A	คือ	$\begin{bmatrix} -0.004665 & 0 & 0 & 0 \\ 0.004665 & -0.030795 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.005284 & 0 \\ 0 & 0 & 0.005284 & -0.028161 \end{bmatrix}$
คำนวณได้	λ_1	=	-0.004665
	λ_2	=	-0.030795
	λ_3	=	-0.005284
	λ_4	=	-0.028161

ค่าโพลที่หาได้มีค่าเป็นลบ แสดงให้เห็นว่าระบบการนี้มีความเสถียรภาพ

5.4 การทดสอบความสามารถควบคุมได้ของระบบ

ทำการทดสอบความสามารถในการควบคุมได้ (Controllability) เพื่อให้ทราบว่าระบบนี้สามารถถูกควบคุมให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายภายในระยะเวลาหนึ่งๆได้หรือไม่ โดยเมตริกซ์ความควบคุมได้ของระบบนี้เป็นดังแสดงในสมการที่ (5.31) โดยระบบจะสามารถควบคุมได้ก็ต่อเมื่อแต่ละแถวใดๆของเมตริกซ์ไม่สามารถแทนกันหรือเทียบเท่ากันได้ เมื่อแทนค่าเมตริกซ์ A และ B ลงไปจะได้สมการที่ (5.32)

$$\text{เมตริกซ์ความควบคุมได้} = [B \quad AB \quad A^2B \quad A^3B] \quad (5.31)$$

$$\text{เมตริกซ์ความควบคุมได้} =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.0132 & 0 & -0.62e-4 & 0 & 0.29e-6 & 0 & -0.13e-8 \\ -0.0018 & 0 & 0.55e-4 & 0.62e-4 & -1.70e-6 & -2.19e-6 & 5.24e-8 & 6.87e-8 \\ 0.0104 & 0 & -0.55e-4 & 0 & 0.29e-6 & 0 & -0.15e-8 & 0 \\ 0 & -0.0043 & 0.55e-4 & 1.22e-4 & -1.84e-6 & -3.45e-6 & 5.34e-8 & 9.71e-8 \end{bmatrix} \quad (5.32)$$

สมการที่ (5.32) เป็นเมตริกซ์ขนาด 4 แถว 8 หลัก โดยแถวที่ 1 เป็นตัวแทนของถึงที่ 1, แถวที่ 2 เป็นตัวแทนของถึงที่ 2, แถวที่ 3 เป็นตัวแทนของถึงที่ 3 และแถวที่ 4 เป็นตัวแทนของถึงที่ 4 เมื่อพิจารณากรณีควบคุมน้ำในถึงที่ 1 และ 4 พบว่า แถวที่ 1 หลักที่ 1 และแถวที่ 4 หลักที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0 เหมือนกันสามารถแทนกันได้ แสดงให้เห็นว่าการควบคุมระดับของน้ำในถึงที่ 1 และถึงที่ 4 ไม่สามารถควบคุมพร้อมกันได้ ในทำนองเดียวกันพิจารณากรณีของถึงที่ 2 และถึงที่ 3 พบว่า แถวที่ 2 หลักที่ 2 และแถวที่ 3 หลักที่ 2 มีค่าเป็น 0 จึงสามารถแทนกันได้ แสดงว่าการควบคุมระดับของน้ำในถึงที่ 2 และถึงที่ 3 ไม่สามารถควบคุมพร้อมกันได้

สามารถสรุปกรณีที่สามารควบคุมได้ดังแสดง ซึ่งเป็นการควบคุมระดับน้ำในถึง 2 ไบ โดยการปรับเปอร์เซ็นต์ของวาล์วควบคุม 2 ตัว

- 1) การควบคุมระดับน้ำของถึงที่ 1 และถึงที่ 3
- 2) การควบคุมระดับน้ำของถึงที่ 1 และถึงที่ 2
- 3) การควบคุมระดับน้ำของถึงที่ 3 และถึงที่ 4
- 4) การควบคุมระดับน้ำของถึงที่ 2 และถึงที่ 4

5.5 การพิจารณาการควบคุมระบบ

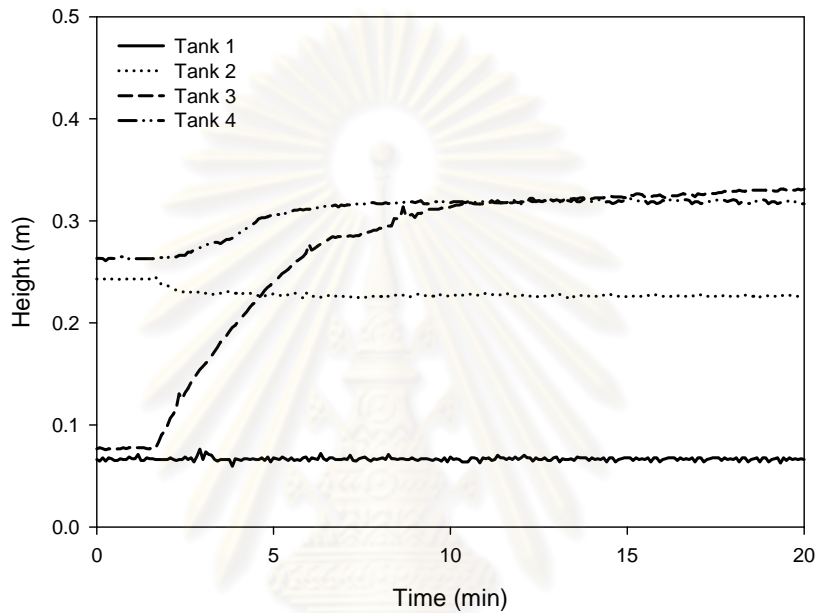
ในงานวิจัยนี้จะทำการควบคุมระบบโดยมีการใส่การรบกวนระบบ (Disturbance input) เข้ามาแบบอิมพัลส์ (Impulse) และจะต้องควบคุมระบบให้เข้าสู่สภาวะคงตัวเดิมที่ความสูงของน้ำดังแสดงในตารางที่ 5.2 โดยมีการเติมน้ำความสูง 10 ซม. (ประมาณ 2 ลิตร) ลงไปในถังใบหนึ่งในถังที่ต้องการควบคุมและพิจารณาพฤติกรรมของการควบคุมของระบบ โดยการควบคุมระดับน้ำของถังที่ 2 และถังที่ 4 จะทำได้ยากที่สุดเนื่องจากระดับน้ำได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำของถังที่ 1 และ 3 ด้วย ส่วนการควบคุมระดับน้ำของถังที่ 1 และถังที่ 3 จะไม่ทำการศึกษาเนื่องจากระดับน้ำของทั้งสองถังซึ่งเป็นถังคู่บนนั้นไม่ได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำของถังอื่นๆ ดังนั้นกรณีทำการทดลองในงานวิจัยนี้มีดังต่อไปนี้

- 1) การควบคุมระดับน้ำของถังที่ 1 และถังที่ 2 เติมน้ำที่ถังที่ 2
 - ถังที่ 1 ค่าเป้าหมายคือระดับน้ำ 30 ซม.
 - ถังที่ 2 ค่าเป้าหมายคือระดับน้ำ 27 ซม.
- 2) การควบคุมระดับน้ำของถังที่ 3 และถังที่ 4 เติมน้ำที่ถังที่ 4
 - ถังที่ 3 ค่าเป้าหมายคือระดับน้ำ 30 ซม.
 - ถังที่ 4 ค่าเป้าหมายคือระดับน้ำ 29 ซม.
- 3) การควบคุมระดับน้ำของถังที่ 2 และถังที่ 4 เติมน้ำที่ถังที่ 2
 - ถังที่ 2 ค่าเป้าหมายคือระดับน้ำ 27 ซม.
 - ถังที่ 4 ค่าเป้าหมายคือระดับน้ำ 29 ซม.

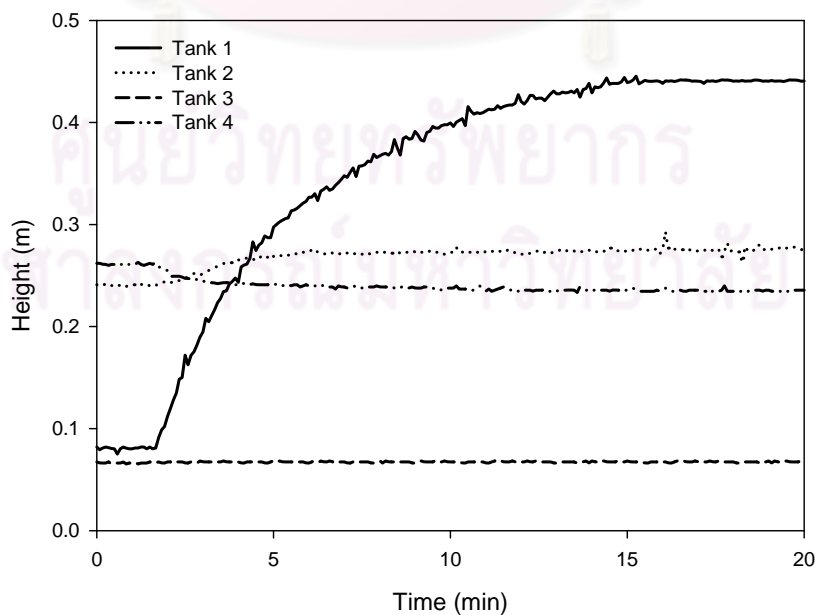
ในการรบกวนระบบโดยการเติมน้ำเข้ามาแบบอิมพัลส์นั้นจะเกิดขึ้นที่วินาทีที่ 30 โดยระดับน้ำหรือตัวแปรควบคุมนี้จะถูกวัดค่าและนำไปคำนวณเพื่อการควบคุมในรอบถัดไป

5.6 ผลการทดสอบการตอบสนองของกระบวนการ

เริ่มต้นปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และวาล์วควบคุมตัวที่ 2 ไว้ที่ 35% จากนั้นได้ทดลองปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 1 แบบสแต็ปจาก 35% ไปที่ 55% ได้ผลดังภาพที่ 5.16 และทดลองปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 2 แบบสแต็ปจาก 35% ไปที่ 55% ได้ผลดังภาพที่ 5.17 โดยการปรับวาล์วจะเกิดขึ้นที่วินาทีที่ 100 ของการทดลอง โดยจะเก็บค่าถึงเวลาที่ระดับน้ำเข้าสู่สภาวะคงตัว



ภาพที่ 5.16 ลักษณะการตอบสนองต่อการปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 1



ภาพที่ 5.17 ลักษณะการตอบสนองต่อการปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 2

จะเห็นได้ว่าเมื่อปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 1 แบบสแต็ปจาก 35% ไปที่ 55% โดยวาล์วควบคุมตัวที่ 2 อยู่ที่ 35% จะมีผลกระทบต่อระดับน้ำถึงที่ 2, ถึงที่ 3 และถึงที่ 4 แต่จะไม่มีผลต่อระดับน้ำถึงที่ 1 นอกจากนี้ระดับน้ำถึงที่ 3 จะมีการเปลี่ยนแปลงไปมากที่สุด ส่วนการปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 2 แบบสแต็ปจาก 35% ไปที่ 55% โดยวาล์วควบคุมตัวที่ 1 อยู่ที่ 35% จะมีผลกระทบต่อระดับน้ำถึงที่ 1, ถึงที่ 2 และถึงที่ 4 โดยไม่กระทบต่อระดับน้ำถึงที่ 3 และพบว่าถึงที่ 1 มีการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำมากที่สุด จากนั้นนำไปคำนวณค่าเวลา t_1 และ t_2 จะได้ค่าอัตราการขยายของกระบวนการ (Process gain) ค่าคงตัวของเวลา (Time constant, τ) และ เดดไทม์ (Dead time, t_0) ดังสรุปในตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ค่าคงที่จากการทดสอบการตอบสนองของกระบวนการ

วาล์วควบคุม	ถึงที่	K	τ	t_0
ตัวที่ 1	2	-0.08	52.50	2.50
	3	1.26	157.50	18.50
	4	0.28	106.50	63.50
ตัวที่ 2	1	1.80	204.00	13.00
	2	0.18	102.00	30.00
	4	-0.13	78.00	2.00

5.7 การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดี

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการปรับแต่งตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยวิธี Minimum Error Integral Criteria (Minimum IAE) ซึ่งจะต้องมีการทดสอบการตอบสนองของกระบวนการ ดังรายละเอียดในหัวข้อ 5.6 เพื่อหาค่า Time constant (τ) และ Dead time (t_0) ไปคำนวณค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 3.1 จากนั้นจึงปรับแต่งตัวควบคุมแบบละเอียดอีกครั้งเพื่อให้ได้ค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Integral of the absolute value of the error, IAE) น้อยที่สุด โดยหลักการคือหากมีการแกว่งหรือมี overshoot เกิดขึ้นให้ปรับค่า K_c ลดลง ซึ่งจะทำให้การตอบสนองช้า และหากมีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวของระบบให้ปรับค่า τ_I ลดลง หรือหากมีการแกว่งหรือการควบคุมอยู่ห่างค่าเป้าหมายให้ปรับค่า τ_D เพิ่มขึ้น

ในงานวิจัยนี้เป็นกระบวนการในการควบคุมความสูงของน้ำซึ่งเป็นกระบวนการที่การตอบสนองค่อนข้างเร็ว ดังนั้นตัวควบคุมแบบ PID จะใช้โหมดของการควบคุมคือ โหมด P และ โหมด I ดังนั้นโหมด D ที่ใช้กับระบบที่มีการตอบสนองช้าจึงไม่จำเป็นต้องใช้

เนื่องจากกระบวนการที่ทำการศึกษาเป็นกระบวนการที่มีตัวแปรขาเข้าและขาออกหลายตัวแปร (Multi-Input-Multi-Output, MIMO) ซึ่งมีการเลือกใช้ตัวแปรควบคุม 2 ตัวคือวาล์วควบคุมเพื่อควบคุมระดับน้ำในถัง 2 ใบดังแสดงในหัวข้อ 5.5 ในกรณีของการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีนี้จะสามารถควบคุมกระบวนการที่มีตัวแปรขาเข้าและขาออกตัวแปรเดียว (Single-Input-Single-Output, SISO) จึงต้องใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีสองชุดสำหรับควบคุมกระบวนการนี้

วิธีการที่ใช้วิเคราะห์การเลือกจับคู่ตัวแปรควบคุมและตัวแปรปรับสำหรับกระบวนการที่มีตัวแปรขาเข้าและขาออกหลายตัวแปร (Multi-Input-Multi-Output, MIMO) คือวิธี Relative Gain Array, RGA [32]

โดยที่ G คือ เมทริกซ์ของค่าเกนที่สภาวะคงที่ (Steady state gain matrix)

เมื่อ $g_{ij} = \frac{\Delta y_i}{\Delta m_j}$ ที่ไม่มีการควบคุม (y คือตัวแปรควบคุม และ m คือตัวแปรปรับ)

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \cdots & g_{1n} \\ g_{21} & g_{22} & \cdots & g_{2n} \\ \vdots & & & \\ g_{n1} & g_{n2} & \cdots & g_{nm} \end{bmatrix}$$

R คือ อินเวอร์สของทรานสโพสของเมทริกซ์ G , $R = (G^{-1})^T$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & & & \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}$$

RGA คือ เมทริกซ์ที่สมาชิกแต่ละตัวมีค่า $\lambda_{ij} = g_{ij} r_{ij}$ ในแต่ละแถวของเมทริกซ์ RGA แสดงถึงตัวแปรขาเข้า ซึ่งในที่นี้คือระดับน้ำในถัง ส่วนแต่ละหลักจะแสดงถึงตัวแปรปรับ คือการเปิดปิดวาล์วควบคุม

$$RGA = \Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \cdots & \lambda_{1n} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \cdots & \lambda_{2n} \\ \vdots & & & \\ \lambda_{n1} & \lambda_{n2} & \cdots & \lambda_{nm} \end{bmatrix}$$

หาก $\lambda_{ij} = 0$ แสดงว่าตัวแปรปรับไม่มีผลต่อตัวแปรขาออกหรือตัวแปรควบคุม

$\lambda_{ij} \geq 1$ ให้เลือกจับคู่ตัวแปรควบคุมกับตัวแปรปรับนั้น

เราสามารถวิเคราะห์การควบคุมสำหรับกรณีต่างๆได้ดังต่อไปนี้

1) การควบคุมระดับน้ำของถังที่ 1 และถังที่ 2

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 1.8 \\ -0.08 & 0.18 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} 1.25 & 0.56 \\ -12.50 & 0 \end{bmatrix}$$

$$RGA = \Lambda = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

ดังนั้นเลือกควบคุมระดับน้ำถังที่ 1 ด้วยวาล์วควบคุมตัวที่ 2 และควบคุมระดับน้ำถังที่ 2 ด้วยวาล์วควบคุมตัวที่ 1

2) การควบคุมระดับน้ำของถังที่ 3 และถังที่ 4

$$G = \begin{bmatrix} 1.26 & 0 \\ 0.28 & -0.13 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} 0.79 & 1.71 \\ 0 & -7.69 \end{bmatrix}$$

$$RGA = \Lambda = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ดังนั้นเลือกควบคุมระดับน้ำถังที่ 3 ด้วยวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และควบคุมระดับน้ำถังที่ 4 ด้วยวาล์วควบคุมตัวที่ 2

3) การควบคุมระดับน้ำของถังที่ 2 และถังที่ 4

$$G = \begin{bmatrix} -0.08 & 0.18 \\ 0.28 & -0.13 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} 3.25 & 7 \\ 4.50 & 2 \end{bmatrix}$$

$$RGA = \Lambda = \begin{bmatrix} -0.26 & 1.26 \\ 1.26 & -0.26 \end{bmatrix}$$

ดังนั้นเลือกควบคุมระดับน้ำถังที่ 2 ด้วยวาล์วควบคุมตัวที่ 2 และควบคุมระดับน้ำถังที่ 4 ด้วยวาล์วควบคุมตัวที่ 1

เวลาในการสุ่มตัวอย่างมีผลกระทบต่อค่าเดดไทม์ (Dead time, t_0) ของระบบ การใช้เวลาในการสุ่มตัวอย่างไม่เท่ากันจึงต้องมีการแก้ไขค่า t_0 ให้ถูกต้อง ในการทดสอบการตอบสนองของกระบวนการใช้เวลาในการสุ่มตัวอย่างเท่ากับ 5 วินาที ส่วนเวลาในการทำการควบคุมเป็น 6 วินาที, 8 วินาที และ 10 วินาที ตามลำดับ จะต้องใช้สมการที่ (5.33) เพื่อหาค่า t_0 ใหม่เพื่อมาคำนวณค่า K_c และ τ_I ใหม่ในแต่ละกรณีที่ทำการควบคุม

$$t_{0c} = t_0 + \frac{T}{2} \quad (5.33)$$

โดยที่ t_{0c} คือ เดดไทม์ (Dead time, t_0) ที่แก้ไขแล้ว
 t_0 คือ เดดไทม์ (Dead time, t_0) ของระบบ
 T คือ เวลาในการสุ่มตัวอย่าง (Sampling time)

ดังนั้นเมื่อใช้เวลาในการสุ่มตัวอย่างมากขึ้น ค่า K_c จะต้องลดลงขณะที่ τ_I จะต้องเพิ่มขึ้นดังแสดงในบทที่ 6

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.8 การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบเป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น

การควบคุมแบบ MPC และ NMPC จะมีลักษณะของปัญหาเหมือนกันคือ จะกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) มีสมการแบบจำลองระบบในรูปเชิงอนุพันธ์สามัญ (ODE) มีการกำหนดค่าขอบเขตของตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุมเหมือนกัน ส่วนที่แตกต่างกันคือสมการแบบจำลองระบบ โดยการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ MPC จะใช้สมการ ODE ในรูปสมการสเตทคือมีการทำให้เป็นเชิงเส้น (linearization) ส่วนการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ NMPC จะใช้สมการ ODE ในรูปไม่เป็นเชิงเส้นโดยจะมีการแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method)

ปัญหาสำหรับตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟของระบบสี่ถังแสดงได้ดังสมการที่ (5.34) ถึงสมการที่ (5.37)

$$\text{ฟังก์ชันวัตถุประสงค์} \min \int_0^{t_f} \left\{ w_{y1} (h_i(t) - h_{i,sp})^2 + w_{y2} (h_j(t) - h_{j,sp})^2 + w_{u1} (\Delta u_1)^2 + w_{u2} (\Delta u_2)^2 \right\} dt \quad (5.34)$$

$$\text{สมการแบบจำลองระบบ} \dot{h} = f(h_1(t), h_2(t), h_3(t), h_4(t), u_1(t), u_2(t)) \quad (5.35)$$

ขอบเขตของตัวแปรปรับและตัวแปรสเตท

$$0 < u_1(t), u_2(t) < 1 \quad (5.36)$$

$$0 < h_1(t), h_2(t), h_3(t), h_4(t) , m < 0.8 \quad (5.37)$$

เมื่อตัวแปรปรับ $u_1(t)$ และ $u_2(t)$ ในช่วงการปรับ 0 – 1 แสดงการเปอร์เซ็นต์การเปิดปิดวาล์วควบคุมที่ 0 – 100% และกำหนดให้ระดับน้ำในถัง $h_1(t)$, $h_2(t)$, $h_3(t)$ และ $h_4(t)$ สูงได้ไม่เกิน 0.80 เมตรเพื่อป้องกันน้ำล้นถัง

โดยที่ $h_i(t)$ และ $h_j(t)$ คือ ระดับน้ำในถังที่ i และถังที่ j ที่ต้องการควบคุมตามลำดับ

$h_{i,sp}$ และ $h_{j,sp}$ คือ ระดับน้ำที่ค่าเป้าหมายในถังที่ i และถังที่ j ที่ต้องการควบคุมตามลำดับ

Δu_1 และ Δu_2 คือ ผลต่างของการเปิด-ปิดวาล์วควบคุม กับการเปิดวาล์วควบคุมที่จุดอ้างอิงของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ตามลำดับ

- w_{y1} และ w_{y2} คือ เวกเตอร์น้ำหนักของระดับน้ำในถังที่ต้องการควบคุมถึงที่ 1 และถึงที่ 2 ตามลำดับ
- w_{u1} และ w_{u2} คือ เวกเตอร์น้ำหนักของการเปิดปิดวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ตามลำดับ
- t_f คือ เวลาสุดท้ายที่ต้องการควบคุม

วิธีการปรับจูนตัวควบคุมแบบ MPC ทำได้หลายวิธีด้วยกัน [33] เช่น

- การปรับค่าขอบเขตเวลา (Horizon) ได้แก่ ค่าขอบเขตเวลาในการทำนาย (Prediction horizon) และขอบเขตเวลาในการควบคุม (Control horizon)
- การปรับเปลี่ยนค่าเวกเตอร์น้ำหนัก (Weighting matrices) ได้แก่ เวกเตอร์น้ำหนักของตัวแปรปรับ และเวกเตอร์น้ำหนักของตัวแปรควบคุม

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการปรับจูนตัวควบคุมแบบ MPC ด้วยการปรับเปลี่ยนค่าเวกเตอร์น้ำหนักในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีการทดลองแบ่งออกเป็นหลายกรณี ดังนั้นการปรับเปลี่ยนค่าเวกเตอร์น้ำหนักจึงเป็นวิธีที่สะดวกต่อการใช้งาน เนื่องจากเป็นการปรับค่าถ่วงน้ำหนักที่ผลต่างของค่าตัวแปรควบคุมและค่าเป้าหมาย นอกจากนี้การปรับค่าขอบเขตเวลาหากมีการปรับค่าขอบเขตเวลามากขึ้นก็จะมีผลทำให้เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (Computation time) มากขึ้นอีกด้วย ซึ่งจะส่งผลต่อเสถียรภาพของการควบคุม

5.8.1 การหาเวกเตอร์น้ำหนักในฟังก์ชันวัตถุประสงค์

เมื่อพิจารณาเวกเตอร์น้ำหนักในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในสมการที่ (5.34) ค่า w_{y1} และ w_{y2} จะตั้งไว้สูงกว่า w_{u1} และ w_{u2} เนื่องจากกรณีที่ศึกษาคือการควบคุมระดับน้ำในถัง จึงให้ความสำคัญของค่าผลต่างกำลังสองที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเป้าหมาย $h_i(t)$ และ $h_j(t)$ มาก ส่วน w_{u1} และ w_{u2} จะมีผลต่อตัวแปรปรับโดยหากมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้การเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับลดลง แต่หากมีค่าน้อย จะทำให้การทำงานของวาล์วควบคุมเกิดการปรับเปิดปิดอย่างรุนแรงส่งผลต่อสมรรถนะในการควบคุมระบบ ดังนั้นการเลือกเวกเตอร์น้ำหนักนั้นต้องพิจารณาถึงการตอบสนองของกระบวนการที่ต้องการควบคุม ซึ่งเวกเตอร์น้ำหนักของตัวแปรควบคุมและตัวแปรปรับแต่ละตัวสามารถกำหนดให้มีค่าไม่เท่ากันได้ ขึ้นกับความสำคัญของตัวแปรที่ต้องการพิจารณาดังกล่าวไปข้างต้น

ในที่นี้ได้หาเวกเตอร์น้ำหนักของการควบคุมกระบวนการสี่ถึงในกรณีที่สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางฮิลริสติก (Heuristic) คือทำการทดลองโดยเปลี่ยนเวกเตอร์น้ำหนักของตัวแปรปรับและตัวแปรควบคุมไปเรื่อยๆจนได้ค่าที่สมรรถนะในการควบคุมดีที่สุด ในขั้นแรกได้เลือกเวกเตอร์น้ำหนักค่าหนึ่ง แล้วนำไปควบคุมด้วยการจำลองการควบคุมด้วยโปรแกรม MATLAB ก่อน จากนั้นจึงนำมาทำการทดลองซึ่งจะให้ผลการควบคุมที่ค่อนข้างดี โดยกำหนดเวกเตอร์น้ำหนักของตัวแปรปรับ w_{u1} และ w_{u2} ไว้คงที่ทั้งสองตัวเพื่อให้ตัวแปรปรับไม่รุนแรง ในการทดลอง จะทำการควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมแบบ NMPC ก่อนและจากนั้นจึงควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมแบบ MPC ซึ่งพบว่า การควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ MPC มีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรปรับที่รุนแรงกว่าการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ NMPC จึงเลือกใช้ค่าเวกเตอร์น้ำหนักคนละชุดกัน เพื่อให้ได้สมรรถนะในการควบคุมที่ดีที่สุดของตัวควบคุมทั้งสองแบบโดยกำหนดไว้ว่า ตัวแปรปรับ ซึ่งก็คือการเปิดปิดของวาล์วควบคุมนั้นจะต้องไม่รุนแรงจนเกินไป โดยให้มีความแตกต่างของการเปิดปิดวาล์วจากค่าก่อนหน้าได้ไม่เกิน 20% ทำให้ค่าเวกเตอร์น้ำหนักที่เลือกนั้นนอกจากจะต้องคำนึงถึงการเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ดีแล้วยังต้องไม่ให้ค่าตัวแปรปรับของตัวควบคุมเปลี่ยนแปลงรุนแรงเกินไปอีกด้วย

5.8.2 ค่าขอบเขตเวลาในการทำนาย และค่าขอบเขตเวลาในการควบคุม

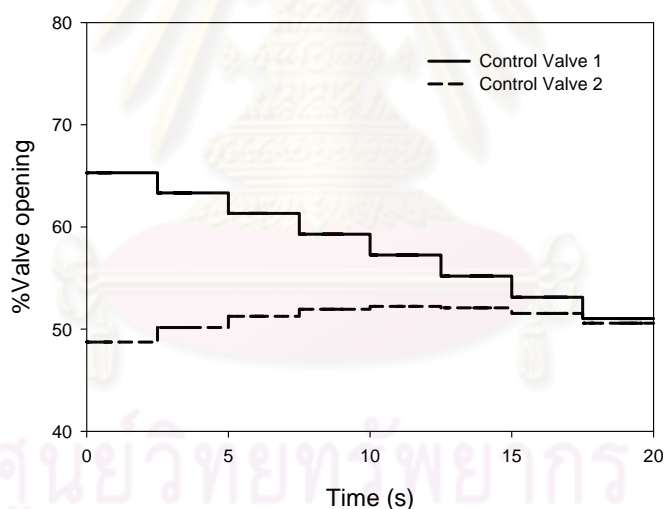
ค่าขอบเขตเวลาในการทำนาย (Prediction horizon) มีหลักการคือ เลือกค่าขอบเขตเวลาในการทำนายให้มากกว่าเวลาของโพลระบบเปิด (open loop pole) ของระบบที่ทำการควบคุมเพื่อเป็นการรับประกันเสถียรภาพของกระบวนการ แต่อย่างไรก็ตามสามารถเลือกค่าขอบเขตเวลาในการทำนายน้อยกว่านั้นได้โดยจะต้องทดสอบว่าตัวแปรควบคุมสามารถเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ภายในเวลาที่กำหนด

ค่าขอบเขตเวลาในการควบคุม (Control horizon) ที่เหมาะสมโดยทั่วไปจะกำหนดค่าขอบเขตเวลาในการควบคุมไว้ไม่น้อยกว่าค่าขอบเขตเวลาในการทำนาย คือจะมีจำนวนตัวแปรปรับน้อยกว่าจำนวนตัวแปรควบคุมเพื่อลดเวลาในการอบติไมซ์ แต่เนื่องจากข้อจำกัดในการใช้งานชุดคำสั่งของ NMPC ทำให้เราจะทำการศึกษาในกรณีที่ค่าขอบเขตเวลาในการทำนาย (prediction horizon) และ ค่าขอบเขตเวลาในการควบคุม (control horizon) มีค่าเท่ากันเท่านั้น โดยในกรณีของตัวควบคุมแบบ NMPC จะเพิ่มหรือลดขอบเขตเวลาในการทำนาย และค่าขอบเขตเวลาในการควบคุมไปเท่าๆกัน

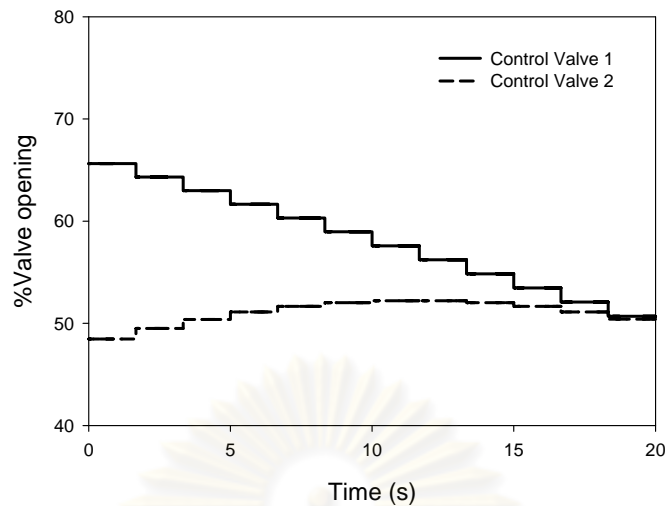
ค่าขอบเขตเวลาในการทำนาย และค่าขอบเขตเวลาในการควบคุมที่เหมาะสมจะต้องให้สมรรถนะการควบคุมที่ดีคือมีค่าเบี่ยงเบนจากค่าเป้าหมายน้อย และใช้เวลาคำนวณน้อย ในการทดลองนี้ได้เลือกใช้ค่าขอบเขตเวลาในการทำนาย และขอบเขตเวลาในการควบคุมที่เวลา 20 วินาที

5.8.3 การแบ่งช่วงเวลา (interval time) ในการออปติไมซ์สำหรับการควบคุมแบบ NMPC

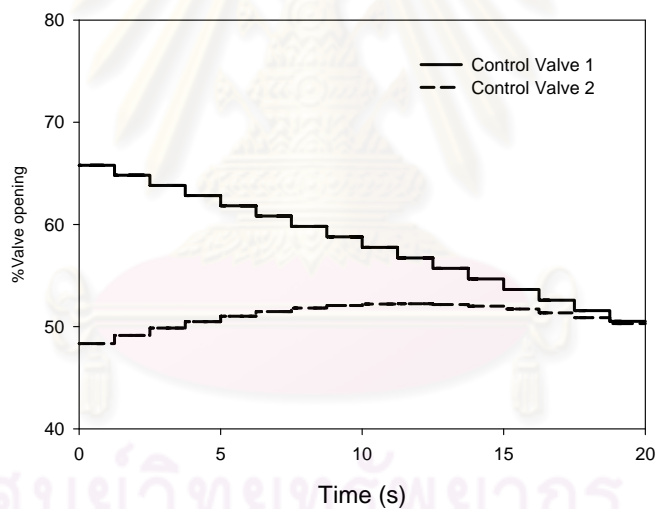
สำหรับการควบคุมแบบ NMPC เราสามารถปรับแต่งการแบ่งช่วงเวลา (interval time) ในการออปติไมซ์ได้อีกด้วย โดยการเพิ่มช่วงเวลาในการออปติไมซ์จะทำให้โปรไฟล์ของการควบคุมราบเรียบขึ้นในแต่ละรอบการออปติไมซ์ดังแสดงในภาพที่ 18 ถึงภาพที่ 20 ซึ่งเป็นการปรับวาล์วควบคุมในรอบการออปติไมซ์หนึ่งหลังจากใส่ตัวรบกวนระบบเข้าไปในกรณีการควบคุมถึงที่ 2 และ 4 ที่เวลาขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุมที่เวลา 20 วินาที ที่ช่วงเวลาในการออปติไมซ์ 8 ช่วง, 12 ช่วง และ 16 ช่วงตามลำดับ



ภาพที่ 5.18 ลักษณะของการปรับวาล์วควบคุมในหนึ่งรอบการออปติไมซ์ ที่ช่วงเวลาในการออปติไมซ์ 8 ช่วง



ภาพที่ 5.19 ลักษณะของการปรับวาล์วควบคุมในหนึ่งรอบการออปติไมซ์
ที่ช่วงเวลาในการออปติไมซ์ 12 ช่วง



ภาพที่ 5.20 ลักษณะของการปรับวาล์วควบคุมในหนึ่งรอบการออปติไมซ์
ที่ช่วงเวลาในการออปติไมซ์ 16 ช่วง

การใช้ช่วงเวลาในการออปติไมซ์มากจะใช้เวลาในการคำนวณในแต่ละรอบการควบคุม (Computation time) นานขึ้นไปด้วย ซึ่งจะนำมาพิจารณาในการทดลองนี้ว่ามีผลต่อสมรรถนะในการควบคุมหรือไม่ และจากการทดลองเบื้องต้นพบว่าเวลาที่ตัวควบคุมแบบ NMPC ใช้ในการคำนวณหนึ่งรอบมีค่าประมาณไม่เกิน 10 วินาที สำหรับช่วงเวลาในการออปติไมซ์ 8 ช่วง ถึง 16 ช่วง จึงได้เลือกใช้เวลาในการสุ่มตัวอย่าง (Sampling time) อยู่ที่ 10 วินาทีสำหรับการทดลองระบบนี้

บทที่ 6

ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

6.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมระดับน้ำของถังในกรณีต่างๆ

การควบคุมระดับน้ำในถังกรณีต่างๆ มีการเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอดี ตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบเชิงเส้น และตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยการปรับแต่งค่าให้ได้สมรรถนะการควบคุมที่ดีที่สุดของการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบต่างๆแล้ว สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6.1 ถึงตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมระดับน้ำของถังที่ 1 และถังที่ 2 ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 10 วินาที

ตัวควบคุม	ถังที่ 1	ถังที่ 2
PID	$K_c = 1.3, \tau_I = 26.7$	$K_c = -1.35, \tau_I = 17.9$
MPC	$w_{y1} = 75, w_{u1} = 25$	$w_{y2} = 85, w_{u2} = 25$
NMPC	$w_{y1} = 300, w_{u1} = 5$	$w_{y2} = 400, w_{u2} = 5$

ตารางที่ 6.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมระดับน้ำของถังที่ 3 และถังที่ 4 ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 6 วินาที

ตัวควบคุม	ถังที่ 3	ถังที่ 4
PID	$K_c = 1.7, \tau_I = 40$	$K_c = -1.35, \tau_I = 17$
MPC	$w_{y1} = 49, w_{u1} = 25$	$w_{y2} = 35, w_{u2} = 25$

ตารางที่ 6.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมระดับน้ำของถังที่ 3 และถังที่ 4 ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 8 วินาที

ตัวควบคุม	ถังที่ 3	ถังที่ 4
PID	$K_c = 1.65, \tau_I = 41$	$K_c = -1.3, \tau_I = 18$
MPC	$w_{y1} = 57, w_{u1} = 25$	$w_{y2} = 45, w_{u2} = 25$

ตารางที่ 6.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมระดับน้ำของถังที่ 3 และถังที่ 4 ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 10 วินาที

ตัวควบคุม	ถังที่ 3	ถังที่ 4
PID	$K_c = 1.6, \tau_I = 42$	$K_c = -1.25, \tau_I = 19$
MPC	$w_{y1} = 65, w_{u1} = 25$	$w_{y2} = 55, w_{u2} = 25$
NMPC	$w_{y1} = 200, w_{u1} = 5$	$w_{y2} = 150, w_{u2} = 5$

ตารางที่ 6.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมระดับน้ำของถังที่ 2 และถังที่ 4 ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 6 วินาที

ตัวควบคุม	ถังที่ 2	ถังที่ 4
PID	$K_c = 1.6, \tau_I = 78$	$K_c = 1.7, \tau_I = 83$
MPC	$w_{y1} = 55, w_{u1} = 25$	$w_{y2} = 60, w_{u2} = 25$

ตารางที่ 6.6 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมระดับน้ำของถังที่ 2 และถังที่ 4 ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 8 วินาที

ตัวควบคุม	ถังที่ 2	ถังที่ 4
PID	$K_c = 1.55, \tau_I = 79$	$K_c = 1.65, \tau_I = 84$
MPC	$w_{y1} = 60, w_{u1} = 25$	$w_{y2} = 65, w_{u2} = 25$

ตารางที่ 6.7 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมระดับน้ำของถังที่ 2 และถังที่ 4 ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 10 วินาที

ตัวควบคุม	ถังที่ 2	ถังที่ 4
PID	$K_c = 1.5, \tau_I = 80$	$K_c = 1.6, \tau_I = 85$
MPC	$w_{y1} = 65, w_{u1} = 25$	$w_{y2} = 70, w_{u2} = 25$
NMPC	$w_{y1} = 500, w_{u1} = 5$	$w_{y2} = 500, w_{u2} = 5$

โดยมีพารามิเตอร์เพิ่มเติมคือ ในกรณีตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบเชิงเส้น ค่าขอบเขตเวลาในการทำนาย และค่าขอบเขตเวลาในการควบคุมเท่ากับ 20 วินาที ส่วนในกรณีตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เป็นเชิงเส้น เวลาในการสุ่มตัวอย่างเป็น 10 วินาทีเท่านั้น และการเลือกพารามิเตอร์มาใช้นั้นจะต้องคำนึงถึงความแตกต่างของการเปิดปิดวาล์ว ซึ่งกำหนดไว้ว่าจะมีความแตกต่างได้ไม่เกิน 20% จากค่าก่อนหน้า เพื่อป้องกันการเปิดปิดวาล์วอย่างรุนแรง

6.2 ผลการควบคุมในกรณีต่างๆ

6.2.1 การควบคุมระดับน้ำของถังที่ 1 และถังที่ 2

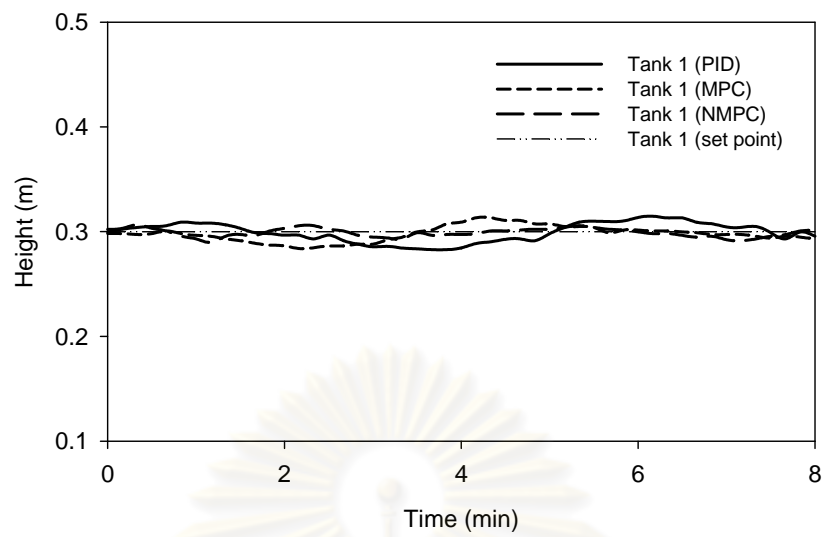
ในกรณีการควบคุมระดับน้ำของถังที่ 1 และถังที่ 2 นี้จะทดลองเฉพาะกรณีใช้เวลาในการสูมตัวอย่างเท่ากับ 10 วินาทีเท่านั้น เนื่องจากการกรณีควบคุมระดับน้ำถังที่ 1 และถังที่ 2 และกรณีการควบคุมระดับน้ำของถังที่ 3 และถังที่ 4 มีลักษณะการควบคุมใกล้เคียงกัน คือ ควบคุมระดับน้ำในถังด้านบนคู่กับถังด้านล่างนั่นเอง การควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เป็นเชิงเส้นจะใช้การควบคุมที่มีการแบ่งช่วงเวลาในการออปติไมซ์ (Interval time) ออกเป็น 16 ช่วง

ในการควบคุมระดับน้ำของถังที่ 1 และถังที่ 2 นี้จะทำการเติมน้ำลงในถังที่ 2 ให้สูงเพิ่มจากเดิม 10 เซนติเมตร แบบอิมพัลส์ที่วินาทีที่ 30 แล้วทำการควบคุมระดับน้ำให้กลับมาสู่ค่าเป้าหมายที่สภาวะคงตัวเดิมคือระดับน้ำ 30 เซนติเมตร สำหรับถังที่ 1 และระดับน้ำ 27 เซนติเมตรสำหรับถังที่ 2

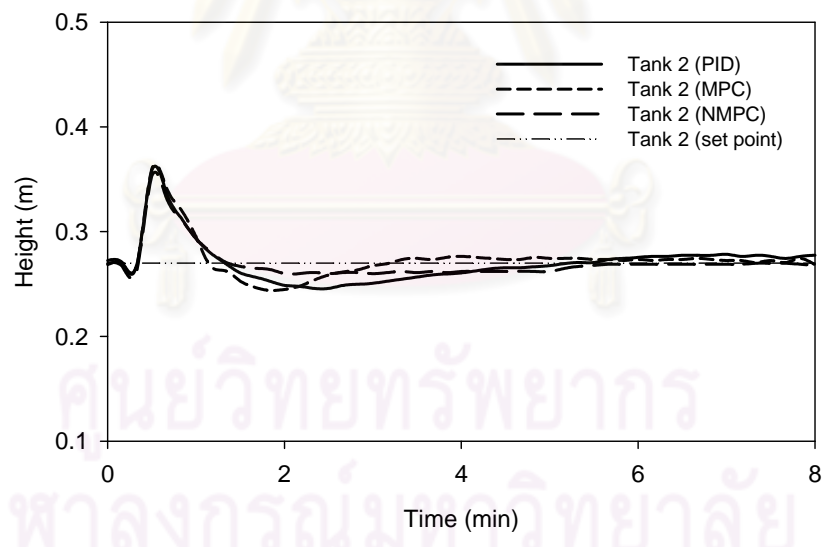
เมื่อเติมน้ำลงในถังที่ 2 วาล์วควบคุมตัวที่ 1 จะถูกเปิดมากขึ้นเพื่อให้น้ำไหลเข้าสู่ถังที่ 2 น้อยลงจนเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการ ส่งผลให้ระดับน้ำในถังที่ 3 สูงขึ้น ส่วนการควบคุมระดับน้ำถังที่ 1 จะมีการปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 2 เพื่อให้ระดับน้ำในถังคงที่จากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำผ่านปั๊มตัวที่ 2 ที่อาจไม่คงที่ได้ นอกจากนี้ น้ำที่ไหลออกจากถังที่ 1 ผ่านวาล์วตัวที่ 1 นั้นยังส่งผลต่อระดับน้ำในถังที่ 2 อีกด้วย

6.2.1.1 การเปรียบเทียบการควบคุมแบบต่างๆ ที่เวลาในการสูมตัวอย่างเท่ากับ 10 วินาที

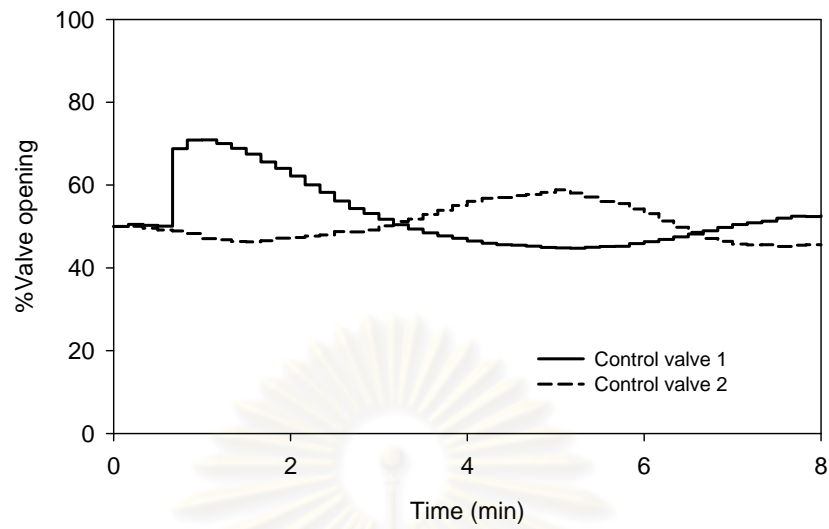
ผลการควบคุมระดับน้ำด้วยตัวควบคุมแบบ PID, MPC และ NMPC ที่เวลาในการสูมตัวอย่างเท่ากับ 10 วินาที ($S = 10$) แสดงในภาพที่ 6.1 และ 6.2 ผลการตอบสนองของวาล์วควบคุมของตัวควบคุมแบบต่างๆ แสดงในภาพที่ 6.3 ถึง 6.5 ซึ่งจะพบว่า การควบคุมแบบ NMPC จะให้ผลการควบคุมที่ดีเมื่อเทียบกับการใช้ตัวควบคุมแบบ PID และ MPC รวมถึงมีการปรับค่าตัวแปรปรับที่ไม่รุนแรงเท่าตัวควบคุมแบบ PID และ MPC อีกด้วย จากภาพที่ 6.2 พบว่าระดับน้ำในถังที่ 2 จะเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ประมาณ 80 วินาที และเข้าสู่สภาวะคงตัวภายใน 5 นาที โดยการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ NMPC จะทำให้ระดับน้ำเข้าสู่สภาวะคงตัวเร็วที่สุด



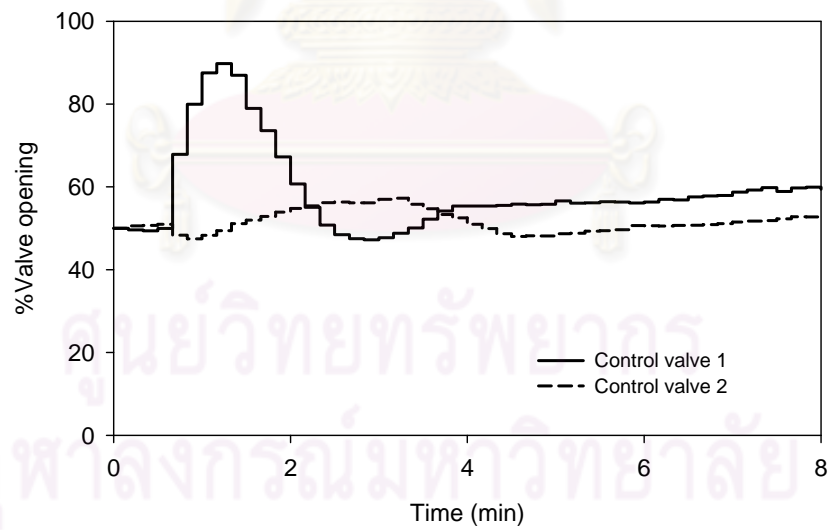
ภาพที่ 6.1 ระดับน้ำถังที่ 1 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 1 และถังที่ 2 ของตัวควบคุมแบบ PID, MPC และ NMPC ที่ $S = 10$



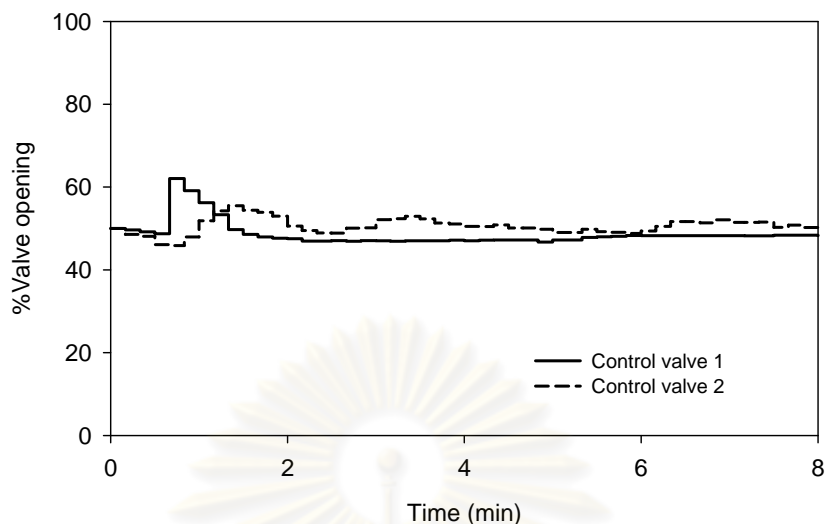
ภาพที่ 6.2 ระดับน้ำถังที่ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 1 และถังที่ 2 ของตัวควบคุมแบบ PID, MPC และ NMPC ที่ $S = 10$



ภาพที่ 6.3 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 1 และถังที่ 2 ของตัวควบคุมแบบ PID ที่ $S = 10$



ภาพที่ 6.4 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 1 และถังที่ 2 ของตัวควบคุมแบบ MPC ที่ $S = 10$



ภาพที่ 6.5 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 1 และถึงที่ 2 ของตัวควบคุมแบบ NMPC ที่ $S = 10$

6.2.2 การควบคุมระดับน้ำของถังที่ 3 และถังที่ 4

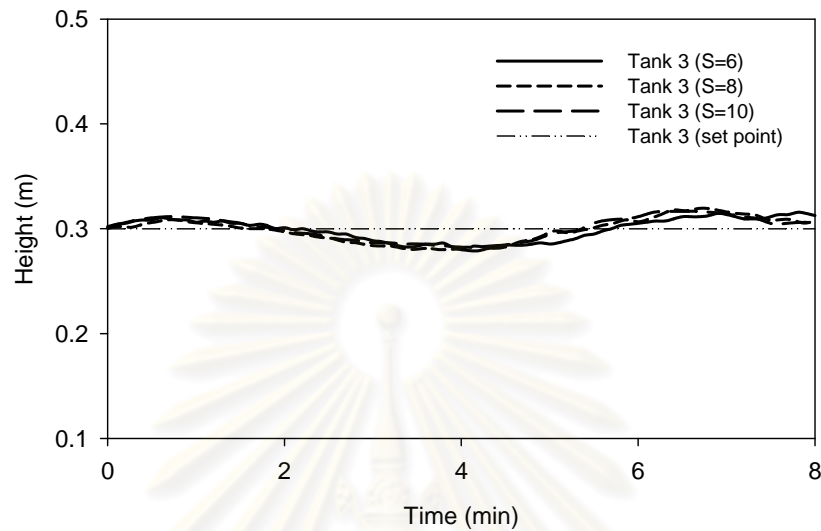
ในการควบคุมระดับน้ำของถังที่ 3 และถังที่ 4 นี้จะทำการเติมน้ำลงในถังที่ 4 ให้สูงจากเดิม 10 เซนติเมตร แบบอิมพัลส์ที่วินาทีที่ 30 แล้วทำการควบคุมระดับน้ำให้กลับมาสู่ค่าเป้าหมายที่สภาวะคงตัวเดิมคือระดับน้ำ 30 เซนติเมตร สำหรับถังที่ 3 และระดับน้ำ 29 เซนติเมตร สำหรับถังที่ 4

เมื่อเติมน้ำลงในถังที่ 4 วาล์วควบคุมตัวที่ 2 จะถูกเปิดมากขึ้นเพื่อให้น้ำไหลเข้าสู่ถังที่ 4 น้อยลงจนเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการ ส่งผลให้ระดับน้ำในถังที่ 1 สูงขึ้น ส่วนการควบคุมระดับน้ำถังที่ 3 จะมีการปรับวาล์วควบคุมตัวที่ 1 เพื่อให้ระดับน้ำในถังคงที่จากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำผ่านปั๊มตัวที่ 1 ที่อาจไม่คงที่ได้ นอกจากนี้ น้ำที่ไหลออกจากถังที่ 3 ผ่านวาล์วตัวที่ 3 นั้นยังส่งผลต่อระดับน้ำในถังที่ 4 อีกด้วย การเปรียบเทียบการควบคุมในกรณีต่างๆแสดงได้ดังต่อไปนี้

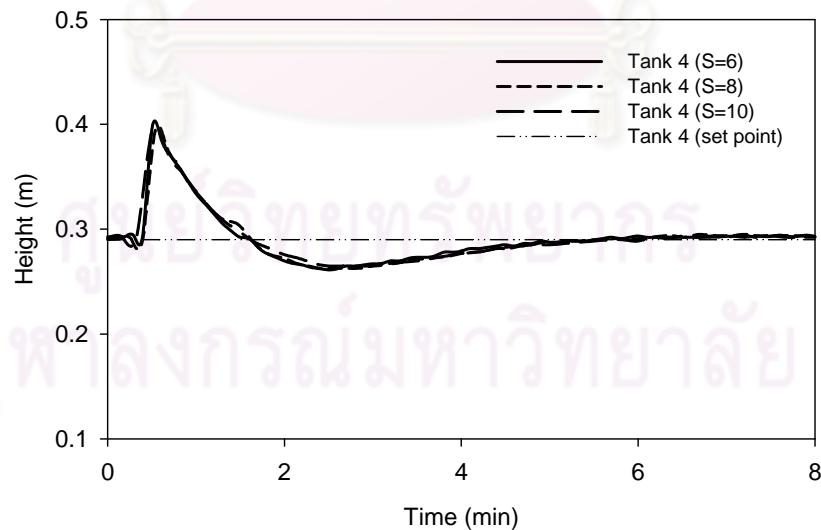
6.2.2.1 การเปรียบเทียบการควบคุมที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 6 วินาที, 8 วินาที และ 10 วินาที ของตัวควบคุมแบบ PID

ผลการควบคุมระดับน้ำด้วยตัวควบคุมแบบ PID ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 6 วินาที ($S = 6$), 8 วินาที ($S = 8$) และ 10 วินาที ($S = 10$) แสดงในภาพที่ 6.6 และ 6.7 ผลการ

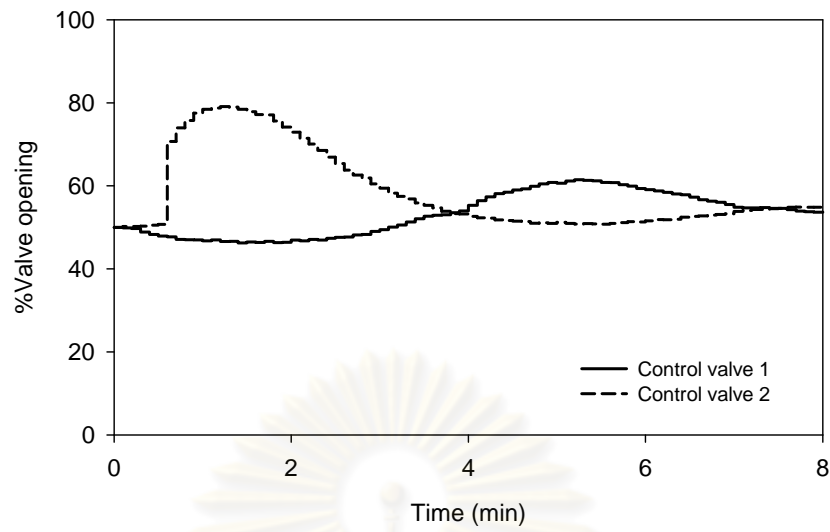
ตอบสนองของวาล์วควบคุมของตัวควบคุมที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างที่เวลาต่างๆแสดงในภาพที่ 6.8 ถึง 6.10 จากภาพที่ 6.7 พบว่าระดับน้ำในถังที่ 4 จะเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ประมาณ 96 วินาที และเข้าสู่สภาวะคงตัวภายใน 5 นาที



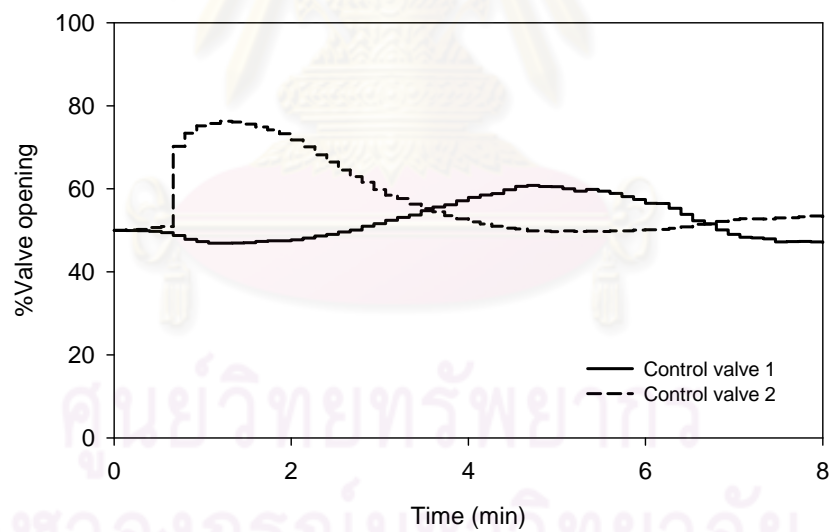
ภาพที่ 6.6 ระดับน้ำถังที่ 3 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 3 และถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ PID ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างต่างๆ



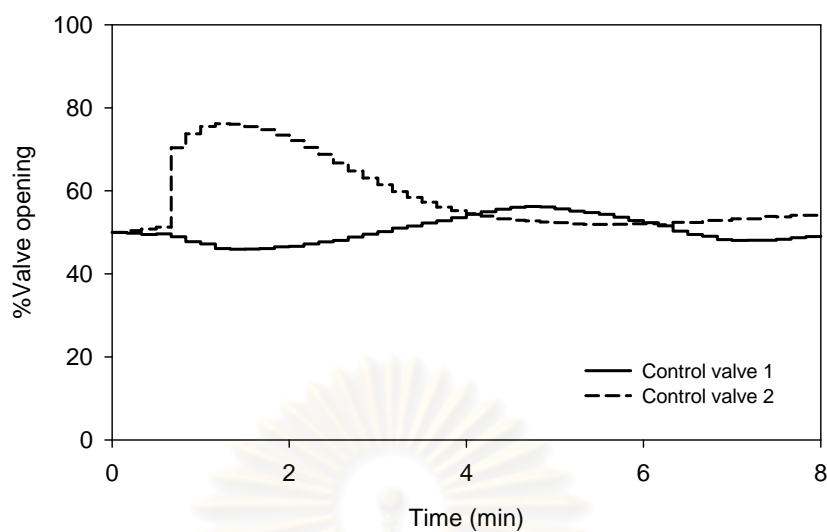
ภาพที่ 6.7 ระดับน้ำถังที่ 4 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 3 และถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ PID ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างต่างๆ



ภาพที่ 6.8 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 3 และถึงที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ PID ที่ $S = 6$



ภาพที่ 6.9 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 3 และถึงที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ PID ที่ $S = 8$

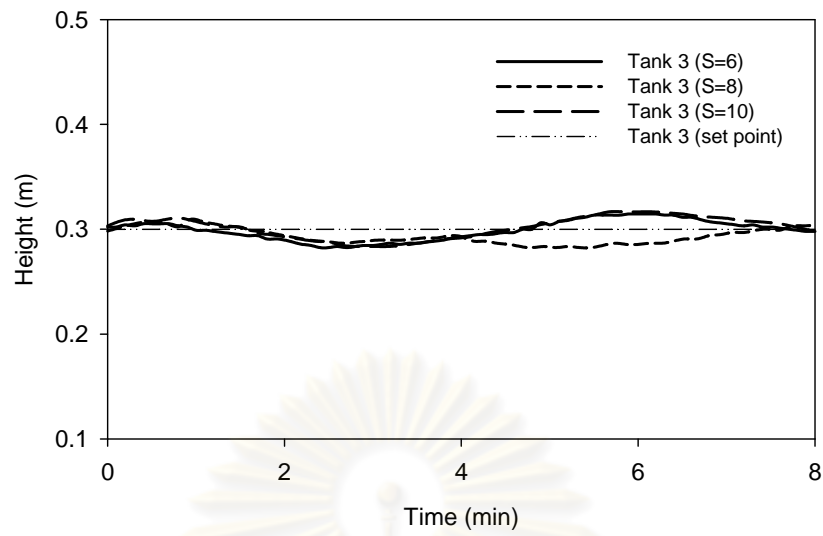


ภาพที่ 6.10 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 3 และถึงที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ PID ที่ $S = 10$

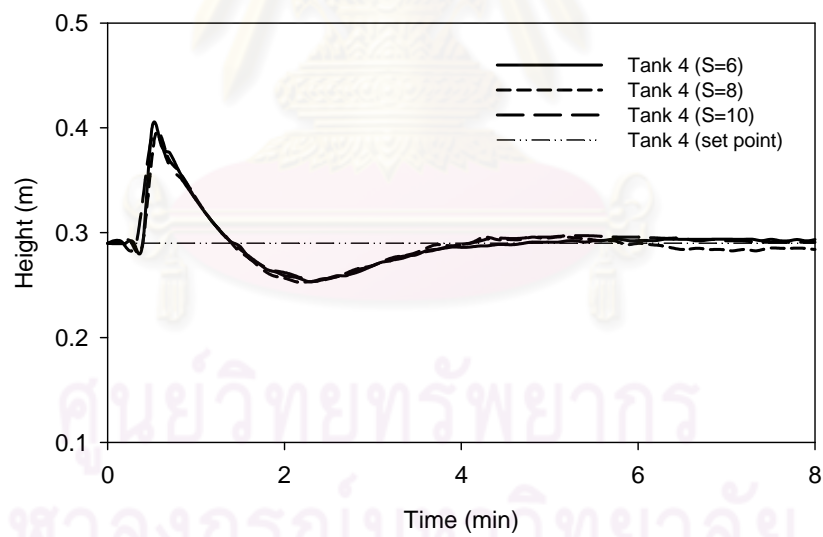
6.2.2.2 การเปรียบเทียบการควบคุมที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 6 วินาที, 8 วินาที และ 10 วินาที ของตัวควบคุมแบบ MPC

ผลการควบคุมระดับน้ำด้วยตัวควบคุมแบบ MPC ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 6 วินาที ($S = 6$), 8 วินาที ($S = 8$) และ 10 วินาที ($S = 10$) แสดงในภาพที่ 6.11 และ 6.12 ผลการตอบสนองของวาล์วควบคุมของตัวควบคุมที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างที่เวลาต่างๆแสดงในภาพที่ 6.13 ถึง 6.15 จากภาพที่ 6.12 พบว่าระดับน้ำในถังที่ 4 จะเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ประมาณ 90 วินาที และเข้าสู่สภาวะคงตัวภายใน 4 นาที

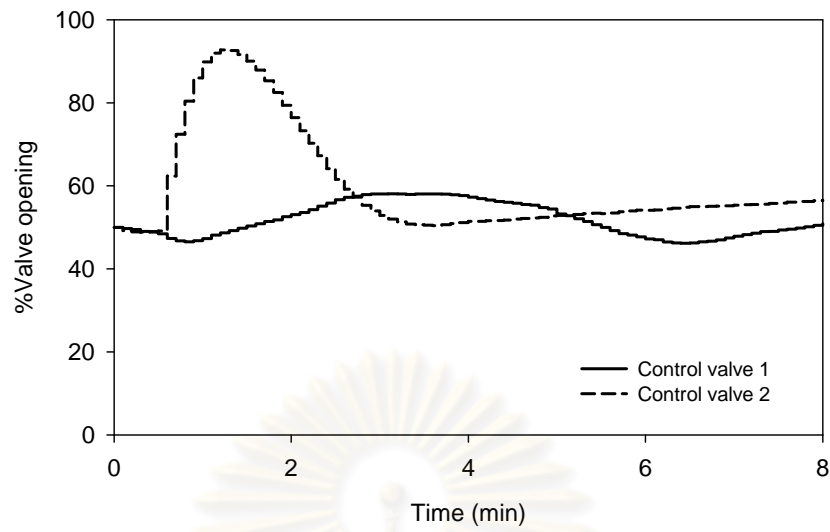
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



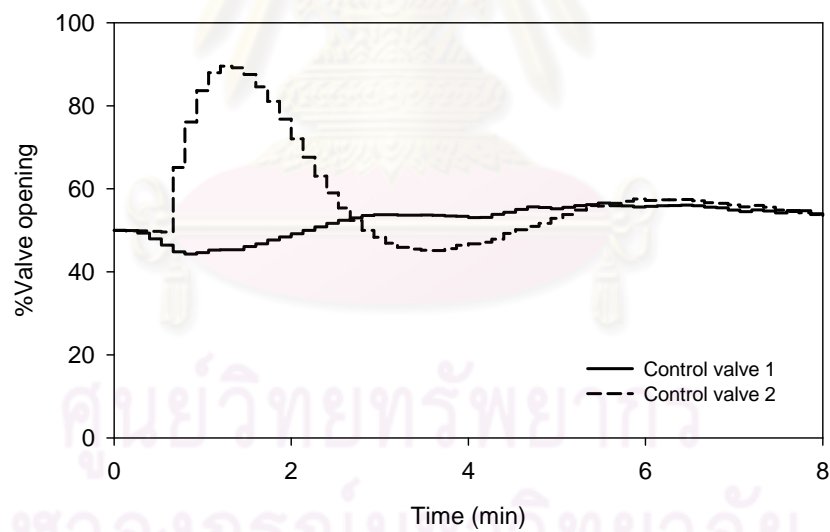
ภาพที่ 6.11 ระดับน้ำถังที่ 3 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 3 และถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ MPC ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างต่างๆ



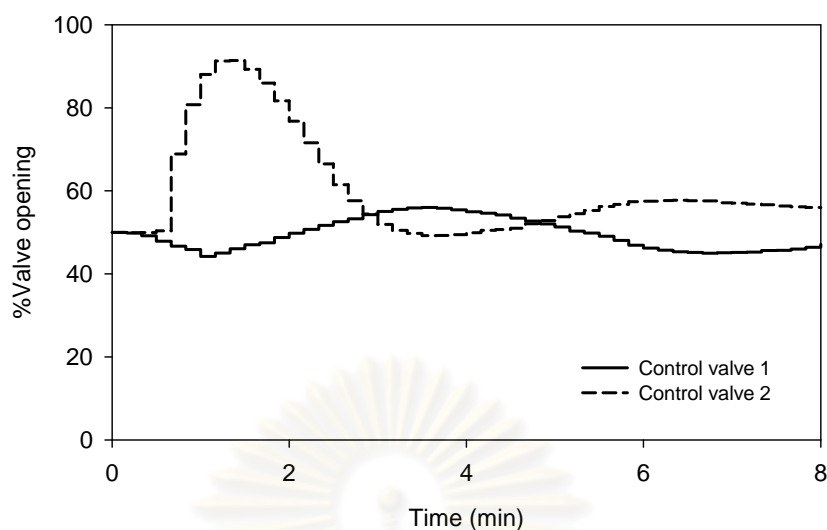
ภาพที่ 6.12 ระดับน้ำถังที่ 4 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 3 และถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ MPC ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างต่างๆ



ภาพที่ 6.13 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 3 และถึงที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ MPC ที่ $S = 6$



ภาพที่ 6.14 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 3 และถึงที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ MPC ที่ $S = 8$

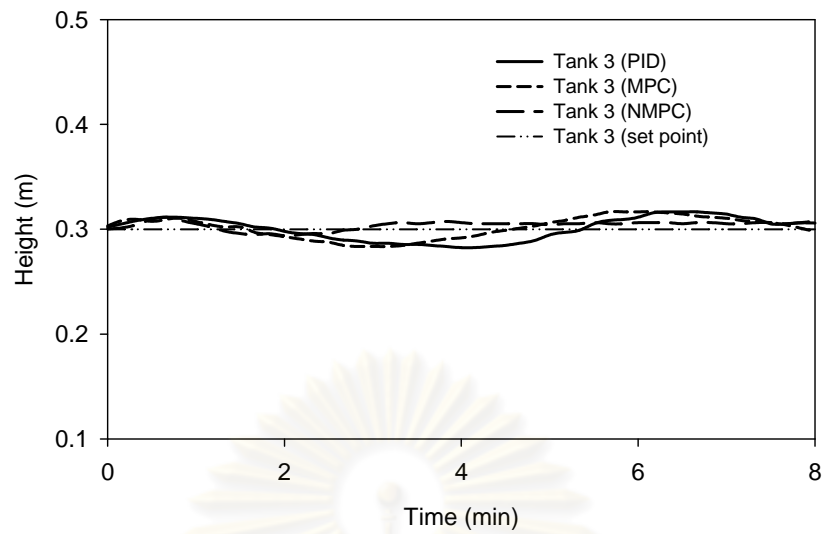


ภาพที่ 6.15 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 3 และถึงที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ MPC ที่ $S = 10$

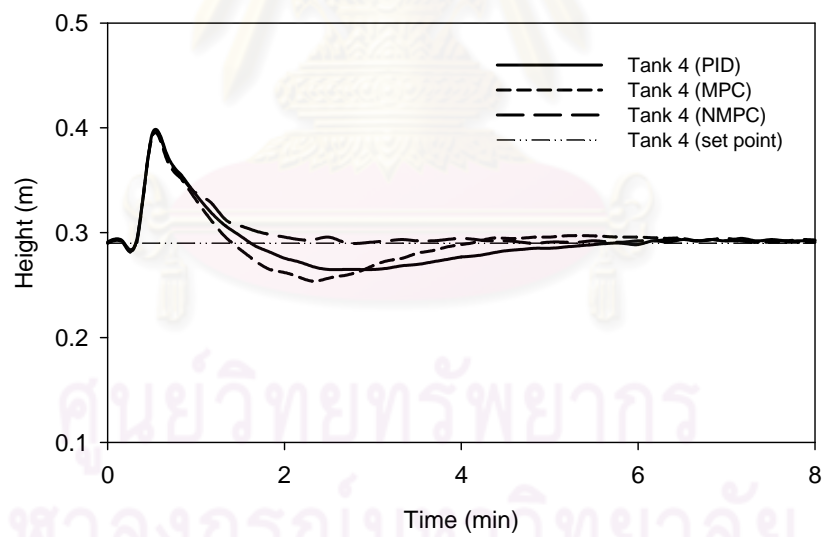
6.2.2.3 การเปรียบเทียบการควบคุมแบบต่างๆ ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างเท่ากับ 10 วินาที

สำหรับการเปรียบเทียบการควบคุมแบบต่างๆนี้ ตัวควบคุมแบบ MPC และ NMPC จะเลือกใช้ค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุมเท่ากันคือ 20 วินาที และตัวควบคุมแบบ NMPC จะใช้การควบคุมที่มีการแบ่งช่วงเวลาในการหอบติไมซ์เป็น 16 ช่วง

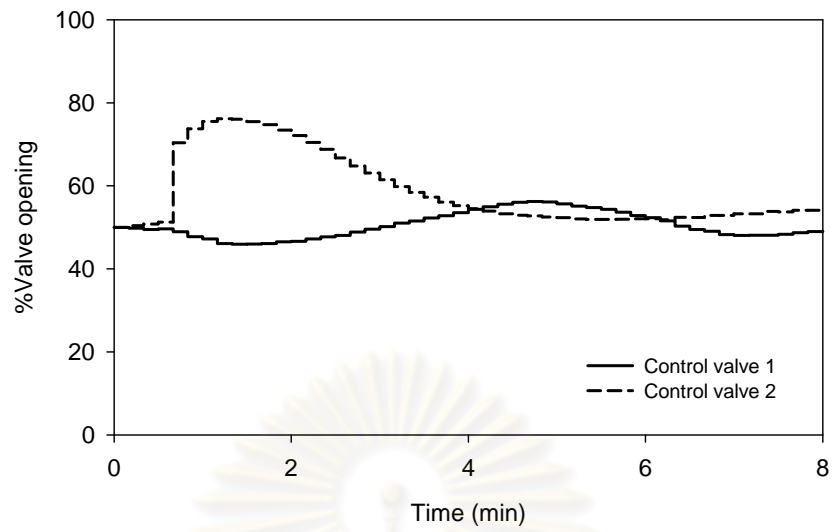
ผลการควบคุมระดับน้ำด้วยตัวควบคุมแบบ PID, MPC และ NMPC ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างเท่ากับ 10 วินาที ($S = 10$) แสดงในภาพที่ 6.16 และ 6.17 ผลการตอบสนองของวาล์วควบคุมของตัวควบคุมแบบต่างๆแสดงในภาพที่ 6.18 ถึง 6.20 ซึ่งจะพบว่าการควบคุมแบบ NMPC จะให้ผลการควบคุมที่ดีเมื่อเทียบกับการใช้ตัวควบคุมแบบ PID และ MPC รวมถึงมีการปรับค่าตัวแปรปรับที่ไม่รุนแรงเท่าตัวควบคุมแบบ PID และ MPC อีกด้วย จากภาพที่ 6.17 พบว่าระดับน้ำในถังที่ 4 จะเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ประมาณ 90 วินาที สำหรับการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ MPC ในการใช้ตัวควบคุมแบบ PID ระดับน้ำจะเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ 96 วินาที ส่วนในการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ NMPC ระดับน้ำจะเข้าสู่ค่าเป้าหมายช้าที่สุดคือที่ประมาณ 2 นาที แต่จะอยู่ในสภาวะคงตัวทันที ในขณะที่การควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PID และ MPC ระดับน้ำเข้าสู่สภาวะคงตัวภายในเวลาประมาณ 5 นาที



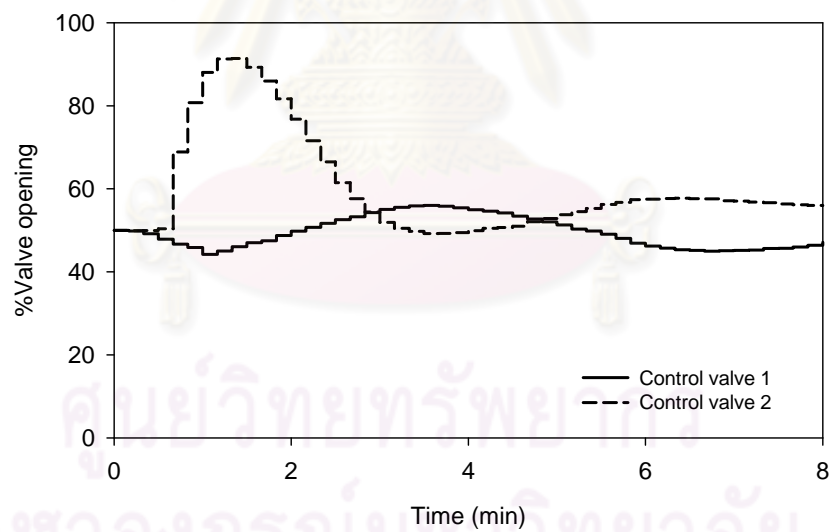
ภาพที่ 6.16 ระดับน้ำถังที่ 3 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 3 และถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ PID, MPC และ NMPC ที่ $S = 10$



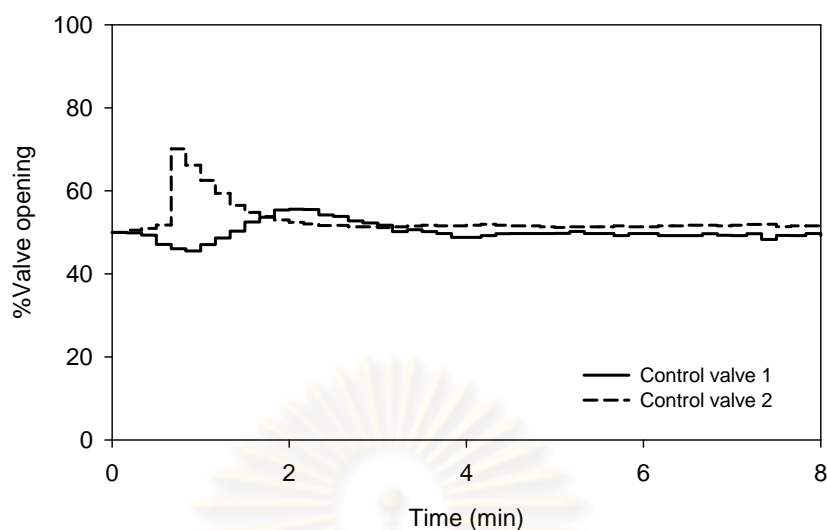
ภาพที่ 6.17 ระดับน้ำถังที่ 4 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 3 และถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ PID, MPC และ NMPC ที่ $S = 10$



ภาพที่ 6.18 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 3 และถึงที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ PID ที่ $S = 10$



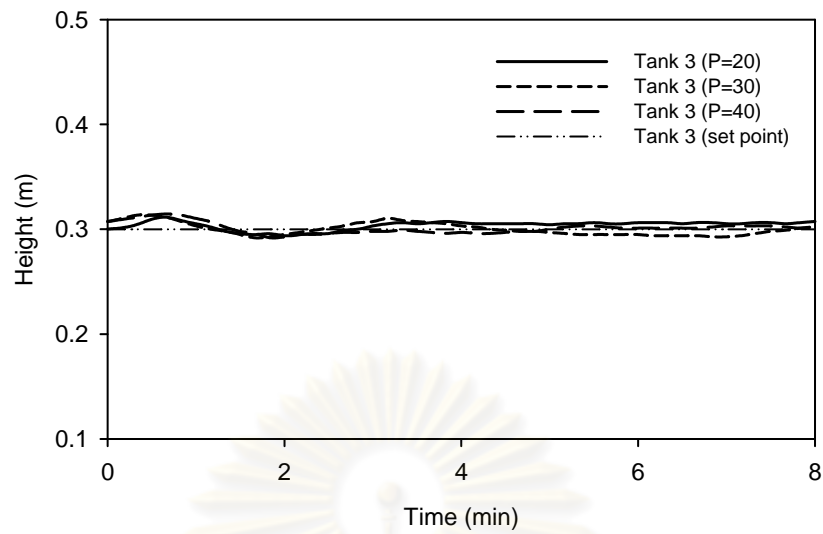
ภาพที่ 6.19 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 3 และถึงที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ MPC ที่ $S = 10$



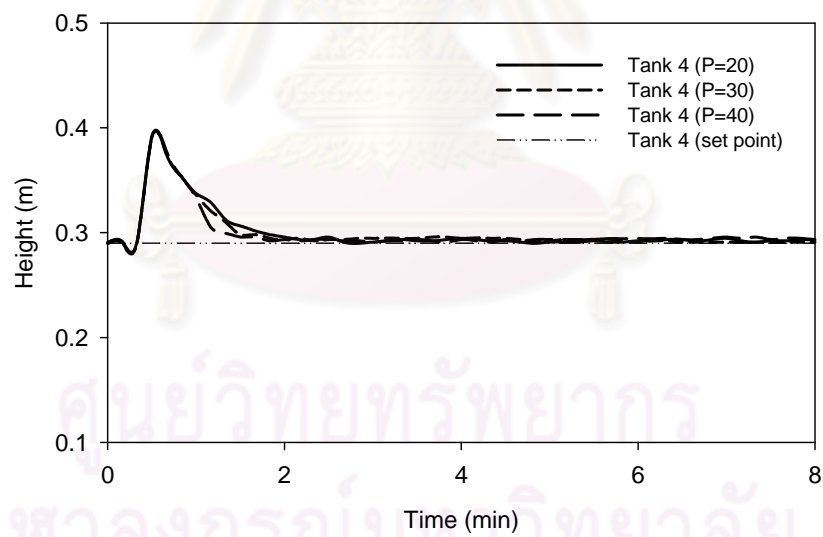
ภาพที่ 6.20 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 3 และถึงที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ NMPC ที่ $S = 10$

6.2.2.4 การเปรียบเทียบการควบคุมที่ค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุมเป็น 20 วินาที, 30 วินาที และ 40 วินาที ของตัวควบคุมแบบ NMPC

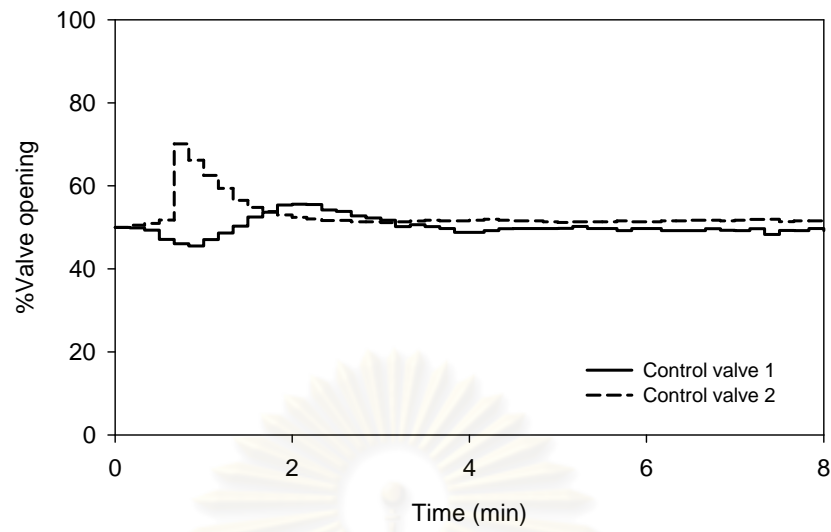
สำหรับการเปรียบเทียบการควบคุมที่ค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุมต่างๆนี้ จะเลือกใช้การควบคุมที่มีการแบ่งช่วงเวลาในการหอบติไม่ซ์เป็น 16 ช่วง ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างเท่ากับ 10 วินาทีมาพิจารณา โดยผลการควบคุมระดับน้ำที่ค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุมเป็น 20 วินาที ($P = 20$), 30 วินาที ($P = 30$) และ 40 วินาที ($P = 40$) แสดงในภาพที่ 6.21 และ 6.22 ผลการตอบสนองของวาล์วควบคุมที่ค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุมต่างๆแสดงในภาพที่ 6.23 ถึง 6.25 จากภาพที่ 6.22 พบว่าระดับน้ำในถังที่ 4 จะเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่เวลา 2 นาที และอยู่ที่สภาวะคงตัวทันที



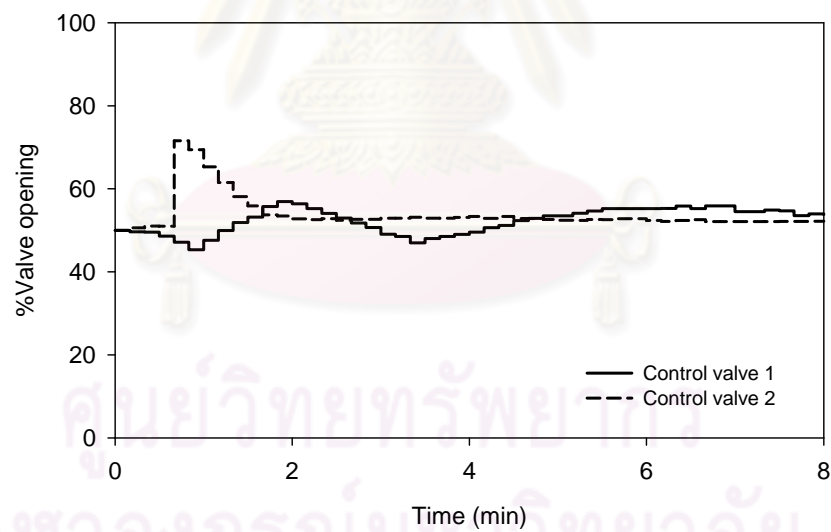
ภาพที่ 6.21 ระดับน้ำถังที่ 3 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 3 และถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ NMPC ที่ค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุมต่างๆ



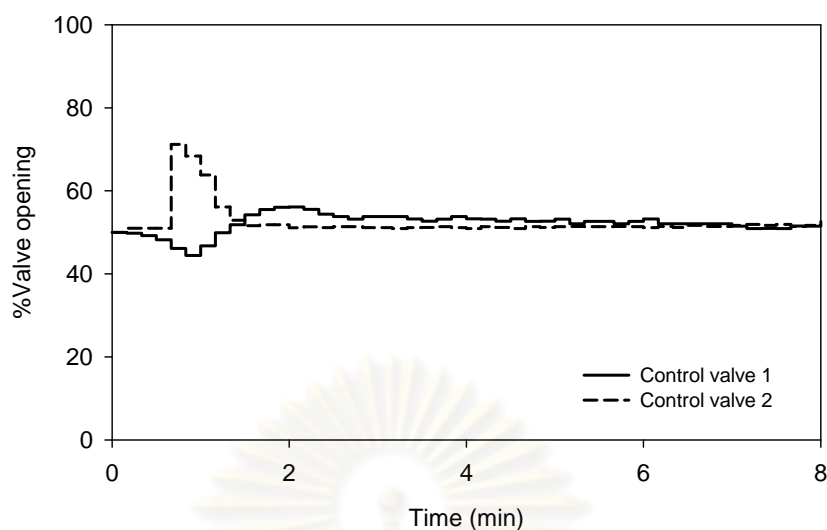
ภาพที่ 6.22 ระดับน้ำถังที่ 4 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 3 และถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ NMPC ที่ค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุมต่างๆ



ภาพที่ 6.23 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 3 และถึงที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ NMPC ที่ $P = 20$



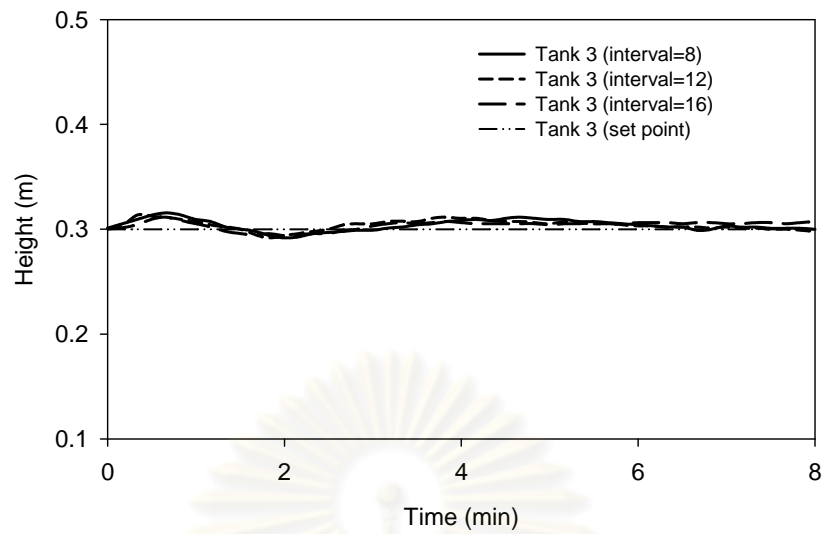
ภาพที่ 6.24 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 3 และถึงที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ NMPC ที่ $P = 30$



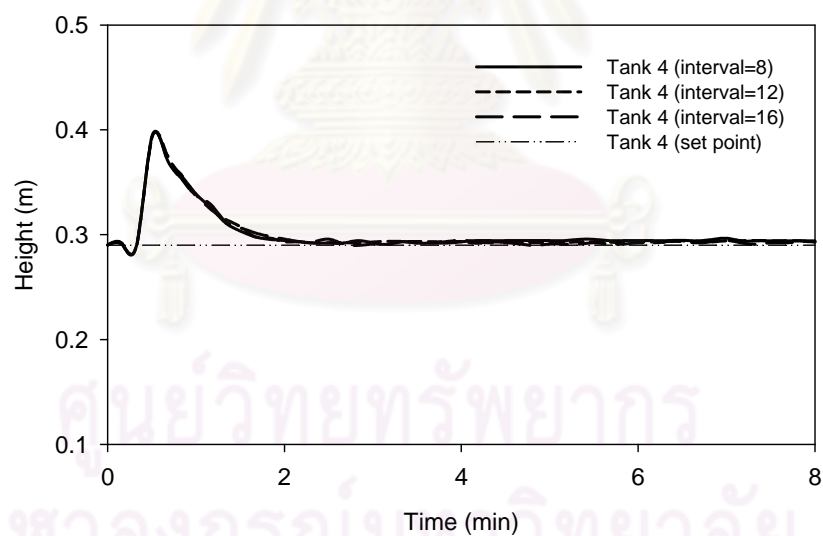
ภาพที่ 6.25 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 3 และถึงที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ NMPC ที่ $P = 40$

6.2.2.5 การเปรียบเทียบการควบคุมที่การแบ่งช่วงเวลาในการออปติไมซ์ 8 ช่วง, 12 ช่วง และ 16 ช่วง ของตัวควบคุมแบบ NMPC

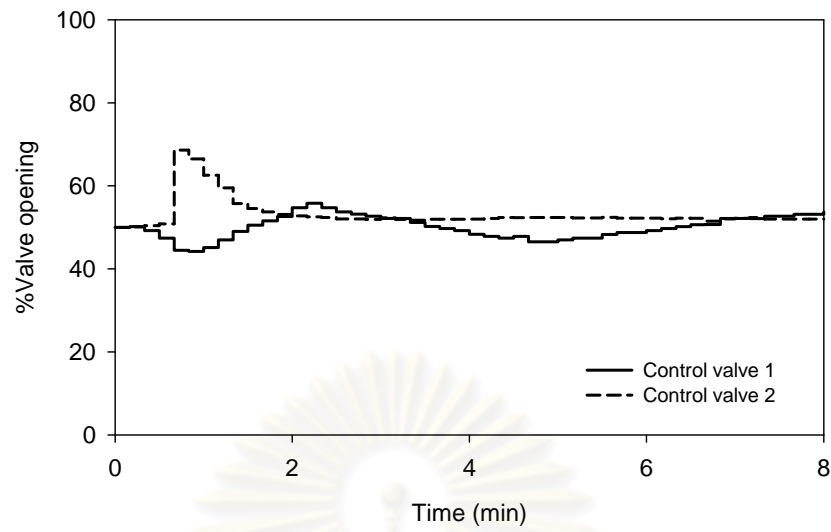
สำหรับการเปรียบเทียบการควบคุมที่การแบ่งช่วงเวลาในการออปติไมซ์ 8 ช่วง (interval = 8), 12 ช่วง (interval = 12) และ 16 ช่วง (interval = 16) จะเลือกใช้การควบคุมที่ค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุมเท่ากับ 20 วินาทีและเวลาในการสุ่มตัวอย่างเท่ากับ 10 วินาที โดยผลการควบคุมระดับน้ำที่ที่การแบ่งช่วงเวลาในการออปติไมซ์ 8 ช่วง, 12 ช่วง และ 16 ช่วง แสดงในภาพที่ 6.26 และ 6.27 ผลการตอบสนองของวาล์วควบคุมที่การแบ่งช่วงเวลาในการออปติไมซ์ต่างๆแสดงในภาพที่ 6.28 ถึง 6.30 จากภาพที่ 6.27 พบว่าระดับน้ำในถังที่ 4 จะเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่เวลา 2 นาที และอยู่ที่สภาวะคงตัวทันที



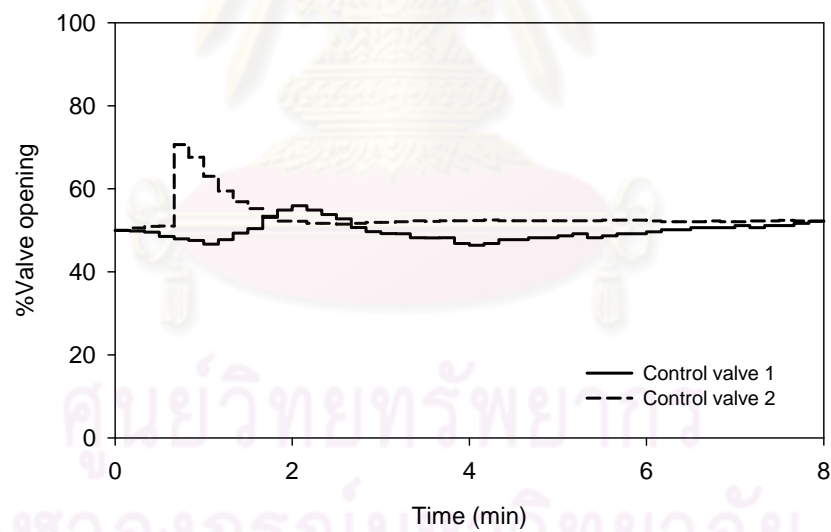
ภาพที่ 6.26 ระดับน้ำถังที่ 3 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 3 และถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ NMPC ที่การแบ่งช่วงเวลาในการอัปเดตไมซ์ซ์ต่างๆ



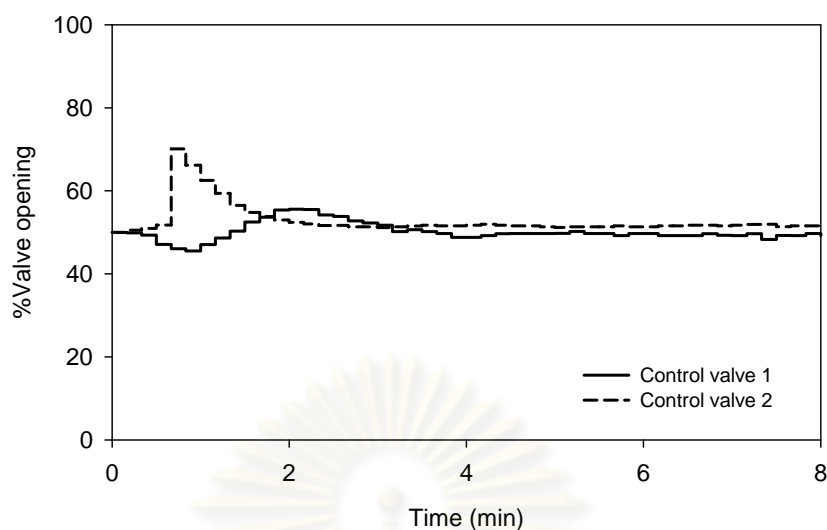
ภาพที่ 6.27 ระดับน้ำถังที่ 4 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 3 และถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ NMPC ที่การแบ่งช่วงเวลาในการอัปเดตไมซ์ซ์ต่างๆ



ภาพที่ 6.28 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 3 และถึงที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ NMPC ที่ interval = 8



ภาพที่ 6.29 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 3 และถึงที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ NMPC ที่ interval = 12



ภาพที่ 6.30 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 3 และถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ NMPC ที่ interval = 16

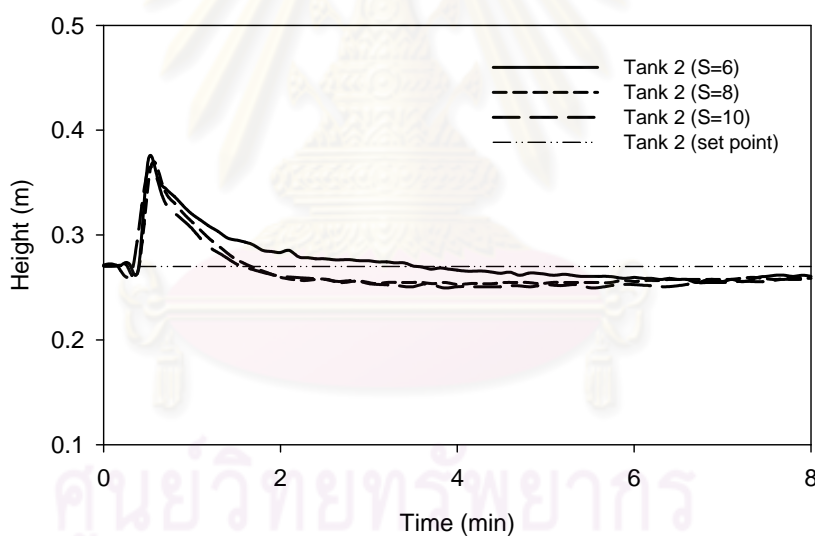
6.2.3 การควบคุมระดับน้ำของถังที่ 2 และถังที่ 4

ในการควบคุมระดับน้ำของถังที่ 2 และถังที่ 4 นี้จะทำการเติมน้ำลงในถังที่ 2 ให้สูงจากเดิม 10 เซนติเมตร แบบอิมพัลส์ที่วินาทีที่ 30 แล้วทำการควบคุมระดับน้ำให้กลับมาสู่ค่าเป้าหมายที่สภาวะคงตัวเดิมคือ ระดับน้ำ 27 เซนติเมตร สำหรับถังที่ 2 และระดับน้ำ 29 เซนติเมตร สำหรับถังที่ 4

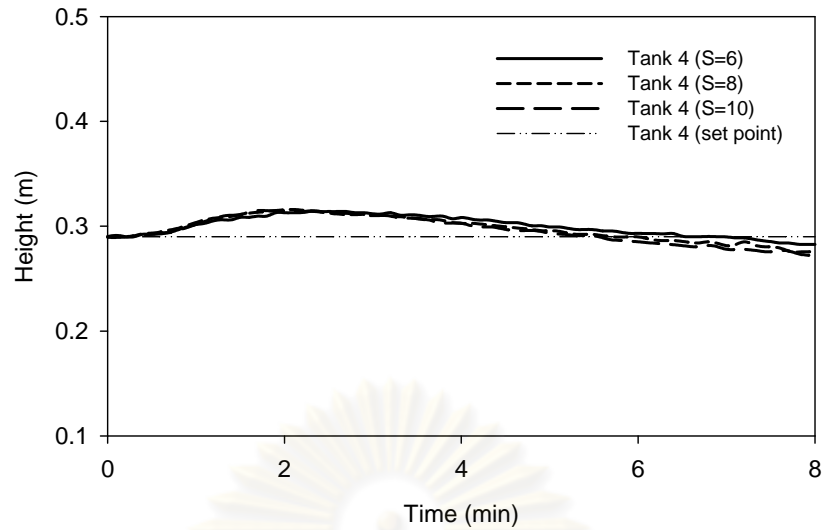
เมื่อเติมน้ำลงในถังที่ 2 วาล์วควบคุมตัวที่ 1 จะถูกเปิดมากขึ้นเพื่อให้น้ำไหลเข้าสู่ถังที่ 2 น้อยลงจนเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการ ส่งผลให้ระดับน้ำในถังที่ 3 สูงขึ้น ระดับน้ำถังที่ 3 ที่สูงขึ้นก็ส่งผลต่อระดับน้ำในถังที่ 4 ที่ต้องการควบคุมด้วยโดยทำให้ระดับน้ำในถังที่ 4 สูงขึ้น วาล์วควบคุมตัวที่ 2 จะถูกเปิดมากขึ้นเพื่อลดระดับน้ำในถังที่ 4 ส่งผลให้ระดับน้ำในถังที่ 1 สูงขึ้นซึ่งจะกระทบไปยังระดับน้ำในถังที่ 2 อีกทอดหนึ่ง ทำให้กรณีการควบคุมนี้ซับซ้อนที่สุดในทุกกรณีที่ทำการทดลอง การเปรียบเทียบการควบคุมในกรณีต่างๆแสดงได้ดังต่อไปนี้

6.2.3.1 การเปรียบเทียบการควบคุมที่เวลาในการสูมตัวอย่าง 6 วินาที, 8 วินาที และ 10 วินาที ของตัวควบคุมแบบ PID

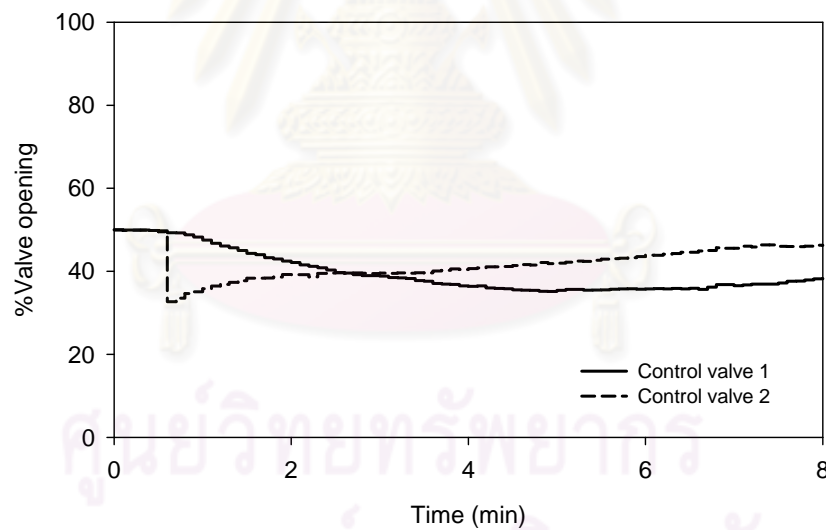
ผลการควบคุมระดับน้ำด้วยตัวควบคุมแบบ PID ที่เวลาในการสูมตัวอย่าง 6 วินาที ($S = 6$), 8 วินาที ($S = 8$) และ 10 วินาที ($S = 10$) แสดงในภาพที่ 6.31 และ 6.32 ผลการตอบสนองของวาล์วควบคุมของตัวควบคุมที่เวลาในการสูมตัวอย่างที่เวลาต่างๆแสดงในภาพที่ 6.33 ถึง 6.35 จากภาพที่ 6.32 พบว่าระดับน้ำในถังที่ 2 จะเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ประมาณ 2 นาที สำหรับเวลาในการสูมตัวอย่าง 8 วินาที และ 10 วินาที ส่วนเวลาในการสูมตัวอย่าง 6 วินาที ระดับน้ำจะเข้าสู่ค่าเป้าหมายช้าที่สุดคือที่ประมาณ 3 นาที แต่จะอยู่ในสภาวะคงตัวทันที ในขณะที่การควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PID และ MPC ระดับน้ำเข้าสู่สภาวะคงตัวภายในเวลาประมาณ 5 นาที



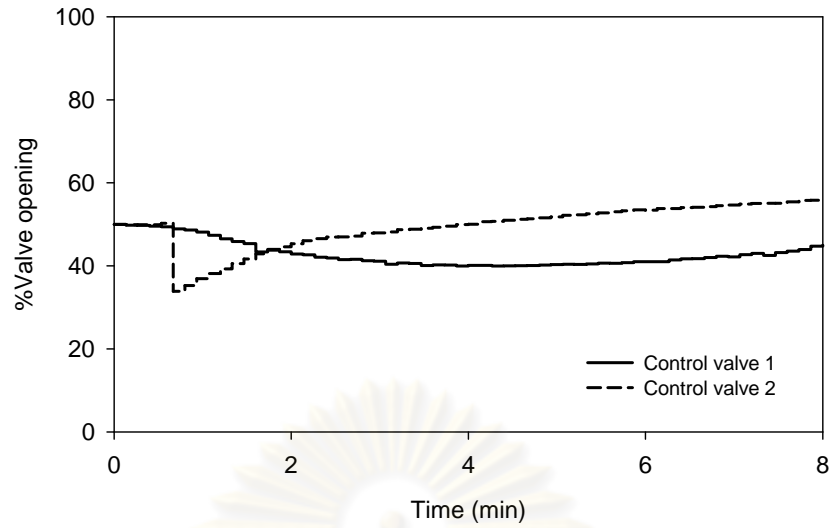
ภาพที่ 6.31 ระดับน้ำถังที่ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 2 และถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ PID ที่เวลาในการสูมตัวอย่างต่างๆ



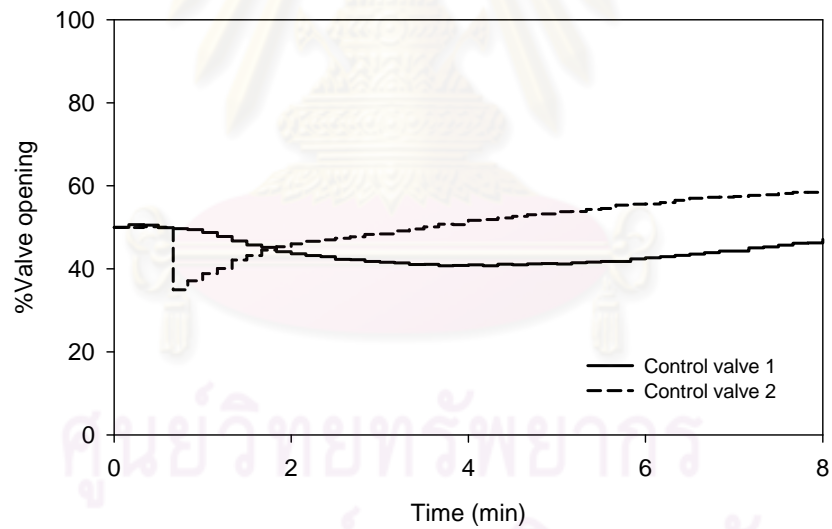
ภาพที่ 6.32 ระดับน้ำถังที่ 4 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 2 และถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ PID ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างต่างๆ



ภาพที่ 6.33 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 2 และถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ PID ที่ $S = 6$



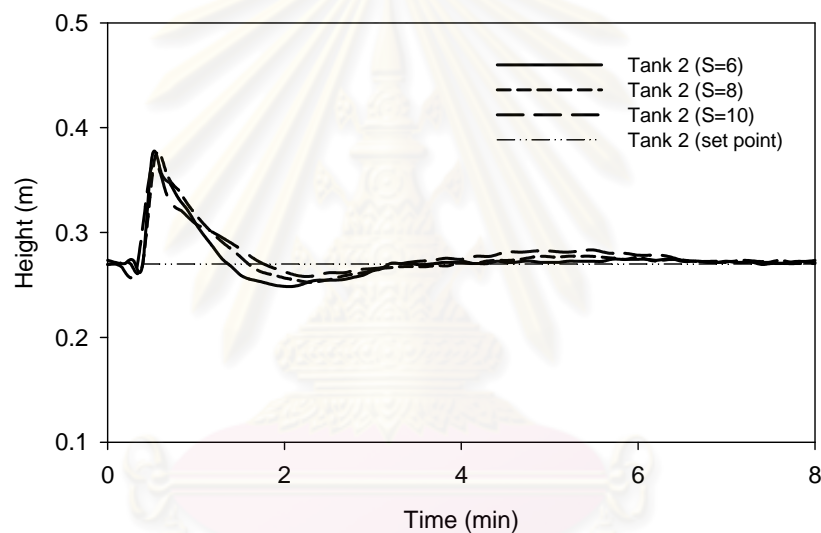
ภาพที่ 6.34 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 2 และถึงที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ PID ที่ $S = 8$



ภาพที่ 6.35 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 2 และถึงที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ PID ที่ $S = 10$

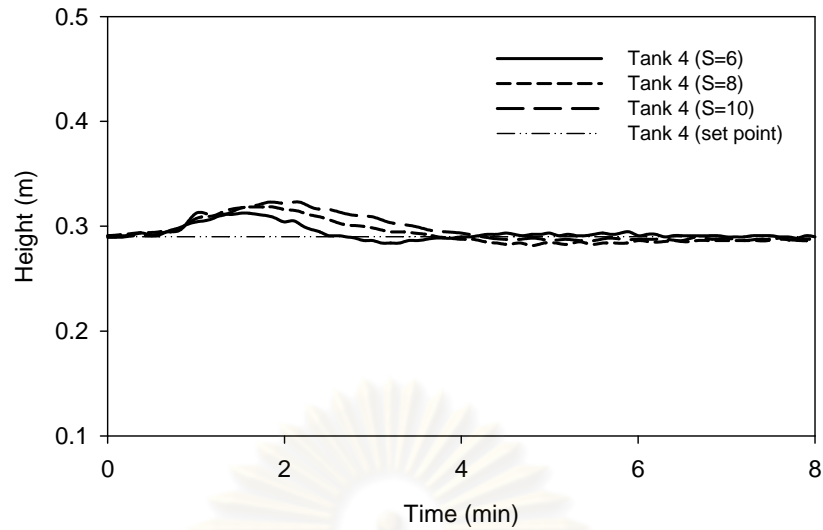
6.2.3.2 การเปรียบเทียบการควบคุมที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 6 วินาที, 8 วินาที และ 10 วินาที ของตัวควบคุมแบบ MPC

ผลการควบคุมระดับน้ำด้วยตัวควบคุมแบบ MPC ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 6 วินาที ($S = 6$), 8 วินาที ($S = 8$) และ 10 วินาที ($S = 10$) แสดงในภาพที่ 6.36 และ 6.37 ผลการตอบสนองของวาล์วควบคุมของตัวควบคุมที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างที่เวลาต่างๆแสดงในภาพที่ 6.38 ถึง 6.40 จากภาพที่ 6.37 พบว่าระดับน้ำในถังที่ 2 จะเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ประมาณ 2 นาที และเข้าสู่สภาวะคงตัวภายใน 3 นาที

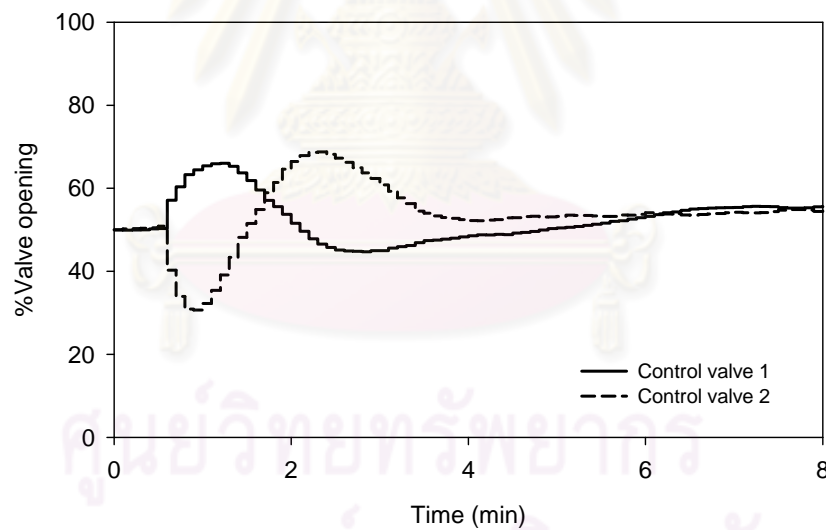


ภาพที่ 6.36 ระดับน้ำถังที่ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 2 และถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ MPC ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างต่างๆ

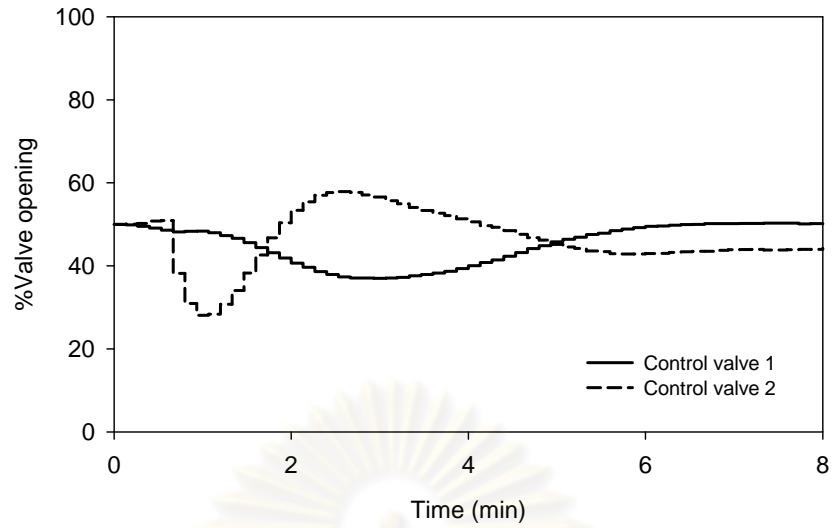
ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



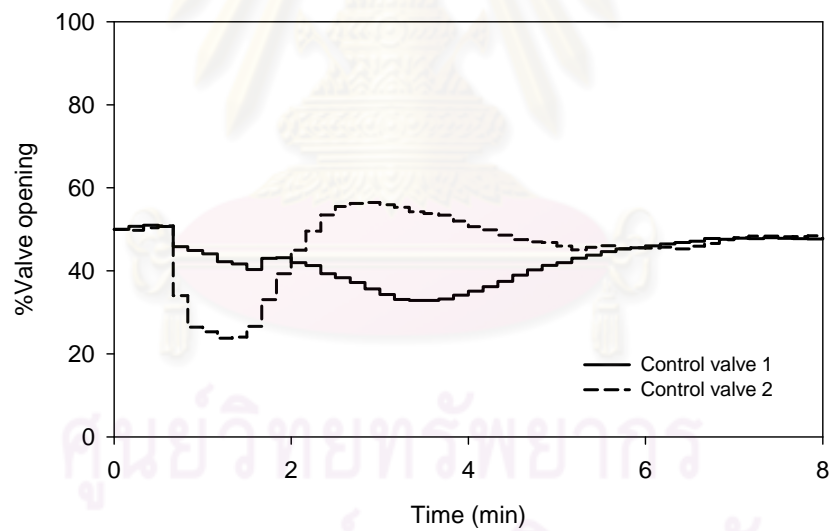
ภาพที่ 6.37 ระดับน้ำถังที่ 4 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 2 และถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ MPC ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างต่างๆ



ภาพที่ 6.38 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 2 และถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ MPC ที่ $S = 6$



ภาพที่ 6.39 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 2 และถึงที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ MPC ที่ $S = 8$

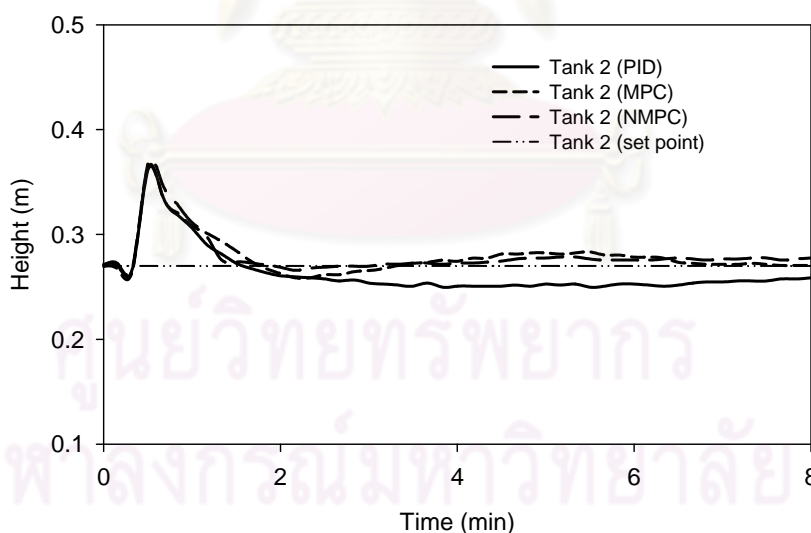


ภาพที่ 6.40 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 2 และถึงที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ MPC ที่ $S = 10$

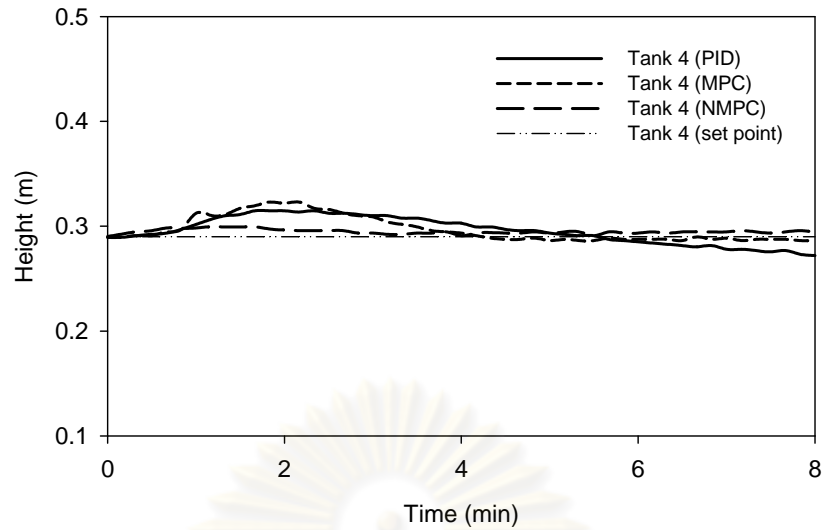
6.2.3.3 การเปรียบเทียบการควบคุมแบบต่างๆ ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างเท่ากับ 10 วินาที

สำหรับการเปรียบเทียบการควบคุมแบบต่างๆนี้ ตัวควบคุมแบบ MPC และ NMPC จะเลือกใช้ค่าขอบเขตเวลาในการทำงานและควบคุมเท่ากันคือ 20 วินาที และตัวควบคุมแบบ NMPC จะใช้การควบคุมที่มีการแบ่งช่วงเวลาในการอัปเดตโมเดลเป็น 16 ช่วง

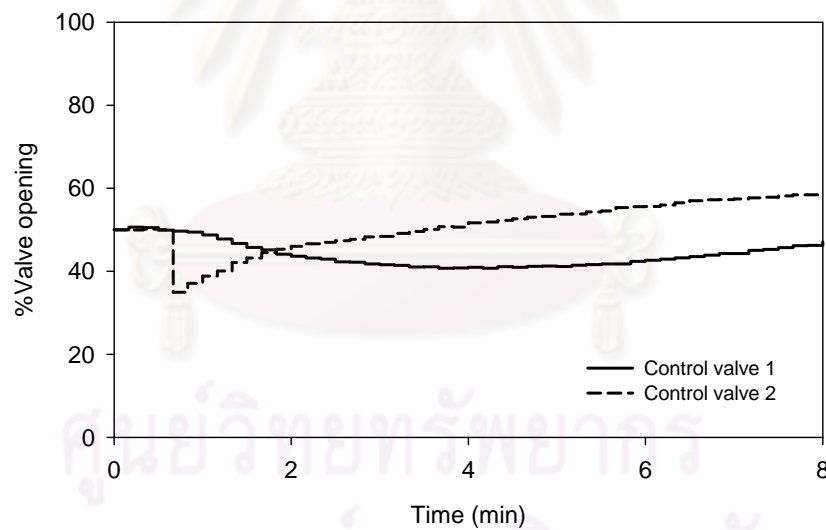
ผลการควบคุมระดับน้ำด้วยตัวควบคุมแบบ PID, MPC และ NMPC ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างเท่ากับ 10 วินาที ($S = 10$) แสดงในภาพที่ 6.41 และ 6.42 ผลการตอบสนองของวาล์วควบคุมของตัวควบคุมแบบต่างๆแสดงในภาพที่ 6.43 ถึง 6.45 ซึ่งจะพบว่าการควบคุมแบบ NMPC จะให้ผลการควบคุมที่ดีเมื่อเทียบกับการใช้ตัวควบคุมแบบ PID และ MPC รวมถึงมีการปรับค่าตัวแปรปรับที่ไม่รุนแรงเท่าตัวควบคุมแบบ PID และ MPC อีกด้วย จากภาพที่ 6.42 พบว่าระดับน้ำในถังที่ 2 จะเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ประมาณ 2 นาที่ โดยการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ NMPC ระดับน้ำจะเข้าสู่ค่าเป้าหมายช้ากว่าการใช้ตัวควบคุมแบบ PID และ MPC เล็กน้อย แต่จะอยู่ในสภาวะคงตัวทันที



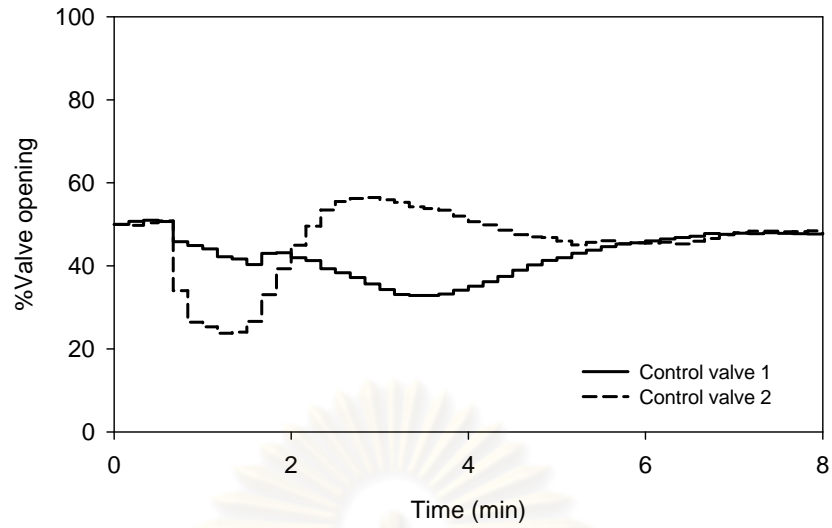
ภาพที่ 6.41 ระดับน้ำถังที่ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 2 และถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ PID, MPC และ NMPC ที่ $S = 10$



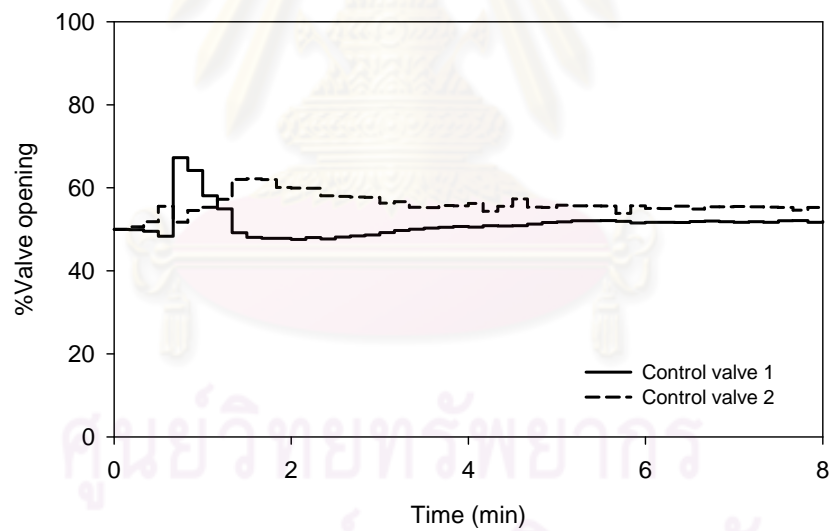
ภาพที่ 6.42 ระดับน้ำถังที่ 4 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 2 และถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ PID, MPC และ NMPC ที่ $S = 10$



ภาพที่ 6.43 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 2 และถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ PID ที่ $S = 10$



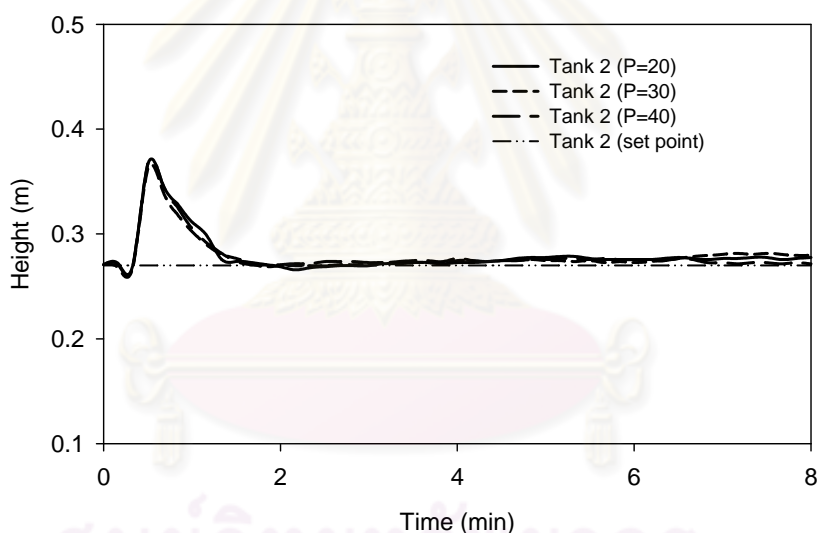
ภาพที่ 6.44 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 2 และถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ MPC ที่ $S = 10$



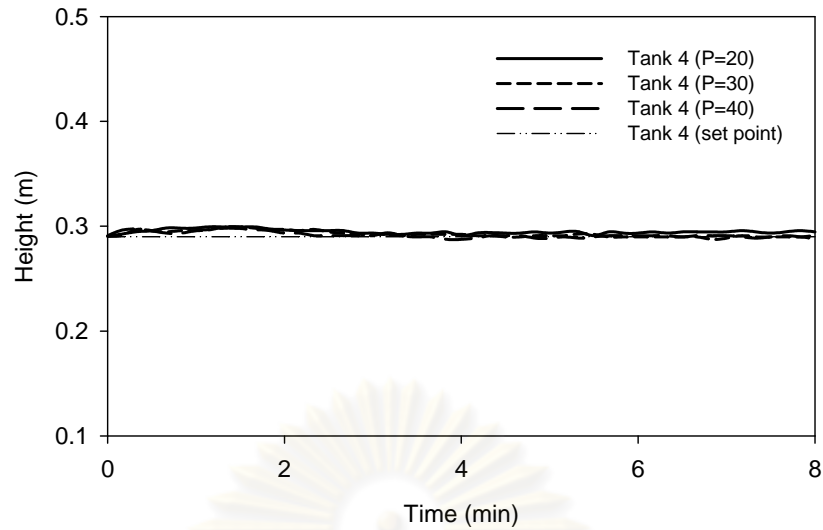
ภาพที่ 6.45 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 2 และถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ NMPC ที่ $S = 10$

6.2.3.4 การเปรียบเทียบการควบคุมที่ค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุมเป็น 20 วินาที, 30 วินาที และ 40 วินาที ของตัวควบคุมแบบ NMPC

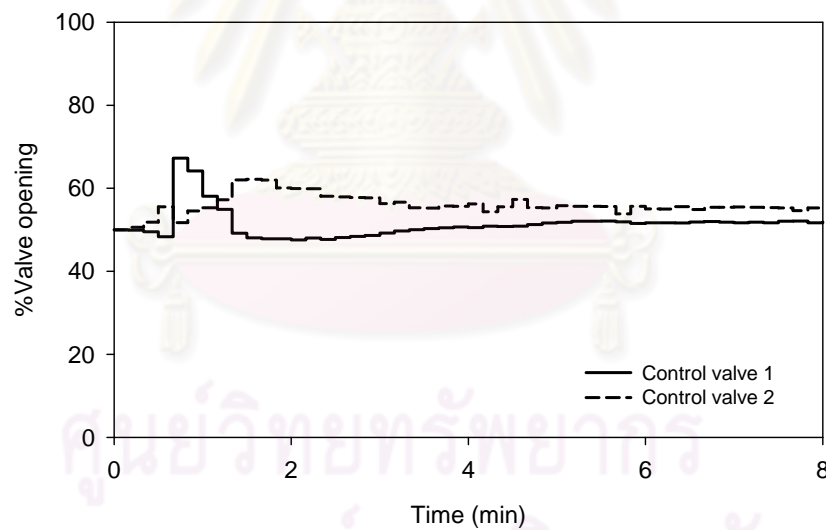
สำหรับการเปรียบเทียบการควบคุมที่ค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุมต่างๆนี้ จะเลือกใช้การควบคุมที่มีการแบ่งช่วงเวลาในการออปติไมซ์เป็น 16 ช่วง ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างเท่ากับ 10 วินาทีมาพิจารณา โดยผลการควบคุมระดับน้ำที่ค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุมเป็น 20 วินาที ($P = 20$), 30 วินาที ($P = 30$) และ 40 วินาที ($P = 40$) แสดงในภาพที่ 6.47 และ 6.48 ผลการตอบสนองของวาล์วควบคุมที่ค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุมต่างๆแสดงในภาพที่ 6.49 ถึง 6.50 จากภาพที่ 6.48 พบว่าระดับน้ำในถังที่ 2 จะเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่เวลา 2 นาที และอยู่ที่สภาวะคงตัวทันที



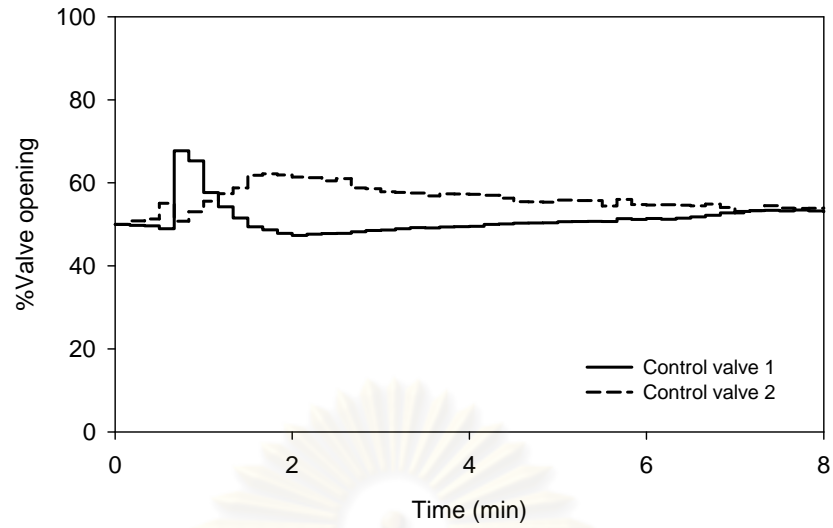
ภาพที่ 6.46 ระดับน้ำถังที่ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 2 และถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ NMPC ที่ค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุมต่างๆ



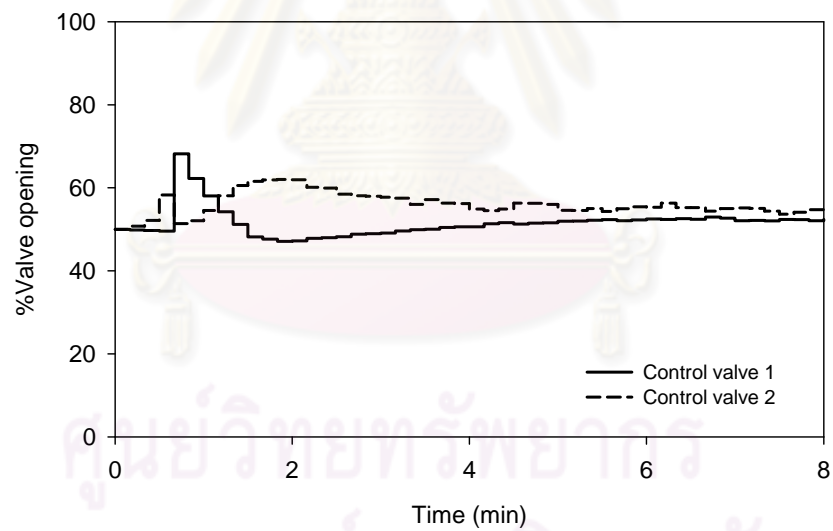
ภาพที่ 6.47 ระดับน้ำถังที่ 4 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 2 และถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ NMPC ที่ค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุมต่างๆ



ภาพที่ 6.48 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 2 และถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ NMPC ที่ $P = 20$



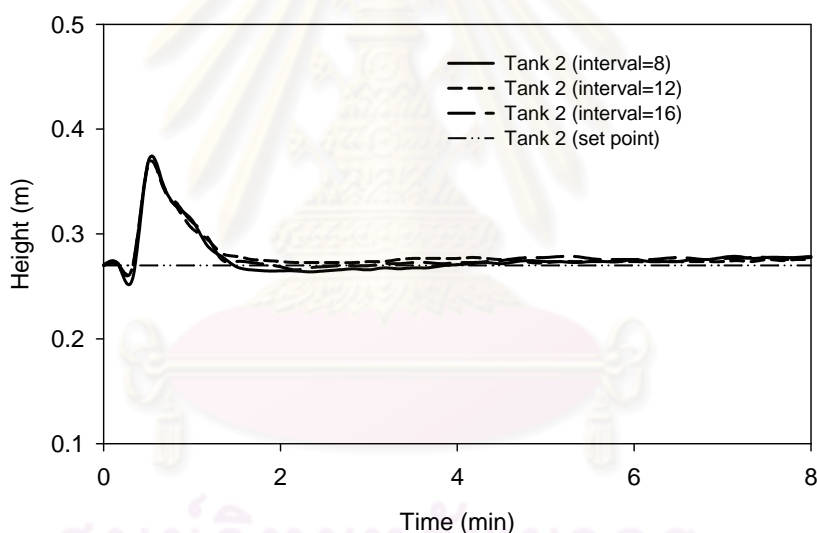
ภาพที่ 6.49 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 2 และถึงที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ NMPC ที่ $P = 30$



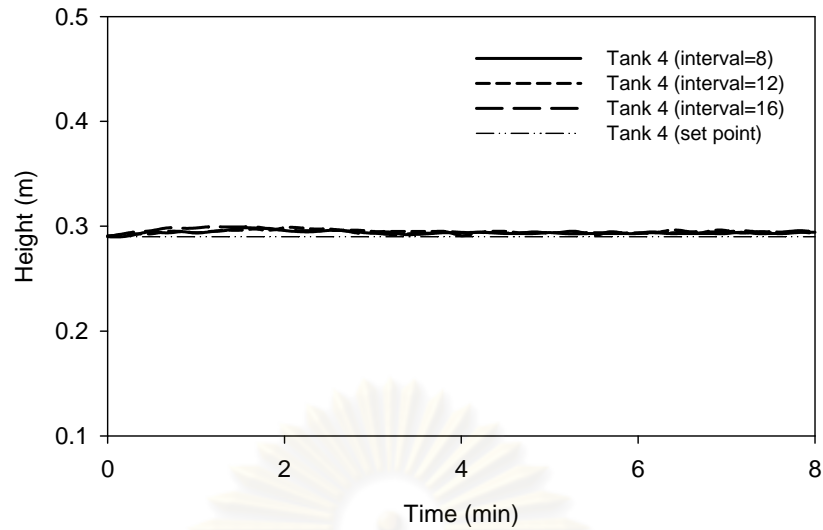
ภาพที่ 6.50 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 2 และถึงที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ NMPC ที่ $P = 40$

6.2.3.5 การเปรียบเทียบการควบคุมที่การแบ่งช่วงเวลาในการออปติไมซ์ 8 ช่วง, 12 ช่วง และ 16 ช่วง ของตัวควบคุมแบบ NMPC

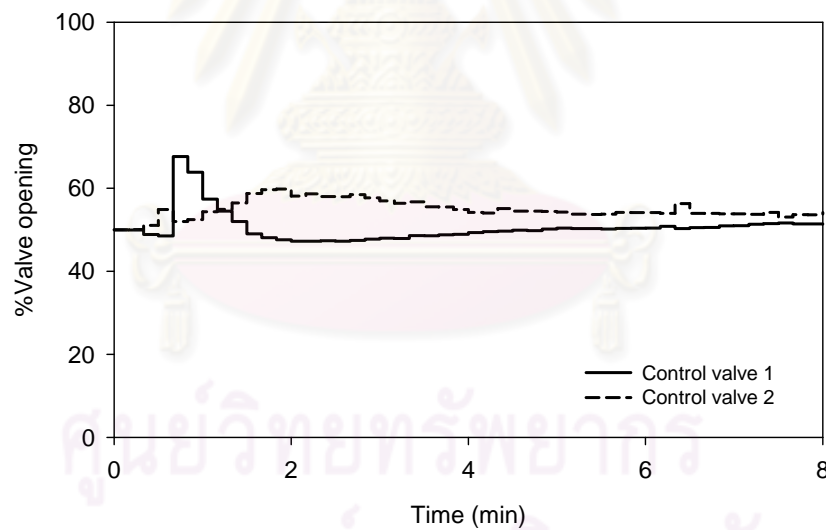
สำหรับการเปรียบเทียบการควบคุมที่การแบ่งช่วงเวลาในการออปติไมซ์ 8 ช่วง (interval = 8), 12 ช่วง (interval = 12) และ 16 ช่วง (interval = 16) จะเลือกใช้การควบคุมที่ค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุมเท่ากับ 20 วินาทีและเวลาในการสุ่มตัวอย่างเท่ากับ 10 วินาที โดยผลการควบคุมระดับน้ำที่ที่การแบ่งช่วงเวลาในการออปติไมซ์ 8 ช่วง, 12 ช่วง และ 16 ช่วง แสดงในภาพที่ 6.51 และ 6.52 ผลการตอบสนองของวาล์วควบคุมที่การแบ่งช่วงเวลาในการออปติไมซ์ต่างๆแสดงในภาพที่ 6.53 ถึง 6.55 จากภาพที่ 6.52 พบว่าระดับน้ำในถังที่ 2 จะเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่เวลา 2 นาที และอยู่ที่สภาวะคงตัวทันที



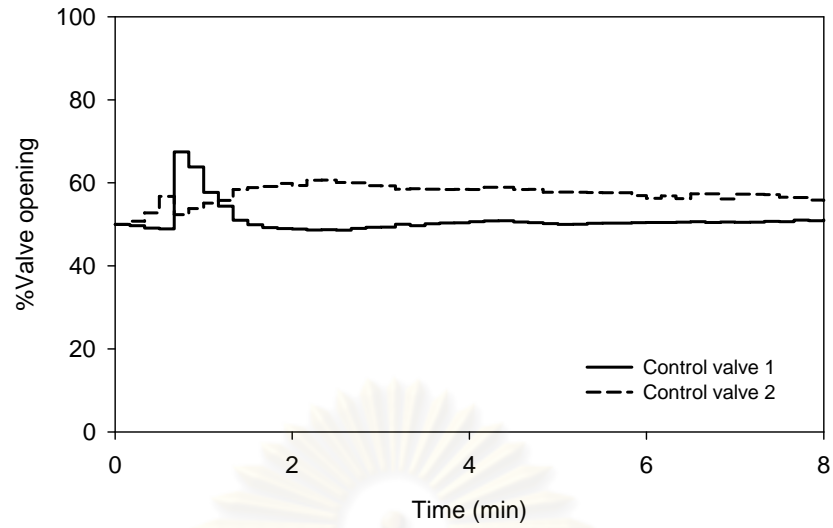
ภาพที่ 6.51 ระดับน้ำถังที่ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 2 และถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ NMPC ที่การแบ่งช่วงเวลาในการออปติไมซ์ต่างๆ



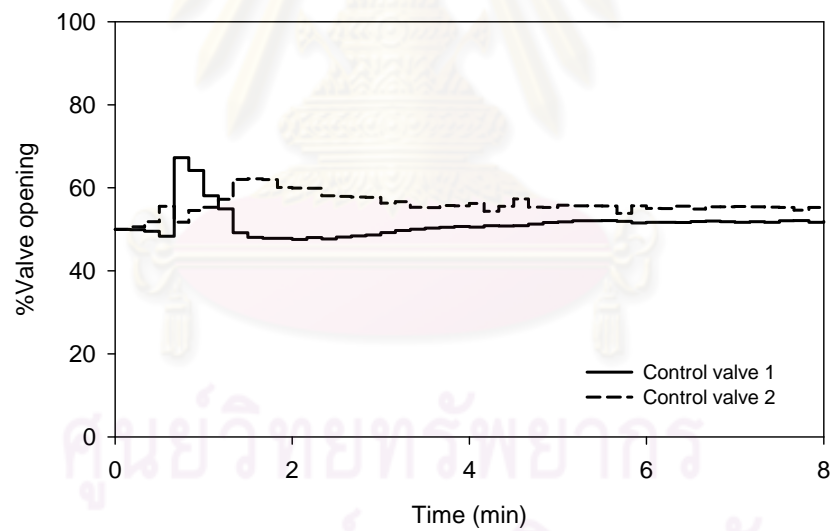
ภาพที่ 6.52 ระดับน้ำถังที่ 4 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 2 และถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ NMPC ที่การแบ่งช่วงเวลาในการอัปเดตไมซ์ซ์ต่างๆ



ภาพที่ 6.53 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 2 และถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ NMPC ที่ interval = 8



ภาพที่ 6.54 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 2 และถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ NMPC ที่ interval = 12



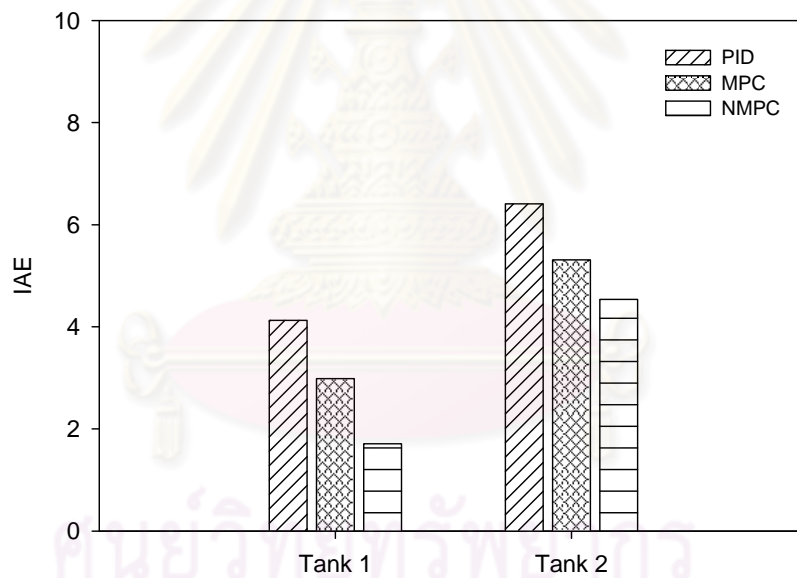
ภาพที่ 6.55 การตอบสนองของวาล์วควบคุมตัวที่ 1 และ 2 ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 2 และถังที่ 4 ของตัวควบคุมแบบ NMPC ที่ interval = 16

6.3 วิเคราะห์ผลการควบคุมในกรณีต่างๆ

6.3.1 วิเคราะห์ผลการควบคุมระดับน้ำของถังที่ 1 และถังที่ 2

6.3.1.1 ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบการควบคุมแบบต่างๆ ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างเท่ากับ 10 วินาที

ผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (The values of Integral of Absolute error, IAE) ของการควบคุมระดับน้ำด้วยตัวควบคุมแบบ PID, MPC และ NMPC ในกรณีใช้เวลาในการสุ่มตัวอย่างเท่ากับ 10 วินาที แสดงในภาพที่ 6.56 แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบ NMPC มีสมรรถนะในการควบคุมที่ดีที่สุด รองลงมาคือตัวควบคุมแบบ MPC และ PID ตามลำดับ

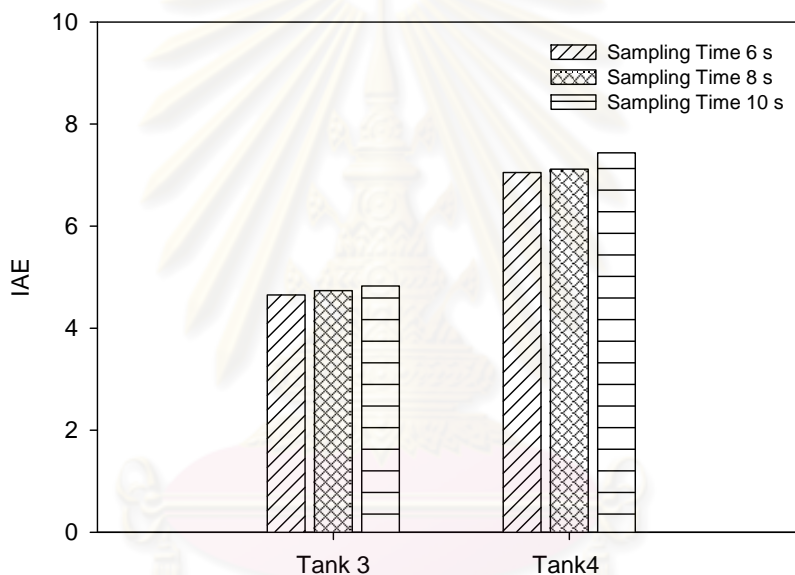


ภาพที่ 6.56 ค่า IAE ของการควบคุมแบบ PID, MPC และ NMPC ที่ $S = 10$ ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 1 และถังที่ 2

6.3.2 วิเคราะห์ผลการควบคุมระดับน้ำของถังที่ 3 และถังที่ 4

6.3.2.1 ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบการควบคุมที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 6 วินาที, 8 วินาที และ 10 วินาที ของตัวควบคุมแบบ PID

ผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (The values of Integral of Absolute error, IAE) ของการควบคุมระดับน้ำด้วยตัวควบคุมแบบ PID ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 6 วินาที, 8 วินาที และ 10 วินาที แสดงในภาพที่ 6.57 แสดงให้เห็นว่าในกรณีการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PID ยิ่งลดเวลาในการสุ่มตัวอย่าง สมรรถนะในการควบคุมจะดีขึ้น

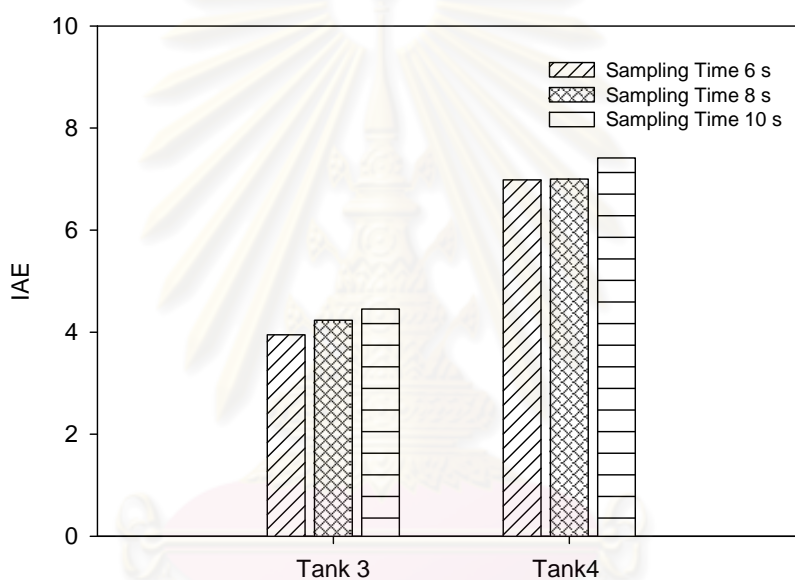


ภาพที่ 6.57 ค่า IAE ของการควบคุมแบบ PID ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างต่างๆ ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 3 และถังที่ 4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.3.2.2 ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบการควบคุมที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 6 วินาที, 8 วินาที และ 10 วินาที ของตัวควบคุมแบบ MPC

ผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (The values of Integral of Absolute error, IAE) ของการควบคุมระดับน้ำด้วยตัวควบคุมแบบ MPC ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 6 วินาที, 8 วินาที และ 10 วินาที แสดงในภาพที่ 6.58 ผลเป็นไปในแนวทางเดียวกับการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PID คือ ยิ่งลดเวลาในการสุ่มตัวอย่าง สมรรถนะในการควบคุมจะดีขึ้น

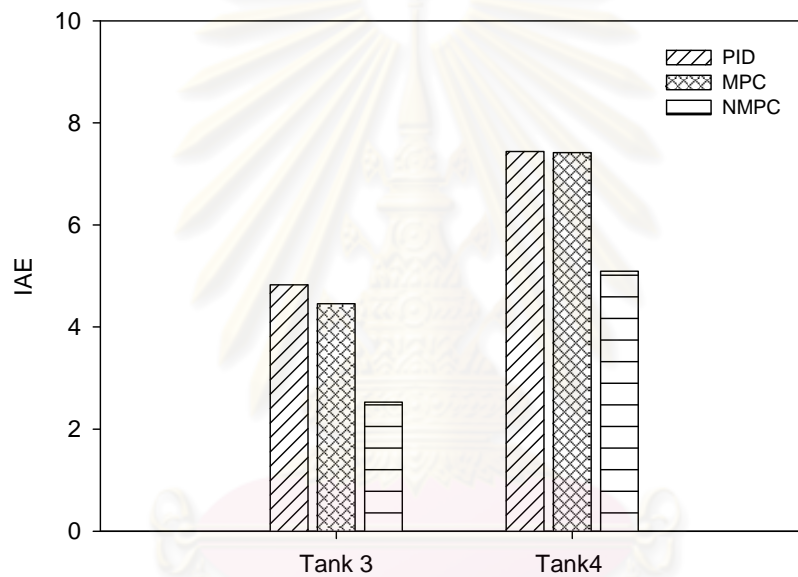


ภาพที่ 6.58 ค่า IAE ของการควบคุมแบบ MPC ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างต่างๆ
ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 3 และถึงที่ 4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.3.2.3 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบการควบคุมแบบต่างๆ ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างเท่ากับ 10 วินาที

ผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (The values of Integral of Absolute error, IAE) ของการควบคุมระดับน้ำด้วยตัวควบคุมแบบ PID, MPC และ NMPC ในกรณีใช้เวลาในการสุ่มตัวอย่างเท่ากับ 10 วินาที แสดงในภาพที่ 6.59 แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบ NMPC มีสมรรถนะในการควบคุมที่ดีที่สุด รองลงมาคือตัวควบคุมแบบ MPC และ PID ตามลำดับ



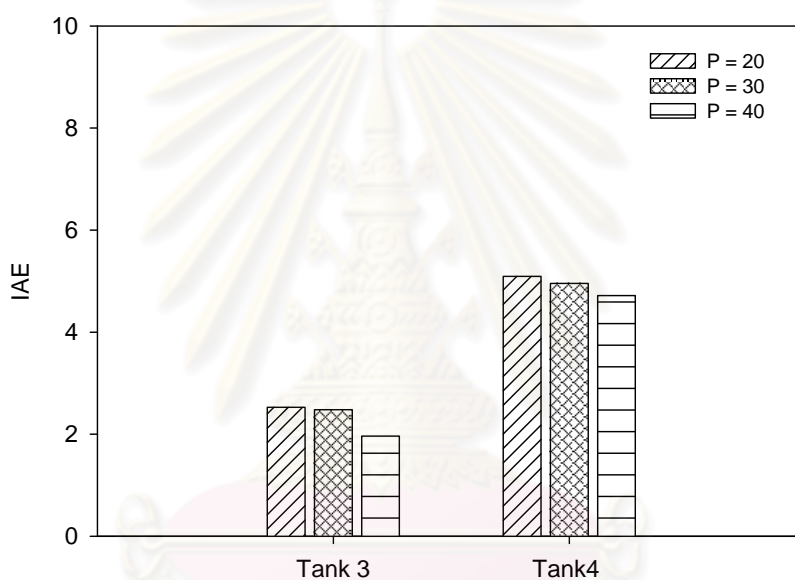
ภาพที่ 6.59 ค่า IAE ของการควบคุมแบบ PID, MPC และ NMPC

ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 3 และถังที่ 4

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.3.2.4 ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบการควบคุมที่ค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุม เป็น 20 วินาที, 30 วินาที และ 40 วินาที ของตัวควบคุมแบบ NMPC

ผลการวิเคราะห์ผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อน (The values of Integral of Absolute error, IAE) ของการควบคุมระดับน้ำด้วยตัวควบคุมแบบ NMPC ในกรณี การควบคุมที่ค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุมเป็น 20 วินาที, 30 วินาที และ 40 วินาที แสดงในภาพที่ 6.60 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุม สมรรถนะ ในการควบคุมจะดีขึ้น

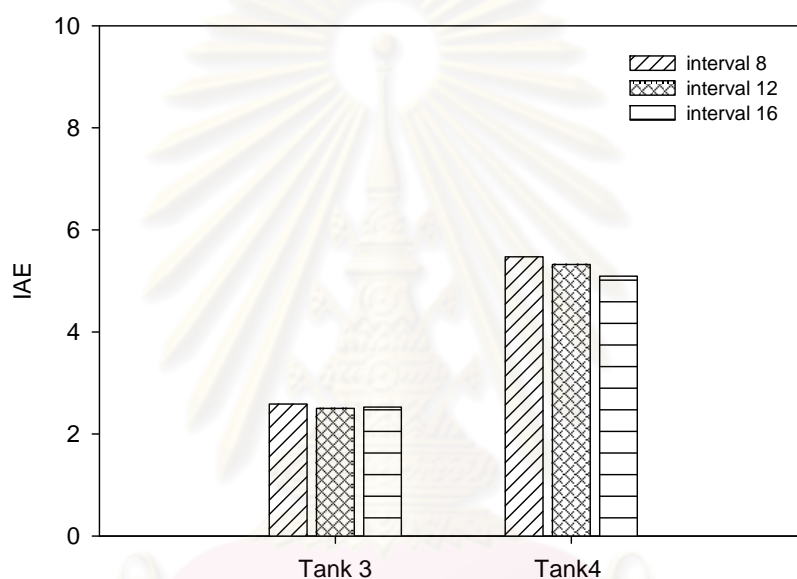


ภาพที่ 6.60 ค่า IAE ของการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ NMPC ที่ค่าขอบเขตเวลาในการทำนาย และควบคุมต่างๆ ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 3 และถึงที่ 4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.3.2.5 ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบการควบคุมที่การแบ่งช่วงเวลาในการอบติไมซ์ 8 ช่วง, 12 ช่วง และ 16 ช่วง ของตัวควบคุมแบบ NMPC

ผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (The values of Integral of Absolute error, IAE) ของการควบคุมระดับน้ำด้วยตัวควบคุมแบบ NMPC ในกรณีการควบคุมที่ที่การแบ่งช่วงเวลาในการอบติไมซ์ 8 ช่วง, 12 ช่วง และ 16 ช่วง แสดงในภาพที่ 6.61 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มช่วงการแบ่งเวลาในการอบติไมซ์ทำให้สมรรถนะในการควบคุมดีขึ้นเล็กน้อย



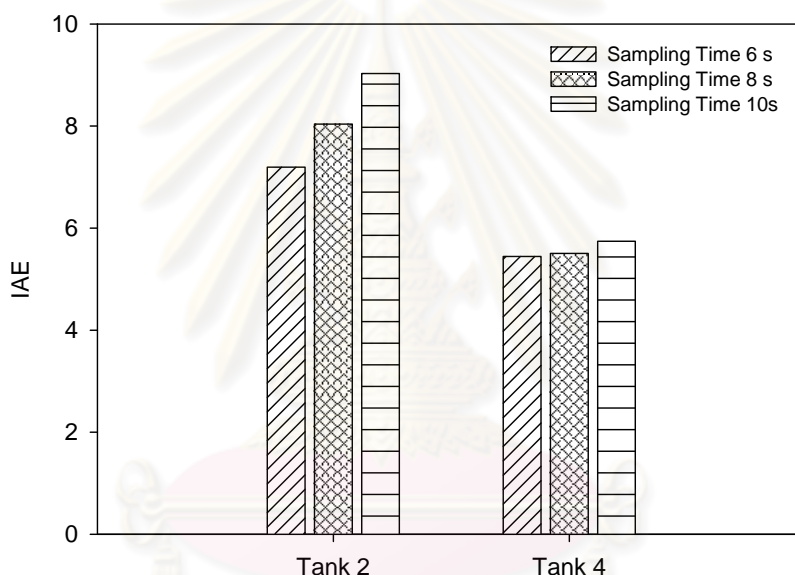
ภาพที่ 6.61 ค่า IAE ของการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ NMPC ที่การแบ่งช่วงเวลาในการอบติไมซ์ต่างๆ ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 3 และถึงที่ 4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.3.3 วิเคราะห์ผลการควบคุมระดับน้ำของถังที่ 2 และถังที่ 4

6.3.3.1 ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบการควบคุมที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 6 วินาที, 8 วินาที และ 10 วินาที ของตัวควบคุมแบบ PID

ผลการวิเคราะห์ผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อน (The values of Integral of Absolute error, IAE) ของการควบคุมระดับน้ำด้วยตัวควบคุมแบบ PID ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 6 วินาที, 8 วินาที และ 10 วินาที แสดงในภาพที่ 6.62 แสดงให้เห็นว่ายิ่งลดเวลาในการสุ่มตัวอย่างในกรณีการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PID สมรรถนะในการควบคุมจะดีขึ้น

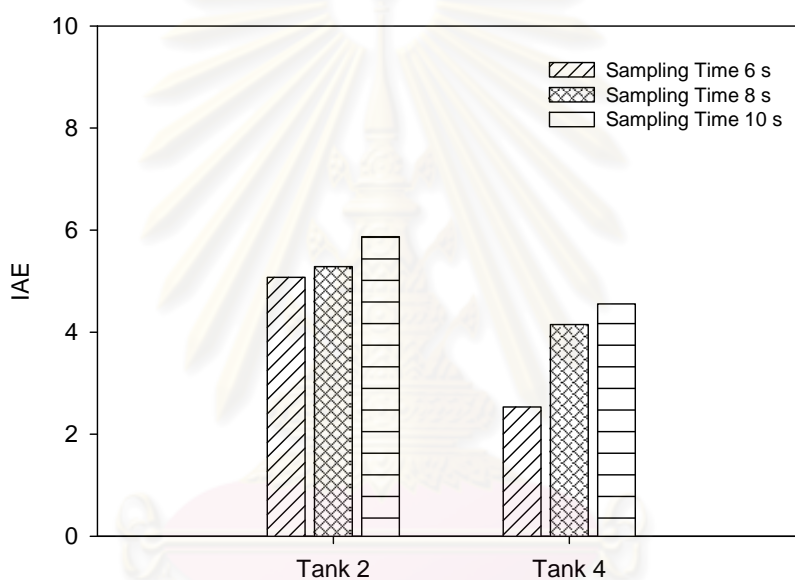


ภาพที่ 6.62 ค่า IAE ของการควบคุมแบบ PID ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างต่างๆ ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 2 และถังที่ 4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.3.3.2 ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบการควบคุมที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 6 วินาที, 8 วินาที และ 10 วินาที ของตัวควบคุมแบบ MPC

ผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (The values of Integral of Absolute error, IAE) ของการควบคุมระดับน้ำด้วยตัวควบคุมแบบ MPC ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 6 วินาที, 8 วินาที และ 10 วินาที แสดงในภาพที่ 6.63 ผลเป็นไปในแนวทางเดียวกับการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PID คือ ยิ่งลดเวลาในการสุ่มตัวอย่าง สมรรถนะในการควบคุมจะดีขึ้น

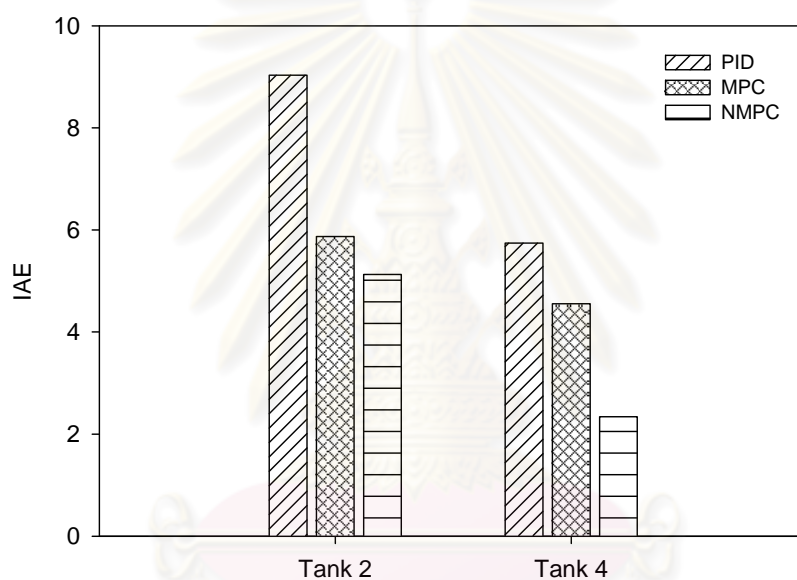


ภาพที่ 6.63 ค่า IAE ของการควบคุมแบบ MPC ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างต่างๆ
ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 2 และถึงที่ 4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.3.3.3 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบการควบคุมแบบต่างๆ ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างเท่ากับ 10 วินาที

ผลการวิเคราะห์ผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อน (The values of Integral of Absolute error, IAE) ของการควบคุมระดับน้ำด้วยตัวควบคุมแบบ PID, MPC และ NMPC ในกรณีใช้เวลาในการสุ่มตัวอย่างเท่ากับ 10 วินาที แสดงในภาพที่ 6.64 แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบ NMPC มีสมรรถนะในการควบคุมที่ดีที่สุด รองลงมาคือตัวควบคุมแบบ MPC และ PID ตามลำดับ

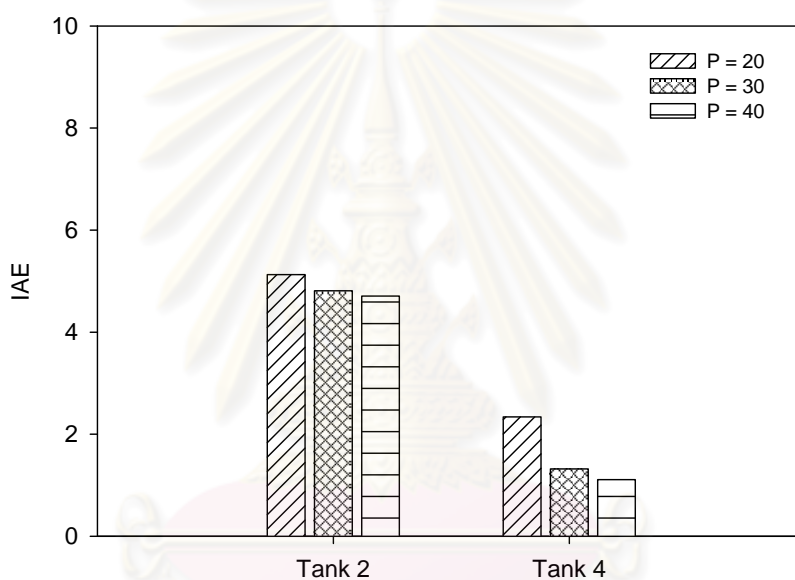


ภาพที่ 6.64 ค่า IAE ของการควบคุมแบบ PID, MPC และ NMPC ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 2 และถังที่ 4

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.3.3.4 ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบการควบคุมที่ค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุม เป็น 20 วินาที, 30 วินาที และ 40 วินาที ของตัวควบคุมแบบ NMPC

ผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (The values of Integral of Absolute error, IAE) ของการควบคุมระดับน้ำด้วยตัวควบคุมแบบ NMPC ในกรณีการควบคุมที่ค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุมเป็น 20 วินาที, 30 วินาที และ 40 วินาที แสดงในภาพที่ 6.65 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุม สมรรถนะในการควบคุมจะดีขึ้น

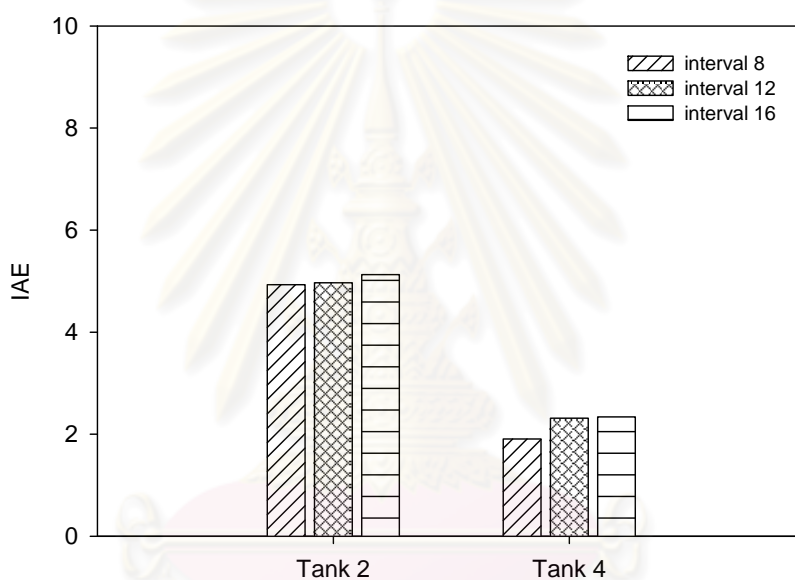


ภาพที่ 6.65 ค่า IAE ของการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ NMPC ที่ค่าขอบเขตเวลาในการทำนาย และควบคุมต่างๆ ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 2 และถึงที่ 4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.3.3.5 ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบการควบคุมที่การแบ่งช่วงเวลาในการออปติไมซ์ 8 ช่วง, 12 ช่วง และ 16 ช่วง ของตัวควบคุมแบบ NMPC

ผลการวิเคราะห์ผลรวมค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อน (The values of Integral of Absolute error, IAE) ของการควบคุมระดับน้ำด้วยตัวควบคุมแบบ NMPC ในกรณีการควบคุมที่ที่การแบ่งช่วงเวลาในการออปติไมซ์ 8 ช่วง, 12 ช่วง และ 16 ช่วง แสดงในภาพที่ 6.66 แสดงให้เห็นว่าการลดช่วงการแบ่งเวลาในการออปติไมซ์ทำให้สมรรถนะในการควบคุมดีขึ้นเล็กน้อย



ภาพที่ 6.66 ค่า IAE ของการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ NMPC ที่การแบ่งช่วงเวลาในการออปติไมซ์ต่างๆ ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 2 และถึงที่ 4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอนะเนาะ

7.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการควบคุมระดับน้ำในระบบสี่ถัง ซึ่งมีลักษณะเป็นระบบที่มีหลายตัวแปร ที่มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยตัวแปรปรับของกระบวนการนี้คือการเปิด-ปิดของวาล์วควบคุมซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำ และตัวแปรควบคุมคือระดับน้ำในถัง โดยได้ศึกษาการควบคุมในกรณีมีการบวกระบบจากการเพิ่มระดับน้ำในถังแบบอิมพัลส์ และควบคุมระบบให้อยู่ที่เสถียรภาพเดิม ในการควบคุมระบบสี่ถังนี้ ได้ประยุกต์ใช้การควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟแบบไม่เป็นเชิงเส้น (NMPC) และทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของการควบคุมกับตัวควบคุมอื่นๆ คือตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID) และตัวควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ (MPC) ซึ่งได้ผลการทดลองในกรณีต่างๆสรุปได้ดังต่อไปนี้

7.1.1 กรณีการเปรียบเทียบการควบคุมที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างต่างๆของตัวควบคุมแบบ PID

การควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PID ที่การใช้เวลาในการสุ่มตัวอย่างต่างๆ ให้พบการควบคุมเป็นไปในแนวทางเดียวกัน โดยการใช้เวลาในการสุ่มตัวอย่างน้อยลงเป็นการลดเดดไทม์ (Dead time) ของระบบ ดังนั้นการใช้ค่า K_c จะเพิ่มขึ้น ส่วน τ_I จะลดลงเพื่อให้ได้การควบคุมที่เหมาะสม ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ด้วยการหาค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (IAE) พบว่าเวลาในการสุ่มตัวอย่างน้อยลงทำให้สมรรถนะของการควบคุมดีขึ้น

7.1.2 กรณีการเปรียบเทียบการควบคุมที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างต่างๆ ของตัวควบคุมแบบ MPC

ผลการควบคุมตัวควบคุมแบบ MPC ที่การใช้เวลาในการสุ่มตัวอย่างต่างๆ มีลักษณะเดียวกับผลการควบคุมตัวควบคุมแบบ PID แต่ในตัวควบคุมแบบ MPC จะต้องมีการลดเวกเตอร์นำหน้าของระดับน้ำในถังที่ต้องการควบคุมลงเมื่อเวลาในการสุ่มตัวอย่างน้อยลง เพื่อให้ตัวแปรปรับไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมากเกินไป เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยการหาค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (IAE) พบว่าเวลาในการสุ่มตัวอย่างน้อยลงทำให้สมรรถนะของการควบคุมดีขึ้น

7.1.3 กรณีการเปรียบเทียบการควบคุมแบบต่างๆ ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างค่าเดียวกัน

การควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PID เป็นตัวแทนการควบคุมที่ไม่อาศัยแบบจำลอง ในขณะที่การควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ MPC เป็นตัวแทนการควบคุมที่อาศัยแบบจำลองที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้น ส่วนการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ NMPC เป็นตัวแทนการควบคุมที่อาศัยแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยตรง เมื่อเปรียบเทียบการควบคุมด้วยตัวควบคุมทั้ง 3 แบบจะพบว่า การควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ NMPC ระดับน้ำจะเข้าสู่ค่าเป้าหมายรวดเร็วที่สุด ในขณะที่การควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ MPC จะเข้าสู่ค่าเป้าหมายช้าที่สุดแต่จะไม่มีออฟเซต (Offset) แต่การควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PID แม้ว่าจะระดับน้ำจะเข้าสู่ค่าเป้าหมายก่อนตัวควบคุมแบบ MPC แต่จะมีการแกว่งและออฟเซต (Offset) ก่อนจะเข้าสู่ค่าเป้าหมายอีกครั้งหนึ่ง เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยการหาค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (IAE) พบว่าตัวควบคุมแบบ NMPC มีสมรรถนะในการควบคุมที่ดีที่สุด รองลงมาคือตัวควบคุมแบบ MPC และ PID ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าในการควบคุมระบบที่มีความซับซ้อนนี้ การใช้ตัวควบคุมที่อาศัยแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น ให้ผลดีกว่าการใช้แบบจำลองที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้น และดีกว่าตัวควบคุมที่ไม่อาศัยแบบจำลองตามลำดับ

7.1.4 กรณีการเปรียบเทียบการควบคุมที่ค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุมต่างๆ ของตัวควบคุมแบบ NMPC

เนื่องจากแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงที่สร้างขึ้นสามารถอธิบายระบบได้ถึงดี ดังนั้น สำหรับการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ NMPC นี้เมื่อวิเคราะห์ด้วยการหาค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (IAE) ของการเพิ่มค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุมจึงพบว่าทำให้ตัวควบคุมมีสมรรถนะที่ดีขึ้น ซึ่งการเพิ่มค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุมนี้จะส่งผลให้ใช้เวลาในการคำนวณในรอบการควบคุมเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้น สำหรับการสุ่มตัวอย่างที่ทุกๆ 10 วินาที ค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุมมากที่สุดที่เลือกใช้ได้คือ 40 วินาทีนั่นเอง

7.1.5 กรณีการเปรียบเทียบการควบคุมที่การแบ่งช่วงเวลาในการหอปติไมซ์ต่างๆ ของตัวควบคุมแบบ NMPC

ในการเพิ่มช่วงเวลาในการหอปติไมซ์นั้นจะส่งผลคือการตอบสนองของตัวแปรปรับจะเพิ่มขึ้นกว่าการใช้ช่วงเวลาในการหอปติไมซ์น้อยๆ จากการวิเคราะห์ค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (IAE) พบว่าสมรรถนะการควบคุมของกรณีการควบคุมถึงที่ 3 และถึงที่ 4 จะดีขึ้นเล็กน้อยเมื่อใช้ช่วงเวลาในการหอปติไมซ์เพิ่มขึ้น ในขณะที่สมรรถนะการควบคุมของกรณีการ

ควบคุมถึงที่ 2 และถึงที่ 4 จะลดลงทั้งนี้เนื่องมาจากการควบคุมถึงที่ 2 และถึงที่ 4 ซึ่งเป็นถึงคู่ล่าง จะมีการควบคุมที่สลับซับซ้อน เมื่อตัวแปรปรับมีการตอบสนองมากขึ้นก็อาจส่งผลกระทบต่อถึงข้างเคียงมากขึ้นนั่นเอง อย่างไรก็ตามการใช้ช่วงเวลาในการขอปติไมซ์ต่างๆกันนั้น ให้ผลรวมความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (IAE) แตกต่างกันไปไม่มากนัก จึงสรุปได้ว่าควรเลือกใช้ช่วงเวลาในการขอปติไมซ์น้อยๆ เนื่องจากจะเป็นการลดเวลาการคำนวณในรอบการควบคุมอีกด้วย

7.1.6 สรุปผลการทดลองจากการเปรียบเทียบในทุกกรณี

ในการทดลองในกรณีต่างๆทั้งหมด สามารถสรุปได้ว่าการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ NMPC ให้สมรรถนะในการควบคุมที่ดีที่สุดแม้ว่าจะใช้เวลาในการคำนวณในรอบการควบคุมซ้ำ คือไม่สามารถใช้เวลาในการสุ่มตัวอย่างต่ำกว่า 10 วินาทีได้ แต่ก็ยังให้สมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PID และตัวควบคุมแบบ MPC ที่การสุ่มตัวอย่างที่เวลา 6 วินาทีและ 8 วินาทีอีกด้วย

สำหรับการควบคุมระบบด้วยแบบจำลองที่มีความผิดพลาดซึ่งในที่นี้คือการควบคุมแบบ MPC ที่อาศัยแบบจำลองที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้น (Linearization) ควรใช้เวลาในการสุ่มตัวอย่างน้อยๆ เนื่องจากการใช้เวลาในการสุ่มตัวอย่างมากยิ่งเป็นการเพิ่มเวลาหนึ่งของระบบทำให้การควบคุมมีสมรรถนะแย่งลง

7.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ระบบสี่ถึงเป็นตัวแทนในการศึกษาระบบที่มีหลายตัวแปร และมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น สามารถนำตัวควบคุมต่างๆมาประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย
- 2) การศึกษาในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบ NMPC ให้สมรรถนะในการควบคุมที่ดี แต่ยังมีข้อด้อยคือใช้เวลาในการคำนวณในรอบการควบคุมซ้ำ ควรมีการพัฒนาให้มีการคำนวณที่รวดเร็วยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] Lewis, F.L. *Applied Optimal Control and Estimation*. Facsimile edition ed. 1992: Prentice-Hall.
- [2] Findeisen, R., and Allgower, F. *An Introduction to Nonlinear Model Predictive Control*, in Institute for Systems Theory in Engineering, University of Stuttgart: Germany.
- [3] Tatjewski, P., and Lawrynczuk, M. *Soft computing in Model-based predictive control*. Int. J. Appl. Math. Comput. Sci., 2006. Vol. 16(No. 1): 7–26.
- [4] Morari, M., and Lee, J.H. *Model predictive control: Past, present and future*. Computers and Chemical Engineering, 1999. 23(4-5): 667-682.
- [5] Orukpe, P.E., and Jaimuokha, I. *Basics of Model Predictive Control*. 2005, Imperial College: London.
- [6] Garcia, C.E., Prett, D.M., and Morari, M. *Model predictive control: Theory and practice-A survey*. Automatica, 1989. 25(3): 335-348.
- [7] Bao-Cang, D. *Modern Predictive Control*. 2010: CRC Press.
- [8] Allgower, F., Findeisen, R., and Nagy, Z.K. *Nonlinear model predictive control: From theory to application*. Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers, 2004. 35(3): 299-315.
- [9] Tamimi, J., and Li, P. *A combined approach to nonlinear model predictive control of fast systems*. Journal of Process Control, 2010. 20(9): 1092-1102.
- [10] Wojsznis, W., Gudaz, J., Blevins, T., and Mehta, A. *Practical approach to tuning MPC*. in ISA TECH/EXPO Technology Update Conference Proceedings. 2001. Houston, TX.
- [11] Nikolaou, M. *Model predictive controllers: A critical synthesis of theory and industrial needs*, in Advances in Chemical Engineering. 2001: 131-204.
- [12] Henson, M.A. *Nonlinear model predictive control: Current status and future directions*. Computers and Chemical Engineering, 1998. 23(2): 187-202.
- [13] Qin, S.J., and Badgwell, T.A. *A survey of industrial model predictive control technology*. Control Engineering Practice, 2003. 11(7): 733-764.

- [14] Kawathekar, R., and Riggs, J.B. *Nonlinear model predictive control of a reactive distillation column*. Control Engineering Practice, 2007. 15(2): 231-239.
- [15] อธิป ถายานุกัฏ, *ตัวควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟแบบง่ายบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลสำหรับควบคุมระดับของเหลวแบบเฉลี่ย*, วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545
- [16] ปิยะพล นันทพรภิรมย์, *การควบคุมเครื่องปฏิกรณ์เพอร์เวเพอเรทีฟเมมเบรนด้วยการควบคุมแบบโมเดลพรีดิกทีฟ*, วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547
- [17] Rusli, E., Ang, S., and Braatz, R.D. *A Quadruple-tank process control experiment*. Chemical Engineering Education, 2004. 38(3): 174-181.
- [18] Gatzke, E.P., Meadows, E.S., Wang, C., and Doyle III, F.J. *Model based control of a four-tank system*. Computers and Chemical Engineering, 2000. 24(2-7): 1503-1509.
- [19] Johansson, K.H. *The quadruple-tank process: A multivariable laboratory process with an adjustable zero*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2000. 8(3): 456-465.
- [20] Raff, T., Huber, S., Nagy, Z.K., and Allgower, F. *Nonlinear model predictive control of a four tank system: An experimental stability study*. in Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications. 2007. Munich.
- [21] Zong, X., Yang, Z., and Yuan, D. *Nonlinear modeling and predictive control of the four-tank system*. 2nd International Conference on Software Engineering and Data Mining, SEDM 2010. Chengdu.
- [22.] Malar, R.S.M., and Thyagarajan, T. *Modeling of quadruple tank system using soft computing techniques*. European Journal of Scientific Research, 2009. 29(2): 249-264.
- [23] อลงกรณ์ จรรย์ชล, *การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบมัลติพารามตริกโมเดลพรีดิกทีฟของการทดลองระบบสี่ถัง*, วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552

- [24] Tondel, P., Johansen, T.A., and Bemporad, A. *An algorithm for multi-parametric quadratic programming and explicit MPC solutions*. Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. 2001. Orlando, FL.
- [25] Mercangoz, M., and Doyle III, F.J. *Distributed model predictive control of an experimental four-tank system*. Journal of Process Control, 2007. 17(3): 297-308.
- [26] Smith, C.A., and Corripio, A. *Principles and Practice of Automatic Process Control*. third ed. 2005: John Wiley & Sons, Inc.
- [27] ไพศาล กิตติศุภกร, *การควบคุมที่อาศัยแบบจำลองสำหรับกระบวนการเคมีแบบเบตซ์*. พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์, 2551
- [28] Findeisen, R., Imsland, L., Allgower, F., and Foss, B.A. *State and output feedback nonlinear model predictive control: An overview*. European Journal of Control, 2003. 9(2-3): 190-206.
- [29] Hindmarsh, A.C., and Serban, R. *User Documentation for cvode v2.6.0, in Center for Applied Scientific Computing*. 2009, Lawrence Livermore National Laboratory.
- [30] Lang, Y.d., and Biegler, L.T. *The IPOPT Interface to CAPE-OPEN*, in Department of Chemical Engineering, Carnegie Mellon University: Pittsburgh.
- [31] Wachter, A., and Biegler, L.T. *On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming*. Mathematical Programming, 2006. 106(1): 25-57.
- [32] Skogestad, S., and Postlethwaite, I. *Multivariable feedback control Analysis and design*. Second ed. John Wiley & Sons, Ltd., 2005
- [33] Wibowo, T.C.S., Saad, N., and Karsiti, M.N. *A Heuristic Approach for Tuning Model Predictive Controller*, 2009. Vol. 11(No. 1): 8 - 14.



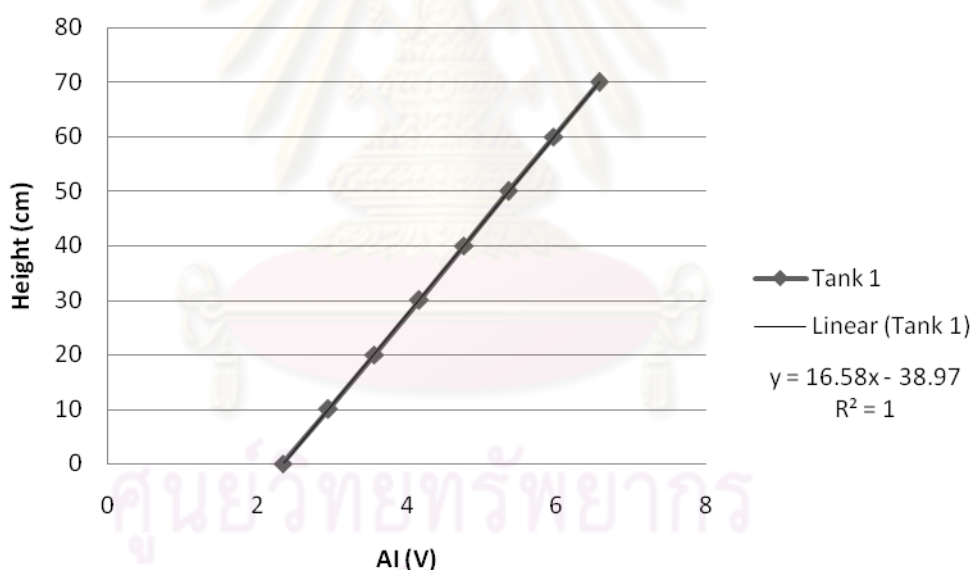
ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

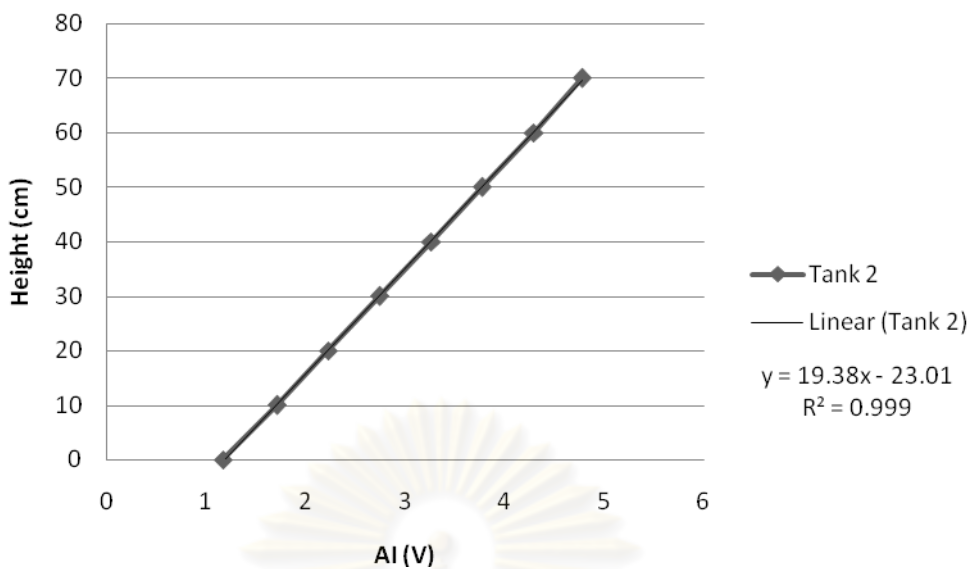
ภาคผนวก ก

การสอบเทียบอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดัน

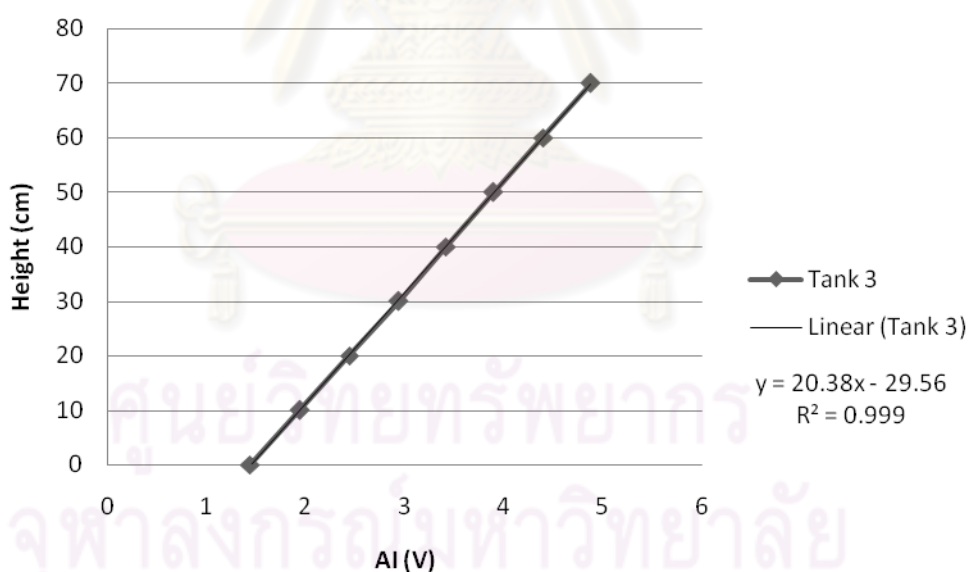
ในการใช้งานอุปกรณ์ใดๆก็ตาม ต้องมีการสอบเทียบอุปกรณ์ก่อนทุกครั้ง ในภาคผนวกนี้จะแสดงวิธีการและผลการสอบเทียบอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดัน (Pressure transmitter) ที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันที่ใช้มีทั้งสิ้น 4 ตัว ติดตั้งไว้ที่กันตั้งแต่ละใบ เมื่อวัดแรงดันของน้ำแล้วอุปกรณ์จะส่งสัญญาณทางไฟฟ้าเป็นกระแสในย่าน 4 – 20 mA ซึ่งจะถูแปลงเป็นค่าแรงดันทางไฟฟ้าผ่านทางอุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้า (Current transmitter) เพื่อแปลงเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าผ่านเครื่องควบคุมแบบกระจายส่วนที่ติดต่อกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์อีกที ดังนั้นค่าที่ส่งมาจากอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันที่อ่านได้จากในโปรแกรมแมทแลปเป็นค่าแรงดันในหน่วย V นั่นเอง โดย ณ ที่ความสูงหนึ่งๆ จะอ่านแรงดันไฟฟ้าได้ค่าหนึ่ง และแต่อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันแต่ละตัวก็จะอ่านค่าได้ไม่เท่ากัน จึงต้องสอบเทียบเฉพาะเครื่องมีวัดนั้นๆไป ดังแสดงกราฟในภาพที่ ก.1 ถึงภาพที่ ก.4



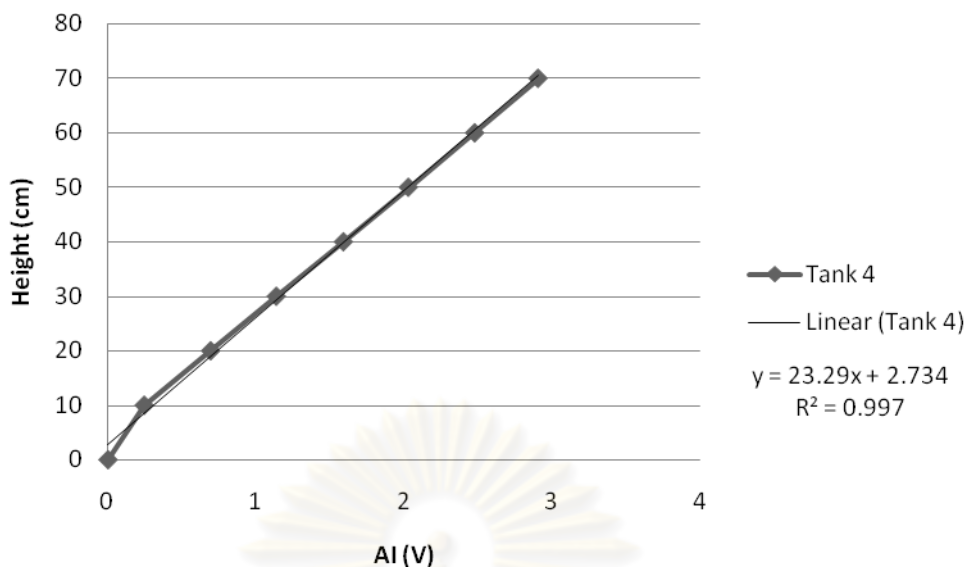
ภาพที่ ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำในถังที่ 1 กับค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดัน



ภาพที่ ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำในถังที่ 2
กับค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดัน



ภาพที่ ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำในถังที่ 3
กับค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดัน



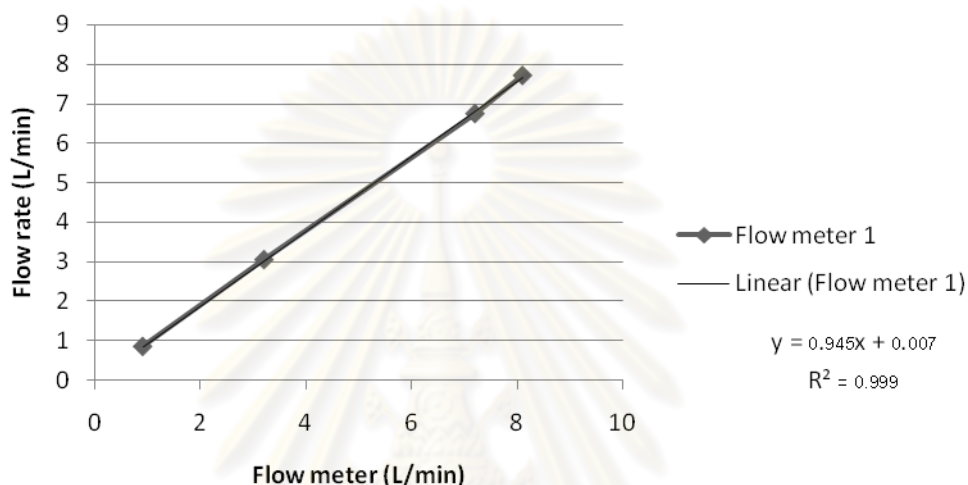
ภาพที่ ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำในถังที่ 4
กับค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดัน

จากภาพที่ ก.1 ถึงภาพที่ ก.4 พบว่ากราฟระหว่างระดับน้ำในถังแต่ละใบกับค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง จากนั้นจึงนำสมการเส้นแนวโน้ม (Trendline) ไปใช้แทนค่าสำหรับตรวจวัดระดับน้ำในถังที่เวลาต่างๆ

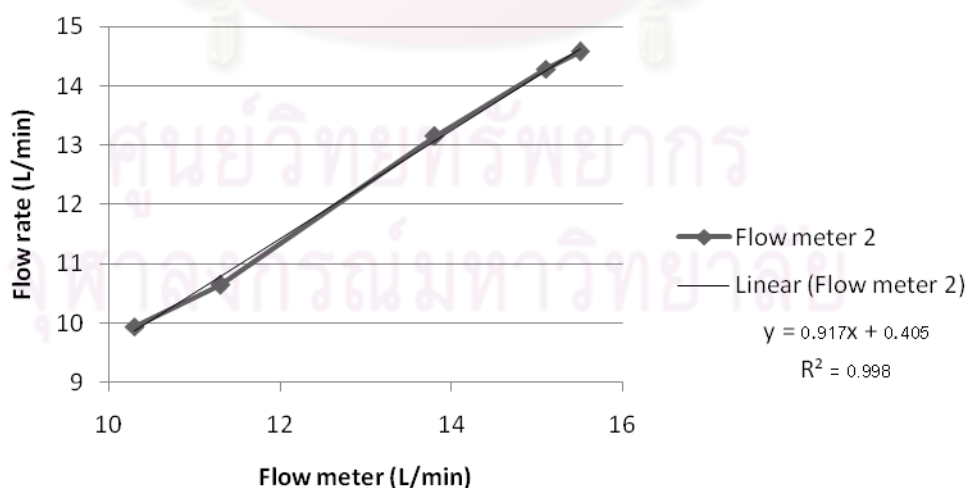
ภาคผนวก ข

การสอบเทียบเครื่องมือวัดอัตราการไหล

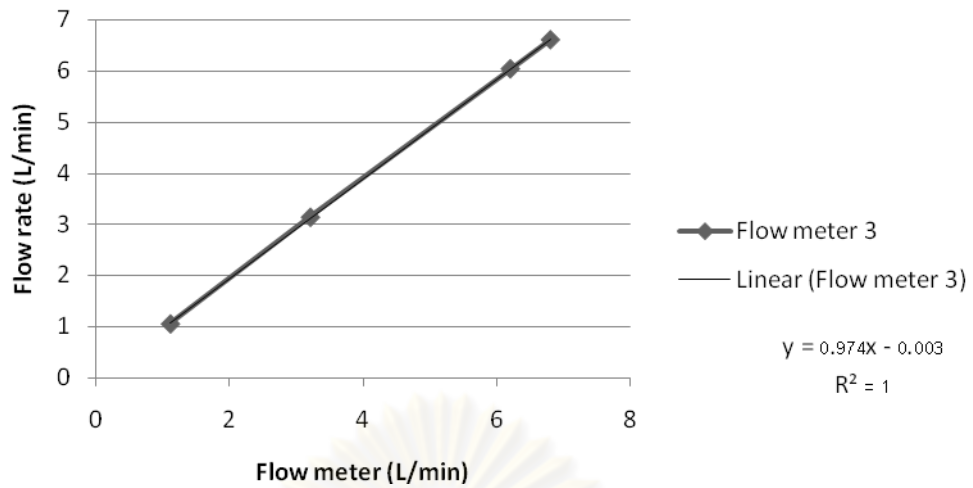
เครื่องมือวัดอัตราการไหลที่ใช้จะต้องสอบเทียบเครื่องมือวัด โดยผลแสดงได้ดังภาพที่ ข.1 ถึงภาพที่ ข.4 จะเห็นว่าแม่อัตราการไหลที่วัดได้ใกล้เคียงกับอัตราการไหลจริงก็ยังคงต้องมีการสอบเทียบเสียก่อนเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องสำหรับการทดลอง



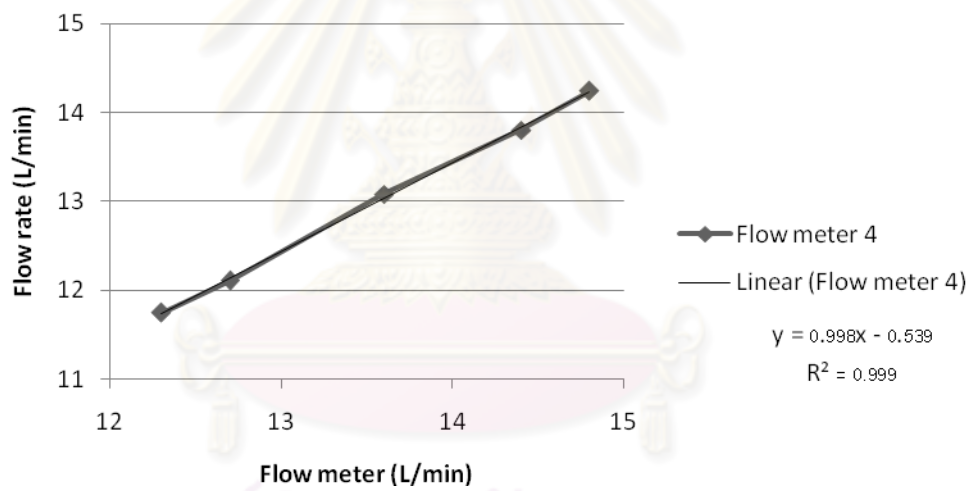
ภาพที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลสู่ถังที่ 1 กับค่าจากเครื่องมือวัด



ภาพที่ ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลสู่ถังที่ 2 กับค่าจากเครื่องมือวัด



ภาพที่ ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลสูงถึงที่ 3 กับค่าจากเครื่องมือวัด



ภาพที่ ข.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลสูงถึงที่ 4 กับค่าจากเครื่องมือวัด

ภาคผนวก ค

ข้อมูลการหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วได้ถัง

วาล์วที่นำมาใช้ติดได้ตั้งแต่ละใบเป็นวาล์วพีวีซีชนิดบอลวาล์ว (Ball valve) จะหาสมการที่ใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วได้จากสมการที่ ค.1 ดังแสดง โดยสมการนี้พิสูจน์มาจากสมการของแบร์นูลลี เมื่อเทียบรูปแบบสมการที่ (ค.1) กับสมการเชิงเส้นในเทอมความสัมพันธ์ระหว่าง x กับ y ที่มีความชันเป็น m และจุดตัดแกน y เป็น c ดังสมการที่ (ค.2) พบว่าเมื่อเราสร้างสมการเชิงเส้นโดยกำหนดให้ F_{cv} เป็นแกน y และ \sqrt{h} เป็นแกน x ดังสมการ (ค.3) จะได้สมการสำหรับหา m ที่อยู่ในพจน์ของความชันดังสมการที่ (ค.4)

$$F_{cv,i} = C_{v,cvi} \sqrt{\frac{\rho g h_i}{G_f}} \quad (\text{ค.1})$$

$$y = mx + c \quad (\text{ค.2})$$

ซึ่งสามารถสรุปได้ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์วได้ถังทั้งสี่ตัวได้ดังตารางที่ 6.1

$$F_{cv,i} = m\sqrt{h_i} \quad (\text{ค.3})$$

$$m = C_{v,cvi} \sqrt{\frac{\rho g}{G_f}} \quad (\text{ค.4})$$

ค่าอัตราการไหลของน้ำที่ระดับน้ำต่างๆที่ผ่านวาล์วได้ถังแต่ละใบสามารถหาได้จากกราฟทดลองแสดงผลในตารางที่ ค.1 ส่วนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำและค่า \sqrt{h} ของวาล์วได้ถังแต่ละตัว จากนั้นนำค่าความชันที่ได้ไปหา $C_{v,cv}$ ของวาล์วแต่ละตัว และนำค่าที่ได้ไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การไหลของวาล์ว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.1 ค่าอัตราการไหลของน้ำที่ระดับน้ำต่างๆผ่านวาล์วได้ถึง

ระดับน้ำ (cm)	อัตราการไหล CV1 (L/min)	อัตราการไหล CV2 (L/min)	อัตราการไหล CV3 (L/min)	อัตราการไหล CV4 (L/min)
75	4.23	25.62	4.58	25.35
70	3.96	24.43	4.36	23.12
65	3.81	23.94	4.51	23.70
60	3.58	24.69	4.19	22.15
55	3.52	23.01	4.02	21.16
50	3.38	21.35	3.84	20.52
45	3.35	20.52	3.80	18.44
40	3.16	19.43	3.57	18.16
35	2.98	18.74	3.41	18.59
30	2.85	16.07	3.19	16.01
25	2.63	16.23	2.98	14.32

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

วิธีการทำแบบจำลองให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น

เนื่องจากกระบวนการสี่ถังในงานวิจัยนี้ เมื่อเขียนอธิบายด้วยสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะพบว่ามีความไม่เป็นเชิงเส้นอยู่ด้วย ดังนั้นจึงมีการใช้วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น (linearization) เพื่อแปลงสมการแบบจำลองให้อยู่ในรูปเชิงเส้น โดยสมการเริ่มต้นที่ใช้สำหรับกระบวนการสี่ถังเป็นสมการที่ (ง.1) ถึง (ง.4) โดยตัวแปร a_i , b_i , c_i และ d_i คือค่าคงที่ในสมการ และสมการเริ่มต้นสำหรับการแปลงให้อยู่ในรูปเชิงเส้นคือสมการที่ (ง.5) โดยที่ค่า \bar{h}_1 , \bar{h}_2 , \bar{h}_3 , \bar{h}_4 , \bar{u}_1 และ \bar{u}_2 คือตัวแปรในสภาวะคงที่

$$\frac{dh_1}{dt} = a_1 u_2^4 + a_2 u_2^3 + a_3 u_2^2 + a_4 u_2 - a_5 \sqrt{h_1} \quad (\text{ง.1})$$

$$\frac{dh_2}{dt} = b_1 u_1^4 + b_2 u_1^3 + b_3 u_1^2 + b_4 u_1 + b_5 + b_6 \sqrt{h_1} - b_7 \sqrt{h_2} \quad (\text{ง.2})$$

$$\frac{dh_3}{dt} = c_1 u_1^4 + c_2 u_1^3 + c_3 u_1^2 + c_4 u_1 - c_5 \sqrt{h_3} \quad (\text{ง.3})$$

$$\frac{dh_4}{dt} = d_1 u_2^4 + d_2 u_2^3 + d_3 u_2^2 + d_4 u_2 + d_5 + d_6 \sqrt{h_3} - d_7 \sqrt{h_4} \quad (\text{ง.4})$$

$$\begin{aligned} \frac{df}{dt} [h_1(t), h_2(t), h_3(t), h_4(t), u_1(t), u_2(t)] &\approx \bar{f} + \frac{\partial f}{\partial h_1} (h_1 - \bar{h}_1) + \frac{\partial f}{\partial h_2} (h_2 - \bar{h}_2) \\ &+ \frac{\partial f}{\partial h_3} (h_3 - \bar{h}_3) + \frac{\partial f}{\partial h_4} (h_4 - \bar{h}_4) + \frac{\partial f}{\partial u_1} (u_1 - \bar{u}_1) + \frac{\partial f}{\partial u_2} (u_2 - \bar{u}_2) \quad (\text{ง.5}) \end{aligned}$$

สำหรับถังที่ 1 จากสมการ (ง.5) จัดรูปได้เป็น (ง.6)

$$\begin{aligned} \frac{df_1}{dt} &= a_1 \bar{u}_2^4 + a_2 \bar{u}_2^3 + a_3 \bar{u}_2^2 + a_4 \bar{u}_2 - a_5 \sqrt{\bar{h}_1} \\ &+ \left(\frac{-a_5}{2\sqrt{\bar{h}_1}} \right) (h_1 - \bar{h}_1) + (4a_1 \bar{u}_2^3 + 3a_2 \bar{u}_2^2 + 2a_3 \bar{u}_2 + a_4) (u_2 - \bar{u}_2) \quad (\text{ง.6}) \end{aligned}$$

สำหรับถังที่ 2 จากสมการ (ง.5) จัดรูปได้เป็น (ง.7)

$$\begin{aligned} \frac{df_2}{dt} &= b_1 \bar{u}_1^4 + b_2 \bar{u}_1^3 + b_3 \bar{u}_1^2 + b_4 \bar{u}_1 + b_5 + b_6 \sqrt{\bar{h}_1} - b_7 \sqrt{\bar{h}_2} \\ &+ \left(\frac{b_6}{2\sqrt{\bar{h}_1}} \right) (h_1 - \bar{h}_1) + \left(\frac{-b_7}{2\sqrt{\bar{h}_2}} \right) (h_2 - \bar{h}_2) + (4b_1 \bar{u}_1^3 + 3b_2 \bar{u}_1^2 + 2b_3 \bar{u}_1 + b_4) (u_1 - \bar{u}_1) \quad (\text{ง.7}) \end{aligned}$$

สำหรับถึงที่ 3 จากสมการ (ง.5) จัดรูปได้เป็น (ง.8)

$$\begin{aligned} \frac{df_3}{dt} &= c_1 \bar{u}_1^4 + c_2 \bar{u}_1^3 + c_3 \bar{u}_1^2 + c_4 \bar{u}_1 - c_5 \sqrt{\bar{h}_3} \\ &+ \left(\frac{-c_5}{2\sqrt{\bar{h}_3}} \right) (h_3 - \bar{h}_3) + (4c_1 \bar{u}_1^3 + 3c_2 \bar{u}_1^2 + 2c_3 \bar{u}_1 + c_4) (u_1 - \bar{u}_1) \end{aligned} \quad (ง.8)$$

สำหรับถึงที่ 4 จากสมการ (ง.5) จัดรูปได้เป็น (ง.9)

$$\begin{aligned} \frac{df_4}{dt} &= d_1 \bar{u}_2^4 + d_2 \bar{u}_2^3 + d_3 \bar{u}_2^2 + d_4 \bar{u}_2 + d_5 + d_6 \sqrt{\bar{h}_3} - d_7 \sqrt{\bar{h}_4} \\ &+ \left(\frac{d_6}{2\sqrt{\bar{h}_3}} \right) (h_3 - \bar{h}_3) + \left(\frac{-d_7}{2\sqrt{\bar{h}_4}} \right) (h_4 - \bar{h}_4) + (4d_1 \bar{u}_2^3 + 3d_2 \bar{u}_2^2 + 2d_3 \bar{u}_2 + d_4) (u_2 - \bar{u}_2) \end{aligned} \quad (ง.9)$$

ต่อมาจะทำการสร้างสมการในรูปตัวแปรเบี่ยงเบน (deviation form) โดยกำหนดให้

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

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

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

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

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

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

เมื่อ δh_1 , δh_2 , δh_3 , δh_4 , δu_1 และ δu_2 คือรูปตัวแปรเบี่ยงเบนสมการที่สภาวะคงที่ (ง.6) ถึง (ง.9) แสดงได้ด้วยสมการ (ง.10) ถึง (ง.13)

$$0 = a_1 \bar{u}_1^4 + a_2 \bar{u}_1^3 + a_3 \bar{u}_1^2 + a_4 \bar{u}_1 - a_5 \sqrt{\bar{h}_1} \quad (ง.10)$$

$$0 = b_1 \bar{u}_1^4 + b_2 \bar{u}_1^3 + b_3 \bar{u}_1^2 + b_4 \bar{u}_1 + b_5 + b_6 \sqrt{\bar{h}_1} - b_7 \sqrt{\bar{h}_2} \quad (ง.11)$$

$$0 = c_1 \bar{u}_1^4 + c_2 \bar{u}_1^3 + c_3 \bar{u}_1^2 + c_4 \bar{u}_1 - c_5 \sqrt{\bar{h}_3} \quad (ง.12)$$

$$0 = d_1 \bar{u}_2^4 + d_2 \bar{u}_2^3 + d_3 \bar{u}_2^2 + d_4 \bar{u}_2 + d_5 + d_6 \sqrt{\bar{h}_3} - d_7 \sqrt{\bar{h}_4} \quad (ง.13)$$

ดังนั้นจะได้ว่าสมการในรูปตัวแปรเบี่ยงเบนก็คือผลต่างระหว่างค่าที่สมภาวะใดๆ กับที่สมภาวะคงที่ดังแสดงในสมการที่ (ง.14) ถึง (ง.17)

$$(ง.6) - (ง.10); \quad \frac{d}{dt}(h_1 - \bar{h}_1) = \left(\frac{-a_5}{2\sqrt{h_1}} \right) (h_1 - \bar{h}_1) + (4a_1\bar{u}_2^3 + 3a_2\bar{u}_2^2 + 2a_3\bar{u}_2 + a_4)(u_2 - \bar{u}_2) \quad (ง.14)$$

$$(ง.7) - (ง.11); \quad \frac{d}{dt}(h_2 - \bar{h}_2) = \left(\frac{b_6}{2\sqrt{h_1}} \right) (h_1 - \bar{h}_1) + \left(\frac{-b_7}{2\sqrt{h_2}} \right) (h_2 - \bar{h}_2) + (4b_1\bar{u}_1^3 + 3b_2\bar{u}_1^2 + 2b_3\bar{u}_1 + b_4)(u_1 - \bar{u}_1) \quad (ง.15)$$

$$(ง.8) - (ง.12); \quad \frac{d}{dt}(h_3 - \bar{h}_3) = \left(\frac{-c_5}{2\sqrt{h_3}} \right) (h_3 - \bar{h}_3) + (4c_1\bar{u}_1^3 + 3c_2\bar{u}_1^2 + 2c_3\bar{u}_1 + c_4)(u_1 - \bar{u}_1) \quad (ง.16)$$

$$(ง.9) - (ง.13); \quad \frac{d}{dt}(h_4 - \bar{h}_4) = \left(\frac{d_6}{2\sqrt{h_3}} \right) (h_3 - \bar{h}_3) + \left(\frac{-d_7}{2\sqrt{h_4}} \right) (h_4 - \bar{h}_4) + (4d_1\bar{u}_2^3 + 3d_2\bar{u}_2^2 + 2d_3\bar{u}_2 + d_4)(u_2 - \bar{u}_2) \quad (ง.17)$$

จัดรูปสมการใหม่และแทนค่าคงที่ต่างๆจะได้เป็น

$$\frac{d}{dt}(h_1 - \bar{h}_1) = A_1(h_1 - \bar{h}_1) + A_2(u_2 - \bar{u}_2) \quad (ง.18)$$

$$\frac{d}{dt}(h_2 - \bar{h}_2) = B_1(h_1 - \bar{h}_1) + B_2(h_2 - \bar{h}_2) + B_3(u_1 - \bar{u}_1) \quad (ง.19)$$

$$\frac{d}{dt}(h_3 - \bar{h}_3) = C_1(h_3 - \bar{h}_3) + C_2(u_1 - \bar{u}_1) \quad (ง.20)$$

$$\frac{d}{dt}(h_4 - \bar{h}_4) = D_1(h_3 - \bar{h}_3) + D_2(h_4 - \bar{h}_4) + D_3(u_2 - \bar{u}_2) \quad (ง.21)$$

เมื่อแทนค่าในรูปตัวแปรเบี่ยงเบน (deviation form) จะได้

$$\frac{d\delta h_1}{dt} = A_1\delta h_1 + A_2\delta u_2 \quad (ง.22)$$

$$\frac{d\delta h_2}{dt} = B_1\delta h_1 + B_2\delta h_2 + B_3\delta u_1 \quad (ง.23)$$

$$\frac{d\delta h_3}{dt} = C_1\delta h_3 + C_2\delta u_1 \quad (\text{ง.24})$$

$$\frac{d\delta h_4}{dt} = D_1\delta h_3 + D_2\delta h_4 + D_3\delta u_2 \quad (\text{ง.25})$$

โดยที่

$$\begin{aligned} A_1 &= \left(\frac{-a_5}{2\sqrt{h_1}} \right) & A_2 &= (4a_1\bar{u}_2^3 + 3a_2\bar{u}_2^2 + 2a_3\bar{u}_2 + a_4) \\ B_1 &= \left(\frac{b_6}{2\sqrt{h_1}} \right) & B_2 &= \left(\frac{-b_7}{2\sqrt{h_2}} \right) & B_3 &= (4b_1\bar{u}_1^3 + 3b_2\bar{u}_1^2 + 2b_3\bar{u}_1 + b_4) \\ C_1 &= \left(\frac{-c_5}{2\sqrt{h_3}} \right) & C_2 &= (4c_1\bar{u}_1^3 + 3c_2\bar{u}_1^2 + 2c_3\bar{u}_1 + c_4) \\ D_1 &= \left(\frac{d_6}{2\sqrt{h_3}} \right) & D_2 &= \left(\frac{-d_7}{2\sqrt{h_4}} \right) & D_3 &= (4d_1\bar{u}_2^3 + 3d_2\bar{u}_2^2 + 2d_3\bar{u}_2 + d_4) \end{aligned}$$

และเมื่อเขียนให้อยู่ในรูปสมการตัวแปรสแตท (State space) จะได้ดังสมการที่ (ง.26)

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta h}_1 \\ \dot{\delta h}_2 \\ \dot{\delta h}_3 \\ \dot{\delta h}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & 0 & 0 \\ B_1 & B_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & D_1 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta h_1 \\ \delta h_2 \\ \delta h_3 \\ \delta h_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & A_2 \\ B_3 & 0 \\ C_2 & 0 \\ 0 & D_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta u_1 \\ \delta u_2 \end{bmatrix} \quad (\text{ง.26})$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

วิธีหาวิเคราะห์ค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การวิเคราะห์ค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Integral of the absolute value of error, IAE) ในการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมแบบต่างๆ เนื่องจากกระบวนการที่มีความคลาดเคลื่อนจากค่าเป้าหมายนี้มีขนาดความผิดพลาดน้อย จึงสามารถใช้วิธี IAE ได้ การหาค่า IAE แสดงได้ดังสมการ (จ.1)

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

เมื่อ $e(t) = r(t) - c(t)$ (จ.2)

โดยที่ $r(t)$ คือ ค่าเป้าหมาย (set point) เป็นค่าที่ต้องการสำหรับตัวแปรควบคุม
 $c(t)$ คือ ค่าของตัวแปรควบคุมที่วัดได้ (controlled variable)
 $e(t)$ คือ ค่าความผิดพลาด (error)

ในกรณีที่ระบบถูกรบกวนจะพบค่าความผิดพลาดแสดงได้ดังภาพที่ จ.1 โดยพื้นที่สีเทาทั้งหมดจะนำมาคำนวณค่า IAE



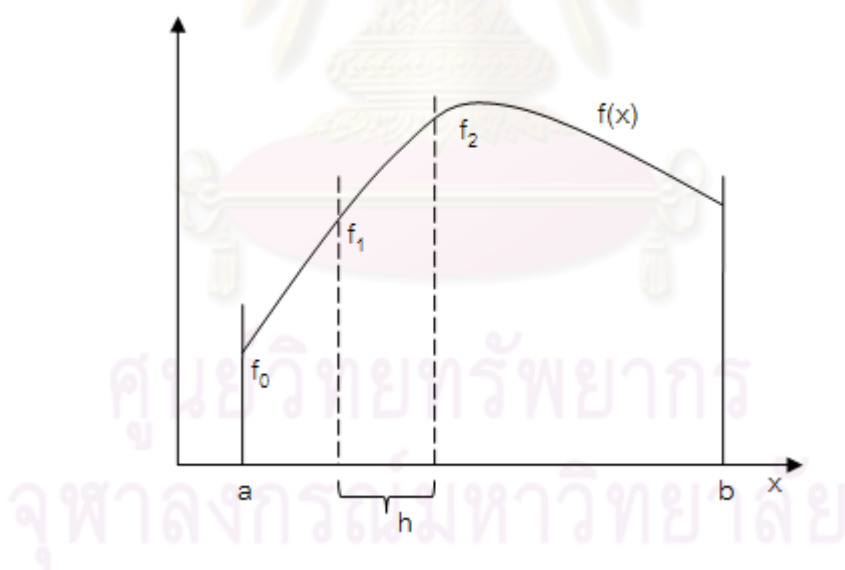
ภาพที่ จ.1 ค่าความผิดพลาดในกรณีมีการรบกวนระบบ

เนื่องจากการหาค่า IAE เป็นการหาพื้นที่ใต้กราฟโดยวิธีการอินทิเกรต แต่ข้อมูลที่มีอยู่เป็นค่าที่ไม่ต่อเนื่องไม่สามารถอินทิเกรตโดยตรงได้ต้องมีการประมาณค่าเสียก่อน วิธีเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการประมาณค่าอินทิกรัลมีหลายวิธีด้วยกัน ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้หลักเกณฑ์ซิมป์สัน 1/3 (Simpson's 1/3 rule) ดังสมการ (๑.3) และสามารถแบ่งช่วงการอินทิเกรตได้เป็นสมการที่ (๑.4) ซึ่งแสดงการแบ่งช่วงสำหรับอินทิเกรตด้วยหลักเกณฑ์ซิมป์สัน 1/3 ได้ดังภาพที่ ๑.2

$$I = h \int_a^b f(x) dx \quad (๑.3)$$

- โดยที่ $f(x)$ คือ สมการที่ต้องการหาค่าอินทิเกรต
 h คือ ช่วงการอินทิเกรต (ในที่นี้คือเวลาในการสุ่มตัวอย่าง)
 a คือ ขอบเขตล่างของการอินทิเกรต
 b คือ ขอบเขตบนของการอินทิเกรต

$$I = \frac{1}{3}h(f_0 + 4f_1 + 2f_2 + 4f_3 + \dots + 4f_{n-1} + f_n) \quad (๑.4)$$



ภาพที่ ๑.2 การอินทิเกรตฟังก์ชัน $f(x)$ ด้วยหลักเกณฑ์ซิมป์สัน 1/3

ภาคผนวก จ

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ผลรวมความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์

ในหัวข้อนี้จะแสดงค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Integral of the absolute value of the error, IAE) ของการควบคุมในกรณีต่างๆดังต่อไปนี้

จ.1 การควบคุมระดับน้ำของถังที่ 1 และถังที่ 2

ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบการควบคุมในกรณีกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 1 และถังที่ 2 แสดงได้ดังตารางที่ จ.1

ตารางที่ จ.1 ค่า IAE ของการควบคุมแบบ PID, MPC และ NMPC ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 10 วินาที ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 1 และถังที่ 2

ตัวควบคุม	PID	MPC	NMPC
ถังที่ 1	3.833	2.985	1.710
ถังที่ 2	6.408	5.311	4.538

จ.2 การควบคุมระดับน้ำของถังที่ 3 และถังที่ 4

ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบการควบคุมในกรณีกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 3 และถังที่ 4 แบบต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ จ.2 ถึงตารางที่ จ.6

ตารางที่ จ.2 ค่า IAE ของการควบคุมแบบ PID ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างต่างๆ ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 3 และถังที่ 4

เวลาในการสุ่มตัวอย่าง	6 วินาที	8 วินาที	10 วินาที
ถังที่ 3	4.652	4.739	4.828
ถังที่ 4	7.051	7.118	7.437

ตารางที่ ๑.3 ค่า IAE ของการควบคุมแบบ MPC ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างต่างๆ ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 3 และถังที่ 4

เวลาในการสุ่มตัวอย่าง	6 วินาที	8 วินาที	10 วินาที
ถังที่ 3	3.950	4.236	4.456
ถังที่ 4	6.988	7.001	7.415

ตารางที่ ๑.4 ค่า IAE ของการควบคุมแบบ PID, MPC และ NMPC ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 10 วินาที ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 3 และถังที่ 4

ตัวควบคุม	PID	MPC	NMPC
ถังที่ 3	4.828	4.456	2.526
ถังที่ 4	7.437	7.415	5.092

ตารางที่ ๑.5 ค่า IAE ของการควบคุมแบบ NMPC ที่ค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุมต่างๆ ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 3 และถังที่ 4

ค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุม	20 วินาที	30 วินาที	40 วินาที
ถังที่ 3	2.526	2.483	1.962
ถังที่ 4	5.092	4.954	4.718

ตารางที่ ๑.6 ค่า IAE ของการควบคุมแบบ NMPC ที่ค่าการแบ่งช่วงเวลาในการหอบติไมซ์ต่างๆ ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 3 และถังที่ 4

การแบ่งช่วงเวลาในการหอบติไมซ์	8 ช่วง	12 ช่วง	16 ช่วง
ถังที่ 3	2.586	2.502	2.526
ถังที่ 4	5.475	5.326	5.092

จ.3 การควบคุมระดับน้ำของถังที่ 2 และถังที่ 4

ข้อมูลผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบการควบคุมในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 2 และถังที่ 4 แบบต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ จ.7 ถึงตารางที่ จ.11

ตารางที่ จ.7 ค่า IAE ของการควบคุมแบบ PID ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างต่างๆ ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 2 และถังที่ 4

เวลาในการสุ่มตัวอย่าง	6 วินาที	8 วินาที	10 วินาที
ถังที่ 2	7.195	8.041	9.029
ถังที่ 4	5.446	5.506	5.743

ตารางที่ จ.8 ค่า IAE ของการควบคุมแบบ MPC ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่างต่างๆ ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 2 และถังที่ 4

เวลาในการสุ่มตัวอย่าง	6 วินาที	8 วินาที	10 วินาที
ถังที่ 2	5.075	5.286	5.873
ถังที่ 4	2.537	4.150	4.555

ตารางที่ จ.9 ค่า IAE ของการควบคุมแบบ PID, MPC และ NMPC ที่เวลาในการสุ่มตัวอย่าง 10 วินาที ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 2 และถังที่ 4

ตัวควบคุม	PID	MPC	NMPC
ถังที่ 2	9.029	5.873	5.127
ถังที่ 4	5.743	4.555	2.342

ตารางที่ จ.10 ค่า IAE ของการควบคุมแบบ NMPC ที่ค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุมต่างๆ ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถังที่ 2 และถังที่ 4

ค่าขอบเขตเวลาในการทำนายและควบคุม	20 วินาที	30 วินาที	40 วินาที
ถังที่ 2	5.127	4.809	4.709
ถังที่ 4	2.342	1.320	1.112

ตารางที่ ค.11 ค่า IAE ของการควบคุมแบบ NMPC ที่ค่าการแบ่งช่วงเวลาในการหอปติไมซ์ต่างๆ
ในกรณีการควบคุมระดับน้ำถึงที่ 2 และถึงที่ 4

การแบ่งช่วงเวลาในการหอปติไมซ์	8 ช่วง	12 ช่วง	16 ช่วง
ถึงที่ 2	4.928	4.968	5.127
ถึงที่ 4	1.906	2.315	2.342



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ช

ชุดคำสั่งที่ใช้ในการควบคุมระบบสี่ถังด้วยตัวควบคุมต่างๆ

ในหัวข้อนี้จะแสดงตัวอย่างชุดคำสั่งที่ใช้ในการควบคุมระบบสี่ถังด้วยตัวควบคุม

แบบ PID, MPC และ NMPC

ช.1 ชุดคำสั่งของตัวควบคุมแบบ PID ในการควบคุมระดับน้ำของถังที่ 1 และถังที่ 2

%PID controller

```

ai=analoginput('nidaq','Dev1');
addchannel(ai,0:3);
ao=analogoutput('nidaq','Dev1');
addchannel(ao,0:1);

MVss=[3 3];
putsample(ao,MVss);
setpt = [0.30 0.27]; %control tank1 and tank2
Kc = [-1.35 1.3]; %T2 T1
Ti = [17.9 26.7]; %increase to decrease oscillation
sum =[0 0];
samp = 10; %sampling time (sec)
final = 8*60/samp+1; %final time
uss = [0.50 0.50]; %percent valve
MVss = 4*uss+1; %volt
p = zeros(final,4);
q = zeros(final,2);
tt = zeros(final,1);

for j = 1:5
temp = getsample(ai);
x(j,1) = 16.51*temp(1)-28.61;
x(j,2) = 19.38*temp(2)-23.01;
x(j,3) = 20.3*temp(3)-18.25;
x(j,4) = 23.29*temp(4)+2.734;
end
x = median(x);
x = x/100;

uu = uss*100;
i=1;
for j=1:4
p(i,j)=x(1,j);
end

for j=1:2
q(i,j)=uu(1,j);
end
tt(i) = i;

for i = 2:final
i

```

```

y = x;
e = [setpt(1)-y(1) setpt(2)-y(2)]; %control tank1 and
tank2
sum = sum + e*samp;
u(1)=uss(1)+ Kc(1)*e(2) + sum(2)*Kc(1)/Ti(1); %ctrl valve1
effect for tank2
u(2)=uss(2)+ Kc(2)*e(1) + sum(1)*Kc(2)/Ti(2); %ctrl
valve2 effect for tank1
if (u(1)>1)
u(1)=1;
elseif (u(1)<0)
u(1)=0;
end
if (u(2)>1)
u(2)=1;
elseif (u(2)<0)
u(2)=0;
end

pause(samp);

MV = 4*u + 1;
putsample(ao,MV);

for j = 1:5
temp = getsample(ai);
x(j,1) = 16.51*temp(1)-28.61;
x(j,2) = 19.38*temp(2)-23.01;
x(j,3) = 20.3*temp(3)-18.25;
x(j,4) = 23.29*temp(4)+2.734;
end
x = median(x);
x = x/100;

%store state variable
for j=1:4
p(i,j)=x(1,j);
end
%store control variable
uu = u*100;
for j=1:2
q(i,j)=uu(1,j);
end
tt(i) = i;
end

MV = [1 1];
putsample(ao,MV);

%plot(tt,p(:,1),'-',tt,p(:,2),'-',tt,p(:,3),'-',tt,p(:,4),'-')
%plot(tt,q(:,1),'-',tt,q(:,2),'x')

```

ข.2 ชุดคำสั่งของตัวควบคุมแบบ MPC ในการควบคุมระดับน้ำของถังที่ 3 และถังที่ 4

```

% MPC controller
ai=analoginput('nidaq','Dev1');
addchannel(ai,0:3);
ao=analogoutput('nidaq','Dev1');
addchannel(ao,0:1);

MVss=[3 3];
putsample(ao,MVss);

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

C =[0 0 1 0; 0 0 0 1];
D =[0 0;0 0];

%weighting metrics
ywt = [65 55];
uwt = [25 25];
setpts = [0.30 0.29];

ulim = [0 0 1 1 0.2 0.2];
ylim = [0 0 0.8 0.8];

%sampling time
T = 10;
%controller parameter
p = 20;
%M = ...; no need because M = blocks
blocks = 20;

TankMPCsecI; %MPC control section I

% ++++ Control SECTION ++++
% Initialization of states, etc.
samp = T;
final = 8*60/T+1;
%get water level at start tank
for j = 1:5
    temp = getsample(ai);
    x(j,1) = 16.51*temp(1)-28.61;
    x(j,2) = 19.31*temp(2)-21.35;
    x(j,3) = 20.3*temp(3)-18.25;
    x(j,4) = 23.29*temp(4)+2.734;
end

```

```

x = median(x);
x = x/100;
MV = [0.5;0.5];
u = [MV(1) MV(2)];

% States of the augmented internal model.
pp = zeros(final,4);
qq = zeros(final,2);
tt = zeros(final,1);

i=1;
for j=1:4
    pp(i,j)=x(1,j);
end
uu = u*100;
for j=1:2
    qq(i,j)=uu(1,j);
end
tt(i) = i;

xi = zeros(ni+nyi,1);
IKC=eye(ni+nyi)-Kest*C;

%Control
for i=2:final
    i
    y = x;
    yp = [x(3); x(4)];
    TankMPCsecII %MPC control section II
    pause(T);

% Plant model
    for j = 1:5
        temp = getsample(ai);
        x(j,1) = 16.51*temp(1)-28.61;
        x(j,2) = 19.31*temp(2)-21.35;
        x(j,3) = 20.3*temp(3)-18.25;
        x(j,4) = 23.29*temp(4)+2.734;
    end
    x = median(x);
    x = x/100;
    u = MV';
    MVss = 4*u + 1; %volt
    putsample(ao,MVss);
    uu = u*100;

%store state variable
    for j=1:4
        pp(i,j)=x(1,j);
    end

%store control variable
    for j=1:2
        qq(i,j)=uu(1,j);
    end
    tt(i) = i;
end

```

```

MVss=[1 1];
putsample(ao,MVss);

%plot(tt,pp(:,1),'-',tt,pp(:,2),'x',tt,pp(:,3),'-
',tt,pp(:,4),'-')
%plot(tt,qq(:,1),'-',tt,qq(:,2),'x')
-----
%TankMPCsecI.m
%MPC control section I

%Continuous to Discrete state space
[phi,gam] = c2dmp(A,B,T);
minfo = [T,4,2,0,0,2,0];
%minfo(1) = dt, the sampling period.
% (2) = n, the system order (dimension of "a").
% (3) = nu, the number of manipulated inputs.
% (4) = nd, the number of measured disturbances.
% (5) = nw, the number of unmeasured disturbances.
% (6) = nym, the number of measured outputs.
% (7) = nyu, the number of unmeasured outputs.

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

% Check for errors and inconsistencies in the models.

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

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

if isempty(uwt),

```



```

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

if isempty(setpts)
    nset=1;
    setpts=zeros(1,nyi);
else
    [nset,ncol]=size(setpts);
    if ncol ~= nyi
        error('Setpoint input matrix has incorrect dimensions')
    end
end

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

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

        if blocks > p
            disp('WARNING: M > P. Truncated.')
            nb=p;
        elseif blocks <= 0
            disp('WARNING: M <= 0. Set = 1.')
            nb=1;
        else
            nb=blocks;
        end
        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:nyl];
% Points to columns of ylim containing ymin.
iymax=iymin+nyl;
% 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(:,iymax)-ulim(:,iumin) < 0))
            error('A lower bound on U was greater than its
upper bound')
        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(:,iymax)-ylim(:,iymin) < 0))
            error('A lower bound on y was greater than its upper
bound')
        end
    end
else
    ylim=[-inf*ones(1,nyi) inf*ones(1,nyi)];
end

if nargin > 10
    if isempty(Kest)
        Kest=[zeros(ni,nymi)
            eye(nymi)
            zeros(nyui,nymi)];
    else
        [nrow,ncol]=size(Kest);
        if nrow ~= ni+nyi | ncol ~= nymi
            error('Estimator gain matrix is wrong size')
        end
    end
else
    Kest=[zeros(ni,nymi)
        eye(nymi)
        zeros(nyui,nymi)];
end
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.ingamma.
iym=[1:nyimi]; % 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=nyip; % 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=nyip+1;
r2=2*nyip;
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+nyip;
    r2=r2+nyip;
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
% nyip) 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:pny,k+1:k+nui)=Su(1:pny-row0,1:nui);
        Sdel(row1+1:mnu,k+1:k+nui)=Sdel(1:mnu-row1,1:nui);
        k=k+nui;
    end
end

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

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

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

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

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

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

umin=ulim(:,iumin)';
umin=umin(:); % Stretches the matrix out into one long column
umax=ulim(:,iumax)';
umax=umax(:);
dumax=ulim(:,idumax)';
dumax=dumax(:);
ymin=ylim(:,iymin)';

```

```

ymin=ymin(:);
ymax=ylim(:,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
-----

```

```

%TankMPCsecII.m
%MPC control section II
%MPC control section II
    yptrue = yp;
    ypnew = yptrue;           % current measured plant
outputs
    setpt = setpts(min(i,nset),:); % current setpoints

% Calculate starting basis vector for the QP

    xi=IKC*xi+Kest*ypnew; % measurement update for state
estimator.
    y0=Sx*xi;
    if nvi > 0
        y0=y0 + Sv0*deltav;
    end
    rhsa=a+SuTQ*(eyep*setpt-y0);

% Update the RHS of the inequality constraints

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

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

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

% Set up and solve the QP;

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

ศูนย์วิทยุโทรพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```

        disp(['Step = ',int2str(i)])
        disp('Simulation terminating prematurely!')
        break
    end
    deltau=[];
    for j=1:nui

```



```

        if il(j) <= 0
            deltau(j,1)=-dumax(j,1);
        else
            deltau(j,1)=basis(il(j))-dumax(j,1);
        end
    end
    MV = deltau + MV;

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

```

ข.3 ชุดคำสั่งของตัวควบคุมแบบ NMPC ในการควบคุมระดับน้ำของถังที่ 2 และถังที่ 4

```

%NMPC controller
global ICx u res5;

samp = 10; %sampling time (sec)
final = 49; %final time

x = [0.30 0.27 0.30 0.29];
x = [0.30 0.40 0.30 0.29]; %disturbance change
u = [0.5 0.5];
ICx = zeros(1,5);
p = zeros(final,4);
q = zeros(final,2);
tt = zeros(final,1);

ywt = [500 500];
uwt = [5 5];
setpt = [0.27 0.29];
ywwt1 = num2str(ywt(1));
ywwt2 = num2str(ywt(2));
uwwt1 = num2str(uwt(1));
uwwt2 = num2str(uwt(2));
OBJ = {'yt1*(y(2)-0.27)^2+yt2*(y(4)-0.29)^2+ut1*(u(1)-
0.5)^2+ut2*(u(2)-0.5)^2'};
yw1 = strrep(OBJ,'yt1',ywwt1);
yw2 = strrep(yw1,'yt2',ywwt2);
uw1 = strrep(yw2,'ut1',uwwt1);
uw2 = strrep(uw1,'ut2',uwwt2);
OBJ = uw2;

i=1
uu = u*100;
for j=1:4
    p(i,j)=x(1,j);
end

for j=1:2
    q(i,j)=uu(1,j);
end
tt(i) = i;

```

```

for i = 2:final
    i
    y = x;
    for j=1:4
        ICx(1,j) = y(size(y,1),j);
    end
    ICx(1,5) = ywt(1)*(y(2)-setpt(1))^2+ywt(2)*(y(4)-
setpt(2))^2+uwt(1)*(u(1)-0.5)^2+uwt(2)*(u(2)-0.5)^2;

    res5 = OBJ; %objective finction
    SNCtrlDis; %sent to calculate in DOTcvpSB
    w = [data.output.control(1) data.output.control(2)];

    ini = samp*(i-1);
    fin = samp*(i-1) + samp;
    [t,y] = odel5s(@(t,y) Math_Model(t,y,u)),[ini fin],y);
    x = y(size(y,1),:);%last row from ODE
    u = w;
    uu = u*100;
    for j=1:4 %store state variable
        p(i,j)=x(1,j);
    end
    for j=1:2 %store control variable
        q(i,j)=uu(1,j);
    end
    tt(i) = i;
end

%plot(tt,p(:,1),'-',tt,p(:,2),'-',tt,p(:,3),'-',tt,p(:,4),'-')
%plot(tt,q(:,1),'-',tt,q(:,2),'-')
-----
%SNCtrlDis.m
% A MATLAB simple example described in detail in the technical
report
%
%*****
% DOTcvp - Dynamic Optimization Toolbox with CVP approach for
% handling continuous and mixed-integer dynamic optimization
% problems
% Copyright (C) 2007-2010
%
% Tomas Hirmajer et al., thirmajer@gmail.com
%
% The DOTcvp toolbox is completely free of charge under the
% creative commons license. The conditions of the license can
% be found on the following web page:
%
% http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/
%*****
global ICx u res5;

clear mex; close all; %clear all;

```

```

% ----- %
% Initialization:
% ----- %
data.name          = 'TankCtrl1';

% ----- %
% Settings for IVP (ODEs, sensitivities):
% ----- %
data.odes.res(1)   = {'-0.04591880*u(2)^4+0.07074460*u(2)^3-
0.02111243*u(2)^2+0.00424347*u(2)-0.00511047*y(1)^0.5'};
data.odes.res(2)   = {'-0.00029898*u(1)^4+0.00309288*u(1)^3-
0.00396851*u(1)^2+0.00000571*u(1)+0.01394214+0.00511047*y(1)^0
.5-0.03200358*y(2)^0.5'};
data.odes.res(3)   = {'-0.03224086*u(1)^4+0.05124361*u(1)^3-
0.01721168*u(1)^2+0.00532322*u(1)-0.00578822*y(3)^0.5'};
data.odes.res(4)   = {'0.01297013*u(2)^4-0.01905420*u(2)^3
+0.00433635*u(2)^2-0.00087669*u(2)+0.01487543+
0.00578822*y(3)^0.5 -0.03033026*y(4)^0.5'};
data.odes.res(5)   = {res5};
data.odes.ic       = ICx;
data.odes.NUMs     = size(data.odes.res,2);
%number of state variables (y)
data.odes.t0       = 0; %initial time
data.odes.tf       = 20; %final time
data.odes.NonlinearSolver = 'Newton';
%['Newton'|'Functional'] /Newton for stiff problems;
%Functional for non-stiff problems
data.odes.LinearSolver   = 'Dense';
%direct ['Dense'|'Diag'|'Band']; iterative
%['GMRES'|'BiCGStab'|'TFQMR'] /for the Newton NLS
data.odes.LMM            = 'Adams';
%['Adams'|'BDF'] /Adams for non-stiff problems; BDF for stiff
%problems
data.odes.RelTol        = 1*10^(-6); %IVP relative tolerance level
data.odes.AbsTol        = 1*10^(-6); %IVP absolute tolerance level
data.sens.SensAbsTol    = 1*10^(-6);
%absolute tolerance for sensitivity variables

% ----- %
% NLP definition:
% ----- %
data.nlp.RHO          = 16; %number of time intervals
data.nlp.problem      = 'min'; %['min'|'max']
data.nlp.J0           = 'y(5)';
%cost function: min-max(cost function)
data.nlp.u0           = u; %initial value for control values
data.nlp.lb           = [0 0]; %lower bounds for control values
data.nlp.ub           = [1 1]; %upper bounds for control values
data.nlp.solver       = 'IPOPT';
%['FMINCON'|'IPOPT'|'SRES'|'DE'|'ACOMI'|'MISQP'|'MITS']
data.nlp.NLPtol       = 1*10^(-5); %NLP tolerance level
data.nlp.GradMethod   = 'SensitivityEq';
%['SensitivityEq'|'FiniteDifference'|'None']
data.nlp.MaxIter      = 100; %Maximum number of iterations
data.nlp.MaxCPUtime   = 60*60*0.25;

```

```

%Maximum CPU time of the optimization (60*60*0.25) = 15 min
data.nlp.t0Time      = [data.odes.tf/data.nlp.RHO];
%initial size of the time intervals, e.g.
%[data.odes.tf/data.nlp.RHO] or for the each time interval
%separately [dt1 dt2 dt3]
data.nlp.lbTime      = 0.01; %lower bound of the time intervals
data.nlp.ubTime      = data.odes.tf;
%upper bound of the time intervals
data.nlp.NUMc        = size(data.nlp.u0,2); %number of control
variables (u)
data.nlp.NUMi        = 0;
%number of integer variables (u) taken from the last control
%variables, if not equal to 0 you need to use some MINLP
%solver ['ACOMI'|'MISQP'|'MITS']

% ----- %
% Equality constraints (ECs):
% ----- %
data.nlp.eq.status   = 'off'; %['on' | 'off'] ECs
data.nlp.eq.NEC      = 1; %number of active ECs
data.nlp.eq.eq(1)    = {' '};
data.nlp.eq.time(1)  = data.nlp.RHO;
data.nlp.eq.PenaltyFun = 'off';
%['on' | 'off'] ECs penalty function
data.nlp.eq.PenaltyCoe = [1.0];
%J0=J0+data.nlp.eq.PenaltyCoe*ViolationOfEqualityConstraint /*
%only for stochastic solvers */

% ----- %
% Inequality /path/ constraints (INECs):
% ----- %
data.nlp.ineq.status = 'on'; %['on' | 'off'] INECs
data.nlp.ineq.NEC    = 8; %number of active INECs
data.nlp.ineq.InNUM  = 4;
%how many inequality constraints are '>' else '<'
data.nlp.ineq.eq(1)  = {'y(1)+0.0'};
data.nlp.ineq.eq(2)  = {'y(2)+0.0'};
data.nlp.ineq.eq(3)  = {'y(3)+0.0'};
data.nlp.ineq.eq(4)  = {'y(4)+0.0'};
data.nlp.ineq.eq(5)  = {'y(1)-0.8'};
data.nlp.ineq.eq(6)  = {'y(2)-0.8'};
data.nlp.ineq.eq(7)  = {'y(3)-0.8'};
data.nlp.ineq.eq(8)  = {'y(4)-0.8'};
data.nlp.ineq.Tol    = 0.0005;
%tolerance level of violation of INECs

% ----- %
% Options for setting of the final output:
% ----- %
data.options.intermediate = 'off';
%['on' | 'off' | 'silent'] display of the intermediate results
data.options.display      = 'off';
%['on' | 'off'] display of the figures
data.options.title        = 'off';
%['on' | 'off'] display of the figure title

```

```

data.options.state          = 'off';
%['on'|'off'] display of the state trajectory
data.options.control       = 'off';
%['on'|'off'] display of the control trajectory
data.options.ConvergCurve = 'off';
%['on'|'off'] display of the convergence curve
data.options.Pict_Format  = 'eps';
%['eps'|'wmf'|'both'] save figures as
data.options.report       = 'off';
%['on'|'off'] save data in the dat file
data.options.commands     = {''};
%additional commands, e.g. 'figure(1),.. '
data.options.trajectories = data.odes.NUMs;
%how many state trajectories will be displayed
data.options.profiler     = 'off'; %['on'|'off']
data.options.multistart   = 1;
%set 1 if the multistart is off, otherwise you have to put
%here some integer value

data.options.action       = 'single-optimization';
%['single-optimization'|'re-optimization'|'hybrid-
%strategy'|'simulation']

% ----- %
% Call of the main function (you do not change this!):
% ----- %
[data]=dotcvp_main(data);

```



 ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวธรรม์กมล คำณูณเศรษฐ์ เกิดวันที่ 10 สิงหาคม พ.ศ. 2530 มีภูมิลำเนาอยู่ในจังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสตรีวิทยา จากนั้นได้เข้าศึกษาในระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยสำเร็จการในปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552



ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย