

การเปรียบเทียบวิธีเซตแอกทีฟและวิธีจุดภายในสำหรับการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง
ที่ประยุกต์ใช้กับหอกลิ้นแอกสารสองชนิด

นางสาววิมลรัตน์ เอ็มอิม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

A COMPARISON OF ACTIVE SET AND INTERIOR POINT METHODS FOR
MODEL PREDICTIVE CONTROL WITH APPLICATION TO
BINARY DISTILLATION COLUMN

Miss Vimonrat Em-im

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเปรียบเทียบวิธีเซตแอกทีฟและวิธีจุดภายใน
สำหรับการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่
ประยุกต์ใช้กับหอกลิ้นแอกสารสองชนิด

โดย

นางสาววิมลรัตน์ เอ็มอัม

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ศาสตราจารย์ ดร.เดวิด บรรเจิดพงษ์ชัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานพ วงศ์สายสุวรรณ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.เดวิด บรรเจิดพงษ์ชัย)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.อิทธิเสก นิลกำแหง)

วิมลรัตน์ เอ็มอิม : การเปรียบเทียบวิธีเซตแอกทีฟและวิธีจุดภายในสำหรับการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่ประยุกต์ใช้กับหอกลั่นแยกสารสองชนิด. (A COMPARISON OF ACTIVE SET AND INTERIOR POINT METHODS FOR MODEL PREDICTIVE CONTROL WITH APPLICATION TO BINARY DISTILLATION COLUMN) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ศ.ดร.เดวิด บรรเจิดพงษ์ชัย, 83 หน้า.

การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองเป็นหนึ่งในกลยุทธ์การควบคุมกระบวนการขั้นสูงที่มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมการควบคุมแบบอัตโนมัติ เพื่อที่จะคำนวณสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุด การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองได้ถูกกำหนดให้อยู่ในรูปของปัญหาโปรแกรมกำลังสอง บางครั้งการแก้ปัญหาคำเหมาะที่สุดใช้เวลาการคำนวณมากกว่าเวลาซีกตัวอย่าง ซึ่งทำให้การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองถูกจำกัดอยู่ในกระบวนการที่มีผลตอบสนองช้าเท่านั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการพัฒนาการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองเพื่อลดเวลาการคำนวณ ผลงานวิจัยแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกประกอบด้วยจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่ประยุกต์ใช้กับหอกลั่นและกระบวนการควบคุมระดับของเหลว เราเปรียบเทียบผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมที่คำนวณจากวิธีเซตแอกทีฟกับวิธีจุดภายใน ผลปรากฏว่าทั้งสองวิธีสามารถควบคุมกระบวนการได้ตามที่ต้องการและเวลาการคำนวณน้อยกว่าเวลาซีกตัวอย่าง นอกจากนี้การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่อาศัยวิธีเซตแอกทีฟยังเร็วกว่าการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่อาศัยวิธีจุดภายใน ในส่วนที่สองเรานำการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่อาศัยวิธีเซตแอกทีฟมาดำเนินการลงบนระบบควบคุมแบบกระจายตัว และประยุกต์การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองกับกระบวนการควบคุมระดับของเหลว ผลปรากฏว่าการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่อาศัยวิธีเซตแอกทีฟสามารถควบคุมกระบวนการควบคุมระดับของเหลวและติดตามสัญญาณเข้าอ้างอิงได้ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับการควบคุมแบบพีไอดี การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่อาศัยวิธีเซตแอกทีฟให้ผลตอบสนองเร็วกว่าและสัญญาณควบคุมยังสอดคล้องกับขอบเขตเงื่อนไขบังคับด้วย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ.....อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2555.....

5270695221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : MODEL PREDICTIVE CONTROL / INTERIOR POINT METHOD / ACTIVE SET METHOD / ADVANCE PROCESS CONTROL

VIMONRAT EM-IM : A COMPARISON OF ACTIVE SET AND INTERIOR POINT METHODS FOR MODEL PREDICTIVE CONTROL WITH APPLICATION TO BINARY DISTILLATION COLUMN. ADVISOR : PROF. DAVID BANJERDPONGCHAI, Ph.D., 83 pp.

Model Predictive Control (MPC) is one of the advanced process control strategies that play an important role in industrial control automation. In order to compute the optimal control signal, MPC is formulated as quadratic program problems. Sometimes, solving the optimization problems takes more computational time than the sampling time, which causes limitation of MPC to only slow response processes. This thesis presents the development of MPC in order to decrease the computational time. This research results are divided into two parts. The first part consists of computer simulation of MPC with application to the distillation column and the liquid level control process. We compare the output responses and control inputs computed by the active set and the interior point methods. The results show that both algorithms can control process with satisfaction and the computational time is less than the sampling time. Moreover, MPC using the active set method appears to be faster than MPC using the interior point method. In the second part, we implement MPC using the active set method on the distributed control systems (DCS) and apply MPC to the liquid level control process. The results show that MPC using the active set method can control the liquid level control process and track the reference inputs. When comparing with PID control, MPC using the active set method gives faster responses and the control inputs satisfy the bounding constraints.

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

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

Academic Year : 2012.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือของศาสตราจารย์ ดร.เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้สละเวลาให้คำแนะนำ สั่งสอนและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่ทำให้มีมุมมองและแนวความคิดในการทำวิจัย วิทยานิพนธ์ รวมทั้งแนวการดำเนินชีวิต ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานพ วงศ์สายสุวรรณ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.อิทธิเสก นิลกำแหง กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาตรวจสอบและให้คำแนะนำ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในสาขาระบบควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ได้ประสิทธิประสาทความรู้พื้นฐานในวิชาทางระบบควบคุม อันเป็นพื้นฐานในการศึกษาและทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ถาวร เบญจนราสุทธิ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมระดับปริญญาตรี ที่ได้ประสิทธิประสาทความรู้ในวิชาพื้นฐานทางศาสตร์ของระบบควบคุม รวมทั้งให้คำแนะนำ และส่งเสริมให้ผู้วิจัยได้มีโอกาสศึกษาต่อในระดับปริญญาโท

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่เป็นกำลังใจสำคัญ เข้าใจ คอยส่งเสริม และให้ความกรุณาदानทุนทรัพย์ รวมทั้งให้โอกาสผู้วิจัยได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท

ขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ รุ่นน้องในห้องปฏิบัติการระบบควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่คอยให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา และกำลังใจ จนผู้วิจัยสามารถทำวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เป็นผลสำเร็จ

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทรัพยากรต่างๆ ที่มีประโยชน์ในการศึกษา และค้นคว้าวิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	4
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	5
บทที่ 2 การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 แบบจำลองปริภูมิสถานะ.....	7
2.3 การทำนายตัวแปรสถานะและสัญญาณออก.....	9
2.4 ฟังก์ชันต้นทุน.....	11
2.5 การแก้ปัญหาโปรแกรมกำลังสอง.....	11
2.5.1 วิธีเซตแอกทีฟ.....	12
2.5.2 วิธีจุดภายใน.....	14
2.6 บทสรุป.....	18
บทที่ 3 การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์.....	19
3.1 บทนำ.....	19
3.2 หอกลับแยกสารสองชนิด.....	19
3.2.1 ส่วนประกอบของหอกลับแยกสารสองชนิด.....	20

	หน้า
3.2.2 สมการพลวัตของหอกลับแยกสารสองชนิด.....	21
3.2.3 การจำลองผลหอกลับแยกสารสองชนิด.....	27
3.3 กระบวนการควบคุมระดับของเหลว.....	29
3.3.1 การระบุเอกลักษณ์ของกระบวนการควบคุมระดับของเหลว.....	30
3.3.2 การจำลองผลกระบวนการควบคุมระดับของเหลว.....	33
3.4 บทสรุป.....	35
บทที่ 4 การควบคุมกระบวนการควบคุมระดับของเหลวด้วยระบบควบคุมแบบกระจายตัว..	36
4.1 บทนำ.....	36
4.2 แบบจำลองกระบวนการควบคุมระดับของเหลว.....	36
4.2.1 การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์.....	40
4.3 ขั้นตอนในการประยุกต์งานวิจัยผ่านระบบควบคุมแบบกระจายตัว.....	47
4.3.1 การสร้างบล็อกฟังก์ชันตัวแปร.....	47
4.3.2 การสร้างบล็อกฟังก์ชันตัวควบคุม.....	49
4.3.3 การสร้างบล็อกฟังก์ชันสวิตช์.....	53
4.3.4 การสร้างกราฟฟิก.....	54
4.4 การทดลองควบคุมกระบวนการด้วยระบบควบคุมแบบกระจายตัว.....	56
4.5 บทสรุป.....	65
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	66
5.1 บทสรุป.....	66
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	67
5.2.1 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในภพหน้า.....	67
5.2.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการประยุกต์งานวิจัยลงบนดีซีเอส.....	67
รายการอ้างอิง.....	68
ภาคผนวก.....	70
ภาคผนวก ก ระบบควบคุมแบบกระจายตัว.....	71
ภาคผนวก ข การใช้งานหน่วยติดต่อและปฏิบัติงานของวิศวกร.....	74
ภาคผนวก ค การสร้างสวิตช์เลือกโปรเจกต์.....	79
ภาคผนวก ง โค้ดโปรแกรมวิธีจุดภายใน.....	81
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	83

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีแบบพีไอ.....	41

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง.....	7
2.2 ระเบียบวิธีของวิธีเซตแอกทีฟ.....	14
2.3 ระเบียบวิธี Backtracking line search.....	16
2.4 ระเบียบวิธีของทฤษฎีนิวตัน.....	17
2.5 ระเบียบวิธีของวิธีจุดภายใน.....	18
3.1 แผนภาพหอกลับแยกสารสองชนิด.....	19
3.2 แผนภาพหอกลับแยกสารสองชนิดที่ใช้คำนวณแบบจำลอง.....	21
3.3 การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุดของหอกลับแยกสารสองชนิด.....	28
3.4 สัญญาณควบคุมและผลตอบสนองของหอกลับแยกสารสองชนิด.....	28
3.5 เวลาที่ใช้คำนวณแต่ละรอบการวนซ้ำของหอกลับแยกสารสองชนิด.....	29
3.6 ลักษณะทางกายภาพของกระบวนการควบคุมระดับของเหลว.....	30
3.7 โครงสร้างกระบวนการควบคุมระดับของเหลว.....	30
3.8 ผลตอบสนองขั้นบันไดของแบบจำลองอันดับหนึ่งที่มีการหน่วงเวลา.....	32
3.9 การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการควบคุมระดับ.....	34
3.10 สัญญาณควบคุมและผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับของเหลว.....	34
3.11 เวลาที่ใช้คำนวณแต่ละรอบการวนซ้ำของกระบวนการควบคุมระดับของเหลว.....	35
4.1 กระบวนการควบคุมระดับของเหลวแบบถึงพักคู่.....	37
4.2 กระบวนการควบคุมระดับของเหลวแบบถึงพักเดี่ยว.....	38
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วควบคุม.....	39
4.4 สัญญาณควบคุมและผลตอบสนอง กรณีการปรับพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดี.....	41
4.5 สัญญาณควบคุมและผลตอบสนอง เปรียบเทียบการปรับค่า r_w กรณี $N_p = 5, N_c = 3$	42
4.6 สัญญาณควบคุมและผลตอบสนอง เปรียบเทียบการปรับค่า r_w กรณี $N_p = 5, N_c = 5$	43
4.7 สัญญาณควบคุมและผลตอบสนอง เปรียบเทียบการปรับค่า r_w กรณี $N_p = 8, N_c = 3$	43
4.8 สัญญาณควบคุมและผลตอบสนอง เปรียบเทียบการปรับค่า r_w กรณี $N_p = 8, N_c = 5$	44
4.9 เวลาในการคำนวณ เปรียบเทียบการปรับค่า r_w กรณี $N_p = 5, N_c = 3$	44
4.10 เวลาในการคำนวณ เปรียบเทียบการปรับค่า r_w กรณี $N_p = 5, N_c = 5$	45
4.11 เวลาในการคำนวณ เปรียบเทียบการปรับค่า r_w กรณี $N_p = 8, N_c = 3$	45

รูปที่	หน้า
4.12 เวลาในการคำนวณ เปรียบเทียบการปรับค่า r_w กรณี $N_p = 8, N_c = 5$	46
4.13 สัญญาณควบคุมและผลตอบสนอง เปรียบเทียบระหว่าง PID กับ MPC.....	46
4.14 หน้าต่างการวาดการควบคุม.....	48
4.15 บล็อกฟังก์ชันตัวแปร.....	48
4.16 บล็อกฟังก์ชันควบคุมประเภท SFC SW.....	49
4.17 หน้าต่างสำหรับเขียน โปรแกรม.....	49
4.18 โค้ดเพิ่มแพคเกจการคำนวณ.....	50
4.19 โค้ดรับสัญญาณ.....	51
4.20 โค้ดรับสัญญาณ.....	51
4.21 หน้าต่างสร้างฟังก์ชันเสริม.....	52
4.22 หน้าต่างสร้างบล็อกฟังก์ชันสวิตช์.....	53
4.23 หน้าต่างตารางความจริงของบล็อกฟังก์ชัน ST_SEL.....	54
4.24 หน้าต่างการสร้างกราฟฟิก.....	55
4.25 หน้าต่างกราฟฟิกสำหรับควบคุมกระบวนการควบคุมระดับ.....	55
4.26 ระเบียบวิธีการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง.....	57
4.27 ระเบียบวิธีของวิธีเซตแอกทิฟสำหรับทดลอง.....	59
4.28 เปรียบเทียบการปรับค่าตัวถ่วงน้ำหนัก กรณี $N_p = 5$ และ $N_c = 3$	60
4.29 เปรียบเทียบการปรับค่าตัวถ่วงน้ำหนัก กรณี $N_p = 5$ และ $N_c = 5$	60
4.30 เปรียบเทียบการปรับค่าตัวถ่วงน้ำหนัก กรณี $N_p = 8$ และ $N_c = 3$	61
4.31 เปรียบเทียบการปรับค่าตัวถ่วงน้ำหนัก กรณี $N_p = 8$ และ $N_c = 5$	61
4.32 เปรียบเทียบการปรับค่าตัวถ่วงน้ำหนัก กรณี $N_p = 8$ และ $N_c = 7$	62
4.33 เปรียบเทียบการปรับค่าตัวถ่วงน้ำหนัก กรณี $N_p = 10$ และ $N_c = 3$	62
4.34 เปรียบเทียบการปรับค่าตัวถ่วงน้ำหนัก กรณี $N_p = 10$ และ $N_c = 5$	63
4.35 เปรียบเทียบการปรับค่าตัวถ่วงน้ำหนัก กรณี $N_p = 10$ และ $N_c = 7$	63
4.36 หน้าต่างกราฟฟิกขณะทดลองกรณี $N_p = 10$ และ $N_c = 7$ และ $r_w = 1$	64
4.37 เปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมแบบพีไอดีและการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง.....	64
ก.1 โครงสร้างระบบควบคุมแบบกระจายตัว.....	71
ก.2 องค์ประกอบของดีซีเอส.....	72
ก.3 หน่วยติดต่อและปฏิบัติการของพนักงานและวิศวกร.....	73

รูปที่	หน้า
ก.4 หน่วยติดต่อและปฏิบัติงานของพนักงานแบบแผงควบคุม.....	73
ข.1 แถบเครื่องมือเอนกประสงค์ของ HIS.....	74
ข.2 หน้าต่างล๊อคอินเลือกประเภทผู้ใช้งาน.....	74
ข.3 หน้าต่างสำหรับเรียกหน้าต่างอื่นๆ.....	75
ข.4 กราฟฟิกโปรเจกต์ QPMPC1.....	75
ข.5 การเปิดปั๊มน้ำ.....	76
ข.6 การเปลี่ยนค่าสัญญาณอ้างอิง.....	76
ข.7 หน้าต่างสั่งการทำงานของตัวควบคุม.....	77
ข.8 การเรียกโปรแกรม System View.....	78
ค.1 หน้าต่างหลักสำหรับการดำเนินการทางวิศวกรรม (SYSTEM VIEW).....	79
ค.2 หน้าต่างสร้างสวิตช์.....	80

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง (Model Predictive Control: MPC) เป็นการควบคุมกระบวนการขั้นสูง (Advance Process Control: APC) ที่ได้เข้ามามีบทบาทในอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท [1] อาทิเช่น อุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเคมี อุตสาหกรรมเรือ อุตสาหกรรมเครื่องปั้น อุตสาหกรรมยานยนต์ หรือแม้กระทั่งอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ ที่เป็นเช่นนี้เพราะการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองสามารถจัดการกับปัญหาที่มีเงื่อนไขบังคับได้

ความสามารถในการแก้ปัญหาของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองแบบออนไลน์ ถือเป็นปัญหาสำคัญของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่นำไปใช้กับระบบที่ต้องการผลตอบสนองเร็วและระบบที่มีเวลาในการคำนวณจำกัด เพราะส่วนประกอบหลักของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองคือการแก้ปัญหาโปรแกรมกำลังสองซึ่งเป็นปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุด โดยแรกเริ่มวิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุด ยังเป็นวิธีที่ไม่มีสมรรถนะมากนัก จึงแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดได้ช้า ทำให้การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองจำกัดอยู่ในอุตสาหกรรมที่มีผลตอบสนองช้าและเป็นระบบขนาดเล็ก แต่เมื่อมีความต้องการที่จะขยายขอบเขตการใช้งานของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองไปยังระบบที่มีผลตอบสนองเร็ว ทำให้มีนักวิจัยหลายคนได้พัฒนาวิธีการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดเพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการในปัจจุบัน

การกลั่นเป็นกระบวนการที่สำคัญในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี การกลั่นคือการแยกสารผสมออกจากกัน โดยอาศัยความสามารถในการกลายเป็นไอที่แตกต่างกันของสารทั้งสอง จุดประสงค์ในการควบคุมหอกกลั่น คือ ต้องการแยกสารผสมออกจากกัน โดยสารแต่ละชนิดจะต้องมีความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ตามที่กำหนด หากสารผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความเข้มข้นสูงจากที่กำหนดจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน หรือหากสารผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความเข้มข้นต่ำกว่าที่กำหนดก็จะได้สารผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีคุณภาพ โดยมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงสถานะแวดล้อมของหอกกลั่น การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่ป้อนเข้ากลางหอ แม้กระทั่งการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนสารก็ส่งผลเช่นกัน การควบคุมหอกกลั่นให้มีประสิทธิภาพ

จึงจำเป็นอย่างยิ่ง ดังนั้น การประยุกต์การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองแบบออนไลน์ควบคุมการทำงานของหอกลั่นจึงเป็นหัวข้อที่ท้าทายและน่าสนใจ

การควบคุมระดับของเหลวก็เป็นอีกหนึ่งกระบวนการที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรม สามารถพบเห็นกระบวนการควบคุมระดับของเหลวในหลายๆ อุตสาหกรรม จุดประสงค์ในการควบคุมกระบวนการควบคุมระดับคือต้องการรักษาระดับของเหลวให้คงที่อยู่ที่ค่าที่กำหนด การควบคุมที่นิยมใช้ในการควบคุมระดับของเหลวยังคงเป็นการควบคุมแบบดั้งเดิมอยู่ คือ ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีนั่นเอง ดังนั้น การประยุกต์ใช้การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองแบบออนไลน์กับกระบวนการควบคุมระดับของเหลวน่าจะทำให้ประสิทธิภาพของการควบคุมกระบวนการเพิ่มขึ้นได้

1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

จากการค้นคว้าบทความที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดที่ปรากฏในการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง พบว่ามีอยู่หลากหลายวิธีด้วยกัน ทั้งที่เป็นแบบออฟไลน์และเป็นแบบออนไลน์ ซึ่งแต่ละวิธีมีจุดเด่นและจุดด้อยแตกต่างกัน และมีการพัฒนาในช่วงเวลาที่ต่างกัน

ในปี ค.ศ. 2001 โปรแกรมกำลังสองแบบพารามิเตอร์หลายตัว (Multi-parametric quadratic programming) [2, 3] เป็นวิธีที่มีการคำนวณหาผลเฉลยของทุกๆ สถานะไว้ล่วงหน้าแบบออฟไลน์ โดยที่คำตอบอยู่ในรูปของสัมพรรคแบ่งส่วน (Piece-wise affine) ที่วาดลงบนรูปหลายเหลี่ยม ทำให้มีลักษณะเป็นตารางตรวจค้นแบบออนไลน์ (Online look-up table) แต่วิธีนี้ทำให้ปัญหาการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองมีความซับซ้อนในการคำนวณ (Computational complexity) เพิ่มขึ้นเป็นฟังก์ชันเลขชี้กำลัง ทำให้การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองโดยอาศัยวิธีโปรแกรมกำลังสองแบบหลายพารามิเตอร์จำกัดอยู่ในปัญหาการควบคุมขนาดเล็กและขนาดกลาง (Small and medium-sized control problem)

ในปี ค.ศ. 1998 Rowlings และคณะ [4] ได้นำวิธีจุดภายใน (Interior-point method) ซึ่งพัฒนามาจาก [5] มาประยุกต์ใช้ในการหาค่าเหมาะที่สุดของปัญหากำลังสองที่ปรากฏในการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง Rowlings และคณะได้แสดงให้เห็นว่า วิธีจุดภายในสามารถประกันว่าเวลาที่ใช้ในการคำนวณมีการเพิ่มขึ้นแบบโพลิโนเมียลซึ่งดีกว่าการเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล และมีค่าความซับซ้อนในการคำนวณต่อรอบเป็น $\mathcal{O}(N_p(m+n)^3)$ (โดยที่ N_p คือ ขอบเขตการควบคุม (Prediction horizon) m คือ จำนวนสัญญาณเข้า (Input) และ n คือ จำนวนสัญญาณออก (Output) แต่วิธีนี้ก็ยังมีจุดบกพร่องตรงที่ยังไม่มีการพัฒนาการเริ่มต้นแบบอุ่น (Warm-starting) ที่มีประสิทธิภาพ ต่อมาในปี ค.ศ. 2010 Yang Wang และ Stephen Boyd [6] ได้นำเสนอ การเริ่ม

ต้นแบบอ่อน ซึ่งทำให้จำนวนรอบการวนซ้ำลดลงประมาณ 5 เท่าหรือมากกว่านั้น ทำให้วิธีจู่ภายในมีสมรรถนะเพิ่มขึ้น

ในปี ค.ศ. 2008 วิธีเซตแอคทีฟ (Active set method) ได้พัฒนาขึ้นโดยอาศัยโครงสร้างสัมพรรคแบ่งส่วนหรือการใช้ผลเฉลยจากเวลาก่อนหน้า ภายใต้สมมุติฐานว่า เซตแอคทีฟของขั้นตอนถัดไปจะคล้ายกับเซตแอคทีฟของขั้นตอนก่อนหน้า โดยมีการเปลี่ยนแปลงไปของเซตไม่มาก ซึ่งวิธีนี้เป็นที่รู้จักในอีกชื่อหนึ่งว่า การเริ่มต้นแบบอ่อน (Warm-starting) [7, 8] บางครั้งวิธีนี้ใช้จำนวนรอบการวนซ้ำหลายรอบในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด และมีค่าความยุ่งยากซับซ้อนในการคำนวณต่อรอบเป็น $O((N_p m)^2)$ แต่วิธีนี้มีจำนวนตัวแปรจำเป็นที่เกี่ยวข้องกับปัญหาน้อย ทำให้ใช้เวลาในการคำนวณแต่ละรอบน้อย และในปีเดียวกัน [9] วิธีเซตแอคทีฟได้รับการพัฒนาจนทำให้จำนวนของรอบการวนซ้ำลดลง จาก [10] ได้กล่าวถึงการประยุกต์ใช้ระบบควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองกับเครื่องยนต์ดีเซล ผู้แต่งเลือกใช้วิธีเซตแอคทีฟแบบออนไลน์ เพื่อที่จะรับมือกับเวลาสุ่มคำนวณของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่เป็นมิลลิวินาที ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า วิธีนี้ใช้ได้ผลกับระบบจริง ถึงแม้ว่าจะใช้ฮาร์ดแวร์ที่มีคุณภาพต่ำก็ตาม และวิธีนี้ยังนำไปสู่การเพิ่มสมรรถนะของตัวควบคุมอีกด้วย ต่อมาปี ค.ศ. 2009 จาก [11] บทความนี้ได้เปรียบเทียบวิธีเซตแอคทีฟและวิธีจู่ภายใน ในแง่ของความซับซ้อนในการคำนวณ การใช้เนื้อที่ในการเก็บข้อมูล ความเร็วในการลู่เข้า โดยที่ความซับซ้อนในการคำนวณวัดจากจำนวนของจุดทศนิยมของการกระทำทางเลขคณิต (บวก คูณ หาร) ที่ถูกดำเนินการไปต่อรอบการวนซ้ำ ขณะที่การใช้เนื้อที่ในการเก็บข้อมูลวัดจากจุดทศนิยมที่เก็บในระหว่างการดำเนินการ และจากการทดสอบความสามารถในการขยายขนาด (Scalability) ทำให้สามารถสังเกตได้ว่า ความเร็วในการลู่เข้าของวิธีจู่ภายในเร็วกว่าวิธีเซตแอคทีฟ และนอกจากนี้ บทความนี้ยังได้กล่าวถึงความขาดเสถียรภาพ (Instability) ที่เกิดจากค่าผิดพลาดเชิงตัวเลขของทั้ง 2 วิธีด้วย ผลลัพธ์ที่ได้คือในกรณีที่จำนวนของตัวแปรและเงื่อนไขบังคับไม่มากนัก วิธีเซตแอคทีฟมีสมรรถนะดีกว่าวิธีจู่ภายใน แต่เมื่อปัญหามีการขยายขึ้น พบว่าวิธีจู่ภายในมีสมรรถนะดีกว่าวิธีเซตแอคทีฟ ส่วนในเรื่องของความขาดเสถียรภาพนั้นวิธีเซตแอคทีฟรุนแรงกว่าวิธีจู่ภายใน แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นแล้ว บทความนี้ได้ทดลองเปรียบเทียบกับระบบควบคุมระบบเดียวเท่านั้น ผลลัพธ์อาจแตกต่างกันขึ้นอยู่กับระบบแต่ละระบบ

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อประยุกต์และเปรียบเทียบการใช้วิธีเซตแอคทีฟและการใช้วิธีจู่ภายในแก้ปัญหาโปรแกรมกำลังสองที่ปรากฏในการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองแบบออนไลน์

2. เพื่อประยุกต์การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองแบบออนไลน์ใช้ควบคุมหอกลิ้นและกระบวนการควบคุมระดับของเหลว

3. เพื่อประยุกต์การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองแบบออนไลน์ใช้ควบคุมกระบวนการควบคุมระดับของเหลวผ่านระบบควบคุมแบบกระจายตัว

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. เขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาโปรแกรมกำลังสอง โดยอาศัยวิธีเซตแอกทีฟและวิธีจุดภายใน

2. นำโปรแกรมที่ได้จากข้อ 1 ประยุกต์ใช้กับการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองควบคุมหอกลิ้น แยกสารสองชนิดและกระบวนการควบคุมระดับของเหลว โดยจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม MATLAB

3. ประยุกต์ใช้การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่อาศัยโปรแกรมจากข้อ 1 กับกระบวนการควบคุมระดับของเหลวผ่านระบบควบคุมแบบกระจายตัว ที่ตั้งอยู่ในห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เดิมที่ต้องประยุกต์กับหอกลิ้นแยกสารสองชนิด แต่หอกลิ้นอยู่ระหว่างรอซ่อม ไม่สามารถทำการทดลองได้

1.5 ขั้นตอนดำเนินงาน

1. ศึกษาและประยุกต์ใช้วิธีเซตแอกทีฟกับการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดที่ปรากฏในการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง

2. ศึกษาและประยุกต์ใช้วิธีจุดภายในกับการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดที่ปรากฏในการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง

3. จำลองผลการประยุกต์ใช้การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองจากข้อ 1 และข้อ 2 กับหอกลิ้นแยกสารและกระบวนการควบคุมระดับของเหลวด้วยโปรแกรม MATLAB

4. เรียบเรียงเขียนงานวิจัย

5. ศึกษากระบวนการควบคุมแบบกระจายตัวของบริษัทโยโกกาวาที่อยู่ภายในห้องปฏิบัติการระบบควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6. ประยุกต์ใช้การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองกับกระบวนการควบคุมระดับของเหลวผ่านระบบควบคุมแบบกระจายตัว โดยอาศัยภาษาซีโบล (SEBOL) ในการโปรแกรมระเบียบวิธีของการควบคุม

7. วิเคราะห์ และสรุปผลการวิจัย

8. เรียบเรียงเขียนวิทยานิพนธ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. พัฒนาการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดเพื่อออกแบบการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองแบบออนไลน์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง
2. ประยุกต์การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองกับกระบวนการควบคุมระดับของเหลว
3. พัฒนาวิธีการควบคุมที่ใช้กับระบบควบคุมแบบกระจายตัวจากตัวควบคุมแบบแผนเดิมเป็นตัวควบคุมกระบวนการขั้นสูง

1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

โครงสร้างของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กล่าวถึง ทฤษฎีการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่จะอธิบายถึงแบบจำลองปริภูมิสถานะ การทำนายตัวแปรสถานะและสัญญาณขาออก ฟังก์ชันต้นทุนและการแก้ปัญหาโปรแกรมกำลังสองที่ปรากฏในทฤษฎีการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง หลังจากกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการในบทที่ 2 แล้ว บทที่ 3 จะกล่าวถึงการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่ประยุกต์ใช้กับหอกลิ้นแยกสารผสมสองชนิดและกระบวนการควบคุมระดับของเหลว และในบทที่ 4 จะนำเสนอการประยุกต์ใช้การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองควบคุมกระบวนการควบคุมระดับของเหลวผ่านระบบควบคุมแบบกระจายตัวที่ตั้งอยู่ในห้องปฏิบัติการระบบควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และลำดับสุดท้ายเป็นบทสรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

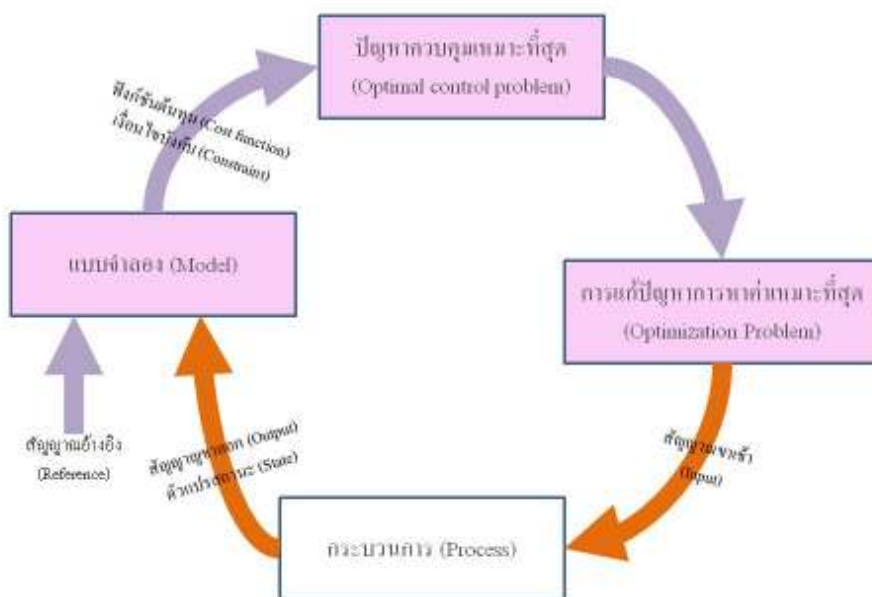
บทที่ 2

การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง

2.1 บทนำ

ในบทนี้ กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีเบื้องต้นของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญและช่วยให้เข้าใจเนื้อหาในงานวิจัยนี้ การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองแบบออนไลน์ ก็คือ มีการคำนวณหาค่าสัญญาณควบคุมเหมาะสมที่สุดอยู่ตลอดเวลา เนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วยแบบจำลองปริภูมิสถานะ การทำนายตัวแปรสถานะและสัญญาณออก ฟังก์ชันต้นทุน และการแก้ปัญหาโปรแกรมกำลังสองที่เกิดขึ้นในการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองเป็นหัวข้อสุดท้าย

การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง (Model predictive control) เป็นเทคนิคการควบคุมที่อาศัยแบบจำลอง ถือเป็นการควบคุมกระบวนการขั้นสูง (Advance process control) มีความแตกต่างจากการควบคุมแบบแผนเดิมตรงที่การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองสามารถจัดการกับเงื่อนไขบังคับของกระบวนการได้ จึงทำให้การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองเป็นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม ในการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองเริ่มจากข้อมูลแบบจำลองวงเปิดที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสถานะ สัญญาณเข้า และสัญญาณออก โดยที่ตัวแปรสถานะมีจำนวน n ตัว สัญญาณขาเข้ามีจำนวน m สัญญาณ และสัญญาณขาออกมีจำนวน q สัญญาณ จากนั้นจะมีการระบุเงื่อนไขบังคับ เช่น ข้อจำกัดของสัญญาณเข้าและพิสัยของตัวแปรสถานะและสัญญาณออกที่ต้องการ หลังจากทราบแบบจำลองและระบุเงื่อนไขบังคับแล้ว จึงได้เป็นปัญหาควบคุมที่เหมาะสมที่สุด จากนั้นเปลี่ยนปัญหาควบคุมที่เหมาะสมที่สุดนี้เป็นปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งต้องหาคำตอบของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่แต่ละเวลาชัคตัวอย่าง โดยใช้ค่าตัวแปรสถานะของปัญหาควบคุมที่เวลาปัจจุบันมาเป็นค่าตัวแปรสถานะเริ่มต้นให้กับปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ผลเฉลยของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ได้อยู่ในรูปของชุดลำดับ ซึ่งใช้แค่ชุดลำดับชุดแรกเท่านั้นเป็นสัญญาณเข้าของกระบวนการ ส่วนชุดที่เหลือตัดทิ้งไป ทำซ้ำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ โดยมี N_p เป็นช่วงเวลาดการทำนาย (Prediction horizon) และ N_c เป็นช่วงเวลาการควบคุม (Control horizon)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง

จากรูปที่ 2.1 พบว่า องค์ประกอบของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือ แบบจำลอง ปัญหาควบคุมที่เหมาะสมที่สุด และการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งเนื้อหาของ 3 ส่วนนี้ จะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

2.2 แบบจำลองปริภูมิสถานะ

เริ่มจากพิจารณาแบบจำลองปริภูมิสถานะของระบบแบบหนึ่งสัญญาณเข้า-หนึ่งสัญญาณออก (Single-input and single-output system) เป็นดังนี้

$$x_m(k+1) = A_m x_m(k) + B_m u(k) \quad (2.1)$$

$$y(k) = C_m x_m(k) + D_m u(k) \quad (2.2)$$

โดยสมมติให้ สัญญาณเข้าไม่ส่งผลต่อสัญญาณออกในเวลาเดียวกัน $D_m = 0$ ดังนั้น จะได้แบบจำลองปริภูมิสถานะเป็นดังนี้

$$x_m(k+1) = A_m x_m(k) + B_m u(k) \quad (2.3)$$

$$y(k) = C_m x_m(k) \quad (2.4)$$

เมื่อประยุกต์ใช้ตัวดำเนินการผลต่าง (Difference operation) ทั้ง 2 ข้างของสมการ (2.3) จะได้ว่า

$$x_m(k+1) - x_m(k) = A_m(x_m(k) - x_m(k-1)) + B_m(u(k) - u(k-1)) \quad (2.5)$$

กำหนดให้ $\Delta x_m(k+1) = x_m(k+1) - x_m(k)$, $\Delta x_m(k) = x_m(k) - x_m(k-1)$ และ $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$ จากสมการ (2.5) จะได้ว่า

$$\Delta x_m(k+1) = A_m \Delta x_m(k) + B_m \Delta u(k) \quad (2.6)$$

ในทำนองคล้ายกัน เมื่อประยุกต์ใช้ตัวดำเนินการผลต่างทั้ง 2 ข้างของสมการ (2.4) จะได้ว่า

$$y(k+1) - y(k) = C_m(x_m(k+1) - x_m(k)) = C_m \Delta x_m(k+1) \quad (2.7)$$

$$= C_m A_m \Delta x_m(k+1) + C_m B_m \Delta u(k) \quad (2.8)$$

รวมสมการ (2.5) และ (2.8) เข้าด้วยกัน สุดท้ายได้แบบจำลองปริภูมิสถานะเป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_m & 0_m^T \\ C_m A_m & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix} \Delta u(k) \quad (2.9)$$

$$y(k) = [0_m \quad 1] \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

โดยจะได้เวกเตอร์ตัวแปรสถานะใหม่เป็น

$$x(k) = [\Delta x_m \quad y(k)]^T \quad (2.11)$$

จากแบบจำลองปริภูมิสถานะของระบบหนึ่งสัญญาณเข้า-หนึ่งสัญญาณออก สามารถขยายสู่ระบบหลายสัญญาณเข้า-หลายสัญญาณออก โดยระบบหลายสัญญาณเข้า-หลายสัญญาณออกมีรูปแบบทั่วไปดังนี้

$$x_m(k+1) = A_m x_m(k) + B_m u(k) + B_d w(k) \quad (2.12)$$

$$y(k) = C_m x_m(k) \quad (2.13)$$

เมื่อ $w(k)$ คือ สัญญาณรบกวนและสมมติให้เป็นสัญญาณรบกวนแสงขาว โดยที่

$$w(k) - w(k-1) = \epsilon(k) \quad (2.14)$$

จากสมการ (2.12) จะได้

$$x_m(k) = A_m x_m(k-1) + B_m u(k-1) + B_d w(k-1) \quad (2.15)$$

กำหนดให้ $\Delta x_m(k) = x_m(k) - x_m(k-1)$ และ $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$ จากนั้นนำสมการ (2.12) ลบด้วยสมการ (2.15) จะได้

$$\Delta x_m(k+1) = A_m \Delta x_m(k) + B_m \Delta u(k) + B_d \epsilon(k) \quad (2.16)$$

เพื่อที่จะสร้างสัมพันธระหว่างสัญญาณออก $y(k)$ กับตัวแปรสถานะ $\Delta x_m(k)$ จึงให้

$$\Delta y(k+1) = C_m \Delta x_m(k) = C_m A_m \Delta x_m(k) + C_m B_m \Delta u(k) + B_d \epsilon(k) \quad (2.17)$$

เมื่อ $\Delta y(k+1) = y(k+1) - y(k)$ ท้ายที่สุดจะได้เวกเตอร์ตัวแปรสถานะตัวใหม่เป็น

$$x(k) = [\Delta x_m(k) \quad y(k)]^T \quad (2.18)$$

และจะได้

$$\begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_m & 0_m^T \\ C_m A_m & I_{q \times q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix} \Delta u(k) + \begin{bmatrix} B_d \\ C_m B_d \end{bmatrix} \epsilon(k) \quad (2.19)$$

$$y(k) = [0_m \quad I_{q \times q}] \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

2.3 การทำนายตัวแปรสถานะและสัญญาณขาออก

เมื่อได้แบบจำลองของระบบที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเข้า สัญญาณออก ตัวแปรสถานะ รวมถึงสัญญาณรบกวนแล้ว จากแบบจำลองที่ได้ ทำให้สามารถทำนายตัวแปรสถานะและสัญญาณออกได้ โดยกำหนดให้ k_i เป็นเวลาปัจจุบันและ N_p คือ ช่วงเวลาการทำนาย (Prediction horizon) สมมติให้ระบบมีข้อมูลตัวแปรสถานะที่วัดได้ ณ เวลาปัจจุบัน $x(k_i)$ จากข้อมูลนี้ ทำให้สามารถทำนายสัญญาณออกในอนาคตได้ โดยกำหนดให้สัญญาณควบคุมในอนาคต เป็นดังนี้

$$\Delta u(k_i), \Delta u(k_i+1), \dots, \Delta u(k_i+N_c-1)$$

เมื่อ N_c คือ ขอบเขตการควบคุม และแทนตัวแปรสถานะในอนาคตด้วย

$$x(k_i+1|k_i), x(k_i+2|k_i), \dots, x(k_i+N_p|k_i)$$

จากแบบจำลองปริภูมิสถานะ A, B, C คำนวณตัวแปรสถานะในอนาคตได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 x(k_i + 1|k_i) &= Ax(k_i) + B\Delta u(k_i) \\
 x(k_i + 2|k_i) &= Ax(k_i + 1|k_i) + B\Delta u(k_i + 1) \\
 &= A^2x(k_i) + AB\Delta u(k_i) + B\Delta u(k_i + 1) \\
 &\vdots \\
 x(k_i + N_p|k_i) &= A^{N_p}x(k_i) + A^{N_p-1}B\Delta u(k_i) + \dots + A^{N_p-N_c}B\Delta u(k_i + N_c - 1)
 \end{aligned}$$

จากตัวแปรสถานะข้างต้น สามารถทำนายสัญญาณออกได้ ดังนี้

$$\begin{aligned}
 y(k_i + 1|k_i) &= CAx(k_i) + CB\Delta u(k_i) \\
 y(k_i + 2|k_i) &= CA^2x(k_i) + CAB\Delta u(k_i) + CB\Delta u(k_i + 1) \\
 &\vdots \\
 y(k_i + N_p|k_i) &= CA^{N_p}x(k_i) + \dots + CA^{N_p-N_c}B\Delta u(k_i + N_c - 1)
 \end{aligned}$$

กำหนดให้

$$\begin{aligned}
 Y &= [y(k_i + 1|k_i) \quad y(k_i + 2|k_i) \quad \dots \quad y(k_i + N_p|k_i)] \\
 \Delta U &= [\Delta u(k_i) \quad \Delta u(k_i + 1) \quad \dots \quad \Delta u(k_i + N_c - 1)]
 \end{aligned}$$

จะได้ว่า

$$Y = Fx(k_i) + \Phi\Delta U \quad (2.21)$$

โดยที่

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix}, \Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N_p} & CA^{N_p-1}B & \dots & CA^{N_p-N_c} \end{bmatrix}$$

จากสมการ (2.21) เมื่อทราบข้อมูลของตัวแปรสถานะ $x(k_i)$ แล้ว ก็สามารถหาค่า ΔU ที่เหมาะสม เพื่อควบคุมระบบให้ได้สัญญาณออกในอนาคตเป็นไปตามที่ต้องการ

2.4 ฟังก์ชันต้นทุนและเงื่อนไขบังคับ

วัตถุประสงค์ของการควบคุมเชิงทำนาย คือ การทำให้สัญญาณออกที่ได้จากการทำนายเข้าใกล้ค่าสัญญาณอ้างอิงมากที่สุด [12] ภายใต้ข้อจำกัดของสัญญาณควบคุม ด้วยวัตถุประสงค์นี้ ทำให้ได้ฟังก์ชันต้นทุนและเงื่อนไขบังคับเป็นดังนี้

$$J = (R_s - Y)^T(R_s - Y) + \Delta U^T \bar{R} \Delta U \quad (2.22)$$

$$\Delta U^{min} \leq \Delta U \leq \Delta U^{max} \quad (2.23)$$

เมื่อ $r(k_i)$ คือ สัญญาณอ้างอิง จะได้ว่า

$$R_s^T = [1 \quad 1 \quad \dots \quad 1] r(k_i)$$

และ

$$\bar{R} = r_w I_{N_c \times N_c}, r_w \geq 0$$

การหา ΔU ที่เหมาะสม จะต้องหาสัญญาณควบคุมที่ทำให้ฟังก์ชันต้นทุน (J) มีค่าต่ำสุด เมื่ออาศัยสมการ (2.21) แทนลงในฟังก์ชันต้นทุนตามสมการ (2.22) จะได้ฟังก์ชันต้นทุนเป็น

$$J = (R_s - Fx(k_i))^T(R_s - Fx(k_i)) - 2\Delta U^T \Phi^T (R_s - Fx(k_i)) + \Delta U^T (\Phi^T \Phi + \bar{R}) \Delta U \quad (2.24)$$

จากสมการ (2.24) ได้ว่า พจน์ $(R_s - Fx(k_i))^T(R_s - Fx(k_i))$ ให้ผลลัพธ์เป็นค่าคงที่ จึงไม่มีผลต่อการคำนวณหาค่า ΔU ที่เหมาะสม ดังนั้น สามารถเขียนฟังก์ชันต้นทุนใหม่ได้ดังนี้

$$J_{new} = \Delta U^T (\Phi^T \Phi + \bar{R}) \Delta U + 2\Delta U^T \Phi^T (Fx(k_i) - R_s) \quad (2.25)$$

ฟังก์ชันต้นทุนใหม่นี้ตรงกับโปรแกรมกำลังสอง (Quadratic Problem: QP) ซึ่งโปรแกรมกำลังสองและวิธีการแก้ปัญหาจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

2.5 การแก้ปัญหาโปรแกรมกำลังสอง

โปรแกรมกำลังสองเป็นรูปแบบหนึ่งของปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization problem) ที่มีฟังก์ชันต้นทุนเป็นกำลังสองและมีเงื่อนไขบังคับเป็นสมการเชิงเส้น รูปแบบทั่วไปของปัญหากำลังสอง สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \min_x \quad & \frac{1}{2}x^T Qx + c^T x & (2.26) \\ \text{subject to} \quad & a_i^T x = b_i, i \in \mathcal{E} \\ & a_i^T x \leq b_i, i \in \mathcal{I} \end{aligned}$$

เมื่อ \mathcal{E} เป็นเซตบ่งชี้สำหรับเงื่อนไขบังคับแบบสมการและ \mathcal{I} เป็นเซตบ่งชี้สำหรับเงื่อนไขบังคับแบบอสมการ สำหรับการหาค่าเหมาะที่สุดของปัญหาโปรแกรมกำลังสองสามารถทำได้หลายวิธีศึกษาได้จากหนังสือการหาค่าเหมาะที่สุดทั่วไป แต่วิธีที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้กับการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองมี 2 วิธีด้วยกัน คือ วิธีเซตแอคทีฟ (Active Set Method) และวิธีจุดภายใน (Interior Point Method) ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงกล่าวถึงการแก้ปัญหาโปรแกรมกำลังสองโดยอาศัยวิธีเซตแอคทีฟและวิธีจุดภายในเท่านั้น รายละเอียดสามารถศึกษาได้ในหัวข้อต่อไป

2.5.1 วิธีเซตแอคทีฟ

วิธีเซตแอคทีฟเป็นวิธีที่ใช้หาค่าตอบของโปรแกรมกำลังสองที่มีเงื่อนไขบังคับแบบอสมการ โดยจะต้องแบ่งเงื่อนไขบังคับแบบอสมการ ออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มหนึ่งให้เป็นแอคทีฟ และอีกกลุ่มหนึ่งให้เป็นไม่แอคทีฟ โดยกลุ่มที่ไม่แอคทีฟจะถูกละเลย และมีเซต \mathcal{W} ซึ่งประกอบด้วยเงื่อนไขบังคับแบบสมการและเงื่อนไขบังคับแบบอสมการที่อยู่ในกลุ่มแอคทีฟ องค์ประกอบสำคัญของวิธีการนี้มีอยู่ 2 ส่วน ส่วนแรกคือ การเลือกทิศทางการค้นหา (Search Direction) ต้องเป็นทิศทางที่ทำให้ปัญหามีคำตอบ (Feasible) และสัมพันธ์กับเซต \mathcal{W} อีกส่วนหนึ่งคือ ลำดับวิธีในการเปลี่ยนเซต \mathcal{W} โดยที่เงื่อนไขบังคับจะเพิ่มเข้าไปในเซต \mathcal{W} หรือจะตัดออกจากเซต \mathcal{W} โดยเป็นไปตามเงื่อนไขที่จะได้กล่าวถึงต่อไป หลังจากที่มีการแบ่งกลุ่มของเงื่อนไขบังคับแบบอสมการ ออกเป็น 2 กลุ่มแล้ว จะได้โปรแกรมกำลังสองที่มีเงื่อนไขบังคับแบบสมการเพียงอย่างเดียว และการค้นหาทิศทาง สามารถแบ่งออกเป็น 3 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 ถ้าทิศทางการค้นหาเป็นค่าเป็นศูนย์ แล้วจุด x ที่ได้ขณะนั้น จะเป็นจุดที่มีค่าเหมาะที่สุด และสอดคล้องกับเซต \mathcal{W} ขณะนั้นด้วย

กรณีที่ 2 ถ้าทิศทางการค้นหาและ ค่า x รวมกับค่าของทิศทางการค้นหา สามารถหาค่าได้สำหรับทุกเงื่อนไขบังคับ แล้วค่า x รวมกับค่าของทิศทางการค้นหา จะกลายเป็นค่า x ใหม่

กรณีที่ 3 ถ้าค่า x รวมกับค่าของทิศทางการค้นหา ไม่สามารถหาค่าได้ หรือไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ จะต้องหาค่า α โดย α สามารถหาได้จาก

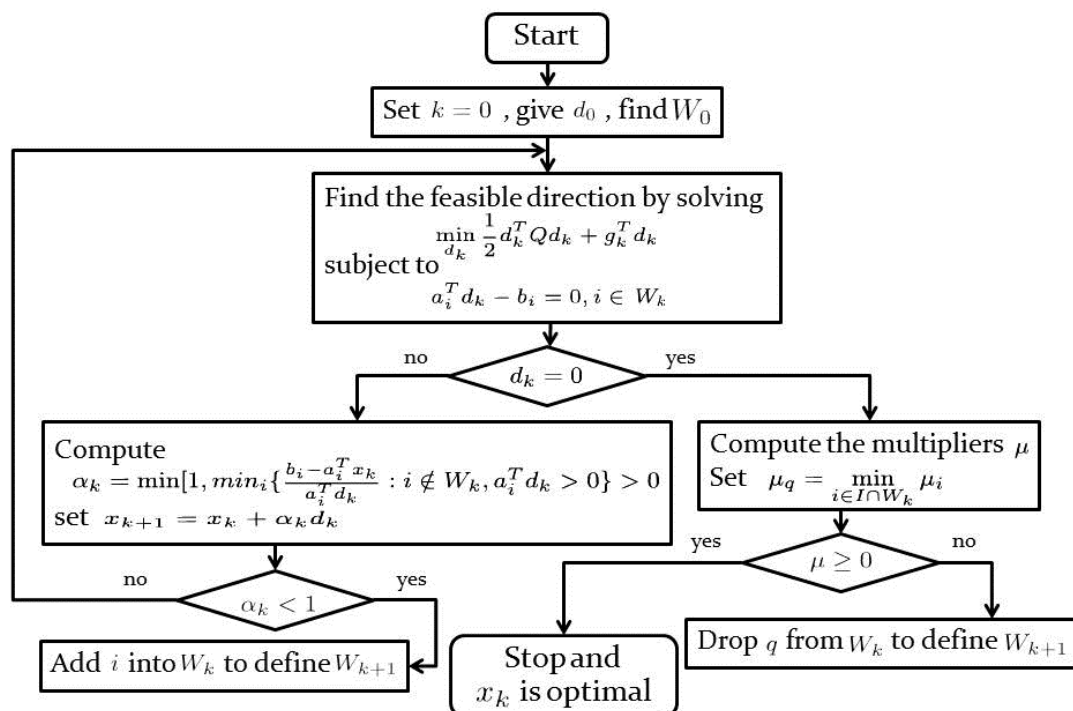
$$\alpha_k = \min \left[1, \min_i \left\{ \frac{b_i - a_i^T x_k}{a_i^T d_k} : i \notin \mathcal{W}_k, a_i^T d_k > 0 \right\} \right] \quad (2.27)$$

วิธีเซตแอกทีฟมีระเบียบวิธีดังนี้

1. เริ่มต้น โดยกำหนดให้ $k = 0$ และสมมุติค่าทิศทางเริ่มต้น (d_0) จากนั้นหาเซตของเงื่อนไขบังคับที่แอกทีฟ (W_0)
2. หาทิศทางเคลื่อนที่ (d_k) โดยการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันต้นทุนที่มีเงื่อนไขบังคับตามข้อ 2
3. ตรวจสอบค่าทิศทางเคลื่อนที่ว่ามีค่าเป็นศูนย์หรือไม่
 - 1.1 หากทิศทางเคลื่อนที่ไม่เป็นศูนย์ ให้คำนวณหาค่าสเกล (α_k) จากการหาค่าต่ำสุดตามสมการ 2.27
 - 1.1.1 หากค่าสเกลที่ได้มากกว่า 1 ให้อัปเดต $x_{k+1} = x_k + \alpha_k d_k$ แล้วกลับไปทำซ้ำข้อ 3
 - 1.1.2 หากค่าสเกลที่ได้น้อยกว่า 1 ให้เพิ่มตัวบ่งชี้ที่ i เข้าไปในเซตของเงื่อนไขบังคับที่แอกทีฟ จะได้ W_{k+1} แล้วจึงกลับไปทำซ้ำข้อ 3
 - 1.2 หากทิศทางเคลื่อนที่เป็นศูนย์ ให้คำนวณหาตัวคูณ μ จากสมการ

$$\mu_q = \min_{i \in I \cap W_k} \mu_i$$
 - 1.2.1 หากตัวคูณมีค่าน้อยกว่าศูนย์ ให้ทิ้งเงื่อนไขที่ตัวบ่งชี้ q ออกจากเซตของเงื่อนไขบังคับที่แอกทีฟ จะได้ W_{k+1} แล้วจึงกลับไปทำซ้ำข้อ 3
 - 1.2.2 หากตัวคูณมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ แสดงว่าค่าทิศทางเคลื่อนที่ที่คำนวณได้เป็นค่าต่ำที่สุดให้หยุดการคำนวณแล้วส่งค่าทิศทางเคลื่อนที่นั้นออกมาในฐานะของค่าการเปลี่ยนแปลงสัญญาณเข้า

จากระเบียบวิธีที่กล่าวมาข้างต้น สามารถเขียนเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ระเบียบวิธีของวิธีเซตแอกทีฟ

2.5.2 วิธีจุดภายใน

วิธีจุดภายในเป็นที่นิยมใช้แก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับปัญหาที่มีทั้งเงื่อนไขบังคับแบบสมการและแบบอสมการ จากหัวข้อที่ 2.4 พบว่า เงื่อนไขบังคับของทฤษฎีการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่เสนอในวิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นแบบอสมการเพียงแบบเดียว ดังนั้น จากสมการ (2.26) จึงพิจารณาเฉพาะเงื่อนไขบังคับแบบอสมการเท่านั้น จะได้เป็น

$$\begin{aligned} \min_x \quad & \frac{1}{2} x^T Q x + c^T x \\ \text{subject to} \quad & a_i^T x \leq b_i \end{aligned} \quad (2.26)$$

วิธีจุดภายในที่เสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วย 2 ทฤษฎีที่เป็นพื้นฐาน คือ ทฤษฎีแนวด้าน (Barrier Method) และทฤษฎีนิวตัน (Newton's Method)

2.5.2.1 ทฤษฎีแนวด้าน

ทฤษฎีแนวด้าน ใช้สำหรับแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดของปัญหาที่มีเงื่อนไขบังคับแบบอสมการ โดยหลักการของทฤษฎีแนวด้าน คือ ต้องการสร้างรูปแบบของปัญหาเงื่อนไขบังคับแบบอสมการให้กลายเป็นปัญหาเงื่อนไขบังคับแบบสมการหรือเป็นปัญหาที่ไม่มีเงื่อนไข

บังคับ ซึ่งจะทำให้ใช้ทฤษฎีนิวตันแก้หาค่าเหมาะที่สุดได้โดยง่าย ขึ้นแรกเริ่มต้นด้วยการทำให้เงื่อนไขบังคับแบบสมการปรากฏอยู่ในฟังก์ชันต้นทุน โดยอาศัยฟังก์ชันลอการิทึม จะได้

$$\min_x \frac{1}{2}x^T Qx + c^T x - (1/t) \sum_{j=1}^m \log(b_j - a_j^T x) \quad (2.27)$$

จากสมการ 2.27 พบว่า เมื่อ t มีค่าเพิ่มมากขึ้น การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฟังก์ชันต้นทุนยิ่งทำได้ยากขึ้น ดังนั้น จึงพิจารณาปัญหาที่คล้ายกันแทนโดยการคูณฟังก์ชันต้นทุนด้วย t จะได้

$$\min_x t \left(\frac{1}{2}x^T Qx + c^T x \right) - \sum_{j=1}^m \log(b_j - a_j^T x) \quad (2.28)$$

กำหนดให้

$$\phi(x) = - \sum_{j=1}^m \log(b_j - a_j^T x)$$

จะได้

$$\nabla \phi(x) = \sum_{j=1}^m \frac{a_j}{b_j - a_j^T x} = A^T d \quad (2.29)$$

$$\nabla^2 \phi(x) = \sum_{j=1}^m \frac{a_j a_j^T}{(b_j - a_j^T x)^2} = A^T \text{diag}(d)^2 A \quad (2.30)$$

โดยที่ $d = (1/(b_1 - a_1^T x), \dots, 1/(b_m - a_m^T x))$

2.5.2.1 ทฤษฎีนิวตัน

ทฤษฎีนิวตันเป็นวิธีที่นิยมใช้สำหรับแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดของปัญหาที่มีเงื่อนไขบังคับแบบสมการหรือปัญหาค่าเหมาะที่สุดที่ไม่มีเงื่อนไขบังคับ พิจารณาจากสมการ 2.27 ในรูป

$$f(x) = \min_x t \left(\frac{1}{2}x^T Qx + c^T x \right) + \phi(x) \quad (2.31)$$

โดยระเบียบวิธีของทฤษฎีนิวตันอธิบายได้ดังนี้

1. กำหนดค่าจุดเริ่มต้น x_0 และ ϵ
2. คำนวณหาทิศทางเคลื่อนที่ โดย

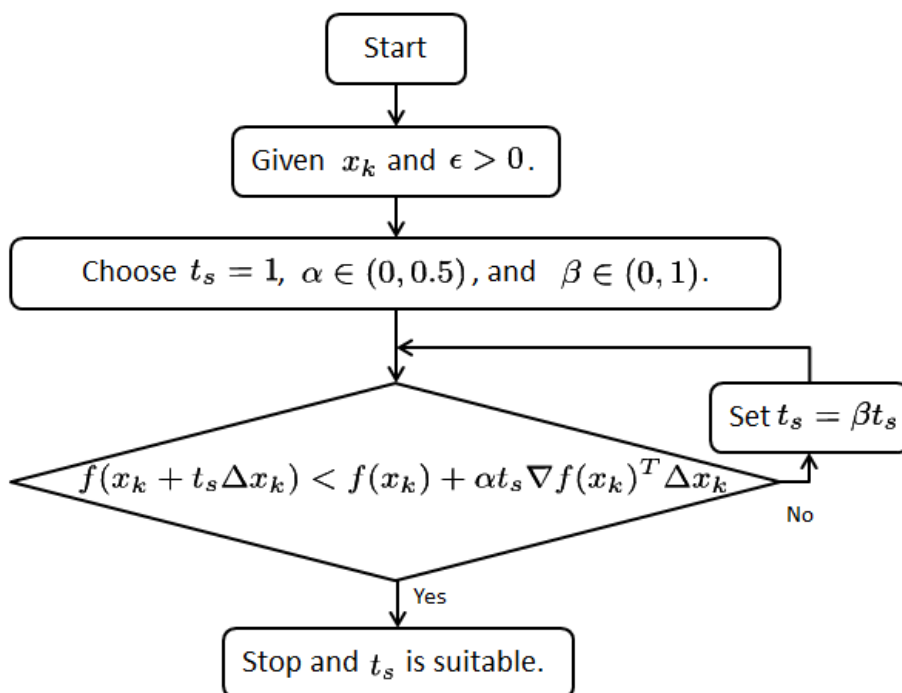
$$v = - \nabla^2 f(x)^{-1} \nabla f(x)$$

3. คำนวณหาค่าความยาว t_s โดยอาศัยวิธี Back Tracking Line Search ตามระเบียบวิธีรูปที่ 2.3
4. อัปเดตค่า $x = x + t_s v$
5. ตรวจสอบว่า

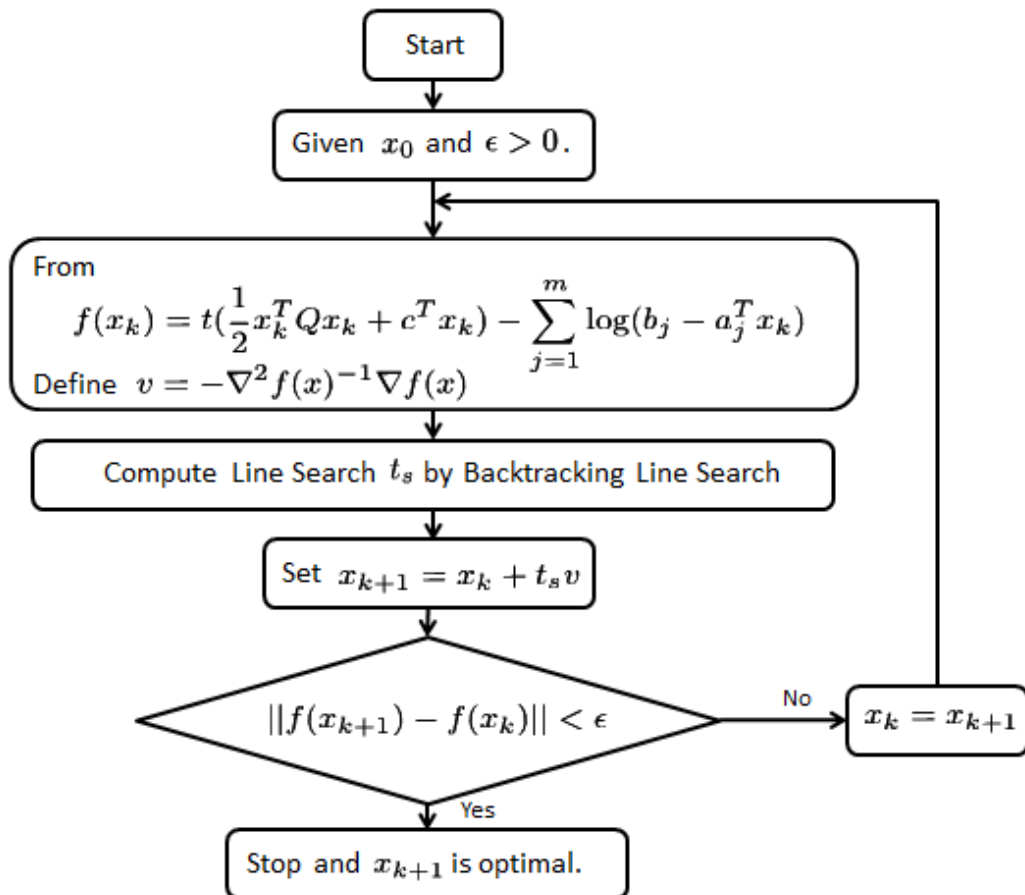
$$\|f(k) - f(k+1)\| \leq \epsilon$$

6. หากเงื่อนไขเป็นจริง แสดงว่า x เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด หากเงื่อนไขไม่เป็นจริง ให้กลับไปทำซ้ำข้อ 2

จากระเบียบวิธีที่กล่าวมาสามารถเขียนเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 ระเบียบวิธี Backtracking line search



รูปที่ 2.4 ระเบียบวิธีของทฤษฎีนิวตัน

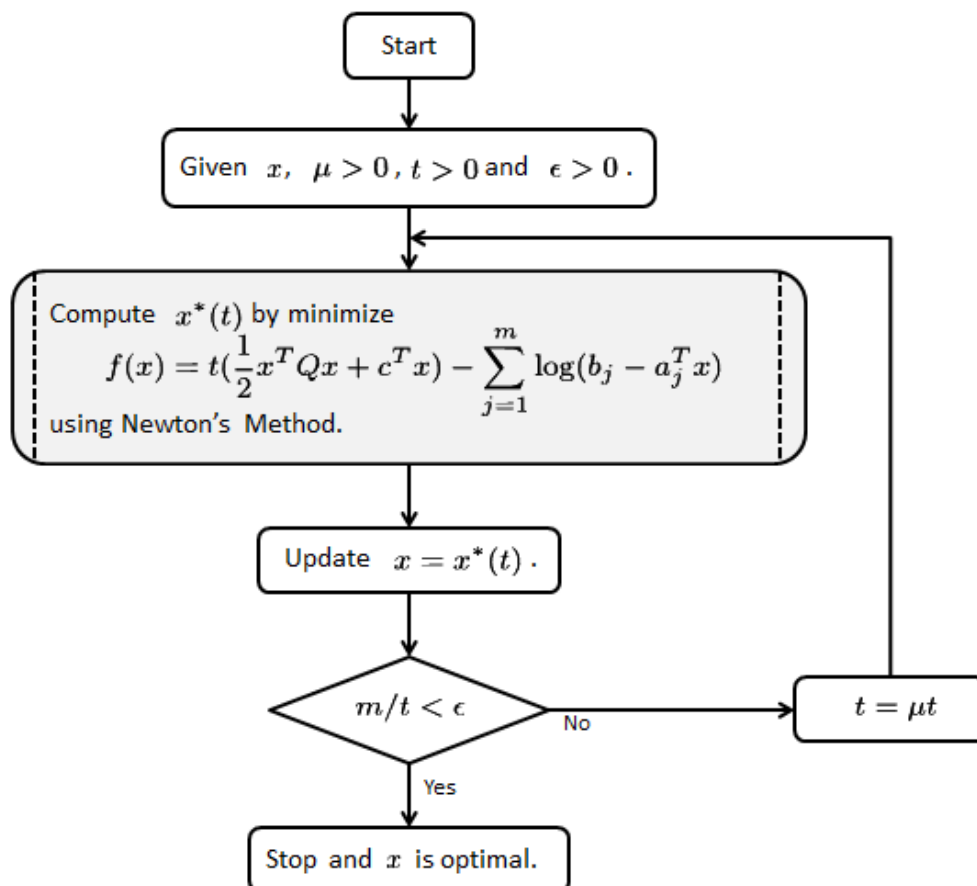
จากที่อธิบายทฤษฎีแนวตันและทฤษฎีนิวตัน สามารถอธิบายเป็นระเบียบวิธีจุดภายในได้ดังนี้

1. เริ่มจาก กำหนด $x, t > 0, \mu > 0$ และ $\epsilon > 0$
2. จากนั้นคำนวณ $x^*(t)$ จากค่า x โดยอาศัยทฤษฎีนิวตันหาค่าต่ำสุดของ

$$f(x) = t\left(\frac{1}{2}x^T Q x + c^T x\right) - \sum_{j=1}^m \log(b_j - a_j^T x)$$

3. อัปเดต $x = x^*(t)$
4. ตรวจสอบเงื่อนไขว่า $m/t \leq \epsilon$ หรือไม่ ถ้าเงื่อนไขไม่เป็นจริง ให้อัปเดต $t = \mu t$ หากเงื่อนไขเป็นจริง แสดงว่า x เป็นค่าเหมาะที่สุดที่คำนวณได้จากวิธีจุดภายใน

สามารถเขียนเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ระเบียบวิธีของวิธีจุดภายใน

2.6 บทสรุป

ในบทนี้แนะนำทฤษฎีการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองแบบออนไลน์ซึ่งจำเป็นต้องแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดเพื่อคำนวณสัญญาณควบคุมที่เหมาะสม โดยปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดที่ปรากฏในทฤษฎีการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองนั้นเป็นปัญหาโปรแกรมกำลังสอง จึงนำเสนอวิธีการในการหาค่าเหมาะที่สุดสองวิธีด้วยกัน คือ การแก้ปัญหาโปรแกรมกำลังสองโดยอาศัยวิธีเซตเอกทิพ และการแก้ปัญหาโปรแกรมกำลังสองโดยอาศัยวิธีจุดภายใน ในบทต่อไปจะนำทฤษฎีการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองแบบออนไลน์ไปประยุกต์ใช้ควบคุมกระบวนการ

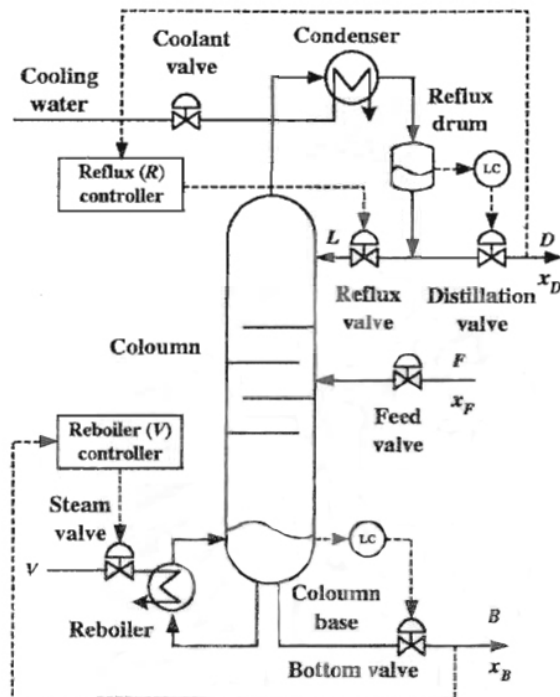
บทที่ 3

การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์

3.1 บทนำ

หลังจากได้กล่าวถึงทฤษฎีการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองในบทที่ผ่านมา ในบทนี้นำทฤษฎีการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองมาประยุกต์ใช้กับหอกลิ้นแยกสารสองชนิดและกระบวนการควบคุมระดับของเหลว โดยเนื้อหาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยในส่วนแรกอธิบายถึงพฤติกรรมองค์ประกอบ ลักษณะทางกายภาพ และแบบจำลองของหอกลิ้นแยกสารสองชนิด ในตอนท้ายของส่วนแรกอธิบายการจำลองผลและผลตอบสนองที่ได้ ในส่วนที่สองกล่าวถึงกระบวนการควบคุมระดับของเหลว การระบุเอกลักษณ์ของกระบวนการ และการจำลองผลเป็นการควบคุมกระบวนการเป็นหัวข้อสุดท้าย

3.2 หอกลิ้นแยกสารสองชนิด



รูปที่ 3.1 แผนภาพหอกลิ้นแยกสารสองชนิด

กระบวนการกลั่นเป็นกระบวนการแยกสารที่สำคัญกระบวนการหนึ่งในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี การกลั่นคือการแยกสารตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปออกจากกัน โดยสารที่จะแยกต้องมีจุดเดือดต่างกัน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเข้มข้นตามที่ผู้ปฏิบัติงานต้องการ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กล่าวถึงหอกลั่นสำหรับแยกสารสองชนิด ซึ่งก็คือ สารผสมมีองค์ประกอบอยู่สองส่วน สารที่มีความหนาแน่นจำเพาะต่ำกว่า เรียกว่า สารเบา ส่วนสารที่มีความหนาแน่นจำเพาะสูงกว่า เรียกว่า สารหนัก จะอยู่ในสถานะก๊าซหรือของเหลวก็ได้

หลักการพื้นฐานของการกลั่น เริ่มจากการให้ความร้อนแก่สารผสมที่ฐานหอ สารเบาซึ่งเป็นสารที่มีความหนาแน่นจำเพาะต่ำกว่าย่อมมีจุดเดือดที่ต่ำกว่าสารหนัก ทำให้เดือดเป็นไอร้อนได้ก่อนสารหนัก เมื่อสารเบาเดือดกลายเป็นไอร้อน ไอร้อนก็จะลอยขึ้นสู่ชั้นที่อยู่สูงขึ้นไปและถ่ายเทความร้อนให้แก่สารในชั้นบนต่อไป ความร้อนที่มากับไอร้อนนี้จะทำให้สารผสมในชั้นที่สองเดือดและระเหยกลายเป็นไอร้อนแล้วจึงถ่ายเทความร้อนให้ชั้นถัดขึ้นไปอีก นอกจากนี้ถ้าของเหลวที่เป็นสารผสมในชั้นใดมีอุณหภูมิไม่สูงพอที่จะระเหยได้ ของเหลวนั้นจะไหลสวนทางกับไอร้อนลงสู่ชั้นที่ต่ำกว่า ทำให้สารผสมที่อยู่ชั้นสูงขึ้นไปมีความบริสุทธิ์ของสารเบามากขึ้น และในขณะเดียวกันสารผสมที่ฐานหอจะมีความบริสุทธิ์ของสารหนักมากขึ้นด้วย โดยหอกลั่นมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่

3.1

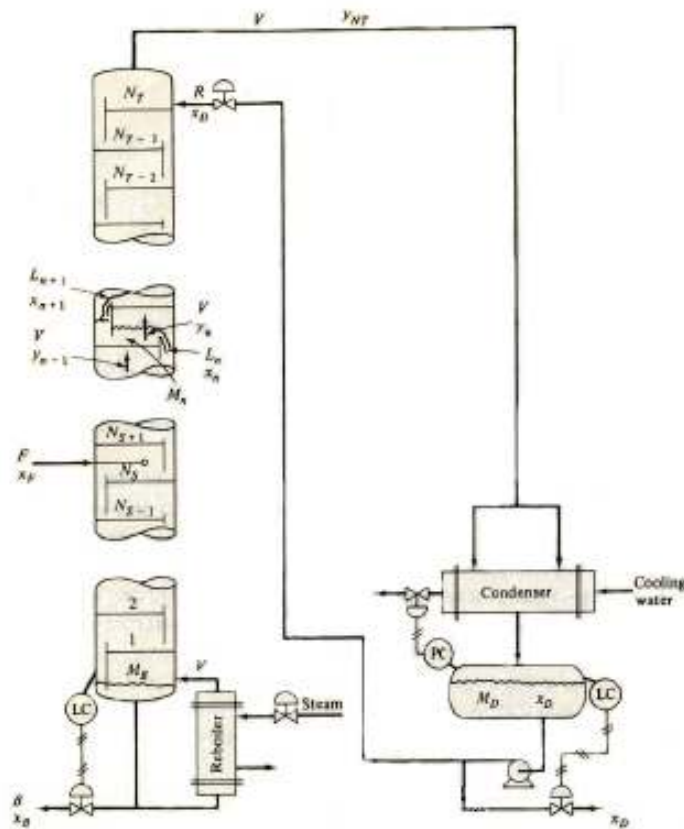
3.2.1 ส่วนประกอบของหอกลั่นแยกสารสองชนิด

หอกลั่นในห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมเป็นแบบจำลองของหอกลั่นขนาดใหญ่ที่ใช้ในอุตสาหกรรม ซึ่งมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมการกลั่นดังนี้

1. เครื่องควบแน่น (Condenser) เป็นอุปกรณ์สำหรับควบแน่นไอร้อนที่ออกทางยอดหอให้เป็นของเหลว
2. ครัมป้อนกลับ (Reflux drum) เป็นภาชนะรองรับสารที่ผ่านการควบแน่นแล้ว โดยจะไหลออกเป็นสองทาง ส่วนหนึ่งไหลออกเป็นผลิตภัณฑ์ยอดหอ (Top composition) อีกส่วนป้อนกลับเข้าสู่หอทางวาล์วป้อนกลับ (Reflux valve) อัตราส่วนของสารที่กลั่นได้และสารที่ป้อนกลับเข้าสู่หอถูกเรียกว่า สัดส่วนการป้อนกลับ (Reflux ratio)
3. หม้อต้มซ้ำ (Reboiler) เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างไอน้ำร้อนกับสารที่ฐานหอ หรือเป็นเครื่องที่ให้ความร้อนแก่สารที่ฐานหอตนเอง
4. ฐานหอ (Column base) เป็นบริเวณที่เกิดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่หอกลั่น และยังเป็นส่วนรองรับสารอีกด้วย สารที่ฐานหอนี้ส่วนหนึ่งไหลออกเป็นผลิตภัณฑ์ฐานหอ (Bottom

composition) และอีกส่วนหนึ่งถูกป้อนกลับเข้าสู่หอ โดยผ่านหม้อต้มซ้ำเพื่อควบคุมความเข้มข้นของสาร

5. ลำตัวหอ (Column) ประกอบไปด้วยชั้น (Tray) จำนวนหลายชั้นซึ่งมีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างไอร้อนและการป้อนกลับภายในหอ
6. วาล์วต่างๆ มีหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของสารในกระบวนการกลั่น
7. ท่อป้อนสารเข้าสู่หอและระบบป้อนสาร



รูปที่ 3.2 แผนภาพหอกลั่นแยกสารสองชนิดที่ใช้คำนวณแบบจำลอง

3.2.2 สมการพลวัตของหอกลั่นแยกสารสองชนิด

ก่อนที่จะกล่าวถึงแบบจำลองของหอกลั่นโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ต้องมีการระบุสมมติฐานและข้อกำหนดในการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบหอกลั่น ซึ่งกำหนดให้เป็นดังนี้

1. สมมติว่าองค์ประกอบของของเหลวในกระบวนการมี 2 ส่วน (Binary mixture) และกำหนดให้ค่าความสามารถในการกลายเป็นไอสัมพัทธ์ (Relative volatility) ของหอกลั่นมีค่าคงที่ และไอน้ำที่ออกจากชั้นแต่ละชั้นสมดุลกับของเหลวที่อยู่ในชั้นนั้นหรือแต่ละชั้นมี

ประสิทธิภาพ 100% นั่นเอง โดยความสัมพันธ์ของสมดุลไอ-ของเหลว (Vapor-liquid equilibrium) ของสารผสม ในรูปอย่างง่ายเป็นดังนี้

$$\bar{y}_n = \frac{\alpha \bar{x}_n}{1 + (\alpha - 1)\bar{x}_n} \quad (3.1)$$

โดยที่ \bar{x}_n คือ ความเข้มข้นของสารเบาในสารผสมสถานะของเหลว

\bar{y}_n คือ ความเข้มข้นของสารเบาในสารผสมสถานะก๊าซ

α คือ ค่าความสามารถในการกลายเป็นไอสัมพัทธ์

2. กำหนดให้สารผสมถูกป้อนเข้าในชั้นที่ N_F ด้วยอัตรา F ปอนด์โมลต่อนาที และมีความเข้มข้น x_F เศษส่วนโมล

3. สมมติให้ไอน้ำจากยอดหอถูกควบแน่นทั้งหมดในเครื่องควบแน่นและไหลผ่านไปยังดรัมป้อนกลับ ซึ่งบรรจุของเหลวจำนวน M_D ปอนด์โมล และสมมติว่าของเหลวในดรัมป้อนกลับผสมกันอย่างสมบูรณ์โดยมีความเข้มข้นเท่ากับ x_D เศษส่วน โมล สำหรับของเหลวในดรัมป้อนกลับนี้ ส่วนหนึ่งป้อนกลับไปยังยอดหอด้วยอัตราไหล L ปอนด์โมลต่อนาที และอีกส่วนหนึ่งส่งออกไปเป็นผลิตภัณฑ์ยอดหอด้วยอัตราไหล D ปอนด์โมลต่อนาที

4. สมมติว่าเวลาประวิง (Delay time) ในการเคลื่อนที่ของไอจากยอดหอไปจนถึงดรัมป้อนกลับและเวลาประวิงในการเคลื่อนที่ของของเหลวจากกาวลว้ป้อนกลับไปยังยอดหอ มีค่าน้อยมากจนละเลยได้

5. กำหนดให้ผลิตภัณฑ์ที่ฐานหอถูกส่งออกด้วยอัตราไหล B ปอนด์โมลต่อนาที และมีความเข้มข้น x_B เศษส่วนโมล

6. กำหนดให้ไอร้อนที่ได้จากการต้มสารในหม้อต้มซ้าลอยขึ้นจากฐานหอไปสู่ชั้นที่สองด้วยอัตราไหล V ปอนด์โมลต่อนาที

7. สมมติให้ของเหลวในหม้อต้มซ้และในฐานหอถูกผสมกันอย่างสมบูรณ์ และมีความเข้มข้น x_B เศษส่วนโมล จำนวน M_B ลิตร - โมล โดยที่ไอร้อนที่กำลังออกจากฐานหอขึ้นสู่ชั้นที่หนึ่งมีความเข้มข้น y_B เศษส่วน โมล ซึ่งอยู่ในสภาวะสมดุลกับความเข้มข้นของของเหลว x_B เศษส่วนโมล

8. กำหนดให้หอกลั่นมีทั้งหมด N_T ชั้น และของเหลวในชั้นที่ n มีจำนวน M_n ปอนด์โมล สมมติว่าผสมกันอย่างสมบูรณ์และมีความเข้มข้นเท่ากับ x_n เศษส่วนโมล

9. สมมติว่าไอร้อนเคลื่อนที่ผ่านแต่ละชั้นอยู่ตลอดเวลาโดยไม่ตกค้างอยู่ในชั้นใดๆ ถึงแม้ว่าในความเป็นจริงจะมีปริมาณไอน้ำค้างอยู่บ้าง แต่จำนวน โมลมีน้อยเมื่อเทียบกับจำนวน โมล

ของของเหลว เพราะความหนาแน่นของไอน้ำยิ่งมากเมื่อเทียบกับความหนาแน่นของของเหลว ทำให้ อัตราไหลของไอน้ำมีค่าเท่ากับตลอดทั้งหอ

10. กำหนดให้อัตราไหลของของเหลวในชั้นที่ n มีค่าเท่ากับ L_n ปอนด์โมลต่อนาที ในทางตรงกันข้ามกับอัตราไหลของไอร้อน อัตราไหลของของเหลวแต่ละชั้นจะมีค่าไม่เท่ากันและ ขึ้นอยู่กับจำนวนโมลของของเหลวในชั้นนั้นๆ โดยในที่นี้จะใช้เพียงความสัมพันธ์อย่างง่ายของสาร ป้อนกลับภายในและโมลในแต่ละชั้นของหอกถัน ดังนี้

$$L_n = \bar{L}_n + \left(\frac{M_n - \bar{M}_n}{\beta} \right) \quad (3.2)$$

เมื่อ \bar{L}_n และ \bar{M}_n คือ ค่าเริ่มต้นที่สถานะอยู่ตัวของอัตราไหล L_n และ โมล M_n ในแต่ละชั้น ส่วน β เป็นค่าคงตัวที่แตกต่างกันไปตามหอกถันแต่ละหอ

11. สมมติให้พลวัตของเครื่องควบแน่นและหม้อต้มซ้ำสามารถละเลยได้ จากข้อสมมติฐานข้างต้น สามารถเขียนสมการอธิบายระบบไม่เชิงเส้นซึ่งมีรูปแบบเป็นสมการอนุพันธ์แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณต่างๆ ในระบบหอกถัน อาจแยกตามส่วนประกอบของหอกถันได้ดังนี้

สมการสมดุลมวล (Total mass balance) ที่เครื่องควบแน่น

$$\frac{dM_D}{dt} = V - L - D \quad (3.3)$$

สมการสมดุลองค์ประกอบ (Component mass balance) ที่เครื่องควบแน่น

$$\frac{d(M_D x_D)}{dt} = V y_{N_T} - V x_D \quad (3.4)$$

สมการสมดุลมวลที่ชั้นบนสุด

$$\frac{dM_{N_T}}{dt} = L - L_{N_T} \quad (3.5)$$

สมการสมดุลองค์ประกอบที่ชั้นบนสุด

$$\frac{d(M_{N_T} x_{N_T})}{dt} = L x_D - L_{N_T} x_{N_T} + V y_{N_{T-1}} - V y_{N_T} \quad (3.6)$$

สมการสมดุลมวลที่ชั้นที่ n โดยที่ $n = 2, \dots, N_{T-1}$

$$\frac{dM_n}{dt} = L_{n+1} - L_n \quad (3.7)$$

สมการสมดุลองค์ประกอบที่ชั้นที่ n โดยที่ $n = 2, \dots, N_{T-1}$

$$\frac{d(M_n x_n)}{dt} = L_{n+1} x_{n+1} - L_n x_n + V y_{n-1} - V y_n \quad (3.8)$$

สมการสมดุลมวลที่ชั้นซึ่งมีการป้อนวัตถุดิบ

$$\frac{dM_{N_F}}{dt} = L_{N_F+1} - L_{N_F} + F \quad (3.9)$$

สมการสมดุลองค์ประกอบที่ชั้นซึ่งมีการป้อนวัตถุดิบ

$$\frac{d(M_{N_F} x_{N_F})}{dt} = L_{N_F+1} x_{N_F+1} - L_{N_F} x_{N_F} + V y_{N_F-1} - V y_{N_F} + F x_F \quad (3.10)$$

สมการสมดุลมวลที่ชั้นแรกหรือฐานหอ

$$\frac{dM_1}{dt} = L_2 - L_1 \quad (3.11)$$

สมการสมดุลองค์ประกอบที่ชั้นแรกหรือฐานหอ

$$\frac{d(M_1 x_1)}{dt} = L_2 x_2 - L_1 x_1 + V y_B - V y_2 \quad (3.12)$$

สมการสมดุลมวลที่หม้อต้มซ้ำ

$$\frac{dM_B}{dt} = L_1 - V - B \quad (3.13)$$

สมการสมดุลองค์ประกอบที่หม้อต้มซ้ำ

$$\frac{d(M_B x_B)}{dt} = L_1 x_1 - V y_B - B x_B \quad (3.14)$$

และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกลั่นผลิตภัณฑ์ยอดหอกับโมลของสารในดรัมป้อนกลับ และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกลั่นผลิตภัณฑ์ฐานหอกับโมลของสารที่ฐานหอเป็นดังนี้

$$D = f_D(M_D) \quad (3.15)$$

$$B = f_B(M_B) \quad (3.16)$$

เพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมจึงกำหนดให้ M_D และ M_B มีค่าคงที่

จากสมการที่ (3.3) - (3.14) ข้างต้นนั้น เป็นสมการแบบไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้น จึงต้องมีการประมาณให้เป็นเชิงเส้นรอบจุดทำงานหนึ่งๆ เพื่อให้ง่ายและเหมาะสมกับการแก้ปัญหาโดยอาศัยวิธีเซตแอกทิฟและวิธีจุดภายใน ทั้งนี้เมื่อพิจารณาตัวแปร a ใดๆ ในระบบ ถ้าให้ \bar{a} เป็นค่าเริ่มต้นที่สภาวะอยู่ตัวของ a จะได้ว่า

$$a = \bar{a} + \delta a \quad (3.17)$$

เมื่อ δa คือ ตัวแปรส่วนเพิ่ม (Incremental variable) ของ a โดยเป็นตัวแปรที่จะปรากฏในชุดสมการที่ทำให้เป็นเชิงเส้น เพราะการทำให้ระบบเป็นเชิงเส้นจะพิจารณาค่าเบี่ยงเบนของตัวแปรหนึ่งๆ จากค่าที่จุดสมดุลหรือค่าเริ่มต้นที่สภาวะอยู่ตัว

กล่าวโดยสรุป ตัวแปรของหอกลับ มีดังนี้

M_D คือ ปริมาณของเหลวที่ครัมป้อนกลับ

M_B คือ ปริมาณของเหลวที่ฐานหอ

M_n คือ ปริมาณของเหลวที่ฐานหอในชั้นที่ n

x_n คือ ความเข้มข้นของสารผสมในสถานะของเหลวในชั้นที่ n

y_n คือ ความเข้มข้นของสารผสมในสถานะก๊าซในชั้นที่ n

L_n คือ อัตราการไหลของของเหลวในชั้นที่ n

D คือ อัตราการไหลของสารผลิตภัณฑ์ยอดหอ

B คือ อัตราการไหลของสารผลิตภัณฑ์ฐานหอ

V คือ อัตราการต้มซ้ำ

L คือ อัตราการป้อนสารที่ยอดหอ

F คือ อัตราการป้อนสารที่กลางหอ

x_F คือ ความเข้มข้นของสารที่ป้อนเข้ากลางหอ

x_D คือ ความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ยอดหอ

x_B คือ ความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ฐานหอ

α คือ ค่าความสามารถในการกลายเป็นไอสัมพัทธ์

β คือ ค่าพารามิเตอร์ความสัมพันธ์ระหว่างสารป้อนกลับและโมลในแต่ละชั้น

หลังจากการประมาณให้เป็นเชิงเส้นแล้ว เขียนเป็นแบบจำลองเชิงเส้นในสภาวะอยู่ตัว (Steady-state model) ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \delta x_D \\ \delta x_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta L \\ \delta V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{F1}(s) \\ G_{F2}(s) \end{bmatrix} \delta F \quad (3.18)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} G_{11} &= \left(\frac{9.4 \times 10^{-3}}{12.72s + 1} \right) \left(\frac{s^2 - 2.73s + 2.48}{s^2 + 2.73 + 2.48} \right), & G_{12} &= \left(\frac{-8.9 \times 10^{-3}}{12.72s + 1} \right) \left(\frac{s^2 - 2.73s + 2.48}{s^2 + 2.73 + 2.48} \right) \\ G_{21} &= \left(\frac{1.02 \times 10^{-2}}{12.72s + 1} \right) \left(\frac{s^2 - 6s + 12}{s^2 + 6 + 12} \right), & G_{22} &= \left(\frac{1.07 \times 10^{-2}}{12.72s + 1} \right) \\ G_{F1} &= \left(\frac{3.9 \times 10^{-3}}{12.72s + 1} \right) \left(\frac{s^2 - 1.43s + 0.68}{s^2 + 1.43 + 0.68} \right), & G_{F2} &= \left(\frac{6.1 \times 10^{-3}}{12.72s + 1} \right) \end{aligned}$$

ซึ่งค่าของฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้นี้เป็นค่าที่ทำการประมาณให้มีอันดับต่ำเรียบร้อยแล้ว สามารถศึกษาเพิ่มเติมจาก [15] และจากสมการที่ 3.18 หากยังไม่คิดผลของสัญญาณรบกวน กล่าวคือ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของอันตรกการป้อนสารที่กลางหอ จะได้แบบจำลองเชิงเส้นเป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} \delta x_D \\ \delta x_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta L \\ \delta V \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

ในทางปฏิบัติการตรวจวัดความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์นั้นทำได้ยาก จึงเป็นการง่ายและสะดวกกว่าหากพิจารณาสัญญาณขาออกเป็นอุณหภูมิยอดหอ (T_1) และอุณหภูมิฐานหอ (T_9) จะได้แบบจำลองเป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} \delta T_1 \\ \delta T_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_{11}e^{-h_{11}s}}{T_{11}s+1} & \frac{K_{12}e^{-h_{12}s}}{T_{12}s+1} \\ \frac{K_{21}e^{-h_{21}s}}{T_{21}s+1} & \frac{K_{22}e^{-h_{22}s}}{T_{22}s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta L \\ \delta V \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

สามารถหาค่าต่างๆ ได้จากการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองหนึ่งหน่วย [16] และเปลี่ยนแบบจำลองให้อยู่ในรูปแบบจำลองปริภูมิสถานะระบบเวลาวิฤต ใช้เวลาสุ่ม 10 วินาที จะได้

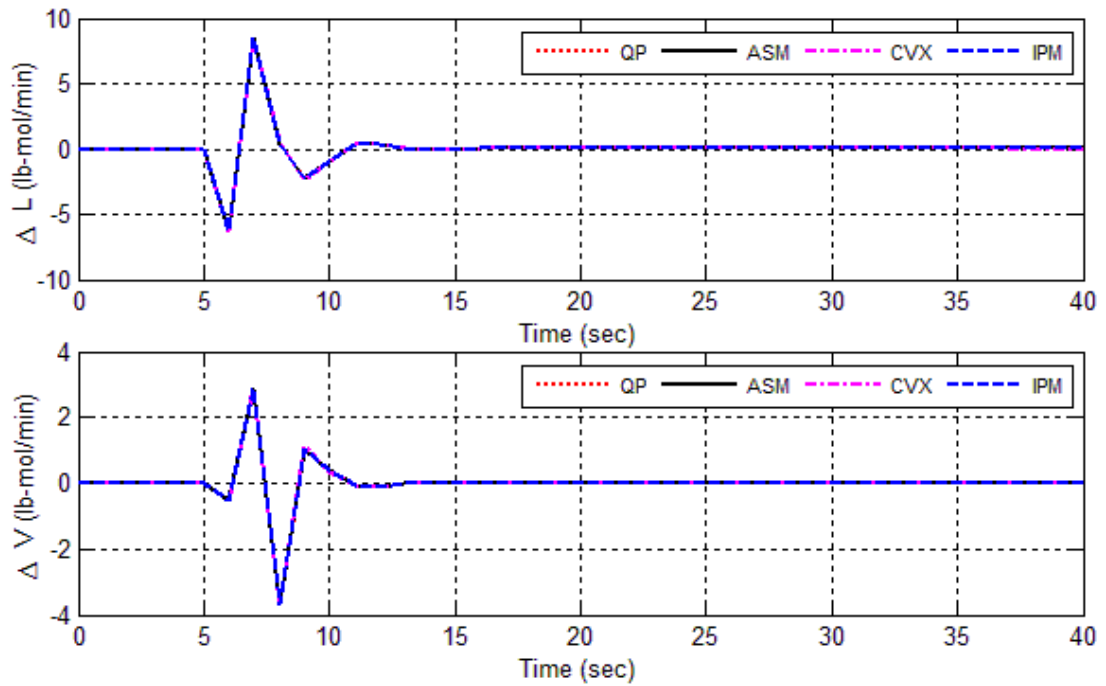
$$A = \begin{bmatrix} 0.3658 & 0.1027 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1.0575 & 0.8757 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.7439 & 0.1443 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.1275 & 0.9886 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.6197 & 0.1304 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.400 & 0.9589 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5393 & 0.1191 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.3217 & 0.9652 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.04282 & 4.3096 & 0 & 0 & -0.3117 & 7.0483 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.7946 & 0.2784 & 0 & 0 & -0.3317 & 33.5443 \end{bmatrix}^T$$

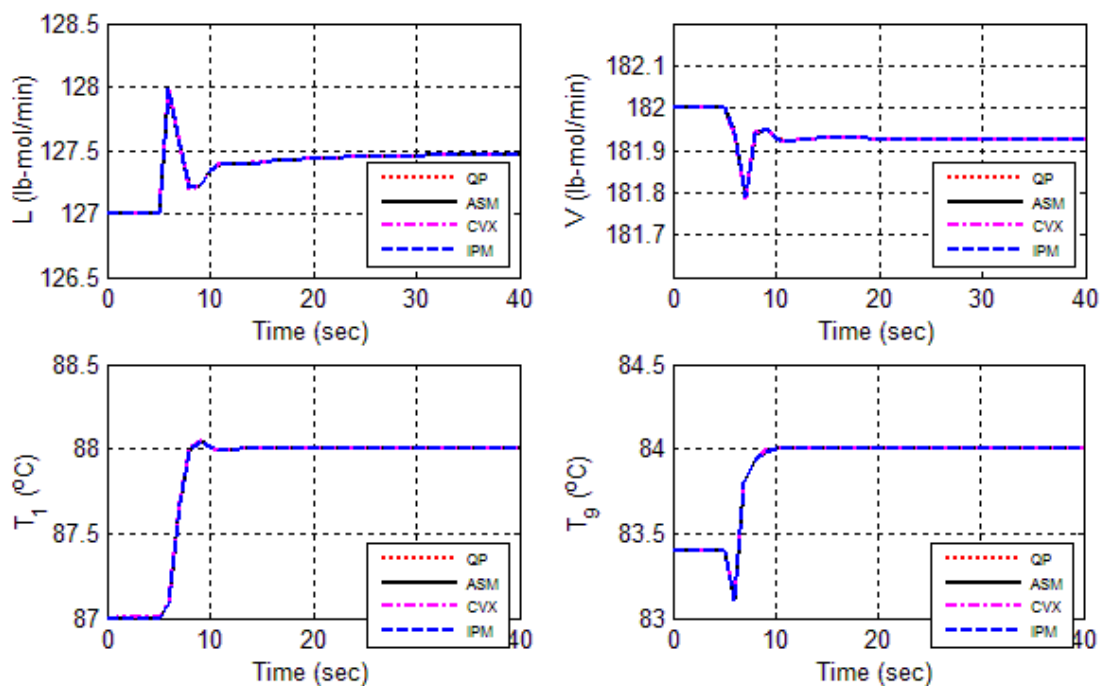
$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3.2.3 การจำลองผลหอกลิ้นแยกสารสองชนิด

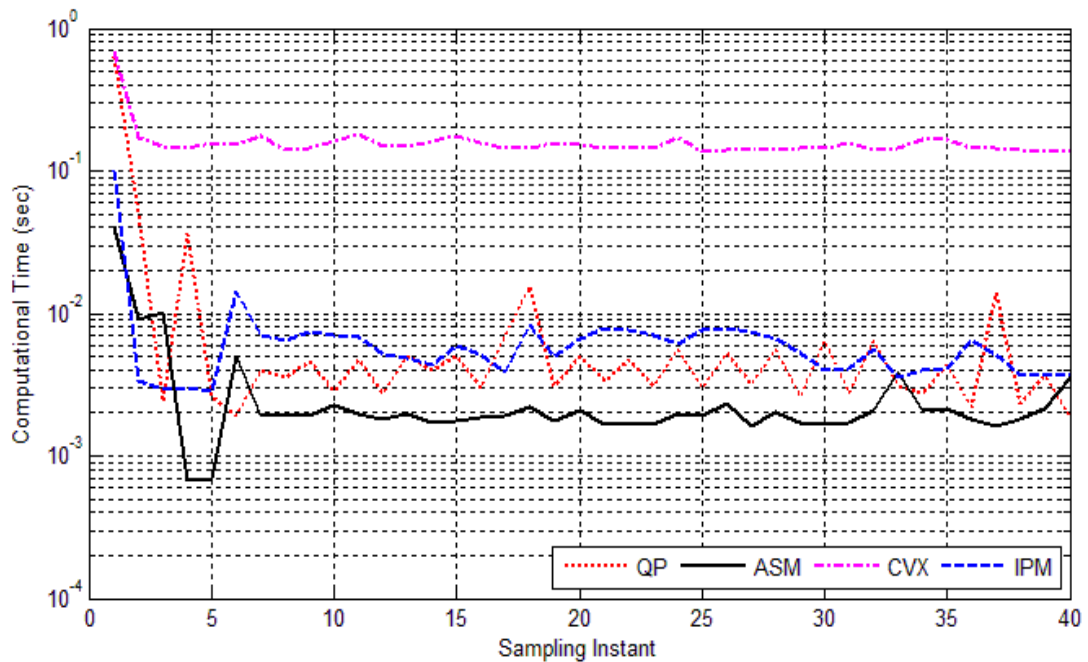
ในหัวข้อนี้ จะนำการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองมาประยุกต์ใช้กับหอกลิ้นแยกสารสองชนิด โดยการทดลองนี้อ้างอิงแบบจำลองหอกลิ้นแยกสารสองชนิดดังในสมการ (3.20) เนื่องจากแบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองเชิงเส้นในสภาวะอยู่ตัว สัญญาณขาออกจึงเป็นค่าเบี่ยงเบนของอุณหภูมิยอดหอและอุณหภูมิฐานหอจากค่าที่สภาวะอยู่ตัว ทำให้วัตถุประสงค์ของการควบคุมคือ ต้องการลดค่าความเบี่ยงเบนหรือสัญญาณออกให้มีค่าน้อย บวกกับวัตถุประสงค์ของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง คือ ต้องการทำให้สัญญาณขาออกที่ได้จากการทำนายเข้าใกล้ค่าสัญญาณอ้างอิงมากที่สุด จึงทดลองโดยเลือกอุณหภูมิฐานหอ 87 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิยอดหอ 83.4 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารที่ยอดหอ 127 ปอนด์โมลต่อนาทีและอัตราการต้มซ้ำ 182 ปอนด์โมลต่อนาทีเป็นจุดทำงาน กำหนดให้ค่าสัญญาณอ้างอิงดังนี้ อุณหภูมิฐานหอ 88 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิยอดหอ 84 องศาเซลเซียส ขอบเขตการทำนาย (N_p) มีค่า 30, ขอบเขตการควบคุม (N_c) มีค่า 20, ตัวถ่วงน้ำหนัก (r_w) มีขนาด 0.1, สัญญาณขาเข้าถูกจำกัดให้มีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน ± 10 ปอนด์โมลต่อนาทีและสถานะเริ่มต้นเป็นศูนย์ ที่เวลา 5 วินาที เปลี่ยนค่าสัญญาณอ้างอิงจากจุดทำงานเป็นสัญญาณอ้างอิงที่กำหนด จำลองผลเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมโดยการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่อาศัยวิธีเซตแอกทีฟกับการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่อาศัยวิธีจุดภายใน ทั้งยังเปรียบเทียบกับโค้ดสำเร็จรูป CVX และ QUADPROG ด้วย ดำเนินการผ่านโปรแกรม MATLAB ด้วยคอมพิวเตอร์ Intel Core i5 2.3 GHz หน่วยความจำ (RAM) 4 GB รูปที่ 3.3 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมเหมาะที่สุดที่คำนวณได้จากตัวควบคุม จากรูปพบว่า ค่าที่คำนวณได้อยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดไว้ รูปที่ 3.4 แสดงสัญญาณควบคุมและผลตอบสนอง จากรูปพบว่า เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงสัญญาณอ้างอิง ตัวควบคุมสามารถควบคุมกระบวนการได้และผลตอบสนองลู่เข้าสู่ค่าสัญญาณอ้างอิงที่ต้องการ รูปที่ 3.5 แสดงเวลาที่ใช้คำนวณสำหรับแต่ละรอบการวนซ้ำ พบว่า การหาค่าสัญญาณควบคุมเหมาะที่สุดโดยอาศัยวิธีเซตแอกทีฟใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมา คือ QUADPROG วิธีจุดภายใน และการคำนวณด้วยโค้ด CVX ใช้เวลานานที่สุด โดยเวลาในการคำนวณของแต่ละวิธีน้อยกว่าเวลาชักตัวอย่าง ทำให้การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองโดยอาศัยวิธีเซตแอกทีฟและการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองโดยอาศัยวิธีจุดภายในเหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้กับกระบวนการจริงต่อไป



รูปที่ 3.3 การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุดของหอกลิ้นแยกสารสองชนิด



รูปที่ 3.4 สัญญาณควบคุมและผลตอบสนองของหอกลิ้นแยกสารสองชนิด



รูปที่ 3.5 เวลาที่ใช้คำนวณแต่ละรอบการวนซ้ำของหอคลันแยกสารสองชนิด

3.3 กระบวนการควบคุมระดับของเหลว

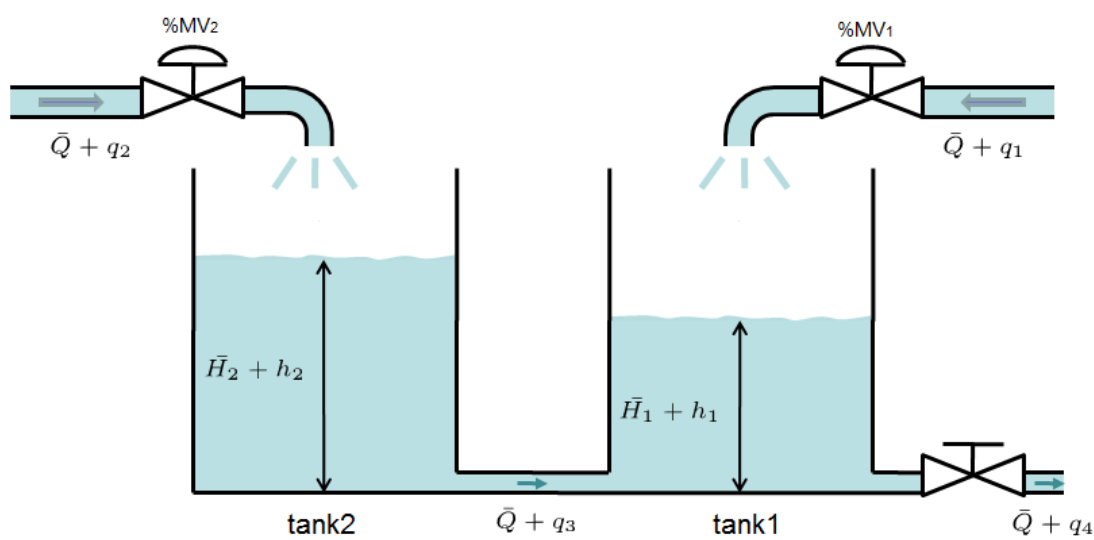
กระบวนการควบคุมระดับของเหลวเป็นกระบวนการพื้นฐานที่มักพบในอุตสาหกรรมทั่วไป อุตสาหกรรมขนาดเล็ก แม้กระทั่งในครัวเรือน องค์ประกอบของกระบวนการควบคุมระดับของเหลวหลักๆ ประกอบด้วย ถังพักสารหรือถังผสมสาร วาล์วควบคุม ปัม อุปกรณ์วัดสัญญาณ เช่น เซนเซอร์วัดอัตราการไหล เซนเซอร์วัดระดับ เป็นต้น ในอุตสาหกรรมขนาดเล็กและในอุตสาหกรรมครัวเรือนนั้น การควบคุมกระบวนการควบคุมระดับของเหลวไม่ยุ่งยากซับซ้อน อาจใช้มนุษย์ควบคุมได้โดยตรง แต่สำหรับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ การใช้มนุษย์ควบคุมนั้นค่อนข้างลำบาก จึงมีการประยุกต์ใช้ทฤษฎีทางระบบควบคุมเข้ามาช่วย ซึ่งทฤษฎีดั้งเดิมที่เป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวางและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายก็คือ ตัวควบคุมแบบพีไอดีนั่นเอง ปัจจุบันการพัฒนาทฤษฎีทางระบบควบคุมมีความก้าวหน้ามากขึ้น รวมทั้งอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับควบคุมเองก็พัฒนาขึ้นด้วย ทำให้เกิดการประยุกต์ใช้กลยุทธ์การควบคุมกระบวนการขั้นสูงในการควบคุมกระบวนการควบคุมระดับของเหลว สำหรับการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองนั้นถือเป็นกลยุทธ์การควบคุมกระบวนการขั้นสูงเช่นกัน การประยุกต์ใช้การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองกับกระบวนการควบคุมระดับของเหลวจึงเป็นหัวข้อที่น่าสนใจและน่าจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมได้ ในหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงการระบุเอกลักษณ์ของกระบวนการควบคุมระดับของเหลว

3.3.1 การระบุเอกลักษณ์ของกระบวนการควบคุมระดับของเหลว

ในบทนี้ จะกล่าวถึงกระบวนการควบคุมระดับของเหลวชนิดสองสัญญาณเข้า – สองสัญญาณออก ที่อยู่ในห้องปฏิบัติการระบบควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า โดยของเหลวที่ใช้คือน้ำ มีลักษณะทางกายภาพดังรูปที่ 3.6 และมีโครงสร้างของกระบวนการดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 ลักษณะทางกายภาพของกระบวนการควบคุมระดับของเหลว



รูปที่ 3.7 โครงสร้างกระบวนการควบคุมระดับของเหลว

จากรูปที่ 3.7 เห็นว่า มีถึงน้ำทั้งหมด 2 ถัง มีวาล์วควบคุมทั้งหมด 2 ตัว ทำให้วัตถุประสงค์ของการควบคุม ได้ว่า ต้องการให้ความสูงของระดับน้ำทั้งสองถังอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ โดยควบคุมเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วควบคุมทั้งสองตัว จากวัตถุประสงค์นี้ ทำให้ความสูงของระดับน้ำเป็นสัญญาณออก และเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วควบคุมเป็นสัญญาณเข้า ได้แบบจำลองที่แทนความสัมพันธ์ข้างต้นเป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \%MV_1 \\ \%MV_2 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

ซึ่งการสร้างแบบจำลองโดยอาศัยการระบุเอกลักษณ์นั้น สามารถกระทำได้โดยพิจารณาแบบจำลองอย่างง่าย ได้แก่ แบบจำลองอันดับหนึ่งที่รวมการประวิงเวลา จะได้

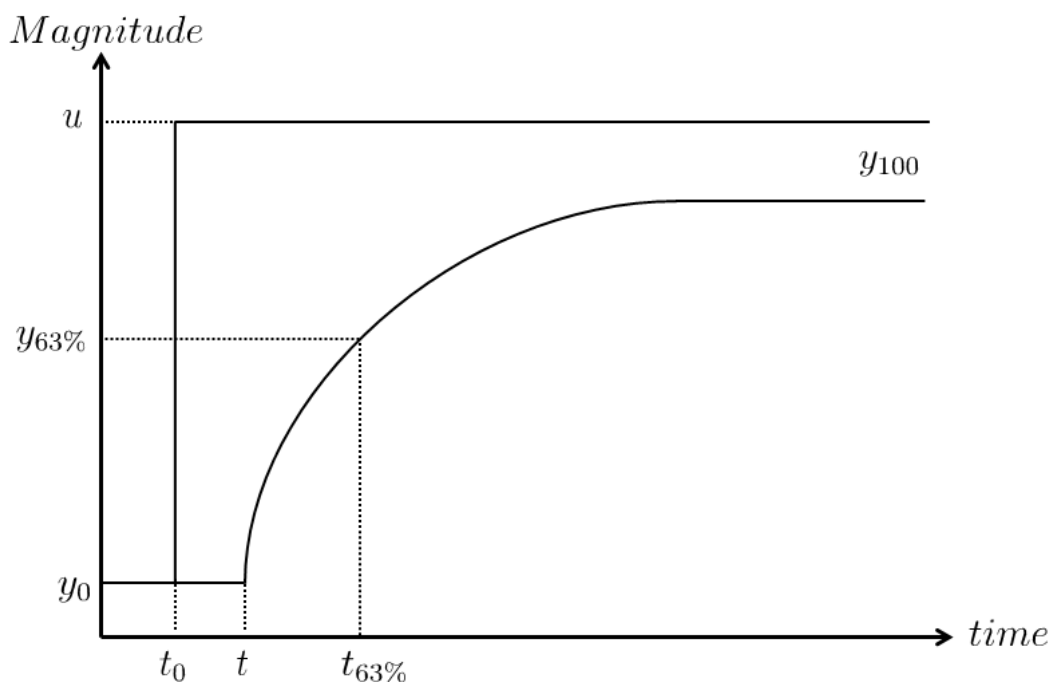
$$\begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_{11}e^{-h_{11}s}}{T_{11}s+1} & \frac{K_{12}e^{-h_{12}s}}{T_{12}s+1} \\ \frac{K_{21}e^{-h_{21}s}}{T_{21}s+1} & \frac{K_{22}e^{-h_{22}s}}{T_{22}s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \%MV_1 \\ \%MV_2 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

กระบวนการควบคุมระดับของเหลวเป็นกระบวนการที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น แต่หากพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขนาดเล็ก ก็จะทำให้ได้ความสัมพันธ์แบบเป็นเชิงเส้น ดังนั้น จะได้แบบจำลองที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างการเบี่ยงเบนความสูงของระดับน้ำและการเบี่ยงเบนเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์ว เป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} \delta H_1 \\ \delta H_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_{11}e^{-h_{11}s}}{T_{11}s+1} & \frac{K_{12}e^{-h_{12}s}}{T_{12}s+1} \\ \frac{K_{21}e^{-h_{21}s}}{T_{21}s+1} & \frac{K_{22}e^{-h_{22}s}}{T_{22}s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \%MV_1 \\ \delta \%MV_2 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

จากแบบจำลองข้างต้น ทำการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีวิเคราะห์ผลตอบสนองสถานะชั่วครู่ด้วยสัญญาณขั้นบันไดซึ่งเป็นวิธีไม่อิงพารามิเตอร์ ก่อนทำการระบุเอกลักษณ์จำเป็นต้องเลือกจุดทำงานเสียก่อน ในที่นี้เลือกจุดทำงานของวาล์วควบคุมตัวที่หนึ่ง 45 เปอร์เซ็นต์ และวาล์วควบคุมตัวที่สอง 40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อผลตอบสนองเข้าสู่สถานะอยู่ตัวแล้ว จึงป้อนสัญญาณขั้นบันไดขนาดหนึ่งหน่วย จากนั้นรอนจนกระทั่งผลตอบสนองเข้าสู่สถานะอยู่ตัวใหม่ นำกราฟผลตอบสนองที่ได้ มาวิเคราะห์หาค่าอัตราขยาย เวลาประวิง และค่าคงตัวเวลา ตามสมการ 3.24

$$\begin{aligned} K &= \frac{y_{100} - y_0}{u} \\ h &= t - t_0 \\ T &= t_{63\%} - t \end{aligned} \quad (3.24)$$



รูปที่ 3.8 ผลตอบสนองขั้นบันไดของแบบจำลองอันดับหนึ่งที่มีการหน่วงเวลา

เนื่องจากกระบวนการมีสัญญาณขาเข้า 2 สัญญาณ การป้อนสัญญาณขั้นบันไดขนาดหนึ่งหน่วยจึงต้องดำเนินการ 2 ครั้ง ครั้งแรกปรับเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วควบคุมตัวที่ 1 เป็น 46 เปอร์เซ็นต์ รอจนกระทั่งผลตอบสนองเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวใหม่ จากนั้นทำการทดลองซ้ำอีกครั้งเพื่อปรับค่าเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วควบคุมตัวที่ 2 เป็น 41 เปอร์เซ็นต์ ได้แบบจำลองเป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} \delta H_1 \\ \delta H_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3.2e^{-7s}}{452s+1} & \frac{4.15e^{-32s}}{416s+1} \\ \frac{3.1e^{-32s}}{472s+1} & \frac{4.9e^{-4s}}{443s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \% MV_1 \\ \delta \% MV_2 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

เมื่อได้แบบจำลองตามสมการ (3.25) จากนั้นทำการประมาณเวลาประวิงด้วยวิธีการประมาณพาดอันดับสอง ซึ่งมีสมการดังนี้

$$e^{-hs} \approx \frac{1 - \frac{hs}{2} + \frac{(hs)^2}{12}}{1 + \frac{hs}{2} + \frac{(hs)^2}{12}} \quad (3.26)$$

จะได้

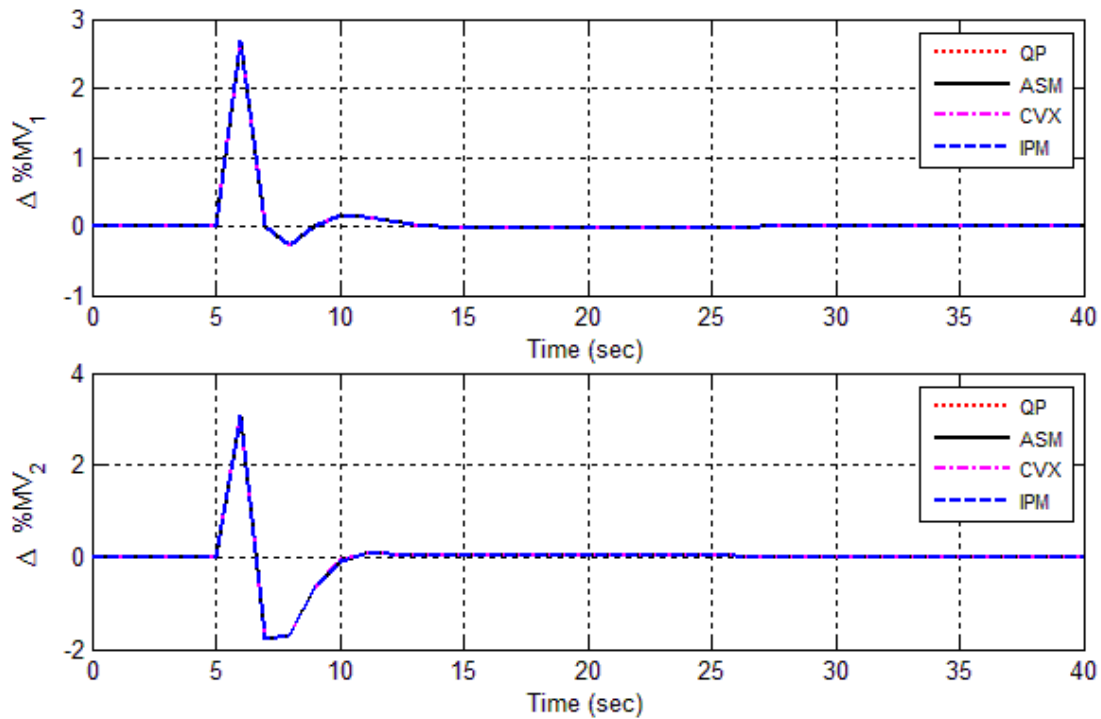
$$\begin{bmatrix} \delta H_1 \\ \delta H_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3.2s^2 - 2.743s + 0.7837}{382s^3 + 164.7s^2 + 23.82s + 0.06122} & \frac{4.15s^2 - 0.7781s + 0.04863}{416s^3 + 79s^2 + 5.063s + 0.01172} \\ \frac{3.1s^2 - 0.5813s + 0.03633}{472s^3 + 89.5s^2 + 5.719s + 0.01172} & \frac{4.9s^2 - 7.35s + 3.675}{443s^3 + 665.5s^2 + 333.8s + 0.75} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \% MV_1 \\ \delta \% MV_2 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

สำหรับการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองนั้น แบบจำลองของกระบวนการต้องเป็นแบบจำลองระบบเวลาวิฤต ดังนั้น จึงต้องแปลงแบบจำลองในสมการที่ 3.27 จากระบบเวลาต่อเนื่องเป็นระบบเวลาวิฤต โดยใช้เวลาลูกม 42 วินาที จะได้

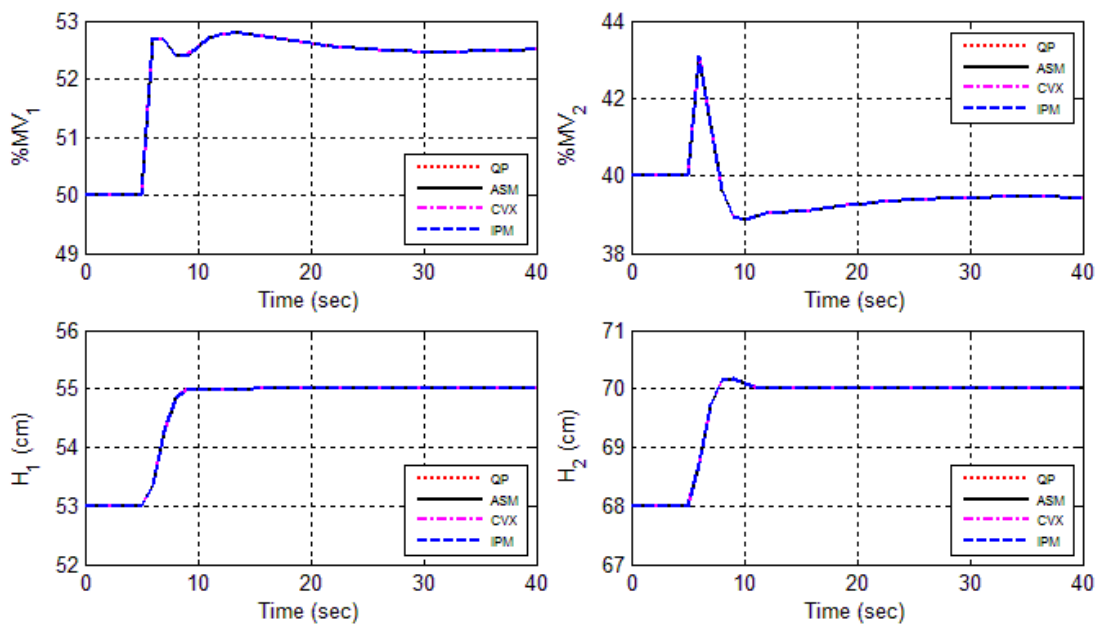
$$G(z) = \begin{bmatrix} \frac{1.013z^2+0.3199z-5.833e-005}{z^3-0.896z^2+0.0001035z} & \frac{0.1027z^2+0.2944z+0.01159}{z^3-0.8788z^2-0.02241z-0.0003436} \\ \frac{0.06773z^2+0.1953z+0.0077}{z^3-0.8897z^2-0.02268z-0.0003478} & \frac{0.4027z^2+0.04042z-1.559e-015}{z^3-0.9096z^2} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

3.3.2 การจำลองผลกระบวนการควบคุมระดับของเหลว

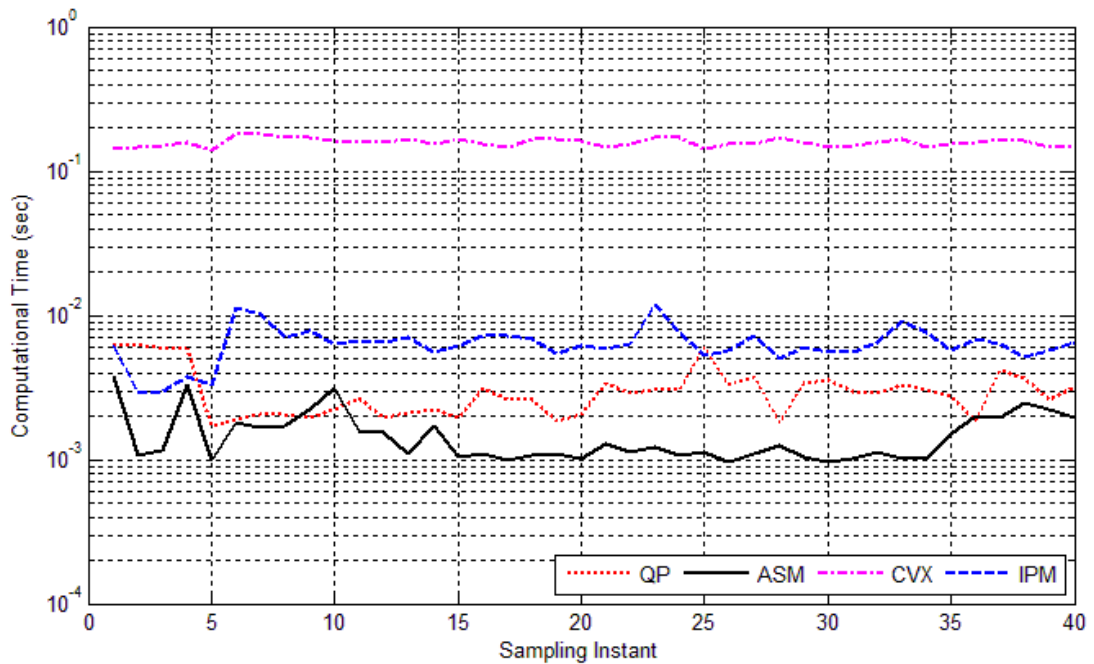
ในหัวข้อนี้กล่าวถึงการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่ประยุกต์ใช้กับกระบวนการควบคุมระดับของเหลว โดยใช้แบบจำลองในสมการ (3.28) วัตถุประสงค์ของการควบคุมกระบวนการควบคุมระดับของเหลว คือ ต้องการควบคุมให้ของเหลวในถังอยู่ในระดับที่ต้องการ เริ่มต้นทำการทดลองโดยกำหนดของเหลวในถังที่หนึ่งอยู่ที่ระดับ 45 เซนติเมตร ของเหลวในถังที่สองอยู่ที่ระดับ 58 เซนติเมตร วาล์วตัวที่หนึ่งเปิด 50 เปอร์เซ็นต์ และวาล์วตัวที่สองเปิด 40 เปอร์เซ็นต์เป็นจุดทำงาน เมื่อถึงวินาทีที่ 5 ต้องการให้ระดับน้ำในถังที่อยู่ที่ระดับ 50 เซนติเมตร และถังที่สองอยู่ที่ระดับ 65 เซนติเมตร ขอบเขตการทำนาย (N_p) มีค่า 40, ขอบเขตการควบคุม (N_c) มีค่า 30, ตัวถ่วงน้ำหนัก (r_w) มีขนาด 0.1, สัญญาณขาเข้าถูกจำกัดให้มีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน ± 5 เปอร์เซ็นต์เปิดวาล์วควบคุมและสถานะเริ่มต้นเป็นศูนย์ จำลองผลเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมโดยตัวควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่อาศัยวิธีเซตแอกทีฟ วิธีจุดภายใน QUADPROG และ CVX ผ่านโปรแกรม MATLAB ด้วยคอมพิวเตอร์ Intel Core i5 2.3 GHz หน่วยความจำ (RAM) 4 GB รูปที่ 3.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุดที่คำนวณได้จากตัวควบคุม จากรูปพบว่า สัญญาณควบคุมที่คำนวณได้มีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน ± 5 เปอร์เซ็นต์เปิดวาล์วควบคุมซึ่งอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดไว้ รูปที่ 3.10 แสดงสัญญาณควบคุมและผลตอบสนอง พบว่า ตัวควบคุมสามารถควบคุมกระบวนการได้ ถึงแม้ว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับของเหลวที่ต้องการก็ตาม รูปที่ 3.11 แสดงเวลาที่ใช้คำนวณในแต่ละรอบการวนซ้ำ พบว่า การหาค่าสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุดโดยอาศัยวิธีเซตแอกทีฟใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมา คือ QUADPROG วิธีจุดภายใน และการคำนวณด้วยโค้ด CVX ใช้เวลานานที่สุด โดยที่เวลาคำนวณของทุกวิธีน้อยกว่าเวลาชักตัวอย่าง ส่งผลให้การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่อาศัยวิธีเซตแอกทีฟและการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่อาศัยวิธีจุดภายในมีความเหมาะสมที่จะประยุกต์ใช้ควบคุมกระบวนการควบคุมระดับของเหลวในห้องปฏิบัติการระบบควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.9 การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการควบคุมระดับ



รูปที่ 3.10 สัญญาณควบคุมและผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมระดับของเหลว



รูปที่ 3.11 เวลาที่ใช้คำนวณแต่ละรอบการวนซ้ำของกระบวนการควบคุมระดับของเหลว

3.4 บทสรุป

ในบทนี้ นำทฤษฎีการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่อาศัยวิธีเซตแอกทีฟ และการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่อาศัยวิธีจุดภายใน ซึ่งเป็นทฤษฎีการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองแบบออนไลน์และเป็นทฤษฎีการควบคุมกระบวนการขั้นสูงมาประยุกต์ใช้ควบคุมหอกลิ้นแยกสารสองชนิดและกระบวนการควบคุมระดับของเหลว จากการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์พบว่า ตัวควบคุมทั้งสองแบบสามารถควบคุมกระบวนการทั้งสองได้ตรงตามวัตถุประสงค์การควบคุมของแต่ละกระบวนการ พร้อมทั้งใช้เวลาคำนวณหาค่าสัญญาณควบคุมเหมาะสมที่สุดในแต่ละรอบการวนซ้ำน้อยกว่าเวลาชักตัวอย่าง ด้วยเหตุนี้ทำให้ทฤษฎีการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่อาศัยวิธีเซตแอกทีฟ และวิธีจุดภายในมีความเหมาะสมและเป็นไปได้สำหรับการประยุกต์ควบคุมกระบวนการจริงต่อไป ในบทถัดไป จะอธิบายการประยุกต์ทฤษฎีการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่อาศัยวิธีเซตแอกทีฟ กับกระบวนการควบคุมระดับของเหลวผ่านระบบควบคุมแบบกระจายตัวที่ตั้งอยู่ในห้องปฏิบัติการงานวิจัยระบบควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การควบคุมกระบวนการควบคุมระดับของเหลว ด้วยระบบควบคุมแบบกระจายตัว

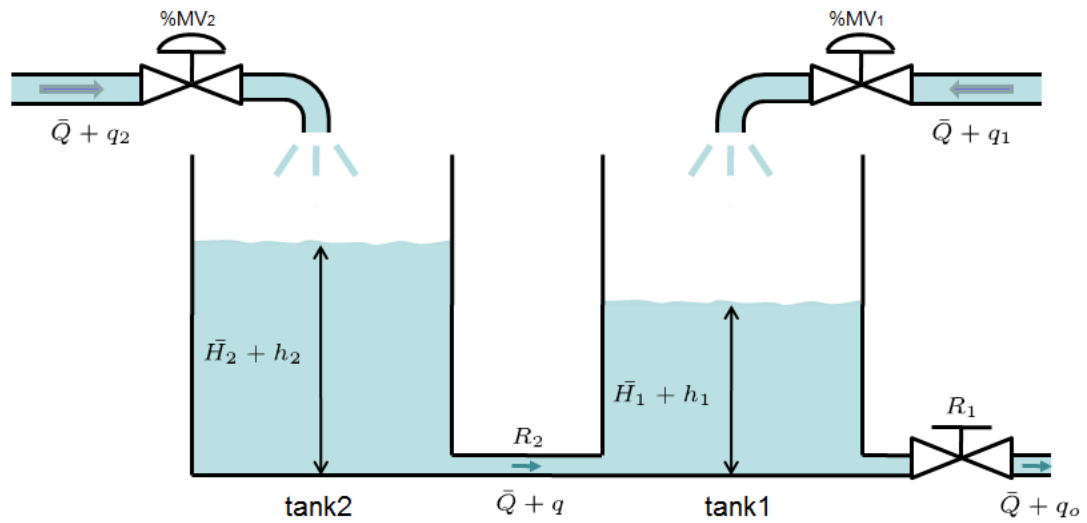
4.1 บทนำ

ในบทนี้ กล่าวถึงการประยุกต์ใช้การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่อาศัยวิธีเซตแอกทีฟหาค่าสัญญาณควบคุมเหมาะสมที่สุดควบคุมกระบวนการควบคุมระดับของเหลวผ่านระบบควบคุมแบบกระจายตัว ในส่วนแรกอธิบายการหาแบบจำลองของกระบวนการควบคุมระดับของเหลวแบบสองสัญญาณเข้า – สองสัญญาณออก จากนั้นอธิบายวิธีการประยุกต์ทฤษฎีการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองลงบนระบบควบคุมแบบกระจายตัว และอธิบายระเบียบวิธีสำหรับการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองผ่านระบบควบคุมแบบกระจายตัว สุดท้ายแสดงผลตอบสนองของกระบวนการเมื่อมีการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

4.2 แบบจำลองกระบวนการควบคุมระดับของเหลว

การทดลองในหัวข้อนี้ ใช้กระบวนการควบคุมระดับของเหลวที่อยู่ในห้องปฏิบัติการระบบควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มีลักษณะทางกายภาพดังแสดงในบทที่ 3 รูปที่ 3.6 จากรูปกระบวนการควบคุมระดับของเหลว มีถังพัก 2 ถัง มีวาล์วควบคุม 2 ตัว ป้อน 2 ตัว ทำให้สามารถเลือกรูปแบบของกระบวนการได้หลากหลาย ทั้งแบบสองสัญญาณเข้า – สองสัญญาณออกหรือแบบหนึ่งสัญญาณเข้า - หนึ่งสัญญาณออก

เริ่มต้นพิจารณาจากรูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างกระบวนการควบคุมระดับของเหลวแบบถังพักคู่ที่มีน้ำไหลเข้าสองทาง ไหลออกหนึ่งทาง กำหนดให้อัตราการไหลเป็นสัญญาณขาเข้า ความสูงของระดับน้ำในถังเป็นสัญญาณขาออก สมมติให้น้ำมีการไหลแบบราบเรียบ โดยปกติกระบวนการควบคุมระดับของเหลว มีลักษณะเป็นระบบแบบไม่เชิงเส้น แต่ในการวิจัยนี้ได้กำหนดให้มีจุดทำงานเดียวและเปลี่ยนแปลงการทำงานในช่วงแคบๆ ดังนั้น จึงสามารถประมาณให้เป็นระบบแบบเชิงเส้นได้ สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณขาเข้าและสัญญาณขาออกของแต่ละถังได้ดังจะอธิบายต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 กระบวนการควบคุมระดับของเหลวแบบถังพักคู่

ถึงที่ 1;

$$q(t) + q_1(t) - q_o(t) = \frac{dV_1(t)}{dt} \quad (4.1)$$

$$q(t) = \frac{h_2(t) - h_1(t)}{R_2} \quad (4.2)$$

$$q_o(t) = \frac{h_1(t)}{R_1} \quad (4.3)$$

$$V_1(t) = A_1 h_1(t) \quad (4.4)$$

แทนสมการ (4.2-4.4) ลงในสมการ 4.1 จะได้

$$\frac{dh_1(t)}{dt} = -\left(\frac{1}{A_1 R_1} + \frac{1}{A_1 R_2}\right)h_1(t) + \frac{h_2(t)}{A_1 R_2} + \frac{q_1(t)}{A_1} \quad (4.5)$$

ถึงที่ 2;

$$q_2(t) - q(t) = \frac{dV_2(t)}{dt} \quad (4.6)$$

$$V_2(t) = A_2 h_2(t) \quad (4.7)$$

แทนสมการ 4.2 และสมการ 4.7 ลงในสมการ 4.6 จะได้

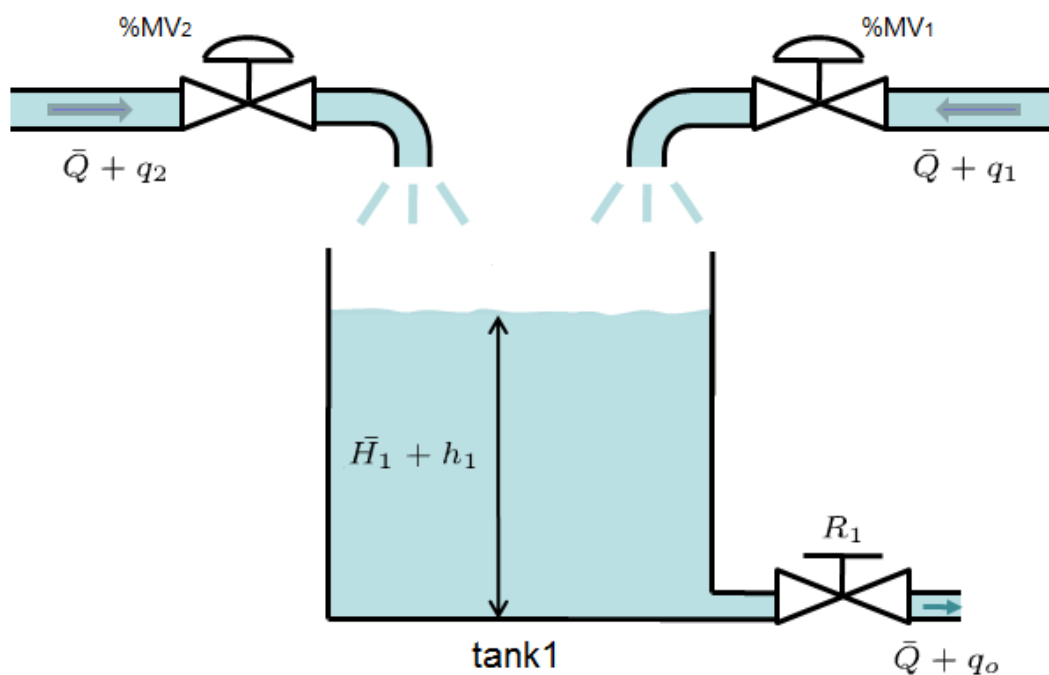
$$\frac{dh_2(t)}{dt} = \frac{h_1(t)}{A_2 R_2} - \frac{h_2(t)}{A_2 R_2} + \frac{q_2(t)}{A_2} \quad (4.8)$$

จากสมการ 4.5 และสมการ 4.8 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_1(t) \\ \dot{h}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{A_1 R_1} + \frac{1}{A_1 R_2}\right) & \frac{1}{A_1 R_2} \\ \frac{1}{A_2 R_2} & -\frac{1}{A_2 R_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1(t) \\ h_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{A_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{A_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

โดยที่ q_1 คือ อัตราการไหลเข้าถังที่ 1, q_2 คือ อัตราการไหลเข้าถังที่ 1, q_o คือ อัตราการไหลออก, q คือ อัตราการไหลออกจากถังที่ 1 ไปยังถังที่ 2, R_1 คือ การเปลี่ยนแปลงความสูงของระดับของเหลวต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของถังที่ 1, R_2 คือ การเปลี่ยนแปลงความสูงของระดับของเหลวต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของถังที่ 2, A_1 คือ พื้นที่หน้าของถังที่ 1, A_2 คือ พื้นที่หน้าของถังที่ 2, h_1 คือ ความสูงของระดับน้ำในถังที่ 1, h_2 คือ ความสูงของระดับน้ำในถังที่ 2, V_1 คือ ปริมาตรของน้ำในถังที่ 1, V_2 คือ ปริมาตรของน้ำในถังที่ 2

ในหัวข้อนี้ เลือกใช้กระบวนการแบบหนึ่งสัญญาณเข้า – หนึ่งสัญญาณออกเท่านั้นในการทดลองควบคุมผ่านระบบควบคุมแบบกระจายตัว โดยรับน้ำจากบ่ิมทั้ง 2 ตัว แต่ควบคุมวาล์วเพียง 1 ตัว อีก 1 ตัวเปิดคงที่ เนื่องจากการรับน้ำจากบ่ิมตัวใดตัวหนึ่งไม่สามารถคงระดับน้ำให้อยู่ในถังได้ จึงได้โครงสร้างเป็นดังรูป



รูปที่ 4.2 กระบวนการควบคุมระดับของเหลวแบบถึงพักเดียว

พิจารณาสมการ 4.9 ตามข้อกำหนดที่กล่าวมาข้างต้น จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์เป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_1(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{A_1 R_1} + \frac{1}{A_1 R_2}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{A_1} & \frac{1}{A_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

เนื่องจากปิดวาล์วระหว่างถังที่ 1 และถังที่ 2 ไม่มีน้ำจากถังที่ 2 ไหลผ่านมายังถังที่ 1 ทำให้ R_2 มีค่าเป็นอนันต์ จะได้

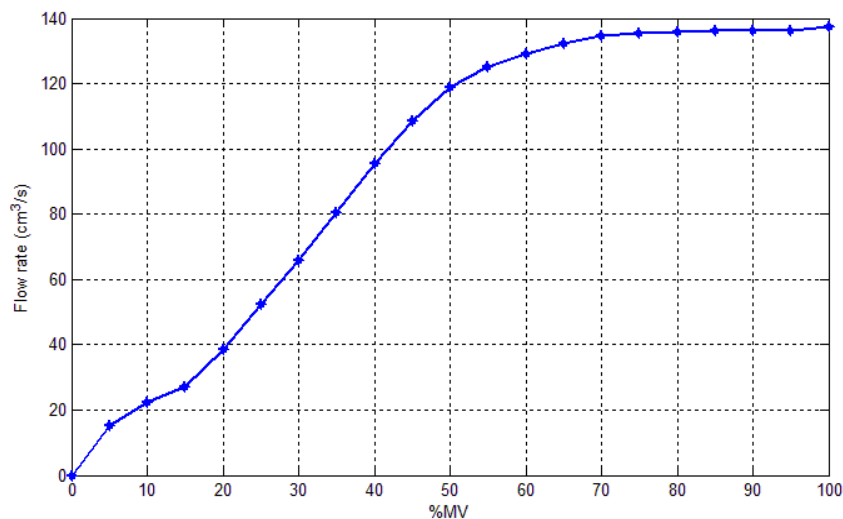
$$\begin{bmatrix} \dot{h}_1(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{A_1 R_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{A_1} & \frac{1}{A_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

โดย R_1 มีค่า 0.2 วินาทีต่อตารางเซนติเมตร, A_1 มีขนาดเท่ากับ A_2 และมีขนาด 315.4 ตารางเซนติเมตร จากสมการข้างต้น ได้แบบจำลองปริภูมิสถานะเป็น

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{h}_1(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -0.0159 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0032 & 0.0032 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \end{bmatrix} \\ y(t) &= h(t) \end{aligned} \quad (4.12)$$

จากแบบจำลองปริภูมิสถานะสังเกตได้ว่า อัตราการไหลเข้าเป็นสัญญาณเข้า, ความสูงของระดับของเหลวเป็นสัญญาณออกและในขณะเดียวกันก็เป็นตัวแปรสถานะด้วย

ในความเป็นจริงนั้น อุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมอัตราการไหลและความสูงของระดับของเหลวคือ วาล์วควบคุม ดังนั้น หากทราบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วควบคุมจะสามารถแปลงสัญญาณเข้าที่เดิมที่เป็นอัตราการไหลให้เป็นเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วควบคุมได้ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วควบคุมเป็นดังรูป



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วควบคุม

จากรูปพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วควบคุมเป็นแบบเอ็กโปเนนเชียล แต่หากแบ่งช่วงการพิจารณาพบว่า ช่วงระหว่าง 15-50 เปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วควบคุม

ซึ่งเป็นช่วงที่ครอบคลุมสำหรับการทดลองที่มีจุดทำงานที่ระดับ 40 เซนติเมตรนั้น มีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นและสามารถหาสมการเส้นตรงได้ ดังนี้

$$q_i = 2.6\%MV_1 - 14 \quad (4.13)$$

ทำให้ได้แบบจำลองปริภูมิสถานะเป็น

$$\begin{aligned} \dot{h}(t) &= -0.0159h(t) + 0.0083\%MV \\ y(t) &= h(t) \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$\text{โดยที่ } \%MV = \%MV_1 - \frac{14}{2.6} + \frac{100}{2.6}$$

4.2.1 การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์

ในหัวข้อนี้แบ่งการจำลองผลการควบคุมกระบวนการควบคุมระดับของเหลวแบบถังพักเดี่ยวออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจำลองผลโดยใช้ตัวควบคุมพีไอดีแบบพีไอ เปรียบเทียบการปรับค่าพารามิเตอร์พีไอระหว่าง 5 วิธี คือ วิธีค่าปริพันธ์ของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Integral of the Absolute Error: IAE), วิธีค่าปริพันธ์ของความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Integral of the Squared Error: ISE), วิธีค่าปริพันธ์ของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์แปรตามเวลา (Integral of the Time Absolute Error: ITAE), วิธีการปรับค่าแบบดาห์ลิน (Dahlin) และวิธีการปรับค่าแบบซีเกอร์-นิโคล (Ziegler-Nichols) ส่วนที่สองจำลองผลโดยใช้การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่อาศัยวิธีเซตแอกทีฟเป็นตัวควบคุม จำลองผลเปรียบเทียบการปรับค่าพารามิเตอร์ N_p , N_c และ r_w

4.2.1.1 การจำลองผลโดยใช้ตัวควบคุมพีไอดีแบบพีไอ

ก่อนจำลองผลโดยใช้ตัวควบคุมพีไอดี จำเป็นต้องทราบฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการเสียก่อน เพื่อนำฟังก์ชันถ่ายโอนมาคำนวณค่าพารามิเตอร์พีไอและค่าพารามิเตอร์ไอ จึงใช้การวิเคราะห์ผลตอบสนองสถานะชั่วครู่แบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยในการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการ และเลือกกระดပ်ของเหลวสูง 40 เซนติเมตรและวาล์วเปิด 30 เปอร์เซ็นต์เป็นจุดทำงาน

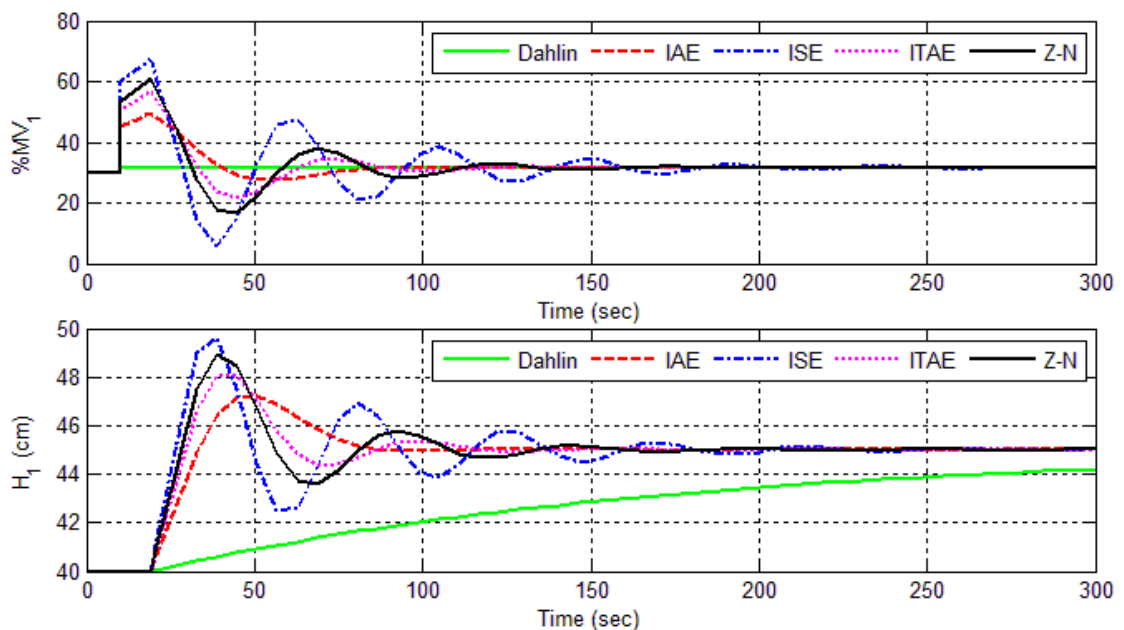
$$G(s) = \frac{3.3e^{-9s}}{154s + 1} \quad (4.15)$$

จากฟังก์ชันถ่ายโอนสมการ (4.15) สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์พีไอและค่าพารามิเตอร์ไอได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1

Method	P	I
ISE	6.023	0.157
IAE	3.068	0.090
ITAE	4.172	0.126
Dahlin	0.286	0.010
Ziegler-Nichols	4.714	0.159

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีแบบพีไอ

จำลองผลโดยเลือกจุดทำงานเดียวกับขั้นตอนการหาฟังก์ชันถ่ายโอน เมื่อเวลาผ่านไป 10 วินาที ต้องการความสูงของระดับของเหลวที่ 45 เซนติเมตร หรือสัญญาณอ้างอิงมีค่า 45 เซนติเมตรนั่นเอง ดำเนินการจำลองผลผ่านฟังก์ชัน SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB ด้วยคอมพิวเตอร์ Intel Core i5 2.3 GHz หน่วยความจำ (RAM) 4 GB ได้ผลการจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.4

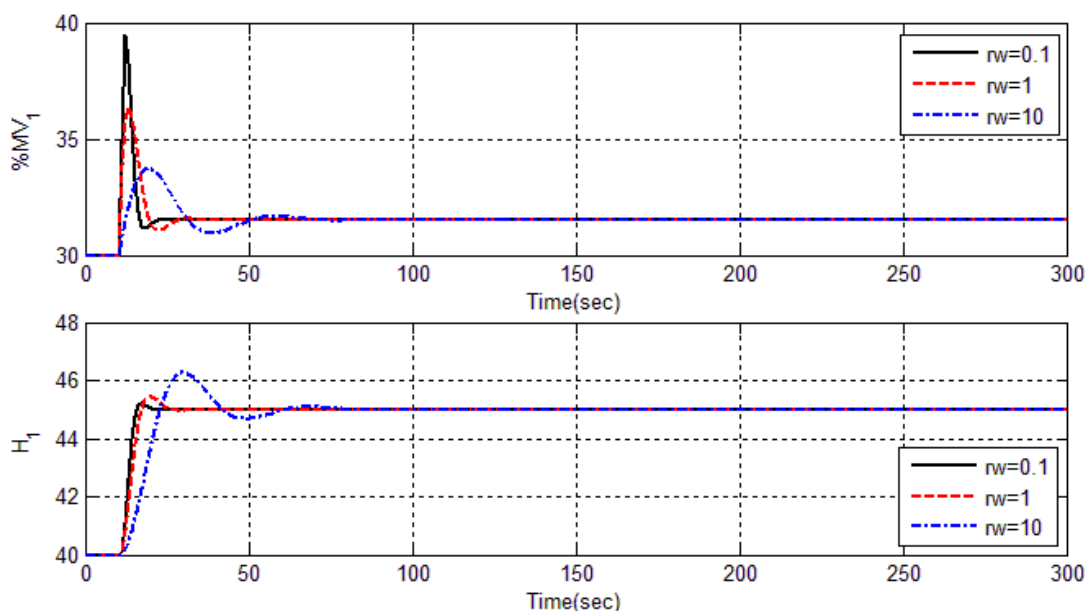


รูปที่ 4.4 สัญญาณควบคุมและผลตอบสนอง กรณีการปรับพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดี

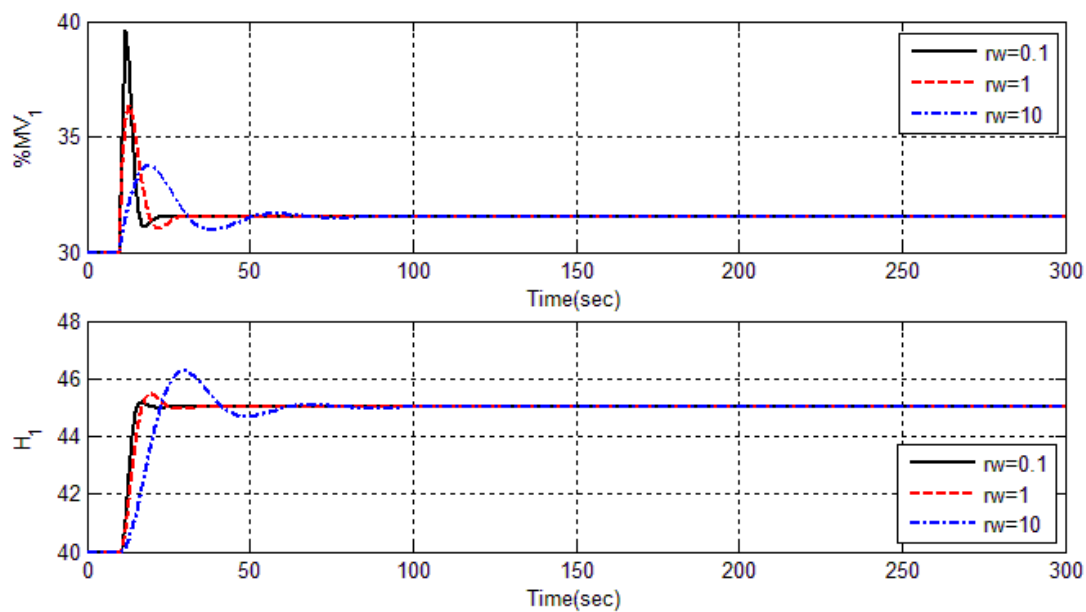
จากรูปพบว่า การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีแบบพีไอ โดยใช้วิธีค่าปริพันธ์ของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (IAE) ให้ผลตอบสนองดีที่สุด โดยมีค่าพุงเกินขนาดเล็กกว่าการปรับด้วยวิธีอื่นๆ และมีค่าประมาณ 4.44 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเวลาในการลู่เข้าก็เร็วกว่าการปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีอื่นเช่นกัน โดยใช้เวลาในการลู่เข้าประมาณ 90 วินาที

4.2.1.2 การจำลองผลโดยใช้การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่อาศัยวิธีเซตแอกทีฟ

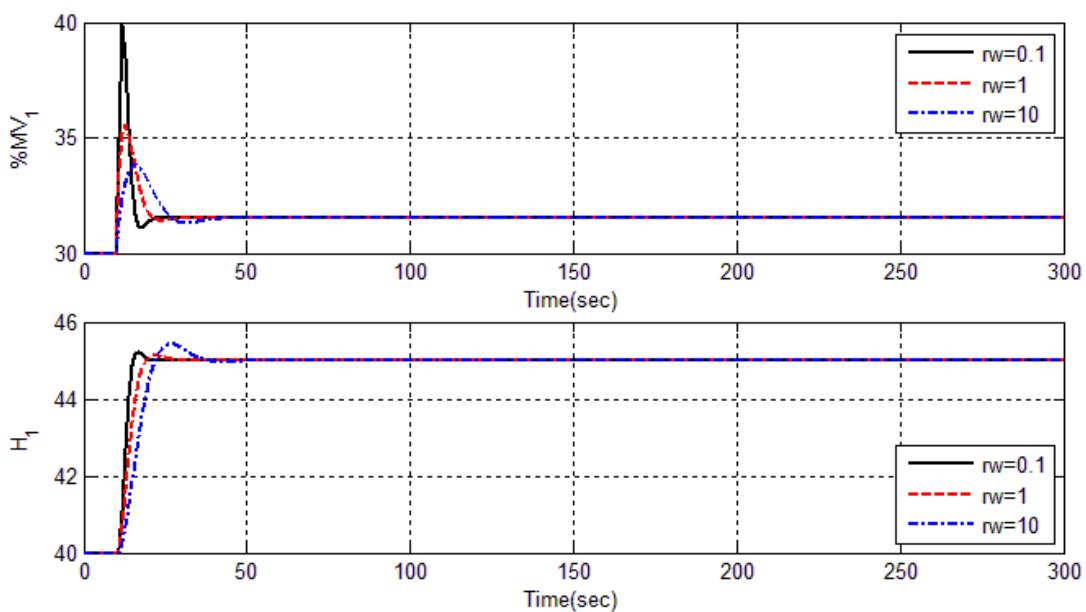
ในหัวข้อนี้ จำลองผลด้วยโปรแกรม MATLAB โดยใช้คอมพิวเตอร์ Intel Core i5 2.3 GHz หน่วยความจำ (RAM) 4 GB กำหนดค่าความสูงของระดับของเหลวที่ 40 เซนติเมตร และเปิดวาล์วควบคุมที่ 30 เปอร์เซ็นต์เป็นจุดทำงาน ที่เวลา 10 วินาที ต้องการค่าความสูงของระดับของเหลวที่ 45 เซนติเมตร จำลองผลเปรียบเทียบระหว่างการปรับค่าพารามิเตอร์ N_p , N_c และ r_w โดยแบ่งเป็น 4 กรณี คือ กรณีแรกปรับ $N_p = 5, N_c = 3$, กรณีที่สองปรับ $N_p = 5, N_c = 5$, กรณีที่สามปรับ $N_p = 8, N_c = 3$ และกรณีสุดท้ายปรับ $N_p = 8, N_c = 5$ โดยแต่ละกรณีจำลองผลเปรียบเทียบการปรับค่า r_w 3 ค่า คือ 0.1, 1 และ 10 ได้ผลการจำลองเป็นดังรูปที่ 4.5-4.12 เมื่อพิจารณาผลการจำลองในแต่ละกรณี พบว่า การปรับค่า $r_w = 0.1$ ให้ผลตอบสนองดีที่สุดในทุกกรณี โดยให้ผลตอบสนองที่ขนาดพุ่งเกินน้อยที่สุดและเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงเร็วที่สุด และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบแต่ละกรณีการปรับ N_p, N_c ตามในรูปที่ 4.5-4.8 ที่ $r_w = 0.1$ พบว่า ผลตอบสนองใกล้เคียงกันมาก สุดท้ายพิจารณาเวลาที่ใช้ในการคำนวณในแต่ละรอบของการชักตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.9-4.12 พบว่า กรณี $N_p = 5, N_c = 3$ ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด ดังนั้น จึงได้ว่า การปรับค่าพารามิเตอร์ของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่ให้ผลตอบสนองดีที่สุด คือ $N_p = 5, N_c = 3$ และ $r_w = 0.1$



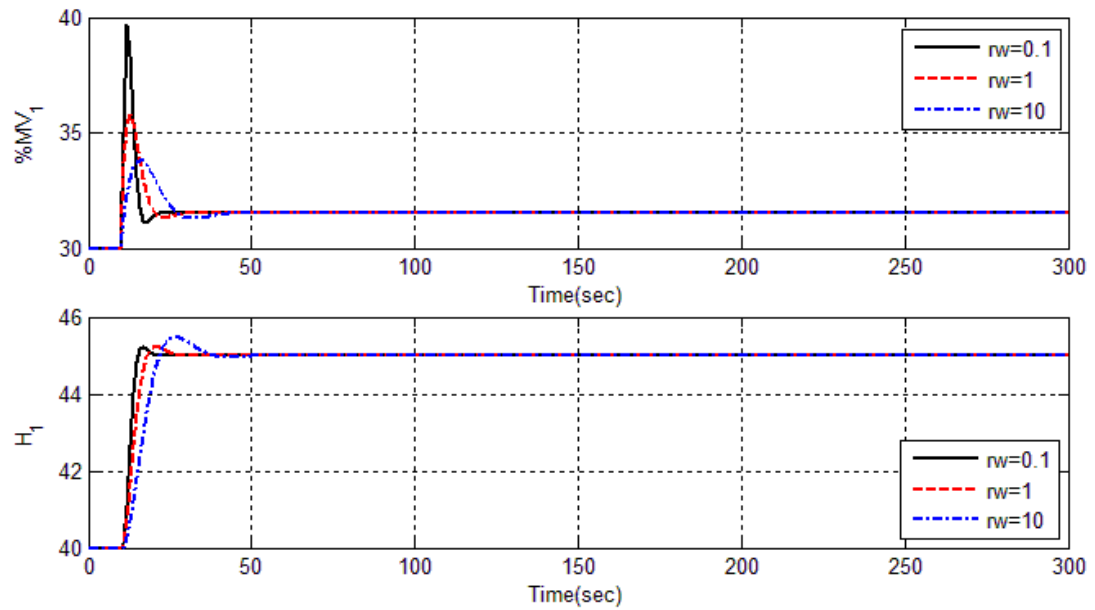
รูปที่ 4.5 สัญญาณควบคุมและผลตอบสนอง เปรียบเทียบการปรับค่า r_w กรณี $N_p = 5, N_c = 3$



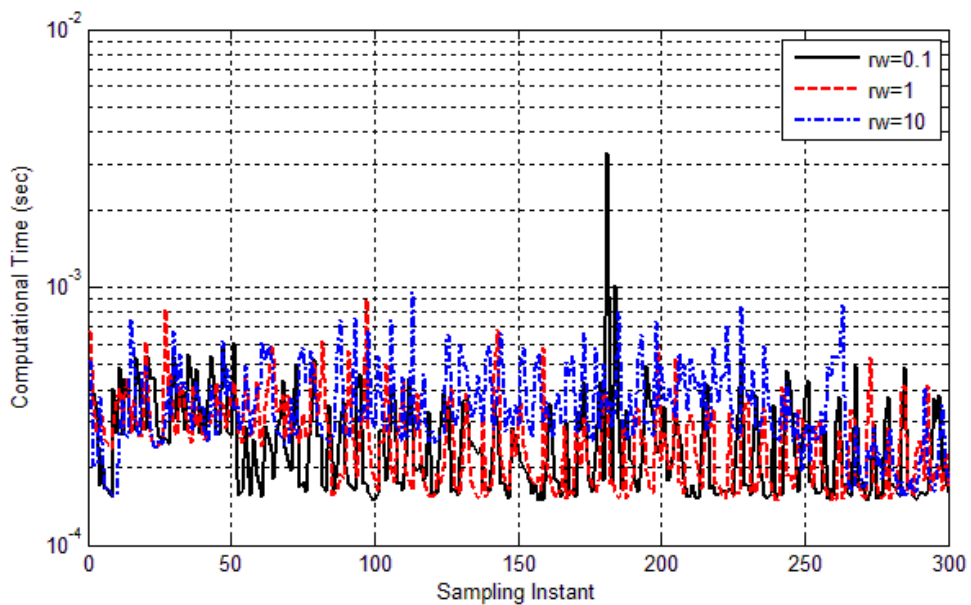
รูปที่ 4.6 สัญญาณควบคุมและผลตอบสนอง เปรียบเทียบการปรับค่า r_w กรณี $N_p = 5, N_c = 5$



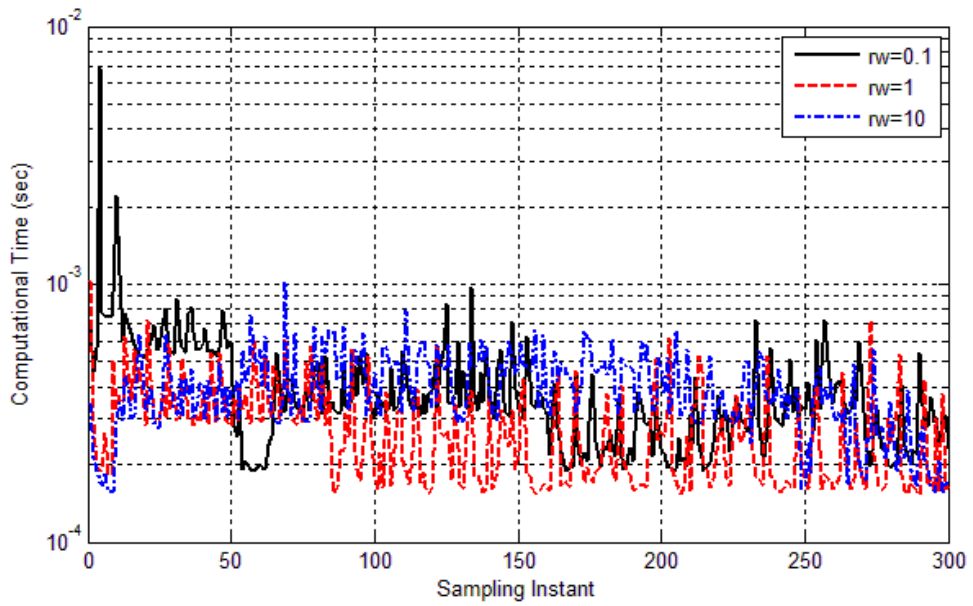
รูปที่ 4.7 สัญญาณควบคุมและผลตอบสนอง เปรียบเทียบการปรับค่า r_w กรณี $N_p = 8, N_c = 3$



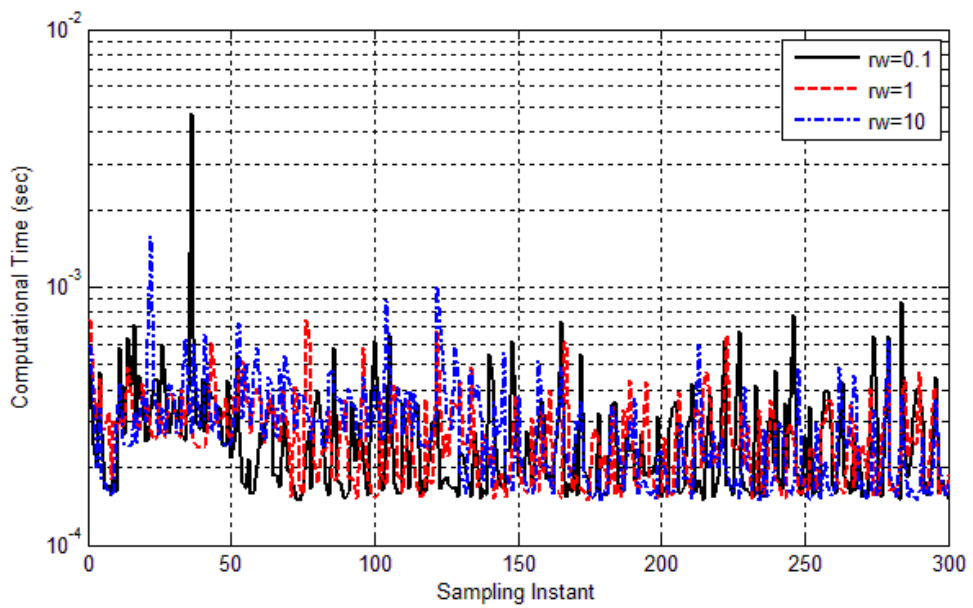
รูปที่ 4.8 สัญญาณควบคุมและผลตอบสนอง เปรียบเทียบการปรับค่า r_w กรณี $N_p = 8, N_c = 5$



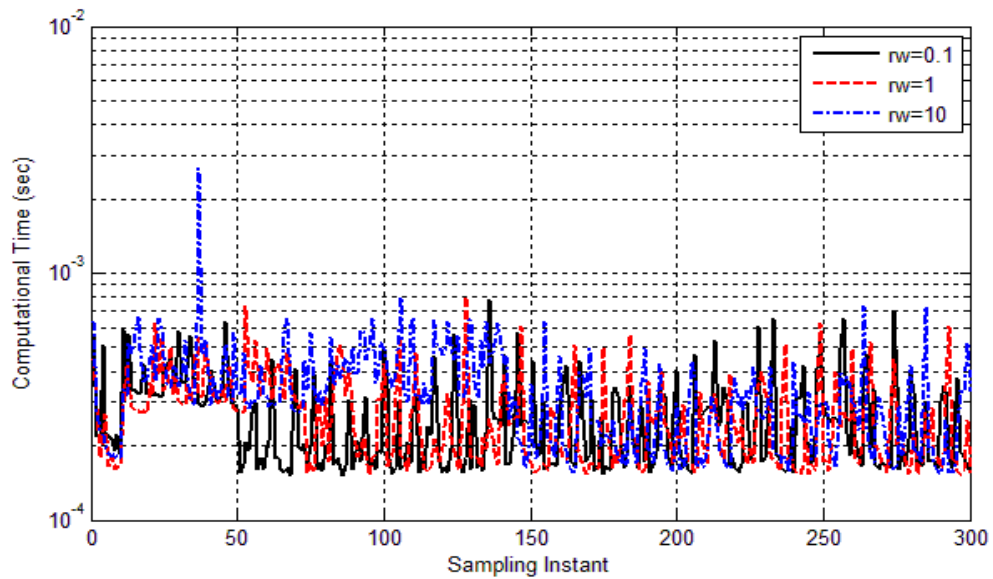
รูปที่ 4.9 เวลาในการคำนวณ เปรียบเทียบการปรับค่า r_w กรณี $N_p = 5, N_c = 3$



รูปที่ 4.10 เวลาในการคำนวณ เปรียบเทียบการปรับค่า r_w กรณี $N_p = 5, N_c = 5$

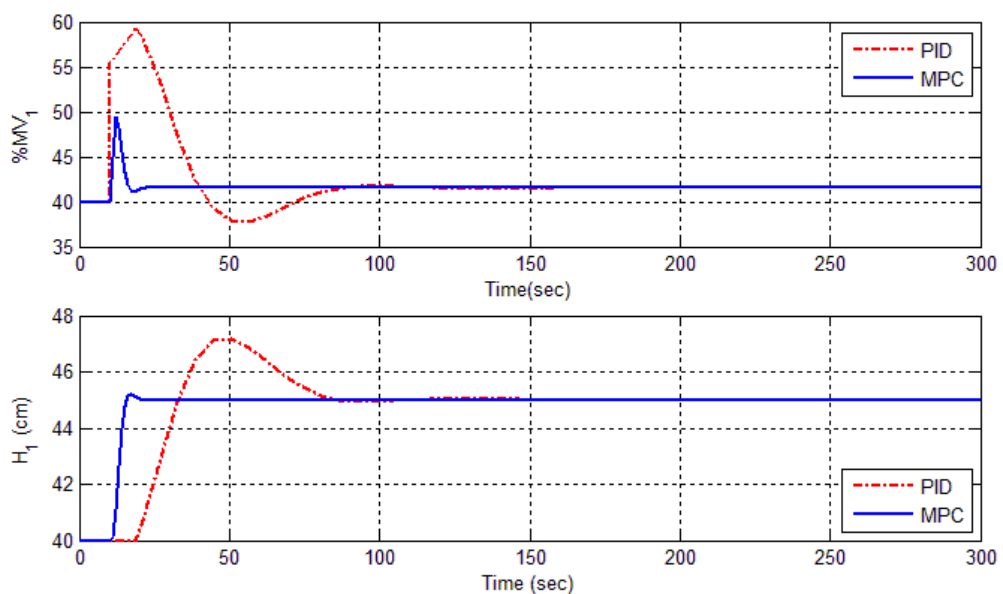


รูปที่ 4.11 เวลาในการคำนวณ เปรียบเทียบการปรับค่า r_w กรณี $N_p = 8, N_c = 3$



รูปที่ 4.12 เวลาในการคำนวณ เปรียบเทียบการปรับค่า r_w กรณี $N_p = 8, N_c = 5$

จากการจำลองผลการควบคุมกระบวนการควบคุมระดับของเหลวทั้ง 2 กรณี (ตัวควบคุมแบบพีไอดีและการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง) จึงนำการปรับค่าพารามิเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองดีที่สุดของทั้ง 2 กรณีมาเปรียบเทียบกัน ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.13 จากรูปพบว่า การควบคุมกระบวนการควบคุมระดับของเหลวโดยอาศัยการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองให้ผลตอบสนองดีกว่าตัวควบคุมพีไอดี โดยที่การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองให้ผลตอบสนองที่มีขนาดค่าพุ่งเกินน้อยกว่าและเวลาในการลู่เข้าเร็วกว่าตัวควบคุมพีไอดี



รูปที่ 4.13 สัญญาณควบคุมและผลตอบสนอง เปรียบเทียบระหว่าง PID กับ MPC

4.3 ขั้นตอนในการประยุกต์งานวิจัยผ่านระบบควบคุมแบบกระจายตัว

ระบบควบคุมแบบกระจายตัวหรือดีซีเอสเป็นเครือข่ายคมนาคมสำหรับตรวจสอบและควบคุมกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม ระบบควบคุมแบบกระจายตัว หมายถึง การติดตั้งเครื่องมือวัดและควบคุมแยกกระจายตามตำแหน่งต่างๆ ทั่วโรงงานอุตสาหกรรม โครงสร้างเบื้องต้นของระบบควบคุมแบบกระจายตัวหลักๆ ประกอบด้วย เครื่องมือสำหรับควบคุมกระบวนการผลิตติดตั้งในบริเวณพื้นที่การผลิตและเครื่องมือสำหรับติดต่อระหว่างระบบควบคุมแบบกระจายตัวกับผู้ปฏิบัติงานติดตั้งในบริเวณห้องควบคุม สำหรับการประยุกต์งานวิจัยผ่านระบบควบคุมแบบกระจายตัวต้องประยุกต์ผ่านเครื่องมือสำหรับติดต่อระหว่างระบบควบคุมแบบกระจายตัวกับผู้ปฏิบัติงานติดตั้งในห้องควบคุม

การประยุกต์งานวิจัยผ่านระบบควบคุมแบบกระจายตัวที่ตั้งอยู่ในห้องปฏิบัติการระบบควบคุมภาคทฤษฎีวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

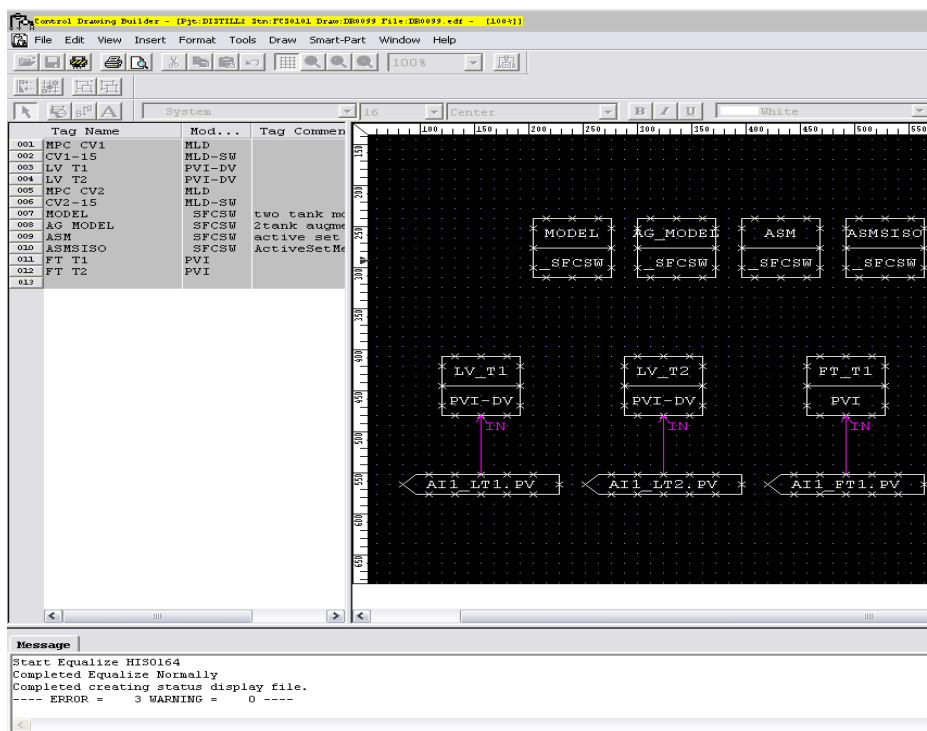
1. สร้างบล็อกฟังก์ชันตัวแปร เพื่อรับ-ส่งค่าระหว่างตัวควบคุมกับกระบวนการ
2. สร้างบล็อกฟังก์ชันตัวควบคุม เพื่อใช้ควบคุมกระบวนการ
3. สร้างบล็อกฟังก์ชันสวิตช์ เพื่อสลับใช้ตัวควบคุมที่สร้างขึ้นควบคุมกระบวนการ
4. สร้างกราฟฟิก เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานใช้งานได้ง่าย

ซึ่งรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนจะอธิบายโดยละเอียดในหัวข้อถัดไป

4.3.1 การสร้างบล็อกฟังก์ชันตัวแปร

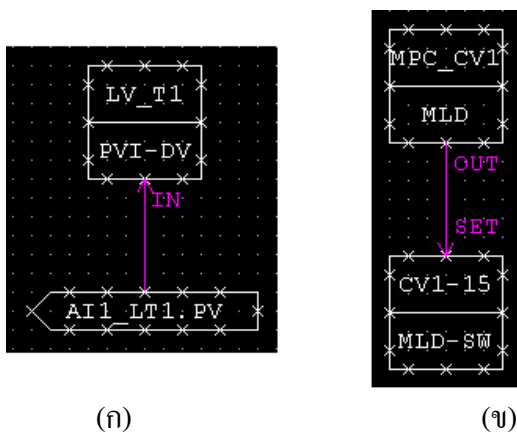
การสร้างฟังก์ชันบล็อกตัวแปรกระทำลงบนหน้าต่างการวาดการควบคุมดังแสดงในรูปที่ 4.14 วัตถุประสงค์ในการควบคุมของการทดลอง ก็คือ ต้องการควบคุมความสูงของระดับของเหลวให้อยู่ในระดับที่ต้องการ โดยอาศัยการปรับเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วควบคุม ดังนั้น สัญญาณที่ต้องวัดค่าเพื่อส่งให้ตัวควบคุม คือ ความสูงของระดับของเหลว และสัญญาณที่ตัวควบคุมต้องการคำนวณและส่งไปควบคุมกระบวนการ คือ เปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วควบคุม ดังนั้น บล็อกฟังก์ชันที่แทนลักษณะข้างต้นแสดงในรูปที่ 4.15

ในรูป 4.15 (ก) แทนการรับค่าความสูงของระดับของเหลว โดยบล็อกด้านล่างเป็นป้ายชื่อของความสูงของระดับของเหลวที่เซนเซอร์อ่านค่าได้มาจากกระบวนการ ส่วนบล็อกด้านบนเป็นตัวแปรที่ไว้เก็บสัญญาณที่รับมาจากป้ายชื่ออีกที โดยสัญญาณที่รับมานั้นถูกเก็บไว้ในตัวแปรที่ชื่อ LV_T1 เมื่อต้องการใช้ค่าความสูงของระดับของเหลว สามารถใช้ชื่อ LV_T1 แทนป้ายชื่อได้เลย



รูปที่ 4.14 หน้าต่างการวาดการควบคุม

ในรูป 4.15 (ก) แสดงการส่งค่าเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วควบคุม โดยสัญญาณควบคุมที่คำนวณได้จากตัวควบคุมจะถูกเก็บไว้ในตัวแปรชื่อ MPC_CV1 และส่งไปควบคุมวาล์วผ่าน CV1-15 ทั้งนี้ชื่อแต่ละชื่อที่ตั้งชื่อต่างกันในแต่ละการทดลอง เพื่อไม่ให้เกิดข้อผิดพลาดในการส่งสัญญาณควบคุม เพราะระบบควบคุมแบบกระจายตัวสามารถสร้างการทดลองได้หลายการทดลอง และตัวควบคุมของแต่ละการทดลองทำงานตลอดเวลา การรับค่าสัญญาณควบคุมจึงขึ้นอยู่กับผู้ปฏิบัติงานว่าต้องการรับค่าจากตัวควบคุมใดการทดลองใด



(ก)

(ข)

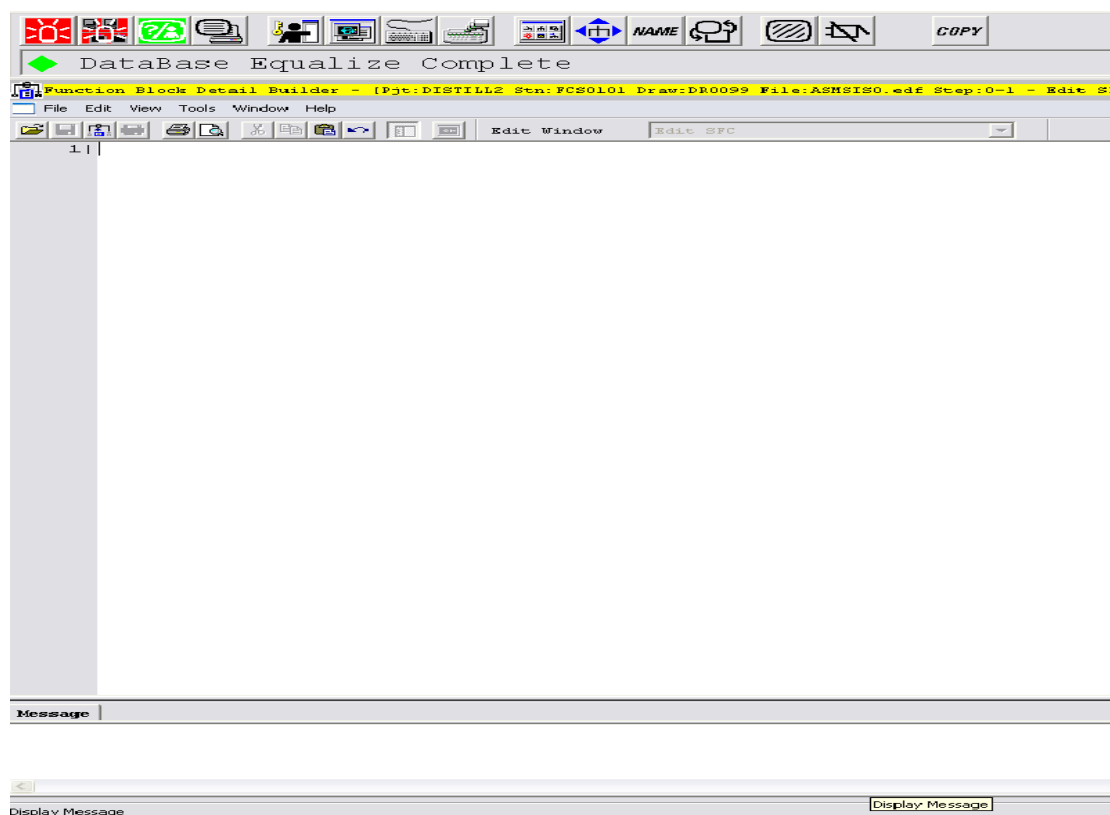
รูปที่ 4.15 บล็อกฟังก์ชันตัวแปร (ก) บล็อกฟังก์ชันรับสัญญาณ (ข) บล็อกฟังก์ชันส่งสัญญาณ

4.3.2 การสร้างบล็อกฟังก์ชันตัวควบคุม

บล็อกฟังก์ชันตัวสร้างบนหน้าตาंतरการควบคุมเช่นเดียวกับการสร้างบล็อกฟังก์ชันตัวแปร ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ใช้บล็อกฟังก์ชันควบคุมประเภท SFCSW เป็นบล็อกฟังก์ชันที่สามารถเขียนโปรแกรมลงไปได้ แต่ภาษาที่ใช้เขียนได้จะเป็นภาษาซีโบล (SEBOL) มีลักษณะคล้ายภาษาซี ซึ่งเป็นภาษาเฉพาะของระบบควบคุมแบบกระจายตัวของบริษัทโยโกกาวา ลักษณะของบล็อกฟังก์ชัน SFCSW และหน้าตาंतरในการเขียนโปรแกรม เป็นดังรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 ตามลำดับ



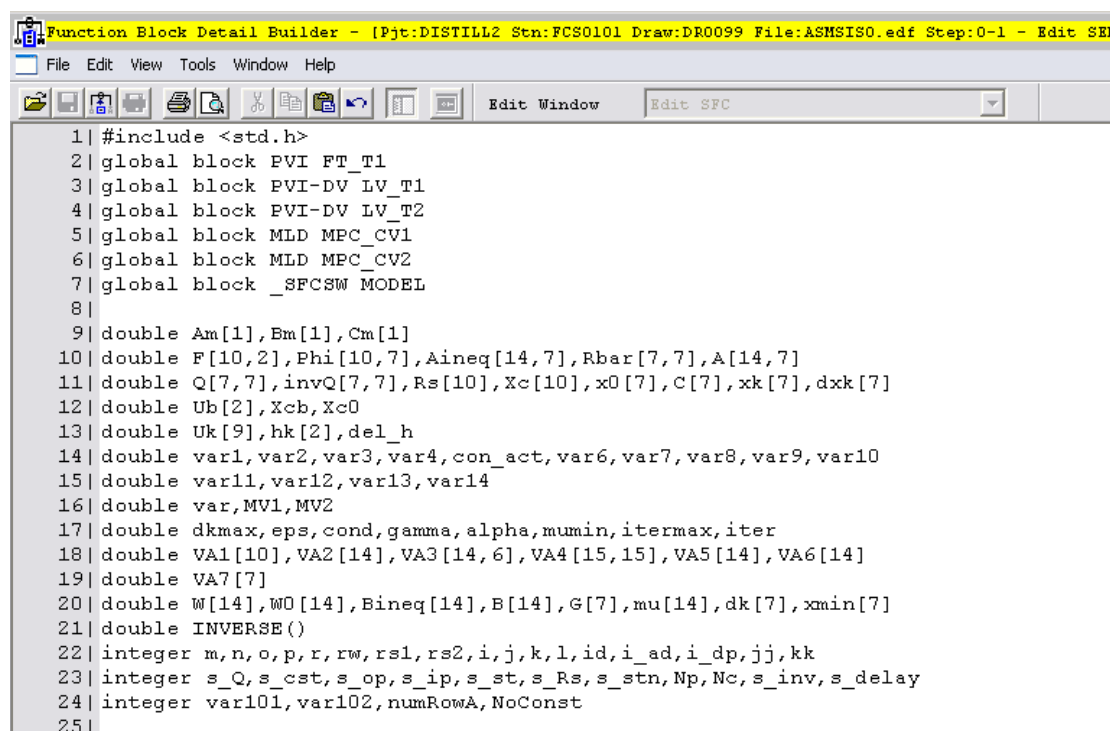
รูปที่ 4.16 บล็อกฟังก์ชันควบคุมประเภท SFCSW



รูปที่ 4.17 หน้าตาंतरสำหรับเขียนโปรแกรม

ในบทนี้ประยุกต์ใช้การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองโดยอาศัยวิธีเซตแอกทีฟที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 เพียงวิธีเดียวเท่านั้น ในการเขียนโปรแกรมสำหรับตัวควบคุมแบบการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง มีข้อควรปฏิบัติดังนี้

1. ในบรรทัดแรกของโปรแกรม หากตัวควบคุมต้องอาศัยการคำนวณทางคณิตศาสตร์ จึงต้องเพิ่มแพ็คเกจที่ใช้ในการคำนวณ โดยใช้โค้ด `#include <std.h>` ดังแสดงในรูปที่ 4.18 บรรทัดที่ 1



```

1 | #include <std.h>
2 | global block PVI_FT_T1
3 | global block PVI-DV_LV_T1
4 | global block PVI-DV_LV_T2
5 | global block MLD_MPC_CV1
6 | global block MLD_MPC_CV2
7 | global block _SFCSW_MODEL
8 |
9 | double Am[1], Bm[1], Cm[1]
10 | double F[10, 2], Phi[10, 7], Aineq[14, 7], Rbar[7, 7], A[14, 7]
11 | double Q[7, 7], invQ[7, 7], Rs[10], Xc[10], x0[7], C[7], xk[7], dxk[7]
12 | double Ub[2], Xcb, Xc0
13 | double Uk[9], hk[2], del_h
14 | double var1, var2, var3, var4, con_act, var6, var7, var8, var9, var10
15 | double var11, var12, var13, var14
16 | double var, MV1, MV2
17 | double dkmax, eps, cond, gamma, alpha, mumin, itermax, iter
18 | double VA1[10], VA2[14], VA3[14, 6], VA4[15, 15], VA5[14], VA6[14]
19 | double VA7[7]
20 | double W[14], W0[14], Bineq[14], B[14], G[7], mu[14], dk[7], xmin[7]
21 | double INVERSE()
22 | integer m, n, o, p, r, rw, rs1, rs2, i, j, k, l, id, i_ad, i_dp, jj, kk
23 | integer s_Q, s_cst, s_op, s_ip, s_st, s_Rs, s_stn, Np, Nc, s_inv, s_delay
24 | integer var101, var102, numRowsA, NoConst
25 |

```

รูปที่ 4.18 โค้ดเพิ่มแพ็คเกจการคำนวณ

2. ถัดมาต้องประกาศตัวแปรทั้งหมดที่ใช้ในโปรแกรม หากมีตัวแปรที่ต้องการนำไปใช้ในบล็อกฟังก์ชันอื่นให้ประกาศเป็นประเภทโกลบอล และต้องประกาศตัวแปรประเภทโกลบอลทั้งหมดก่อน แล้วจึงประกาศตัวแปรประเภทโลคอล และนอกจากต้องประกาศตัวแปรทั้งหมดแล้วยังต้องประกาศบล็อกฟังก์ชันที่ต้องการใช้งานรวมถึงฟังก์ชันที่ผู้ปฏิบัติงานสร้างขึ้นที่จะนำมาใช้ในโปรแกรมด้วย ดังรูปที่ 4.18 บรรทัดที่ 2-24

3. สำหรับตัวควบคุมนั้น ต้องรับและส่งค่ากับกระบวนการ โดยดำเนินการผ่านบล็อกฟังก์ชันตัวแปรที่สร้างในหัวข้อ 4.3.1 โดยมีโค้ดสำหรับเรียกใช้ค่าจากกระบวนการ ดังรูปที่ 4.19 บรรทัดที่ 145, 146 และ 153

```

Function Block Detail Builder - [Pjt:DISTILL2 Stn:FCS0101 Draw:DR0099 File:ASMSISO.edf Step:0-1 - Edit SEB0L.]
File Edit View Tools Window Help
Edit Window Edit SFC
145| Xc[1]=LV_T1.PV-Xcb
146| Xc[2]=1*LV_T1.PV          !y(k+9)=C*x(k)
147|
148| %.OUT[1,9]=Xc[1]          !***
149| %.OUT[2,9]=Xc[2]
150|
151| !!----- REFERENCE -----!!
152| s_Rs = s_op*Np
153| rs1= LV_T1.SV
154| for r=1 to s_Rs
155|   Rs[r]=rs1
156| next@
157|
158| !!----- COMPUTE C -----!!
159| for i= 1 to s_Rs
160|   var=0
161|   for j = 1 to s_stn
162|     var=var+F[i,j]*Xc[j]
163|   next@
164|   VAL[i] = var-Rs[i]
165| next@
166| for i=1 to s_Q
167|   var=0

```

รูปที่ 4.19 โค้ดรับสัญญาณ

```

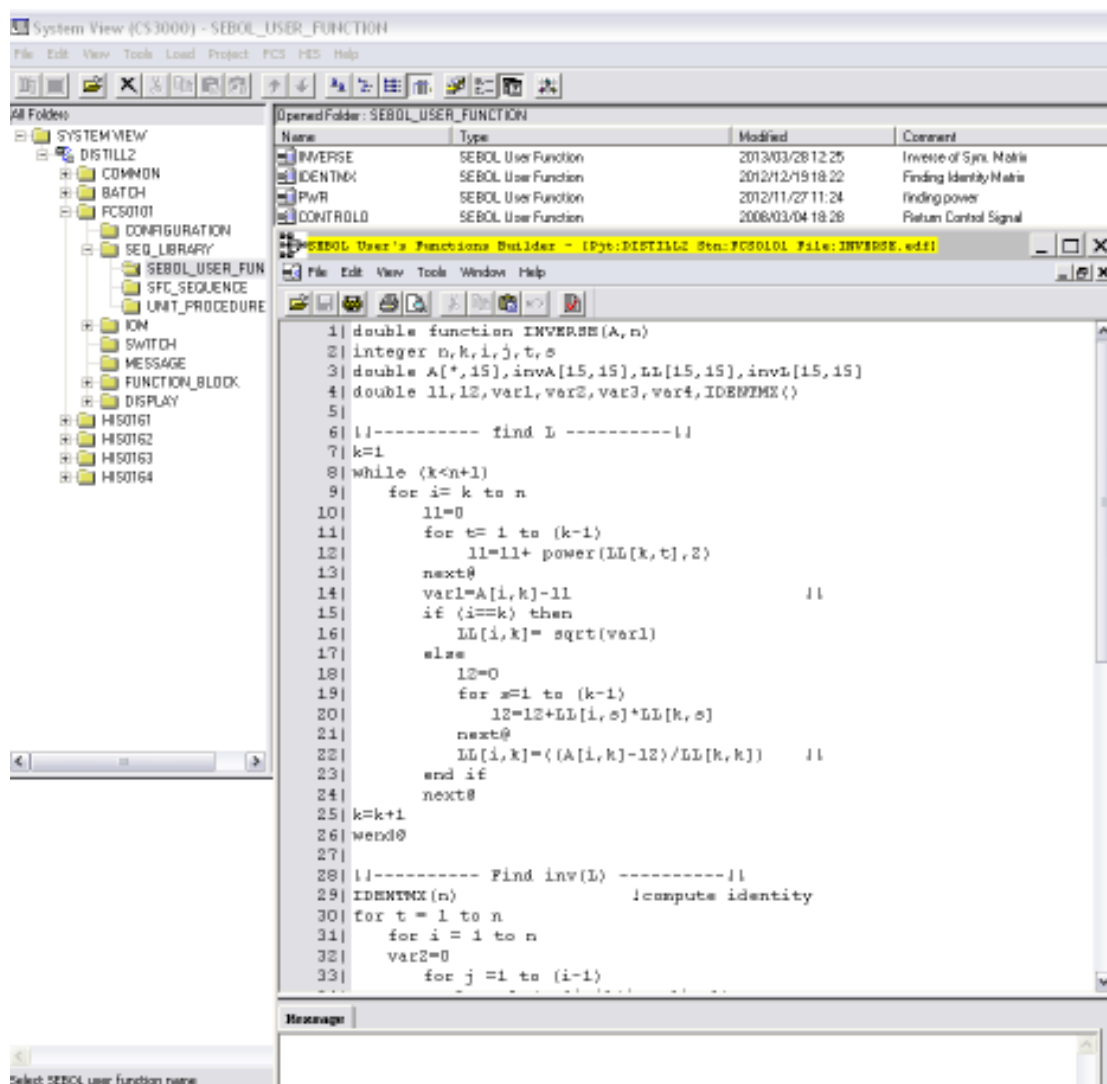
468| !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
469| for i = 1 to s_cst          !***
470| %.OUT[i,4]=W[i]
471| %.OUT[i,5]=W0[i]
472| %.OUT[i,7]= mu[i]          !***
473| next@
474| for i=1 to s_Q
475| %.OUT[i,6]= xk[i]          !***
476| next@
477| %.OUT[2,1]= mumin
478|
479| !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
480|
481| iter=iter+1
482|
483| if (W[1]==0) then
484|   NoConst=NoConst+1
485|   if (NoConst>=3) then
486|     iter=itermax
487|   end if
488| end if
489|
490| until((iter==itermax) | (mumin >= 0.000001) )
491|
492| !!-----SAVE PARAMETER FOR k-1-----!!
493| !Ub[1]=MPC_CV1.MV
494| Xcb=LV_T1.PV          !Xc at k-1(before)
495| Ub[1]=MPC_CV1.MV
496|
497| !!-----Sending out %MV to Process-----!!
498| dxk[1] = xk[1]
499| MPC_CV1.MV = Ub[1]+dxk[1]

```

รูปที่ 4.20 โค้ดส่งสัญญาณ

และโค้ดสำหรับส่งค่าไปยังกระบวนการ ดังรูปที่ 4.20 บรรทัดที่ 499 นอกจากนั้น หากต้องการตรวจสอบค่าที่สนใจ สามารถทำได้โดยอาศัยโค้ด ตามรูปที่ 4.20 บรรทัดที่ 469-477

4. สร้างฟังก์ชันพิเศษ เนื่องจากตัวควบคุมที่อาศัยทฤษฎีการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองโดยอาศัยวิธีเซตแอกทีฟที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 นั้น ต้องคำนวณค่าอินเวอร์สมเมตริกซ์ ซึ่งระบบควบคุมแบบกระจายตัวไม่มีฟังก์ชันนี้ไว้ให้ ดังนั้น จึงต้องสร้างฟังก์ชันสำหรับหาอินเวอร์สมเมตริกซ์ขึ้นมาเอง และหากสร้างฟังก์ชันนี้แยกออกมาจากโปรแกรมหลัก จะทำให้สะดวกและมีประโยชน์กว่าการเขียนรวมในโปรแกรมหลัก การสร้างฟังก์ชันเสริมนี้กระทำบนหน้าต่างของการสร้างฟังก์ชัน โดยผู้ใช้ (User's Function Builder) ตามรูป 4.21

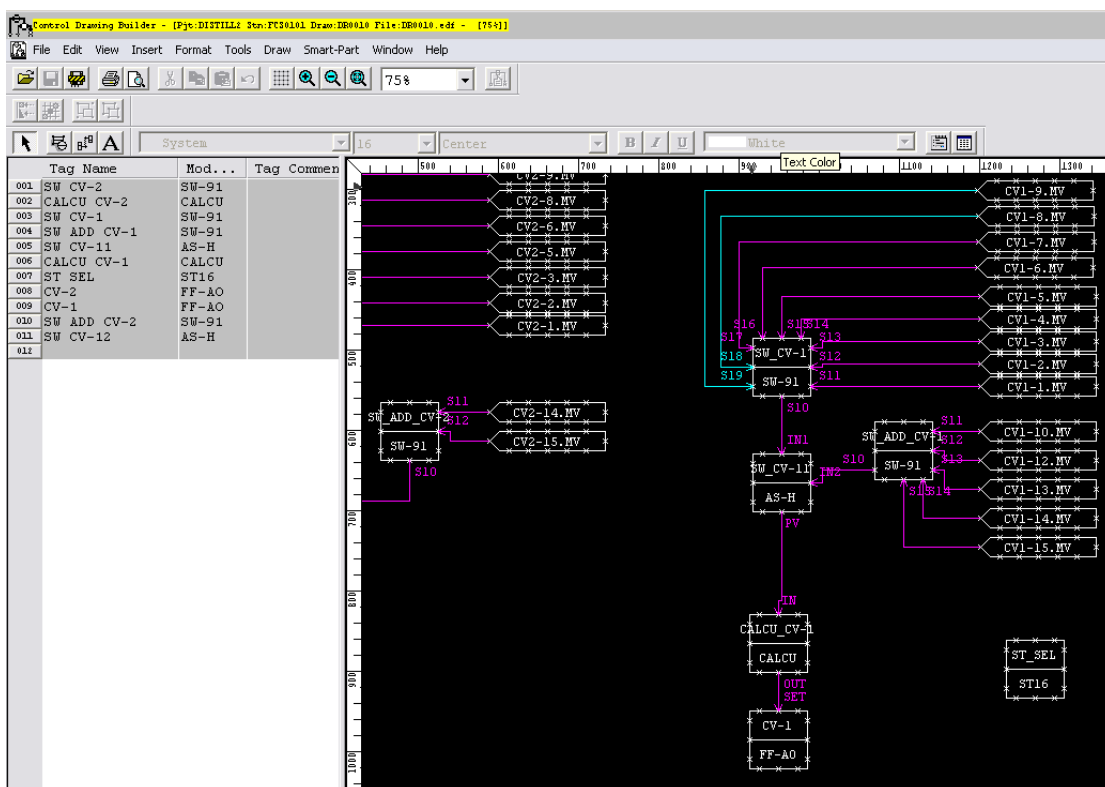


รูปที่ 4.21 หน้าต่างสร้างฟังก์ชันเสริม

5. เขียนโปรแกรมคำนวณตามทฤษฎีการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองโดยอาศัยวิธีเซตแอกทีฟ

4.3.3 การสร้างบล็อกฟังก์ชันสวิตช์

เนื่องจากการทดลองครั้งนี้สร้างรวมกับการทดลองอื่นๆ และการทำงานของระบบควบคุมแบบกระจายตัวนั้น ตัวควบคุมทุกตัวจะทำงานพร้อมๆ กัน แต่มีเพียงสัญญาณควบคุมจากตัวควบคุมที่ผู้ปฏิบัติงานเลือกไว้เพียงตัวเดียวเท่านั้นที่สามารถส่งสัญญาณไปควบคุมกระบวนการได้ บล็อกฟังก์ชันสวิตช์จึงมีหน้าที่เลือกว่าต้องการให้กระบวนการรับสัญญาณควบคุมจากตัวควบคุมตัวใด การสร้างบล็อกฟังก์ชันสวิตช์กระทำบนหน้าตาंतरการวาดการควบคุมแต่เป็นคนละหน้าตาंतरกับหัวข้อที่ 4.3.1 และหัวข้อ 4.3.2 เพราะต้องสร้างรวมกับการทดลองอื่นๆ ด้วย ดังรูปที่ 4.22 โดยเชื่อมต่อป้ายชื่อ (tag name) ของบล็อกฟังก์ชันตัวแปรรับสัญญาณควบคุมที่สร้างขึ้นจากหัวข้อ 4.3.1 หรือ CV1-15.MV เข้ากับบล็อกฟังก์ชันสวิตช์ SW_ADD_CV-1 จากนั้นเข้าไปสร้างเงื่อนไขเพื่อสั่งให้วาล์วสลับมารับค่าสัญญาณควบคุมจากตัวควบคุมที่สร้างขึ้นเพียงตัวเดียวในตารางความจริงของบล็อกฟังก์ชัน ST_SEL ดังรูป 4.23



รูปที่ 4.22 หน้าตาंतरสร้างบล็อกฟังก์ชันสวิตช์

Function Block Detail Builder - [Pjt:DISTILL2 Stn:FCS0101 Draw:DR0010 File:ST_SEL.edf - Edit Sequence Tables.]

File Edit View Tools Window Help

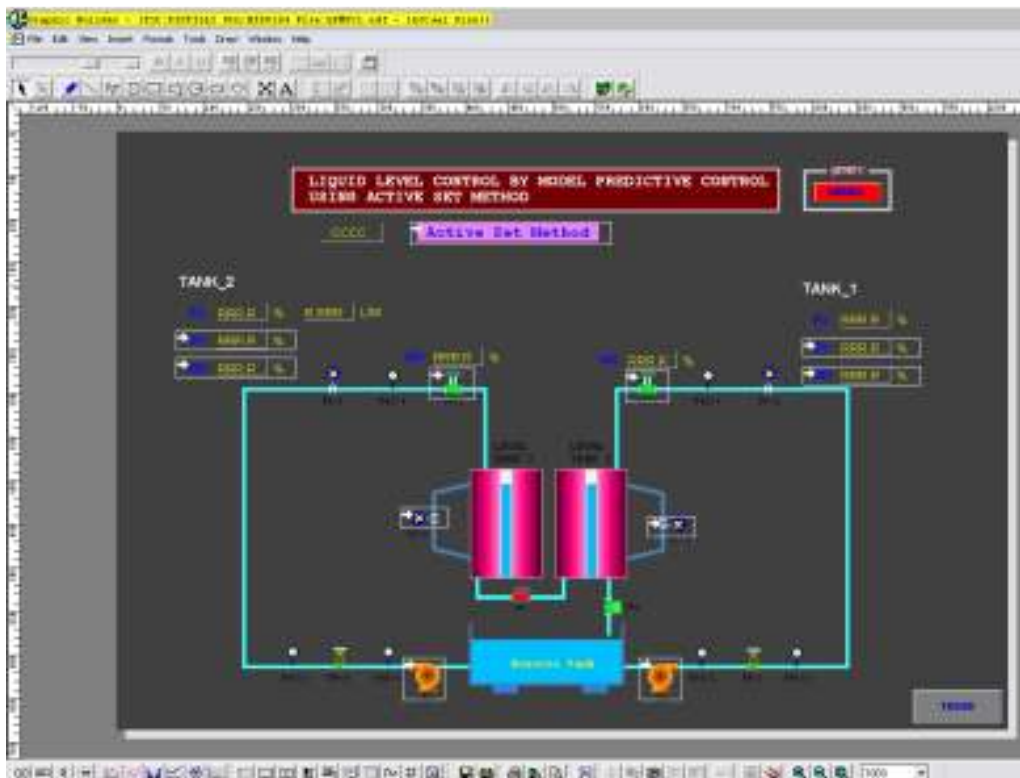
Processing Timing TC . Scan Per

No.	Taq name.Data item	Data	1 . . .	5 . . .	9 . . .	1 3 . .	1 7 . .	2 1 . .
C10	SEL_LAB10.PV	ON	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
C11	SEL_TANK.PV	ON	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
C12	SEL_LEVEL.PV	ON	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
C13	SEL_GPC.PV	ON	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
C14	SEL_QPMPC.PV	ON	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
C15			. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
A35	SEL_LAB5.PV	H	. . . . .	N . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
A36	SEL_LAB6.PV	H	. . . . .	. N . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
A37	SEL_LAB7.PV	H	. . . . .	. . N . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
A38	SEL_LAB8.PV	H	. . . . .	. . . N . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
A39	SEL_LAB9.PV	H	. . . . .	. . . . N . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
A40	SEL_LAB10.PV	H	. . . . .	. . . . .	. N . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
A41	CV2-3.MODE	AUT	. Y . . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
A42	SEL_TANK.PV	H	. . . . .	. . . . .	. . N . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
A43	SEL_LEVEL.PV	H	. . . . .	. . . . .	. . . N . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
A44	SW_CV-1.SW	H	. . . . .	. . . . .	. . N N N . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
A45	SW_ADD_CV-1.SW	H	N N N N	N N N N	N . . . . . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
A46	CV1-12.MODE	AUT	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . Y . . . . .	. . . . .	. . . . .
A47	SW_CV-12.SW	1	Y Y Y	Y Y . Y	Y . Y Y . . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
A48	SEL_QPMPC.PV	H	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	N N . . . . .	. . . . .

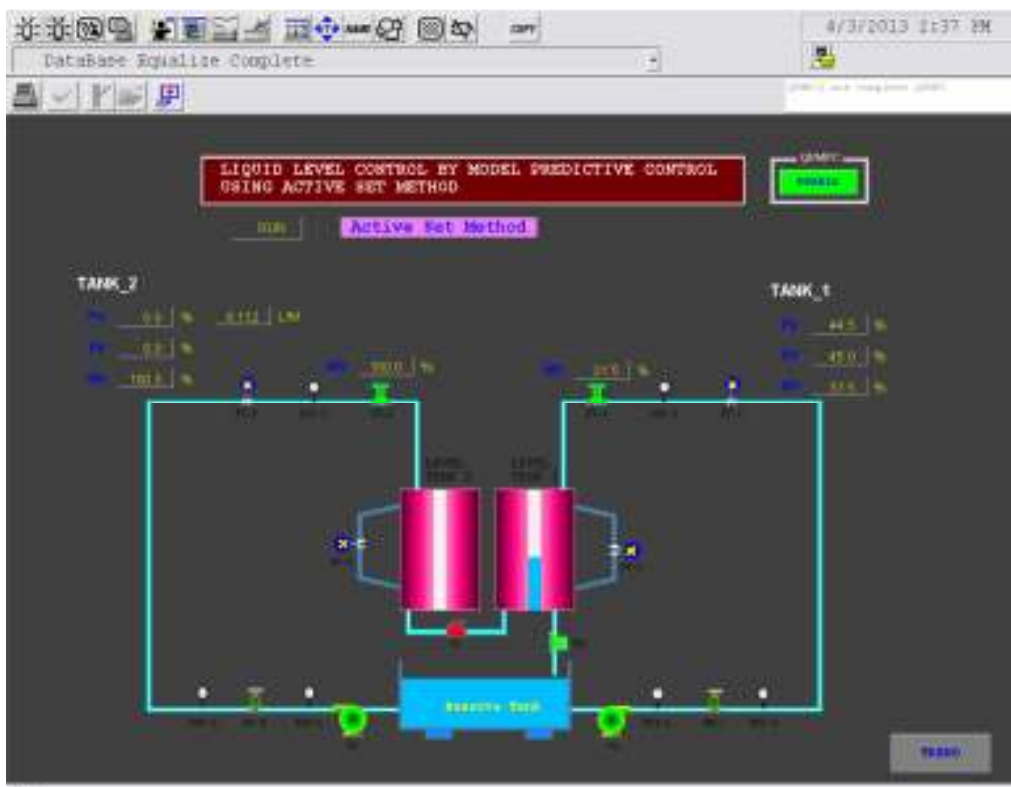
รูปที่ 4.23 หน้าต่างตารางลำดับของบล็อกฟังก์ชัน ST_SEL

4.3.4 การสร้างกราฟฟิก

การสร้างกราฟฟิกดำเนินการบนหน้าต่างเครื่องมือสร้างกราฟฟิก (Graphic Builder) จำเป็นต้องสร้างหน้ากราฟฟิกเพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานเข้าใจภาพรวมของการควบคุมกระบวนการและควบคุมการทำงานของกระบวนการได้ง่าย กราฟฟิกที่สอดคล้องกับการควบคุมกระบวนการควบคุมระดับของเหลวนี้เป็นดังรูป 4.24 จะได้น้ำกราฟฟิกที่ติดต่อกับผู้ปฏิบัติงานเป็นดังรูป 4.25



รูปที่ 4.24 หน้าต่างการสร้างกราฟฟิก



รูปที่ 4.25 หน้าต่างกราฟฟิกสำหรับควบคุมกระบวนการควบคุมระดับ

4.4 การทดลองควบคุมกระบวนการด้วยระบบควบคุมแบบกระจายตัว

ในการทดลองควบคุมกระบวนการควบคุมระดับของเหลวผ่านระบบควบคุมแบบกระจายตัว ใช้การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่อาศัยวิธีเซตแอกทีฟคำนวณหาสัญญาณขาเข้าที่เหมาะสมเป็นตัวควบคุม วิธีการสร้างตัวควบคุมเป็นไปตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา จากแบบจำลองปริภูมิสถานะของกระบวนการควบคุมระดับของเหลวดังสมการที่ 4.14 และเนื่องจากกระบวนการจริงมีการประวิงเวลาจากสัญญาณเข้าเป็นเวลา 9 วินาที ดังนั้น จะได้แบบจำลองปริภูมิสถานะที่มีการประวิงเวลาเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= -0.0159x(t) + 0.0083u(t - 9) \\ y(t) &= x(t) \end{aligned} \quad (4.16)$$

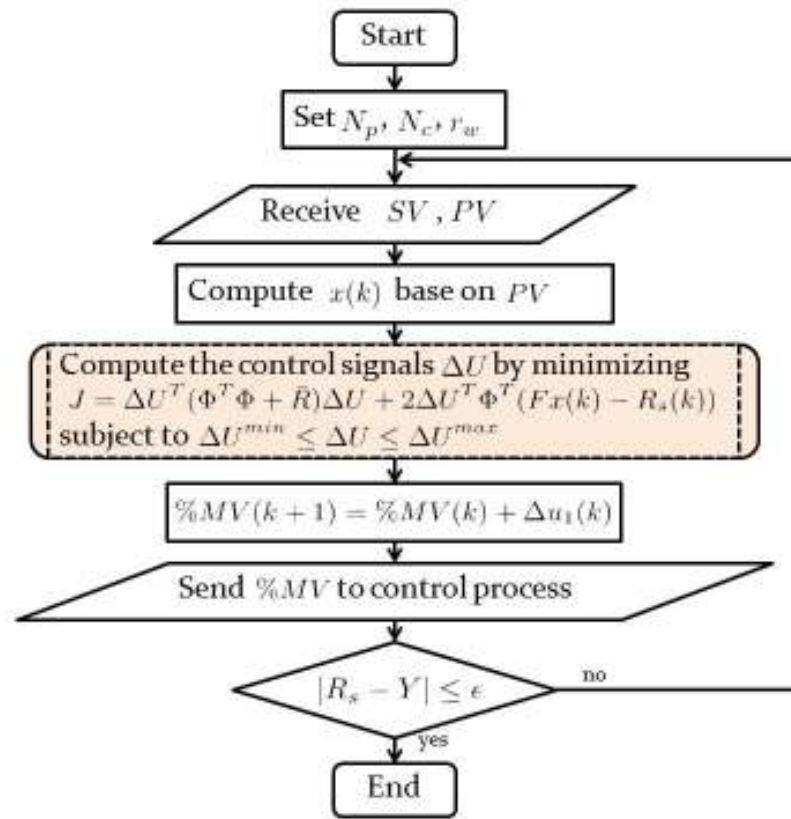
เปลี่ยนให้เป็นระบบเวลาวิฤต โดยใช้เวลาลุ่ม 1 วินาที จะได้

$$\begin{aligned} x(k + 1) &= 0.9845x(k) + 0.0082u(k - 9) \\ y(k) &= x(k) \end{aligned} \quad (4.17)$$

เปลี่ยนเป็นแบบจำลองปริภูมิสถานะแบบเพิ่มตัวอินทิกรัล (Augmented State Space Model) จะได้

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta x(k + 1) \\ y(k + 1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0.9845 & 0 \\ 0.9845 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0082 \\ 0.0082 \end{bmatrix} \Delta u(k - 9) \\ y(k) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.18)$$

การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองเป็นทฤษฎีที่ต้องอาศัยแบบจำลอง เมื่อได้จำลองของกระบวนการแล้ว ลำดับต่อไปจะอธิบายระเบียบวิธีของการควบคุมโดยอาศัยการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองโดยระเบียบวิธีของการควบคุมอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 4.26 ระเบียบวิธีการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง

1. เริ่มจากตั้งค่าขอบเขตการทำนาย ขอบเขตการควบคุม และตัวถ่วงน้ำหนัก เพื่อคำนวณเมตริกซ์ F เมตริกซ์ Φ และเมตริกซ์ \bar{R}
2. รับค่าสัญญาณอ้างอิง (SV) และค่าความสูงของระดับของเหลว (PV) มาจากกระบวนการ
3. คำนวณหาค่าตัวแปรสถานะ จากค่าความสูงของระดับของเหลว โดยอาศัยสมการ $\Delta x = x(k) - x(k-1) = PV(k) - PV(k-1)$ และ $y(k) = PV$
4. คำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงสัญญาณขาเข้าที่เหมาะสมโดยการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันต้นทุน

$$J = \Delta U^T (\Phi^T \Phi + \bar{R}) \Delta U + 2\Delta U^T \Phi^T (F x(k_i) - R_s)$$

ที่มีเงื่อนไขบังคับเป็น $\Delta U^{min} \leq \Delta U \leq \Delta U^{max}$ โดยอาศัยวิธีเซตแตกทีฟ

5. เมื่อได้ค่าการเปลี่ยนแปลงสัญญาณขาเข้าที่เหมาะสมแล้ว นำมาคำนวณค่าสัญญาณควบคุมจาก $\%MV(k+1) = \%MV(k) + \Delta u_1(k)$
6. ส่งค่าสัญญาณควบคุมไปควบคุมแล้ว

7. จากนั้นตรวจสอบค่าความสูงของระดับของเหลวว่าเข้าใกล้ค่าสัญญาณอ้างอิงหรือไม่ ถ้าไม่ก็กลับไปทำข้อที่ 2 อีกครั้ง แต่ถ้าค่าความสูงของระดับของเหลวเข้าใกล้ค่าสัญญาณอ้างอิงแล้วให้หยุดการคำนวณของตัวควบคุม

จากระเบียบวิธีของการควบคุมที่อธิบายมาข้างต้น สามารถเขียนเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 4.26 ต่อไปจะอธิบายระเบียบวิธีของวิธีเซตแอกทีฟที่ประยุกต์ใช้กับการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองผ่านระบบควบคุมแบบกระจายตัวซึ่งมีความแตกต่างเล็กน้อยกับวิธีเซตแอกทีฟที่ได้อธิบายในบทที่ 2 มีระเบียบวิธีเป็นดังนี้

1. ก่อนเริ่มการคำนวณด้วยวิธีเซตแอกทีฟต้องจัดฟังก์ชันต้นทุนให้อยู่ในรูปปัญหากำลังสอง $\frac{1}{2}d_k^T Q d_k + g_k^T d_k$ จากนั้นเริ่มระเบียบวิธีด้วยการรับค่าสัญญาณอ้างอิงและขอบเขตการเปลี่ยนแปลงสัญญาณขาเข้า
2. กำหนดให้ $k = 0$ และสมมุติค่าทิศทางเริ่มต้น (d_0) จากนั้นหาเซตของเงื่อนไขบังคับที่แอกทีฟ (W_0)
3. หาทิศทางเคลื่อนที่ (d_k) โดยการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันต้นทุนที่มีเงื่อนไขบังคับตามข้อ 2
4. ตรวจสอบค่าทิศทางเคลื่อนที่ว่ามีค่าเป็นศูนย์หรือไม่
 - 4.1 หากทิศทางเคลื่อนที่ไม่เป็นศูนย์ให้คำนวณหาค่าความยาว (α_k) จากการหาค่าต่ำสุดตามสมการ

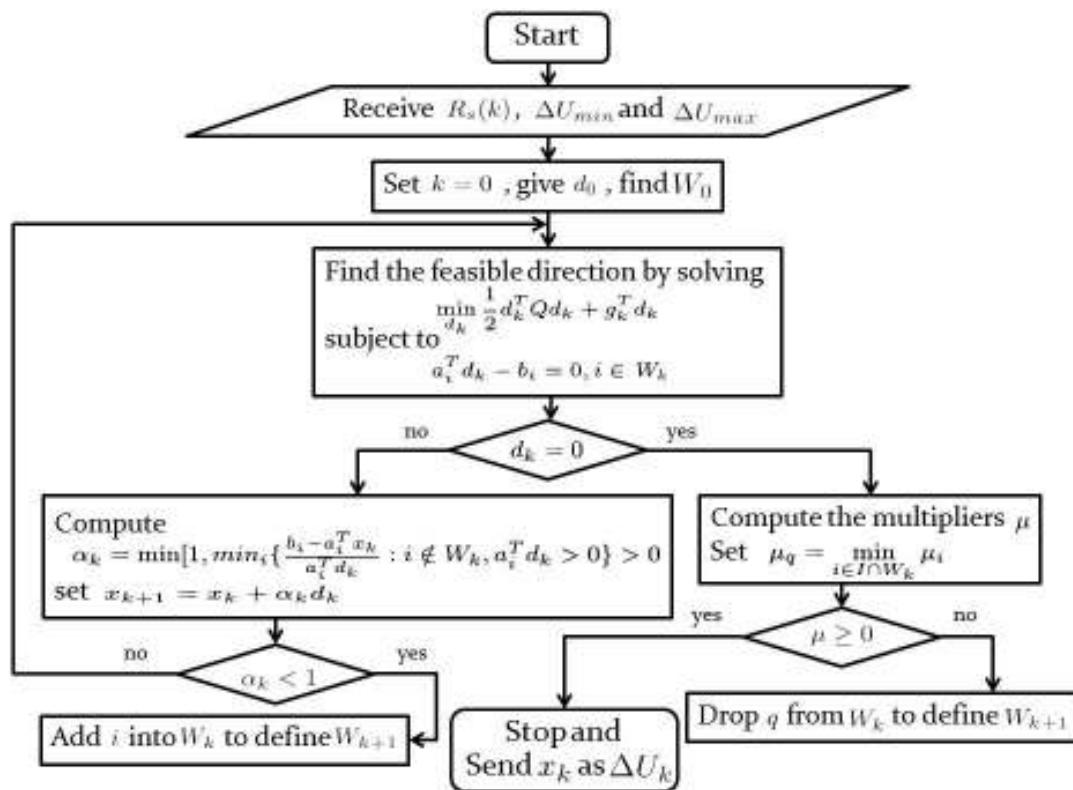
$$\min[1, \min_i \{ \frac{b_i - a_i^T x_k}{a_i^T d_k} : i \notin W_k, a_i^T d_k > 0 \}] > 0$$

- 4.1.1 หากค่าความยาวที่ได้มากกว่า 1 ให้อัปเดต $x_{k+1} = x_k + \alpha_k d_k$ แล้วกลับไปทำซ้ำข้อ 3
- 4.1.2 หากค่าความยาวที่ได้น้อยกว่า 1 ให้เพิ่มตัวบ่งชี้ที่ i เข้าไปในเซตของเงื่อนไขบังคับที่แอกทีฟ จะได้ W_{k+1} แล้วจึงกลับไปทำซ้ำข้อ 3
- 4.2 หากทิศทางเคลื่อนที่เป็นศูนย์ให้คำนวณหาตัวคูณ μ จากสมการ

$$\mu_q = \min_{i \in I \cap W_k} \mu_i$$

- 4.2.1 หากตัวคูณมีค่าน้อยกว่าศูนย์ให้ทิ้งเงื่อนไขที่ตัวบ่งชี้ q ออกจากเซตของเงื่อนไขบังคับที่แอกทีฟ จะได้ W_{k+1} แล้วจึงกลับไปทำซ้ำข้อ 3
- 4.2.2 หากตัวคูณมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์แสดงว่าค่าทิศทางเคลื่อนที่ที่คำนวณได้เป็นค่าต่ำที่สุดให้หยุดการคำนวณแล้วส่งค่าทิศทางเคลื่อนที่นั้นออกมาในฐานะของค่าการเปลี่ยนแปลงสัญญาณขาเข้า

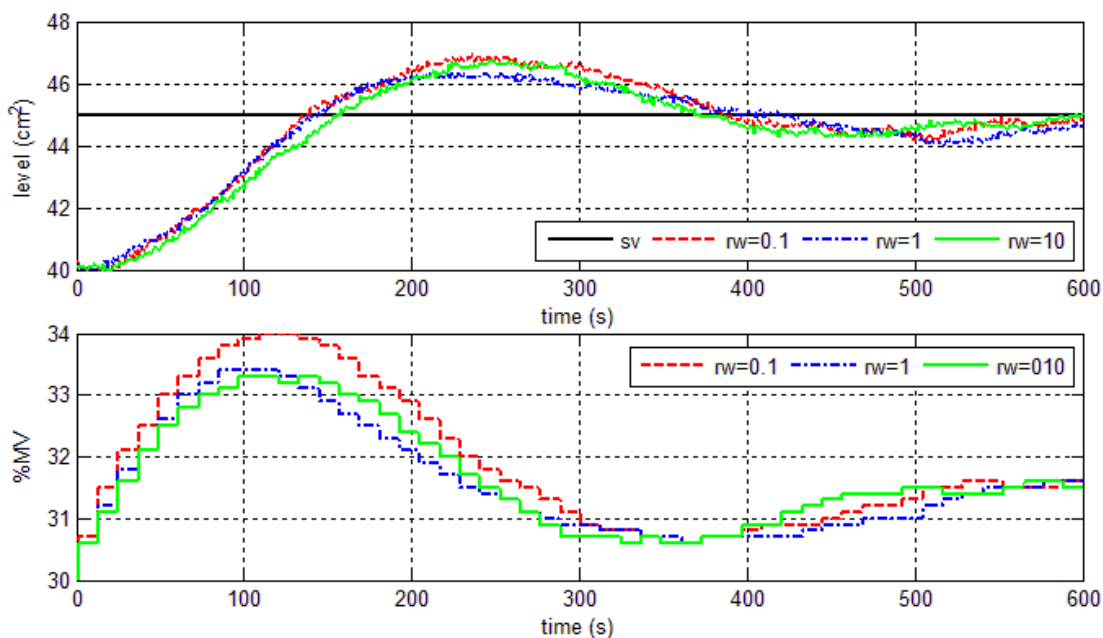
จากระเบียบวิธีที่กล่าวมาข้างต้น สามารถเขียนเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 4.27



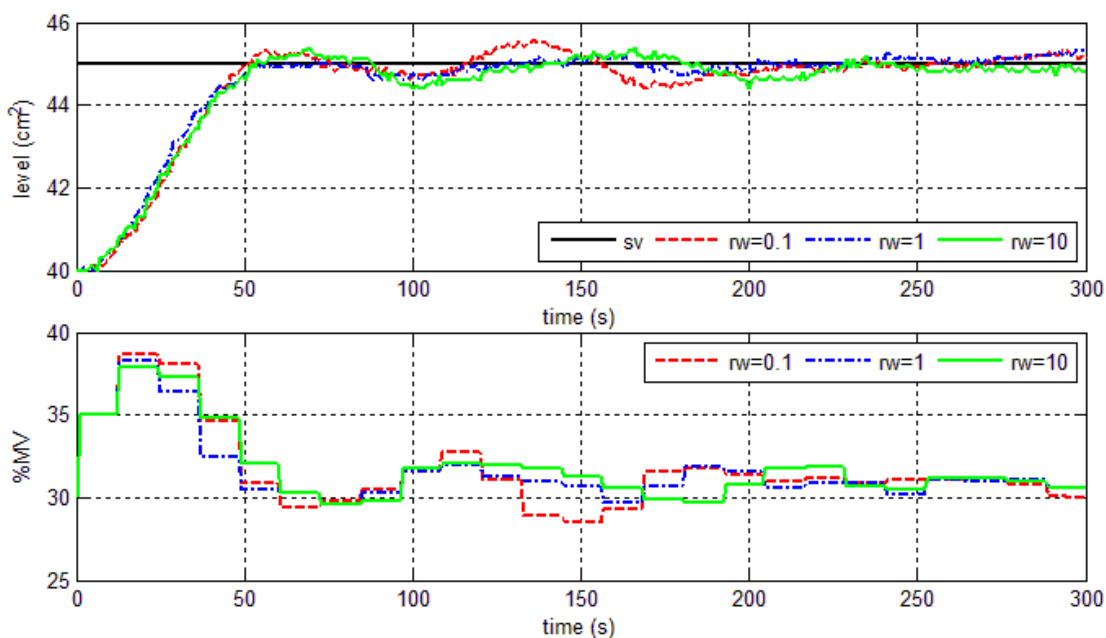
รูปที่ 4.27 ระเบียบวิธีของวิธีเซตแอกทีฟสำหรับทดลอง

จากระเบียบวิธีที่กล่าวมาข้างต้นและทฤษฎีของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 พบว่า การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองมีค่าพารามิเตอร์ที่สามารถปรับค่าได้ 3 ค่า คือ ค่าขอบเขตการทำนาย (N_p) ค่าขอบเขตการควบคุม (N_c) และค่าตัวถ่วงน้ำหนัก (r_w) ในการทดลองนี้ จึงเลือกปรับค่าขอบเขตการทำนาย 3 ค่า คือ 5, 8 และ 10 เลือกปรับค่าขอบเขตการควบคุม 3 ค่า คือ 3, 5 และ 7 สุดท้ายเลือกปรับค่าตัวถ่วงน้ำหนัก 3 ค่าเช่นกัน คือ 0.1, 1 และ 10 ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.28 – รูปที่ 4.35 ในกรณีสุดท้ายที่เลือกค่า $N_p = 10$ และ $N_c = 7$ พบว่า ตัวควบคุมไม่สามารถคำนวณหาค่าสัญญาณเข้าที่เหมาะสมได้ เนื่องจากมีปัญหาในการหาค่าอินเวอร์สเมตริกซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.36 ส่วนในรูปที่ 4.37 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมแบบพีไอดีกับการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองกรณีที่ผลตอบสนองดีที่สุด โดยการควบคุมแบบพีไอดี อาศัยทฤษฎีของซีเกอร์และนิโคลปรับค่าพารามิเตอร์ ส่วนการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองเลือกกรณี $N_p = 5$, $N_c = 5$ และ $r_w = 1$ พบว่า การควบคุมโดยตัวควบคุมแบบพีไอดีใช้เวลา 70 วินาทีในการลู่เข้าสู่สัญญาณอ้างอิงและมีค่าความคลาดเคลื่อนที่สถานะอยู่ตัว 1.75 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการควบคุมโดยใช้

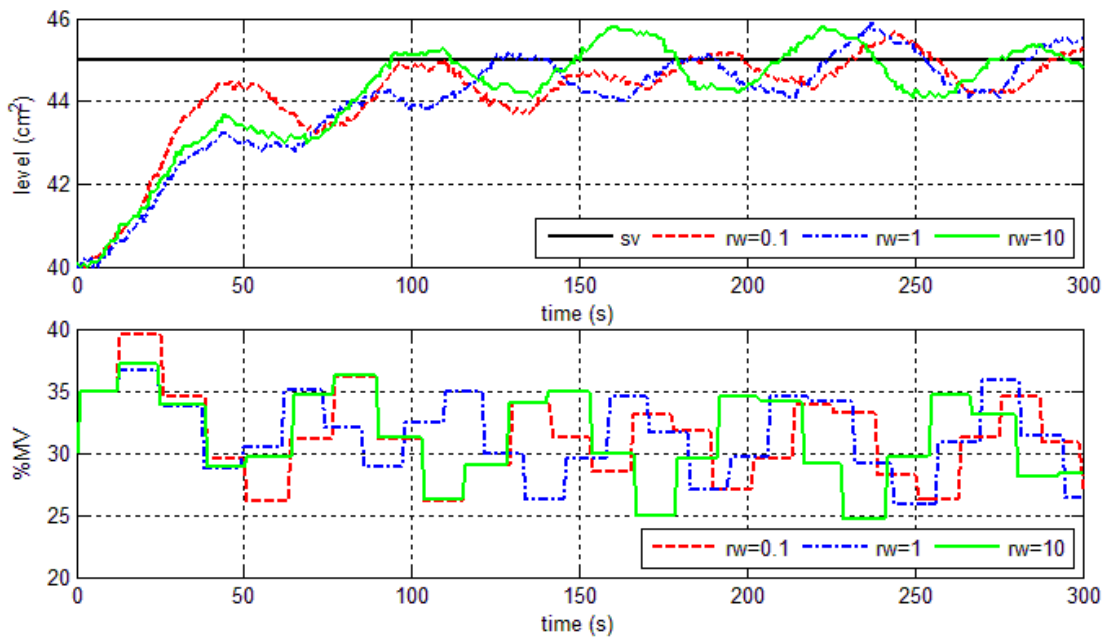
ทฤษฎีการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองใช้เวลา 55 วินาทีในการเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงและมีค่าความคลาดเคลื่อนที่สภาวะอยู่ตัว 2.39 เปอร์เซ็นต์



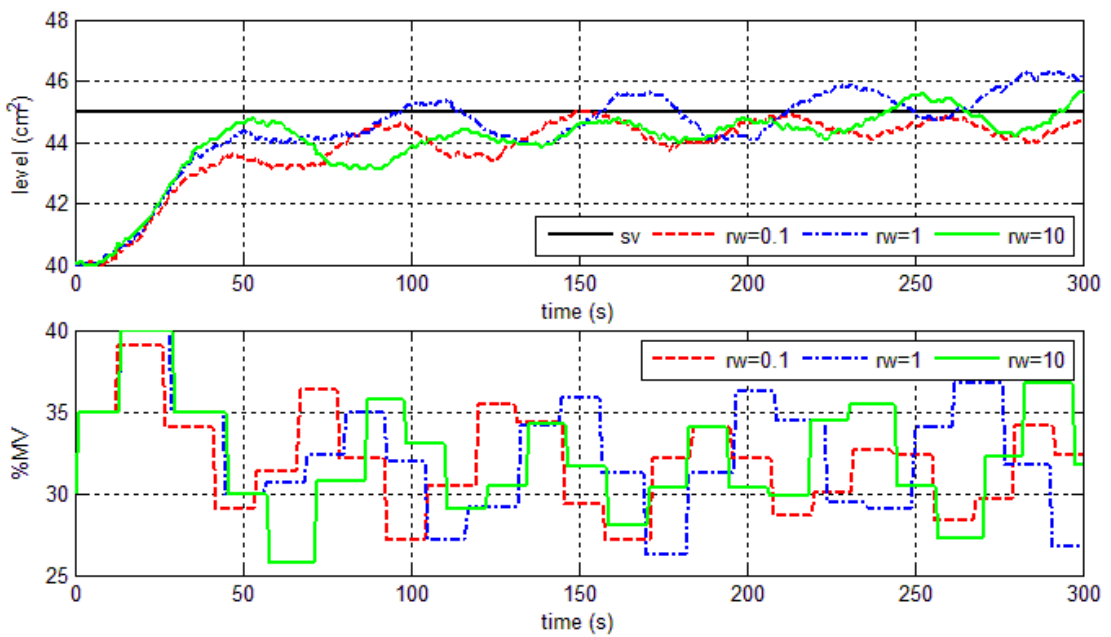
รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบการปรับค่าตัวถ่วงน้ำหนัก กรณี $N_p = 5$ และ $N_c = 3$



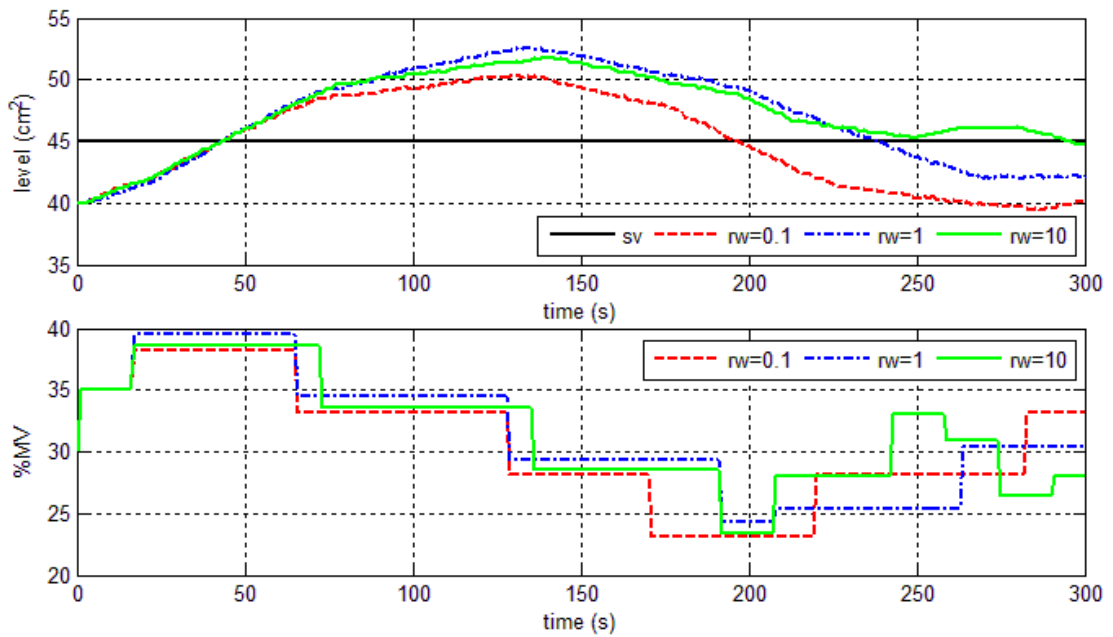
รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบการปรับค่าตัวถ่วงน้ำหนัก กรณี $N_p = 5$ และ $N_c = 5$



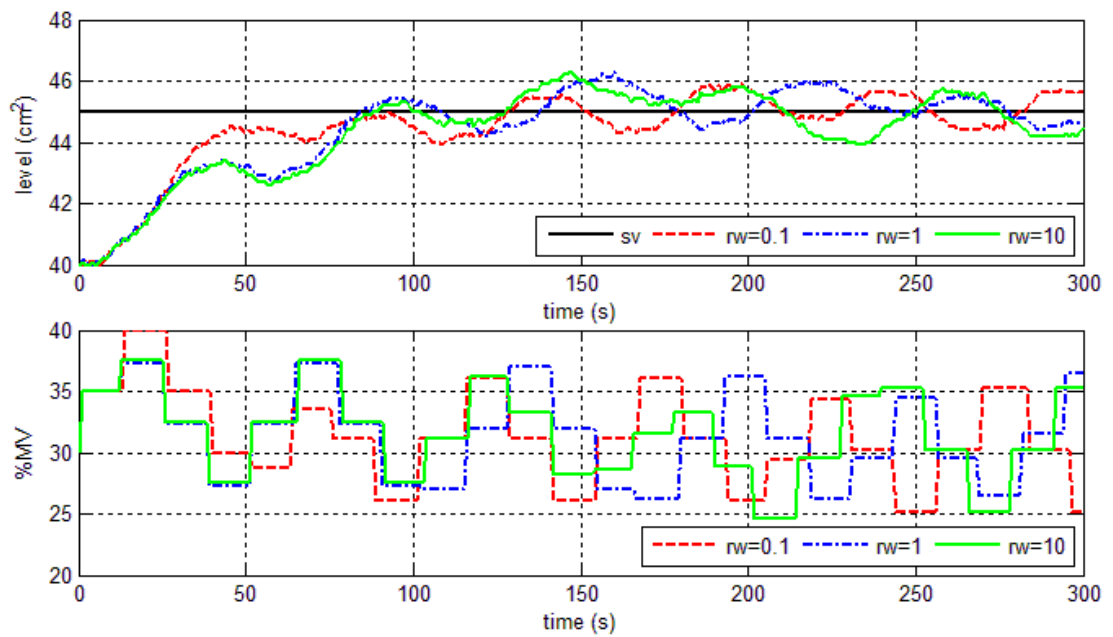
รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบการปรับค่าตัวถ่วงน้ำหนัก กรณี $N_p = 8$ และ $N_c = 3$



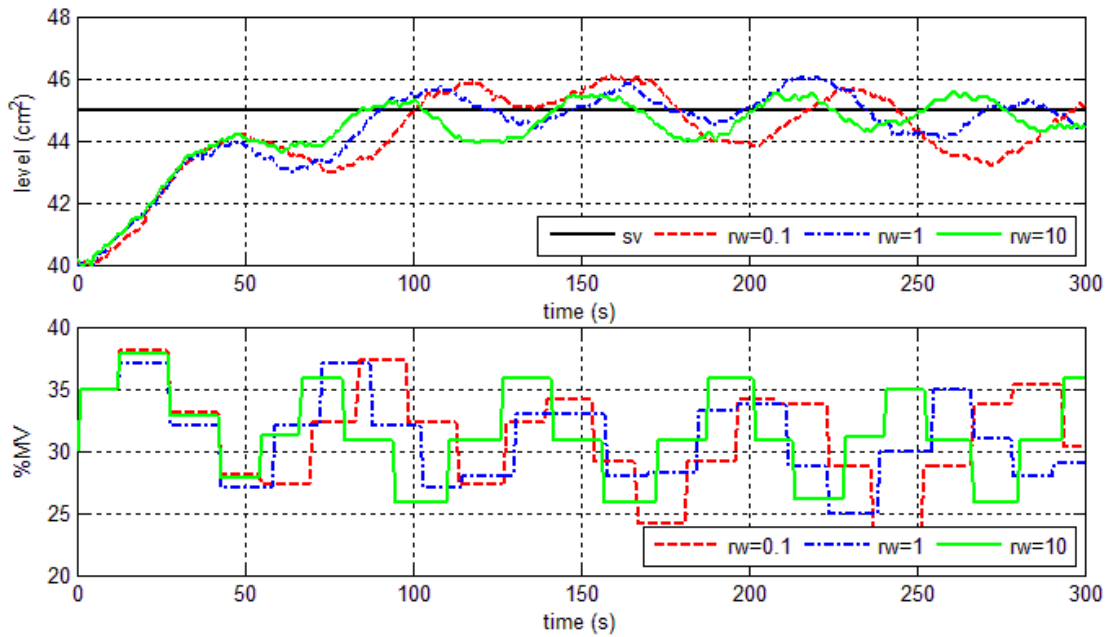
รูปที่ 4.31 เปรียบเทียบการปรับค่าตัวถ่วงน้ำหนัก กรณี $N_p = 8$ และ $N_c = 5$



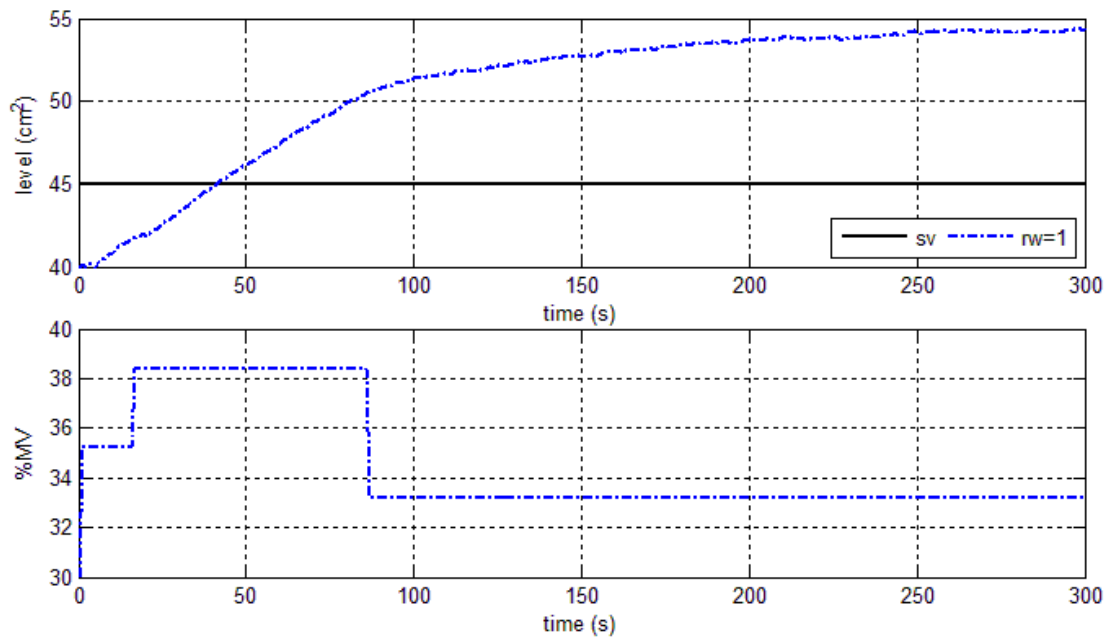
รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบการปรับค่าตัวถ่วงน้ำหนัก กรณี $N_p = 8$ และ $N_c = 7$



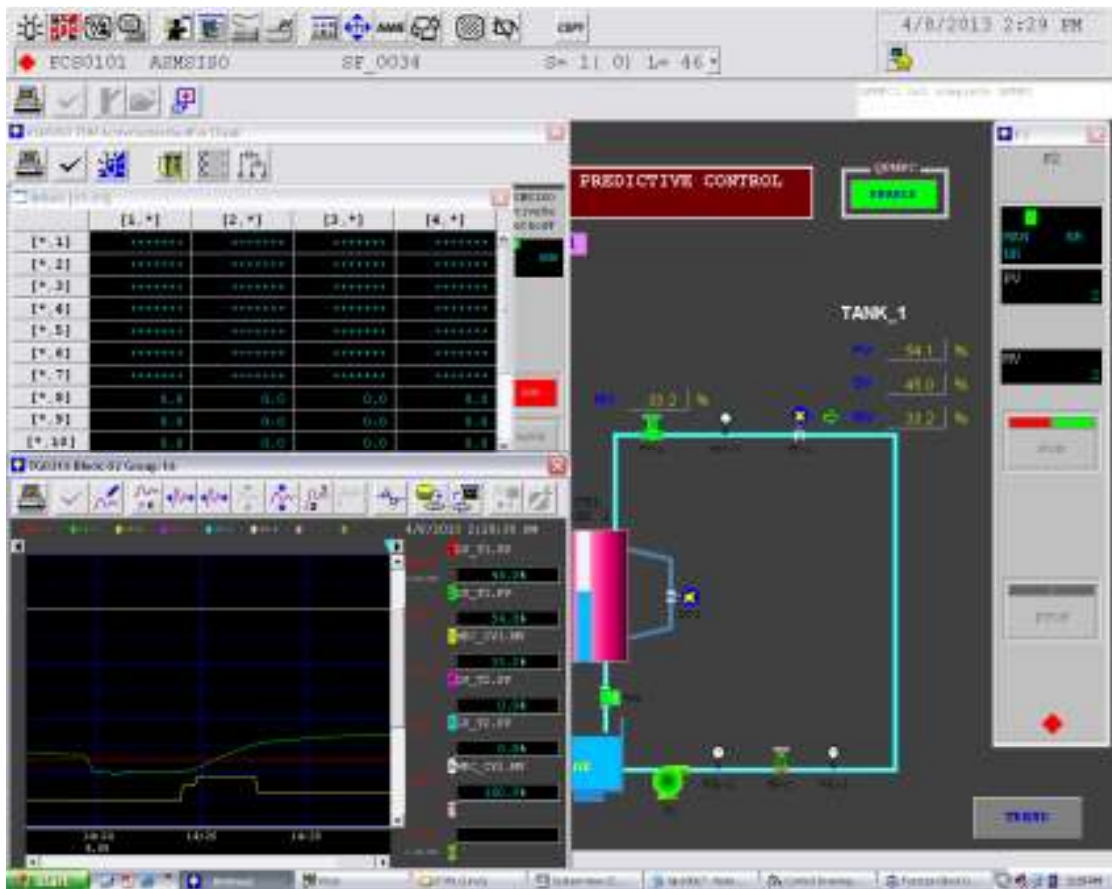
รูปที่ 4.33 เปรียบเทียบการปรับค่าตัวถ่วงน้ำหนัก กรณี $N_p = 10$ และ $N_c = 3$



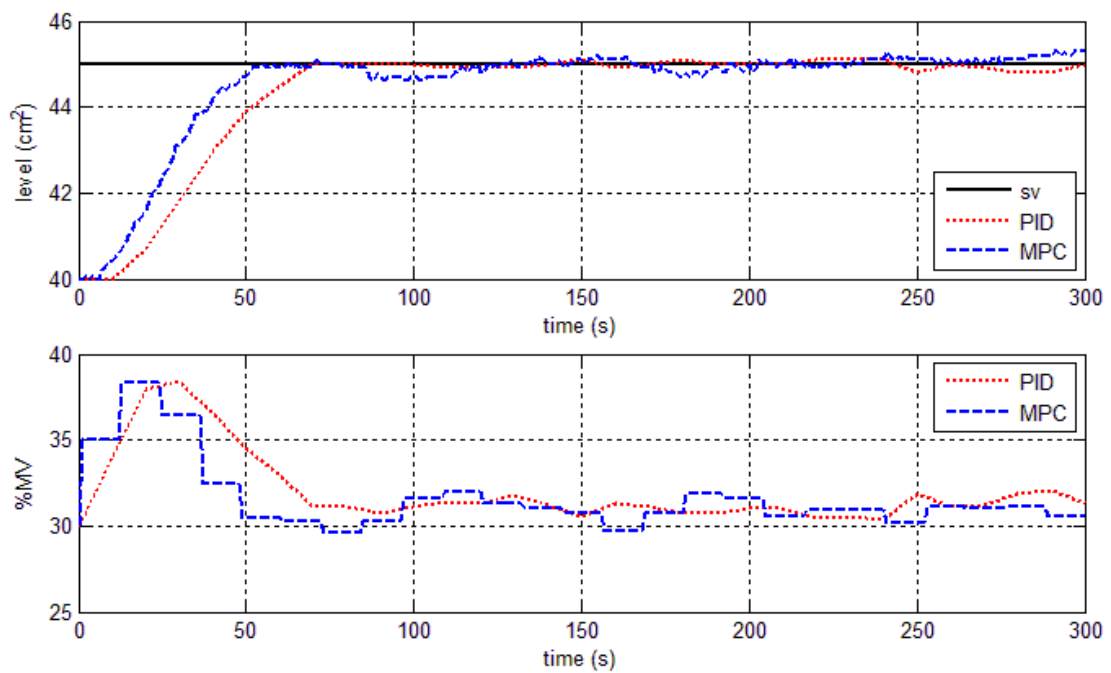
รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบการปรับค่าตัวถ่วงน้ำหนัก กรณี $N_p = 10$ และ $N_c = 5$



รูปที่ 4.35 เปรียบเทียบการปรับค่าตัวถ่วงน้ำหนัก กรณี $N_p = 10$ และ $N_c = 7$



รูปที่ 4.36 หน้าต่างกราฟฟิกลักษณะทดลองกรณี $N_p = 10$, $N_c = 7$ และ $r_w = 1$



รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมแบบพีไอดีและการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง

4.5 บทสรุป

ในบทนี้นำเสนอการควบคุมกระบวนการควบคุมระดับของเหลวด้วยการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่ใช้วิธีเซตแอกทีฟหาค่าสัญญาณเข้าเหมาะสมที่สุดควบคุมกระบวนการผ่านระบบควบคุมแบบกระจายตัว ก่อนทำการทดลองควบคุมผ่านระบบควบคุมแบบกระจายตัวได้มีการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ จากการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์เปรียบเทียบระหว่างการควบคุมโดยอาศัยการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองและตัวควบคุมแบบพีไอดี พบว่า การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองสามารถควบคุมกระบวนการได้มีประสิทธิภาพมากกว่าตัวควบคุมพีไอดี จากนั้นจึงทำการทดลองควบคุมกระบวนการควบคุมระดับของเหลวผ่านระบบควบคุมแบบกระจายตัว จากการทดลองปรับค่า N_p , N_c และ r_w พบว่า การเพิ่มขึ้นของ N_p และ N_c มีผลทำให้เวลาในการคำนวณหาค่าสัญญาณเข้าเหมาะสมที่สุดมีค่ามากขึ้น ส่วนการเพิ่มขึ้นของ r_w ส่งผลให้ค่าสัญญาณเข้าเหมาะสมที่สุดที่คำนวณได้มีค่าน้อยลง แต่ใช้เวลาในการคำนวณแต่ละรอบนานขึ้น การปรับค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ตัวที่ทำให้ผลตอบสนองดีที่สุด คือ $N_p = 5$, $N_c = 5$ และ $r_w = 1$ โดยทำให้เวลาในการลู่เข้าน้อยกว่าการควบคุมที่อาศัยตัวควบคุมแบบพีไอดี แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนที่สถานะอยู่ตัว พบว่ามีค่ามากกว่าการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี และในกรณีปรับ $N_p = 10$ และ $N_c = 7$ พบว่า ตัวควบคุมไม่สามารถคำนวณหาค่าสัญญาณเข้าเหมาะสมที่สุดได้ เนื่องจากฟังก์ชันอินเวอร์สไม่สามารถหาค่าอินเวอร์สของเมตริกซ์ได้ กรณีนี้ถือเป็นข้อจำกัดสำคัญของการควบคุมผ่านระบบควบคุมแบบกระจายตัว

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองเป็นการควบคุมกระบวนการขั้นสูงที่น่าสนใจและมีการประยุกต์ใช้แพร่หลายในอุตสาหกรรม แต่ด้วยข้อจำกัดเรื่องเวลาในการคำนวณหาค่าสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมของปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดใช้เวลานาน ทำให้การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองถูกจำกัดอยู่ในเฉพาะกระบวนการที่มีผลตอบสนองช้า หรือใช้การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองแบบออฟไลน์แทน ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองแบบออนไลน์ที่ประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของปัญหาโปรแกรมกำลังสองที่มีประสิทธิภาพและเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวาง 2 วิธี คือ วิธีเซตแอกทีฟและวิธีจุดภายใน จากการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมหอกลิ้นและกระบวนการควบคุมระดับของเหลว พบว่า การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองแบบออนไลน์โดยอาศัยวิธีเซตแอกทีฟและวิธีจุดภายในสามารถควบคุมกระบวนการทั้งสองได้ตรงตามวัตถุประสงค์ของการควบคุมของแต่ละกระบวนการ อีกทั้งเวลาในการคำนวณหาค่าสัญญาณควบคุมเหมาะสมที่สุดในแต่ละรอบการวนซ้ำยังน้อยกว่าช่วงเวลาสุ่ม ทำให้การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองแบบออนไลน์นี้เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานจริง นอกจากนี้ยังพบว่า การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองแบบออนไลน์ที่อาศัยวิธีเซตแอกทีฟใช้เวลาน้อยที่สุดในการคำนวณหาค่าสัญญาณควบคุมเหมาะสมที่สุด หลังจากจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์แล้ว จึงนำการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองแบบออนไลน์โดยอาศัยวิธีเซตแอกทีฟมาควบคุมกระบวนการควบคุมระดับของเหลวผ่านระบบควบคุมแบบกระจายตัวที่อยู่ในห้องปฏิบัติการระบบควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จากการปรับค่าพารามิเตอร์ 3 ตัว คือ N_p , N_c และ r_w พบว่า การเพิ่มขึ้นของค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ตัว ส่งผลให้เวลาในการคำนวณหาค่าสัญญาณควบคุมเหมาะสมที่สุดเพิ่มขึ้น โดยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ที่ให้ผลตอบสนองของกระบวนการดีที่สุดและดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี คือ $N_p = 5$, $N_c = 5$ และ $r_w = 1$ นอกจากนี้ยังพบว่า กรณีที่ $N_p = 10$ และ $N_c = 7$ ทำให้เกิดข้อบกพร่องในการคำนวณจนไม่สามารถคำนวณหาค่าสัญญาณควบคุมเหมาะสมที่สุดได้ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากข้อจำกัดเรื่องพื้นที่หน่วยความจำของระบบควบคุมแบบกระจายตัวนั่นเอง สำหรับการประยุกต์ใช้การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองแบบ

ออนไลน์ควบคุมกระบวนการจริงนั้น นอกจากต้องคำนึงถึงปัญหาเรื่องเวลาในการคำนวณหา
 สัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุดแล้ว ยังต้องคำนึงถึงข้อจำกัดของอุปกรณ์ควบคุมด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในภายหน้า

1. การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองโดยอาศัยวิธีจุดภายในยังคงเป็นหัวข้อที่น่าสนใจ ที่
 จะนำมาประยุกต์ลงบนระบบควบคุมแบบกระจายตัว และควรพิจารณาการแก้ปัญหาการหาค่า
 เหมาะที่สุดที่หลีกเลี่ยงการคำนวณอินเวอร์สมเมตริกซ์
2. การประยุกต์ใช้การพิจารณาแบบจำลองปริภูมิสถานะที่ไม่บวกตัวอินทิกรัลในการ
 สร้างฟังก์ชันต้นทุนเป็นประเด็นที่น่าสนใจ

5.2.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการประยุกต์งานวิจัยลงบนดีซีเอส

1. ควรมีความระมัดระวังในการเลือกค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลกับขนาดของการ
 คำนวณ เนื่องจากระบบควบคุมแบบกระจายตัวมีข้อจำกัดในเรื่องของหน่วยความจำ การเลือก
 พารามิเตอร์ที่มากเกินไป นอกจากทำให้เพิ่มเวลาในการคำนวณหาค่าสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุด
 แล้ว ยังเสี่ยงต่อการใช้ระบบควบคุมแบบกระจายตัวเกินขีดจำกัดอีกด้วย
2. การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองเป็นทฤษฎีที่อาศัยแบบจำลองเป็นหลักสำคัญ ดังนั้น
 แบบจำลองที่ใช้ควรมีความแม่นยำ
3. อุปกรณ์ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นปั๊มลม ปั๊มน้ำ วาล์วควบคุม ควรได้รับการซ่อมแซมและ
 บำรุงรักษาอย่างเหมาะสม สังเกตได้จากบางช่วงของการทดลองค่าอัตราการไหลไม่คงที่
 เปลี่ยนแปลงไปจากที่ควรจะเป็น ส่งผลให้การทดลองผิดพลาด และต้องทำการทดลองซ้ำหลายครั้ง
 อีกทั้งยังส่งผลให้การระบุเอกลักษณ์ของกระบวนการทำได้ยากขึ้นอีกด้วย

รายการอ้างอิง

- [1] Bemporad, A. Model predictive control design: new trends and tools. *In Proc. of the 45th IEEE Conf. on Decision and Control* (2006): 6678-6683.
- [2] Tondel, P. T., Johansen, A., and Bemporad, A. Brief paper an algorithm for multi-parametric quadratic programming and explicit MPC solutions. *Automatica* 39 (2003): 489-497.
- [3] Tondel, P. T., Johansen, A., and Bemporad, A. An algorithm for multi-parametric quadratic programming and explicit MPC solutions. *In Proc. of the 40th IEEE Conf. on Decision and Control* (2001): 1199-1204.
- [4] Rao, C. V., Wright, S. J., and Rawlings, J.B. Application of interior-point methods to model predictive control. *Journal of Optimization Theory and Applications* 99 3, (1998): 723-757.
- [5] Milman, R. and Davison, E. J. Fast computation of the quadratic programming subproblem in model predictive control. *In Proc. of the American Control Conf.* (2003): 4723-4729.
- [6] Wang, Y. and Boyd, S. Fast model predictive control using online optimization. *IEEE Trans. on Control Systems Technology* 18 2 (2010): 267-278.
- [7] Ferreau, H. J., Bock, H. G., and Diehl, M. An online active set strategy to overcome the limitations of explicit MPC. *International Journal of Robust and Nonlinear Control* 18 (2008): 816-830.
- [8] Seilinger, M. N., Jones, C. N., and Morari, M. Real-time suboptimal model predictive control using a combination of explicit MPC and online optimization. *In Proc. of the 47th IEEE Conf. on Decision and Control* (2008): 4718-4723.
- [9] Milman R., and Davison, E. J. A fast MPC algorithm using nonfeasible active set methods. *Journal of Optimization Theory and Applications* 139 (2008): 591-616.
- [10] Ferreau, H. J., Ortner, P., Langthaler, P., Re, L. D., and Diehl, M. Predictive control of a real-world diesel engine using an extended online active set strategy. *Annual Reviews in Control* 31 (2007): 293-301.

- [11] Lau, M. S. K., Yue, S. P., Ling, K. V., and Maciejowski, J. M. A comparison of interior point and active set methods for FPGA implementation of model predictive control. *In Proc. of the European Control Conf.* (2009): 156-161.
- [12] Wang, L. *Model Predictive Control System Design and Implementation using MATLAB*. Australia: Springer, 2009.
- [13] เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย. ระบบควบคุมพลวัต การวิเคราะห์ การออกแบบ และการประยุกต์. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [14] Chen, C. T. *Linear system theory and design*. New York: Oxford University Press, 1999.
- [15] Khaisongkram, W. *Performance analysis and controller design for a binary distillation column under disturbances with bounded magnitudes and bounded derivatives*. Master's thesis, Department of Electrical Engineering, Engineering, Chulalongkorn University, 2002.
- [16] วรพล กัณณีย์ และเดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย. การระบุเอกลักษณ์และการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนในแบบจำลองพลวัตของหอกลับแยกสารสองชนิด. ในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29, หน้า 1073-1076. 9-10 พฤศจิกายน 2549 ณ โรงแรมแอมบาสเดอร์ซิตี้ จอมเทียน จังหวัดชลบุรี.
- [17] Nocedal J. and Wright, S. J. *Numerical Optimization*. Springer, 1960.
- [18] Grant, M. and Boyd, S. *CVX User's Guide of CVX version 1.2 (build 711)*. 2009.

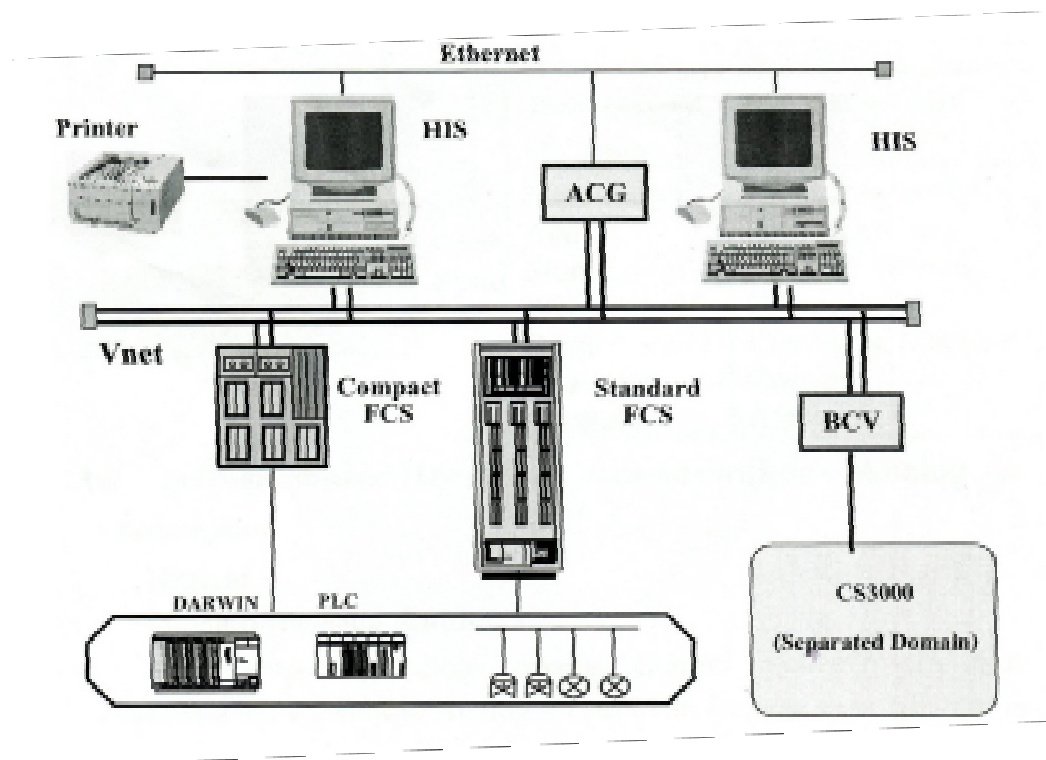
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

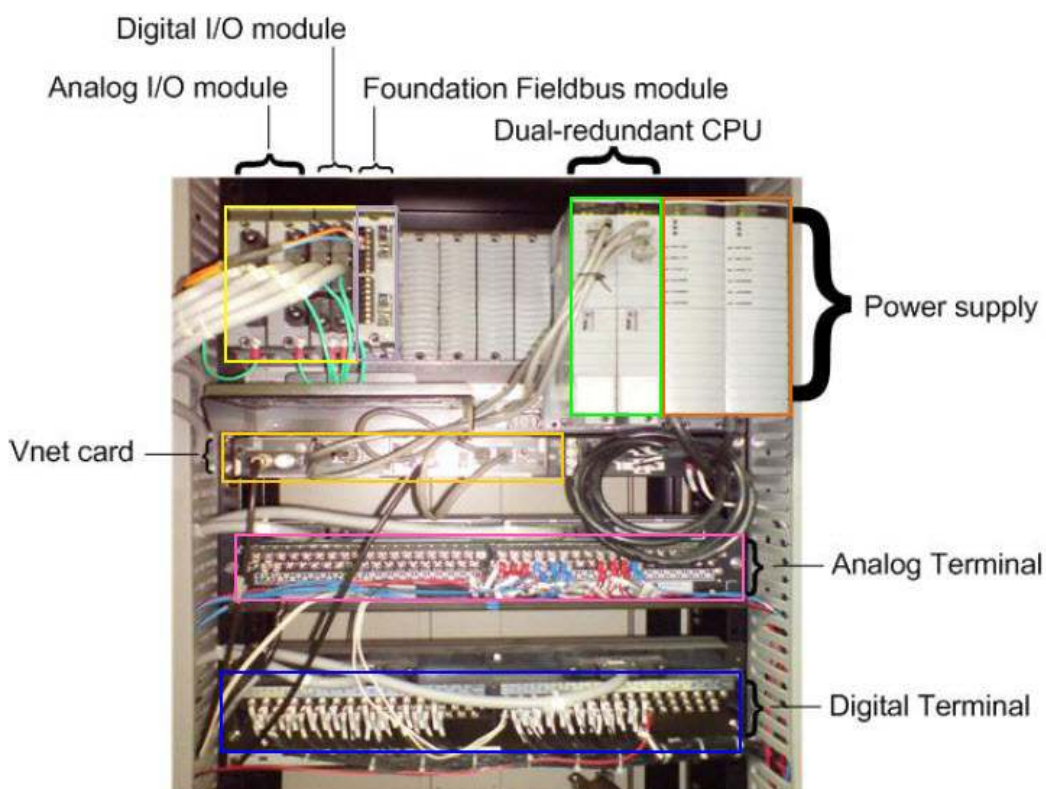
ระบบควบคุมแบบกระจายตัว

ระบบควบคุมแบบกระจายตัว (Distributed Control System) หรือดีซีเอส คือ เครื่องข่ายคมนาคมสำหรับตรวจสอบและควบคุมกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมที่เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โครงสร้างเบื้องต้นของดีซีเอสประกอบด้วย เครื่องมือสำหรับควบคุมการผลิตติดตั้งในบริเวณพื้นที่การผลิตและเครื่องมือสำหรับติดต่อระหว่างดีซีเอสกับพนักงานติดตั้งในบริเวณห้องควบคุม ปัจจุบันมีผู้ผลิตและจำหน่ายดีซีเอสหลายบริษัท แต่ทุกบริษัทจะมีองค์ประกอบคล้ายกันและแบ่งอุปกรณ์ภายในตามหน้าที่การปฏิบัติงานออกเป็นหน่วยเครื่องมือ (Module) โดยที่ประกอบด้วยหน่วยเครื่องมือ ดังนี้

1. หน่วยเชื่อมต่อกระบวนการ เป็นอุปกรณ์ติดต่อระหว่างดีซีเอสกับกระบวนการผลิต ทำหน้าที่รับสัญญาณวัดจากกระบวนการผลิตสู่ดีซีเอสและส่งสัญญาณควบคุมจากดีซีเอสไปยังกระบวนการผลิต หน่วยเชื่อมต่อกระบวนการของดีซีเอสหลักๆ ประกอบด้วย หน่วยรับสัญญาณแอนะล็อก หน่วยส่งสัญญาณแอนะล็อก หน่วยรับสัญญาณดิจิทัล และหน่วยส่งสัญญาณดิจิทัล



รูปที่ ก.1 โครงสร้างระบบควบคุมแบบกระจายตัว



รูปที่ ก.2 องค์ประกอบของดีซีเอส

2. หน่วยควบคุมกระบวนการ เป็นอุปกรณ์หลักสำหรับควบคุมกระบวนการผลิต โดยรับข้อมูลของกระบวนการผลิตจากหน่วยเชื่อมต่อกระบวนการเพื่อคำนวณค่าสัญญาณควบคุมและส่งค่านั้นกลับไปยังหน่วยเชื่อมต่อกระบวนการเพื่อส่งไปควบคุมกระบวนการผลิต

3. หน่วยติดต่อและปฏิบัติการของพนักงานและหน่วยปฏิบัติการของวิศวกร เป็นอุปกรณ์ติดต่อระหว่างดีซีเอสกับผู้ใช้ระดับวิศวกรและพนักงานทั่วไป อาจใช้อุปกรณ์ชุดเดียวกันสำหรับพนักงานและวิศวกรหรือแยกชุดกันก็ได้ หน่วยติดต่อและปฏิบัติการของพนักงานทำหน้าที่ติดต่อกับพนักงานเพื่อตรวจสอบและควบคุมกระบวนการผลิตเท่านั้น ส่วนหน่วยติดต่อและปฏิบัติงานของวิศวกรทำหน้าที่ติดต่อระหว่างดีซีเอสกับวิศวกร สำหรับจัดโครงสร้างของระบบควบคุม ออกแบบระบบควบคุม เชื่อมต่อเครื่องมือภายในดีซีเอส การกำหนดรายละเอียดและสร้างกราฟฟิกสำหรับพนักงาน เป็นต้น สำหรับดีซีเอสของบริษัทโยโกกาวาที่ตั้งอยู่ในห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมนั้นมีหน่วยติดต่อและปฏิบัติการของพนักงานและหน่วยปฏิบัติการของวิศวกรเป็นอุปกรณ์ชุดเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.3 หน่วยติดต่อและปฏิบัติการของพนักงานและวิศวกร



รูปที่ ก.4 หน่วยติดต่อและปฏิบัติงานของพนักงานแบบแผงควบคุม

4. หน่วยเชื่อมต่อเครือข่าย เป็นอุปกรณ์สำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ทุกส่วนของดีซีเอสกับเครือข่ายคมนาคม
5. หน่วยเก็บข้อมูลและประวัติกระบวนการ เป็นอุปกรณ์สำหรับเก็บข้อมูลของกระบวนการ
6. หน่วยเชื่อมต่อกับเครือข่ายคอมพิวเตอร์ เป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่างเครือข่ายของดีซีเอสกับเครือข่ายของคอมพิวเตอร์อื่น
7. หน่วยเชื่อมต่อกับระบบเครื่องมือย่อย เป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่างดีซีเอสกับเครื่องมืออื่นในระบบควบคุมภายนอกระบบดีซีเอส เช่น พีแอลซี
8. หน่วยจ่ายกำลังไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ทุกส่วนของดีซีเอส

ภาคผนวก ข

การใช้งานหน่วยติดต่อและปฏิบัติงานของวิศวกร

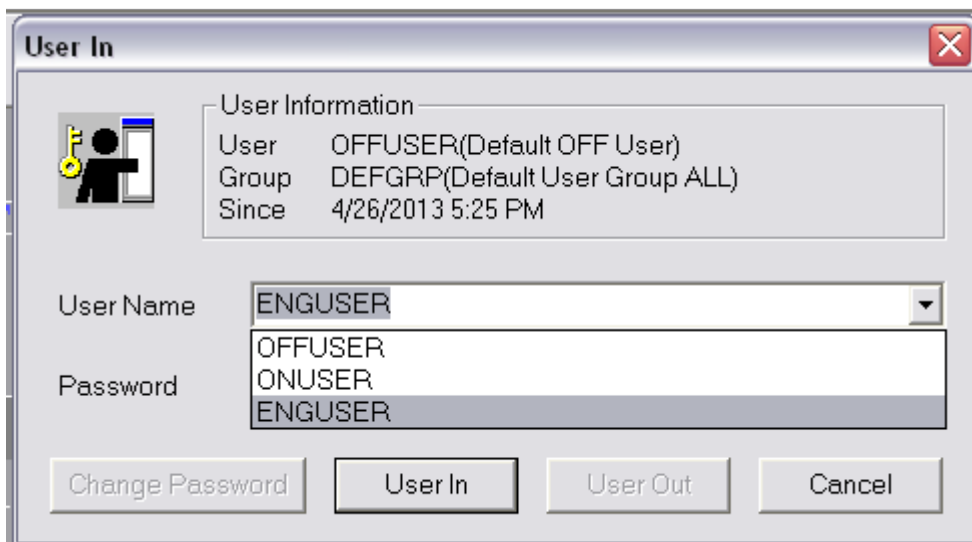
ในที่นี้จะกล่าวถึงการใช้งานหน่วยติดต่อและปฏิบัติงานของวิศวกรเพื่อสร้างโปรเจกต์ลงบนดีชีเอสที่อยู่ในห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม ซึ่งเป็นดีชีเอสของบริษัทโยโกกาว่า โดยทางบริษัทเรียกหน่วยติดต่อและปฏิบัติงานกับพนักงานและวิศวกร ว่า **HIS** โดยผู้วิจัยได้ทำการประยุกต์โปรเจกต์ลงบนเครื่อง **HIS0164**

สำหรับการเข้าใช้งานเครื่อง **HIS0164** ของวิศวกรนั้น มีขั้นตอนที่ต้องปฏิบัติดังนี้

1. เมื่อเปิดคอมพิวเตอร์เครื่อง **HIS0164** และล็อกอินเข้าระบบวินโดวส์แล้ว จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ ข.1 อยู่ด้านบนของหน้าจอโดยอัตโนมัติ จากนั้นคลิกที่ปุ่มตามวงกลมสีแดง จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ ข.2 เพื่อล็อกอินเข้าระบบของดีชีเอส ให้เลือก **ENGUSER** ส่วนช่อง **Password** ให้เว้นว่างไว้ แล้วกดปุ่ม **User In**



รูปที่ ข.1 แถบเครื่องมือเอนกประสงค์ของ HIS



รูปที่ ข.2 หน้าต่างล็อกอินเลือกประเภทผู้ใช้งาน

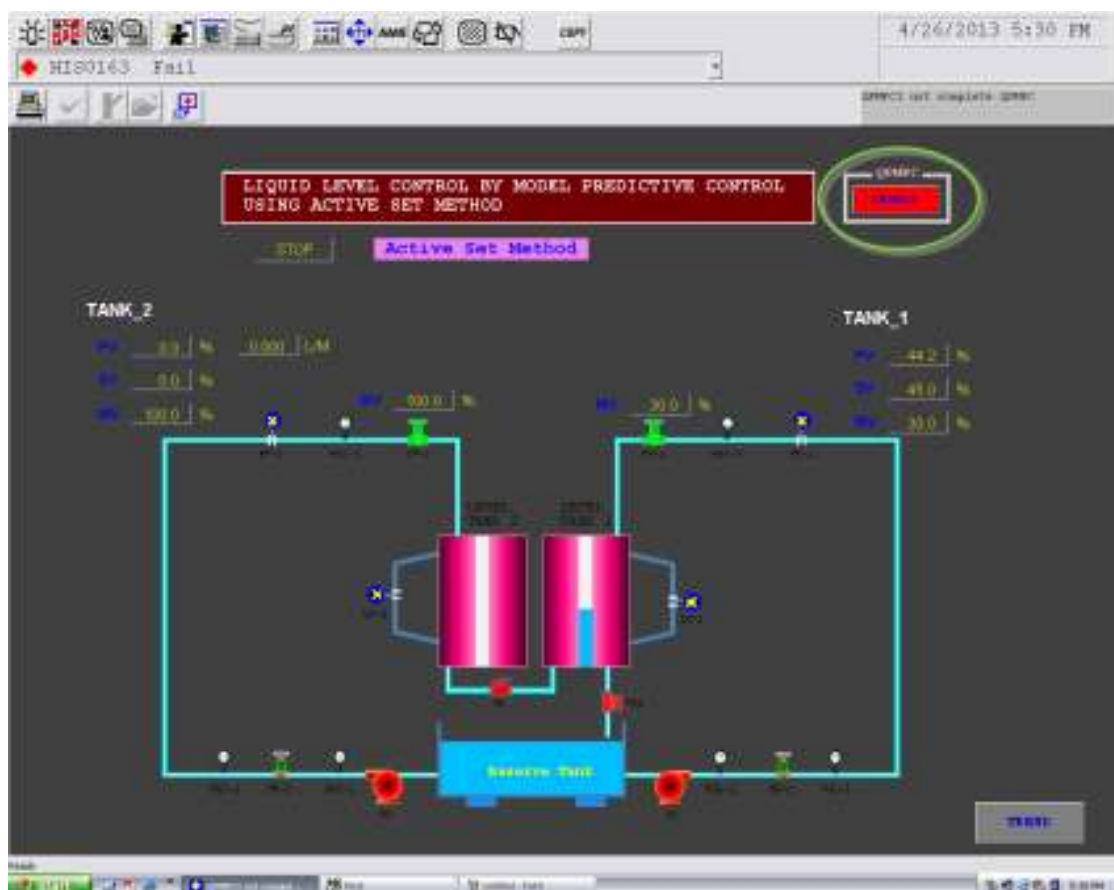
2. หากต้องการทดลองตัวควบคุมที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นให้กดปุ่ม **NAME** ตามรูปที่ ข.1 ในกรอบสี่เหลี่ยมสีน้ำเงิน ปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ ข. 3 ให้พิมพ์คำว่า **QPMPC1** กดปุ่ม **OK** จะปรากฏหน้า

กราฟฟิกสำหรับการควบคุมกระบวนการควบคุมระดับของเหลวโดยมีการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่อาศัยวิธีเซตแอกทีฟเป็นตัวควบคุมดังรูปที่ ข.4



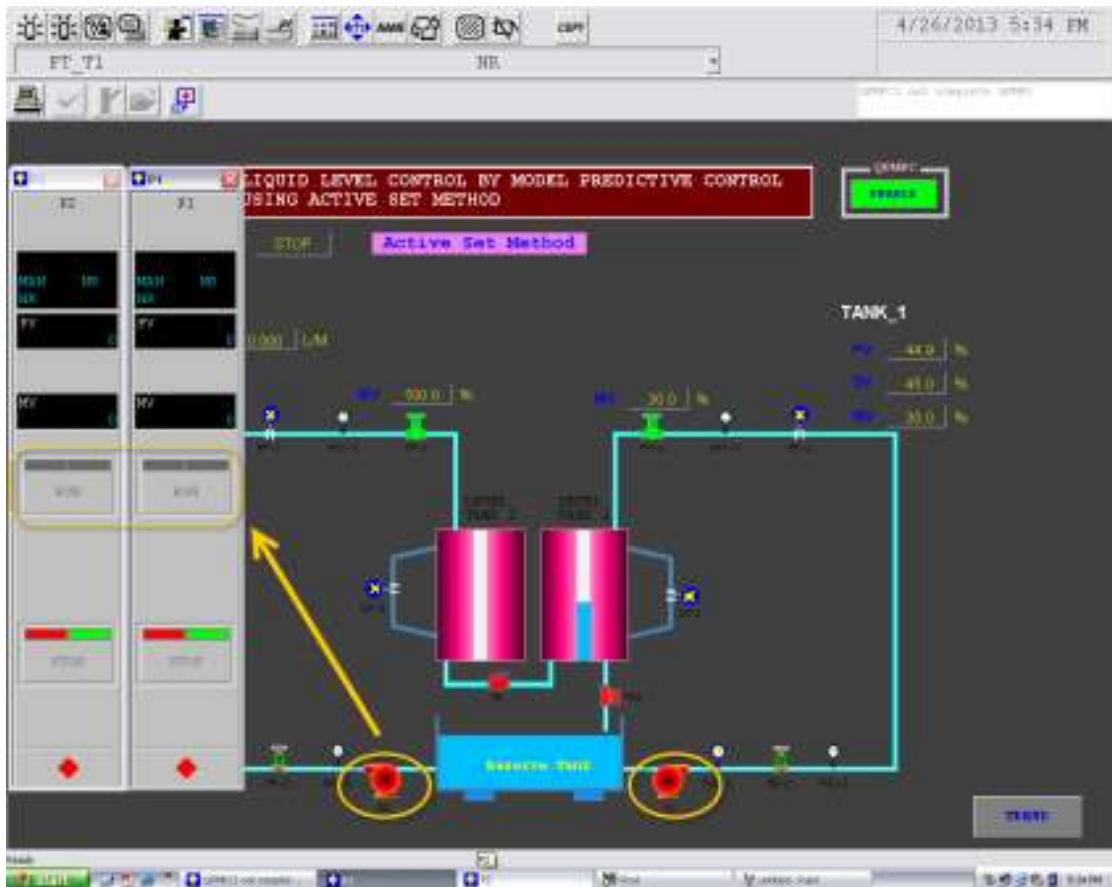
รูปที่ ข.3 หน้าต่างสำหรับเรียกหน้าต่างอื่นๆ

3. จากนั้นกดปุ่ม **ENABLE** เพื่อเลือกให้โปรเจกต์นี้ทำงาน หากไม่เกิดข้อผิดพลาดใดๆ จากปุ่มสีแดงจะเปลี่ยนเป็นสีเขียว และสามารถเริ่มทำการทดลองได้ โดยเซตค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามเนื้อหาบทที่ 4 ที่ได้กล่าวไปแล้ว



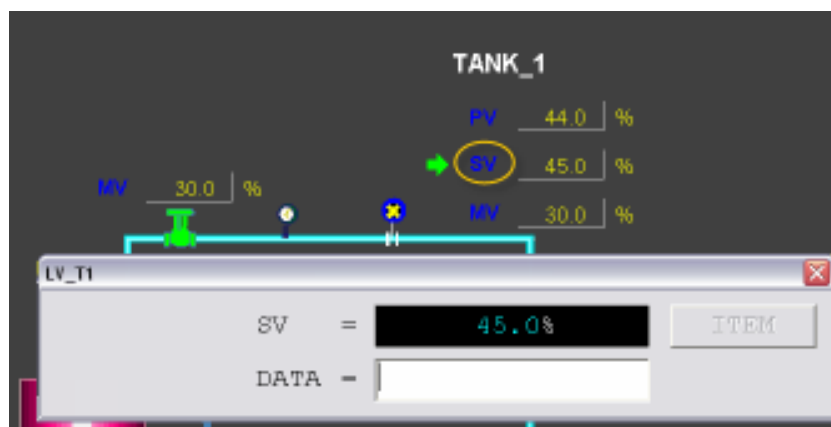
รูปที่ ข.4 กราฟฟิกโปรเจกต์ QPMPC1

4. หากต้องการเปิดปั้มน้ำให้ดับเบิ้ลคลิกที่รูปปั้มน้ำจากนั้นกดปุ่ม **RUN** ดังรูปที่ ข.5 หากปั้มน้ำทำงานจะเปลี่ยนจากสีแดงกลายเป็นสีเขียว



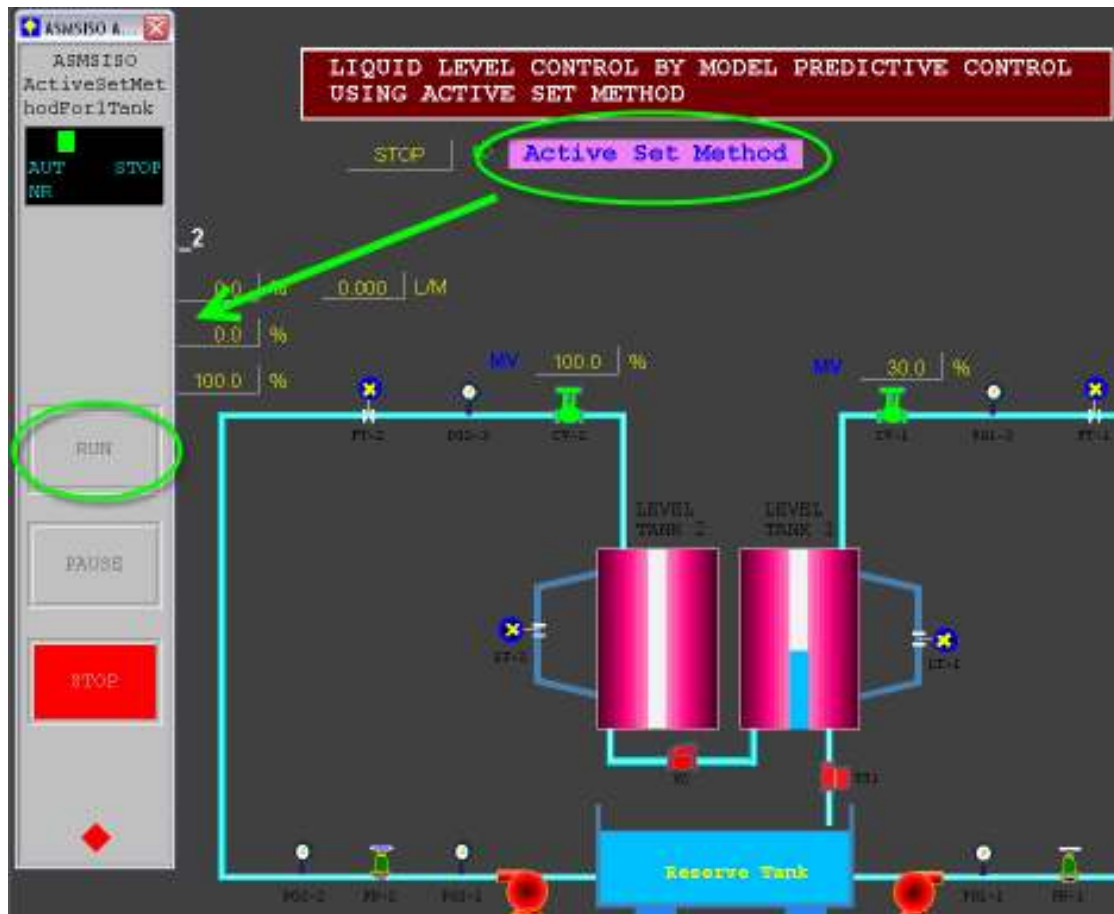
รูปที่ ข.5 การเปิดปั้มน้ำ

5. หากต้องการเปลี่ยนค่าสัญญาณอ้างอิง ทำได้โดยดับเบิ้ลคลิกที่ **SV** ดังรูปที่ ข.6 ใส่ค่าสัญญาณอ้างอิงที่ต้องการในช่อง **DATA**



รูปที่ ข.6 การเปลี่ยนค่าสัญญาณอ้างอิง

6. เมื่อต้องการสั่งให้ตัวควบคุมทำหน้าที่ควบคุมกระบวนการ สามารถสั่งการได้โดยดับเบิลคลิกที่ปุ่ม **Active Set Method** จะปรากฏหน้าต่าง ASMSISO จากนั้นกดปุ่ม RUN ดังรูปที่ ข.7



รูปที่ ข.7 หน้าต่างสั่งการทำงานของตัวควบคุม

7. หากต้องการสร้าง ปรับปรุง แก้ไขโปรเจกต์ สามารถทำได้โดยกดปุ่ม **START** เลือก **SYSTEM VIEW** ตามรูปที่ ข.5 จากนั้นจะปรากฏหน้าต่างของโปรแกรม (System View) ที่ผู้ใช้สามารถออกแบบโปรเจกต์ได้ตามความต้องการ



รูปที่ ข.8 การเรียกโปรแกรม System View

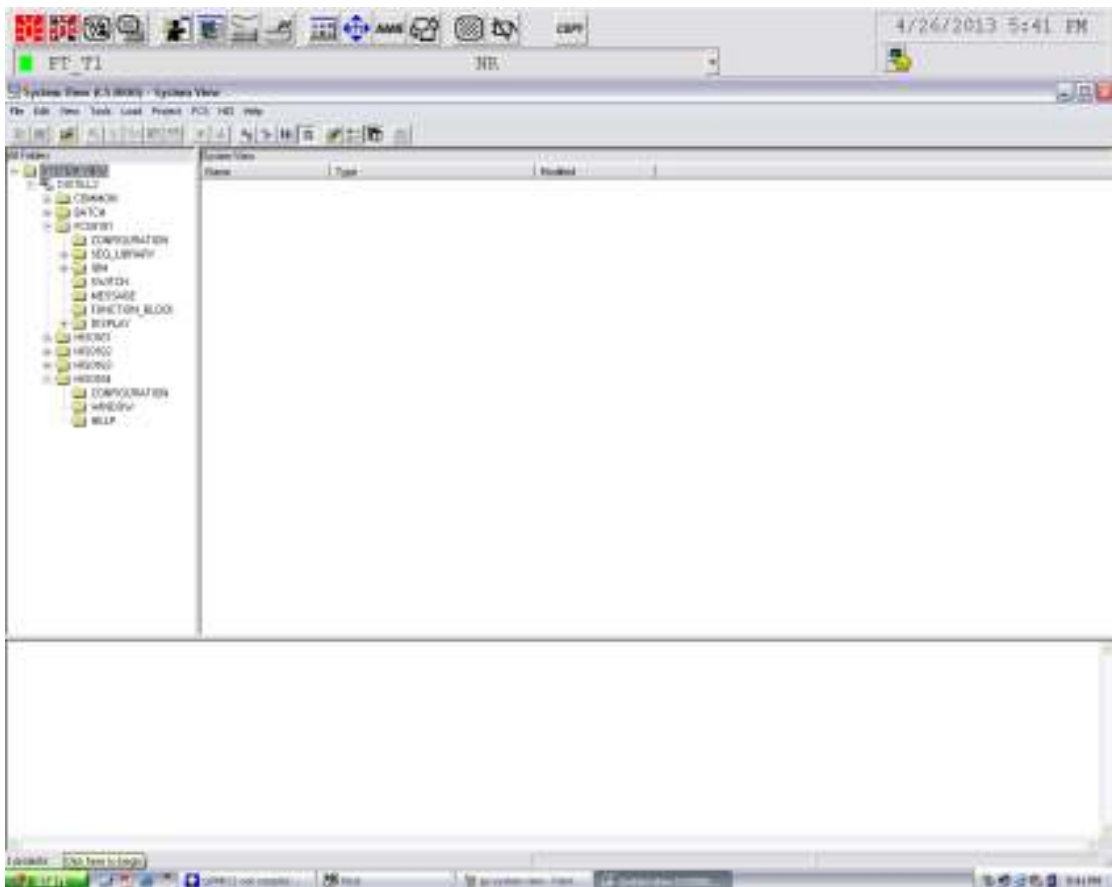
ภาคผนวก ค

การสร้างสวิตช์เลือกโปรเจกต์

ในบทที่ 4 กล่าวถึง การสร้างบล็อกฟังก์ชันสวิตช์เพื่อเลือกสัญญาณควบคุมจากโปรเจกต์ที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นเป็นสัญญาณควบคุมที่ส่งไปควบคุมการเปิดวาล์วควบคุม แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงการสร้างสวิตช์เพื่อเลือกให้โปรเจกต์ดำเนินการในฐานะเป็นตัวควบคุมที่ควบคุมกระบวนการควบคุมระดับของเหลว ซึ่งทั้ง 2 อย่างนี้ต้องทำงานร่วมกันตามที่ได้แสดงในรูปที่ 4.13 นอกจากนี้สวิตช์เลือกโปรเจกต์ยังต้องนำไปออกแบบร่วมกับการสร้างกราฟฟิกซึ่งก็คือปุ่ม **ENABLE** ตามที่แสดงในรูปที่ 4.14 นั่นเอง

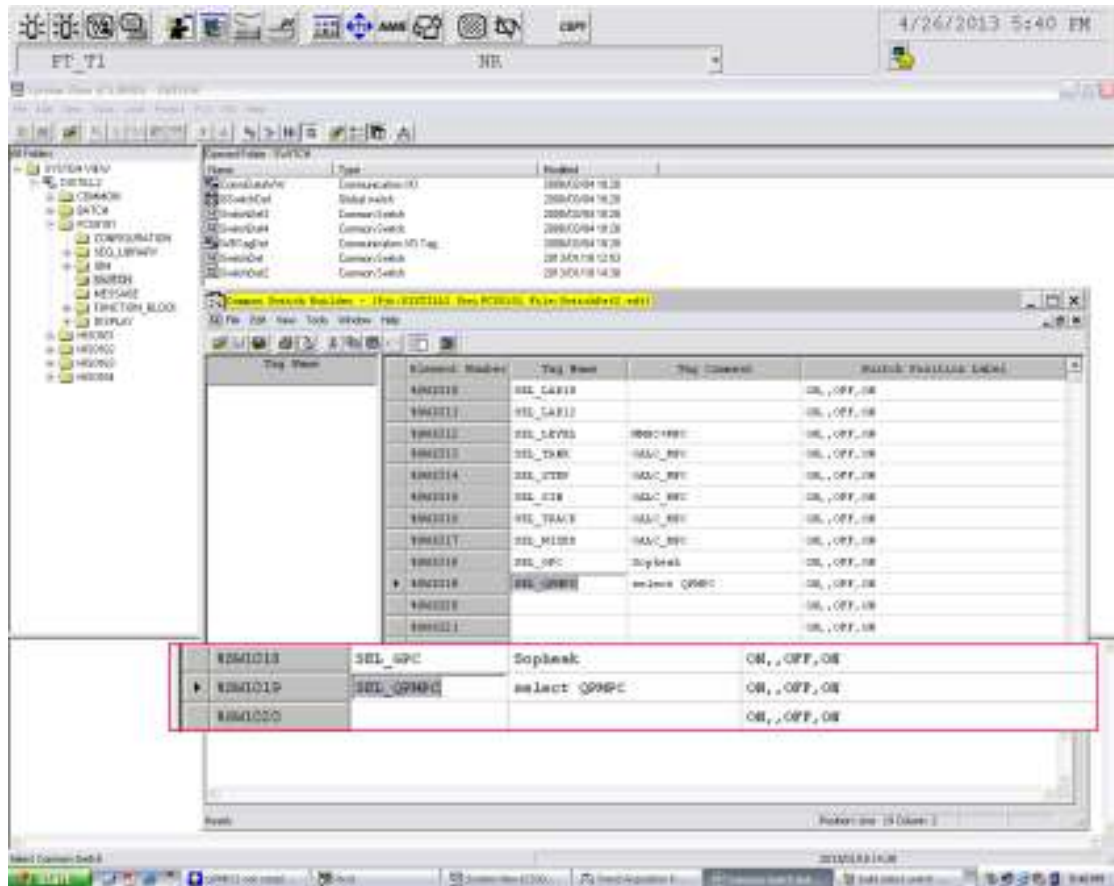
ขั้นตอนการสร้างสวิตช์เลือกโปรเจกต์ มีดังนี้

1. เริ่มจาก กดปุ่ม **START** เลือก **SYSTEM VIEW** จะปรากฏหน้าต่างหลักขึ้นมาดังรูป



รูปที่ ค.1 หน้าต่างหลักสำหรับการดำเนินการทางวิศวกรรม (SYSTEM VIEW)

2. เลือกโฟลเดอร์ **FCS0101** จากนั้นเลือกโฟลเดอร์ **SWITCH** จะปรากฏไอคอนต่างๆ ให้เลือกไอคอน **SwitchDef** ที่ต้องการ ในที่นี้ผู้วิจัยเลือก **SwitchDef2** จะปรากฏหน้าต่างสำหรับสร้างสวิตซ์ดังรูปที่ ค.2



รูปที่ ค.2 หน้าต่างสร้างสวิตซ์

3. สุดท้ายใส่ชื่อสวิตซ์ที่ต้องการสร้าง และคำอธิบายให้ตรงกับช่อง **ELEMENT NUMBER** ที่ต้องการ สามารถเลือก **ELEMENT NUMBER** ใดก็ได้ที่ยังไม่มีผู้ใช้งาน อย่างเช่นผู้วิจัยเลือก **%SW0119** ตั้งชื่อว่า **SEL_QPMP** และใส่คำอธิบายที่สอดคล้องกับการเลือกโปรเจกต์เป็นต้น

ภาคผนวก ง

โค้ดโปรแกรมวิธีจุดภายใน

จากระเบียบวิธีของวิธีจุดภายในที่อธิบายไว้ในเนื้อหาบทที่ 2 สามารถเขียนเป็นโค้ดโปรแกรม MATLAB (m file) ได้ ดังนี้

```
-----  
function [xmin,fmin] = IP4(x,Q,c,A,b)  
  
t = 1;  
mu = 10;  
eps = 1e-8;  
tol = 1e-8;  
iterOut=1;  
m = length(b);  
  
%%  
while (m/t > tol)  
    iterIn=1;  
  
    while(1)          %%Newton's Method  
        const = b-A*x;  
        GradL = 1./const;          %%Gradient of Log barrier function  
        d=GradL.^2;  
        HesL=diag(d);          %%Hessian of Log barrier function  
  
        %% Function of QP with log barrier function  
        f = t*(x'*Q*x/2+c'*x)-sum(log(b-A*x));  
        Gradf = t*(Q'*x+c)+A'*GradL;          %%Gradient of f  
        Hesf = t*Q+A'*HesL*A;          %%Hessian of f  
  
        %% Newton's Method  
        dk = -inv(Hesf)*Gradf;          %%Find direction  
        alpha = 0.1;  
        beta = 0.1;  
        s = 1;  
  
        while (1)          %%Start Backtracking line search  
            x_new = x+s*dk;  
            Z = t*(x_new'*Q*x_new/2+c'*x_new)-sum(log(b-A*x_new));  
            Plus = alpha*s*(t*(Q'*x+c)+A'*GradL)'*dk;  
            Y = f+Plus;  
            if Z>Y || sum(logical((b-A*x_new)<0))  
                s = beta*s;  
            else  
                break;  
            end  
        end  
        %%End Backtracking line search  
        f1=t*(x_new'*Q*x_new/2+c'*x_new)-sum(log(b-A*x_new));
```

```
        if (abs(f1-f)>eps)           %%Newton's Condition Checking
            x=x_new;
            iterIn=iterIn+1;
        else
            break;
        end

    end
    t=mu*t;                          %%Update t
    iterOut=iterOut+1;
    xmin=x_new;
    fmin=f1;
end
```

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววิมลรัตน์ เอมอ้อม เกิดเมื่อวันที่ 20 มกราคม พ.ศ. 2529 จังหวัดพระนครศรีอยุธยา เป็นบุตรของนายบุญเลิศ และนางสมหมาย เอมอ้อม สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ในปีถัดมา ณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สังกัดห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

วิมลรัตน์ เอมอ้อม และเดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย. วิชเชตแอกทีฟสำหรับการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่ประยุกต์ใช้กับหอกลิ้น. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 34. พฤศจิกายน 2554, หน้า 781-784.