

การประยุกต์การควบคุมขั้นสูงโดยดำเนินการผ่านDCS



นายปรเมษ เชียงจง

# สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

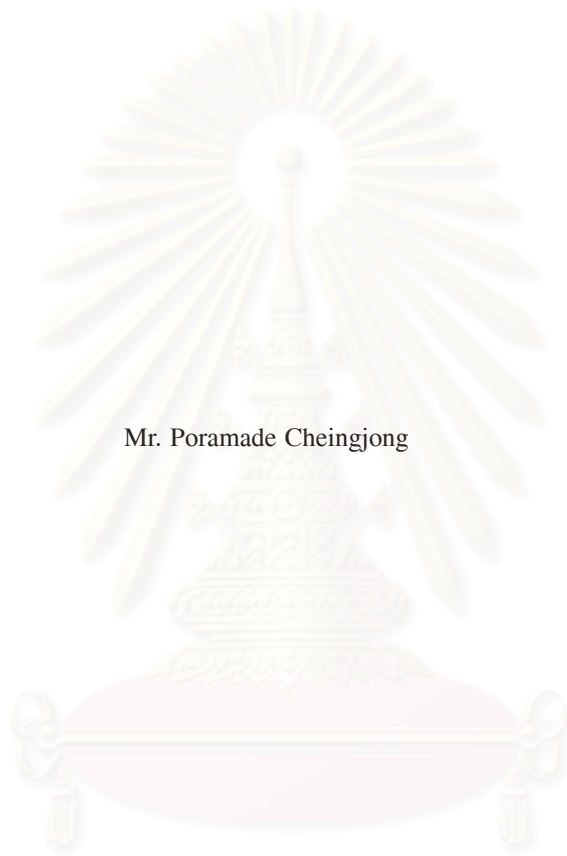
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ADVANCED CONTROL APPLICATION AS IMPLEMENTED VIA DISTRIBUTED CONTROL SYSTEMS



Mr. Poramade Cheingjong

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2007

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การประยุกต์การควบคุมขั้นสูงโดยดำเนินการผ่านDCS  
โดย                              นายประเมษ เชียงจาง  
สาขาวิชา                      วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษา              ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานพ วงศ์สายสุวรรณ


---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

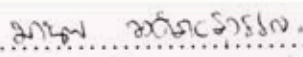
  
.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สวลัย ประดิษฐานนท์)

ประธานกรรมการสอบ

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

อาจารย์ที่ปรึกษา

  
.....

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุธรรม วาณิชเสนี)

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปรเมษ เชียงจุง: การประยุกต์การควบคุมขั้นสูงโดยดำเนินการผ่านDCS (ADVANCED CONTROL APPLICATION AS IMPLEMENTED VIA DISTRIBUTED CONTROL SYSTEMS), อ. ที่ปรึกษา: ผศ.ดร. มานพ วงศ์สายสุวรรณ, 101 หน้า

จุดมุ่งหมายของวิทยานิพนธ์นี้คือ พิจารณาการประยุกต์การควบคุมขั้นสูง 3 วิธีโดยดำเนินการผ่านDCS

การควบคุมระดับแบบเฉลี่ยถูกใช้ควบคุมระดับในถังพักโดยดำเนินการผ่านDCS การควบคุมระดับแบบเฉลี่ย คือการรักษาระดับของเหลวในถังพักให้อยู่ภายในขอบเขตที่กำหนด โดยพยายามให้อัตราการไหลออกมีความราบรื่นภายใต้การรบกวนของอัตราการไหลเข้า การควบคุมระดับถูกจัดให้อยู่ในรูปแบบปัญหาการควบคุมที่เหมาะสมที่สุดในขอบเขตจำกัด โดยใช้การทำนายการรบกวนแบบลาดซึ่งเป็นวิธีที่นำเสนอสำหรับปรับปรุงสมรรถนะการติดตามระดับ ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของสัญญาณควบคุมสามารถหาจากแคลคูลัสของการแปรผัน และนำผลที่ได้ไปใช้ในกรอบงานของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองระบบควบคุมที่นำเสนอมีสมรรถนะในการติดตามระดับที่ดีโดยที่อัตราการไหลออกราบรื่น

ตัวควบคุม PI แบบปรับอัตราขยายได้ถูกใช้ควบคุมอุณหภูมิออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยดำเนินการผ่านDCS การควบคุมโดยวิธีนี้ถูกพัฒนาให้ใช้ได้กับวิธีการออกแบบในอุตสาหกรรมทั่วไปในการจัดการรบกวนที่นอกเหนือจากช่วงการทำงาน ผลการควบคุมแสดงให้เห็นว่าเป็นการควบคุมที่กระชับโดยไม่ต้องใช้ผู้ปฏิบัติการ

ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีถูกใช้ควบคุมหอกลิ้นแยกสารผสมสองชนิดโดยดำเนินการผ่านDCS การรวมกลุ่มข้อมูลแบบฟัซซีมีนถูกใช้ในการระบุจำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและฐานกฎฟัซซีกำหนดโดยตารางค่าอัตราขยายฟัซซี ดังนั้นไม่จำเป็นต้องใช้วิธีที่มีกฎเกณฑ์สำหรับการออกแบบฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตรรกศาสตร์ฟัซซีและการตั้งกฎจากผู้เชี่ยวชาญ ตัวกำกับดูแลฟัซซีสามารถปรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI แบบออนไลน์เพื่อรักษาอุณหภูมิที่ยอดหอและฐานหอที่ค่ากำหนดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนสารผสมเข้ากลางหอกลิ้น

ทัศนวิสัย ประโยชน์การใช้สอย และความเชื่อถือได้ในองค์ประกอบของDCS ทำให้สามารถประยุกต์ใช้การควบคุมขั้นสูงโดยดำเนินการผ่านDCS และDCSยอมให้ใช้วิธีการควบคุมที่ซับซ้อนในการออกแบบการดำเนินการ การปฏิบัติการ และการบำรุงรักษา

ภาควิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า .....  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า .....  
ปีการศึกษา ..... 2550 .....

ลายมือชื่อนิสิต ..... ปรเมษ เชียงจุง .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... ภาณุ วงศ์สายสุวรรณ .....

##4970424921: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: DISTRIBUTED CONTROL SYSTEMS (DCS) / HEAT EXCHANGER / SURGE TANK / BINALY DISTILLATION COLUMN / ADAPTIVE PI CONTROL / MODEL-PREDICTIVE OPTIMAL AVERAGING LEVEL CONTROL / FUZZY C-MEANS CLUSTERING COMBINED WITH FUZZY GAIN SCHEDULING

PORAMADE CHEINGJONG: ADVANCED CONTROL APPLICATION AS IMPLEMENTED VIA DISTRIBUTED CONTROL SYSTEMS, THESIS ADVISOR: MANOP WONGSAISUWAN, Ph.D., 101 pp.

The intent of this thesis is to provide a review of three advanced control application as implemented via distributed control system (DCS).

The averaging level control application is implemented via DCS to control a surge tank. In averaging level control, the liquid level in a surge tank is maintained within the prescribed bounds with an attempt to keep the outlet flow smooth under the disturbance of the inlet flow. Such level control is formulated as an optimal control problem using a ramp-disturbance prediction, which is a new approach for improving the performance of tank level tracking. The analytical solutions of the control action can be derived via calculus of variation, and the results are implemented within the framework of model predictive control. With smoothness of outlet flows, the proposed control technique provides far superior tracking performance.

The adaptive PI control application is implemented via DCS to control a heat exchanger. The control scheme is developed by a typical industrial design approach in order to reject disturbance over the whole operating range. The results show that tighter control with less operator attention is achieved.

The fuzzy supervisory PI control is implemented via DCS to control a binary distillation column. The fuzzy c-mean clustering is used to identify the membership functions and fuzzy rules are determined using fuzzy gain scheduling technique. Thus, the need of heuristic method for designing fuzzy membership functions and rules from expert knowledge is omitted. Then, the fuzzy supervisors adapt the parameters of the PI controllers on line to maintain the top and the bottom temperature of the distillation column in spite of the changes in feed flow rate.

Due to the visibility, functionality and reliability, DCS instrumentation has provided an excellent tool for the application of advanced control schemes. DCS allows more sophisticated control strategies to be designed, implemented, operated and maintained.

Department . . . . . Electrical Engineering  
 Field of study . . . . . Electrical Engineering  
 Academic year . . . . . 2007

Student's signature . . . . . Poramade Cheingjong  
 Advisor's signature . . . . . Manop Wongsaisuwan

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลือของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มานพ วงศ์สายสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้สละเวลาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ รวมทั้งได้มอบหมายงานที่เป็นประโยชน์ ที่ทำให้นิสิตมีแนวความคิดในการทำวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. สุวัลย์ ประดิษฐ์นนท์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร. สุธรรม วาณิชเสนี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาตรวจสอบและให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในสาขาระบบควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้พื้นฐานในวิชาทางระบบควบคุม อันเป็นพื้นฐานในการศึกษาและทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่เป็นกำลังใจและกำลังทรัพย์ตลอดเวลา รวมทั้งให้โอกาสผู้วิจัยได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโทมาบัดนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ รุ่นน้องในห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมทั้งในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ให้กำลังใจและคำปรึกษา จนผู้วิจัยได้ทำวิทยานิพนธ์นี้ได้สำเร็จสมบูรณ์ ขอขอบคุณพี่กรรมวัฒน์ และพี่เกียรติขจร สำหรับข้อมูลอันเป็นประโยชน์เกี่ยวกับระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี่ และระบบหากลั่นแยกสารผสมสองชนิด ขอขอบคุณพี่ทัณฑ์ สำหรับคำแนะนำเกี่ยวกับการแก้ไขปัญหาของการควบคุมแบบเหมาะที่สุด พี่วุฒินันท์ พี่วรพล ศิริพงษ์ สำหรับคำแนะนำในเรื่องการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง พี่ศิริชัย พี่ธีรพงษ์ สำหรับคำแนะนำเกี่ยววงจรแปลงสัญญาณ ขอขอบคุณพี่ฐาปนา พี่วฤต ธนาตย์ จิตติชัย และกรรณก สำหรับคำแนะนำประกอบการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทรัพยากรต่างๆ ในการศึกษา ค้นคว้าและวิจัย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมา .....	1
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา .....	2
1.2.1 การควบคุมระดับแบบเฉลี่ย .....	2
1.2.2 การควบคุม PI แบบปรับอัตราขยายได้ .....	2
1.2.3 การควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี่ .....	3
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ .....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน .....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	5
1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์ .....	5
<b>2 การควบคุมระดับในถังพัก .....</b>	<b>7</b>
2.1 การควบคุมระดับแบบเฉลี่ยของถังพัก .....	7
2.1.1 แบบจำลองถังพัก .....	7
2.1.2 การคำนวณหาสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุด .....	8
2.1.3 การนำสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุดมาใช้ในการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง .....	11
2.2 การควบคุมระดับในถังพักโดยดำเนินการผ่านDCS .....	16
2.2.1 โครงสร้างและการทำงานของถังพัก .....	16
2.2.2 ตัวสังเกต (Observer) สำหรับการควบคุมระดับแบบเฉลี่ย .....	16
2.2.3 การนำสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุดไปใช้กับ solenoid valve .....	17
2.2.4 การควบคุมระดับในถังพักโดยใช้การควบคุมระดับแบบเฉลี่ย .....	18

บทที่	หน้า
2.3 สรุป .....	22
<b>3 การควบคุมอุณหภูมิเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน .....</b>	<b>23</b>
3.1 ตัวควบคุมสัดส่วนและอินทิกรัลแบบปรับอัตราขยายได้ (Adaptive PI controller) .....	23
3.1.1 ทฤษฎีadaptive interaction [2, 6] .....	23
3.1.2 ขั้นตอนวิธีการปรับอัตราขยายของตัวควบคุม PI โดยใช้ทฤษฎีadaptive interaction ..	25
3.1.3 การประมาณตัวควบคุมสัดส่วนและอินทิกรัลแบบปรับอัตราขยายได้ทางเวลาต่อเนื่อง	26
3.2 การควบคุมอุณหภูมิออกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยดำเนินการผ่านDCS .....	28
3.3 สรุป .....	32
<b>4 การควบคุมหอกลิ้นแยกสารผสมสองชนิด.....</b>	<b>33</b>
4.1 ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี [3].....	33
4.1.1 การกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกด้วยวิธีการรวมกลุ่มแบบวิธีfuzzy c-means .....	33
4.1.2 การกำหนดฐานกฎฟัซซีโดยใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีของตัวควบคุม PI .....	35
4.1.3 Defuzzification โดยใช้วิธีcentroid .....	38
4.2 การควบคุมหอกลิ้นแยกสารผสมสองชนิดโดยดำเนินการผ่านDCS .....	38
4.3 สรุป .....	62
<b>5 การประยุกต์การควบคุมขั้นสูงโดยดำเนินการผ่านDCS.....</b>	<b>63</b>
5.1 การประยุกต์การควบคุมขั้นสูงในการควบคุม 3 กระบวนการพร้อมกันโดยดำเนินการผ่านDCS	63
5.1.1 โครงสร้างและการเชื่อมต่อระหว่างDCSกับกระบวนการ .....	63
5.1.2 ขั้นตอนการดำเนินการผ่านDCS .....	65
5.1.3 ผลการควบคุมกระบวนการ .....	69
5.2 สรุป .....	74
<b>6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>75</b>
6.1 บทสรุป .....	75
6.2 ข้อเสนอแนะ .....	76
<b>รายการอ้างอิง .....</b>	<b>77</b>
<b>ภาคผนวก .....</b>	<b>79</b>
ภาคผนวก ก ตัวสังเกตสำหรับการควบคุมระดับแบบเฉลี่ย .....	80
ภาคผนวก ข การนำสัญญาณควบคุมเหมาะสมที่สุดไปใช้กับถังพัก .....	82
ภาคผนวก ค พิสูจน์การลดรูปของสมการค่าถ่วงน้ำหนัก .....	84
ภาคผนวก ง การทำงานของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี .....	86



บทที่	หน้า
ภาคผนวก จ การรวมกลุ่มข้อมูล .....	89
จ.1 การรวมกลุ่มข้อมูลแบบhard c-means .....	89
จ.2 การรวมกลุ่มข้อมูลแบบfuzzy c-means .....	91
ภาคผนวก ฉ ตารางค่าอัตราขยายพีซีซี .....	93
ภาคผนวก ช Human Interface Station .....	96
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	<b>101</b>



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

หน้า

2.1	ดรรชนีสมรรถนะ ของการควบคุมระดับแบบเฉลี่ยเหมาะสมที่สุดเชิงทำนายแบบจำลอง ที่ใช้การทำนายการรบกวนแบบขั้นบันไดและแบบลาด เมื่อการรบกวนที่เข้าสู่ระบบมีรูปแบบต่างๆ .....	12
2.2	อัตราการเปิด-ปิด solenoid valve กับอัตราการไหลเข้าที่จุดสมมูล 0.5 เมตร .....	18
4.1	(a) ตารางค่าอัตราขยายพีชชีสำหรับ $K'_p$ (b) ตารางค่าอัตราขยายพีชชีสำหรับ $K'_i$ .....	37
4.2	(c) ตารางค่าอัตราขยายพีชชีสำหรับ $K'_p$ (d) ตารางค่าอัตราขยายพีชชีสำหรับ $K'_i$ เมื่อจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสมเป็น 3 กลุ่มข้อมูล .....	37
4.3	ความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ยอดหอ สารผสมที่ถูกป้อนเข้ากลางหอ และสารผลิตภัณฑ์ฐานหอ ที่อุณหภูมิที่กำหนด .....	39
4.4	รายละเอียดการทดลองการควบคุมหอกลิ้นแยกสารผสมสองชนิดของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม UOP3CC .....	39
5.1	รายละเอียดการเชื่อมต่อสัญญาณในกระบวนการกับDCS .....	64
5.2	ขั้นตอนการดำเนินการผ่านDCS .....	67
ข.1	อัตราการเปิด-ปิด solenoid valve กับอัตราการไหลเข้าที่จุดสมมูล 0.5 เมตร .....	82
ง.1	ตารางค่าอัตราขยายพีชชีสำหรับ $\Delta u$ .....	87
ฉ.1	ตารางค่าอัตราขยายพีชชีสำหรับ $K'_p$ .....	95
ฉ.2	ตารางค่าอัตราขยายพีชชีสำหรับ $K'_i$ .....	95

## สารบัญญภาพ

หน้า

2.1	ถึงพัก .....	7
2.2	การทำนายการรบกวนระบบ $w(\tau)$ โดยใช้สมการลาด .....	9
2.3	แผนภาพขั้นตอนการประยุกต์ใช้สัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุดกับแบบจำลองถึงพัก .....	11
2.4	ผลตอบของระดับของเหลวในถัง $x_1(t)$ เมื่อการรบกวนเป็นสัญญาณขั้นบันได .....	13
2.5	ผลตอบของอัตราการไหลออก $x_2(t)$ เมื่อการรบกวนเป็นสัญญาณขั้นบันได .....	13
2.6	ผลตอบของระดับของเหลวในถัง $x_1(t)$ เมื่อการรบกวนเป็นสัญญาณสุ่ม .....	14
2.7	ผลตอบของอัตราการไหลออก $x_2(t)$ เมื่อการรบกวนเป็นสัญญาณสุ่ม .....	14
2.8	ผลตอบของระดับของเหลวในถัง $x_1(t)$ เมื่อการรบกวนเป็นสัญญาณไซน์ .....	15
2.9	ผลตอบของอัตราการไหลออก $x_2(t)$ เมื่อการรบกวนเป็นสัญญาณไซน์ .....	15
2.10	การเชื่อมต่อระหว่างDCSกับถึงพัก .....	16
2.11	แผนภาพขั้นตอนการนำตัวควบคุมระดับแบบเคลื่อนมาใช้กับถึงพักของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม .....	19
2.12	อัตราการไหลเข้าเป็นสัญญาณขั้นบันได และการประมาณอัตราการไหลออก .....	20
2.13	ระดับของเหลว และเวลาการเปิด solenoid valve เมื่อการรบกวนเป็นสัญญาณขั้นบันได .....	20
2.14	อัตราการไหลเข้าเป็นสัญญาณไซน์ และการประมาณอัตราการไหลออก .....	21
2.15	ระดับของเหลว และเวลาการเปิด solenoid valve เมื่อการรบกวนเป็นสัญญาณไซน์ .....	21
3.1	ตัวอย่างของอุปกรณ์และการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ .....	24
3.2	ขั้นตอนวิธีการกำหนดอัตราขยายของตัวควบคุม PI .....	25
3.3	โครงสร้างการนำตัวควบคุมสัดส่วนและอินทิกรัลแบบปรับอัตราขยายได้ไปใช้ในทางปฏิบัติ ..	27
3.4	การเชื่อมต่อระหว่างDCSกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน .....	28
3.5	อุณหภูมิขาออกและสัญญาณควบคุมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อค่ากำหนดอยู่ที่ $40^{\circ}\text{C}$ .....	30
3.6	การปรับค่าถ่วงน้ำหนักการเชื่อมต่อ $K_p, K_i$ .....	30
3.7	อุณหภูมิขาออกและสัญญาณควบคุมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน .....	31
3.8	การปรับค่าถ่วงน้ำหนักการเชื่อมต่อ $K_p, K_i$ .....	31
4.1	โครงสร้างตัวควบคุมสัดส่วนและอินทิกรัลแบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี่ .....	33
4.2	แผนภาพขั้นตอนการรวมกลุ่มข้อมูลแบบ fuzzy c-means .....	34
4.3	แผนภาพขั้นตอนการรวมกลุ่มข้อมูลแบบ fuzzy c-means กับการระบุจำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่เหมาะสมที่สุด .....	35

4.4	ระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI .....	36
4.5	ผลตอบต่อสัญญาณแบบขั้นบันได .....	36
4.6	แผนภาพการเชื่อมต่อระหว่างDCSกับหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด .....	38
4.7	อุณหภูมิที่ยอดหอและอัตราการป้อนกลับสารที่ยอดหอของการทดลองที่ 1 .....	42
4.8	อุณหภูมิที่ฐานหอและอัตราการป้อนไอสารที่ฐานหอของการทดลองที่ 1 .....	42
4.9	การกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตเริ่มต้นของการทดลองที่ 2 .....	44
4.10	การกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตสุดท้ายของการทดลองที่ 2 .....	44
4.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Error กับ fuzzy partition matrix ของข้อมูลอินพุตของการทดลองที่ 2 .....	45
4.12	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของกลุ่มข้อมูลอินพุต Error ของการทดลองที่ 2 .....	45
4.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Delta-Error กับ fuzzy partition matrix ของข้อมูลอินพุตของการทดลองที่ 2 .....	46
4.14	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของกลุ่มข้อมูลอินพุต Delta-Error ของการทดลองที่ 2 .....	46
4.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $K_p$ กับ fuzzy partition matrix ของข้อมูลเอาต์พุตของการทดลองที่ 2 .....	47
4.16	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของกลุ่มข้อมูลเอาต์พุต $K'_p$ ของการทดลองที่ 2 .....	47
4.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $K_i$ กับ fuzzy partition matrix ของข้อมูลเอาต์พุตของการทดลองที่ 2 .....	48
4.18	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของกลุ่มข้อมูลเอาต์พุต $K'_i$ ของการทดลองที่ 2 .....	48
4.19	อุณหภูมิที่ยอดหอและอัตราการป้อนกลับสารที่ยอดหอของการทดลองที่ 2 .....	49
4.20	ค่าพารามิเตอร์ $K_p$ และ $K_i$ ของวงรอบยอดหอของการทดลองที่ 2 .....	49
4.21	อุณหภูมิที่ฐานหอและอัตราการป้อนไอสารที่ฐานหอของการทดลองที่ 2 .....	50
4.22	การกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตเริ่มต้นของการทดลองที่ 3 .....	52
4.23	การกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตสุดท้ายของการทดลองที่ 3 .....	52
4.24	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Error กับ fuzzy partition matrix ของข้อมูลอินพุตของการทดลองที่ 3 .....	53
4.25	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของกลุ่มข้อมูลอินพุต Error ของการทดลองที่ 3 .....	53
4.26	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Delta-Error กับ fuzzy partition matrix ของข้อมูลอินพุตของการทดลองที่ 3 .....	54
4.27	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของกลุ่มข้อมูลอินพุต Delta-Error ของการทดลองที่ 3 .....	54
4.28	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $K_p$ กับ fuzzy partition matrix ของข้อมูลเอาต์พุตของการทดลองที่ 3 .....	55

4.29	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของกลุ่มข้อมูลเอาต์พุต $K'_p$ ของการทดลองที่ 3	55
4.30	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $K_i$ กับ fuzzy partition matrix ของข้อมูลเอาต์พุตของการทดลองที่ 3	56
4.31	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของกลุ่มข้อมูลเอาต์พุต $K'_i$ ของการทดลองที่ 3	56
4.32	อุณหภูมิที่ฐานหอยและอัตราการป้อนไอสารที่ฐานหอยของการทดลองที่ 3	57
4.33	ค่าพารามิเตอร์ $K_p$ และ $K_i$ ของวงรอบฐานหอยของการทดลองที่ 3	57
4.34	อุณหภูมิที่ยอดหอยและอัตราการป้อนกลับสารที่ยอดหอยของการทดลองที่ 3	58
4.35	อุณหภูมิที่ยอดหอยและอัตราการป้อนกลับสารที่ยอดหอยของการทดลองที่ 4	60
4.36	ค่าพารามิเตอร์ $K_p$ และ $K_i$ ของวงรอบยอดหอยของการทดลองที่ 4	60
4.37	อุณหภูมิที่ฐานหอยและอัตราการป้อนไอสารที่ฐานหอยของการทดลองที่ 4	61
4.38	ค่าพารามิเตอร์ $K_p$ และ $K_i$ ของวงรอบฐานหอยของการทดลองที่ 4	61
5.1	แผนภาพการเชื่อมต่อDCSกับกระบวนการ 3 กระบวนการ	64
5.2	อัตราการไหลเข้าเป็นสัญญาณขั้นบันไดและสัญญาณไซน์ และการประมาณอัตราการไหลออก	70
5.3	ระดับของเหลว และอัตราการเปิด solenoid valve เมื่อการรบกวนเป็นสัญญาณขั้นบันไดและสัญญาณไซน์	70
5.4	อุณหภูมิขาออกและสัญญาณควบคุมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	71
5.5	การปรับค่าถ่วงน้ำหนักการเชื่อมต่อ $K_p, K_i$	71
5.6	อุณหภูมิที่ยอดหอยและอัตราการป้อนกลับสารที่ยอดหอย	72
5.7	ค่าพารามิเตอร์ $K_p$ และ $K_i$ ของวงรอบยอดหอย	72
5.8	อุณหภูมิที่ฐานหอยและอัตราการป้อนไอสารที่ฐานหอย	73
5.9	ค่าพารามิเตอร์ $K_p$ และ $K_i$ ของวงรอบฐานหอย	73
ง.1	ฟังก์ชันสามเหลี่ยมแสดงค่าความเป็นสมาชิกของเซตฟัซซี่ $E$	86
ง.2	การหาค่าต่ำสุดของกฎที่ (2, 3)	87
ง.3	ตัวอย่างการรวมกฎโดยวิธีcentroid	88
จ.1	การกระจายตัวของข้อมูล 2 มิติ	89
ฉ.1	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ $e(k)$ และ $\Delta e(k)$	94
ฉ.2	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ $K'_p$ และ $K'_i$	94
ฉ.3	ผลตอบต่อสัญญาณขั้นบันได	94
ช.1	หน้าต่าง HIS	96
ช.2	หน้าต่าง HEAT GRAPHIC	97
ช.3	หน้าต่าง TANK GRAPHIC	98

	หน้า
ช.4 หน้าต่าง DISTILL GRAPHIC .....	99
ช.5 หน้าต่าง THREE PLANTS TEST .....	100



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา

Distributed control systems (DCS) เป็นระบบที่มีใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมทั่วไป มีการเชื่อมต่อสัญญาณ (I/O interface) ที่ได้มาตรฐาน สะดวกต่อผู้ปฏิบัติงานในการเฝ้าสังเกต (Monitoring) และทำการควบคุมกระบวนการ (Operating) หน่วยประมวลผลของDCS (Field control station, FCS) แยกออกจากหน่วยแสดงผล (Human interface station, HIS) ทำให้DCSสามารถทำการควบคุมกระบวนการได้หลายกระบวนการในเวลาเดียวกัน โดยจำนวนกระบวนการขึ้นอยู่กับจำนวนกลุ่มฟังก์ชัน (Function block) และจำนวนการเชื่อมต่อของสัญญาณเข้าและสัญญาณออก การควบคุมที่มีใช้ในDCSเป็นเพียงการควบคุมพื้นฐาน เช่น การควบคุมแบบสัดส่วน อินทิกรัล และอนุพันธ์ (PID), ฟังก์ชันการทำงานแบบลำดับขั้น (Sequential function) เป็นต้น ฟังก์ชันการควบคุมพื้นฐานดังกล่าวเอื้อต่อการประยุกต์การควบคุมขั้นสูงซึ่งยังไม่แพร่หลายในอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจในการศึกษาเพื่อประยุกต์การควบคุมขั้นสูงโดยการดำเนินการผ่านDCSกับกระบวนการพื้นฐานที่ใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไป

วิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้กระบวนการพื้นฐานที่ใช้ในอุตสาหกรรมที่มีในห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม 3 กระบวนการที่แตกต่างกันโดยเลือกการควบคุมขั้นสูงที่เหมาะสมกับแต่ละกระบวนการในการทดสอบการดำเนินการผ่านDCS

1. ถังพัก เป็นกระบวนการที่พบได้ทั่วไปในอุตสาหกรรม วัตถุประสงค์ของการควบคุมคือรักษาระดับของเหลวในถังพักให้คงค่าที่ค่ากำหนด โดยพยายามให้อัตราการไหลออกของของเหลวมีความราบรื่นภายใต้การรบกวนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลเข้า ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้การควบคุมระดับแบบเฉลี่ย ซึ่งอาศัยการคำนวณหาค่าสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุดร่วมกับการทำนายสถานะของระบบในช่วงการควบคุม (Control horizon) [1]
2. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เป็นกระบวนการที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากมีการหน่วงเวลา (Transportation lag) ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอากาศร้อนไปยังเครื่องมือวัดที่อยู่อีกปลายด้านหนึ่งของท่อ วัตถุประสงค์ของการควบคุมคือ ควบคุมอุณหภูมิออกไว้ที่ค่ากำหนดและลดผลการรบกวนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณอากาศที่ไหลเข้าสู่กระบวนการ ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้การควบคุม PI แบบปรับอัตราขยายได้ [2]
3. หอกลิ้นแยกสารผสมสองชนิด เป็นกระบวนการแยกสารผสมสองชนิดออกจากกันโดยอาศัยความแตกต่างของความสามารถในการกลายเป็นไอของสาร สารที่มีจุดเดือดต่ำซึ่งเป็นสารที่มีความเข้มข้นสูงจะระเหยกลายเป็นไอเคลื่อนที่ขึ้นทางตอนบนของหอกลิ้น หอกลิ้นแยกสารผสมสองชนิดมีหลายสัญญาณเข้าและหลายสัญญาณออก มีความไม่เป็นเชิงเส้นและมีการกระทำระหว่างวงรอบ

การควบคุม วัตถุประสงค์ของการควบคุมคือควบคุมอุณหภูมิที่ยอดหอและฐานหอไว้ที่ค่ากำหนด เนื่องจากการรบกวนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนสารเข้ากลางหอ ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้การควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี โดยใช้การรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ในการกำหนดค่าความเป็นสมาชิกร่วมกับตารางค่าอัตราขยายฟัซซีในการกำหนดฐานกฎที่เหมาะสม [3]

## 1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

วิทยานิพนธ์นี้ใช้การควบคุมแบบขั้นสูงที่แตกต่างกัน 3 วิธีตามความเหมาะสมในการควบคุมแต่ละกระบวนการ เพื่ออำนวยความสะดวกแก่ผู้ปฏิบัติงานและมีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานจริง

### 1.2.1 การควบคุมระดับแบบเฉลี่ย

การควบคุมระดับแบบเฉลี่ย (Averaging level control) มีเป้าหมายหลักคือ การรักษาอัตราการไหลออกจากถัง (Outlet flow) ให้มีความราบรื่น (Smoothness) เพื่อป้อนเข้าสู่กระบวนการในลำดับถัดไป โดยที่ต้องคุมค่าระดับของเหลวในถังไม่ให้เกิดการล้นหรือลดลงต่ำกว่าขอบเขตที่กำหนดในขณะที่อัตราการไหลเข้า (Inlet flow) ซึ่งเป็นการรบกวนของระบบมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

เพื่อรักษาความราบรื่นของอัตราการไหลออกนี้ [4, 5] ได้พยายามลดค่าอัตราชนี่สมรรถนะ ซึ่งนิยามเป็นค่ามากที่สุดของอัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลออก (Maximum rate of change in the outlet flow) โดยคำนึงถึงเงื่อนไขขอบเขตสถานะสูงสุดและต่ำสุดของถัง [1] ได้เปลี่ยนไปใช้ตรรกชนี่สมรรถนะนิยามเป็นปริพันธ์กำลังสองของอัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลออกและตั้งปัญหาให้อยู่ในรูปของแคลคูลัสของการแปรผัน (Calculus of variation) โดยมีเงื่อนไขขอบเขตสถานะ [1] ยังได้แสดงให้เห็นถึงวิธีการนำเอาผลเฉลยของปัญหามาประยุกต์ใช้กับการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง (Model predictive control) อีกด้วย ทั้งนี้ [1, 4, 5] ใช้วิธีทำนายการรบกวนในรูปแบบสัญญาณขั้นบันได (Step signal) ดังนั้นเมื่ออัตราการไหลเข้าจริงแปรค่าอย่างซับซ้อนจะเกิดความคลาดเคลื่อนที่สภาวะอยู่ตัว (Steady state error) มากขึ้น ส่งผลให้สมรรถนะในการติดตามระดับด้อยลง ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอทางเลือกในการทำนายการรบกวนในรูปแบบสัญญาณลาด (Ramp signal) เพื่อปรับปรุงสมรรถนะในการติดตามระดับของเหลวในถัง และตั้งปัญหาแคลคูลัสของการแปรผันขึ้นใหม่โดยใช้ตรรกชนี่สมรรถนะและเทคนิควิธีการควบคุมจาก [1]

### 1.2.2 การควบคุม PI แบบปรับอัตราขยายได้

ตัวควบคุม PI เป็นการควบคุมที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม การปรับตั้งตัวควบคุมให้มีความคงทนตลอดช่วงการทำงานต่อความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ต้องพิจารณาถึงในการออกแบบตัวควบคุม การออกแบบระบบควบคุม PI แบบปรับอัตราขยายได้ถูกพัฒนาและนำไปใช้กับปรับค่าถ่วงน้ำหนักของการควบคุมแบบโครงข่ายประสาท (Neural network) [6, 7] และถูกนำไปใช้สำหรับการปรับตั้งตัวควบคุมแบบ PID [2, 8] การควบคุมโดยวิธีนี้เป็นที่น่าสนใจที่ว่า การปรับไม่จำเป็นต้องทราบข้อมูลของกระบวนการ ทั้งยังรับประกันเสถียรภาพหลังจากระบบลู่เข้าสู่จุดปรับตั้ง และ



สามารถส่อมค่าเริ่มต้นของการปรับได้

### 1.2.3 การควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี

กระบวนการกลั่นมีกระบวนการทำงานที่ซับซ้อน การทำงานในกระบวนการกลั่นบางส่วนไม่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย การดำเนินการต้องอาศัยผู้มีประสบการณ์และการตัดสินใจที่ดี ระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในการดำเนินการแทนผู้ปฏิบัติการ

ระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีใช้การสร้างแบบจำลองเชิงภาษา และนำหลักของการใช้เหตุผลในการตัดสินใจ การเป็นสมาชิกในเซตฟัซซี [9, 10] ระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีได้ถูกพัฒนาและประยุกต์ใช้ในทางอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย ข้อดีของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีคือ ไม่จำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบการควบคุม

การใช้การควบคุมPIDร่วมกับระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีได้ถูกพัฒนาขึ้นและใช้ได้ดีในทางอุตสาหกรรม วิธีการนำระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีไปใช้กับการควบคุมPIDมีอยู่หลายวิธี [11] เช่น วิธีขั้นตอนทางพันธุกรรมแบบลำดับขั้น (Hierarchical genetic algorithm) [12, 13], วิธีการรวมกลุ่มข้อมูลฟัซซี (Fuzzy clustering) [3] และการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซี (Fuzzy gain scheduling) [14] เป็นต้น วิทยานิพนธ์นี้ประยุกต์ใช้วิธีการรวมกลุ่มข้อมูลแบบฟัซซีซีมีน (Fuzzy c-means clustering) ร่วมกับการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI

ฟัซซีซีมีนเป็นวิธีรวมกลุ่มข้อมูลที่ได้จากการปฏิบัติงาน และกำหนดค่าระดับความเป็นสมาชิกของข้อมูลภายในเซตของฟัซซีได้อย่างเหมาะสม โดยวิธีนี้จะคำนวณค่าความเป็นสมาชิกออกมาในรูปของfuzzy partition matrix เมื่อทำการพล็อตเมทริกซ์ของแต่ละกลุ่มข้อมูลลงบนแกนตัวแปรแต่ละตัว จะเห็นถึงเซตของข้อมูลซึ่งง่ายเมื่อนำเซตของข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในการกำหนดฐานกฎฟัซซี การกำหนดฐานกฎฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI วิทยานิพนธ์นี้อาศัยตารางค่าอัตราขยายฟัซซีซึ่งสามารถสร้างกฎฟัซซี IF-THEN ที่เหมาะสมกับกระบวนการได้เป็นอย่างดี และใช้ร่วมกับการกำหนดขอบเขตของสัญญาณออกโดยวิธีscaling factor เพื่อลดความไม่แน่นอนของขอบเขตสัญญาณออก

### 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ประยุกต์ใช้การควบคุมระดับแบบเฉลี่ยในการควบคุมระดับของเหลวและอัตราการไหลออกของถังพัก ซึ่งถังพักเป็นของบริษัท Feedback รุ่น Procon38-901-M ทำการโปรแกรมเพื่อควบคุมผ่านกลุ่มฟังก์ชันของDCS วัตถุประสงค์ของการควบคุมคือ รักษากระดับของเหลวในถังพักที่ค่ากำหนดและอัตราการไหลออกยังมีความราบรื่น โดยที่ มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเข้าเป็นการรบกวน
2. ประยุกต์ใช้การควบคุม PI แบบปรับอัตราขยายได้ในการควบคุมอุณหภูมิออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งเป็นของบริษัท Feedback รุ่น PT326 ทำการโปรแกรมเพื่อควบคุมผ่านกลุ่มฟังก์ชันของDCS วัตถุประสงค์ของการควบคุมคือ ควบคุมอุณหภูมิออกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนไว้ที่ค่ากำหนดตลอดช่วงการทำงานและขจัดผลของการรบกวนที่เกิดจากการปรับผ่าน (Shutter) เมื่อเพิ่มหรือลดปริมาณอากาศที่เข้าสู่ระบบ

3. ประยุกต์ใช้การควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีโดยใช้การรวมกลุ่มข้อมูลแบบฟัซซีซีมีนร่วมกับตารางค่าอัตราขยายฟัซซีในการควบคุมอุณหภูมิที่ยอดหอและฐานหอของหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิดซึ่งเป็นของบริษัท Armfield รุ่น UOP3CC ทำการโปรแกรมเพื่อควบคุมผ่านกลุ่มฟังก์ชันของDCS วัตถุประสงค์ของการควบคุมคือ ควบคุมอุณหภูมิที่ยอดหอและฐานหอที่ค่ากำหนดโดยสามารถลดผลของการรบกวน ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงอัตราสารป้อนสารเข้าที่กลางหอโดยที่ความเข้มข้นของสารที่ป้อนเข้ากลางหอคงที่
4. ประยุกต์การควบคุมขั้นสูงในการควบคุมกระบวนการทั้ง 3 กระบวนการที่กล่าวมาแล้วพร้อมๆกัน และสร้างส่วนติดต่อกับผู้ใช้ เพื่อความสะดวกของผู้ปฏิบัติงานในการทดสอบการทำงานของDCS

#### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาและเรียนรู้ลักษณะทางกายภาพทั่วไปของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน ถังพัก และหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม
2. ศึกษาลักษณะและการทำงานของDCSที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม การเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างกระบวนการกับDCS และการโปรแกรมด้วยภาษาซีโบล
3. ศึกษาโครงสร้างและหลักการการทำงานของตัวควบคุม PI การแปลงโครงสร้างตัวควบคุม PI ให้อยู่ในรูปเวลาติสครีต (Discrete time) การโปรแกรมตัวควบคุม PI ลงบนDCS และปรับตั้งพารามิเตอร์สำหรับใช้ในการควบคุมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด
4. ศึกษาการควบคุมระดับแบบเฉลี่ย จำลองการทำงานของถังพักและการรบกวนในรูปแบบต่างๆกัน โดยใช้ตัวอย่างของถังพัก [1]
5. ศึกษาระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี หลักการและพื้นฐานของการรวมกลุ่มข้อมูลแบบฟัซซีซีมีน และการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI จากนั้นทำการจำลองการควบคุมโดยวิธีนี้กับฟังก์ชันถ่ายโอนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน [12]
6. ศึกษาการประยุกต์ใช้ตัวควบคุม PI แบบปรับอัตราขยายได้ในการควบคุมอุณหภูมิออกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม โดยโปรแกรมด้วยภาษาซีโบลลงบนกลุ่มฟังก์ชันของDCS และสร้างส่วนติดต่อกับผู้ใช้
7. ศึกษาการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยในการควบคุมระดับของเหลวและอัตราการไหลออกของถังพักที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม โดยโปรแกรมด้วยภาษาซีโบลลงบนกลุ่มฟังก์ชันของDCS และสร้างส่วนติดต่อกับผู้ใช้
8. ศึกษาการประยุกต์ใช้การควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีโดยใช้การรวมกลุ่มข้อมูลแบบฟัซซีซีมีนในการกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิก และใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีในการกำหนดฐานกฎที่เหมาะสม เพื่อใช้ควบคุมกระบวนการกลั่นของหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิดที่มีอยู่

ในห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม โดยโปรแกรมด้วยภาษาซีโบลลงบนกลุ่มฟังก์ชันของDCS และสร้างส่วนติดต่อกับผู้ใช้

9. ศึกษาการประยุกต์ใช้การควบคุมขั้นสูงกับการควบคุมกระบวนการทั้ง 3 กระบวนการที่กล่าวมาแล้วพร้อมๆกัน
10. สรุปและวิเคราะห์ผลของการออกแบบระบบควบคุม การประยุกต์ใช้ การดำเนินการ และความเป็นไปได้ในการใช้งานจริงในอุตสาหกรรม

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ความรู้พื้นฐานและการทำงานของDCS การเชื่อมต่อของกระบวนการกับDCS การสร้างส่วนติดต่อกับผู้ใช้ และการโปรแกรมด้วยภาษาซีโบล
2. ความรู้พื้นฐานและการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ถังพัก และหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด
3. ความรู้พื้นฐานของตัวควบคุม PI แบบปรับอัตราขยายได้และการประยุกต์ใช้งาน
4. ความรู้พื้นฐานการควบคุมระดับแบบเฉลี่ยและการประยุกต์ใช้งาน
5. ความรู้พื้นฐานของตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีและการประยุกต์ใช้งาน
6. ความรู้พื้นฐานของการสร้างตัวสังเกตแบบลดลำดับ
7. ความรู้พื้นฐานของการรวมกลุ่มข้อมูลด้วยฟัซซีซีมีน และการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI
8. ความรู้พื้นฐานของการสร้างสัญญาณpulse width modulate
9. ความเป็นไปได้ในการประยุกต์การควบคุมขั้นสูงโดยดำเนินการผ่านDCS

### 1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 อธิบายการควบคุมระดับแบบเฉลี่ยของถังพักและแสดงผลการจำลองการควบคุมถังพัก ในตอนถัดมาได้แสดงการควบคุมระดับในถังพักของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมโดยใช้การควบคุมระดับแบบเฉลี่ยโดยดำเนินการผ่านDCSและแสดงผลการควบคุม บทที่ 3 อธิบายการควบคุม PI แบบปรับอัตราขยายได้ โดยทฤษฎีadaptive interactionถูกนำมาใช้ในการปรับพารามิเตอร์  $K_p, K_i$  ของตัวควบคุม PI ตลอดจนแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิออกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมโดยใช้ตัวควบคุม PI แบบปรับอัตราขยายได้โดยดำเนินการผ่านDCS บทที่ 4 อธิบายการควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีโดยใช้การรวมกลุ่มข้อมูลแบบฟัซซีซีมีนร่วมกับตารางค่าอัตราขยายฟัซซี และแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิวงรอบยอดหอดและฐานหอดของหอ

กลั่นแยกสารผสมสองชนิดของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมโดยใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี่โดยดำเนินการผ่านDCS บทที่ 5 อธิบายการประยุกต์ใช้การควบคุมขั้นสูงทั้ง 3 วิธีในการควบคุมกระบวนการ 3 กระบวนการที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 3 และ 4 พร้อมๆกันโดยดำเนินการผ่านDCS และบทที่ 6 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

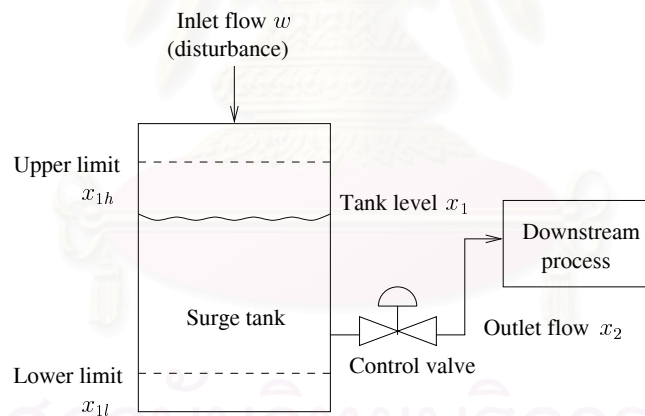
## บทที่ 2

### การควบคุมระดับในถังพัก

การควบคุมระดับแบบเฉื่อย เป็นการควบคุมขั้นสูงอย่างแรกที่ใช้ในการทดสอบการดำเนินการผ่านDCS ในวิทยานิพนธ์นี้ถังพักที่ใช้มีลักษณะหนึ่งสัญญาณเข้าหนึ่งสัญญาณออก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอย่างสุ่มของอัตราการไหลเข้าทำให้การควบคุมมีความซับซ้อนขึ้น ดังนั้นตัวควบคุมที่สามารถลดผลของการเปลี่ยนแปลงอย่างสุ่มของอัตราการไหลเข้าเพื่อให้ระดับในถังพักอยู่ที่ค่ากำหนดและทำให้อัตราการไหลออกราบรื่นเป็นสิ่งที่น่าสนใจ การศึกษาเริ่มจากการจำลองการควบคุมระดับแบบเฉื่อยของถังพัก และศึกษาการประยุกต์ใช้งานจริงกับถังพักของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม โดยวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในการประยุกต์การควบคุม การแก้ไขปัญหา และผลการควบคุมที่ได้

#### 2.1 การควบคุมระดับแบบเฉื่อยของถังพัก

##### 2.1.1 แบบจำลองถังพัก



รูปที่ 2.1: ถังพัก

แบบจำลองถังพัก [1] ที่ใช้ในการควบคุมระดับแบบเฉื่อยแสดงดังรูปที่ 2.1 การรบกวนระบบคืออัตราการไหลเข้า  $w(t)$  ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างสุ่มตลอดเวลา ถังพักทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับการเปลี่ยนแปลงของการรบกวน โดยใช้วาล์วปรับอัตราการไหลออก  $x_2(t)$  ให้เปลี่ยนแปลงอย่างราบรื่นในขณะเดียวกันก็รักษาระดับน้ำในถังพัก  $x_1(t)$  ให้เปลี่ยนแปลงไม่เกินกว่าขอบเขตสูงสุด  $x_{1h}$  และไม่น้อยกว่าขอบเขตต่ำสุด  $x_{1l}$  ในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ความราบรื่นสามารถวัดได้จากอัตราการแปรค่าของ  $x_2(t)$  ดังนั้นอนุพันธ์  $\dot{x}_2(t)$  จึงต้องถูกพิจารณาในจุดประสงค์การควบคุม ในที่นี้นิยามให้  $u(t) = \dot{x}_2(t)$  จากสมการสมดุล

ทางวัสดุ (Material balance) ได้ว่าสมการสถานะ (State equation) ที่ใช้แทนระบบคือ

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= A^{-1}(w(t) - x_2(t)) \\ \dot{x}_2(t) &= u(t) \end{aligned} \quad (2.1)$$

เมื่อตัวแปรต่างๆ เป็นดังนี้

- $x_1(t)$  คือ ระดับความสูงของของเหลวในถัง
- $x_2(t)$  คือ อัตราการไหลออก
- $u(t)$  คือ สัญญาณควบคุม
- $w(t)$  คือ อัตราการไหลเข้า (การรบกวนระบบ)
- $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของถังพัก

ระดับของเหลวที่ทำการควบคุมต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตสถานะของระดับของเหลว  $x_1(t)$  ดังนี้

$$x_{1l} \leq x_1(\tau) \leq x_{1h}, \quad t \leq \tau \leq t + t_f \quad (2.2)$$

เมื่อสถานะที่จุดปลาย (Terminal condition) ของ  $x_1(t)$  คือ

$$\begin{aligned} x_1(t + t_f) &= x_{1r} \\ x_2(t + t_f) &= w(t + t_f) \end{aligned} \quad (2.3)$$

โดยที่  $x_{1r}$  คือค่ากำหนด (Set point) ซึ่งต้องการให้ระดับของเหลวเข้าสู่ค่านี้ ในวิทยานิพนธ์นี้ไม่พิจารณาเงื่อนไขขอบเขตสถานะของ  $x_2(t)$  และ  $u(t)$

สำหรับการทำนายการรบกวนระบบในช่วงการควบคุมใดๆ  $w(\tau)$  ถูกจำลองให้อยู่ในรูปสมการลาด (Ramp equation) ดังนี้

$$w(\tau) = m \cdot (\tau - t) + w(t), \quad t < \tau < t + t_f \quad (2.4)$$

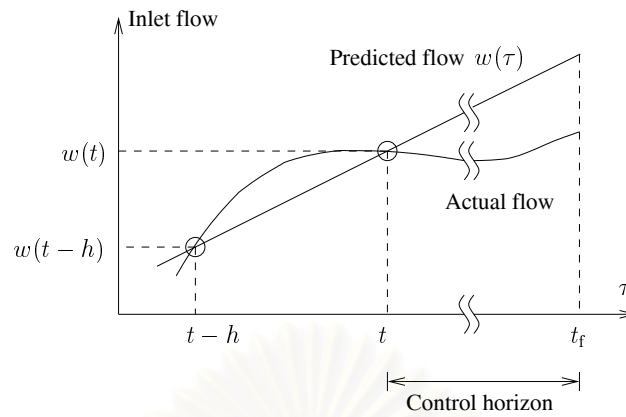
เมื่อ  $m = [w(t) - w(t - h)]/h$  เป็นความชันของสัญญาณลาด  $w(t)$  คือค่าการรบกวนที่วัดได้ ณ เวลาสุ่มปัจจุบัน และ  $w(t - h)$  คือค่าการรบกวนที่วัดได้เมื่อระยะเวลาการสุ่มก่อนหน้า การทำนายการรบกวนแบบลาดนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.2

### 2.1.2 การคำนวณหาสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุด

วัตถุประสงค์ของการควบคุมคือ ให้เกิดความราบรื่นที่สุดของอัตราการไหลออกเท่าที่เป็นไปได้ ในที่นี้ตรรกะนี้สมรรถนะที่ต้องการลดค่า ต้องสามารถแทนปริมาณความผันผวนของ  $x_2(t)$  หรืออีกนัยหนึ่งคือขนาดของ  $u(t)$  ดังนั้นพิจารณาตรรกะนี้สมรรถนะในรูป

$$J = \int_t^{t+t_f} \frac{1}{2} u^2(\tau) d\tau \quad (2.5)$$

เมื่อขอบเขตการหาค่าปริพันธ์คือช่วงการควบคุม (Control horizon) ที่ใช้ในการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่ระยะเวลา  $t$  ใดๆ ที่พิจารณา ถึงเวลา  $t + t_f$  สำหรับการคำนวณหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแยกเป็นสองกรณีคือ เมื่อมีเงื่อนไขขอบเขตสถานะและเมื่อไม่มีขอบเขตสถานะ



รูปที่ 2.2: การทำนายการรบกวนระบบ  $w(\tau)$  โดยใช้สมการลาด

### 2.1.2.1 การคำนวณแบบไม่มีเงื่อนไขขอบเขตสถานะ

เนื่องจากระบบดังกล่าวไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Time invariant system) จึงพิจารณาให้  $t = 0$  ได้ ช่วงการควบคุมในกรณีนี้คือ  $0 < \tau < t_f$  จากสมการ (2.5) และ (2.1) แนวทางการวิเคราะห์ด้วยวิธีแคลคูลัสของการแปรผันในงานวิจัยนี้ยึดหลักตาม [15] ซึ่งเป็นแนวทางมาตรฐาน สมการแฮมิลโทเนียน (Hamiltonian equation) ของปัญหาการควบคุมที่เหมาะสมที่สุดเป็นสมการ (2.6)

$$\mathcal{H} = \frac{1}{2}u^2(\tau) + p_1(\tau)(A^{-1}(w(\tau) - x_2(\tau))) + p_2(\tau)u(\tau) \quad (2.6)$$

เมื่อ  $p_1(\tau)$  และ  $p_2(\tau)$  เป็นสถานะร่วม (Costate) เงื่อนไขจำเป็น (Necessary condition) ของปัญหาคือ

$$\dot{p}_1^*(\tau) = 0 \quad (2.7)$$

$$\dot{p}_2^*(\tau) = p_1^*(\tau)A^{-1} \quad (2.8)$$

$$0 = u^*(\tau) + p_2^*(\tau) \quad (2.9)$$

จากนั้นหาปริพันธ์ของสมการ (2.7) จะได้ว่า  $p_1^*(\tau)$  เป็นค่าคงที่ เพื่อความกระชับของผลลัพธ์ กำหนดให้ค่าคงที่นี้อยู่ในรูป  $\alpha A$  เมื่อ  $\alpha$  เป็นค่าคงที่ซึ่งต้องคำนวณหา จากนั้นหาปริพันธ์ของ (2.8) ในช่วงเวลา  $0 \leq \tau \leq t$  และแทนค่า  $p_2^*(\tau)$  ใน (2.9) พบว่า

$$p_2^*(\tau) = \alpha\tau + \beta \quad (2.10)$$

$$u^*(\tau) = -\alpha\tau - \beta \quad (2.11)$$

เมื่อ  $\beta$  เป็นค่าคงตัวการปริพันธ์ ที่ต้องการคำนวณหา จากนั้นแทนค่า  $u^*(\tau)$  จาก (2.11) และ  $w(\tau)$  จาก (2.4) ลงใน (2.1) ตามลำดับ หาค่าปริพันธ์ในช่วงเวลา  $0 \leq \tau \leq t_f$  เมื่อสถานะเริ่มต้นของระบบ  $x(0) = x_0 = [x_{10}, x_{20}]^T$  ซึ่งสามารถวัดได้ และสถานะที่จุดปลาย  $\tau = t_f$  ที่ต้องการ เป็นไปตามสมการ

(2.3) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{-12}{t_f^3} [A(x_{1r} - x_{10}) - \frac{t_f}{2}(w_0 - x_{20})] \\ \beta &= \frac{6}{t_f^2} A(x_{1r} - x_{10}) - \frac{4}{t_f}(w_0 - x_{20}) - m\end{aligned}$$

### 2.1.2.2 การคำนวณแบบมีเงื่อนไขขอบเขตสถานะ

จากสมการ (2.1) และ (2.11) ได้ว่า  $x_2^*(\tau) = x_{20} - \beta\tau - \frac{1}{2}\alpha\tau^2$  ทำให้  $x_1^*(\tau)$  เป็นฟังก์ชันพหุนามกำลังสาม (Cubic function) ซึ่งมีจุดสุดขีด (Extremum) ได้มากที่สุดสองจุด จุดสุดขีดจุดแรกนั้นอยู่ที่  $\tau = t_f$  เพราะว่า  $w(t_f) - x_2(t_f) = 0$  ทำให้  $\dot{x}_1(t_f) = 0$  ณ จุดนี้ ถ้าจุดสุดขีดที่สองไม่อยู่ในช่วงการควบคุม  $0 < \tau < t_f$  ผลเฉลยของการควบคุมที่เหมาะสมที่สุด จะเป็นดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 2.1.2.1 แต่หากจุดสุดขีดทั้งสองอยู่ในช่วงการควบคุม ค่าสุดขีดต้องสอดคล้องเงื่อนไข (2.2) กำหนดให้จุดสุดขีดอีกจุดอยู่ที่  $\tau = t_p$  โดยที่  $0 < t_p < t_f$  และกำหนด  $x_1(t_p) = x_{1L}$  เมื่อ  $x_{1L}$  แทน  $x_{1h}$  หรือ  $x_{1l}$  แล้วแต่กรณี จากนั้นกำหนดให้  $x_2(t_p) = w(t_p)$  ที่กำหนดเช่นนี้เพราะถ้า  $x_2(t_p) < w(t_p)$  แล้ว  $dx_1(\tau)/d\tau|_{\tau=t_p} > 0$  ทำให้  $x_1(\tau) > x_{1L}$ , ( $x_{1L} = x_{1h}$ ) ทุกๆ เวลา  $t_p < \tau < t_p + \varepsilon$  เมื่อ  $\varepsilon > 0$  และถ้า  $x_2(t_p) > w(t_p)$  แล้ว  $dx_1(\tau)/d\tau|_{\tau=t_p} < 0$  ทำให้  $x_1(\tau) > x_{1L}$ , ( $x_{1L} = x_{1h}$ ) ทุกๆ เวลา  $t_p - \varepsilon < \tau < t_p$ ,  $\varepsilon > 0$  สรุปได้ว่าที่จุดสุดขีดอีกจุดอยู่ที่เวลา  $\tau = t_p$  ผลเฉลยของสมการสถานะร่วมถูกแบ่งเป็นสองช่วงดังนี้

$$\begin{aligned}p_1^*(\tau) &= \begin{cases} \alpha_1, & 0 \leq \tau \leq t_p \\ \alpha_2, & t_p \leq \tau \leq t_f \end{cases} \\ p_2^*(\tau) &= \begin{cases} \alpha_1\tau + \beta_1, & 0 \leq \tau \leq t_p \\ \alpha_2\tau + \beta_2, & t_p \leq \tau \leq t_f \end{cases}\end{aligned}\quad (2.12)$$

จากสมการ (2.12) สามารถหาค่า  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1$  และ  $\beta_2$  ได้จากการแทนค่าสถานะของสถานะ  $x(t_p)$  และ  $x(t_f)$  และหาค่า  $t_p$  จากความต่อเนื่องที่เวลา  $\tau = t_p$  ของสมการสถานะร่วม  $p_2^*(t)$  ในที่สุดแล้วผลเฉลยของ  $t_p$  สามารถคำนวณได้จากการแก้สมการพหุนามกำลังสาม

$$\begin{aligned}(w_0 - x_{20})t_p^3 + [-3A(x_{1r} - x_{10}) - 2(w_0 - x_{20})t_f]t_p^2 \\ + [6A(x_{1L} - x_{10})t_f + (w_0 - x_{20})t_f^2]t_p - 3A(x_{1L} - x_{10})t_f^2 = 0\end{aligned}\quad (2.13)$$

โดยที่สมการของ  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1$  และ  $\beta_2$  เป็นดังนี้

$$\alpha_1 = \frac{-12}{t_p^3} [A(x_{1L} - x_{10}) - \frac{t_p}{2}(w_0 - x_{20})] \quad (2.14)$$

$$\beta_1 = \frac{6}{t_p^2} A(x_{1L} - x_{10}) - \frac{4}{t_p}(w_0 - x_{20}) - m \quad (2.15)$$

$$\alpha_2 = \frac{-12}{(t_f - t_p)^3} A(x_{1r} - x_{1L}) \quad (2.16)$$

$$\beta_2 = \frac{6}{(t_f - t_p)^3} A(x_{1r} - x_{1L})(t_f + t_p) - m \quad (2.17)$$

ใช้วิธีการวนซ้ำของนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson method) [16] มาหาผลเฉลยของสมการ (2.13) เพื่อคำนวณค่า  $t_p$  หนึ่ง ในทางปฏิบัติการหาค่า  $t_p$  ในแต่ละช่วงการควบคุม สามารถเร่งให้เร็วขึ้นได้ โดย



การเลือกค่าเริ่มต้นในการวนซ้ำที่เหมาะสม ซึ่งอธิบายได้ดังต่อไปนี้ ในช่วง  $0 < \tau < t_p$ ,  $x_1(\tau)$  ไม่มีทางเกินเงื่อนไขขอบเขตสถานะ แต่ที่เวลา  $t_p$ , พบว่า  $x_2(t_p) = w(t_p)$  ดังนั้น  $t_p$  จึงเป็นรากของสมการ  $x_2^*(\tau) = x_{20} - \beta_1\tau - \frac{1}{2}\alpha_1\tau^2$  สมมติรากอีกรากหนึ่งของสมการ  $x_2^*(t)$  คือ  $\tau = t_r$  โดย  $x_2^*(t_r) = w(t_r)$  และแทนค่า  $\alpha_1, \beta_1$  จากสมการ (2.14, 2.15) จะได้

$$t_r = \frac{-t_p^2}{6 \frac{A(x_{1L} - x_{10})}{(w_0 - x_{20})} - \frac{t_p}{2}} \quad (2.18)$$

เนื่องจาก  $t_r$  ต้องมีค่าอยู่ในช่วง  $t_r < 0$  หรือ  $t_r > t_p$  ดังนั้น

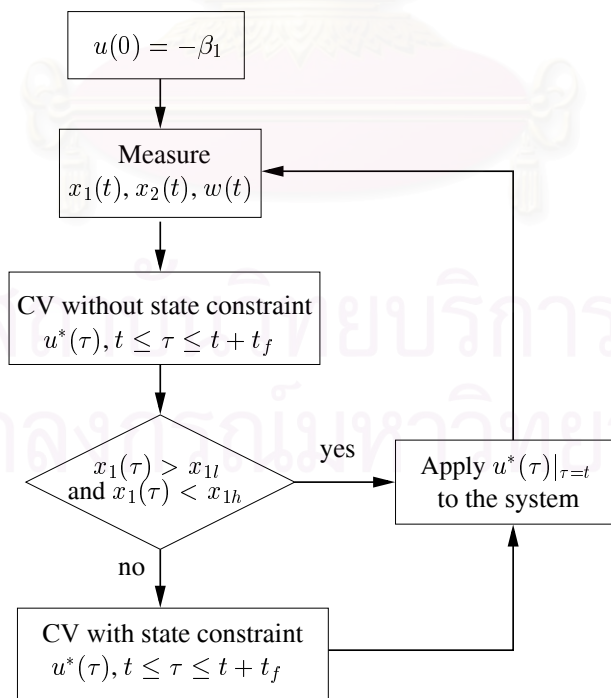
$$0 < t_p < \frac{3A(x_{1L} - x_{10})}{(w_0 - x_{20})} \quad (2.19)$$

ค่าเริ่มต้นที่ดีในการวนซ้ำเพื่อคำนวณ  $t_p$  จึงเป็นดังนี้

$$t_p = \frac{kA(x_{1L} - x_{10})}{(w_0 - x_{20})}, \quad 0 < k < 3 \quad (2.20)$$

### 2.1.3 การนำสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุดมาใช้ในการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง

ในการนำสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุดไปใช้ กำหนดให้คาบการซิกตัวอย่าง (Sampling period) แทนด้วย  $h$  ณ ขณะเวลาซิกตัวอย่าง  $t$  พิจารณาช่วงการควบคุม  $[t, t_f]$  ในกรอบงานของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองโดยพิจารณารูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3: แผนภาพขั้นตอนการประยุกต์ใช้สัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุดกับแบบจำลองถึงพัก

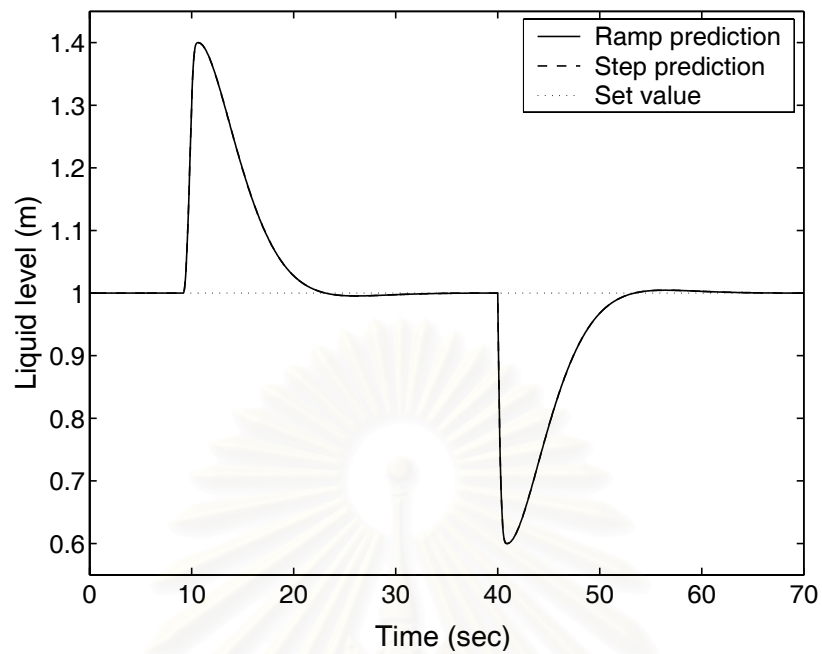
ทำการทดลองโดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบตาม [1, 4] กล่าวคือ  $A = 1$  เมตร,  $x_{1h} = 1.4$  เมตร,  $x_{1l} = 0.6$  เมตร,  $x_{1r} = 1$  เมตร และเมื่อสถานะเริ่มต้นของตัวแปรสถานะคือ  $x_1(0) = 1$  เมตร และ  $x_2(0) = 1$  ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที การรบกวน  $w(t)$  มีค่าไม่เกิน 2 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีและเวลาในการชັกตัวอย่าง  $h = 0.05$  วินาที ตาม [1] ช่วงการควบคุม  $t_f = 7$  วินาที สถานะเริ่มต้นของสัญญาณควบคุมกำหนดให้เป็น  $u(0) = -\beta_1$  เพื่อป้องกันการเกินเงื่อนไขขอบเขตสถานะของ  $x_1(t)$  ในการทดลองนี้เปรียบเทียบผลการคำนวณสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้การทำนายการรบกวนแบบลาด กับการทำนายการรบกวนแบบขั้นบันได [1] การรบกวนที่เลือกใช้มีสามประเภทคือ สัญญาณขั้นบันได สัญญาณสุ่ม และสัญญาณไซน์ (ความถี่ 0.04 และ ขนาดเท่ากับ 0.2 เมตร) ผลการจำลองระบบควบคุมแสดงดังรูปที่ 2.4 ถึง 2.9 ระหว่างการจำลองผล บันทึกค่าสัญญาณควบคุม  $u(t)$  และค่าอนุพันธ์อันดับสองของ  $J$  ในแต่ละกรณีของการรบกวน ซึ่งได้แสดงไว้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1: ตรีชนีสมรรถนะ ของการควบคุมระดับแบบเฉลี่ยที่เหมาะสมที่สุดเชิงทำนายแบบจำลอง ที่ใช้การทำนายการรบกวนแบบขั้นบันไดและแบบลาด เมื่อการรบกวนที่เข้าสู่ระบบมีรูปแบบต่าง ๆ

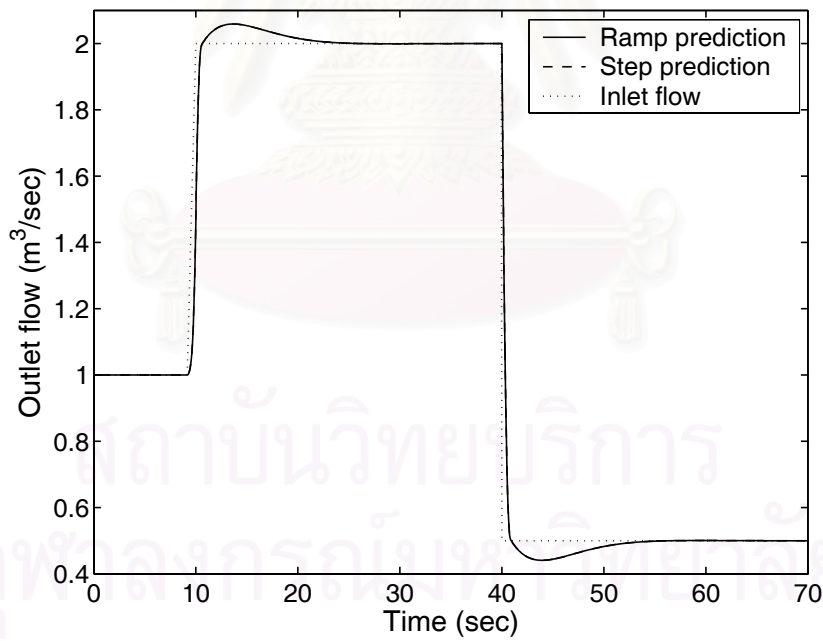
การรบกวน	สัญญาณขั้นบันได	สัญญาณสุ่ม	สัญญาณไซน์
การทำนายแบบขั้นบันได	4.9156	0.5089	0.3293
การทำนายแบบลาด	4.9156	0.4996	0.2966

จากตารางที่ 2.1 ในกรณีที่การรบกวนเป็นสัญญาณขั้นบันได จะเห็นว่า การควบคุมซึ่งใช้การทำนายการรบกวนแบบลาด มีสมรรถนะเดียวกันกับการควบคุม [1] ซึ่งใช้การทำนายแบบขั้นบันได สำหรับกรณีการรบกวนเป็นสัญญาณสุ่ม และสัญญาณไซน์ ระบบควบคุมซึ่งใช้การทำนายการรบกวนแบบลาด มีการติดตามระดับของเหลวที่ดีกว่า และค่าตรีชนีสมรรถนะที่คำนวณได้ยังต่ำกว่าการควบคุมโดยใช้การทำนายการรบกวนแบบขั้นบันได

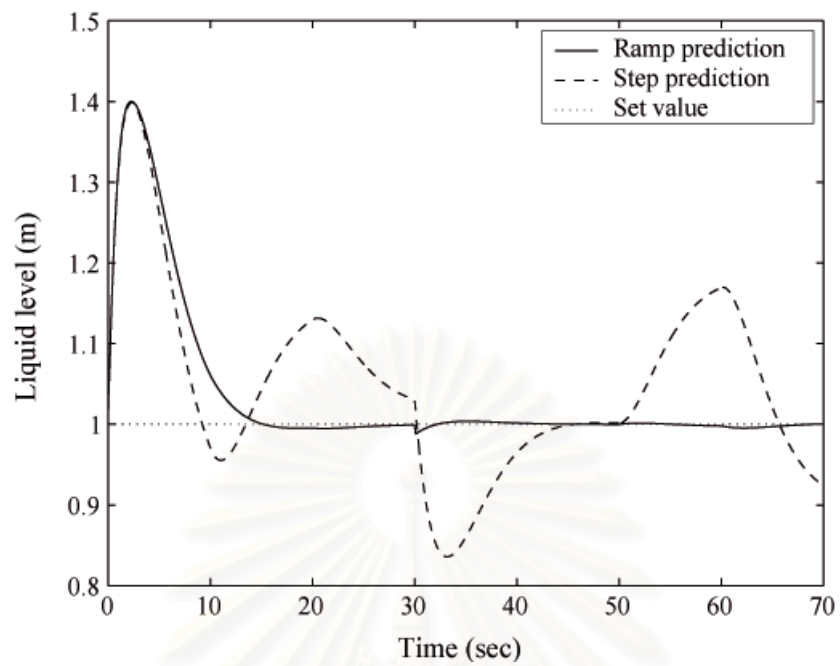
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



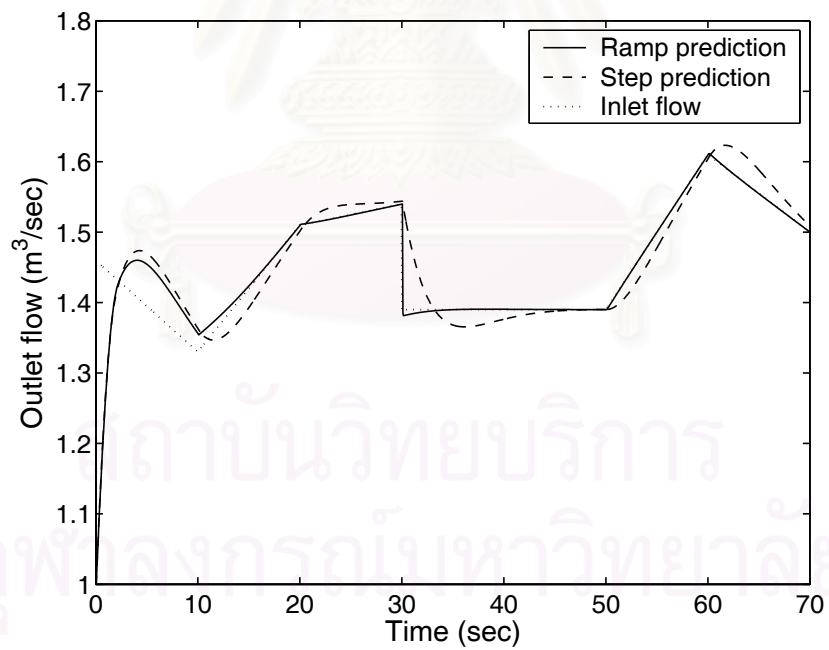
รูปที่ 2.4: ผลตอบของระดับของเหลวในถัง  $x_1(t)$  เมื่อการรบกวนเป็นสัญญาณขั้นบันได



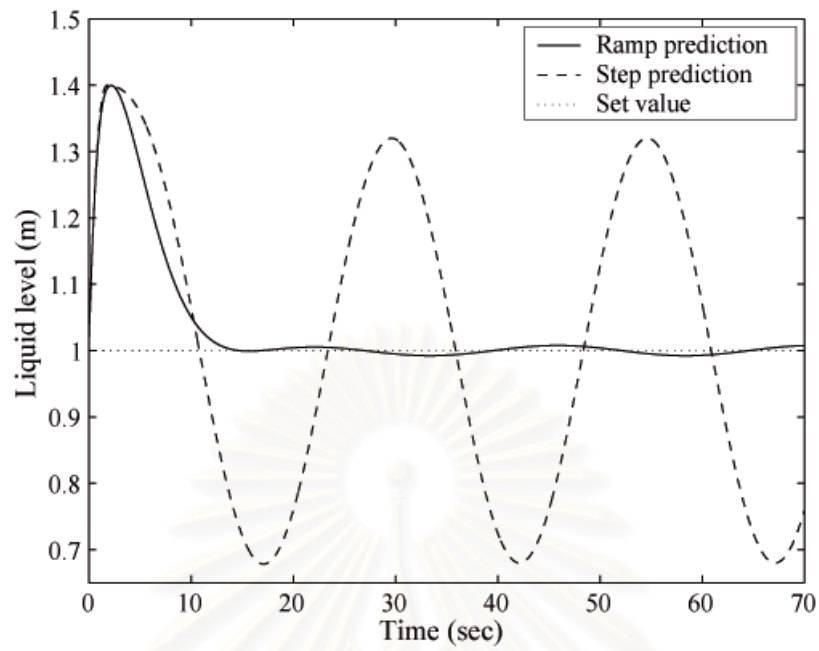
รูปที่ 2.5: ผลตอบของอัตราการไหลออก  $x_2(t)$  เมื่อการรบกวนเป็นสัญญาณขั้นบันได



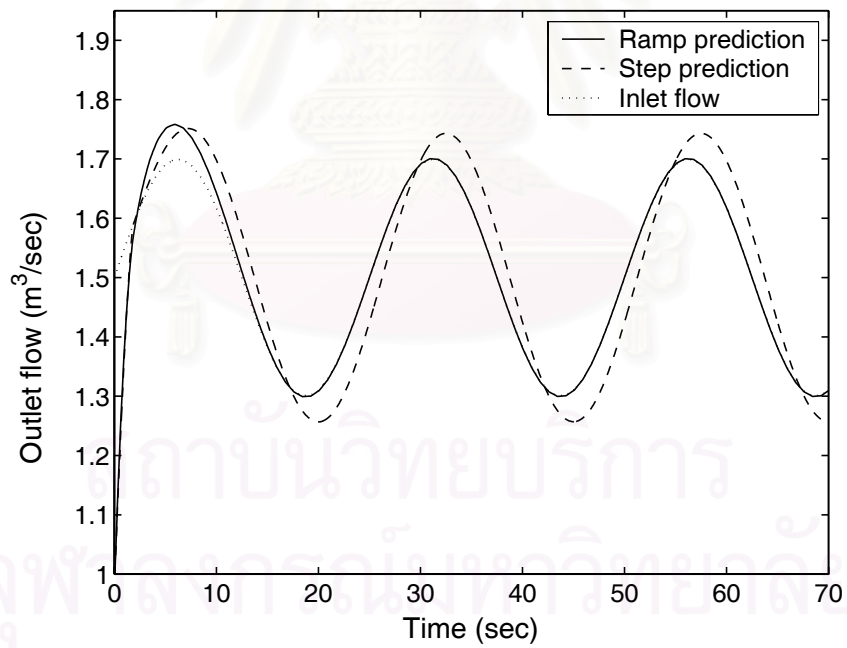
รูปที่ 2.6: ผลตอบของระดับของเหลวในถัง  $x_1(t)$  เมื่อการรบกวนเป็นสัญญาณสุ่ม



รูปที่ 2.7: ผลตอบของอัตราการไหลออก  $x_2(t)$  เมื่อการรบกวนเป็นสัญญาณสุ่ม



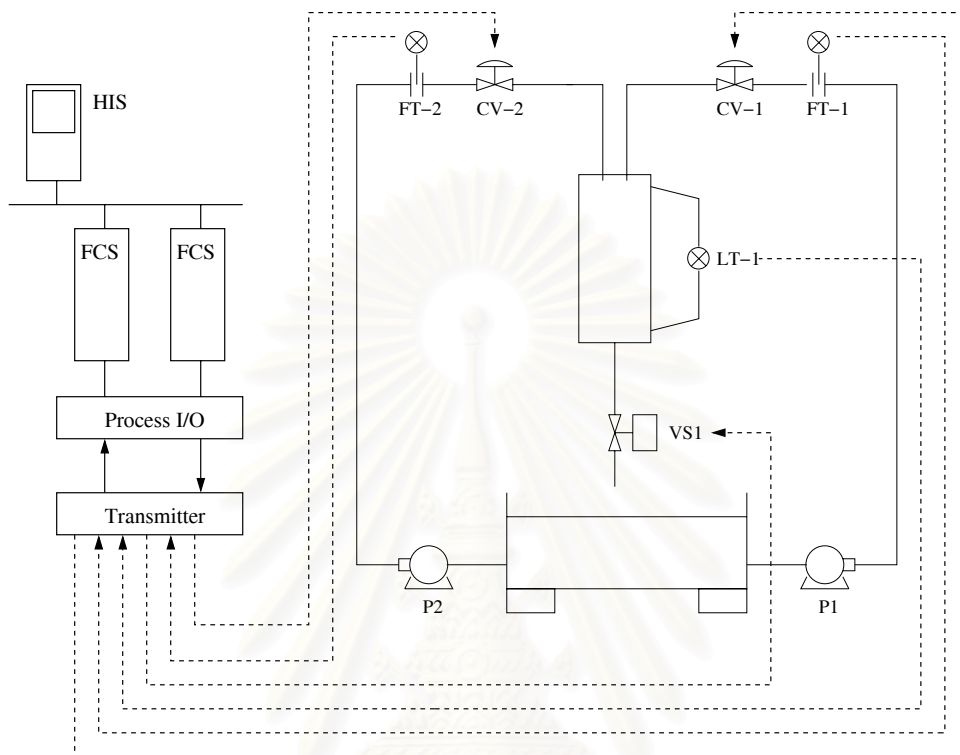
รูปที่ 2.8: ผลตอบของระดับของเหลวในถัง  $x_1(t)$  เมื่อการรบกวนเป็นสัญญาณไซน์



รูปที่ 2.9: ผลตอบของอัตราการไหลออก  $x_2(t)$  เมื่อการรบกวนเป็นสัญญาณไซน์

## 2.2 การควบคุมระดับในถังพักโดยดำเนินการผ่านDCS

### 2.2.1 โครงสร้างและการทำงานของถังพัก



รูปที่ 2.10: การเชื่อมต่อระหว่างDCSกับถังพัก

ถังพักของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมเป็นของบริษัท Yokogawa มีลักษณะเป็นถังพักคู่เชื่อมต่อกันโดยมี manual valve (VC) สำหรับตัดแยกถังทั้งสอง วิทยานิพนธ์นี้พิจารณาถังพักเดี่ยว ดังนั้นทำการปิด manual valve (VC) และพิจารณาถังพักใบที่หนึ่งเป็นหลัก ของเหลวถูกสูบเข้าทางด้านบนของถังพักโดยอาศัยปั๊ม (P1 และ P2) อัตราการไหลเข้าของของเหลวสู่ถังพักสามารถวัดได้โดยใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบออริฟิส (Orifice flow meter, FT-1 และ FT-2) อัตราไหลเข้าถูกสร้างเป็นสัญญาณรบกวนของถังพักโดยใช้วาล์วควบคุม (CV-1 และ CV-2) ระดับของเหลวภายในถังพักสามารถวัดได้โดยใช้การวัดความดันต่าง (Differential pressure, LT1) ทางด้านล่างของถังพักใบที่หนึ่งมี solenoid valve (VS1) สำหรับควบคุมการปล่อยของเหลวออกจากถัง การเชื่อมต่อระหว่างDCSกับถังพักแสดงดังรูปที่ 2.10

### 2.2.2 ตัวสังเกต (Observer) สำหรับการควบคุมระดับแบบเฉลี่ย

ถังพักมีเครื่องมือวัดระดับและเครื่องมือวัดอัตราการไหลของของเหลวทางขาเข้า แต่ไม่มีเครื่องมือวัดอัตราการไหลของของเหลวทางขาออก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ตัวสังเกตในการประมาณอัตราการไหลออกซึ่งเป็นตัวแปรที่จำเป็นในการคำนวณหาสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากการโปรแกรมลงบนDCSอยู่ในรูปเวลาติสคริต ดังนั้นการออกแบบตัวสังเกตต้องทำการแปลงสมการสถานะเวลาต่อ

เนื่อง (2.1) ให้อยู่ในรูปสมการสถานะเวลา discrete ดังสมการที่ (2.21) ทั้งนี้สมการ (2.1) ต้องสามารถสังเกตได้ (Observable)

$$X(k+1) = \Phi X(k) + \Gamma U(k) \quad (2.21)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & -A^{-1}h \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}A^{-1}h^2 & -A^{-1}h \\ h & 0 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

โดยที่  $X(k+1) = [x_1(k+1) \ x_2(k+1)]^T$ ,  $U(k) = [u(k) \ w(k)]^T$  และ  $h$  เป็นเวลาในการชักตัวอย่าง ใช้การออกแบบตัวสังเกตแบบลดอันดับ (Reduced-order observer) [17] เพื่อประมาณอัตราการไหลออก  $\hat{x}_2(t)$  แสดงดังสมการ (2.24)

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1(k) \\ \hat{x}_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - k_1 & -A^{-1}h(1 - k_1) \\ -k_2 & A^{-1}hk_2 + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1(k-1) \\ \hat{x}_2(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}A^{-1}h^2(1 - k_1) & A^{-1}h(1 - k_1) \\ \frac{1}{2}A^{-1}h^2k_2 + h & -A^{-1}hk_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u(k-1) \\ w(k-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} y(k) \quad (2.24)$$

โดยอัตราขยายของตัวสังเกต (Observer gain)  $K = [k_1 \ k_2]^T$  และ  $y(k) = x_1(k)$  เนื่องจากสามารถวัดระดับของของเหลว  $x_1(k)$  ได้ ดังนั้นกำหนดให้  $k_1 = 1$  หรือวางโพลตัวแรกไว้ที่ศูนย์ ( $\mu_1 = 0$ ) และ  $k_2$  คำนวณจากรากของ  $|zI - (\Phi - KC\Phi)|$  มีขนาดน้อยกว่า 1 นั่นคือโพลตัวที่สอง ( $\mu_2$ ) อยู่ในวงกลมหนึ่งหน่วย ดังนั้นสมการ (2.24) สามารถเขียนเป็น

$$\hat{x}_1(k) = y(k) \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned} \hat{x}_2(k) &= \hat{x}_2(k-1) + A^{-1}hk_2(\hat{x}_2(k-1) - w(k-1)) \\ &\quad + \left(\frac{1}{2}A^{-1}h^2k_2 + h\right)u(k-1) + k_2(y(k) - \hat{x}_1(k-1)) \end{aligned} \quad (2.26)$$

$$\mu_2 = A^{-1}hk_2 + 1 \quad (2.27)$$

### 2.2.3 การนำสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุดไปใช้กับ solenoid valve

เนื่องจากสัญญาณควบคุมในสมการ (2.11) คือความเร่งของอัตราการไหลออก ดังนั้นทำการแปลงสัญญาณควบคุมดังกล่าวให้อยู่ในรูปอัตราการไหลออกแสดงดังสมการ (2.28)

$$x_2(k) = \hat{x}_2(k) + hu(k) \quad (2.28)$$

วาล์วทางขาออกจากถังพักเป็น solenoid valve จำเป็นต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลออกกับเปอร์เซ็นต์ของ PWM (Pulse width modulator) โดยพิจารณากระดับของของเหลวที่จุดสมดุล 0.5 เมตร และปรับอัตราการเปิด-ปิด solenoid valve ให้สัมพันธ์กับอัตราการไหลเข้าซึ่งได้ข้อมูลดังตารางที่ 2.2

ที่จุดสมดุลอัตราการไหลเข้ามีค่าเท่ากับอัตราการไหลออก จากตารางที่ 2.2 สามารถหาความสัมพันธ์ของอัตราการเปิด-ปิด solenoid valve กับอัตราการไหลออกที่จุดสมดุล 0.5 เมตร ได้ดัง

สมการ (2.29)  $x_2(k)$  ในสมการดังกล่าวต้องมีหน่วยเป็นลิตรต่อนาที

$$\%PWM = -0.00977146 x_2^2(k) + 8.51348572 x_2(k) - 2.63208265 \quad (2.29)$$

ตารางที่ 2.2: อัตราการเปิด-ปิด solenoid valve กับอัตราการไหลเข้าที่จุดสมมูล 0.5 เมตร

%PWM (คาบของPWM = 10 วินาที)	อัตราการไหลเข้า (ลิตรต่อนาที)
90	11.02
80	9.79
70	8.58
60	7.41
50	6.22
40	5.04
30	3.85

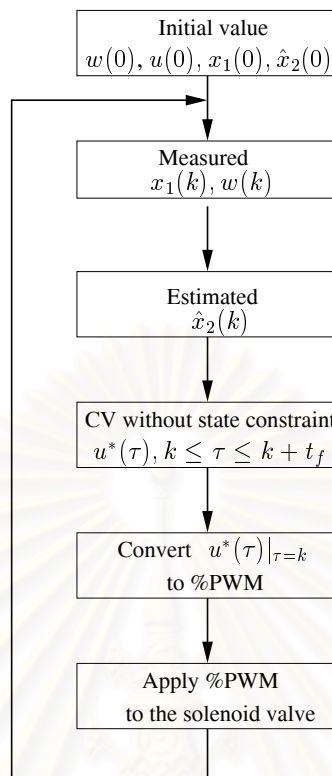
#### 2.2.4 การควบคุมระดับในถังพักโดยใช้การควบคุมระดับแบบเฉลี่ย

ในการนำตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยมาใช้กับฟังก์ชันของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม ใช้การทำนายการรบกวนแบบขั้นบันไดและใช้การคำนวณแบบไม่มีเงื่อนไขขอบเขตสถานะ ที่เป็นเช่นนี้เพราะการนำตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยไปใช้งานจริง การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเข้าถูกจำกัดด้วยขนาดท่อและขนาดวาล์วควบคุม ดังนั้นการทำนายการรบกวนแบบขั้นบันไดจึงเพียงพอและไม่ทำให้ระดับของเหลวเกินเงื่อนไขขอบเขตสถานะ ทั้งนี้ไม่พิจารณากรอบงานของการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง แผนภาพการนำตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยมาใช้กับถังพักแสดงดังรูปที่ 2.11

สำหรับวัตถุประสงค์ของการนำตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยเหมาะสมที่สุดมาใช้กับถังพักคือ การรักษากระดับของเหลวไว้ที่ค่ากำหนด 0.5 เมตร เมื่อมีการรบกวนเป็นอัตราการไหลเข้าหลายๆ รูปแบบ ดังนั้นสามารถออกแบบการทดลองเป็น 2 กรณี

- กรณีอัตราการไหลเข้าเป็นสัญญาณขั้นบันได
  - ที่เวลาเริ่มต้น ปรับวาล์วควบคุม FT-1 ไว้ที่ 15%ของการเปิดวาล์วสูงสุด และวาล์วควบคุม FT-2 ไว้ที่ 30%ของการเปิดวาล์วสูงสุด
  - ที่เวลา 15 นาที ปรับวาล์วควบคุม FT-1 ไว้ที่ 30%ของการเปิดวาล์วสูงสุด และวาล์วควบคุม FT-2 ไว้ที่ 30%ของการเปิดวาล์วสูงสุด
  - ที่เวลา 35 นาที ปรับวาล์วควบคุม FT-1 ไว้ที่ 20%ของการเปิดวาล์วสูงสุด และวาล์วควบคุม FT-2 ไว้ที่ 20%ของการเปิดวาล์วสูงสุด
  - ที่เวลา 55 นาที ปรับวาล์วควบคุม FT-1 ไว้ที่ 15%ของการเปิดวาล์วสูงสุด และวาล์วควบคุม FT-2 ไว้ที่ 30%ของการเปิดวาล์วสูงสุด และจบการทำงานที่เวลา 70 นาที



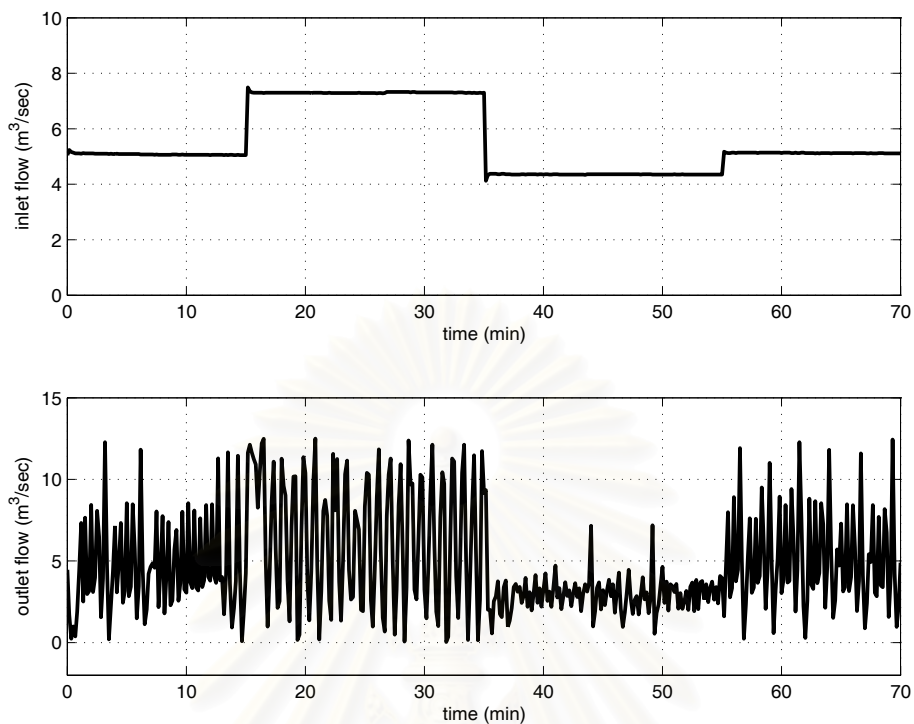


รูปที่ 2.11: แผนภาพขั้นตอนการนำตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยมาใช้กับถังพักของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม

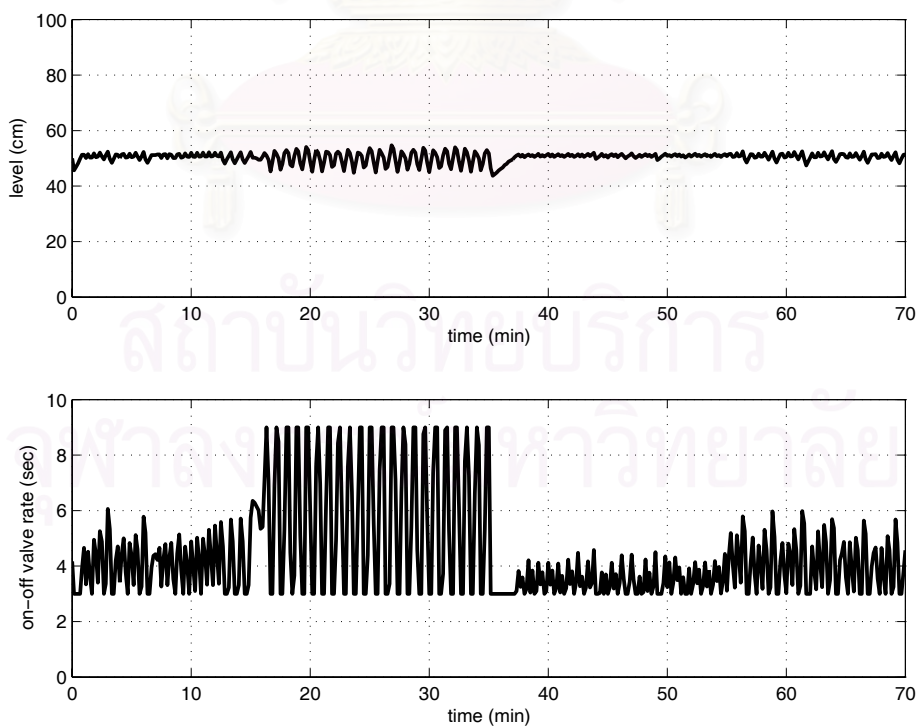
- กรณีอัตราการไหลเข้าเป็นสัญญาณไซน์

- ที่เวลาเริ่มต้น ปรับวาล์วควบคุม FT-2 ไว้ที่ 25%ของการเปิดวาล์วสูงสุด ตั้งขนาดสัญญาณไซน์ไว้ที่ 10 และคาบการแกว่งอยู่ที่ 900 วินาที และเริ่มต้น (Offset) ของวาล์วควบคุมที่ FT-1 ไว้ที่ 25%ของการเปิดวาล์วสูงสุด
- จบการทำงานที่เวลา 70 นาที

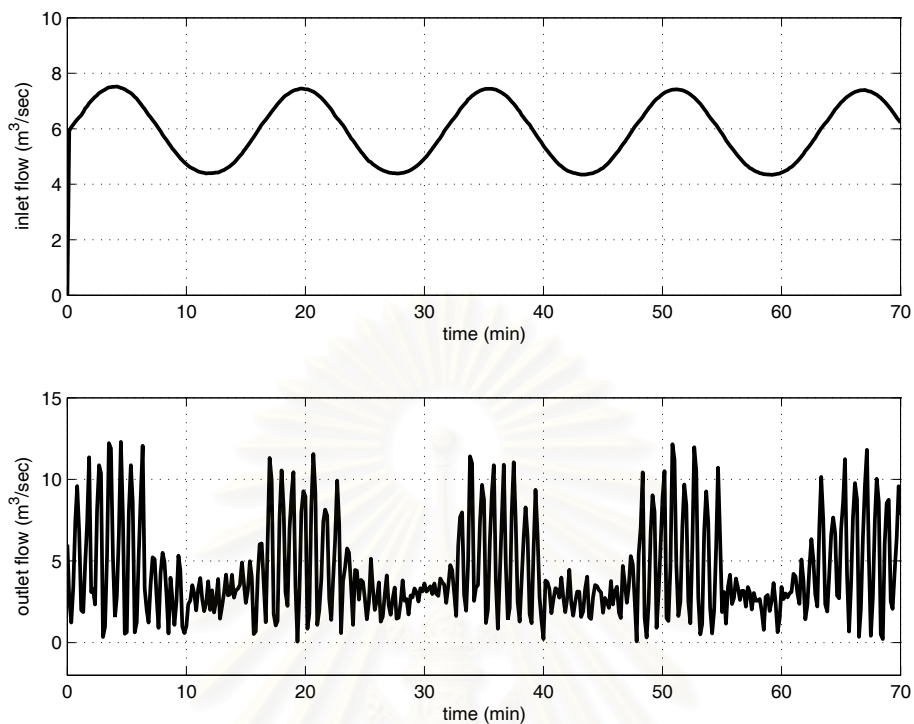
ทำการทดลองโดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบจากถังพักของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมดังนี้ เส้นผ่านศูนย์กลางของถังพัก  $r = 0.1002$  เมตร,  $x_{1h} = 0.8$  เมตร,  $x_{1l} = 0.2$  เมตร,  $x_{1r} = 0.5$  เมตร และสถานะเริ่มต้นของตัวแปรสถานะคือ  $x_1(0) = 0.5$  เมตร,  $\hat{x}_2 = 0.0001$  ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที การรบกวน  $3.85 \leq w \leq 11.02$  ลิตรต่อนาที โดยสถานะเริ่มต้นของการรบกวน  $w(0) = 0$  และสถานะเริ่มต้นของสัญญาณควบคุมกำหนดให้เป็น  $u(0) = 0$  เวลาในการชั้กตัวอย่าง  $h = 1$  วินาที ช่วงการควบคุม  $t_f = 10$  วินาที และเวลาในการชั้กตัวอย่างเพื่อบันทึกค่า 10 วินาที ผลการทดลองกรณีที่อัตราการไหลเข้าเป็นสัญญาณขั้นบันได ผลการวัดอัตราการไหลเข้าและการประมาณอัตราการไหลออกแสดงดังรูปที่ 2.12 และระดับของเหลวในถังพักและเวลาการเปิด solenoid valve แสดงดังรูปที่ 2.13 ในกรณีที่อัตราการไหลเข้าเป็นสัญญาณไซน์ ผลการวัดอัตราการไหลเข้าและการประมาณอัตราการไหลออกแสดงดังรูปที่ 2.14 และระดับของเหลวในถังพักและเวลาการเปิด solenoid valve แสดงดังรูปที่ 2.15



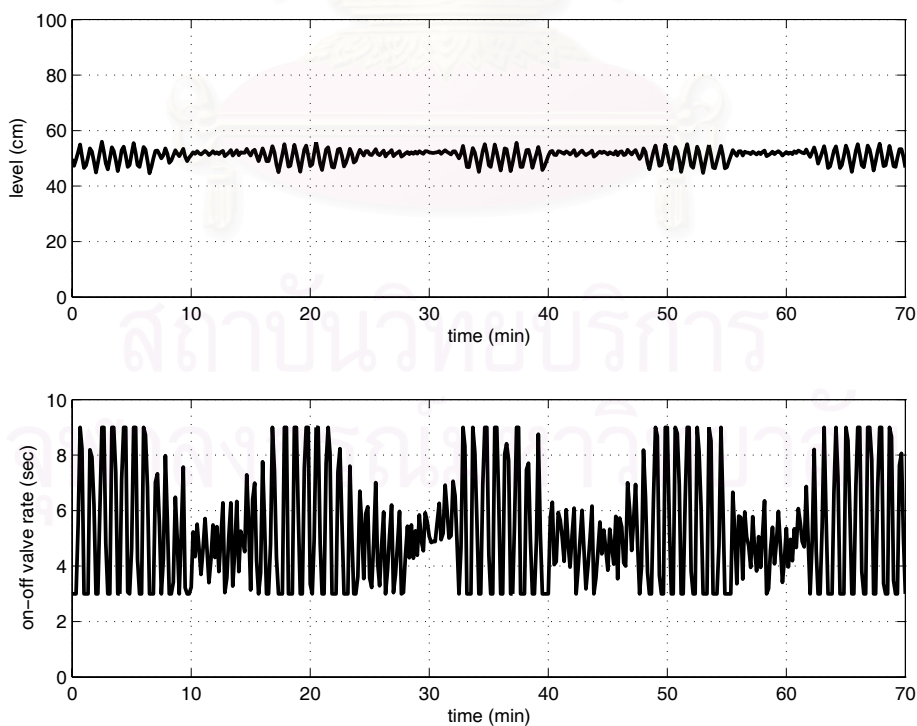
รูปที่ 2.12: อัตราการไหลเข้าเป็นสัญญาณขั้นบันได และการประมาณอัตราการไหลออก



รูปที่ 2.13: ระดับของเหลว และเวลาการเปิด solenoid valve เมื่อการรบกวนเป็นสัญญาณขั้นบันได



รูปที่ 2.14: อัตราการไหลเข้าเป็นสัญญาณไซน์ และการประมาณอัตราการไหลออก



รูปที่ 2.15: ระดับของเหลว และเวลาการเปิด solenoid valve เมื่อการรบกวนเป็นสัญญาณไซน์

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อการรบกวนเป็นสัญญาณขั้นบันไดและสัญญาณไซน์ ตัวควบคุมระดับแบบเฉลี่ยที่มีการประมาณอัตราการใช้พลังงานแบบลดอันดับให้ผลการติดตามระดับมีความแม่นยำโดยระดับของของเหลวภายในถังพักไม่เกินเงื่อนไขขอบเขตสถานะ

## 2.3 สรุป

ในบทนี้นำเสนอการควบคุมระดับในถังพักโดยใช้การควบคุมระดับแบบเฉลี่ย เป็นการควบคุมขั้นสูงอย่างแรกในการทดสอบการดำเนินการผ่านDCS DCSยอมให้ผู้ปฏิบัติการสามารถประยุกต์การควบคุมขั้นสูงโดยทำการโปรแกรมด้วยภาษาซีโบล (SEBOL language) ผ่านกลุ่มฟังก์ชันการควบคุมพื้นฐานของDCS DCSมีส่วนแสดงผลให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถเฝ้าสังเกตและทำการควบคุมกระบวนการได้สะดวกยิ่งขึ้น การจำลองการควบคุมระดับเฉลี่ยของถังพักใช้การควบคุมที่เหมาะสมในการพิจารณาสมรรถนะเพื่อให้อัตราการใช้พลังงานเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด และใช้สมการลาตทานายอัตราการใช้พลังงานเข้าซึ่งเป็นการรบกวนระบบ ผลการจำลองพบว่าการทำนายการรบกวนแบบลดอันดับสามารถควบคุมระดับของเหลวให้คงค่าที่ค่ากำหนดและอัตราการใช้พลังงานมีความราบรื่นกว่าการทำนายแบบขั้นบันได เมื่อนำสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุดซึ่งเป็นอัตราการใช้พลังงานเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้ควบคุมระดับในถังพักของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมพบว่า ไม่สามารถใช้สัญญาณควบคุมดังกล่าวได้โดยตรงต้องทำการแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปที่เหมาะสมก่อนนำไปใช้ ปัญหาที่พบอีกอย่างหนึ่งคือไม่สามารถวัดอัตราการใช้พลังงานเข้าได้ จึงใช้ตัวสังเกตแบบลดอันดับในการประมาณอัตราการใช้พลังงานเข้า และเมื่อพิจารณาถึงฟังก์ชันการวิจัยระบบควบคุมพบว่า อัตราการใช้พลังงานเข้าสู่ถังพักถูกจำกัดด้วยขนาดของท่อและขนาดวาล์วควบคุม ดังนั้นในการประยุกต์ใช้การควบคุมระดับแบบเฉลี่ยโดยดำเนินการผ่านDCS ไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงเงื่อนไขขอบเขตสถานะของระดับของเหลวและกระบวนการเชิงทำนายแบบจำลอง ก่อนเลือกตัวควบคุมควรตรวจสอบระบบที่ทำการควบคุมว่ามี sensors, actuators ที่สามารถให้และรับสัญญาณได้

## บทที่ 3

### การควบคุมอุณหภูมิเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

การควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมสัดส่วนและอินทิกรัลแบบปรับอัตราขยายได้ (Adaptive PI controller) เป็นการควบคุมขั้นสูงอย่างที่สองที่ใช้ในการทดสอบการดำเนินการผ่านDCS เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้มีลักษณะหนึ่งสัญญาณเข้าหนึ่งสัญญาณออก การเคลื่อนที่ของอากาศร้อนจากปลายท่อด้านหนึ่งไปยังเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ปลายท่ออีกด้านหนึ่งทำให้เกิดการหน่วง (Transportation lag) ซึ่งเป็นลักษณะหนึ่งของความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinearity) การควบคุมโดยใช้ตัวควบคุม PI ที่มีอัตราขยายคงที่แบบวิธี Ziegler-Nichols สามารถใช้งานได้ดีในช่วงการทำงานช่วงหนึ่งที่ทำกรปรับตั้งอัตราขยายนั้นเท่านั้น เมื่อมีการเปลี่ยนช่วงการทำงานประสิทธิภาพของตัวควบคุม PI ที่มีอัตราขยายคงที่ จะลดลง และต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญเพื่อปรับตั้งอัตราขยายใหม่ ในวิทยานิพนธ์นี้พิจารณานำตัวควบคุม PI แบบปรับอัตราขยายได้เองโดยสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงช่วงการทำงานและการรบกวนที่เกิดขึ้นมาใช้ การศึกษาตัวควบคุมสัดส่วนและอินทิกรัลแบบปรับอัตราขยายได้เริ่มจากทฤษฎีadaptive interaction การประยุกต์ทฤษฎีadaptive interactionกับตัวควบคุมสัดส่วนและอินทิกรัลเพื่อปรับอัตราขยาย และศึกษาการประยุกต์ใช้งานจริงกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมโดยวิเคราะห์ถึงผลการควบคุมที่ได้

#### 3.1 ตัวควบคุมสัดส่วนและอินทิกรัลแบบปรับอัตราขยายได้ (Adaptive PI controller)

##### 3.1.1 ทฤษฎีadaptive interaction [2, 6]

ทฤษฎีadaptive interaction พิจารณาระบบที่ประกอบด้วย  $N$  ระบบย่อย ซึ่งเรียกแต่ละระบบย่อยว่า อุปกรณ์ (Device) แต่ละอุปกรณ์ถูกลำดับโดยตรรกะ  $n \in N := \{1, 2, \dots, N\}$  ซึ่งแต่ละอุปกรณ์ประกอบด้วย 1 สัญญาณออกที่อินทิเกรตได้ (Integrable output signal)  $y_n$  และ 1 สัญญาณเข้าที่อินทิเกรตได้ (Integrable input signal)  $x_n$  พลวัตของอุปกรณ์แต่ละตัวสามารถอธิบายโดยcausal function

$$F_n : X_n \longrightarrow Y_n, \quad n \in N \quad (3.1)$$

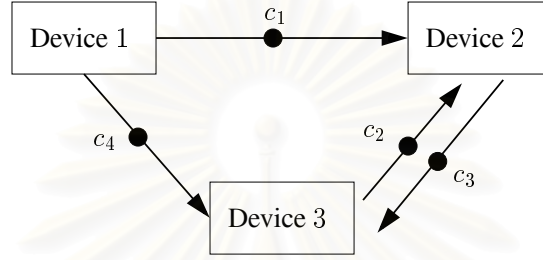
( $F_n : X_n \longrightarrow Y_n$  เป็นcausal function ถ้าสัญญาณออก  $y_n(t)$  ขึ้นกับสัญญาณเข้า  $x_n(\tau) : \tau \leq t$ )

ซึ่ง  $X_n$  และ  $Y_n$  คือ สเปซของสัญญาณเข้าและสัญญาณออกตามลำดับ นั่นคือ สัญญาณเข้า  $x_n(t)$  สัมพันธ์กับสัญญาณออก  $y_n(t)$  ของอุปกรณ์ลำดับที่  $n$  อธิบายโดยสมการ

$$y_n(t) = (F_n \circ x_n)(t) = F_n[x_n(t)], \quad n \in N \quad (3.2)$$

$\circ$  คือ function decomposition โดยตั้งสมมติฐานว่าcausal function  $F_n$  สามารถหาอนุพันธ์เฟลทเชท (Fréchet derivative) [18] ได้

เมื่อพิจารณาการกระทำระหว่างกันของ 2 อุปกรณ์ กำหนดให้  $c$  เป็นการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ (Connection) และ  $C$  เป็นเซตของการเชื่อมต่อทั้งหมดระหว่างอุปกรณ์ ให้  $pre_c$  แทนลำดับของอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อก่อนหน้าการเชื่อมต่อ  $c$  และให้สัญญาณออกส่งผ่านไปยังการเชื่อมต่อ  $c$  ให้  $post_c$  แทนลำดับของอุปกรณ์ที่ต่อหลังจากการเชื่อมต่อ  $c$  และรับสัญญาณเข้าจากการเชื่อมต่อ  $c$  กำหนดให้  $I_n$  เป็นเซตของการเชื่อมต่อที่ส่งผ่านสัญญาณเข้ามายังอุปกรณ์ลำดับที่  $n$  :  $I_n = \{c : pre_c = n\}$  และ  $O_n$  เป็นเซตของการเชื่อมต่อที่ส่งผ่านสัญญาณออกจากอุปกรณ์ลำดับที่  $n$  :  $O_n = \{c : post_c = n\}$



รูปที่ 3.1: ตัวอย่างของอุปกรณ์และการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์

เพื่อความเข้าใจพิจารณารูปที่ 3.1 ซึ่งเป็นตัวอย่างของอุปกรณ์และการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ พิจารณาการเชื่อมต่อ  $c_1$  พบว่า  $pre_{c_1} = 1$  และ  $post_{c_1} = 2$  และเมื่อพิจารณาเซตของการเชื่อมต่อที่เป็นสัญญาณเข้าสู่อุปกรณ์ลำดับที่ 2 พบว่า  $I_2 = \{c_1, c_2\}$  และเซตของการเชื่อมต่อที่เป็นสัญญาณออกจากอุปกรณ์ลำดับที่ 2 พบว่า  $O_2 = \{c_3\}$

ในที่นี้พิจารณาเฉพาะการกระทำระหว่างกันเชิงเส้น (Linear interaction) ให้  $x_n$  เป็นผลรวมของสัญญาณเข้าทุกสัญญาณที่เข้าสู่อุปกรณ์ลำดับที่  $n$  แสดงโดยสมการ

$$x_n(t) = u_n(t) + \sum_{c \in I_n} \alpha_c y_{pre_c}(t), \quad n \in N \quad (3.3)$$

โดยที่  $u_n(t)$  เป็นสัญญาณเข้าจากภายนอกที่ผ่านเข้าสู่อุปกรณ์ลำดับที่  $n$  และ  $\alpha_c$  คือ ค่าถ่วงน้ำหนักการเชื่อมต่อ (Connection weight) สัญญาณออกของอุปกรณ์ลำดับที่  $n$  แสดงโดยสมการ

$$y_n(t) = F_n [u_n(t) + \sum_{c \in I_n} \alpha_c y_{pre_c}(t)] \quad (3.4)$$

จุดมุ่งหมายของขั้นตอนวิธีการปรับ (Adaptive algorithm) คือ ปรับค่าถ่วงน้ำหนักการเชื่อมต่อ  $\alpha_c$  โดยการหาค่าต่ำสุดของตรรกะนี้สมรรถนะ  $E$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสัญญาณออก และสัญญาณเข้าจากภายนอก ถ้าค่าถ่วงน้ำหนัก  $\alpha_c$  ถูกปรับตามสมการ

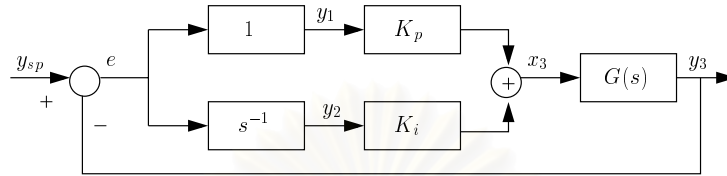
$$\dot{\alpha}_c = \left( \sum_{s \in O_{post_c}} \alpha_s \dot{\alpha}_s \frac{\frac{dE}{dy_{post_s}} \circ F'_{post_s}[x_{post_s}]}{\frac{dE}{dy_{post_s}} \circ F'_{post_s}[x_{post_s}] \circ y_{post_c}} - \gamma \frac{\partial E}{\partial y_{post_c}} \right) \circ F'_{post_c}[x_{post_c}] \circ y_{pre_c}, \quad c \in C \quad (3.5)$$

ดังนั้นตรรกะนี้สมรรถนะ  $E$  จะมีค่าลดลงในทิศทางเดียว (Monotonically decrease) กับเวลา สมการ (3.5) สามารถลดรูปได้เป็น

$$\dot{\alpha}_c = -\gamma \frac{dE}{d\alpha_c}, \quad c \in C \quad (3.6)$$

ซึ่ง  $\gamma > 0$  คือ สัมประสิทธิ์การปรับ (Adaptation coefficient)  $F_n$  และ  $E$  เป็น instantaneous function ดังนั้นขั้นตอนวิธีการปรับสามารถแทน function decomposition (o) ด้วยการคูณ

### 3.1.2 ขั้นตอนวิธีการปรับอัตราขยายของตัวควบคุม PI โดยใช้ทฤษฎี adaptive interaction



รูปที่ 3.2: ขั้นตอนวิธีการกำหนดอัตราขยายของตัวควบคุม PI

ตัวควบคุมสัดส่วนและอินทิกรัล (PI) อธิบายได้โดยสมการ

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (3.7)$$

โดย  $e(t)$  คือ ค่าผิดพลาดของระบบ ( $e = y_{sp} - y_3$ ,  $y_{sp}$  เป็นสัญญาณเข้าอ้างอิง)

$u(t)$  คือ สัญญาณควบคุม

$K_p$  คือ อัตราขยายสัดส่วน

$K_i$  คือ อัตราขยายอินทิกรัล

ตามทฤษฎี adaptive interaction ตัวควบคุม PI แสดงดังรูปที่ 3.2 สามารถแยกออกเป็น 3 อุปกรณ์ อุปกรณ์ลำดับที่ 1 คือ ส่วนของสัดส่วนของตัวควบคุม PI ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) เป็น 1 อุปกรณ์ลำดับที่ 2 คือ ส่วนของอินทิกรัลของตัวควบคุม PI ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น  $s^{-1}$  อุปกรณ์ลำดับที่ 3 คือ พลานต์ (plant) ดังนั้นค่าถ่วงน้ำหนักการเชื่อมต่อของระบบนี้คือ  $\alpha_c = K_p, K_i$  เซตของสัญญาณออกของระบบคือ  $O_{post_c} = O_3$  จากทฤษฎี adaptive interaction ในหัวข้อที่ 3.1.1 ค่าถ่วงน้ำหนักการเชื่อมต่อสามารถเขียนอยู่ในรูป

$$\dot{\alpha}_c = -\gamma \frac{\partial E}{\partial y_{post_c}} \circ F'_{post_c}[x_{post_c}] \circ y_{pre_c} \quad (3.8)$$

ดรรชนีสมรรถนะสามารถเขียนอยู่ในรูปกำลังสองของค่าผิดพลาดดังสมการ

$$E = (y_{sp} - y_3)^2 = e^2 \quad (3.9)$$

ถ้าอนุพันธ์เฟลทเซทของฟังก์ชัน  $F[x]$  ดังนั้นค่าถ่วงน้ำหนักการเชื่อมต่อ  $K_p, K_i$  สามารถเขียนเป็น

$$\dot{K}_p = -2\gamma (y_3 - y_{sp}) F'_3[x_3] \circ y_1 \quad (3.10)$$

$$\dot{K}_i = -2\gamma (y_3 - y_{sp}) F'_3[x_3] \circ y_2 \quad (3.11)$$

ในการหาค่าอนุพันธ์เฟลทเซทของฟังก์ชัน  $F[x]$  โดยพิจารณาฟังก์ชันในรูป

$$F[x] = \int_0^t f(x(\tau), \tau) d\tau \quad (3.12)$$

ถ้าอนุพันธ์เฟลทเซทปรากฏหมายความว่า สามารถหาผลต่างเชิงอนุพันธ์เฟลทเซท (Fréchet differential) ของฟังก์ชัน  $F[x]$  ได้ และผลต่างเชิงอนุพันธ์ดังกล่าวเท่ากับผลต่างเชิงอนุพันธ์แกททีค (Gateaux differential) นั่นคือฟังก์ชัน  $F$  มีความต่อเนื่องที่จุด  $x$  อนุพันธ์แกททีคแสดงได้โดยสมการ

$$\delta F[x; h] = \int_0^t f_x(x(\tau), \tau)h(\tau)d\tau \quad (3.13)$$

ซึ่ง  $f_x = \frac{\partial f}{\partial x}$  ดังนั้นอนุพันธ์เฟลทเซทของฟังก์ชัน  $F$  ที่  $x$  กำหนดโดย

$$F'(x) \circ h = \int_0^t f_x(x(\tau), \tau)h(\tau)d\tau \quad (3.14)$$

พิจารณาระบบเชิงเส้นไม่ขึ้นกับเวลาที่มี transfer function เป็น  $G(s)$  ฟังก์ชัน  $F[x]$  สามารถเขียนในรูปคอนโวลูชัน (Convolution) ได้ดังสมการ

$$F[x] = g(t) * x(t) = \int_0^t g(t-\tau)x(\tau)d\tau \quad (3.15)$$

ซึ่ง  $g(t)$  คือ ผลตอบสนองอิมพัลส์ (Impulse response) ของระบบเชิงเส้นไม่ขึ้นกับเวลา ดังนั้น

$$F'[x] \circ h = \int_0^t g(t-\tau)h(\tau)d\tau \quad (3.16)$$

$$= g(t) * h(t) \quad (3.17)$$

ในทางปฏิบัติสามารถประมาณ  $F'[x] \circ h = \beta h$  ดังนั้นสมการ (3.10, 3.11) สามารถเขียนใหม่เป็น

$$\dot{K}_p = -2\gamma(y_3 - y_{sp})\beta y_1 \quad (3.18)$$

$$\dot{K}_i = -2\gamma(y_3 - y_{sp})\beta y_2 \quad (3.19)$$

ในที่นี้กำหนดให้  $\sigma = 2\gamma\beta$ ,  $\sigma > 0$  และเมื่อพิจารณารูปที่ 3.2

$$y_1(s) = 1 \cdot e(s) \quad (3.20)$$

$$y_2(s) = s^{-1} \cdot e(s) \quad (3.21)$$

### 3.1.3 การประมาณตัวควบคุมสัดส่วนและอินทิกรัลแบบปรับอัตราขยายได้ทางเวลาต่อเนื่อง

การนำตัวควบคุมสัดส่วนและอินทิกรัลแบบปรับอัตราขยายได้ไปใช้ในทางปฏิบัตินั้นไม่สามารถทำได้โดยตรง เนื่องจากการคำนวณและการส่งผ่านสัญญาณของคอมพิวเตอร์ไม่ได้อยู่ในรูปเวลาต่อเนื่อง (Continuous time) ดังนั้นต้องทำการแปลงฟังก์ชันถ่ายโอนและสมการอนุพันธ์เชิงสามัญ (Ordinary differential equation) ให้อยู่ในรูปเวลาไม่ต่อเนื่อง (Discrete time) ก่อนจึงสามารถโปรแกรมลงบนคอมพิวเตอร์ได้ ในวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาการประมาณให้อยู่ในรูปเวลาไม่ต่อเนื่องโดยใช้วิธีการประมาณเชิงสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal method) หรือเรียกอีกชื่อว่าการประมาณทัสทิน (Tustin approximation) [17] วิธีนี้จะส่งผ่านขอบเขตที่อยู่ที่ฝั่งซ้ายของโดเมนเวลาต่อเนื่อง (s-plane) ไปอยู่ในขอบเขตของวงกลมหนึ่งหน่วยในโด



เมนเวลาไม่ต่อเนื่อง (z-plane) การแปลงโดยวิธีนี้ทำให้มั่นใจได้ว่าระบบยังมีเสถียรภาพอยู่ สำหรับสมการที่ใช้ในการแปลงจากโดเมนเวลาต่อเนื่องไปเป็นโดเมนเวลาไม่ต่อเนื่องคือ

$$s = \frac{2}{h} \cdot \frac{z-1}{z+1} \quad (3.22)$$

ซึ่ง  $h$  คือ เวลาในการซัดตัวอย่าง (Sampled time) ดังนั้นสมการตัวควบคุม PI (3.7) เขียนอยู่ในรูปเวลาไม่ต่อเนื่องได้เป็น

$$u[kh] = P[kh] + I[kh] \quad (3.23)$$

$$P[kh] = K_p (b y_{sp}[kh] - y_3[kh]) \quad (3.24)$$

$$I[kh+h] = I[kh] + \frac{K_i h}{2} (e[kh+h] + e[kh]) \quad (3.25)$$

$$e[kh] = y_{sp}[kh] - y_3[kh] \quad (3.26)$$

ซึ่ง  $k = \{0, 1, 2, \dots, K\}$  และ  $b$  คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของค่ากำหนด (Set point weighting) สมการค่าถ่วงน้ำหนักการเชื่อมต่อ  $K_p, K_i$  (3.18, 3.19) และสัญญาณออกของอุปกรณ์ลำดับที่ 1 และ 2 (3.20, 3.21) สามารถแปลงให้อยู่ในรูปเวลาไม่ต่อเนื่องได้เป็น

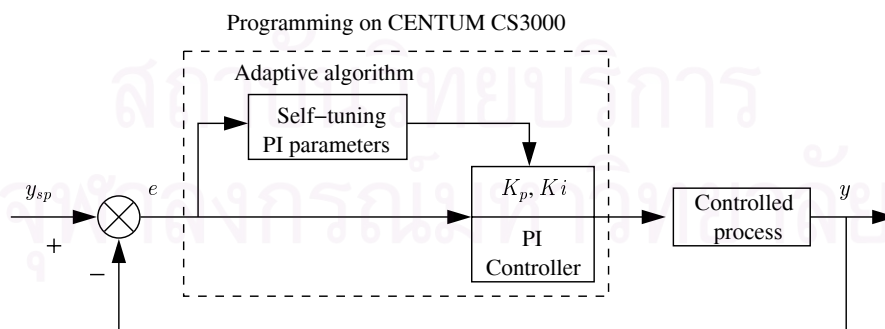
$$K_p = K_p[kh-h] + \frac{\sigma h}{2} (y_1[kh]e[kh] + y_1[kh-h]e[kh-h]) \quad (3.27)$$

$$K_i = K_i[kh-h] + \frac{\sigma h}{2} (y_2[kh]e[kh] + y_2[kh-h]e[kh-h]) \quad (3.28)$$

$$y_1[kh] = e[kh] \quad (3.29)$$

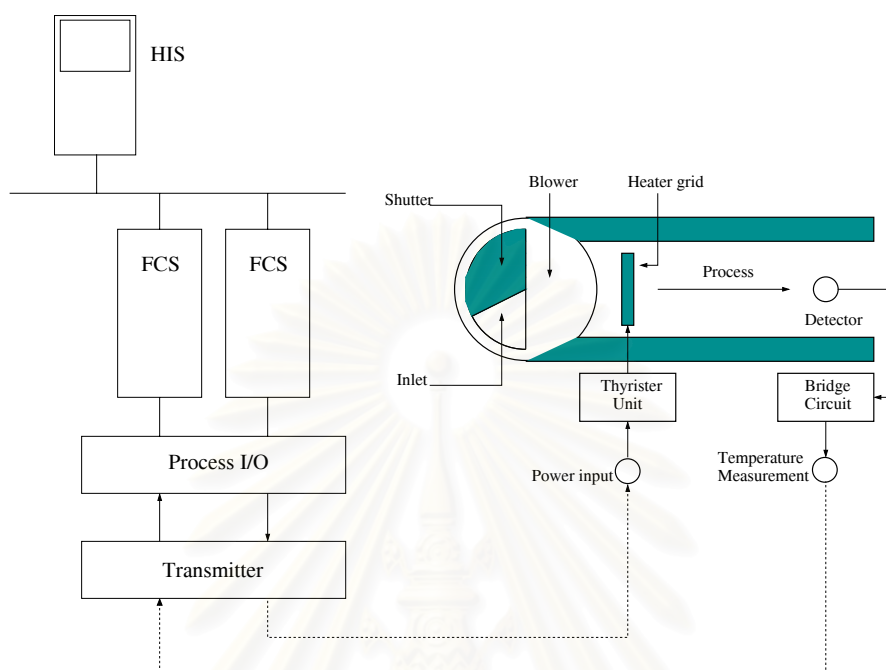
$$y_2[kh+h] = y_2[kh] + \frac{h}{2} (e[kh+h] + e[kh]) \quad (3.30)$$

โครงสร้างของการนำตัวควบคุมสัดส่วนและอินทิกรัลแบบปรับอัตราขยายได้ไปใช้ในทางปฏิบัติ แสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3: โครงสร้างการนำตัวควบคุมสัดส่วนและอินทิกรัลแบบปรับอัตราขยายได้ไปใช้ในทางปฏิบัติ

### 3.2 การควบคุมอุณหภูมิออกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยดำเนินการผ่านDCS



รูปที่ 3.4: การเชื่อมต่อระหว่างDCSกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

การทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอาศัยเครื่องเป่าลม (Blower) ดูดอากาศเข้าสู่ท่อด้วยอัตราเร็วคงที่ โดยปริมาตรของอากาศถูกควบคุมด้วยม่านปรับ (Shutter) ไหลผ่านเครื่องทำความร้อน (Heater) ซึ่งถูกควบคุมโดยสัญญาณควบคุมผ่านทางไทรสเตอร์ (Thyristor) ที่ปลายอีกด้านหนึ่งของท่อ จะติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดอุณหภูมิ การเชื่อมต่อระหว่างDCSกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแสดงดังรูปที่ 3.4 จุดประสงค์หลักของการควบคุมคือ ลดผลของการรบกวนซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของอากาศขาเข้า และรักษาอุณหภูมิขาออกของกระบวนการให้อยู่ที่ค่ากำหนด

จากจุดประสงค์หลักของการควบคุมสามารถแบ่งการทดลองได้เป็น 2 การทดลอง ดังนี้

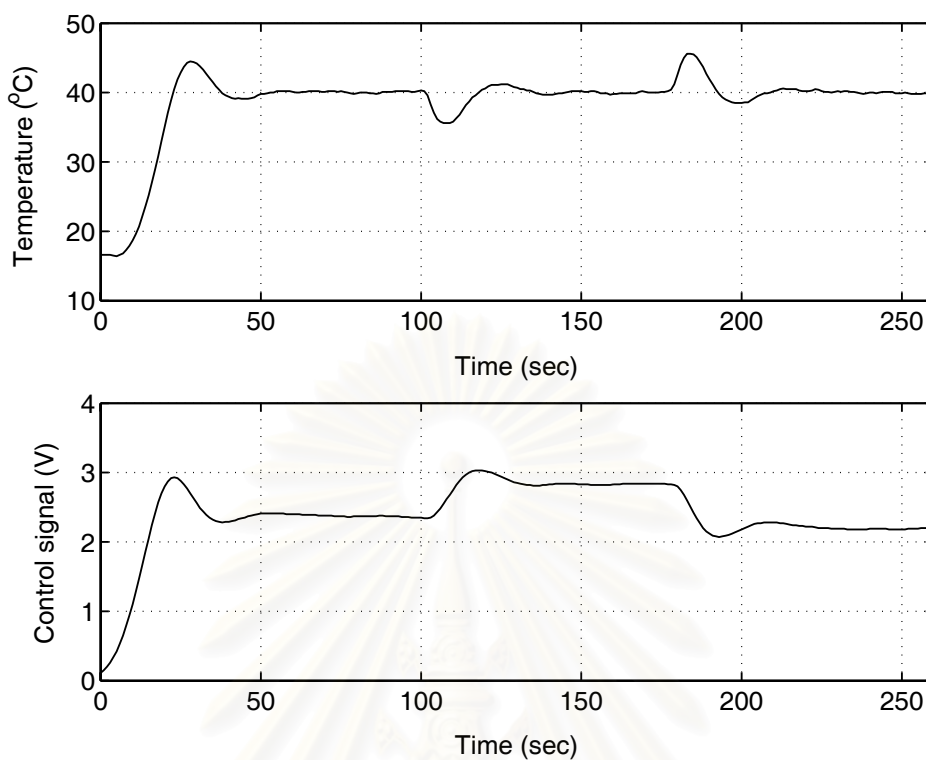
- การทดลองการลดการรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรอากาศขาเข้า
  - เริ่มต้นการทดลองโดยค่ากำหนดอยู่ที่  $40^{\circ}\text{C}$
  - มีการรบกวนจากการปรับม่านปรับ ณ.วินาทีที่ 100 จากตำแหน่งเริ่มต้น 40 องศา เป็น 60 องศา
  - ปรับม่านปรับกลับมาที่ตำแหน่ง 40 องศา ณ.วินาทีที่ 175
- การทดลองการรักษาอุณหภูมิขาออกของกระบวนการให้อยู่ที่ค่ากำหนด
  - ทำการทดลองต่อเนื่อง ณ.วินาทีที่ 260 อุณหภูมิเริ่มต้นอยู่ที่  $40^{\circ}\text{C}$  และม่านปรับอยู่ที่ตำแหน่ง 40 องศา

- เปลี่ยนค่ากำหนดจาก  $40^{\circ}\text{C}$  เป็น  $60^{\circ}\text{C}$  ณ.วินาทีที่ 285
- ปรับค่ากำหนดกลับมาที่  $40^{\circ}\text{C}$  ณ.วินาทีที่ 605

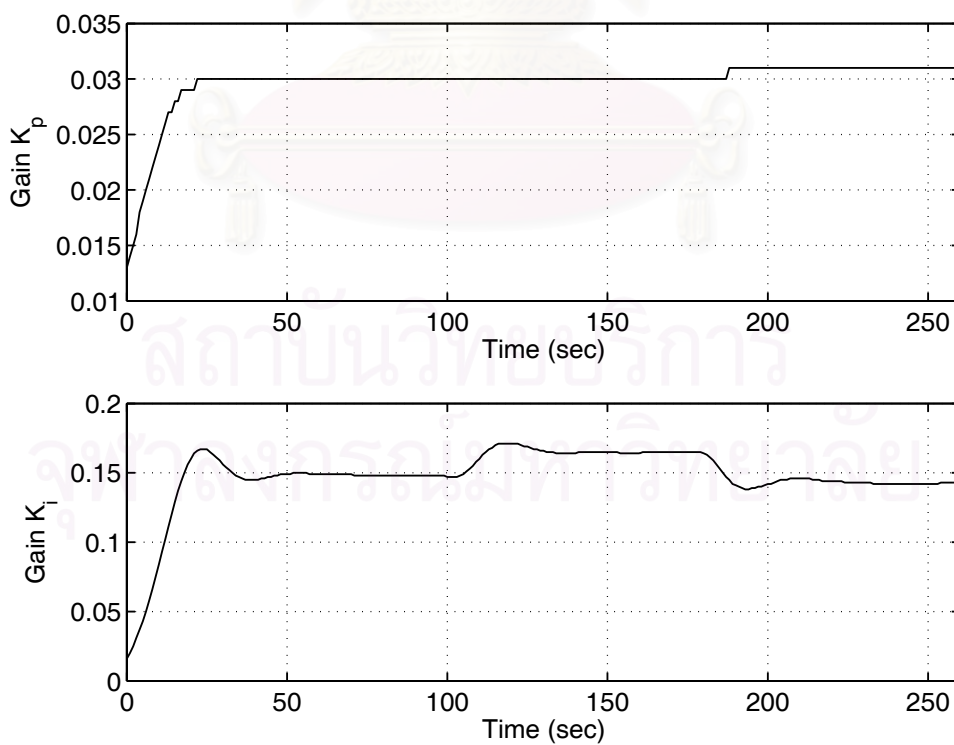
พารามิเตอร์ของตัวปรับอัตราขยายตัวควบคุม PI เป็นดังนี้คือ ค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักการเชื่อมต่อ  $K_p, K_i$  อยู่ที่ศูนย์ ค่าสัมประสิทธิ์ของการปรับ  $\sigma = 0.000002$  เวลาในการซັกดตัวอย่าง  $h = 1$  วินาที และเวลาในการซັกดตัวอย่างเพื่อบันทึกค่า 1 วินาที การทดลองการลดการรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรอากาศขาเข้า ผลของอุณหภูมิขาออกและสัญญาณควบคุม และผลของการปรับค่าถ่วงน้ำหนักการเชื่อมต่อในการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ การทดลองการรักษาอุณหภูมิขาออกของกระบวนการให้อยู่ที่ค่ากำหนด ผลของอุณหภูมิขาออกและสัญญาณควบคุม และผลของการปรับค่าถ่วงน้ำหนักการเชื่อมต่อแสดงดังรูปที่ 3.7 และ 3.8 ตามลำดับ



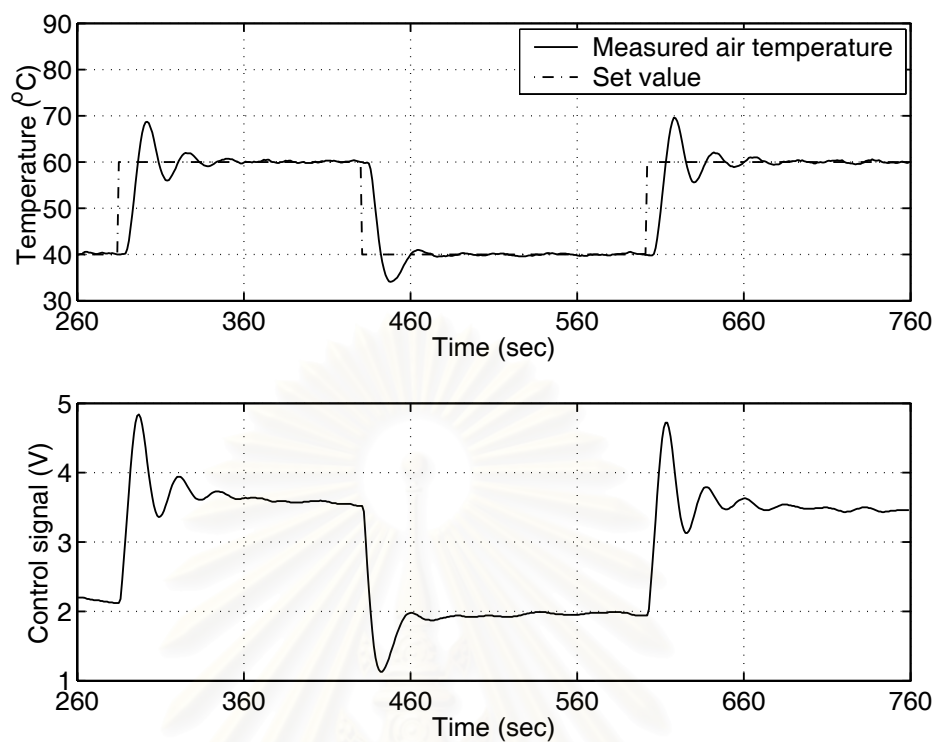
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



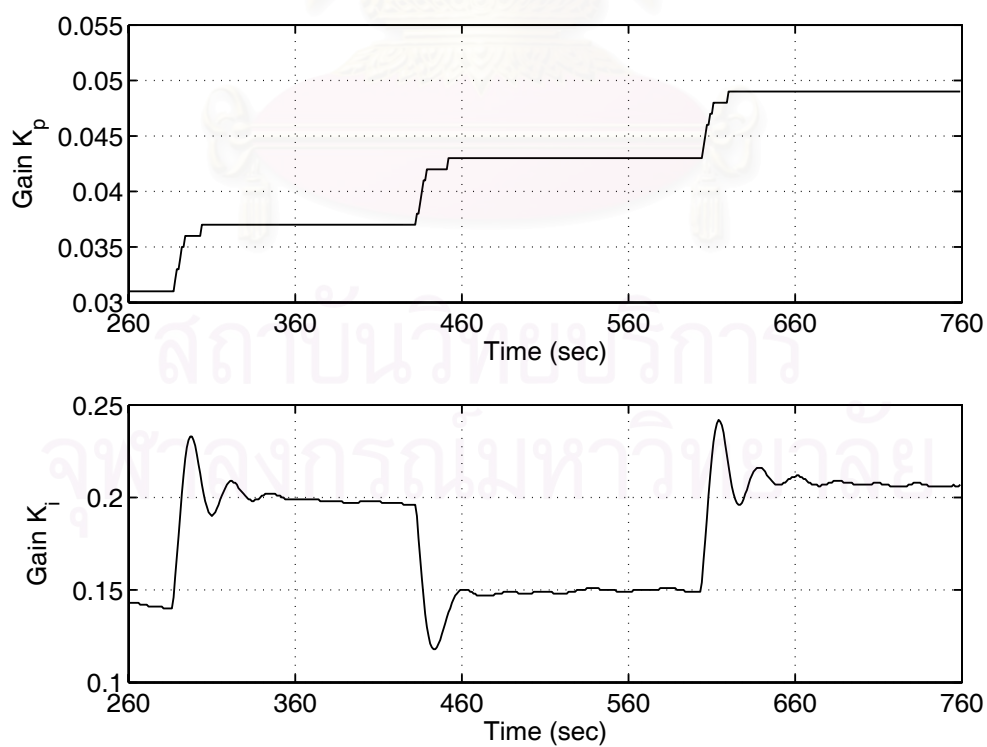
รูปที่ 3.5: อุณหภูมิขาออกและสัญญาณควบคุมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อค่ากำหนดอยู่ที่  $40^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 3.6: การปรับค่าถ่วงน้ำหนักการเชื่อมต่อ  $K_p, K_i$



รูปที่ 3.7: อุณหภูมิขาออกและสัญญาณควบคุมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 3.8: การปรับค่าถ่วงน้ำหนักการเชื่อมต่อ  $K_p, K_i$

ผลการทดลองแสดงว่า ตัวควบคุมสัดส่วนและอินทิกรัลแบบปรับอัตราขยายได้เมื่อนำมาใช้กับการควบคุมอุณหภูมิออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม สามารถลดผลการรบกวนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของอากาศขาเข้า และสามารถติดตามค่ากำหนดได้เป็นอย่างดีทั้งขาขึ้นและขาลง

ค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักการเชื่อมต่อ  $K_p, K_i$  ซึ่งกำหนดให้เท่ากับศูนย์เนื่องจากการประมาณหัตถินค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ที่ถูกประมาณต้องเท่ากับศูนย์ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ของการปรับ  $\sigma = 0.000002$  ได้จากการทดลองโดยพิจารณาว่าถ้าผลตอบสนองเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วให้ลดค่าสัมประสิทธิ์ของการปรับลง แต่ถ้าผลตอบสนองเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ให้เพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ของการปรับขึ้น เมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์การปรับที่เหมาะสมให้ใช้ค่านั้นตลอดการทดลอง

### 3.3 สรุป

ในบทนี้นำเสนอการควบคุมอุณหภูมิออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้ตัวควบคุม PI แบบปรับอัตราขยายได้ เป็นการควบคุมขั้นสูงอย่างที่สองในการทดสอบการดำเนินการผ่านDCS DCSยอมให้ผู้ปฏิบัติการสามารถประยุกต์การควบคุมขั้นสูงโดยทำการโปรแกรมด้วยภาษาซีโบล (SEBOL language) ผ่านกลุ่มฟังก์ชันการควบคุมพื้นฐานของDCS DCSมีส่วนแสดงผลให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถเฝ้าสังเกตและทำการควบคุมกระบวนการได้สะดวกยิ่งขึ้น ตัวควบคุม PI ถูกใช้เป็นตัวควบคุมหลักในการควบคุมกระบวนการ ทฤษฎีadaptive interactionถูกนำมาใช้ในการปรับอัตราขยายของตัวควบคุม PI ซึ่งทฤษฎีดังกล่าวเป็นวิธีที่รับประกันเสถียรภาพหลังจากที่ระบบลู่เข้าสู่ค่ากำหนดและไม่จำเป็นต้องทราบข้อมูลของกระบวนการ การใช้งานตัวควบคุมโดยดำเนินการผ่านDCSต้องทำการประมาณตัวควบคุม PI และค่าถ่วงน้ำหนักการเชื่อมต่อให้อยู่ในรูปสมการไม่ต่อเนื่องทางเวลา ผลการควบคุมแสดงให้เห็นว่าทฤษฎีadaptive interactionสามารถปรับอัตราขยายของตัวควบคุม PI ให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงและการรบกวนระบบที่เกิดขึ้น

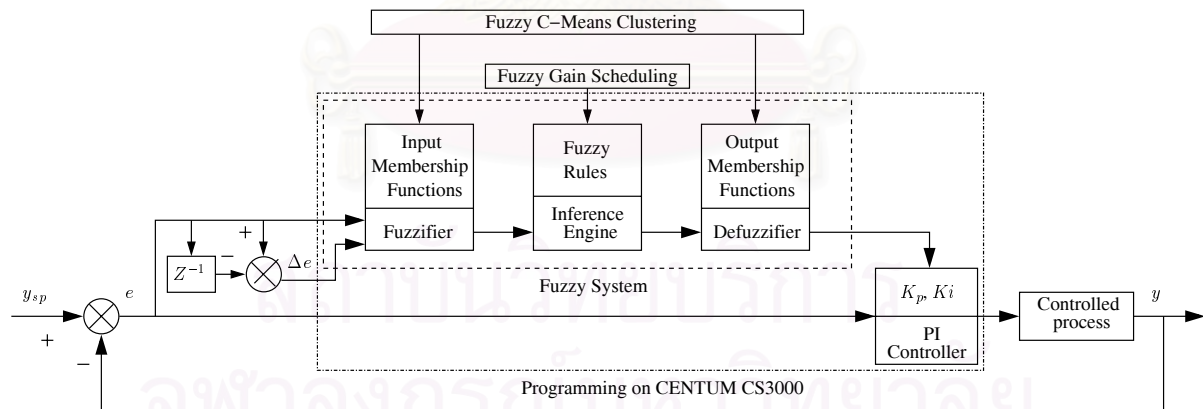
## บทที่ 4

### การควบคุมหอกลิ้นแยกสารผสมสองชนิด

การควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมสัดส่วนและอินทิกรัล (PI) แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี่ เป็นการควบคุมขั้นสูงอย่างสามที่ใช้ในการทดสอบการดำเนินการผ่านDCS หอกลิ้นแยกสารผสมสองชนิด มีลักษณะหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง มีการกระทำระหว่างวงรอบการควบคุม และมีการรบกวนจากภายนอก ดังนั้นการควบคุมมีความซับซ้อนมาก การควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมสัดส่วนและอินทิกรัลแบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี่ [3] ได้ผลการควบคุมเป็นที่น่าพอใจและมีความเป็นไปได้ในการใช้งานในอุตสาหกรรม ในบทนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้งานจริงโดยดำเนินการผ่านDCSกับหอกลิ้นแยกสารผสมสองชนิดของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม

#### 4.1 ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี่ [3]

โครงสร้างของตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี่แสดงดังรูปที่ 4.1 ใช้การรวมกลุ่มข้อมูลแบบ fuzzy c-means ในการกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุต ใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซี่ของตัวควบคุม PI ในการกำหนดฐานกฎฟัซซี่ และ defuzzification ใช้วิธี centroid



รูปที่ 4.1: โครงสร้างตัวควบคุมสัดส่วนและอินทิกรัลแบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี่

##### 4.1.1 การกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกด้วยวิธีการรวมกลุ่มแบบวิธี fuzzy c-means

การรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ทำได้โดยพิจารณา sample set ของข้อมูล  $X$  ใดๆ ซึ่งประกอบด้วยข้อมูล  $n$  ตัว โดยเขียนอยู่ในรูปความสัมพันธ์  $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$  ซึ่งข้อมูล  $x_i$  แต่ละชุดเป็นจุดในปริภูมิสถานะ  $m$  มิติ กำหนดโดย  $x_k = \{x_{k1}, x_{k2}, x_{k3}, \dots, x_{km}\}$  โดยที่จุดศูนย์กลางของกลุ่มข้อ

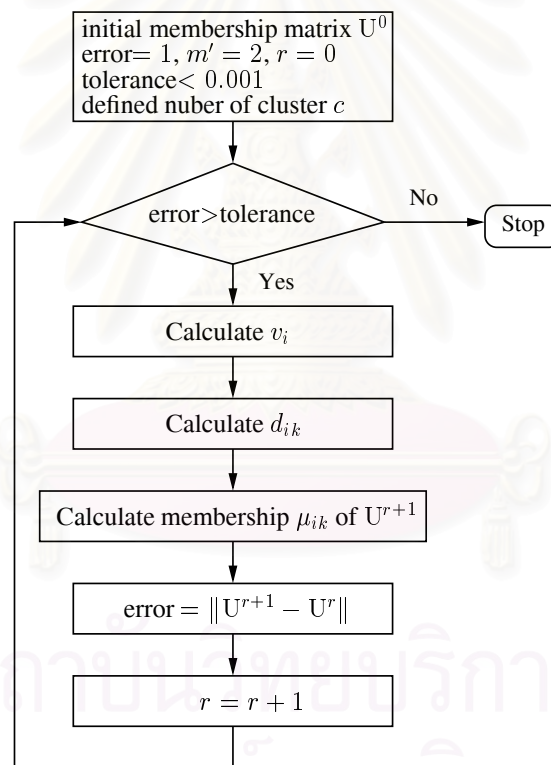
มูลที่  $i = 1, 2, \dots, c$  ในมิติที่  $j = 1, 2, \dots, m$  แสดงโดย  $v_{ij}$  Fuzzy partition matrix  $M_{fc}$  ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก  $c$  กลุ่ม และ  $n$  ข้อมูล กำหนดโดย

$$M_{fc} = \{U \mid \mu_{ij} \in [0, 1], \sum_{i=1}^c \mu_{ik} = 1, 0 < \sum_{k=1}^n \mu_{ik} < n\} \quad (4.1)$$

ค่าความเป็นสมาชิกใน  $U$  และจุดศูนย์กลางข้อมูล  $v$  หาจากการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

$$J(U, v) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c \mu_{ik}^{m'} (d_{ik})^2 \quad (4.2)$$

$m' \in [0, \infty]$  คือ weighting parameter และ  $d_{ik}$  คือ ระยะทางจากข้อมูล  $x_k$  ถึงจุดศูนย์กลางของกลุ่มข้อมูล  $v_i$  (Euclidean distance measure) ใน  $m$  มิติ แผนภาพขั้นตอนการรวมกลุ่มข้อมูลแบบ fuzzy c-means แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2: แผนภาพขั้นตอนการรวมกลุ่มข้อมูลแบบ fuzzy c-means

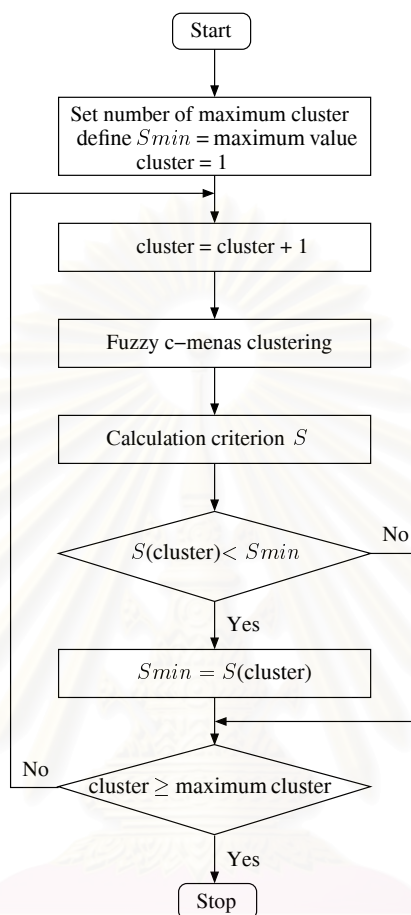
จากรูปที่ 4.2 พบว่า ต้องกำหนดจำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิก  $c$  ทุกครั้งที่ทำการรวมกลุ่มข้อมูล ในวิทยานิพนธ์นี้จำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่เหมาะสมคำนวณโดยใช้วิธี compactness and separation validity function [19] ซึ่งสมการแสดงดังนี้

$$S = \frac{\sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n \mu_{ik}^{m'} \|v_i - x_k\|^2}{n \min \|v_i - v_k\|^2} \quad (4.3)$$

จำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่เหมาะสมจะมีค่าความแปรปรวนระหว่างกลุ่มข้อมูล  $S$  ต่ำสุด และข้อมูล



มีการกระจายตัวอย่างเหมาะสม แผนภาพขั้นตอนการทำงานของการรวมกลุ่มข้อมูลแบบ fuzzy c-means กับการระบุจำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่เหมาะสมแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3: แผนภาพขั้นตอนการรวมกลุ่มข้อมูลแบบ fuzzy c-means กับการระบุจำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่เหมาะสมที่เหมาะสม

เมื่อได้ fuzzy partition matrix ที่เหมาะสมแล้ว ทำการพล็อตเมตริกซ์ดังกล่าวลงบนแกนของข้อมูลแต่ละตัวและใช้การประมาณฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นฟังก์ชันแบบสามเหลี่ยม การรวมกลุ่มข้อมูลแบบ fuzzy c-means พบว่าเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อน สามารถกำหนดจำนวนและรูปร่างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกได้อย่างเหมาะสม ทั้งยังสอดคล้องกับการกระจายตัวของกลุ่มข้อมูลและทราบถึงขอบเขตที่แน่นอนของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

#### 4.1.2 การกำหนดฐานกฎฟuzzyโดยใช้ตารางค่าอัตราขยายฟuzzyของตัวควบคุม PI

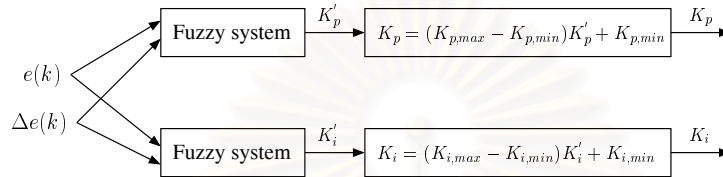
วิธีการสร้างฐานกฎฟuzzyสำหรับระบบตรรกศาสตร์ฟuzzyที่ใช้ปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ถูกเสนอโดย [20] สำหรับวิทยานิพนธ์นี้เราสร้างฐานกฎฟuzzyสำหรับตัวควบคุม PI ซึ่งแตกต่างจากเดิมโดยถือหลักตาม [3] ดังนี้คือ กำหนดให้  $K_p \in [K_{p,min}, K_{p,max}] \subset \mathfrak{R}$  และ  $K_i \in [K_{i,min}, K_{i,max}] \subset \mathfrak{R}$  ค่า  $K_{p,min}, K_{p,max}, K_{i,min}, K_{i,max}$  หาได้จากการทดลอง การสร้างฐานกฎฟuzzyเป็นการอธิบายการปรับค่า

อัตราขยายของตัวควบคุม PI โดยค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI สามารถหาได้จาก

$$K_p = (K_{p,max} - K_{p,min})K'_p + K_{p,min} \quad (4.4)$$

$$K_i = (K_{i,max} - K_{i,min})K'_i + K_{i,min} \quad (4.5)$$

$K'_p$  และ  $K'_i$  คือ ข้อมูลเอาต์พุตของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี่ โดยมีอินพุตเป็นค่าผิดพลาด  $e(k)$  และการเปลี่ยนแปลงสัญญาณค่าผิดพลาด  $\Delta e(k)$  ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4: ระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี่สำหรับตัวควบคุม PI

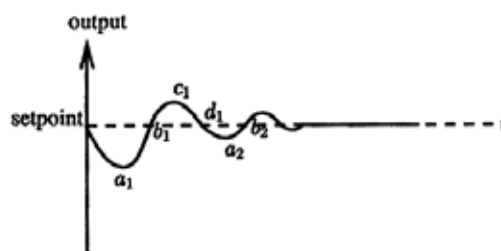
ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต  $e(k)$  และ  $\Delta e(k)$  กับเอาต์พุต  $K'_p$  และ  $K'_i$  สามารถเขียนอยู่ในรูปกฎฟัซซี่ IF-THEN ได้ดังนี้

$$IF e(k) \text{ is } A^i \text{ and } \Delta e(k) \text{ is } B^i, \text{ THEN } K'_p \text{ is } C^j \text{ } K'_i \text{ is } D^j$$

$A^i, B^i, C^j$  และ  $D^j$  คือ เซตฟัซซี่ โดย  $i = 1, 2, \dots, 7$  และ  $j = 1, 2$  ตัวแปรเชิงภาษาสำหรับ  $e(k)$  และ  $\Delta e(k)$  กำหนดเป็น 7 เซตฟัซซี่ ได้แก่ ค่าลบมาก (NB) ค่าลบปานกลาง (NM) ค่าลบน้อย (NS) ค่าศูนย์ (ZO) ค่าบวกน้อย (PS) ค่าบวกปานกลาง (PM) ค่าบวกมาก (PB) และตัวแปรเชิงภาษาสำหรับ  $K'_p$  และ  $K'_i$  กำหนดเป็น 2 เซตฟัซซี่ ได้แก่ เล็ก (S) ใหญ่ (B)

การสร้างกฎฟัซซี่ IF-THEN ทำได้โดยพิจารณาจากรูปที่ 4.5 ณ.เวลาเริ่มต้น ช่วง  $a_1$  สัญญาณค่าผิดพลาดมีค่ามากในขณะที่การเปลี่ยนแปลงสัญญาณค่าผิดพลาดมีค่าน้อย เพราะเพิ่งเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงจากสัญญาณอ้างอิง ณ.จุดนี้การควบคุมแบบสัดส่วนมีผลต่อระบบ เพื่อให้สัญญาณออกเข้าสู่ค่าอ้างอิงโดยเร็ว ดังนั้นกฎฟัซซี่จึงเป็น

$$IF e(k) \text{ is } PB \text{ and } \Delta e(k) \text{ is } ZO, \text{ THEN } K'_p \text{ is } B \text{ } K'_i \text{ is } S$$



รูปที่ 4.5: ผลตอบต่อสัญญาณแบบขั้นบันได

ช่วง  $a_1$  ถึง  $b_1$  สัญญาณค่าผิดพลาดเริ่มมีค่าลดลงในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณค่าผิดพลาดเริ่มมีค่าลบมากขึ้น ดังนั้นช่วงนี้จึงเพิ่มความเพิ่ม  $K'_p$  และ  $K'_i$  เพื่อให้สัญญาณเอาต์พุตเข้าสู่ค่าอ้างอิง ดังนั้นกฎฟัซซีจึงเป็น

*IF  $e(k)$  is PS and  $\Delta e(k)$  is NS, THEN  $K'_p$  is B  $K'_i$  is B*

ช่วง  $b_1$  สัญญาณค่าผิดพลาดมีค่าน้อยมาก การควบคุมแบบสัดส่วนไม่มีผลต่อสัญญาณเอาต์พุตมากนัก ณ.จุดนี้มีเพียงการควบคุมแบบอินทิกรัลเท่านั้นที่มีผลต่อระบบ เพื่อให้ระบบไม่มีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว ดังนั้นกฎฟัซซีจึงเป็น

*IF  $e(k)$  is ZO and  $\Delta e(k)$  is NB, THEN  $K'_p$  is S  $K'_i$  is B*

สำหรับช่วงที่เหลือ ใช้การวิเคราะห์เช่นเดียวกับช่วง  $a_1$  ถึง  $b_1$  ดังนั้นเราสามารถสร้างกฎฟัซซีได้ทั้งหมด 49 กฎ และสามารถเขียนเป็นฐานกฎฟัซซีได้ดังตารางที่ 4.1

จากการใช้การรวมกลุ่มแบบ fuzzy c-menas ร่วมกับการระบุจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสมพบว่า เซตฟัซซีสามารถปรับเปลี่ยนได้ 2 – 7 เซต ดังนั้นฐานกฎฟัซซีสามารถเปลี่ยนแปลงได้ 4, 9, 16, 25, 36, และ 49 กฎ เพราะเซตฟัซซีที่เกิดจากการพล็อต fuzzy partition matrix ไปยังแกนของอินพุตแต่ละตัวมีจำนวนเท่ากัน เพื่อให้เกิดความเข้าใจในการเปลี่ยนแปลงฐานกฎฟัซซี เราจะยกตัวอย่างของฐานกฎถูกเปลี่ยนแปลงไปเหลือเพียง 9 กฎ แสดงตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1: (a) ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับ  $K'_p$  (b) ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับ  $K'_i$

		$\Delta e(k)$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$e(k)$	NB	B	B	B	B	B	B	B
	NM	S	B	B	B	B	B	S
	NS	S	S	B	B	B	S	S
	ZO	S	S	S	B	S	S	S
	PS	S	S	B	B	B	S	S
	PM	S	B	B	B	B	B	S
	PB	B	B	B	B	B	B	B

(a)

		$\Delta e(k)$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$e(k)$	NB	S	S	S	S	S	S	S
	NM	S	S	B	B	B	S	S
	NS	S	B	B	B	B	B	S
	ZO	B	B	B	B	B	B	B
	PS	S	B	B	B	B	B	S
	PM	S	S	B	B	B	S	S
	PB	S	S	S	S	S	S	S

(b)

ตารางที่ 4.2: (c) ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับ  $K'_p$  (d) ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับ  $K'_i$  เมื่อจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสมเป็น 3 กลุ่มข้อมูล

		$\Delta e(k)$		
		NS	ZO	PS
$e(k)$	NS	B	B	B
	ZO	S	B	S
	PS	B	B	B

(c)

		$\Delta e(k)$		
		NS	ZO	PS
$e(k)$	NS	B	B	B
	ZO	B	B	B
	PS	B	B	B

(d)

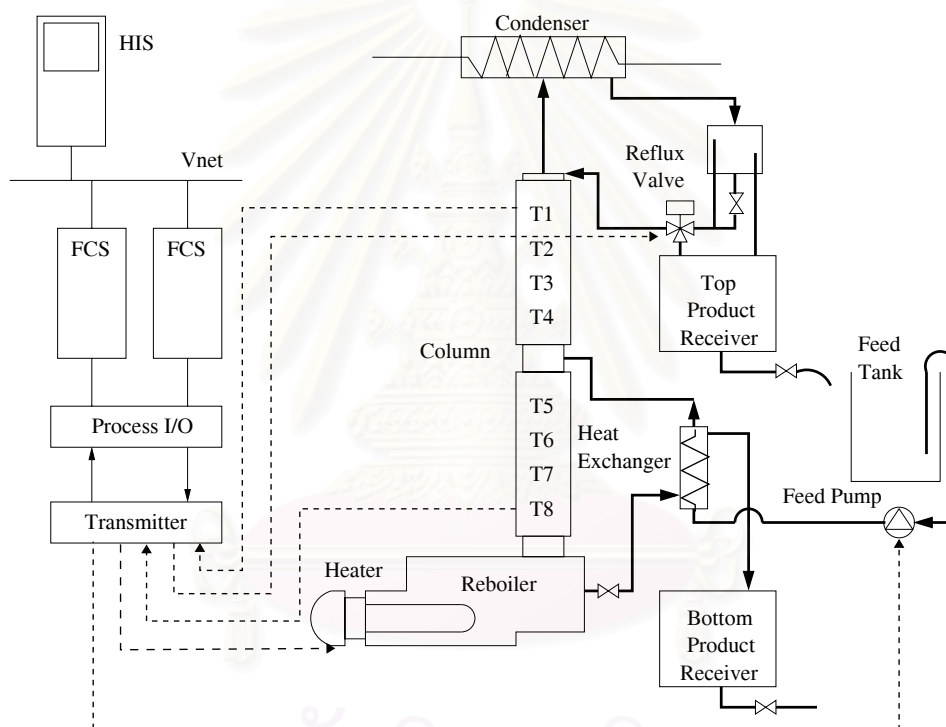
### 4.1.3 Defuzzification โดยใช้วิธีcentroid

การรวมกฎเป็นการหาค่าเอาต์พุตของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี่ ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีcentroid [9] ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกและแพร่หลาย สมการในการหาค่าเอาต์พุตแสดงดังนี้

$$\Delta u_o = \frac{\sum_i \Delta u_i \cdot \mu_i^{(\Delta U)}(\Delta u_i)}{\sum_i \mu_i^{(\Delta U)}(\Delta u_i)} \quad (4.6)$$

$\Delta U$  คือ เซตฟัซซี่เอาต์พุต,  $\mu_i$  คือ ค่าความเป็นสมาชิกของเซตที่  $i$  ในเซตฟัซซี่  $\Delta U$

## 4.2 การควบคุมหอกลิ้นแยกสารผสมสองชนิดโดยดำเนินการผ่านDCS



รูปที่ 4.6: แผนภาพการเชื่อมต่อระหว่างDCSกับหอกลิ้นแยกสารผสมสองชนิด

หอกลิ้นแยกสารผสมสองชนิดของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมเป็นของบริษัท Amfield รุ่น UOP3CC โดยที่การเชื่อมต่อระหว่างDCSกับหอกลิ้นแยกสารผสมสองชนิดแสดงดังรูปที่ 4.6 โครงสร้างของหอกลิ้นประกอบด้วยหอกลิ้น (Column) ซึ่งภายในแบ่งออกเป็น 8 ชั้นโดยใช้แผ่นตะแกรง (Sieve tray) สารผสมระหว่างเอทานอลกับน้ำกลั่นถูกป้อนเข้าหอกลิ้นระหว่างชั้นที่ 4 กับชั้นที่ 5 การควบคุมหอกลิ้นเป็นโครงสร้างการควบคุมแบบสมดุพลังงาน (LV structure) แบ่งออกเป็น 2 วงรอบคือ วงรอบยอดหอใช้อัตราการป้อนกลับสารที่ยอดหอ (Reflux flow rate) และวงรอบฐานหอใช้การควบคุมอัตราการป้อนไอสาร (Reboiler rate) ในการควบคุมอุณหภูมิที่ยอดหอและฐานหอตามลำดับ วัตถุประสงค์ของการควบคุมคือ รักษาอุณหภูมิที่ยอดหอและฐานหอไว้ที่ค่ากำหนดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราการป้อนสารเข้า

กลางหอ ค่ากำหนดความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ยอดหอ ฐานหอ และสารผสมที่ถูกป้อนเข้ากลางหอ กำหนดโดยอุณหภูมิแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3: ความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ยอดหอ สารผสมที่ถูกป้อนเข้ากลางหอ และสารผลิตภัณฑ์ฐานหอ ที่อุณหภูมิที่กำหนด

	สารผลิตภัณฑ์ยอดหอ	สารผสมที่ถูกป้อนเข้ากลางหอ	สารผลิตภัณฑ์ฐานหอ
ความเข้มข้น (%โดยปริมาตร)	91.5	40	16
อุณหภูมิ (°C)	83.4	55	87.0

การทดลองการควบคุมหอกลับแยกสารผสมสองชนิดโดยใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีสามารถออกแบบเป็น 4 การทดลองดังตารางที่ 4.4 การทดลองที่ 1 เป็นการทดลองในกรณีที่ตัวควบคุม PI แบบกำหนดพารามิเตอร์คงที่ ผลการทดลองที่ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองในการทดลองที่ 4 ซึ่งเป็นการทดลองในกรณีที่ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี ในการทดลองที่ 2 และ 3 ใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีที่วงรอบใดวงรอบหนึ่งเพื่อทำการหาฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่เหมาะสมของข้อมูลอินพุตและเอาต์พุต ทั้งนี้ในการทดลองดังกล่าวมีการใช้ตัวควบคุม PI แบบกำหนดพารามิเตอร์คงที่ในวงรอบที่เหลือเพราะต้องการให้อุณหภูมิที่วงรอบดังกล่าวอยู่ที่ค่ากำหนดและเพื่อให้ได้ข้อมูลอินพุตที่ดี สามารถนำไปใช้ในการรวมกลุ่มข้อมูลของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี

ตารางที่ 4.4: รายละเอียดการทดลองการควบคุมหอกลับแยกสารผสมสองชนิดของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม UOP3CC

การทดลอง	การควบคุมในวงรอบยอดหอ	การควบคุมในวงรอบฐานหอ
1	ตัวควบคุม PI แบบกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่	ตัวควบคุม PI แบบกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่
2	ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี	ตัวควบคุม PI แบบกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่
3	ตัวควบคุม PI แบบกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่	ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี
4	ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี	ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี

ขั้นตอนการทดลองเริ่มจากตั้งค่ากำหนดของอุณหภูมิที่ยอดหอเท่ากับ  $83.4^{\circ}\text{C}$  และที่ฐานหอเท่ากับ  $87^{\circ}\text{C}$  โดยที่ความดันภายในหอกลั่นคงที่ เติมสารผสมระหว่างเอทานอลกับน้ำกลั่นโดยมีความเข้มข้นของสารผสมในหม้อต้มซ้ำประมาณ 25 % โดยปริมาตร และความเข้มข้นของสารผสมที่ถูกป้อนเข้ากลางหอกลั่นประมาณ 40 % โดยปริมาตร เริ่มต้นอัตราการป้อนไอสารที่ฐานหอ 40 % ของอัตราการป้อนไอสารที่ฐานหอสูงสุด 1.5 กิโลวัตต์ ระยะเวลา 50 นาที เมื่ออุณหภูมิที่ยอดหอและฐานหอสูงขึ้นใกล้จุดทำงาน ให้ปรับการทำงานเข้าสู่โหมดควบคุมและทำการป้อนสารผสมเข้ากลางหอกลั่นด้วยอัตรา 10 % (หรือ 30 มิลลิลิตร/นาที) และเริ่มบันทึกผลการทดลองที่เวลา 60 นาที ระยะเวลา 75 นาที ปรับอัตราการที่ป้อนสารผสมเข้ากลางหอกลั่นเป็น 15 % (หรือ 50 มิลลิลิตร/นาที) และระยะเวลา 90 นาที ปรับอัตราการป้อนสารผสมเข้ากลางหอกลั่นกลับมาที่ 10 % (หรือ 30 มิลลิลิตร/นาที) สิ้นสุดการบันทึกผลการทดลองที่เวลา 105 นาที

ในการทดลอง ค่าพารามิเตอร์ของการรวมกลุ่มข้อมูลและตารางค่าอัตราขยายฟัซซีกำหนดตาม [3] ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีสามารถกำหนดจากการทดลองดังนี้

- ค่าพารามิเตอร์ของการรวมกลุ่มข้อมูล และตารางค่าอัตราขยายฟัซซี
  - กำหนดให้จำนวนฟัซซีเซตของข้อมูลที่เข้าสู่ระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีเป็น 3, 5, 7 เซต และจำนวนเซตของข้อมูลที่ออกจากระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีคงที่ 2 เซต
  - เลือกใช้การรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means และกำหนดให้  $m' = 2$  และ tolerance = 0.001
  - เลือกใช้การระบุหาจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสม โดยใช้ compactness and separation validity function
  - เลือกใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI
- ค่าพารามิเตอร์ของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีในการควบคุมวงรอบยอดหอ
  - $e(k) \in [-0.4, 0.3]$  และ  $\Delta e(k) \in [-0.2, 0.15]$
  - $K_p \in [3.556, 0.01]$  และ  $K_i \in [7.112, 0]$
  - กำหนดอัตราการซั๊กตัวอย่างเพื่อบันทึกข้อมูลทุก 10 วินาที
  - เลือกใช้การแปลงฟัซซีแบบสามเหลี่ยม
  - เลือกใช้การตัดสินใจฟัซซีแบบ max-min
  - เลือกใช้การแปลงกลับฟัซซีแบบจุดศูนย์ถ่วง
- ค่าพารามิเตอร์ของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีในการควบคุมวงรอบฐานหอ
  - $e(k) \in [-0.5, 0.5]$  และ  $\Delta e(k) \in [-0.4, 0.4]$

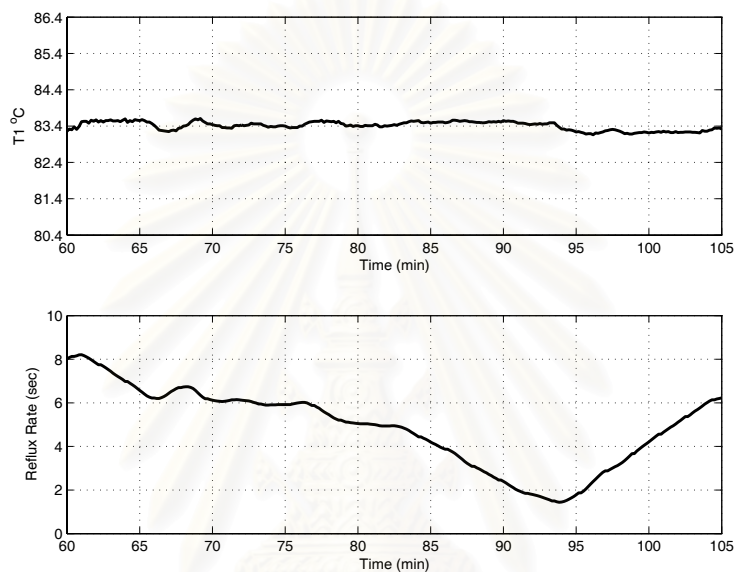
- $K_p \in [0.9336, 0.01]$  และ  $K_i \in [0.3, 0]$
- กำหนดอัตราการชักตัวอย่างเพื่อบันทึกข้อมูลทุก 10 วินาที
- เลือกใช้การแปลงฟูซซีแบบสามเหลี่ยม
- เลือกใช้การตัดสินใจฟูซซีแบบ max-min
- เลือกใช้การแปลงกลับฟูซซีแบบจุดศูนย์ถ่วง



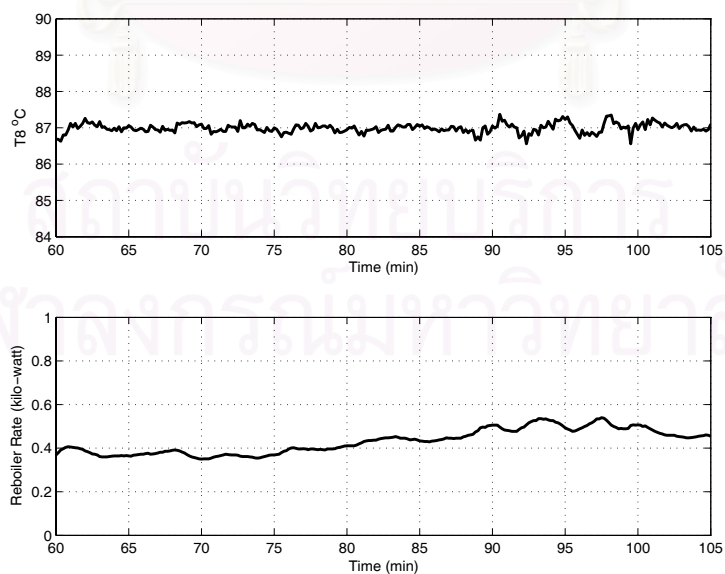
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## การทดลองที่ 1

การควบคุมอุณหภูมิวงรอบยอตหอและวงรอบฐานหอโดยใช้ตัวควบคุม PI แบบกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 สัญญาณออกมีการแกว่งแต่สามารถควบคุมให้อยู่รอบๆ ค่ากำหนดได้ ทั้งนี้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI หาได้จากวิธี Ziegler-Nichols แบบวงเปิด โดยตัวควบคุม PI ของวงรอบยอตหอมีค่าพารามิเตอร์  $K_p = 2.667$  และ  $T_i = 0.5$  และตัวควบคุม PI ของวงรอบฐานหอมีค่าพารามิเตอร์  $K_p = 0.7$  และ  $T_i = 3.112$



รูปที่ 4.7: อุณหภูมิที่ยอตหอและอัตราการป้อนกลับสารที่ยอตหอของการทดลองที่ 1



รูปที่ 4.8: อุณหภูมิที่ฐานหอและอัตราการป้อนไอสารที่ฐานหอของการทดลองที่ 1

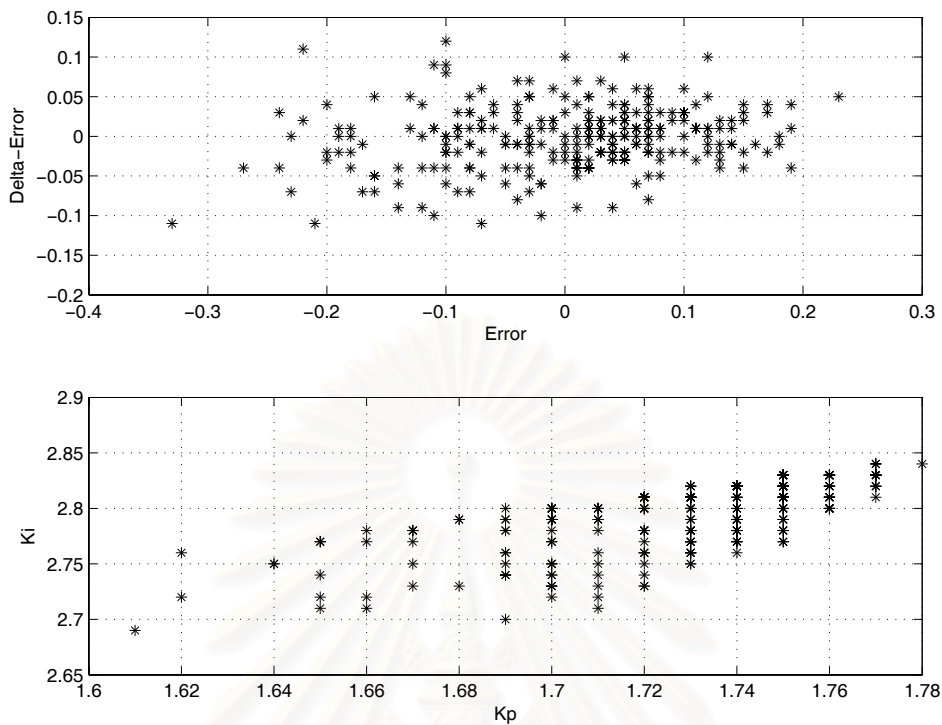


## การทดลองที่ 2

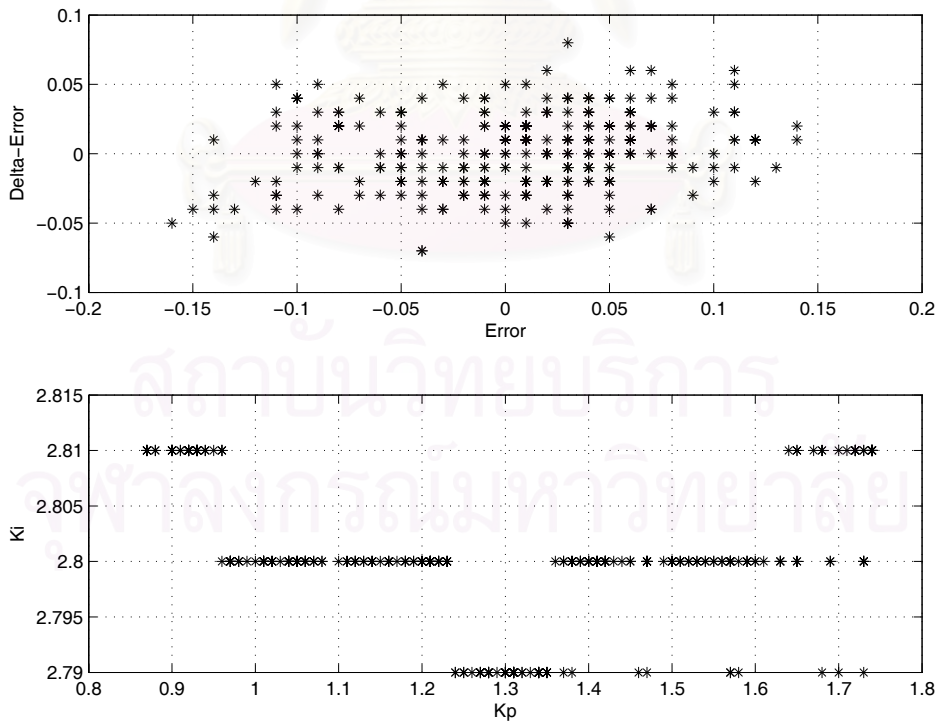
ใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีในการควบคุมอุณหภูมิวงรอบยอตหอ และใช้ตัวควบคุม PI แบบกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่ในการควบคุมอุณหภูมิวงรอบฐานหอ การกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตเริ่มต้นของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีในการควบคุมวงรอบยอตหอแสดงดังรูปที่ 4.9 และการกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตสุดท้ายในการควบคุมวงรอบยอตหอแสดงดังรูปที่ 4.10 จากการกระจายตัวของข้อมูลสามารถระบุจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสมของข้อมูลอินพุต  $e(k)$  และ  $\Delta e(k)$  ได้ 3 กลุ่ม และกลุ่มข้อมูลเอาต์พุต  $K_p$  และ  $K_i$  กำหนดให้ คงที่ 2 กลุ่ม ใช้การรวมกลุ่มข้อมูลแบบ fuzzy c-means ในการกำหนดรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่เหมาะสมของข้อมูลอินพุตและข้อมูลเอาต์พุต

จากการพล็อต fuzzy partition matrix ของข้อมูลอินพุตไปยังแกน  $e(k)$  และ  $\Delta e(k)$  รูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแสดงดังรูปที่ 4.11 และ 4.13 ตามลำดับ และพล็อต fuzzy partition matrix ของข้อมูลเอาต์พุตไปยังแกน  $K_p$  และ  $K_i$  รูปร่างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแสดงดังรูปที่ 4.15 และ 4.17 ตามลำดับ จากนั้นใช้ฟังก์ชันแบบสามเหลี่ยมในการประมาณฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตแต่ละกลุ่มแสดงดังรูปที่ 4.12, 4.14, 4.16 และ 4.18 ตามลำดับ

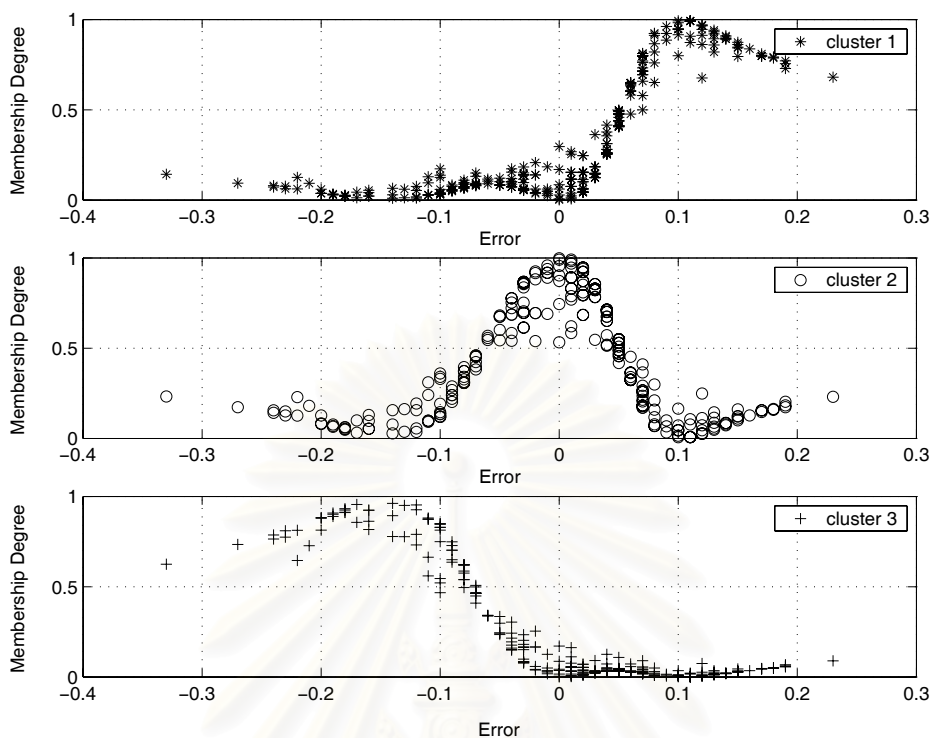
ผลการควบคุมอุณหภูมิวงรอบยอตหอและวงรอบฐานหอแสดงดังรูปที่ 4.19 และ 4.21 ตามลำดับ อุณหภูมิที่ยอตหอคงค่าอยู่ที่ค่ากำหนดได้ดีขึ้นและสามารถควบคุมอุณหภูมิที่ฐานหอได้ดีเช่นเดียวกัน สำหรับค่าพารามิเตอร์  $K_p$  และ  $K_i$  ของการควบคุมในวงรอบยอตหอแสดงดังรูปที่ 4.20



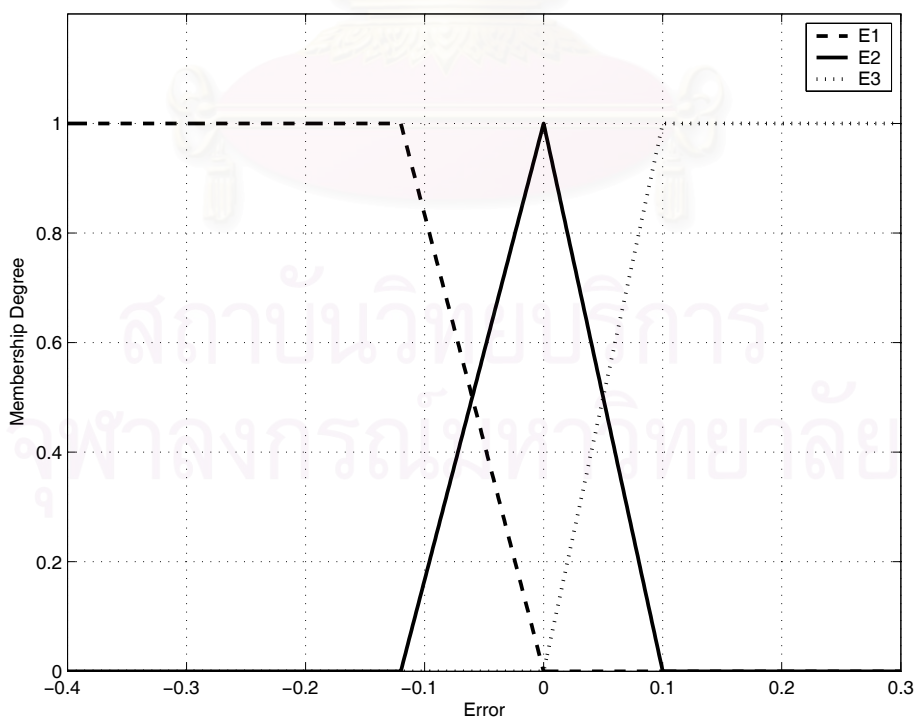
รูปที่ 4.9: การกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตเริ่มต้นของการทดลองที่ 2



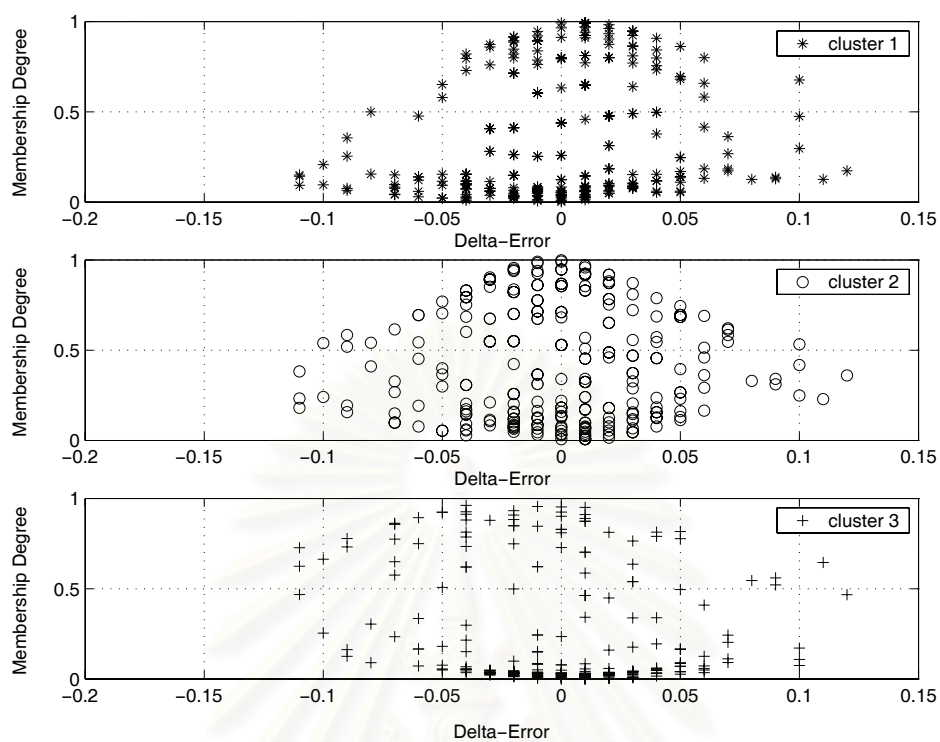
รูปที่ 4.10: การกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตสุดท้ายของการทดลองที่ 2



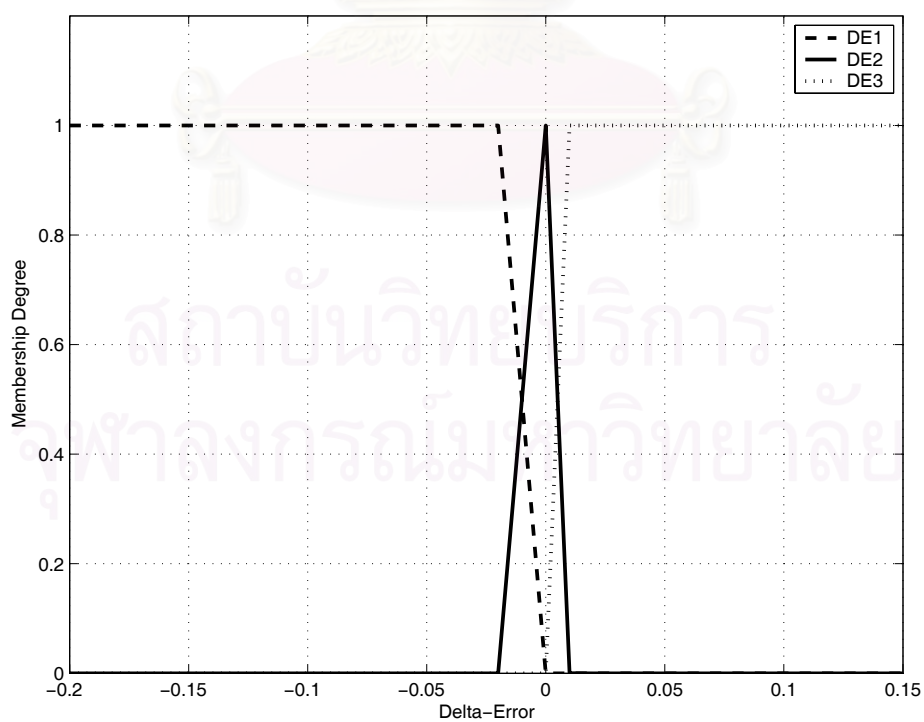
รูปที่ 4.11: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Error กับ fuzzy partition matrix ของข้อมูลอินพุตของการทดลองที่ 2



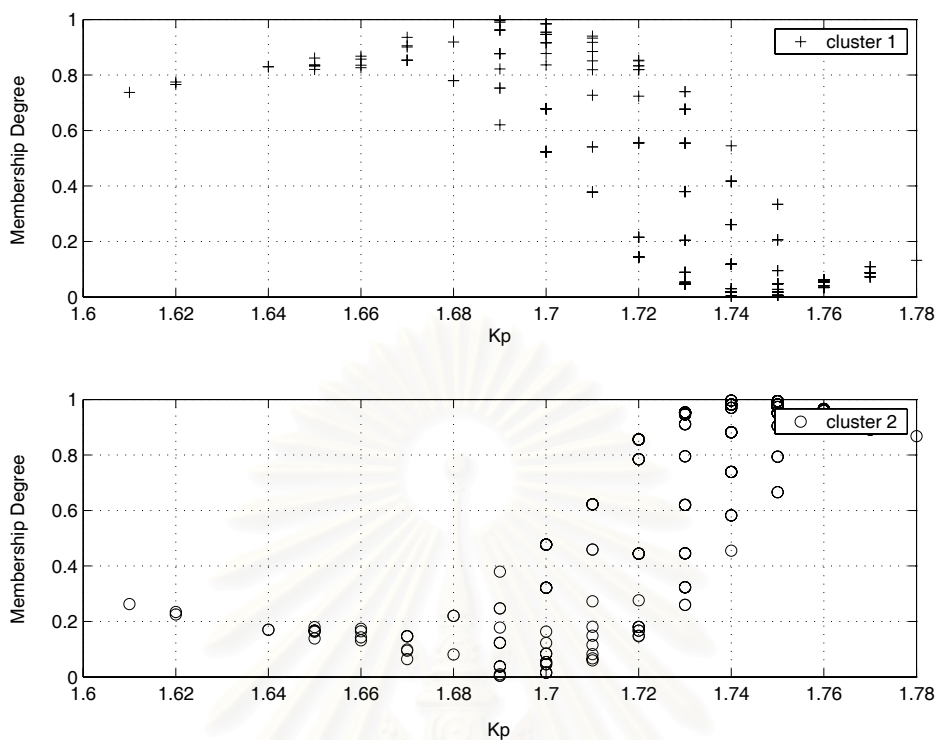
รูปที่ 4.12: ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของกลุ่มข้อมูลอินพุต Error ของการทดลองที่ 2



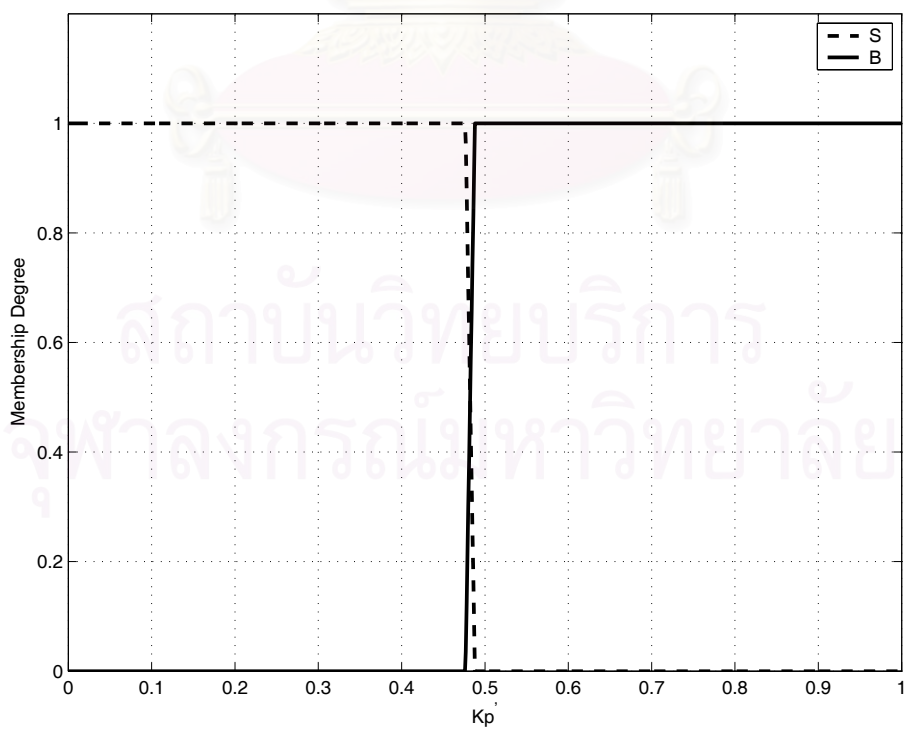
รูปที่ 4.13: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Delta-Error กับ fuzzy partition matrix ของข้อมูลอินพุตของการทดลองที่ 2



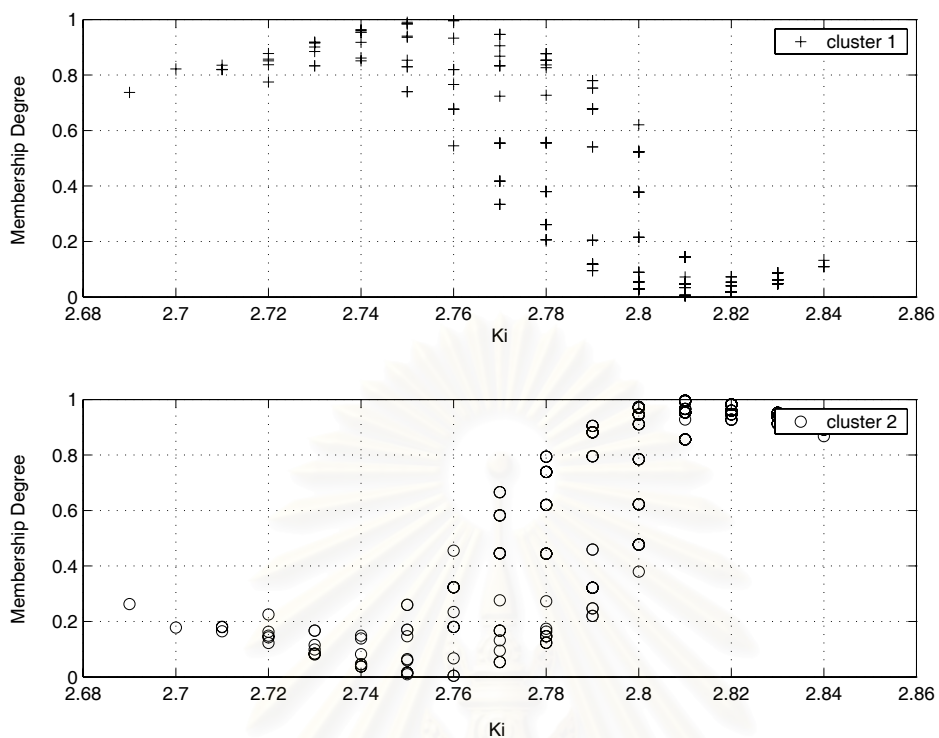
รูปที่ 4.14: ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของกลุ่มข้อมูลอินพุต Delta-Error ของการทดลองที่ 2



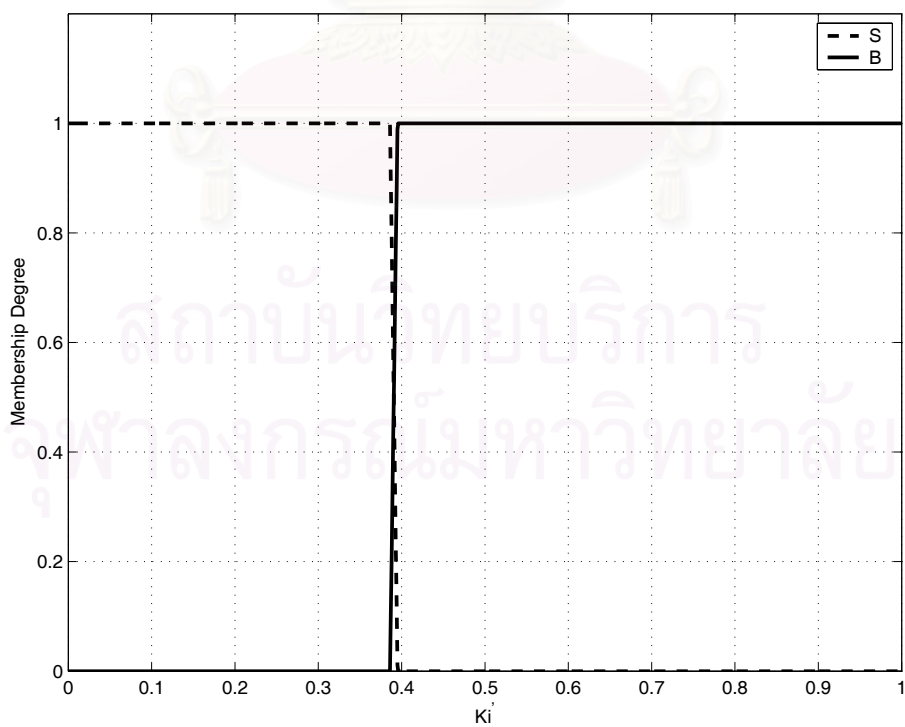
รูปที่ 4.15: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $K_p$  กับ fuzzy partition matrix ของข้อมูลเอทพุตของการทดลองที่ 2



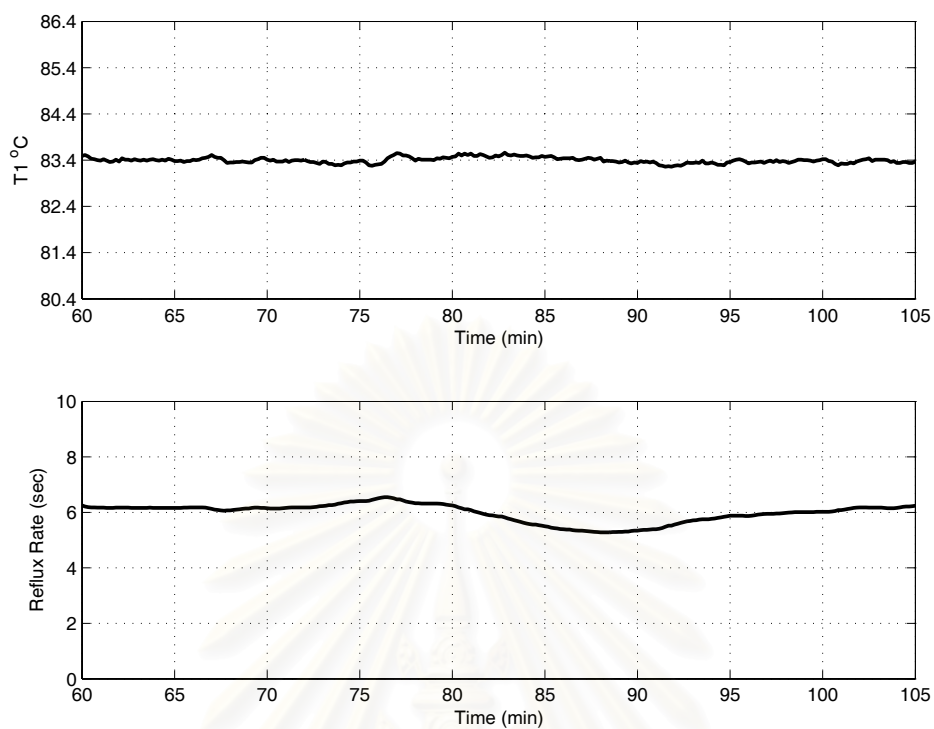
รูปที่ 4.16: ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของกลุ่มข้อมูลเอทพุต  $K'_p$  ของการทดลองที่ 2



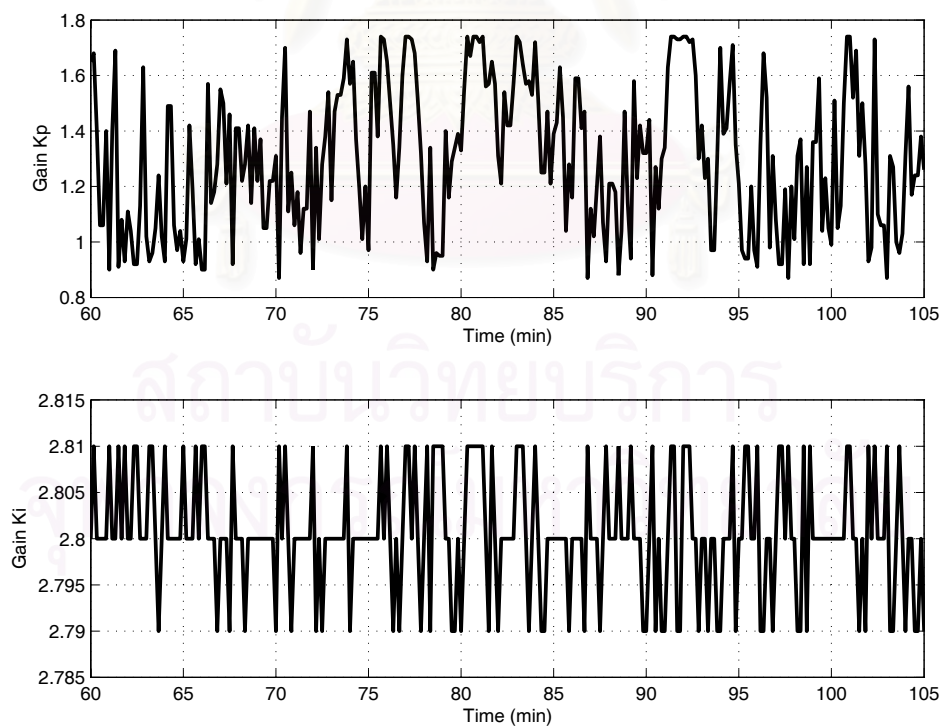
รูปที่ 4.17: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $K_i$  กับ fuzzy partition matrix ของข้อมูลเอาต์พุตของการทดลองที่ 2



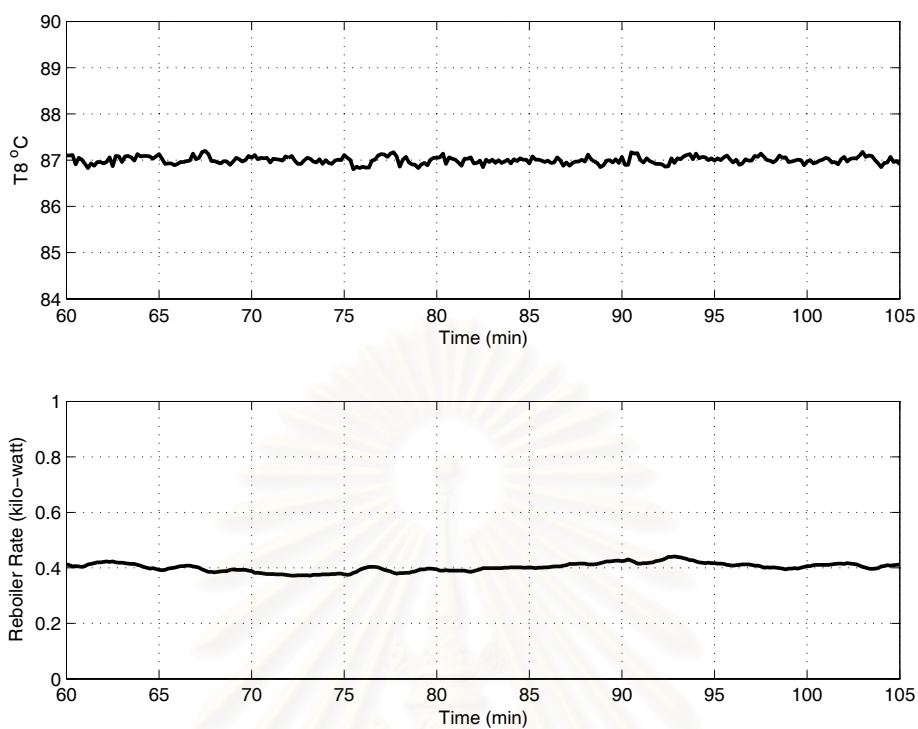
รูปที่ 4.18: ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของกลุ่มข้อมูลเอาต์พุต  $K_i$  ของการทดลองที่ 2



รูปที่ 4.19: อุณหภูมิที่ยอดหอและอัตราการป้อนกลับสารที่ยอดหอของการทดลองที่ 2



รูปที่ 4.20: ค่าพารามิเตอร์  $K_p$  และ  $K_i$  ของวงรอบยอดหอของการทดลองที่ 2



รูปที่ 4.21: อุณหภูมิที่ฐานหอและอัตราการป้อนไอน้ำที่ฐานหอของการทดลองที่ 2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



### การทดลองที่ 3

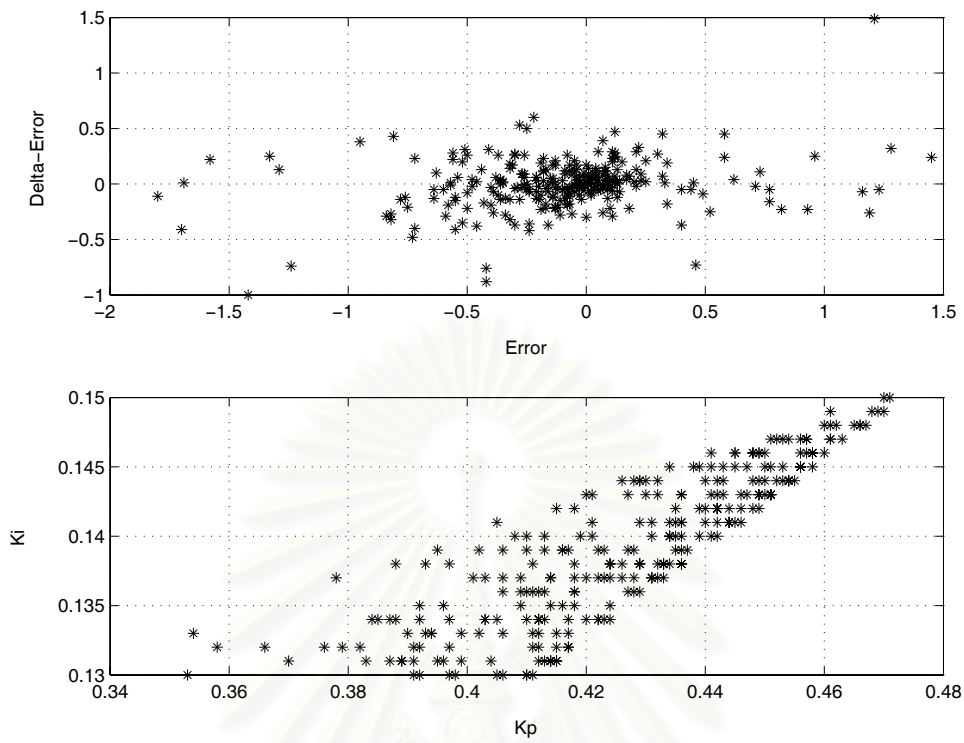
ใช้ตัวควบคุม PI แบบกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่ในการควบคุมอุณหภูมิวงรอบยอหด และใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีในการควบคุมอุณหภูมิวงรอบฐานห่อ การกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตเริ่มต้นของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีในการควบคุมวงรอบฐานห่อแสดงดังรูปที่ 4.22 และการกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตสุดท้ายของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีในการควบคุมวงรอบฐานห่อแสดงดังรูปที่ 4.23 ในการทดลองสามารถระบุจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสมของข้อมูลอินพุต  $e(k)$  และ  $\Delta e(k)$  ได้เป็น 3 กลุ่ม และกลุ่มข้อมูลเอาต์พุต  $K_p$  และ  $K_i$  กำหนดให้คงที่ 2 กลุ่ม

จากการกำหนดรูปร่างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่เหมาะสมของข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตในการรวมกลุ่มข้อมูลแบบ fuzzy c-means และพล็อต fuzzy partition matrix ของข้อมูลอินพุตลงบนแกน  $e(k)$  และ  $\Delta e(k)$  รูปร่างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแสดงดังรูปที่ 4.24 และ 4.26 ตามลำดับ และพล็อต fuzzy partition matrix ของข้อมูลเอาต์พุตลงบนแกน  $K_p$  และ  $K_i$  รูปร่างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแสดงดังรูปที่ 4.28 และ 4.30 ตามลำดับ สามารถประมาณรูปร่างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกโดยใช้ฟังก์ชันแบบสามเหลี่ยมของข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตแสดงดังรูปที่ 4.25, 4.27, 4.29 และ 4.31 ตามลำดับ

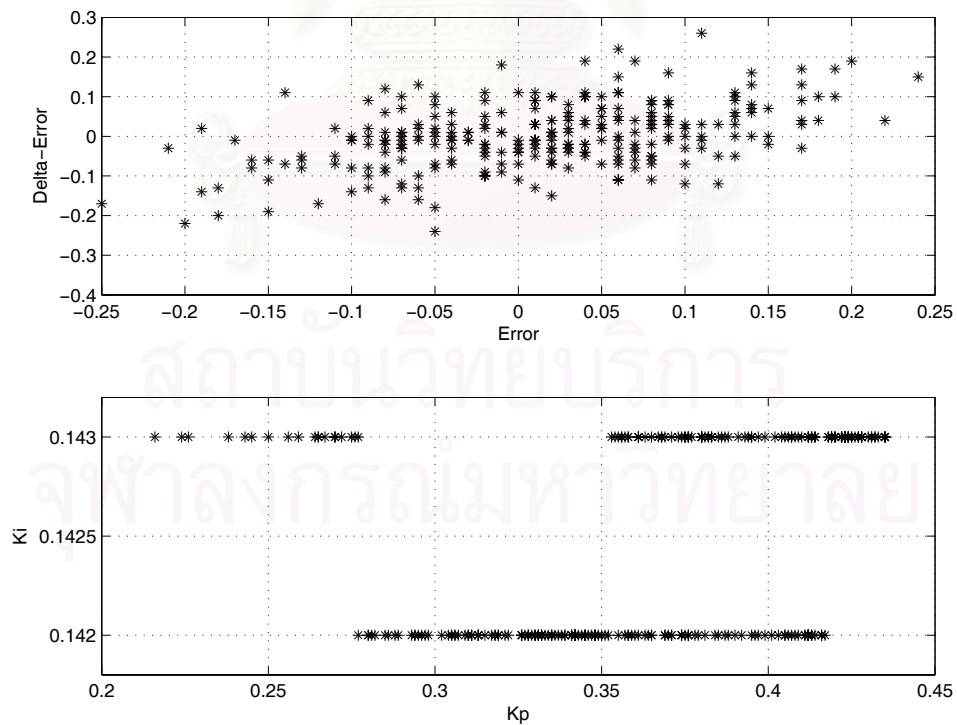
ผลการควบคุมอุณหภูมิวงรอบฐานห่อและวงรอบยอหดแสดงดังรูปที่ 4.32 และ 4.34 ตามลำดับ ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีสามารถควบคุมอุณหภูมิฐานห่อคงที่ที่ค่ากำหนดได้เป็นอย่างดี และตัวควบคุม PI แบบกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่ที่สามารถควบคุมอุณหภูมียอหดได้แต่ยังมีการแกว่งของอุณหภูมิต่อรอบๆค่ากำหนดอยู่ ส่วนค่าพารามิเตอร์  $K_p$  และ  $K_i$  ของวงรอบฐานห่อแสดงดังรูปที่ 4.33

จากการทดลองหลายครั้งพบว่า ถ้าสามารถควบคุมอุณหภูมิที่ฐานห่อให้ติดตามค่ากำหนดได้ดีและอัตราการป้อนไอสารไม่เปลี่ยนแปลงมากจะส่งผลให้การควบคุมอุณหภูมียอหดทำได้ง่าย ดังนั้นการใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีในการควบคุมวงรอบยอหดและฐานห่อในการทดลองที่ 2 และ 3 ให้ผลการทดลองที่ดี จึงมีความเป็นไปได้ว่า ถ้าใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีมาควบคุมวงรอบยอหดและฐานห่อพร้อมกันน่าจะทำให้ผลควบคุมที่ดี

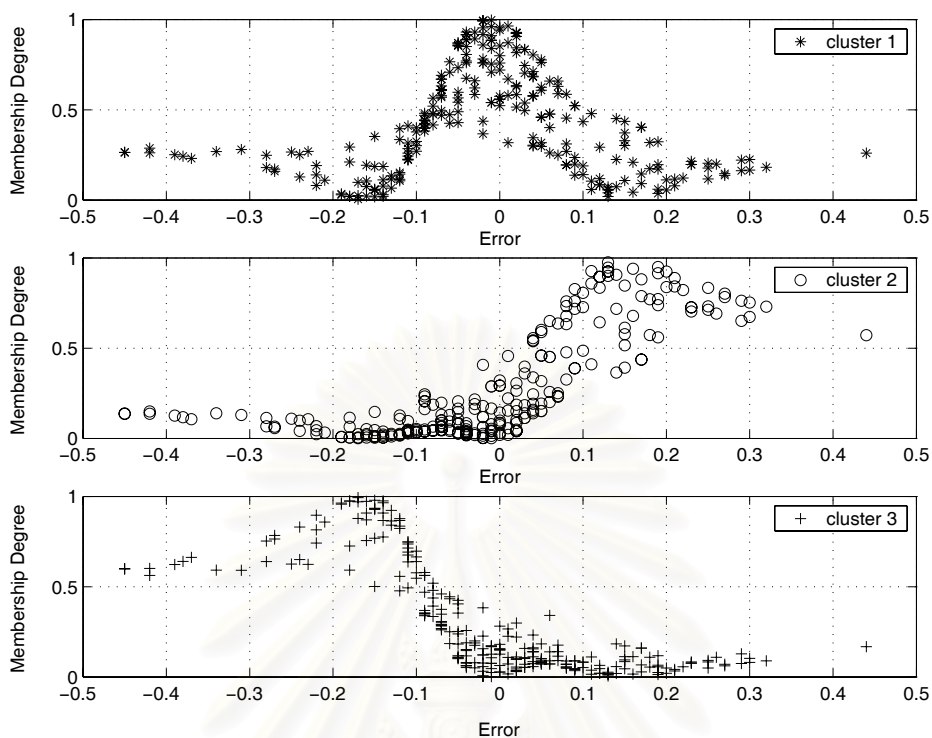
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



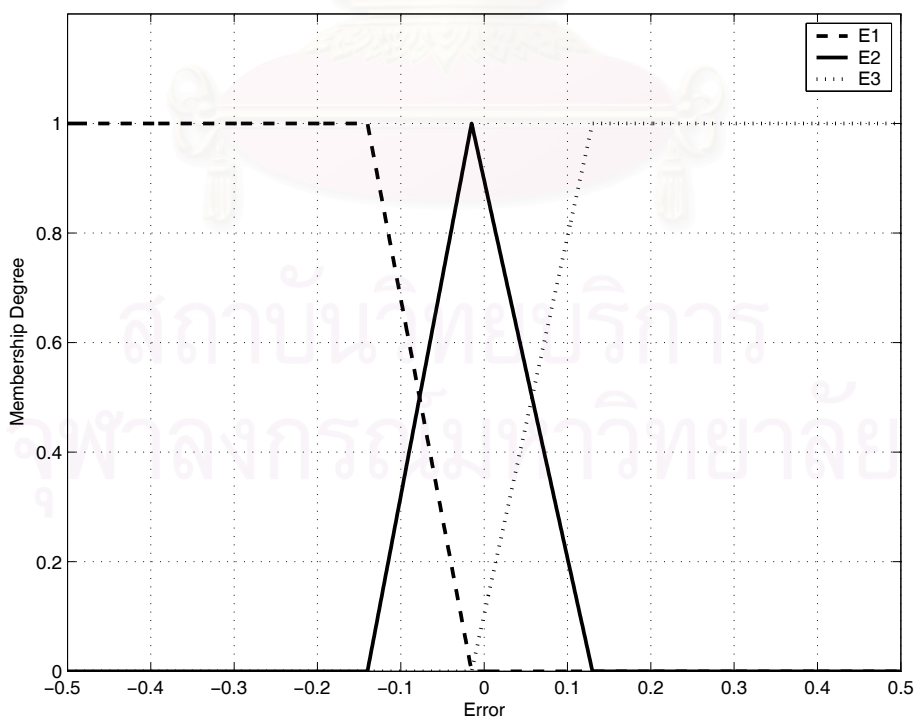
รูปที่ 4.22: การกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตเริ่มต้นของการทดลองที่ 3



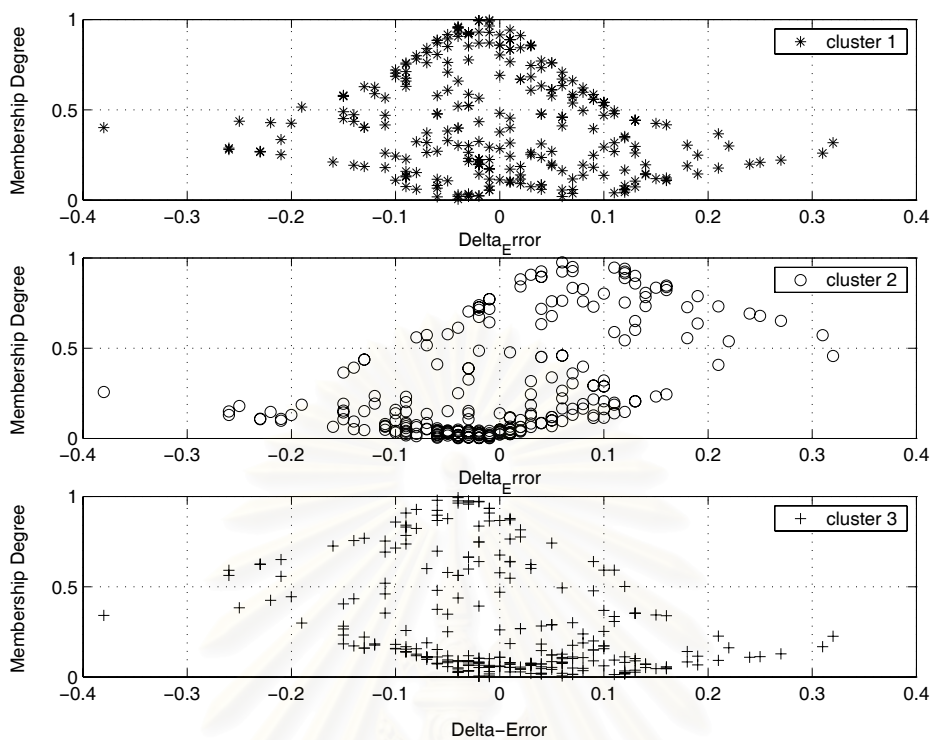
รูปที่ 4.23: การกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตสุดท้ายของการทดลองที่ 3



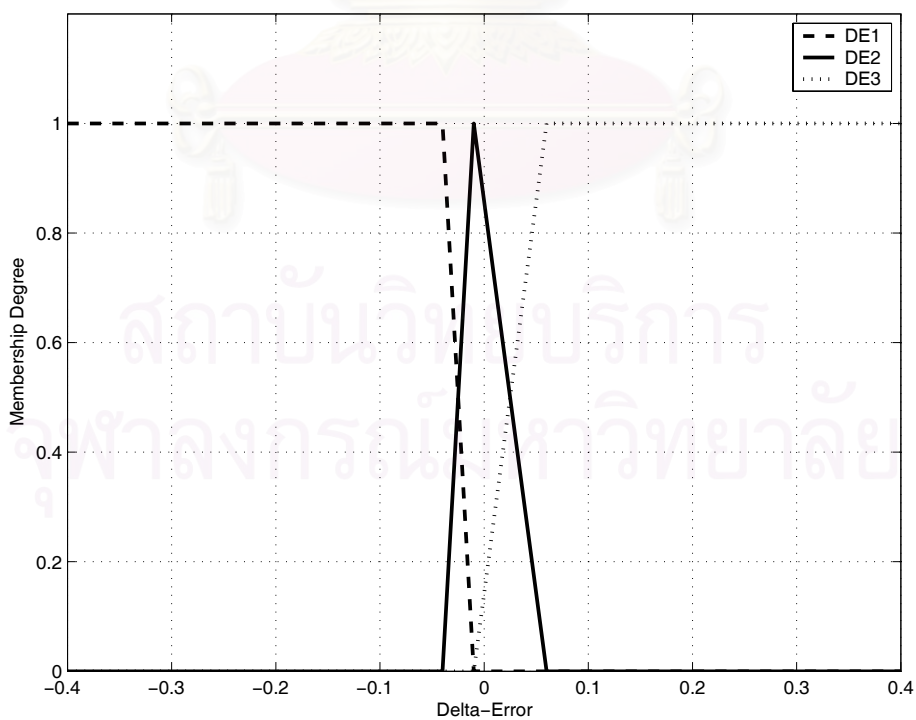
รูปที่ 4.24: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Error กับ fuzzy partition matrix ของข้อมูลอินพุตของการทดลองที่ 3



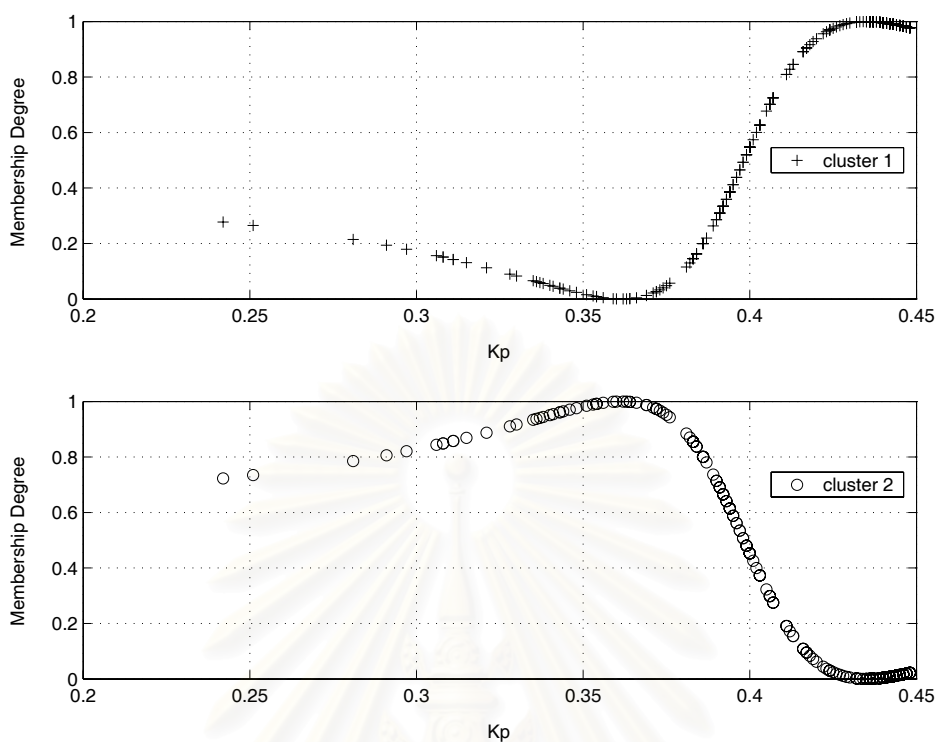
รูปที่ 4.25: ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของกลุ่มข้อมูลอินพุต Error ของการทดลองที่ 3



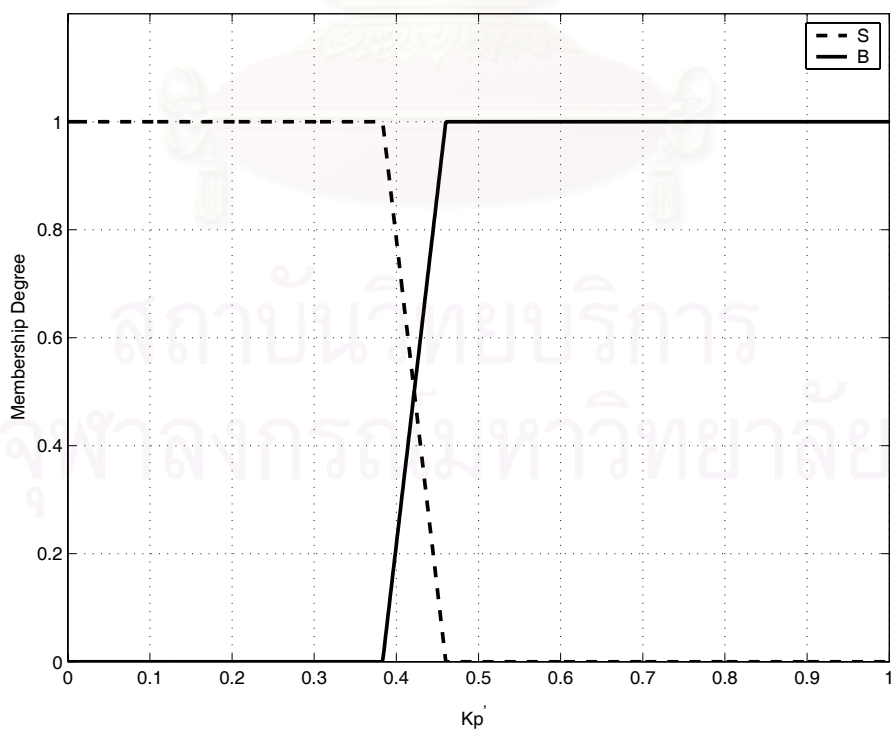
รูปที่ 4.26: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Delta-Error กับ fuzzy partition matrix ของข้อมูลอินพุตของการทดลองที่ 3



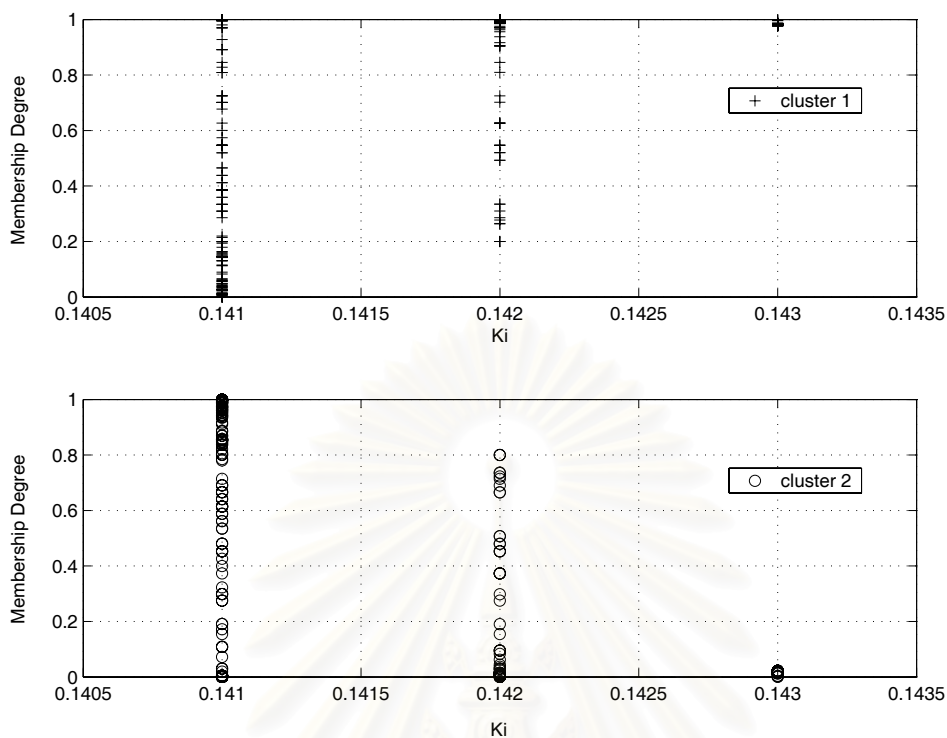
รูปที่ 4.27: ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของกลุ่มข้อมูลอินพุต Delta-Error ของการทดลองที่ 3



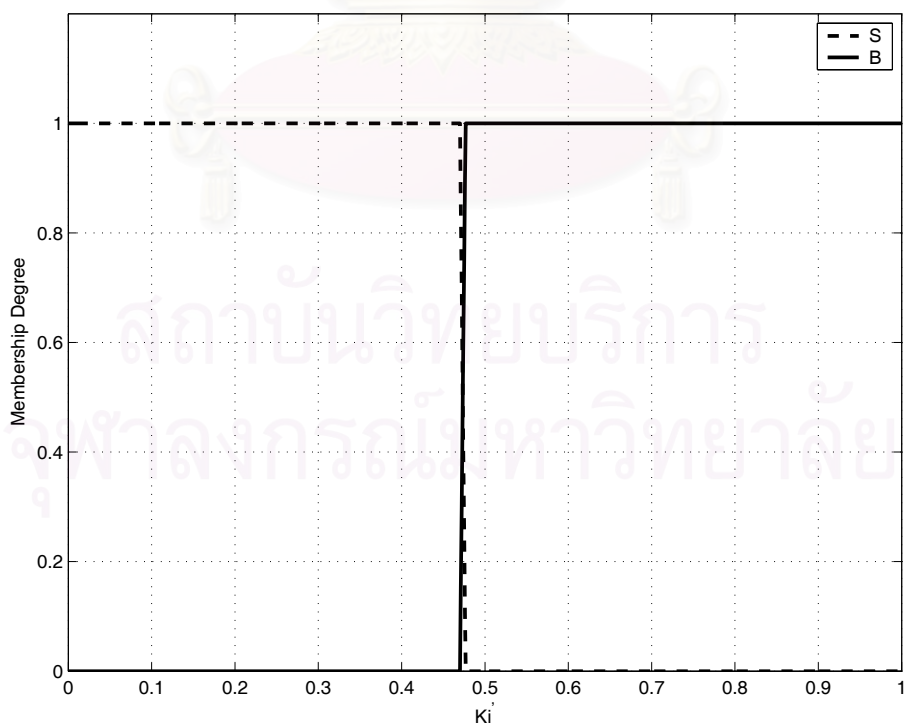
รูปที่ 4.28: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $K_p$  กับ fuzzy partition matrix ของข้อมูลเอทพุตของการทดลองที่ 3



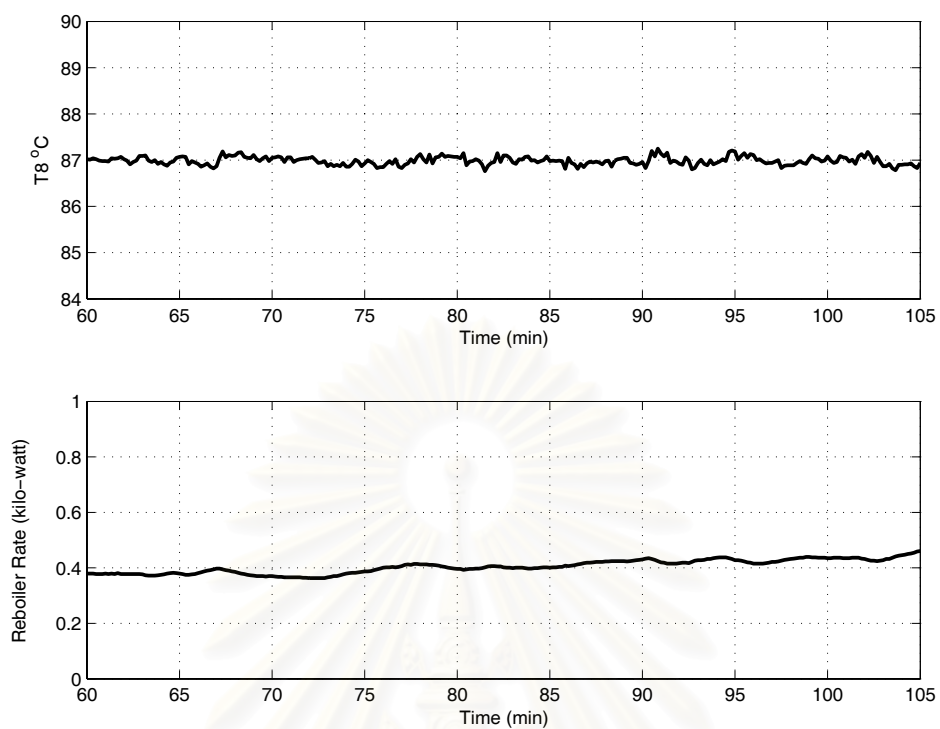
รูปที่ 4.29: ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของกลุ่มข้อมูลเอทพุต  $K_p'$  ของการทดลองที่ 3



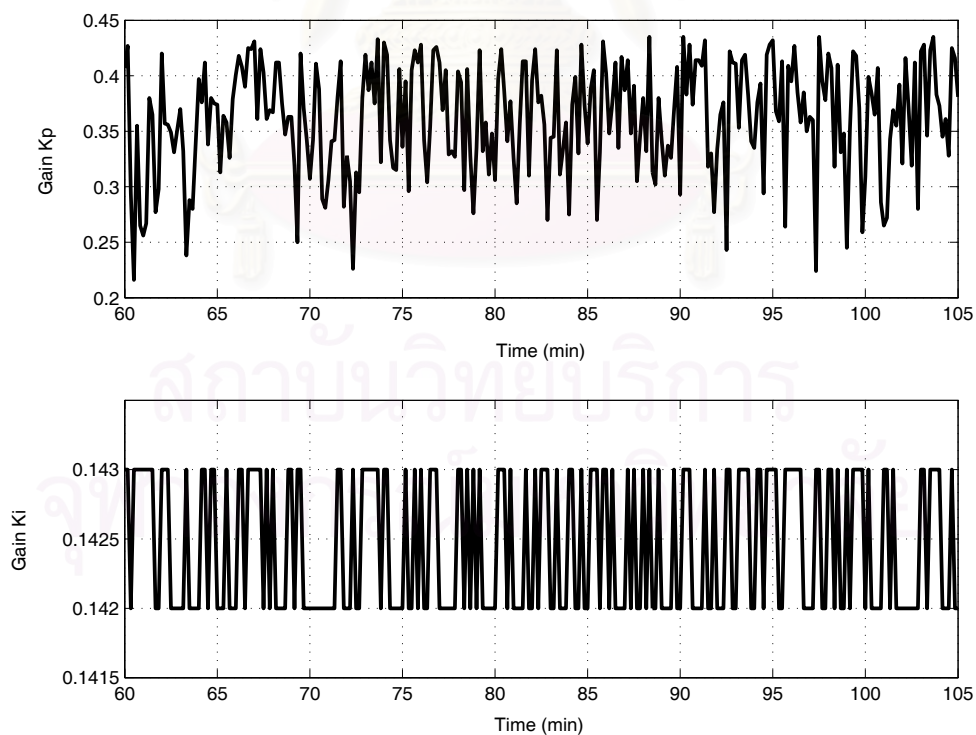
รูปที่ 4.30: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $K_i$  กับ fuzzy partition matrix ของข้อมูลเอาต์พุตของการทดลองที่ 3



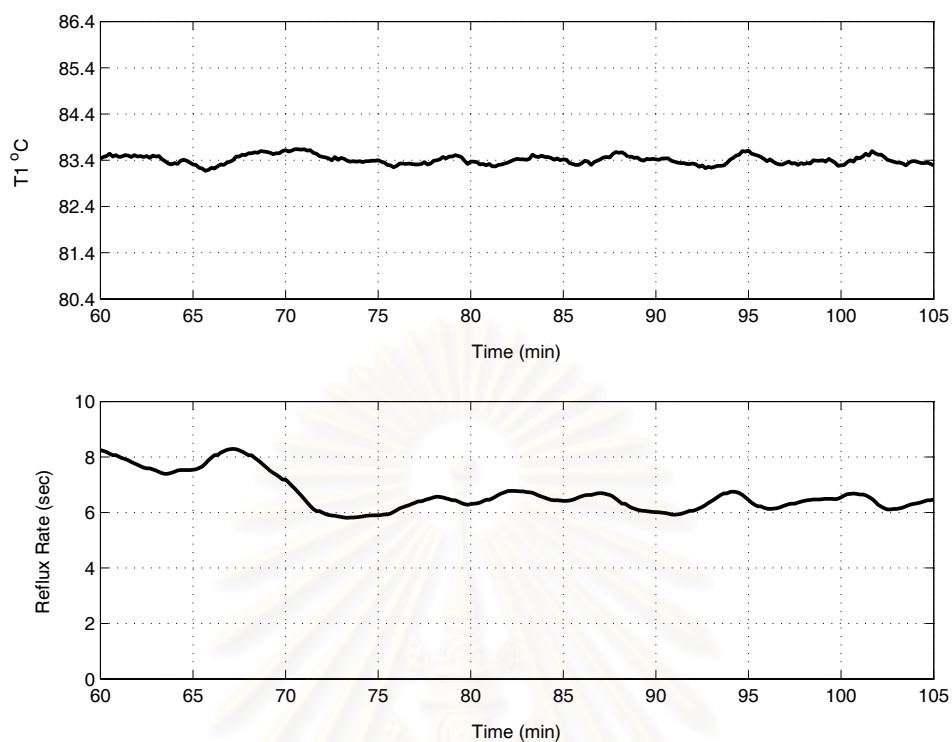
รูปที่ 4.31: ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของกลุ่มข้อมูลเอาต์พุต  $K'_i$  ของการทดลองที่ 3



รูปที่ 4.32: อุณหภูมิที่ฐานหอและอัตราการป้อนไอสารที่ฐานหอของการทดลองที่ 3



รูปที่ 4.33: ค่าพารามิเตอร์  $K_p$  และ  $K_i$  ของวงรอบฐานหอของการทดลองที่ 3



รูปที่ 4.34: อุณหภูมิที่ยอดหอและอัตราการป้อนกลับสารที่ยอดหอของการทดลองที่ 3

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

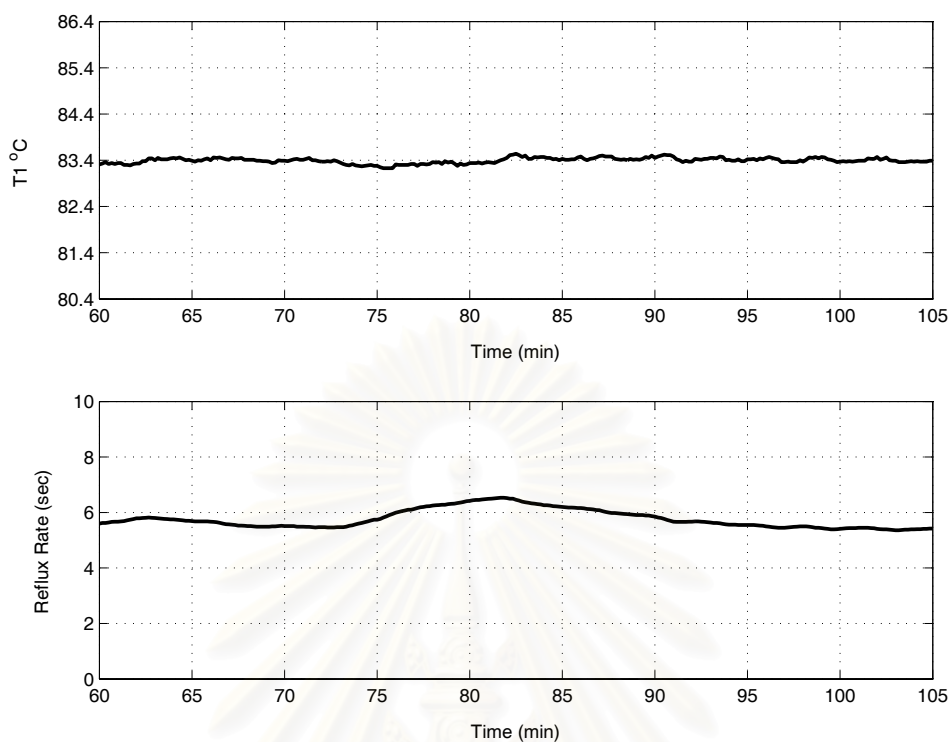


#### การทดลองที่ 4

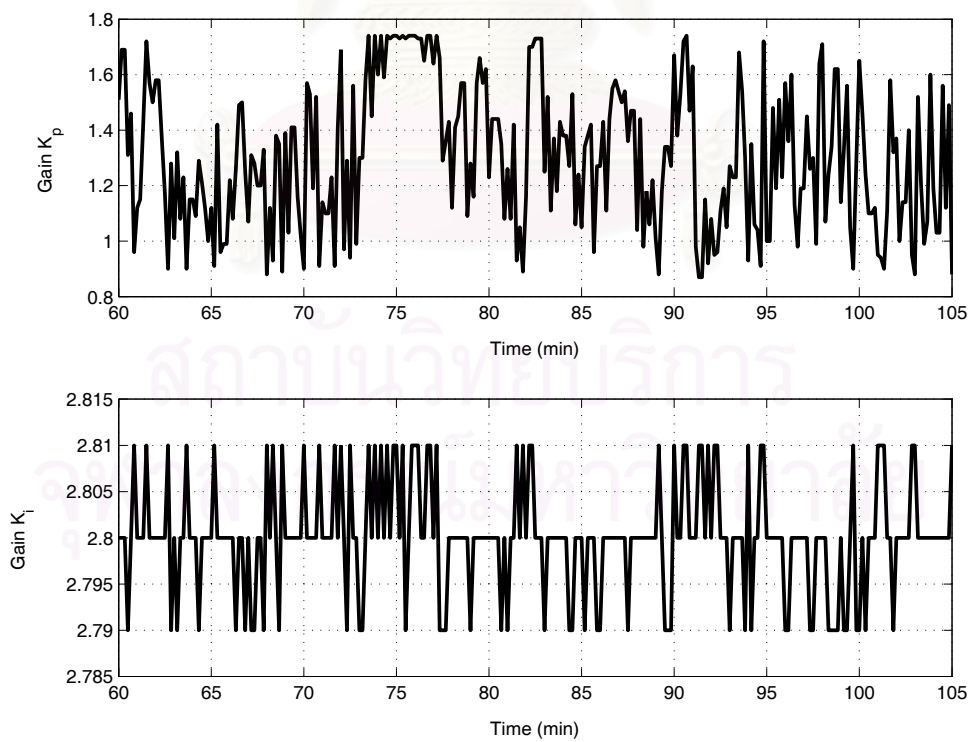
ใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีในการควบคุมอุณหภูมิวงรอบยอดหอและวงรอบฐานหอโดยใช้โครงสร้างระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีแบบเดียวกับการทดลองที่ 2 และการทดลองที่ 3 ผลการควบคุมอุณหภูมิและค่าพารามิเตอร์  $K_p$  และ  $K_i$  ของวงรอบยอดหอและฐานหอแสดงดังรูปที่ 4.35, 4.36, 4.37 และ 4.38 ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่วงรอบยอดหอและฐานหอคงค่าที่ค่ากำหนดได้เป็นอย่างดี และเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนสารผสมเข้ากลางหอพบว่าอุณหภูมิทั้งยอดหอและฐานหอไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากค่ากำหนดมากนัก และผลการควบคุมที่ได้ดีกว่าการใช้ตัวควบคุม PI แบบกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่ในการทดลองที่ 1 และดีกว่าใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีในการควบคุมเพียงวงรอบเดียว (การทดลองที่ 2 และ 3) เมื่อพิจารณาสัญญาณควบคุมพบว่าสัญญาณควบคุมที่ยอดหอและฐานหอพบว่ามีแกว่งน้อยกว่าการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุม PI แบบกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่ในการทดลองที่ 1 ด้วย



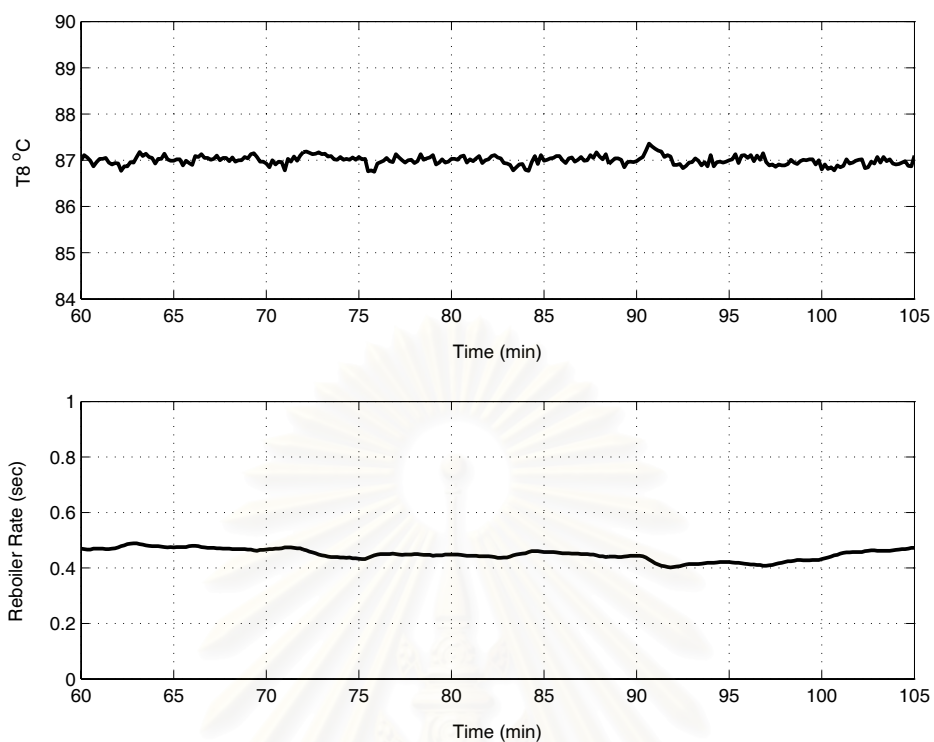
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



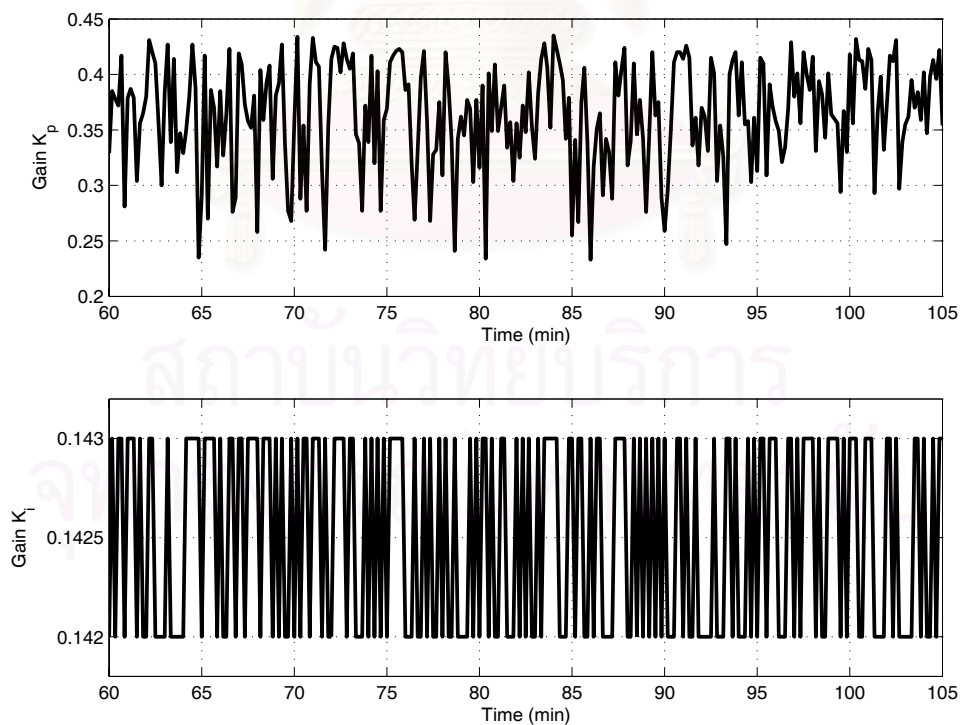
รูปที่ 4.35: อุณหภูมิที่ยอดหอและอัตราการป้อนกลับสารที่ยอดหอของการทดลองที่ 4



รูปที่ 4.36: ค่าพารามิเตอร์  $K_p$  และ  $K_i$  ของวงรอบยอดหอของการทดลองที่ 4



รูปที่ 4.37: อุณหภูมิที่ฐานหอและอัตราการป้อนไอสารที่ฐานหอของการทดลองที่ 4



รูปที่ 4.38: ค่าพารามิเตอร์  $K_p$  และ  $K_i$  ของวงรอบฐานหอของการทดลองที่ 4

จากผลการทดลองทั้ง 4 แสดงให้เห็นว่า การควบคุมโดยใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีให้ผลการควบคุมที่ดี เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนสารผสมเข้ากลางหอบพบว่าในการใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีในวงรอบยอดหอบและวงรอบฐาน (การทดลองที่ 4) ให้ผลดีกว่าการใช้ตัวควบคุม PI แบบกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่ (การทดลองที่ 1) และดีกว่าการใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีเพียงวงรอบใดวงรอบหนึ่ง (การทดลองที่ 2 และ 3)

### 4.3 สรุป

ในบทนี้นำเสนอการควบคุมหอกลิ้นแยกสารผสมสองชนิดโดยใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี เป็นการควบคุมขั้นสูงอย่างี่สามในการทดสอบการดำเนินการผ่านDCS DCSยอมให้ผู้ปฏิบัติการสามารถประยุกต์การควบคุมขั้นสูงโดยทำการโปรแกรมด้วยภาษาซีโบล (SEBOL language) ผ่านกลุ่มฟังก์ชันการควบคุมพื้นฐานของDCS DCSมีส่วนแสดงผลให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถเฝ้าสังเกตและทำการควบคุมกระบวนการได้สะดวกยิ่งขึ้น ตัวควบคุม PI ถูกใช้เป็นตัวควบคุมหลักในการควบคุมกระบวนการและใช้ระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีในการปรับอัตราขยายของตัวควบคุม PI ผลการควบคุมเป็นที่น่าพอใจสอดคล้องกับ [3]

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

# การประยุกต์การควบคุมขั้นสูงโดยดำเนินการผ่านDCS

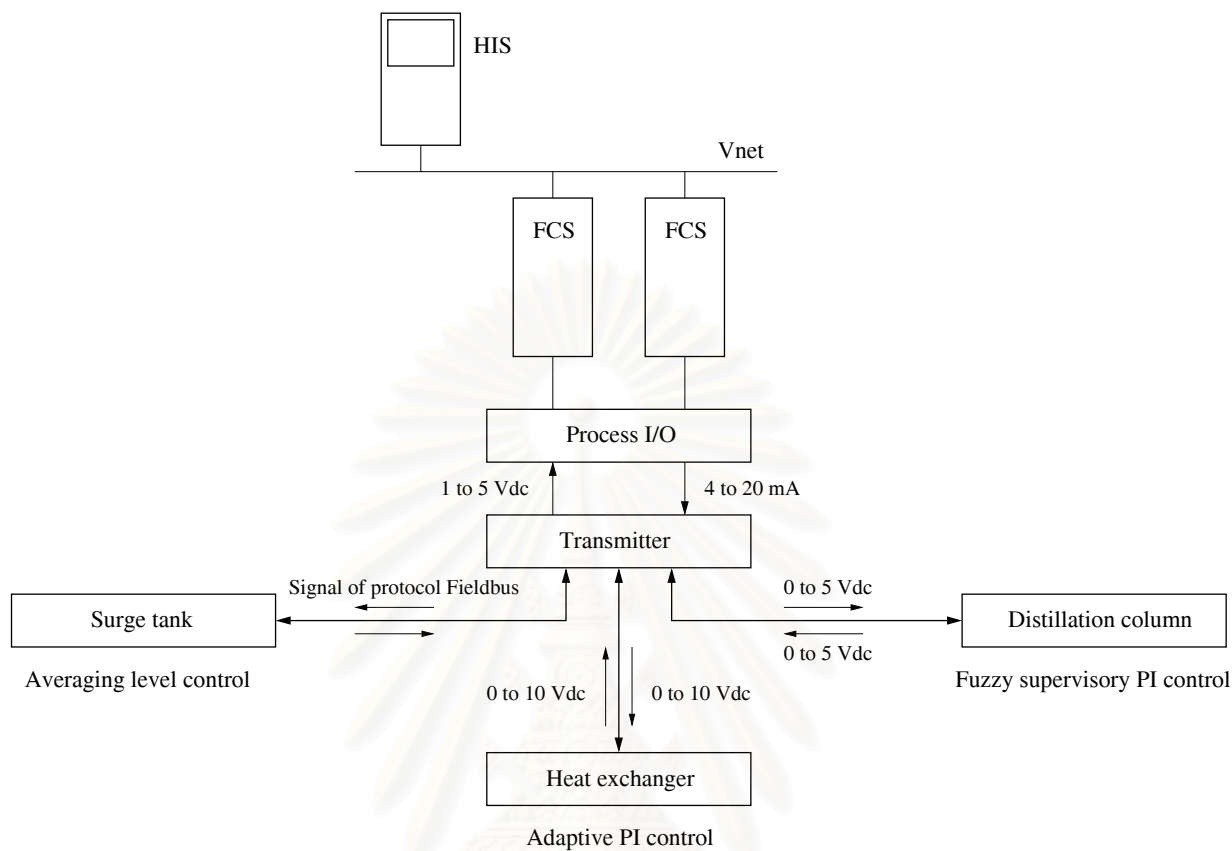
Distributed control systems (DCS) เป็นระบบที่หน่วยประมวลผล (Field control station, FCS) แยกออกจากหน่วยแสดงผล (Human interface station, HIS) ทำให้DCSสามารถควบคุมกระบวนการหลายกระบวนการพร้อมกันโดยขึ้นอยู่กับจำนวนกลุ่มฟังก์ชัน (Function block) และจำนวนการเชื่อมต่อสัญญาณเข้าและสัญญาณออกของDCS DCSมีฟังก์ชันการควบคุมพื้นฐานที่เอื้อต่อการประยุกต์การควบคุมขั้นสูงโดยโปรแกรมด้วยภาษาซีโบล (SEBOL language) ในบทนี้ทำการประยุกต์การควบคุมขั้นสูงโดยดำเนินการผ่านDCSกับกระบวนการทั้ง 3 กระบวนการพร้อมกันคือ การควบคุมระดับแบบเฉลี่ยใช้ควบคุมระดับในถังพัก ตัวควบคุม PI แบบปรับอัตราขยายได้ใช้ควบคุมอุณหภูมิออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัชซีใช้ควบคุมอุณหภูมียอดหอและฐานหอของหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด การศึกษาเริ่มจากโครงสร้างและการเชื่อมต่อระหว่างDCSกับกระบวนการ 3 กระบวนการ ขั้นตอนการดำเนินการผ่านDCS และวิเคราะห์ผลการควบคุมที่ได้

## 5.1 การประยุกต์การควบคุมขั้นสูงในการควบคุม 3 กระบวนการพร้อมกันโดยดำเนินการผ่านDCS

### 5.1.1 โครงสร้างและการเชื่อมต่อระหว่างDCSกับกระบวนการ

การเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างDCSกับ 3 กระบวนการแสดงดังรูปที่ 5.1 สัญญาณจากเครื่องมือวัดและตัวปรับตั้ง (Actuator) ของแต่ละกระบวนการมีความแตกต่างกัน การเชื่อมต่อสัญญาณจากอุปกรณ์ดังกล่าวกับDCSถูกพิจารณาว่าเป็นอันดับแรก DCSของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมมีสัญญาณ 3 รูปแบบด้วยกันคือ สัญญาณแอนาล็อก (Analog Signal) สัญญาณดิจิทัล (Digital signal) และสัญญาณในลักษณะของโปรโตคอลฟิลด์บัส (Signal of protocol fieldbus) สัญญาณแอนาล็อกอินพุตมีขนาด 1 ถึง 5 โวลต์ สัญญาณแอนาล็อกเอาต์พุตมีขนาด 4 ถึง 20 มิลลิแอมป์ และสัญญาณดิจิทัลมีขนาด 1 และ 5 โวลต์

ถังพักใช้สัญญาณในลักษณะของโปรโตคอลฟิลด์บัสสำหรับการปรับวาล์วควบคุม ส่งค่าอัตราการไหลเข้าจากเครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบออริฟิส และค่าระดับจากเครื่องมือวัดระดับแบบดิฟเฟอเรนเชียลไปยังDCS และใช้สัญญาณดิจิทัลในการปรับ solenoid valve เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนใช้สัญญาณแอนาล็อกขนาด 0 ถึง 10 โวลต์ สำหรับการปรับไทรสเตอร์ (Thyrister) ในการควบคุมเครื่องทำความร้อนและส่งค่าอุณหภูมิจากเครื่องมือวัดอุณหภูมิกลับไปยังDCS หอกลั่นแยกสารผสมสองชนิดใช้สัญญาณแอนาล็อกขนาด 0 ถึง 5 โวลต์ สำหรับปรับอัตราการป้อนไอสารที่ฐานหอ ปรับอัตราการป้อนสารผสมเข้ากลางหอ และส่งค่าอุณหภูมิจากเครื่องมือวัดอุณหภูมิต่อหอและฐานหอไปยังDCS และใช้สัญญาณดิจิทัลในการปรับอัตราการป้อนกลับสารที่ยอดหอ รายละเอียดการเชื่อมต่อสัญญาณในกระบวนการกับDCSแสดงดังตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.1: แผนภาพการเชื่อมต่อDCSกับกระบวนการ 3 กระบวนการ

ตารางที่ 5.1: รายละเอียดการเชื่อมต่อสัญญาณในกระบวนการกับDCS

กระบวนการ	อุปกรณ์	สัญญาณในกระบวนการ	สัญญาณจากDCS
ถังพัก ถึงพัก	Solenoid valve เครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบออริฟิส เครื่องมือวัดระดับแบบดิฟเฟอเรนเชียล วาล์วควบคุม FT-1 และ FT-2	1 และ 5 Vdc Protocol fieldbus Protocol fieldbus Protocol fieldbus	1 และ 5 Vdc Protocol fieldbus Protocol fieldbus Protocol fieldbus
เครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน	ไทรสเตอร์ เครื่องมือวัดอุณหภูมิ	0 ถึง 10 Vdc 0 ถึง 10 Vdc	1 ถึง 5 Vdc 4 ถึง 20 mA
หอกันแยกสารผสม สองชนิด	ปรับอัตราการป้อนกลับสารยอดหอ ปรับอัตราการป้อนไอสารฐานหอ ปรับอัตราการป้อนสารผสมเข้ากลางหอ	1 และ 5 Vdc 0 ถึง 5 Vdc 0 ถึง 5 Vdc	1 และ 5 Vdc 1 ถึง 5 Vdc 4 ถึง 20 mA

## 5.1.2 ขั้นตอนการดำเนินการผ่านDCS

ในการทดลอง ค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการและตัวควบคุมกำหนดดังนี้

- ค่าพารามิเตอร์ถังพักของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมและการควบคุมระดับแบบเฉลี่ย
  - เส้นผ่านศูนย์กลางของถังพัก  $r = 0.1002$  เมตร,  $x_{1h} = 0.8$  เมตร,  $x_{1l} = 0.2$  เมตร,  $x_{1r} = 0.5$  เมตร และสถานะเริ่มต้นของตัวแปรสถานะคือ  $x_1(0) = 0.5$  เมตร,  $\dot{x}_2 = 0.0001$  ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที การรบกวน  $3.85 \leq w \leq 11.02$  ลิตรต่อนาที โดยสถานะเริ่มต้นของการรบกวน  $w(0) = 0$  และสถานะเริ่มต้นของสัญญาณควบคุมกำหนดให้เป็น  $u(0) = 0$  เวลาในการชักตัวอย่าง  $h = 1$  วินาที ช่วงการควบคุม  $t_f = 7$  วินาที และเวลาในการชักตัวอย่างเพื่อบันทึกค่า 10 วินาที
- ค่าพารามิเตอร์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมและตัวควบคุม PI แบบปรับอัตราขยายได้
  - ค่ากำหนดเริ่มต้นของอุณหภูมิออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอยู่ที่  $30^\circ\text{C}$  ม่านปรับอยู่ที่ 40 องศา สัญญาณควบคุมเริ่มต้นที่ให้กับไทรสเตอร์เท่ากับ 2 V ค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักการเชื่อมต่อ  $K_p, K_i$  อยู่ที่ศูนย์ ค่าสัมประสิทธิ์ของการปรับ  $\sigma = 0.0000015$  เวลาในการชักตัวอย่าง  $h = 1$  วินาที และเวลาในการชักตัวอย่างเพื่อบันทึกค่า 1 วินาที
- ค่าพารามิเตอร์หอกลิ้นแยกสารผสมสองชนิดของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมและตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี
  - ค่ากำหนดของอุณหภูมิที่ยอดหอเท่ากับ  $83.4^\circ\text{C}$  และที่ฐานหอเท่ากับ  $87^\circ\text{C}$  โดยที่ความดันภายในหอกลิ้นคงที่ เตรียมสารผสมระหว่างเอทานอลกับน้ำกลั่นโดยมีความเข้มข้นของสารผสมในหม้อต้มซ้ำประมาณ 25 %โดยปริมาตร และความเข้มข้นของสารผสมที่ถูกป้อนเข้ากลางหอกลิ้นประมาณ 40 %โดยปริมาตร เริ่มต้นอัตราการป้อนไอสารที่ฐานหอ 40 %ของอัตราการป้อนไอสารที่ฐานหอสูงสุด 1.5 กิโลวัตต์
    - ค่าพารามิเตอร์ของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีในการควบคุมวงรอบยอดหอ
      - \*  $e(k) \in [-0.4, 0.3]$  และ  $\Delta e(k) \in [-0.2, 0.15]$
      - \*  $K_p \in [3.556, 0.01]$  และ  $K_i \in [7.112, 0]$
      - \* กำหนดอัตราการชักตัวอย่างเพื่อบันทึกข้อมูลทุก 10 วินาที
      - \* เลือกใช้การแปลงฟัซซีแบบสามเหลี่ยม
      - \* เลือกใช้การตัดสินใจฟัซซีแบบ max-min
      - \* เลือกใช้การแปลงกลับฟัซซีแบบจุดศูนย์ถ่วง
    - ค่าพารามิเตอร์ของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีในการควบคุมวงรอบฐานหอ
      - \*  $e(k) \in [-0.5, 0.5]$  และ  $\Delta e(k) \in [-0.4, 0.4]$
      - \*  $K_p \in [0.9336, 0.01]$  และ  $K_i \in [0.3, 0]$

- \* กำหนดอัตราการชักตัวอย่างเพื่อบันทึกข้อมูลทุก 10 วินาที
- \* เลือกใช้การแปลงพีชชีแบบสามเหลี่ยม
- \* เลือกใช้การตัดสินใจพีชชีแบบ max-min
- \* เลือกใช้การแปลงกลับพีชชีแบบจุดศูนย์ถ่วง

ขณะทดลองมีการเปลี่ยนค่ากำหนดและปรับการรบกวนให้กับกระบวนการทั้ง 3 กระบวนการดังนี้

- ถึงพัก

การรบกวนถึงพักมีสองกรณีคือ กรณีอัตราการไหลเข้าเป็นสัญญาณขั้นบันได และกรณีอัตราการไหลเข้าเป็นสัญญาณไซน์ การเปลี่ยนแปลงการรบกวนเป็นดังนี้ ณ.นาทิตี่ 60 วาล์วควบคุม FT-1 และ FT-2 เป็น 15 และ 30 % ของการเปิดวาล์วสูงสุด ตามลำดับ ณ.นาทิตี่ 68 วาล์วควบคุม FT-1 และ FT-2 เป็น 30 และ 30 % ของการเปิดวาล์วสูงสุด ตามลำดับ ณ.นาทิตี่ 76 วาล์วควบคุม FT-1 และ FT-2 เป็น 25 และ 25 % ของการเปิดวาล์วสูงสุด ตามลำดับ ณ.นาทิตี่ 84 เป็นต้นไปวาล์วควบคุม FT-1 ถูกปรับตามสัญญาณไซน์ขนาด 10 คาบการแกว่งอยู่ที่ 840 วินาที โดยเริ่มต้น (Offset) ของวาล์วควบคุมที่ FT-1 ไว้ที่ 25 % ของการเปิดวาล์วสูงสุด และวาล์วควบคุม FT-2 กำหนดไว้ที่ 25 % ของการเปิดวาล์วสูงสุด ผลการวัดอัตราการไหลเข้าและการประมาณอัตราการไหลออกแสดงดังรูปที่ 5.2 และระดับของเหลวในถังพักและอัตราการเปิด solenoid valve แสดงดังรูปที่ 5.3

- เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

การรบกวนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่ากำหนด และการเปลี่ยนแปลงปริมาตรอากาศขาเข้า ค่ากำหนดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนถูกเปลี่ยนจากค่ากำหนดเริ่มต้น 30°C ไปเป็น 40°C ณ.นาทิตี่ 69 และเปลี่ยนเป็น 60°C ณ.นาทิตี่ 78 จากนั้นค่ากำหนดถูกปรับลดลงเป็น 50°C ณ.นาทิตี่ 87 และเปลี่ยนเป็น 30°C ณ.นาทิตี่ 96 และสิ้นสุดการทดลองณ.นาทิตี่ 105 ระหว่างที่อุณหภูมิคงค่าที่ค่ากำหนดมีการปรับปริมาตรอากาศที่เข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการปรับผ่านปรับทุกๆ 3 นาที จากตำแหน่ง 40 องศา ไปเป็น 60 องศา และปรับกลับไปที่ตำแหน่ง 40 องศา ผลของอุณหภูมิขาออกและสัญญาณควบคุม และผลของการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก การเชื่อมต่อในการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.4 และ 5.5 ตามลำดับ

- หอกลิ้นแยกสารผสมสองชนิด

การรบกวนหอกลิ้นแยกสารผสมสองชนิดใช้การเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนสารผสมเข้ากลางหอ เมื่ออุณหภูมิที่ยอดหอและฐานหอคงค่ากำหนด ณ.นาทิตี่ 75 ปรับอัตราการป้อนสารผสมเข้ากลางหอจากเริ่มต้น 10 % (หรือ 30 มิลลิลิตร/นาที) เป็น 15 % (หรือ 50 มิลลิลิตร/นาที) และณ.นาทิตี่ 90 นาที ปรับอัตราการป้อนสารผสมเข้ากลางหอกลิ้นกลับมาที่ 10 % (หรือ 30 มิลลิลิตร/นาที) สิ้นสุดการบันทึกผลการทดลองที่เวลา 105 นาที ผลการควบคุมอุณหภูมิและค่าพารามิเตอร์  $K_p$  และ  $K_i$  ของวงรอบยอดหอและฐานหอแสดงดังรูปที่ 5.6, 5.7, 5.8 และ 5.9 ตามลำดับ

เพื่อง่ายต่อความเข้าใจสามารถแสดงขั้นตอนการดำเนินการผ่าน DCS ได้ดังตารางที่ 5.2



ตารางที่ 5.2: ขั้นตอนการดำเนินการผ่านDCS

กระบวนการ/เวลา (นาที)	0	50	60 (เริ่มต้นบันทึกค่า)
ถังพัก	ค่ากำหนด= 0.5 เมตร	-	เปิดปั๊ม P1 และ P2 FT-1 = 15%* FT-2 = 30%* เข้าโหมดควบคุม
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	ค่ากำหนด = 30°C ม่านปรับ 40 องศา สัญญาณควบคุมเริ่มต้น 2 Vdc	-	เปิดเครื่อง เข้าโหมดควบคุม
หอกลิ้นแยกสารผสมสองชนิด	ค่ากำหนดยอดหอ = 83.4°C ค่ากำหนดฐานหอ = 87°C พลังงานหม้อต้มซ้ำ = 40%	อัตราการป้อนสารเข้า กลางหอ = 10% เข้าโหมดควบคุม	-

กระบวนการ/เวลา (นาที)	63	66	69
ถังพัก	-	ณ. นาทีที่ 68 FT-1 = 30%* FT-2 = 30%*	-
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	ม่านปรับ 60 องศา	ม่านปรับ 40 องศา	ค่ากำหนด = 40°C
หอกลิ้นแยกสารผสมสองชนิด	-	-	-

กระบวนการ/เวลา (นาที)	72	75	78
ถังพัก	-	ณ. นาทีที่ 76 FT-1 = 25%* FT-2 = 25%*	-
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	ม่านปรับ 60 องศา	ม่านปรับ 40 องศา	ค่ากำหนด = 60°C
หอกลิ้นแยกสารผสมสองชนิด	-	อัตราการป้อนสารเข้า กลางหอ = 15%	-

กระบวนการ/เวลา (นาที)	81	84	87
ถึงพัก	-	สัญญาณรบกวนเป็นสัญญาณไซน์* (ขนาด 10%ของการเปิดวาล์วสูงสุด, คาบ 840 วินาที)	-
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	ม่านปรับ 60 องศา	ม่านปรับ 40 องศา	ค่ากำหนด = 50°C
หอกลิ้นแยกสารผสมสองชนิด	-	-	-

กระบวนการ/เวลา (นาที)	90	93	96
ถึงพัก	-	-	-
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	ม่านปรับ 60 องศา	ม่านปรับ 40 องศา	ค่ากำหนด = 30°C
หอกลิ้นแยกสารผสมสองชนิด	อัตราการป้อนสารเข้ากลางหอ = 10%	-	-

กระบวนการ/เวลา (นาที)	99	102	105 (สิ้นสุดการบันทึกค่า)
ถึงพัก	-	-	-
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	ม่านปรับ 60 องศา	ม่านปรับ 40 องศา	-
หอกลิ้นแยกสารผสมสองชนิด	-	-	-

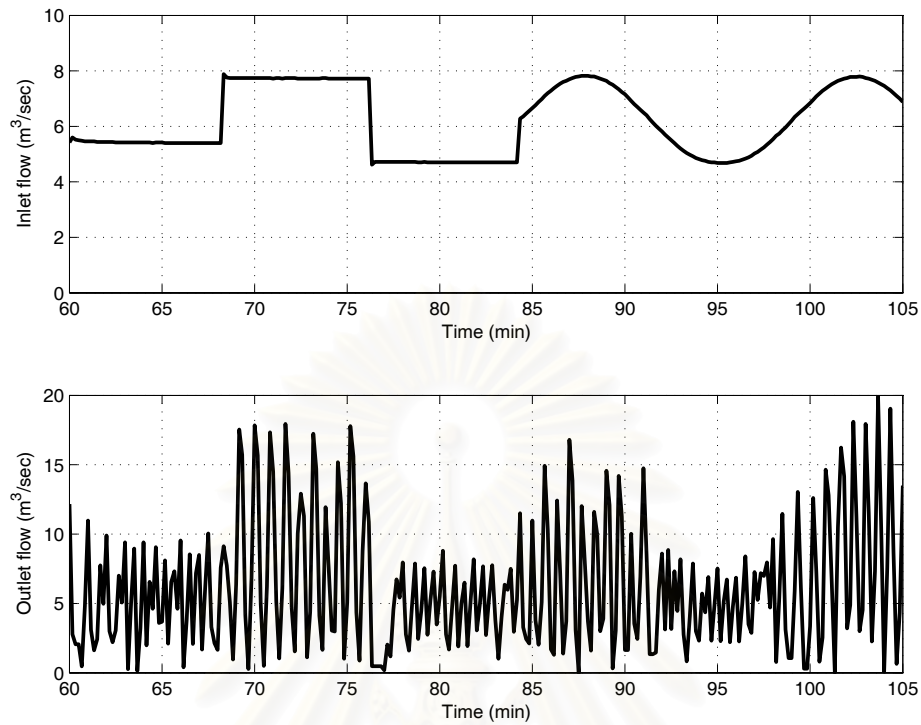
โดย \* หมายถึง การเปลี่ยนแปลงการรบกวนดังกล่าวถูกโปรแกรมลงบนDCSเรียบร้อยแล้วเพียงแต่  
สั่งให้เริ่มการทำงาน ข้อมูลที่ไม่มีเครื่องหมาย (\*) ในตารางเป็นส่วนที่ผู้ทดลองต้องปรับแบบแมนนวล

### 5.1.3 ผลการควบคุมกระบวนการ

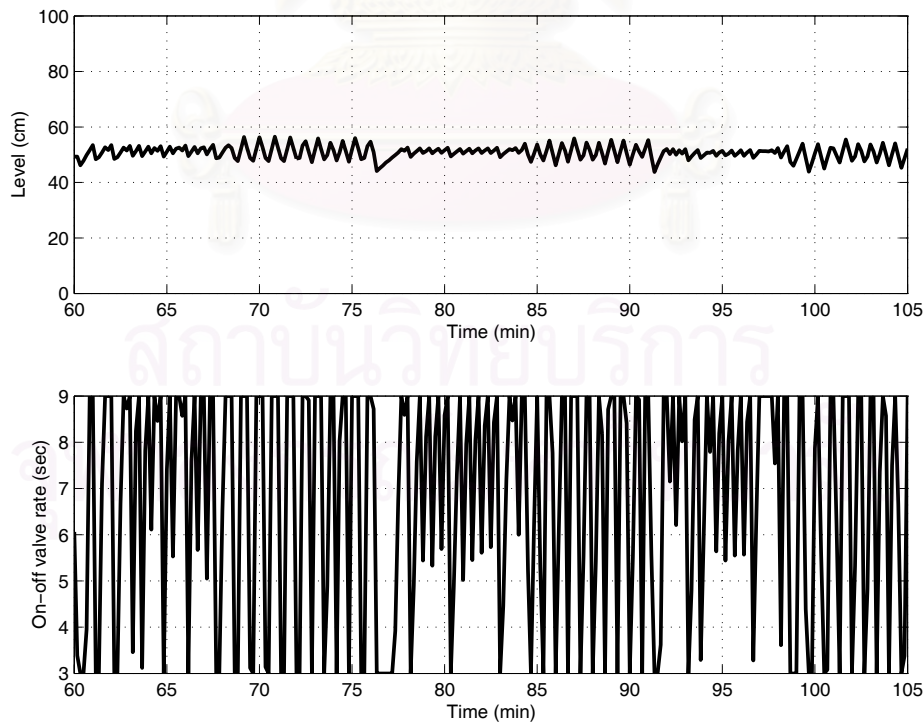
ผลการควบคุมระดับในถังพักโดยใช้การควบคุมระดับแบบเฉลี่ยพบว่า ระดับของเหลวในถังพัก  
สามารถคงค่ากำหนดไม่ว่าการรบกวนที่เกิดขึ้นเป็นสัญญาณขั้นบันไดหรือสัญญาณไซน์ ทั้งนี้ค่าพารามิเตอร์  
มิเตอร์ของการควบคุมระดับเฉลี่ยมีการเปลี่ยนแปลงจากในบทที่ 2 คือ ช่วงการควบคุม  $t_f = 7$  วินาที  
เพื่อให้การประมาณอัตราการไหลออกมีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น และสัญญาณควบคุม  
มีค่าเหมาะสมที่สุด

การควบคุมอุณหภูมิออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI แบบปรับ  
อัตราขยายได้มีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของการปรับจากในบทที่ 3 เป็น  $\sigma = 0.0000015$  เนื่องจาก  
ในการทดลองหลายครั้งพบว่าอุณหภูมิออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีการเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้น ดังนั้นจึง  
ต้องลดการเปลี่ยนแปลงอัตราขยายของตัวควบคุม PI เพื่อให้สัญญาณควบคุมสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลง  
และการรบกวนระบบที่เกิดขึ้น ผลการควบคุมอุณหภูมิออกสามารถติดตามค่ากำหนดและสามารถ  
ลดผลการรบกวนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของอากาศเข้า

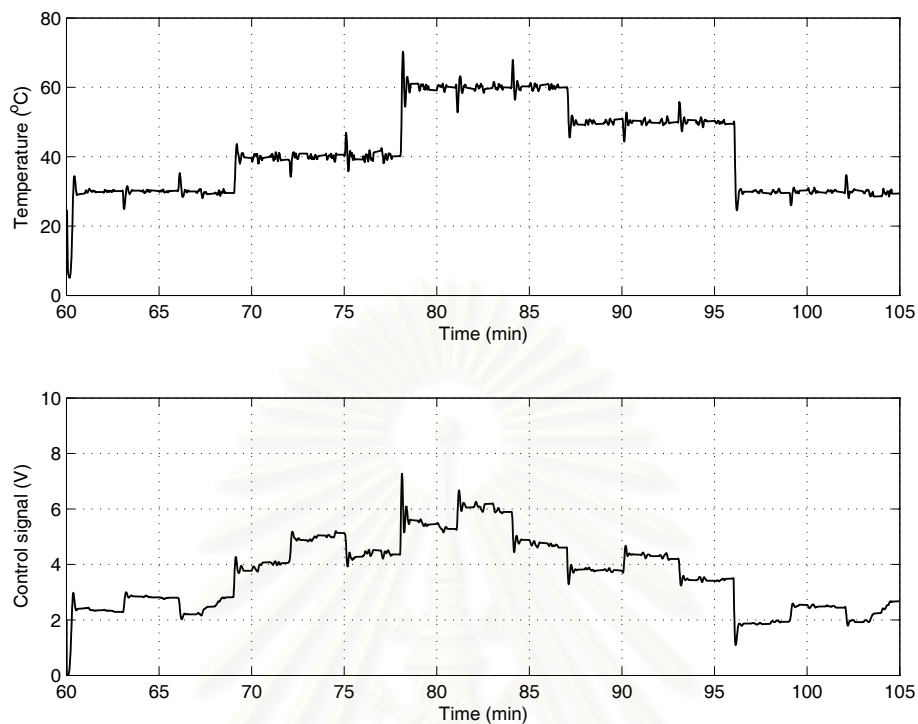
ผลการควบคุมอุณหภูมิวงรอบยอดหอและฐานหอพบว่า ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบ  
ตรรกศาสตร์ฟัซซีสามารถคงค่าอุณหภูมิวงรอบยอดหอและฐานหอที่ค่ากำหนด และลดผลการรบกวนที่  
เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนสารผสมเข้ากลางหอ



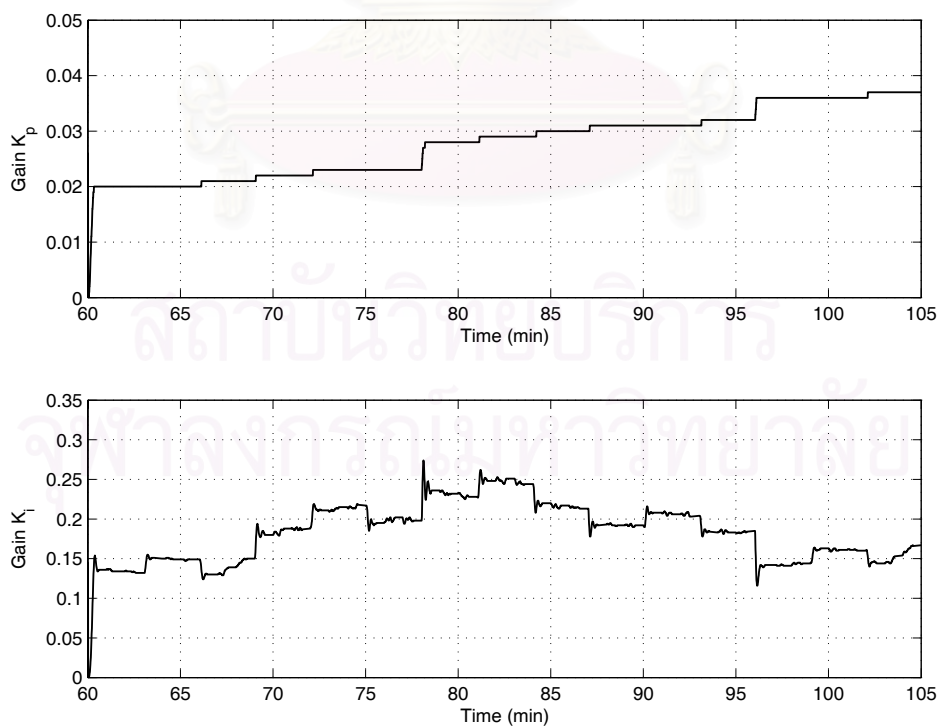
รูปที่ 5.2: อัตราการไหลเข้าเป็นสัญญาณขั้นบันไดและสัญญาณไซน์ และการประมาณอัตราการไหลออก



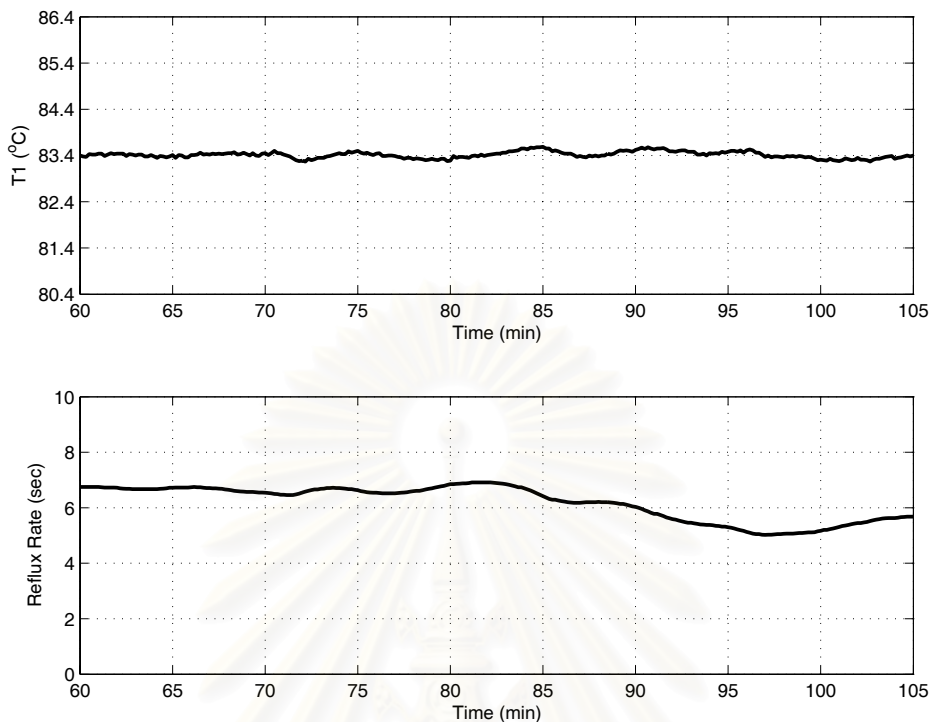
รูปที่ 5.3: ระดับของเหลว และอัตราการเปิด solenoid valve เมื่อการรบกวนเป็นสัญญาณขั้นบันไดและสัญญาณไซน์



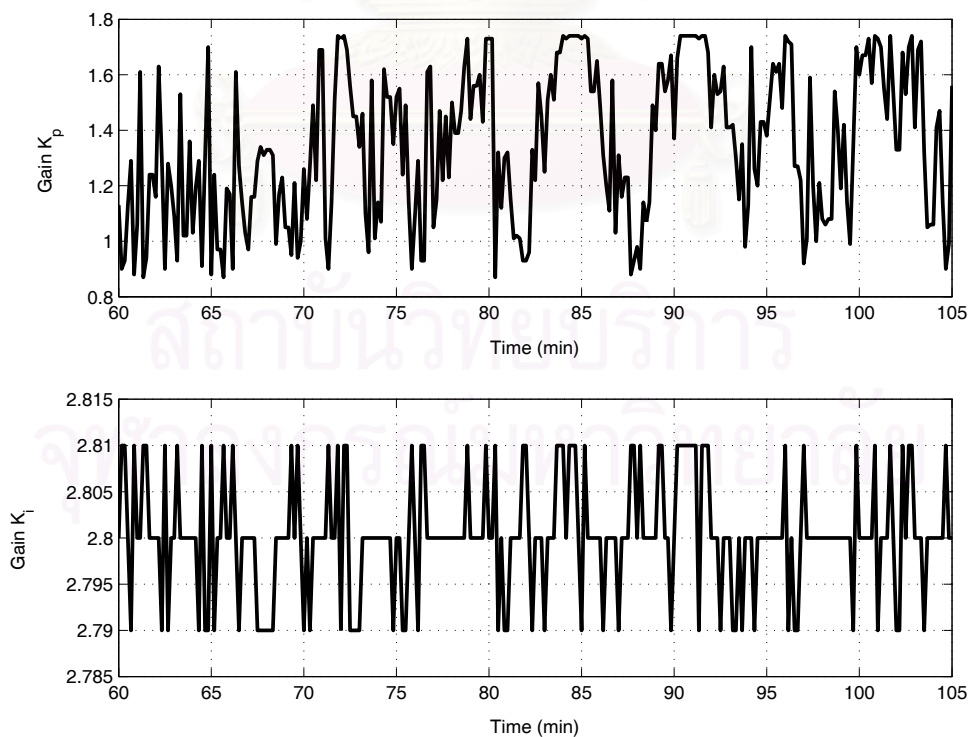
รูปที่ 5.4: อุณหภูมิขาออกและสัญญาณควบคุมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



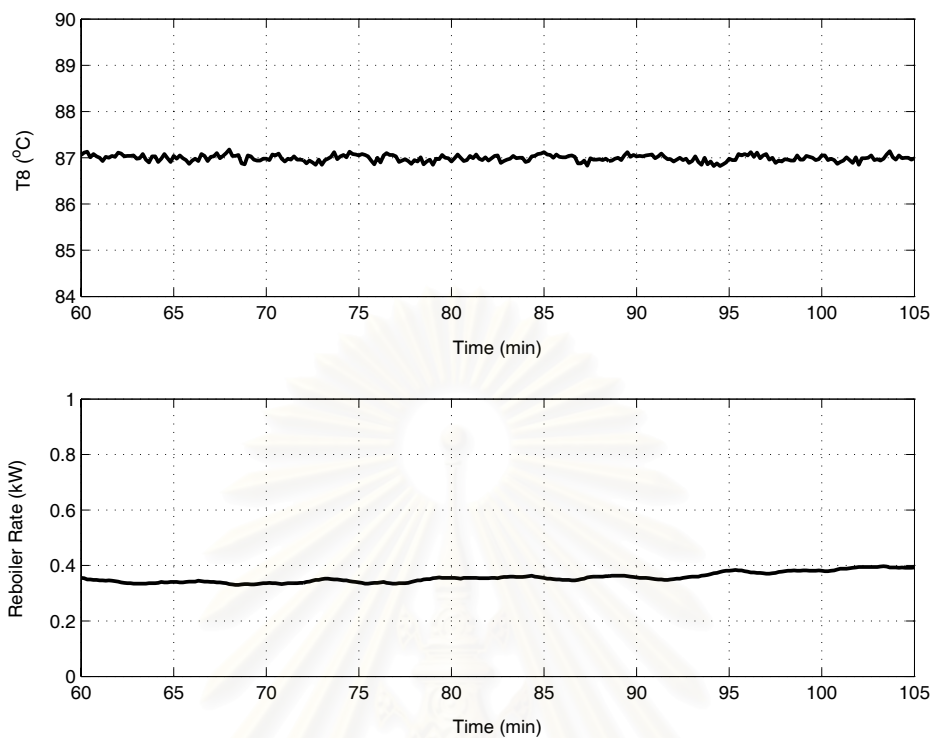
รูปที่ 5.5: การปรับค่าถ่วงน้ำหนักการเชื่อมต่อ  $K_p, K_i$



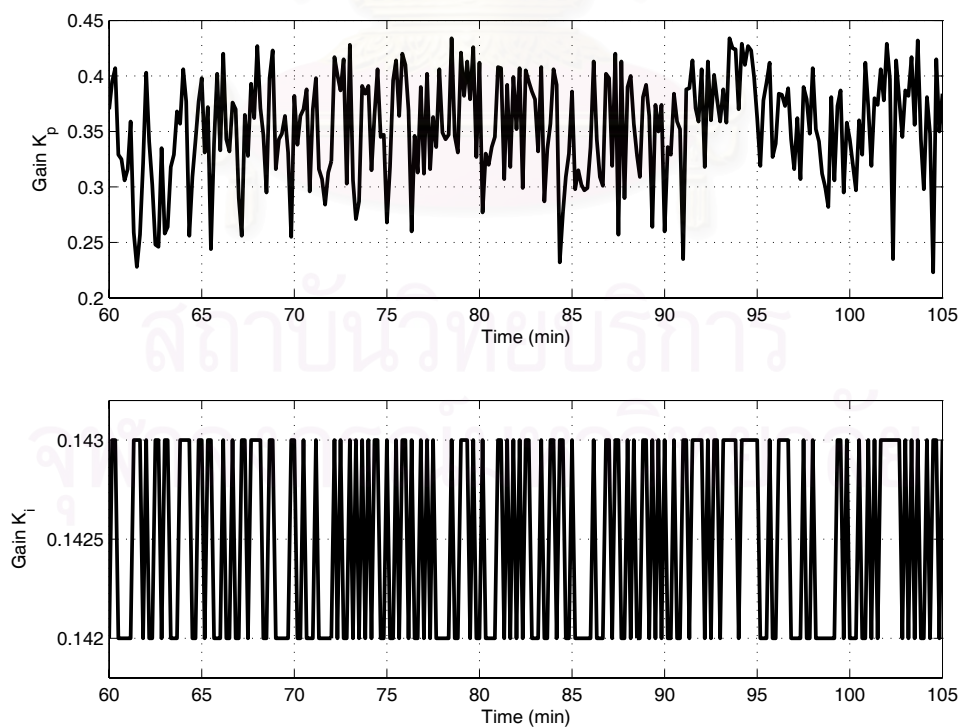
รูปที่ 5.6: อุณหภูมิที่ยอดหอและอัตราการป้อนกลับสารที่ยอดหอ



รูปที่ 5.7: ค่าพารามิเตอร์  $K_p$  และ  $K_i$  ของวงรอบยอดหอ



รูปที่ 5.8: อุณหภูมิที่ฐานหอและอัตราการป้อนไอสารที่ฐานหอ



รูปที่ 5.9: ค่าพารามิเตอร์  $K_p$  และ  $K_i$  ของวงรอบฐานหอ

## 5.2 สรุป

ในบทนี้นำเสนอการประยุกต์การควบคุมขั้นสูงโดยดำเนินการผ่านDCS ในการควบคุมกระบวนการ 3 กระบวนการของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมพร้อมกัน การโปรแกรมลงบนDCSอาศัยภาษาซีโบล (SEBOL language) เป็นโปรแกรมภาษาของบริษัท Yokogawa ซึ่งมีลักษณะคล้ายภาษาซี (C language) ผ่านฟังก์ชันการควบคุมพื้นฐานของDCS ผู้ปฏิบัติการที่ทำการจำลองการควบคุมกระบวนการบนคอมพิวเตอร์ ด้วยภาษาซีสามารถคัดลอกโปรแกรมลงบนฟังก์ชันการควบคุมพื้นฐานของDCSได้โดยตรง DCSมีการเชื่อมต่อสัญญาณที่ได้มาตรฐาน ดังนั้นกระบวนการที่มีอยู่เดิมในห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมสามารถเชื่อมต่อเข้ากับDCSได้โดยตรง ผู้ปฏิบัติการเพียงเลือกประเภทการ์ดสัญญาณให้ตรงกับกรับและส่งสัญญาณของกระบวนการ หน่วยประมวลผลของDCS (Human interface station, HIS) ช่วยในการเฝ้าสังเกตกระบวนการ มีการแจ้งเตือนและสัญญาณเตือนเมื่อเกิดความผิดพลาดขณะทำการควบคุม การตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์ในระบบผ่านฟังก์ชัน Recipe management function และในกรณีอุปกรณ์ฟีลด์บัส (Fieldbus device) สามารถตรวจสอบการทำงานและปรับตั้งอุปกรณ์ผ่านHISโดยอาศัยโปรแกรม Plant Resource Manager (PRM) ซึ่งอำนวยความสะดวกแก่ผู้ปฏิบัติการ การควบคุมกระบวนการ 3 กระบวนการพร้อมกันโดยดำเนินการผ่านDCSให้ผลการควบคุมเหมือนกับการควบคุมโดยดำเนินการผ่านDCSเพียงกระบวนการเดียว ทั้งนี้อาศัยการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมให้เหมาะสม



## บทที่ 6

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการประยุกต์การควบคุมขั้นสูงโดยดำเนินการผ่านDistributed control systems (DCS) โดยประยุกต์การควบคุมขั้นสูงที่เหมาะสมกับกระบวนการ 3 กระบวนการที่มีในห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมได้แก่ การควบคุมระดับในถังพักโดยใช้การควบคุมระดับแบบเฉลี่ย การควบคุมอุณหภูมิออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้ตัวควบคุม PI แบบปรับอัตราขยายได้ และการควบคุมหอกลิ้นแยกสารผสมสองชนิดโดยใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัชซี

การออกแบบตัวควบคุมโดยใช้ทฤษฎีควบคุมขั้นสูงเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้งานจริงในอุตสาหกรรม อาจเลือกการออกแบบโดยอาศัยแบบจำลองในกรณีที่สามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ออกแบบได้ค่อนข้างแม่นยำ เช่น ถังพัก ในกรณีที่การหาแบบจำลองทำได้ยาก เช่น หอกลิ้นแยกสารผสมสองชนิด การออกแบบตัวควบคุมโดยไม่ใช้แบบจำลองเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ทฤษฎีที่เลือกใช้ควรเข้าใจง่ายและอำนวยความสะดวกแก่ผู้ปฏิบัติการ การเลือกตัวควบคุมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เช่น ตัวควบคุม PI แล้วนำทฤษฎีควบคุมขั้นสูงมาใช้เพื่อทำการปรับอัตราขยายแบบonline และreal-time เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง

ทฤษฎีการควบคุมขั้นสูงถูกโปรแกรมผ่านฟังก์ชันการควบคุมพื้นฐานของDCS โดยใช้ภาษาซีโบล (SEBOL language) ซึ่งมีลักษณะคล้ายภาษาซีที่ใช้โปรแกรมในเครื่องคอมพิวเตอร์ ทำให้ผู้ปฏิบัติการสามารถตัดลอกโปรแกรมภาษาซีที่ทำการจำลองการควบคุมกระบวนการบนคอมพิวเตอร์ลงบนฟังก์ชันการควบคุมพื้นฐานของDCSได้โดยตรง การประยุกต์การควบคุมขั้นสูงโดยดำเนินการผ่านDCSมีความแตกต่างจากการประยุกต์การควบคุมขั้นสูงผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์คือ เครื่องคอมพิวเตอร์อาศัยอุปกรณ์แปลงสัญญาณประเภท A/D และ D/A ในการรับและส่งสัญญาณจากเครื่องคอมพิวเตอร์ไปยังเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่มีอยู่ในกระบวนการ แต่DCSมีอุปกรณ์แปลงสัญญาณติดตั้งมาพร้อมกับหน่วยประมวลผล (Field control station, FCS) ผู้ปฏิบัติการเพียงเลือกประเภทการวัดสัญญาณให้เหมาะกับเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่มีอยู่ในกระบวนการ ความแตกต่างอีกอย่างหนึ่งคือเมื่อเกิดความผิดพลาดในการประมวลผลทำให้ต้องหยุดการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์ ส่งผลให้การควบคุมกระบวนการสิ้นสุดลง สร้างความเสียหายในการควบคุม ต่างจากDCSที่มีหน่วยประมวลผลแยกออกจากหน่วยแสดงผล (Human interface station, HIS) เมื่อเกิดความผิดพลาดในหน่วยแสดงผลจะไม่มีผลต่อการทำงานของหน่วยประมวลผลซึ่งเป็นส่วนควบคุมกระบวนการ หรือในกรณีที่หน่วยประมวลผลเกิดความผิดพลาด DCSจัดให้มีหน่วยประมวลผลสำรองทำงานเป็นdual redundantกับหน่วยประมวลผลหลักเพื่อป้องกันความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

การควบคุมระดับแบบเฉลี่ยซึ่งอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ให้สัญญาณควบคุมเหมาะสมที่สุดและ

ค่าพารามิเตอร์ในสมการแบบจำลองคงที่เพราะถึงพักมีขนาดคงที่ ส่วนอัตราขยายของตัวควบคุม PI ถูกปรับตามทฤษฎีควบคุมขั้นสูงทั้งสองวิธี ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้ผู้ปฏิบัติการที่ชำนาญในการปรับตั้งตัวควบคุม การประยุกต์การควบคุมขั้นสูงผ่านโดยดำเนินการผ่านDCSให้ผลการทดลองเป็นไปตามวัตถุประสงค์การควบคุมของแต่ละกระบวนการ ทั้งในกรณีการควบคุมกระบวนการเดี่ยวและกรณีการควบคุม 3 กระบวนการพร้อมกัน เป็นไปได้ที่จะนำวิธีการควบคุมขั้นสูงในวิทยานิพนธ์นี้ไปใช้ควบคุมกระบวนการในอุตสาหกรรมโดยดำเนินการผ่านDCS

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

1. การนำการควบคุมระดับแบบเฉลี่ยไปใช้ควบคุมระดับในถังพักที่มีอยู่ในอุตสาหกรรม ถังพักควรมีเครื่องมือวัดอัตราการไหลเข้าและอัตราการไหลออกจากถังพัก และมีเครื่องมือวัดระดับที่สามารถส่งสัญญาณติดต่อกับDCSได้ ทั้งนี้ต้องทราบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังพักเพื่อใช้ในสมการสถานะที่ใช้แทนถังพัก
2. การทำนายการรบกวนโดยใช้สัญญาณขั้นบันไดและสัญญาณลาดในการควบคุมระดับแบบเฉลี่ยของถังพักให้ผลการควบคุมที่ดี แต่ในกรณีที่การรบกวนมีการเปลี่ยนแปลงที่รุนแรงและรวดเร็ว การปรับปรุงการทำนายการรบกวนให้ดีขึ้นน่าจะช่วยให้ระดับในถังพักไม่เปลี่ยนแปลงมากและทำให้อัตราการไหลออกมีความราบรื่นขึ้น
3. การนำตัวควบคุม PI แบบปรับอัตราขยายได้และตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี่ไปใช้ในอุตสาหกรรม ตัวควบคุมทั้งสองเหมาะสำหรับใช้กับระบบที่มีสัญญาณเข้าและสัญญาณออกในแต่ละวงรอบควบคุมเป็นSISO (Single input single output) ตัวควบคุม PI แบบปรับอัตราขยายได้เหมาะกับกระบวนการที่มีการเปลี่ยนค่ากำหนดบ่อยครั้ง ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี่เหมาะกับกระบวนการที่ค่ากำหนดคงที่ตลอด เพื่อไม่ต้องหาฟังก์ชันความเป็นสมาชิกใหม่เมื่อมีการเปลี่ยนค่ากำหนด
4. ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราขยายของตัวควบคุม PI แบบปรับอัตราขยายได้ในการควบคุมอุณหภูมิออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนพบว่า อัตราขยายดังกล่าวมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนค่ากำหนด แม้ในทฤษฎีadaptive interaction [2, 6] กล่าวว่า ค่าถ่วงน้ำหนัก  $\alpha_c$  ที่ถูกปรับตามสมการ 3.5 มีขอบเขตการเปลี่ยนแปลงค่าถ่วงน้ำหนัก แต่เมื่อนำทฤษฎีดังกล่าวมาใช้กับตัวควบคุม PI ยังไม่มีข้อพิสูจน์เรื่องขอบเขตการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราขยาย
5. DCSที่ใช้ในการดำเนินการ (กรณีที่DCSเป็นของบริษัทอื่นที่ไม่ใช่ของบริษัท Yokogawa) ต้องมีฟังก์ชันการควบคุมพื้นฐานที่สามารถโปรแกรมภาษา (เช่น ภาษาซี เป็นต้น) เพื่อประยุกต์สมการทางคณิตศาสตร์

## รายการอ้างอิง

- [1] S. Ogawa, B. Allison, G. Dumont and M. Davies. A New Approach to Optimal Averaging Level Control with State Constraints. *IEEE Conference of Decision and Control*, (2002): 1952 - 1957.
- [2] Feng Lin, Robert D. Brant, and George Saikalis. Self-Tuning of PID Controllers by Adaptive Interaction. *Proceedings of the American Control Conference*, (2000): 3676 - 3681.
- [3] K. Somsung and S. Pratishtananda. Design and Implementation of Fuzzy Supervisory PI Controllers Using Fuzzy c-Means Clustering Combined with Fuzzy Gain Scheduling for a Binary Distillation Column. *TENCON 2005, 2005 IEEE Region 10*, (2005): 1 - 6.
- [4] M. A. McDonald and T. J. McAvoy. Optimal Averaging Level Control. *AIChE Journal*, 32, 1, (1986): 75 -86.
- [5] P. J. Campo and M. Morari. Model Predictive Optimal Averaging Level Control. *AIChE Journal*, 35, 4, (1989): 579 - 591.
- [6] Robert D. Brant and Feng Lin. Adaptive interaction and its application to neural networks. *Elsevier, Information Sciences 121*, (1999): 201 - 215.
- [7] George Saikalis and Feng Lin. Neural Network Controller by Adaptive interaction. *Proceedings of the American Control Conference*, (2001): 1247 - 1252.
- [8] Bader M. Badreddine and Feng Lin. Adaptive PID Controller for Stable/Unstable Linear and Non-Linear Systems. *Proceeding of the IEEE International Conference on Control Application*, (2001): 1031 - 1036.
- [9] K.F. Man, K.S. Tang, and S. Kwang. *Genetic Algorithms*. Springer-Verlag London Ltd, 1999,
- [10] Timothy J. Ross. *Fuzzy logic with engineering applications*. John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- [11] A. Visioli. Tuning of PID controllers with fuzzy logic. *IEE Proc. -Control Theory Application*, 148, 1, (2001): 1 - 8.
- [12] P. Wang and D.P. Kwok. Optimal Fuzzy PID Control Based on Genetic Algorithm. *IEEE*, (1992): 977 - 981.
- [13] K. Worapradya and S. Pratishtananda. Real-Time Control of a Binary Distillation Column Using HGA Fuzzy Supervisory PI Controllers. *TENCON 2005, 2005 IEEE Region 10*, (2005): 1 - 5.

- [14] C.S. Chang and Weihui Fu. Area load frequency control using fuzzy gain scheduling of PI controllers. *Elsevier, Electric Power Systems Research 42*, (1997): 145 - 152.
- [15] D. E. Kirk. *Optimal Control Theory An Introduction*. Prentice-Hall Inc., 1970.
- [16] D. Kincaid and W. Cheney. *Numerical Analysis: Mathematics of Scientific Computing*. Brooks/Cole, 2002.
- [17] Karl J. Åström and Björn Wittenmark. *Computer Controlled Systems theory and design*. Prentice-Hall International Inc., 1997.
- [18] David G. Luenberger. *Optimization by Vector Space Methods*. John Wiley & Sons, 1968.
- [19] Xuanli Lisa Xie and Gerardo Beni. A Validity Measure for Fuzzy Clustering. *IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence*, 13, 8, (1991): 841 - 847.
- [20] Zhen Yu Zhao. Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers. *IEEE Transaction On System, Man, And Cybernetics*, , 23, 5, (1993): 1392 - 1398.
- [21] Katsuhiko Ogata. *Modern control engineering*. Prentice Hall, 2002.
- [22] H. Genter and M. Glesner. Automatic Generation of a Fuzzy Classification System Using Fuzzy Clustering Methods. *ACM Press*, (1994): 180 - 183.
- [23] Dong C. Park and Issam Dagher. Gradient Based Fuzzy c-means (GBFCM) Algorithm. *IEEE*, (1994): 1626 - 1631.
- [24] *Textbook For CS3000 Fundamental*. Yokogawa, 2004.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### ตัวสังเกตสำหรับการควบคุมระดับแบบเฉลี่ย

การประยุกต์ใช้การควบคุมระดับเฉลี่ยกับถังพักของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมมีความยุ่งยาก เพราะไม่สามารถวัดอัตราการไหลออกของถังพักได้ อัตราการไหลออกเป็นตัวแปรสถานะที่ใช้ในการคำนวณหาสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุด วิธีการหนึ่งที่สามารถหาค่าประมาณอัตราการไหลออกคือการสร้างตัวสังเกต

การวิเคราะห์ว่าระบบที่พิจารณาสามารถสร้างตัวสังเกตได้หรือไม่ สามารถตรวจสอบได้จาก rank ของ observability matrix [21] พิจารณาสมการสถานะ (ก.1)

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + BU \\ Y &= CX \end{aligned} \quad (\text{ก.1})$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -A^{-1} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & A^{-1} \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, C = [1 \quad 0], X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, U = \begin{bmatrix} u \\ w \end{bmatrix}$$

พิจารณา Observability matrix,

$$\begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}$$

โดยที่  $n$  คือ มิติของตัวแปรสถานะ  $X$  พบว่าสมการสถานะ (ก.1) มี rank เท่ากับ 2 ซึ่งเท่ากับมิติของตัวแปรสถานะ  $X$  สรุปได้ว่าสมการสถานะดังกล่าวสังเกตได้ จากนั้นทำการแปลงสมการสถานะเวลาต่อเนื่องให้อยู่ในรูปสมการสถานะเวลาดิสครีตโดยยึดหลักตาม [17]

$$X(k+1) = \Phi X(k) + \Gamma U(k) \quad (\text{ก.2})$$

$$Y(k) = CX(k) \quad (\text{ก.3})$$

$$\begin{aligned} \Phi &= e^{Ah} \\ &= I + Ah + \frac{(Ah)^2}{2} + \dots \\ &= \begin{bmatrix} 1 & -A^{-1}h \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{ก.4})$$

$$\begin{aligned} \Gamma &= \int_0^h e^{As} B ds \\ &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}A^{-1}h^2 & -A^{-1}h \\ h & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{ก.5})$$

สมการตัวสังเกตแบบลดอันดับ [17] แสดงได้ดังสมการ

$$\hat{X}(k) = (I - KC)(\Phi\hat{X}(k-1) + \Gamma U(k-1)) + KY(k) \quad (ก.6)$$

$\hat{X}$  คือ ค่าประมาณตัวแปรสถานะ

อัตราขยายตัวสังเกต  $K = [k_1 \ k_2]^T$  สามารถออกแบบได้โดยการวางโพลของตัวสังเกต เนื่องจากสามารถวัดระดับของเหลว  $x_1$  ได้ ดังนั้นสามารถกำหนดโพลตัวแรกไว้ที่ศูนย์ ( $\mu_1 = 0$ ) และโพลตัวที่สอง ( $\mu_2$ ) หาได้จากรากที่เหลือของสมการ

$$|zI - (\Phi - KC\Phi)| = 0 \quad (ก.7)$$

สมการ (ก.7) เกิดจากการสร้างสมการค่าผิดพลาด ( $E$ ) ระหว่างตัวแปรสถานะจริง (ก.1) กับตัวแปรสถานะที่เกิดจากการประมาณ (ก.6) ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

$$E(k) = X(k) - \hat{X}(k) = (\Phi - KC\Phi)E(k-1) \quad (ก.8)$$

จากสมการ (ก.7) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} |zI - (\Phi - KC\Phi)| &= 0 \\ z^2 - (2 - k_1 + A^{-1}hk_2)z - A^{-1}h(1 - k_1)k_2 &= 0 \end{aligned} \quad (ก.9)$$

และจากการวางโพลของตัวสังเกตจะได้ว่า

$$\begin{aligned} (z - \mu_1)(z - \mu_2) &= 0 \\ z^2 - \mu_2z &= 0 \end{aligned} \quad (ก.10)$$

การเท่ากันของสมการ (ก.9) กับ (ก.10) ดังนั้นอัตราขยายตัวสังเกตเป็นดังนี้คือ

$$k_1 = 1 \quad (ก.11)$$

$$k_2 = \frac{A}{h}(\mu_2 - 1) \quad (ก.12)$$

โดยโพลตัวที่ 2 ของตัวสังเกต  $\mu_2$  ต้องอยู่ในวงกลมหนึ่งหน่วย ดังนั้นตัวสังเกตแบบลดอันดับในสมการ (ก.6) สามารถเขียนได้เป็น

$$\hat{x}_1(k) = y(k) \quad (ก.13)$$

$$\begin{aligned} \hat{x}_2(k) &= \hat{x}_2(k-1) + A^{-1}hk_2(\hat{x}_2(k-1) - w(k-1)) \\ &\quad + \left(\frac{1}{2}A^{-1}h^2k_2 + h\right)u(k-1) + k_2(y(k) - \hat{x}_1(k-1)) \end{aligned} \quad (ก.14)$$

## ภาคผนวก ข

### การนำสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุดไปใช้กับถังพัก

การนำสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุดไปใช้กับถังพักของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมต่างจากการนำสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุดไปใช้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของถังพักคือ สัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้กับแบบจำลองอยู่ในรูปของความเร่งของอัตราการไหลออกซึ่งไม่สามารถใช้สัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุดดังกล่าวกับ solenoid valve ของถังพักของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมได้โดยตรง เราจำเป็นต้องแปลงสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุดเป็นอัตราการไหลออกก่อน และแปลงเป็นเปอร์เซ็นต์PWM (Pulse width modulator) สำหรับการสั่งเปิด-ปิด solenoid valve ผ่านทางDCS สมการที่ใช้แปลงสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุดเป็นอัตราการไหลออกแสดงได้ดังนี้

$$x_2(k) = \hat{x}_2(k) + hu(k) \quad (\text{ข.1})$$

โดยที่  $x_2$  เป็นอัตราการไหลออกที่เกิดจากการแปลงสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่สุด  $u$  ทุกๆ เวลาชักตัวอย่าง  $h$  โดยใช้ค่าประมาณตัวแปรสถานะ  $\hat{x}_2$  อัตราการไหลออกดังกล่าวถูกแปลงเป็นเปอร์เซ็นต์PWM ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลออกกับเปอร์เซ็นต์PWM หาจากการระบุเอกลักษณ์ (Identification) โดยพิจารณาจากอัตราการไหลเข้าและเปอร์เซ็นต์การเปิด-ปิด solenoid valve ที่จุดสมดุล 0.5 เมตร ข้อมูลที่ได้แสดงดังตาราง ข.1

ตารางที่ ข.1: อัตราการเปิด-ปิด solenoid valve กับอัตราการไหลเข้าที่จุดสมดุล 0.5 เมตร

%PWM (คาบของPWM = 10 วินาที)	อัตราการไหลเข้า (ลิตรต่อนาที)
90	11.02
80	9.79
70	8.58
60	7.41
50	6.22
40	5.04
30	3.85

ที่จุดสมดุลอัตราการไหลเข้าเท่ากับอัตราการไหลออก จากตารางข้างต้นสามารถคำนวณหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลออกกับเปอร์เซ็นต์PWM จากการประมาณค่าระหว่างช่วง (Interpolation) โดยใช้ฟังก์ชันพหุนามกำลังสอง (Quadratic polynomial function) เลือกค่าจากตาราง ข.1 3 ค่าเพื่อหาสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันพหุนาม

$$\%PWM = a x_2^2 + b x_2 + c \quad (\text{ข.2})$$



เมื่อ  $a, b, c$  คือ สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันพหุนาม พิจารณา %PWM = 90, 60 และ 30 จะได้

$$90 = a (11.02)^2 + b 11.02 + c \quad (\text{ข.3})$$

$$60 = a (7.42)^2 + b 7.42 + c \quad (\text{ข.4})$$

$$30 = a (3.85)^2 + b 3.85 + c \quad (\text{ข.5})$$

ทำการแก้สมการ (ข.3) ถึง (ข.5) เราจะได้สมการความสัมพันธ์ของอัตราการไหลออกกับ %PWM ดังนี้

$$\%PWM = -0.00977146 x_2^2(k) + 8.51348572 x_2(k) - 2.63208265 \quad (\text{ข.6})$$



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ค

### พิสูจน์การลดรูปของสมการค่าถ่วงน้ำหนัก

จากทฤษฎี adaptive interaction ในบทที่ 3 ขั้นตอนวิธีการปรับคือ การปรับค่าถ่วงน้ำหนักการเชื่อมต่อ  $\alpha_c$  โดยการหาค่าต่ำสุดของดรอนีสมรรถนะ  $E$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสัญญาณออก และสัญญาณเข้าจากภายนอก โดยที่ค่าถ่วงน้ำหนัก  $\alpha_c$  ถูกปรับตามสมการ

$$\dot{\alpha}_c = \left( \sum_{s \in O_{\text{post}_c}} \alpha_s \dot{\alpha}_s \frac{\frac{dE}{dy_{\text{post}_s}} \circ F'_{\text{post}_s}[x_{\text{post}_s}]}{\frac{dE}{dy_{\text{post}_s}} \circ F'_{\text{post}_s}[x_{\text{post}_s}] \circ y_{\text{post}_c}} - \gamma \frac{\partial E}{\partial y_{\text{post}_c}} \right) \circ F'_{\text{post}_c}[x_{\text{post}_c}] \circ y_{\text{pre}_c}, \quad c \in C \quad (\text{ค.1})$$

ดรอนีสมรรถนะ  $E$  มีค่าลดลงในทิศทางเดียว (Monotonically decrease) กับเวลา สมการ (ค.1) สามารถลดรูปได้เป็น

$$\dot{\alpha}_c = -\gamma \frac{dE}{d\alpha_c}, \quad c \in C \quad (\text{ค.2})$$

ขั้นตอนการพิสูจน์ความสอดคล้องกันของสมการลดรูป (ค.2) กับสมการ (ค.1) [6] แสดงดังนี้ ก่อนอื่นตั้งสมมติฐานว่าสมการ (ค.1) มีผลเฉลยที่เป็นไปได้เพียงอย่างเดียว (Unique solution) และ  $E$  เป็นฟังก์ชันของ  $y_n, n \in N$  ทุกๆ การเชื่อมต่อ  $c \in C$  อนุพันธ์ของ  $E$  เทียบกับค่าถ่วงน้ำหนักการเชื่อมต่อ  $\alpha_c$  คือ

$$\frac{dE}{d\alpha_c} = \frac{dE}{dy_{\text{post}_c}} \circ \frac{dy_{\text{post}_c}}{dx_{\text{post}_c}} \circ \frac{dx_{\text{post}_c}}{d\alpha_c} \quad (\text{ค.3})$$

อนุพันธ์ของสมการ (3.3) เทียบกับค่าถ่วงน้ำหนักการเชื่อมต่อ  $\alpha_c$  และอนุพันธ์ของสมการ (3.4) เทียบกับสัญญาณเข้า  $x_{\text{post}_c}$  คือ

$$\frac{dx_{\text{post}_c}}{d\alpha_c} = y_{\text{pre}_c} \quad (\text{ค.4})$$

$$\frac{dy_{\text{post}_c}}{dx_{\text{post}_c}} = F'_{\text{post}_c}[x_{\text{post}_c}] \quad (\text{ค.5})$$

ดังนั้นสมการ (ค.3) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{dE}{d\alpha_c} = \frac{dE}{dy_{\text{post}_c}} \circ F'_{\text{post}_c}[x_{\text{post}_c}] \circ y_{\text{pre}_c} \quad (\text{ค.6})$$

อนุพันธ์ของ  $E$  เทียบกับสัญญาณออก  $y_n$  คือ

$$\frac{dE}{dy_n} = \frac{\partial E}{\partial y_n} + \sum_{c \in O_n} \frac{dE}{dy_{\text{post}_c}} \circ \frac{dy_{\text{post}_c}}{dy_n} \quad (\text{ค.7})$$

อนุพันธ์ของสมการ (3.3) และ (3.4) เทียบสัญญาณออก  $y_n$  คือ

$$\frac{dx_{\text{post}_c}}{dy_n} = \sum_{c \in I_{\text{post}_c}} \alpha_c \frac{dy_{\text{pre}_c}}{dy_n} \quad (\text{ค.8})$$

$$\frac{dy_{\text{post}_c}}{dy_n} = \frac{dF_{\text{post}_c}[x_{\text{post}_c}]}{dx_{\text{post}_c}} \circ \frac{dx_{\text{post}_c}}{dy_n} \quad (\text{ค.9})$$

ถ้า  $n = \text{pre}_c$  ใน (ค.8) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{dx_{\text{post}_c}}{dy_{\text{pre}_c}} &= \sum_{c \in I_{\text{post}_c}} \alpha_c \\ &= \sum_{c \in O_{\text{pre}_c}} \alpha_c \\ \frac{dx_{\text{post}_c}}{dy_n} &= \sum_{c \in O_n} \alpha_c \end{aligned} \quad (\text{ค.10})$$

แทน  $\frac{dy_{\text{post}_c}}{dy_n} = \alpha_c F'_{\text{post}_c}[x_{\text{post}_c}]$  ลงในสมการ (ค.7) จะได้

$$\frac{dE}{dy_n} = \frac{\partial E}{\partial y_n} + \sum_{c \in O_n} \alpha_c \frac{dE}{dy_{\text{post}_c}} \circ F'_{\text{post}_c}[x_{\text{post}_c}] \quad (\text{ค.11})$$

คูณทั้งสองข้างของสมการ (ค.6) ด้วย  $\frac{\frac{dE}{dy_{\text{post}_c}} \circ F'_{\text{post}_c}[x_{\text{post}_c}]}{\frac{dE}{dy_{\text{post}_c}} \circ F'_{\text{post}_c}[x_{\text{post}_c}] \circ y_{\text{pre}_c}}$  จะได้

$$\frac{dE}{dy_{\text{post}_c}} \circ F'_{\text{post}_c}[x_{\text{post}_c}] = \frac{dE}{d\alpha_c} \cdot \frac{\frac{dE}{dy_{\text{post}_c}} \circ F'_{\text{post}_c}[x_{\text{post}_c}]}{\frac{dE}{dy_{\text{post}_c}} \circ F'_{\text{post}_c}[x_{\text{post}_c}] \circ y_{\text{pre}_c}} \quad (\text{ค.12})$$

และแทนสมการ (ค.12) ลงในสมการ (ค.11) จากนั้นแทน  $\frac{dE}{d\alpha_c} = \frac{-\dot{\alpha}_c}{\gamma}$  จะได้

$$\frac{dE}{dy_n} = \frac{\partial E}{\partial y_n} - \frac{1}{\gamma} \sum_{c \in O_n} \alpha_c \dot{\alpha}_c \frac{\frac{dE}{dy_{\text{post}_c}} \circ F'_{\text{post}_c}[x_{\text{post}_c}]}{\frac{dE}{dy_{\text{post}_c}} \circ F'_{\text{post}_c}[x_{\text{post}_c}] \circ y_{\text{pre}_c}} \quad (\text{ค.13})$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \dot{\alpha}_c &= -\gamma \frac{dE}{d\alpha_c} \\ &= -\gamma \frac{dE}{dy_{\text{post}_c}} \circ F'_{\text{post}_c}[x_{\text{post}_c}] \circ y_{\text{pre}_c} \\ &= -\gamma \left( \frac{\partial E}{\partial y_{\text{post}_c}} - \frac{1}{\gamma} \sum_{s \in O_{\text{post}_c}} \alpha_s \dot{\alpha}_s \frac{\frac{dE}{dy_{\text{post}_s}} \circ F'_{\text{post}_s}[x_{\text{post}_s}]}{\frac{dE}{dy_{\text{post}_s}} \circ F'_{\text{post}_s}[x_{\text{post}_s}] \circ y_{\text{pre}_s}} \right) \circ F'_{\text{post}_c}[x_{\text{post}_c}] \circ y_{\text{pre}_c} \end{aligned}$$

เมื่อ  $y_{\text{post}_c} = y_{\text{pre}_s}$  จะได้

$$\dot{\alpha}_c = \left( \sum_{s \in O_{\text{post}_c}} \alpha_s \dot{\alpha}_s \frac{\frac{dE}{dy_{\text{post}_s}} \circ F'_{\text{post}_s}[x_{\text{post}_s}]}{\frac{dE}{dy_{\text{post}_s}} \circ F'_{\text{post}_s}[x_{\text{post}_s}] \circ y_{\text{post}_c}} - \gamma \frac{\partial E}{\partial y_{\text{post}_c}} \right) \circ F'_{\text{post}_c}[x_{\text{post}_c}] \circ y_{\text{pre}_c}$$

สรุปได้ว่า สมการลดรูป (ค.2) สอดคล้องกับสมการ (ค.1)

## ภาคผนวก ง

### การทำงานของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี

ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีนอกจากใช้ในการรวมกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสมแล้วยังใช้ในขั้นตอนการทำงานของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี [9] ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ

#### 1. Fuzzification

ขั้นตอนนี้ทำการหาค่าความเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุตที่เข้าสู่ระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี โดยใช้กราฟที่พล็อตจาก fuzzy partition matrix ของอินพุตแต่ละตัวที่ได้จากการรวมกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสม กราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกดังกล่าวถูกประมาณเป็นฟังก์ชันแบบสามเหลี่ยมดังสมการ (ง.1) โดยสมมติว่ามีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทั้งหมด 7 เซต

$$\begin{aligned} \mu_1^E(e) &= \begin{cases} 1 & e \leq \alpha_{1b} \\ \frac{\alpha_{1c}-e}{\alpha_{1c}-\alpha_{1b}} & \alpha_{1b} < e < \alpha_{1c} \\ 0 & e \geq \alpha_{1c} \end{cases} \\ \mu_i^E(e) &= \begin{cases} \frac{e-\alpha_{ia}}{\alpha_{ib}-\alpha_{ia}} & \alpha_{ia} < e \leq \alpha_{ib} \\ \frac{\alpha_{ic}-e}{\alpha_{ic}-\alpha_{ib}} & \alpha_{ib} < e < \alpha_{ic} \\ 0 & e \leq \alpha_{ia} \text{ or } e \geq \alpha_{ic} \end{cases} \quad \text{where } i = 2, \dots, 6 \\ \mu_n^E(e) &= \begin{cases} 0 & e \leq \alpha_{nb} \\ \frac{e-\alpha_{na}}{\alpha_{nb}-\alpha_{na}} & \alpha_{na} < e < \alpha_{nb} \\ 0 & e \geq \alpha_{nb} \end{cases} \quad \text{where } n = 7 \end{aligned} \quad (ง.1)$$

โดยที่  $E$  คือ เซตฟัซซีค่าผิดพลาด และ  $e$  คือ ค่าผิดพลาด ค่าความเป็นสมาชิกของเซตฟัซซีการเปลี่ยนแปลงค่าผิดพลาด  $\Delta E$  สามารถคำนวณได้แบบเดียวกัน ฟังก์ชันแบบสามเหลี่ยมแสดงดังรูปที่ ง.1



รูปที่ ง.1: ฟังก์ชันสามเหลี่ยมแสดงค่าความเป็นสมาชิกของเซตฟัซซี  $E$

#### 2. Fuzzy rule base

การนำอินพุต  $e$  และ  $\Delta e$  ไปใช้กับฐานกฎฟัซซีที่สร้างขึ้นแสดงดังนี้ สมมติว่ามีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทั้งหมด 7 เซต คือ {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB} กำหนดให้อินพุต  $e$  มีค่าความ

เป็นสมาชิกเท่ากับ 0.7 ในเซต NM และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0.3 ในเซต NS ขณะที่  $\Delta e$  มีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0.5 ในเซต NS และมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0.9 ในเซต ZO ดังนั้นเมื่อพิจารณาตารางค่าอัตราขยายฟัซซีของเอาร์ทพุต  $\Delta u$  ในตารางที่ ง.1

ตารางที่ ง.1: ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับ  $\Delta u$

		$\Delta e(k)$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$e(k)$	NB	NB	NB	NB	NM	NS	NS	ZO
	NM	NB	NM	NM	NS	NS	ZO	PS
	NS	NB	NM	NM	NS	ZO	PS	PS
	ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
	PS	NS	NS	ZO	PS	PM	PM	PB
	PM	NS	ZO	PS	PM	PM	PM	PB
	PB	ZO	PS	PS	PM	PB	PB	PB

จากตารางที่ ง.1 พบว่ากฎฟัซซีที่ถูกใช้มีทั้งหมด 4 กฎ ดังนั้นสามารถหาค่าความเป็นสมาชิกของเซตฟัซซีเอาร์ทพุตในแต่ละกฎโดยการหาค่าต่ำสุดของค่าความเป็นสมาชิกของเซตฟัซซีอินพุต ดังนี้

กฎที่ (2, 3)

*IF e is NM and  $\Delta e$  is NS THEN  $\Delta u$  is NM*

ค่าความเป็นสมาชิกของเอาร์ทพุตในกฎที่ (2, 3)  $\Delta u = \min\{0.7, 0.5\} = 0.5$  ในเซต NM  
กฎที่ (2, 4)

*IF e is NM and  $\Delta e$  is ZO THEN  $\Delta u$  is NS*

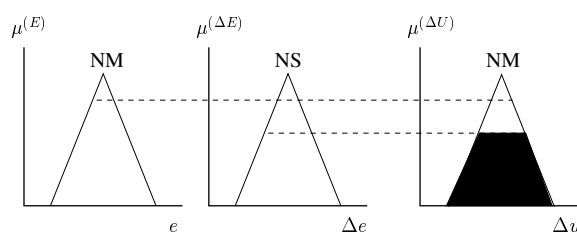
ค่าความเป็นสมาชิกของเอาร์ทพุตในกฎที่ (2, 4)  $\Delta u = \min\{0.7, 0.9\} = 0.7$  ในเซต NS  
กฎที่ (3, 3)

*IF e is NS and  $\Delta e$  is NS THEN  $\Delta u$  is NM*

ค่าความเป็นสมาชิกของเอาร์ทพุตในกฎที่ (3, 3)  $\Delta u = \min\{0.3, 0.5\} = 0.3$  ในเซต NM  
กฎที่ (3, 4)

*IF e is NS and  $\Delta e$  is ZO THEN  $\Delta u$  is NS*

ค่าความเป็นสมาชิกของเอาร์ทพุตในกฎที่ (3, 4)  $\Delta u = \min\{0.3, 0.9\} = 0.3$  ในเซต NS



รูปที่ ง.2: การหาค่าต่ำสุดของกฎที่ (2, 3)

รูปที่ ง.2 แสดงการหาค่าต่ำสุดของกฎที่ (2,3) โดยการฉายอินพุต  $e$  และ  $\Delta e$  ลงบนแกนเอาต์พุต  $\Delta u$  การรวมค่าความเป็นสมาชิกของเซตฟัซซีเอาต์พุตที่อยู่ในเซตเดียวกันทำได้โดยการหาค่าสูงสุดของค่าความเป็นสมาชิกของฟังก์ชันเอาต์พุต ดังนี้

เอาต์พุตในเซต NM มีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ  $\max\{0.5, 0.3\} = 0.5$

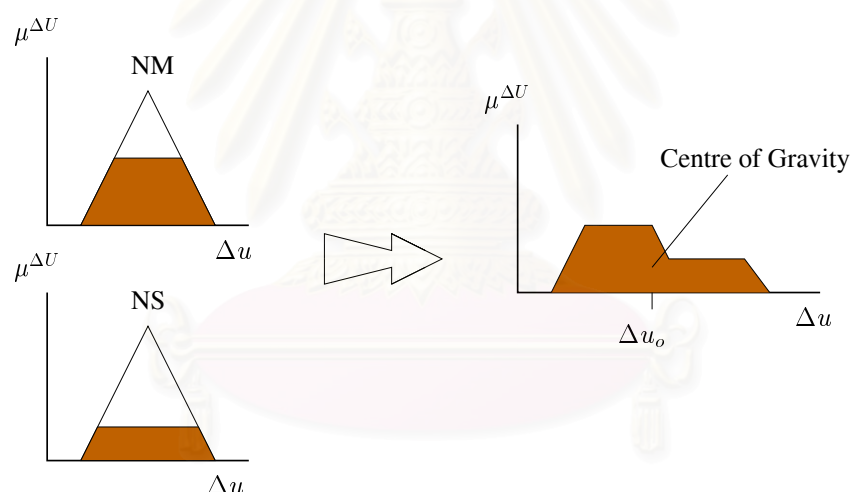
เอาต์พุตในเซต NS มีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ  $\max\{0.7, 0.3\} = 0.7$

### 3. Defuzzification

การรวมกฎเป็นการหาค่าเอาต์พุตของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีcentroid โดยมีสมการในการหาค่าเอาต์พุตดังนี้

$$\Delta u_o = \frac{\sum_i \Delta u_i \cdot \mu_i^{(\Delta U)}(\Delta u_i)}{\sum_i \mu_i^{(\Delta U)}(\Delta u_i)} \quad (\text{ง.2})$$

$\Delta U$  คือ เซตฟัซซีเอาต์พุต และ  $\mu_i$  คือ ค่าความเป็นสมาชิกของเซตที่  $i$  ในเซตฟัซซี  $\Delta U$  ตัวอย่างการรวมกฎโดยวิธีcentroid แสดงดังรูปที่ ง.3

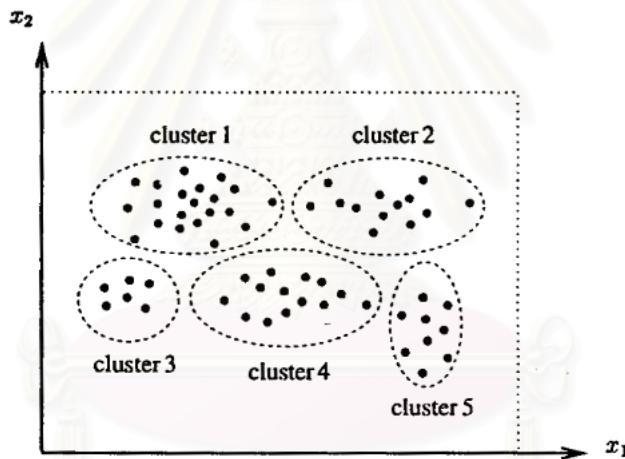


รูปที่ ง.3: ตัวอย่างการรวมกฎโดยวิธีcentroid

## ภาคผนวก จ

### การรวมกลุ่มข้อมูล

ระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีอาศัยตัวแปรเชิงภาษา (Linguistic) แทนเซตของข้อมูลและกำหนดค่าความเป็นสมาชิกในเซต เซตโดยทั่วไปจะกำหนดค่าความเป็นสมาชิกเพียงใช่หรือไม่ใช่สมาชิกในเซต เช่น “กรุงเทพฯอยู่ใกล้เชียงใหม่” ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0 เพราะกรุงเทพฯอยู่ไกลจากเชียงใหม่มาก เซตประเภทนี้ถูกเรียกว่า crisp set แต่เซตที่ใช้อยู่ในระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี (fuzzy set) สามารถกำหนดค่าความเป็นสมาชิกโดยแบ่งเป็นระดับ เช่น “กรุงเทพฯอยู่ใกล้เชียงใหม่” ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0.5 เมื่อเทียบกับ “ยะลาอยู่ใกล้กับเชียงใหม่” ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0 และถ้าเทียบกับ “พิษณุโลกอยู่ใกล้กับเชียงใหม่” ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0.8 เพราะกรุงเทพฯอยู่ตรงกลางระหว่างเชียงใหม่กับยะลา และพิษณุโลกอยู่ใกล้เชียงใหม่มากกว่ากรุงเทพฯ



รูปที่ จ.1: การกระจายตัวของข้อมูล 2 มิติ

รูปที่ จ.1 แสดงตัวอย่างการกระจายตัวของข้อมูล 2 มิติ ข้อมูลในลักษณะนี้สามารถใช้ในการรวมกลุ่มข้อมูลในรูปแบบของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี (fuzzy set) ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีการรวมกลุ่มข้อมูลแบบfuzzy c-means เพื่อความเข้าใจในขั้นตอนการรวมกลุ่มข้อมูลแบบfuzzy c-means ในที่นี้จะอธิบายการรวมกลุ่มข้อมูลแบบhard c-means ก่อน

#### จ.1 การรวมกลุ่มข้อมูลแบบhard c-means

hard c-means [10] เป็นการรวมกลุ่มข้อมูลแบบcrisp set โดยข้อมูลแต่ละจุดจะมีค่าความเป็นสมาชิกเป็น 1 ในกลุ่มข้อมูลใดกลุ่มข้อมูลหนึ่งและเป็น 0 ในกลุ่มข้อมูลที่เหลือ แต่ละกลุ่มข้อมูลเรียกว่า partition กำหนดเซต  $A_i, (i = 1, 2, \dots, c)$  เป็นกลุ่มข้อมูลแบบhard c-partition ของ  $X$  กลุ่มที่ 1 ถึง  $c$  โดยสอดคล้อง

กับเงื่อนไข

$$\bigcup_{i=1}^c \mu_{A_i}(x_k) = X, \quad \forall k \quad (จ.1)$$

$$\mu_{A_i}(x_k) \cap \mu_{A_j}(x_k) = 0, \quad \forall k \quad (จ.2)$$

$$0 < \sum_{k=1}^n \mu_{A_i}(x_k) < n, \quad \forall i \quad (จ.3)$$

ซึ่งสมการ (จ.1, จ.2) อธิบายได้ว่าข้อมูล  $x_k$  อยู่ในกลุ่มข้อมูล  $A$  กลุ่มใดกลุ่มหนึ่งเพียงกลุ่มเดียว และสมการ (จ.3) อธิบายได้ว่าไม่มีกลุ่มข้อมูล  $A_i$  ใดเลยที่เป็นเซตว่าง และไม่มีกลุ่มข้อมูล  $A_i$  ใดเลยที่มีสมาชิกในเซต  $X$  รวมอยู่ในกลุ่มทั้งหมด

กำหนดให้ universe ( $U$ ) ประกอบด้วยค่าความเป็นสมาชิก  $\mu_{ik}$  ซึ่ง  $\mu_{ik} = \mu_{A_i}(x_k)$ , ( $i = 1, 2, \dots, c$  และ  $k = 1, 2, \dots, n$ ) จากสมการ (จ.1) - (จ.3) เราสามารถกำหนดเมทริกซ์ความเป็นสมาชิกสำหรับ hard c-partition ของเซต  $X$  ดังนี้

$$M_{hc} = \{U \mid \mu_{ik} \in \{0, 1\}, \sum_{i=1}^c \mu_{ik} = 1, 0 < \sum_{k=1}^n \mu_{ik} < n\} \quad (จ.4)$$

และกำหนดให้จำนวนเซตที่เป็นไปได้ของ  $M_{hc}$  ที่เกิดขึ้นเป็น  $\eta_{M_{hc}}$  (The cardinality of any hard c-partition)

$$\eta_{M_{hc}} = \frac{1}{c!} \left\{ \sum_{i=1}^c \binom{c}{i} (-1)^{c-i} \cdot i^n \right\} \quad (จ.5)$$

ซึ่ง  $\binom{c}{i}$  เป็น binomial coefficient เช่น binomial coefficient ของพจน์ที่ 4 เมื่อกระจาย  $(a+b)^5$  คือ  $\binom{5}{3} = 10$

เราจะเลือกเซตที่เหมาะสมที่สุดจากเซตที่เป็นไปได้ของ  $M_{hc}$  โดยพิจารณา objective function

$$J(U, v) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c \mu_{ik} (d_{ik})^2$$

ซึ่ง  $U$  คือ universe ของค่าความเป็นสมาชิก,  $v$  คือ เวกเตอร์จุดศูนย์กลางของกลุ่มข้อมูลใดๆ,  $d_{ik}$  คือ ระยะทางจากข้อมูล  $x_k$  ถึงจุดศูนย์กลางของกลุ่มข้อมูล  $v_i$  (Euclidean distance measure) ใน  $m$  มิติ

$$d_{ik} = d(x_k - v_i) = \|x_k - v_i\| = \left[ \sum_{j=1}^m (x_{kj} - v_{ij})^2 \right]^{1/2} \quad (จ.6)$$

โดยที่  $v_i = \{v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{im}\}$  และจุดศูนย์กลางของกลุ่มข้อมูลที่  $i = 1, 2, \dots, c$  ในมิติที่  $j = 1, 2, \dots, m$  แสดงดังสมการ

$$v_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n \mu_{ik} \cdot x_{kj}}{\sum_{k=1}^n \mu_{ik}} \quad (จ.7)$$



ขั้นตอนวิธีการรวมกลุ่มข้อมูลแบบhard c-means

1. กำหนดจำนวนกลุ่มข้อมูล  $c$  โดยที่  $2 \leq c < n$  และค่าเริ่มต้นของ  $U^0 \in M_{hc}$
2. คำนวณหาจุดศูนย์กลาง  $v_j^r$  ของกลุ่มข้อมูล  $c$  ในทุกมิติ โดยใช้สมการ (จ.7) ซึ่ง  $r = 0, 1, 2, \dots$  คือ รอบการคำนวณ
3. ปรับค่า  $U^r$  ไปเป็น  $U^{r+1}$  โดยอาศัยความสัมพันธ์

$$\mu_{ik}^{r+1} = \begin{cases} 1, & d_{ik}^r = \min\{d_{jk}^r\}, \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall j \in c$$

4. เปรียบเทียบ  $U^r$  และ  $U^{r+1}$

$$\|U^{r+1} - U^r\| \leq \varepsilon \quad (\text{tolerance})$$

ถ้าเงื่อนไขข้างต้นเป็นจริง จบการคำนวณมิฉะนั้น  $r = r + 1$  กลับไปทำในขั้นตอนที่ 2

## จ.2 การรวมกลุ่มข้อมูลแบบfuzzy c-means

fuzzy c-means [10, 22, 23] เป็นการรวมกลุ่มข้อมูลแบบfuzzy set คือ ค่าความเป็นสมาชิกของข้อมูล  $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_m\}$  ในเซตฟัซซี  $\{A_i, i = 1, 2, \dots, c\}$  มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 โดยความสัมพันธ์ของค่าความเป็นสมาชิกของข้อมูลที่  $k$  ในกลุ่มข้อมูลที่  $i$  คือ

$$\mu_{ik} = \mu_{A_i}(x_k) \in [0, 1] \quad (\text{จ.8})$$

$$\sum_{i=1}^c \mu_{ik} = 1, \quad \forall k = 1, 2, \dots, n \quad (\text{จ.9})$$

$$0 < \sum_{k=1}^n \mu_{ik} < n \quad (\text{จ.10})$$

ข้อมูลเพียงจุดเดียวสามารถเป็นสมาชิกได้มากกว่า 1 เซตฟัซซี โดยผลรวมของค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมดของข้อมูลจุดนั้นต้องมีค่าเป็น 1 ไม่มีกลุ่มข้อมูลใดเป็นเซตว่างและไม่มีกลุ่มข้อมูลใดเลยที่มีสมาชิกในเซต  $X$  อยู่ทั้งหมด

เนื่องจากข้อมูลแต่ละตัวสามารถมีค่าความเป็นสมาชิกได้มากกว่า 1 กลุ่ม ดังนั้นเงื่อนไขของค่าความเป็นสมาชิกเป็นดังนี้

$$\mu_{ik} \wedge \mu_{jk} \neq 0 \quad (\text{จ.11})$$

$$\bigvee_{i=1}^c \mu_{A_i}(x_k) = 1 \quad \forall k \quad (\text{จ.12})$$

$$0 < \sum_{k=1}^n \mu_{A_i}(x_k) < n \quad \forall i \quad (\text{จ.13})$$

สามารถกำหนดเมทริกซ์ความเป็นสมาชิกสำหรับfuzzy c-partition ของเซต  $X$  ดังนี้

$$M_{fc} = \{U \mid \mu_{ij} \in [0, 1], \sum_{i=1}^c \mu_{ik} = 1, 0 < \sum_{k=1}^n \mu_{ik} < n\} \quad (\text{จ.14})$$

เช่นเดียวกับhard c-partition สามารถเลือกเซตที่เหมาะสมที่สุดจากเซตที่เป็นไปได้ของ  $M_{fc}$  โดยพิจารณา objective function

$$J(U, v) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c \mu_{ik}^{m'} (d_{ik})^2$$

$m' \in [0, \infty]$  คือ weighting parameter และ  $d_{ik}$  คือ ระยะทางจากข้อมูล  $x_k$  ถึงจุดศูนย์กลางของกลุ่มข้อมูล  $v_i$  (Euclidean distance measure) ใน  $m$  มิติ

$$d_{ik} = d(x_k - v_i) = \left[ \sum_{j=1}^m (x_{kj} - v_{ij})^2 \right]^{1/2} \quad (\text{จ.15})$$

$v_{ij}$  คือ จุดศูนย์กลางของกลุ่มข้อมูลที่  $i = 1, 2, \dots, c$  ในมิติที่  $j = 1, 2, \dots, m$  แสดงดังสมการ

$$v_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n \mu_{ik}^{m'} \cdot x_{kj}}{\sum_{k=1}^n \mu_{ik}^{m'}} \quad (\text{จ.16})$$

ขั้นตอนวิธีการรวมกลุ่มข้อมูลแบบfuzzy c-means

1. กำหนดจำนวนกลุ่มข้อมูล  $c$  โดยที่  $2 \leq c < n$  ค่าของ weighting parameter  $m' \in (0, \infty)$  และค่าเริ่มต้นของ  $U^0 \in M_{fc}$  โดยใช้การสุ่ม
2. คำนวณหาจุดศูนย์กลาง  $v_{ij}^r$  ของกลุ่มข้อมูล  $c$  ในทุกมิติ โดยใช้สมการ (จ.16)  $r = 0, 1, 2, \dots$  คือ รอบการคำนวณ
3. ปรับค่า  $U^r$  ไปเป็น  $U^{r+1}$  โดยอาศัยความสัมพันธ์

$$\mu_{ik}^{r+1} = \left[ \sum_{j=1}^c \left( \frac{d_{ik}^r}{d_{jk}^r} \right)^{2/(m'-1)} \right]^{-1}, \quad 1 \leq i \leq c, \quad 1 \leq k \leq n$$

4. เปรียบเทียบ  $U^r$  และ  $U^{r+1}$

$$\|U^{r+1} - U^r\| \leq \varepsilon \quad (\text{tolerance})$$

ถ้าเงื่อนไขข้างต้นเป็นจริง จบการคำนวณมิฉะนั้น  $r = r + 1$  กลับไปทำในขั้นตอนที่ 2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ฉ

### ตารางค่าอัตราขยายพีซีซี

Zhao [20] เสนอวิธีการสร้างฐานกฎพีซีซีสำหรับระบบตรรกศาสตร์พีซีซีที่ใช้ปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในสถานะหนึ่งๆ และถูกประยุกต์ใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุม PI โดย [3] ดังนี้คือ กำหนดให้  $K_p \in [K_{p,min}, K_{p,max}] \subset \mathfrak{R}$  และ  $K_i \in [K_{i,min}, K_{i,max}] \subset \mathfrak{R}$  ค่าพารามิเตอร์  $K_{p,min}, K_{p,max}, K_{i,min}, K_{i,max}$  หาได้จาก

$$K_{p,min} = 0.32K_u, \quad K_{p,max} = 0.6K_u \quad (ฉ.1)$$

$$K_{i,min} = \frac{K_{p,min}}{T_i}, \quad K_{i,max} = \frac{K_{p,max}}{T_i} \quad (ฉ.2)$$

$K_u$  คือ ค่าอัตราขยายเมื่อสัญญาณออกอยู่ในภาวะoscillate และ  $T_i$  คือ integral time คำนวณจากการปรับจูน PI โดยวิธีZiegler-Nichols แบบวงปิด การสร้างฐานกฎพีซีซีเป็นการอธิบายการปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุม PI โดยค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI สามารถหาได้จาก

$$K'_p = \frac{K_p - K_{p,min}}{K_{p,max} - K_{p,min}} \quad (ฉ.3)$$

$$K'_i = \frac{K_i - K_{i,min}}{K_{i,max} - K_{i,min}} \quad (ฉ.4)$$

ค่าพารามิเตอร์ที่ถูกปรับจูนโดยระบบตรรกศาสตร์พีซีซีคือ  $K'_p$  และ  $K'_i$  โดยมีอินพุตของระบบตรรกศาสตร์พีซีซีเป็นค่าผิดพลาด  $e(k)$  และการเปลี่ยนแปลงสัญญาณค่าผิดพลาด  $\Delta e(k)$  ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตสามารถเขียนอยู่ในรูปกฎพีซีซี IF-THEN ได้ดังนี้

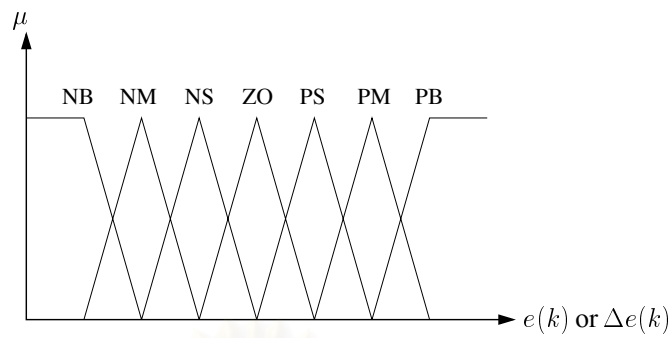
$$IF \ e(k) \text{ is } A^i \text{ and } \Delta e(k) \text{ is } B^i, \text{ THEN } K'_p \text{ is } C^j \ K'_i \text{ is } D^j$$

$A^i, B^i, C^j$  และ  $D^j$  คือ เซตพีซีซี โดย  $i = 1, 2, \dots, 7$  และ  $j = 1, 2$  ตัวแปรเชิงภาษาสำหรับ  $e(k)$  และ  $\Delta e(k)$  นิยามไว้ 7 เซต ได้แก่ ค่าลบมาก (NB) ค่าลบปานกลาง (NM) ค่าลบน้อย (NS) ค่าศูนย์ (ZO) ค่าบวกน้อย (PS) ค่าบวกปานกลาง (PM) ค่าบวกมาก (PB) แสดงดังรูปที่ ฉ.1 และตัวแปรเชิงภาษาสำหรับ  $K'_p$  และ  $K'_i$  นิยามไว้ 2 เซต ได้แก่ เล็ก (S) ใหญ่ (B) แสดงดังรูปที่ ฉ.2

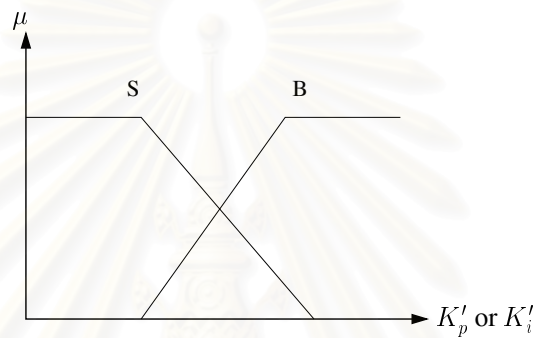
เซตพีซีซีอินพุตและเอาต์พุตของระบบตรรกศาสตร์พีซีซีสามารถหาได้จากผลตอบที่มีเสถียรภาพของกระบวนการต่อสัญญาณขั้นบันได การสร้างกฎพีซีซี IF-THEN ทำได้โดยพิจารณาจากรูปที่ ฉ.3

ช่วง  $a_1$  สัญญาณค่าผิดพลาดมีค่ามาก ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงสัญญาณค่าผิดพลาดมีค่าน้อย เพราะเพิ่งเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงจากสัญญาณอ้างอิง ณ.จุดนี้การควบคุมแบบสัดส่วนมีผลต่อระบบมาก เพื่อให้สัญญาณควบคุมมีค่าสูงซึ่งมีผลให้สัญญาณเอาต์พุตมีค่าถึงค่าอ้างอิงโดยเร็ว

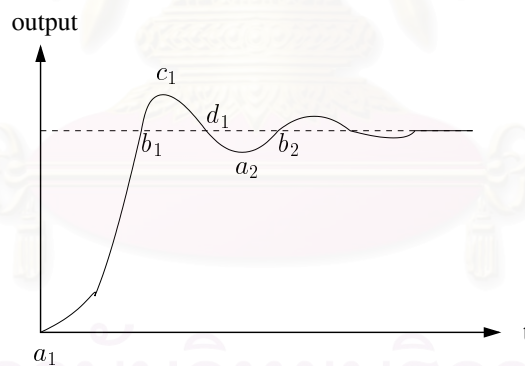
ช่วง  $a_1$  ถึง  $b_1$  สัญญาณค่าผิดพลาดเริ่มมีคาลดลง ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณค่าผิดพลาดเริ่มมีคาลบมากขึ้น ณ.จุดนี้ต้องการให้สัญญาณออกมีค่าเพิ่มขึ้นอีกจึงควรปรับค่าอัตราขยายสัดส่วนและอินทิกรัลให้มีค่ามากพอเหมาะสำหรับทำให้สัญญาณออกมีค่าเพิ่มขึ้นต่อไป



รูปที่ ๑.1: ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ  $e(k)$  และ  $\Delta e(k)$



รูปที่ ๑.2: ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ  $K_p'$  และ  $K_i'$



รูปที่ ๑.3: ผลตอบต่อสัญญาณขั้นบันได

ช่วง  $b_1$  สัญญาณค่าผิดพลาดมีค่าน้อยมาก การควบคุมแบบสัดส่วนไม่มีผลต่อสัญญาณเอาต์พุตมากนัก ณ.จุดนี้มีเพียงการควบคุมแบบอินทิกรัลเท่านั้นที่มีผลต่อระบบ เพื่อให้ระบบไม่มีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว

จากการวิเคราะห์ผลตอบของกระบวนการต่อสัญญาณขั้นบันไดในช่วง  $a_1$  ถึง  $b_1$  สามารถสร้างกฎการควบคุมดังนี้

*IF  $e(k)$  is PB and  $\Delta e(k)$  is ZO, THEN  $K_p'$  is B  $K_i'$  is S*

*IF  $e(k)$  is PS and  $\Delta e(k)$  is NS, THEN  $K_p'$  is B  $K_i'$  is B*

IF  $e(k)$  is ZO and  $\Delta e(k)$  is NB, THEN  $K'_p$  is S  $K'_i$  is B

สำหรับช่วงที่เหลือ ใช้การวิเคราะห์เช่นเดียวกับช่วง  $a_1$  ถึง  $b_1$  ดังนั้นเราสามารถสร้างกฎฟัซซีได้ทั้งหมด 49 กฎ และสามารถเขียนเป็นฐานกฎฟัซซีได้ดังตารางที่ ฉ.1 - ฉ.2

ตารางที่ ฉ.1: ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับ  $K'_p$

		$\Delta e(k)$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$e(k)$	NB	B	B	B	B	B	B	B
	NM	S	B	B	B	B	B	S
	NS	S	S	B	B	B	S	S
	ZO	S	S	S	B	S	S	S
	PS	S	S	B	B	B	S	S
	PM	S	B	B	B	B	B	S
	PB	B	B	B	B	B	B	B

ตารางที่ ฉ.2: ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับ  $K'_i$

		$\Delta e(k)$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$e(k)$	NB	S	S	S	S	S	S	S
	NM	S	S	B	B	B	S	S
	NS	S	B	B	B	B	B	S
	ZO	B	B	B	B	B	B	B
	PS	S	B	B	B	B	B	S
	PM	S	S	B	B	B	S	S
	PB	S	S	S	S	S	S	S

หลังจากหาค่า  $K'_p$  และ  $K'_i$  ได้แล้ว จึงสามารถหาค่า  $K_p$  และ  $K_i$  ของตัวควบคุม PI ได้ดังนี้

$$K_p = (K_{p,max} - K_{p,min})K'_p + K_{p,min} \quad (ฉ.5)$$

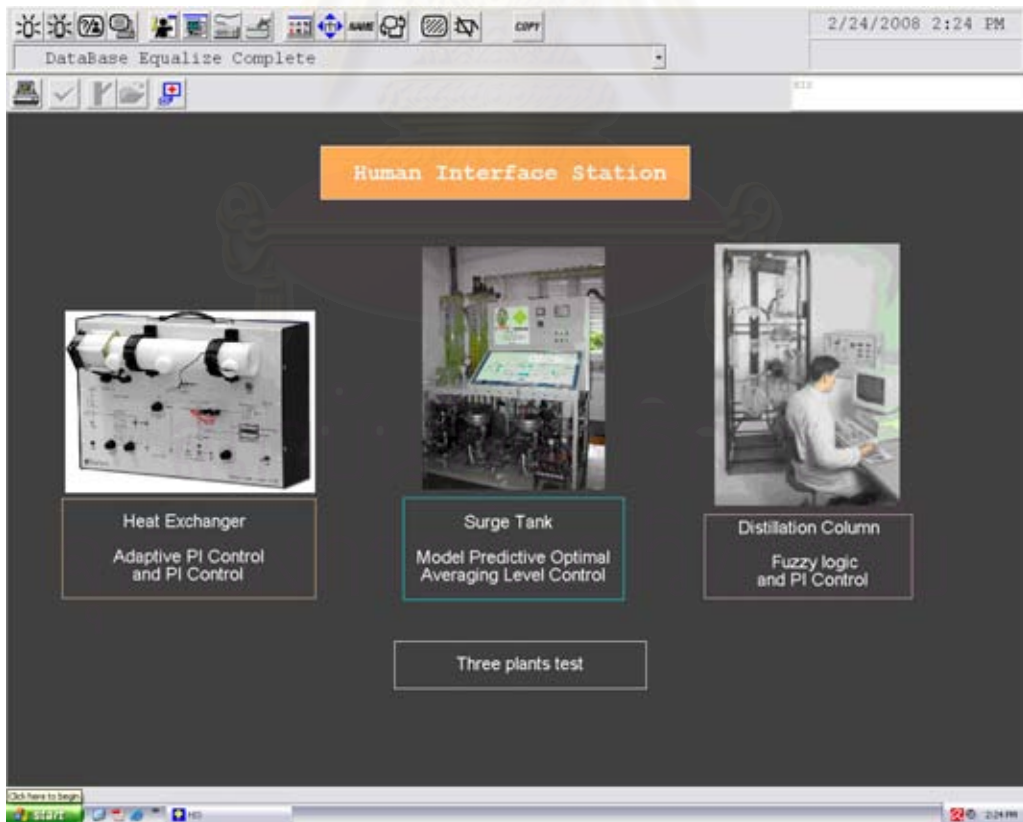
$$K_i = (K_{i,max} - K_{i,min})K'_i + K_{i,min} \quad (ฉ.6)$$

## ภาคผนวก ข

### Human Interface Station

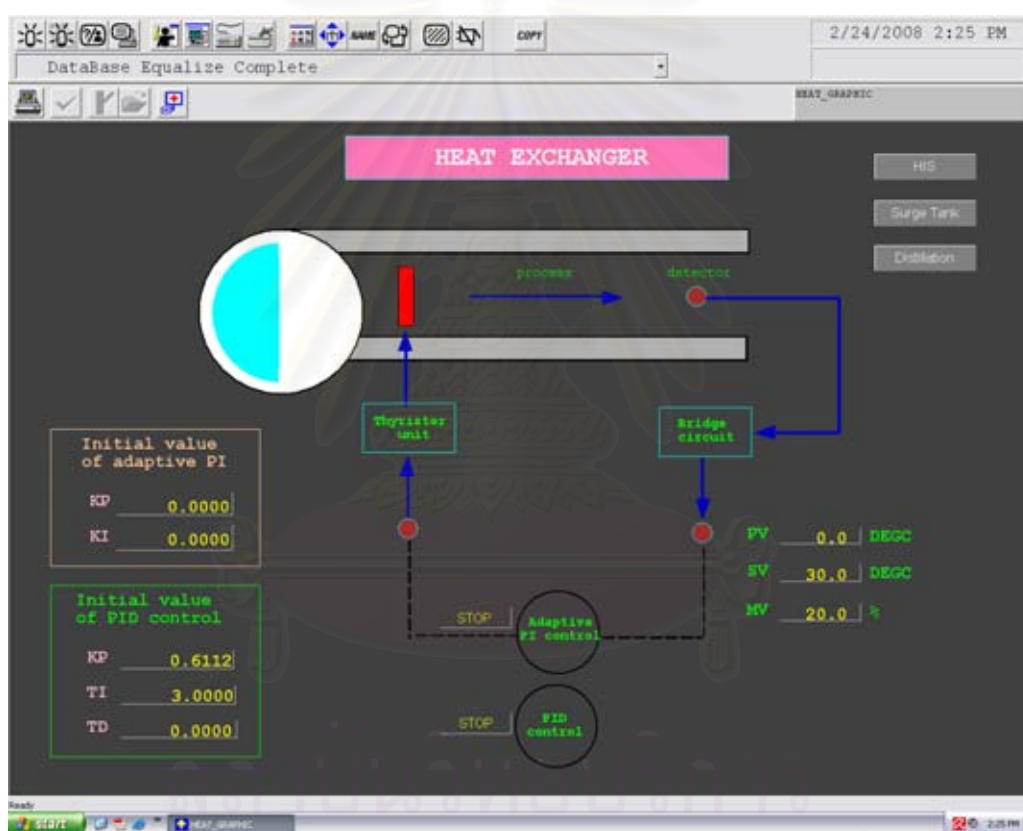
Distributed Control Systems (DCS) ของบริษัท Yokogawa รุ่น CENTUM CS3000 เป็นระบบที่หน่วยประมวลผล (Field control station, FCS) แยกออกจากหน่วยแสดงผล (Human interface station, HIS) สามารถควบคุมหลายกระบวนการพร้อมกัน โครงสร้างและการทำงานของDCSแสดงใน [24] ในที่นี้กล่าวถึงหน่วยแสดงผลHISที่สร้างขึ้นสำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ เพื่ออำนวยความสะดวกแก่ผู้ปฏิบัติการในการดำเนินการ (Operate) และเฝ้าดูการทำงาน (Monitor)

หน้าต่าง HIS แสดงดังรูปที่ ข.1 หน้าต่างนี้ใช้สำหรับเลือกกระบวนการที่ทำการควบคุมโดยดำเนินการผ่านDCSโดยแบ่งออกเป็น 4 การควบคุมคือ การควบคุมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้ตัวควบคุม PI แบบปรับอัตราขยายได้ (ซ้าย) การควบคุมระดับในถังพักโดยใช้การควบคุมระดับแบบเฉลี่ย (กลาง) การควบคุมหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิดโดยใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี (ขวา) และการควบคุม 3 กระบวนการพร้อมกัน (ล่าง)



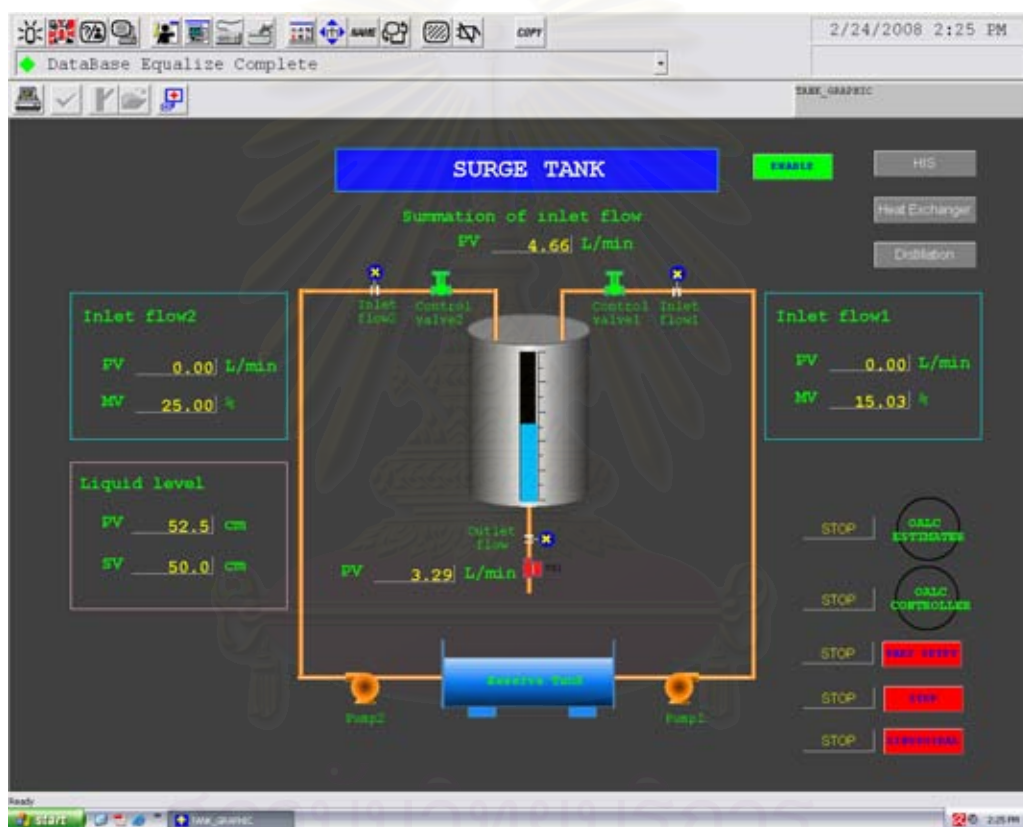
รูปที่ ข.1: หน้าต่าง HIS

หน้าต่าง HEAT GRAPHIC แสดงดังรูปที่ ช.2 หน้าต่างนี้มีการควบคุม 2 ส่วนคือ ตัวควบคุม PID แบบกำหนดพารามิเตอร์คงที่ ผู้ปฏิบัติการสามารถปรับอัตราขยายของตัวควบคุม PID และสั่งให้ตัวควบคุม PID ทำงาน การควบคุมที่ 2 คือตัวควบคุม PI แบบปรับอัตราขยายได้ ผู้ปฏิบัติการสามารถกำหนดค่าเริ่มต้นของอัตราขยายของตัวควบคุม PI และสั่งให้ตัวควบคุม PI ทำงาน ทางด้านล่างขวา PV แสดงค่าอุณหภูมิออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน กราฟของอุณหภูมิออกแสดงโดยคลิกขวาที่ PV แล้วเลือก tuning ผู้ปฏิบัติการสามารถกำหนดค่ากำหนดในช่อง SV และสามารถกำหนดสัญญาณควบคุมเริ่มต้นในช่อง MV โดยที่ช่อง MV นี้สามารถแสดงค่าสัญญาณควบคุมที่ให้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ผู้ปฏิบัติการสามารถไปยังหน้าต่าง HIS หน้าต่าง TANK GRAPHIC หรือหน้าต่าง DISTILL GRAPHIC ผ่านทางปุ่มเลือกด้านบนขวา



รูปที่ ช.2: หน้าต่าง HEAT GRAPHIC

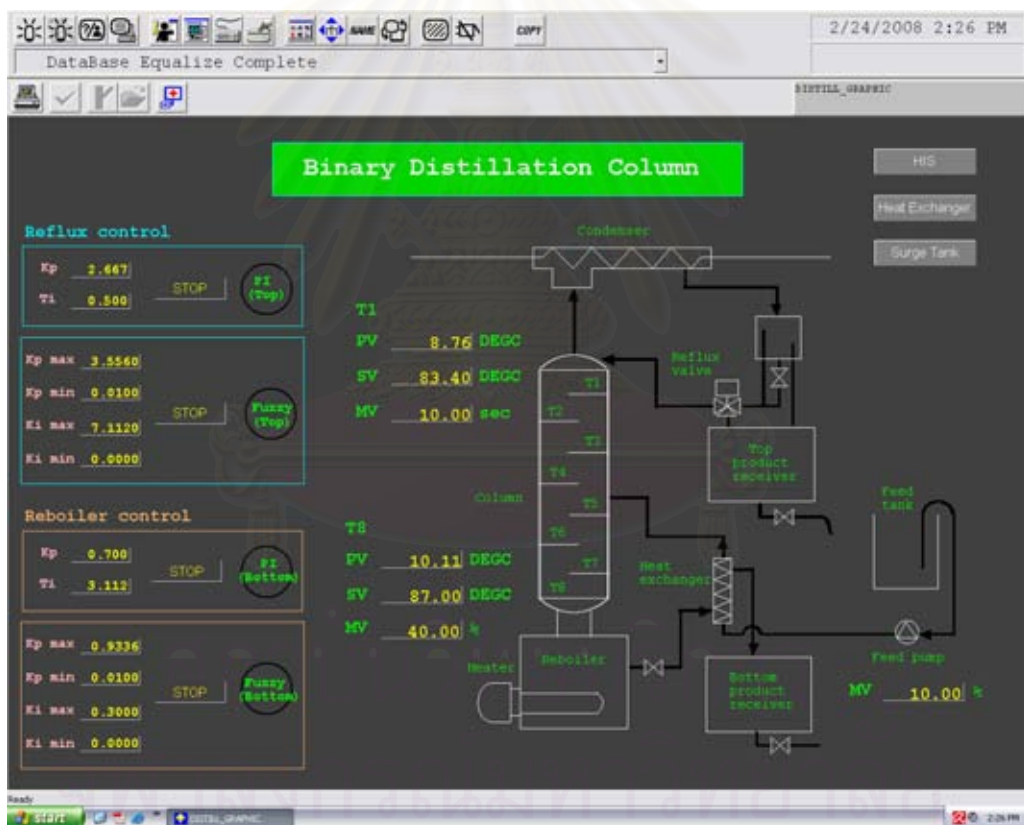
หน้าต่าง TANK GRAPHIC แสดงดังรูปที่ ข.3 ผู้ปฏิบัติการต้องสั่งให้วาล์วควบคุม FT-1 และ FT-2 รับสัญญาณจากหน้าต่างนี้โดยคลิกที่ปุ่ม ENABLE ผู้ปฏิบัติการสามารถสั่งให้การควบคุมระดับแบบเฉลี่ยทำงานและเลือกการรบกวนแบบสัญญาณขั้นบันไดหรือสัญญาณไซน์จากปุ่มเลือกทางด้านล่างขวา อัตราการไหลเข้าสามารถอ่านค่าได้จาก PV ด้านบนช่องกลางซึ่งเป็นผลรวมของอัตราการไหลเข้าที่ 1 และ 2 ตำแหน่งวาล์วควบคุม FT-1 สามารถกำหนดได้ในช่อง MV ด้านขวา และ FT-2 ในช่อง MV ด้านซ้าย ผู้ปฏิบัติการสามารถเฝ้าดูระดับในถังพักและกำหนดค่ากำหนดได้ในช่อง PV และ SV ด้านล่างซ้ายตามลำดับ ค่าประมาณอัตราการไหลออกแสดงในช่อง PV ตรงกลางของหน้าต่างนี้ ผู้ปฏิบัติการสามารถไปยังหน้าต่าง HIS หน้าต่าง HEAT GRAPHIC หรือหน้าต่าง DISTILL GRAPHIC ผ่านทางปุ่มเลือกด้านบนขวา



รูปที่ ข.3: หน้าต่าง TANK GRAPHIC



หน้าต่าง DISTILL GRAPHIC แสดงดังรูปที่ ข.4 หอกลิ้นแยกสารผสมสองชนิดมีวงรอบควบคุม 2 วงรอบคือ วงรอบยอดหอและวงรอบฐานหอ ซึ่งแต่ละวงรอบกำหนดให้มีการควบคุม 2 แบบคือ ตัวควบคุม PI แบบกำหนดพารามิเตอร์คงที่และตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี่ ผู้ปฏิบัติการต้องเลือกการควบคุมแบบใดแบบหนึ่งในแต่ละวงรอบ ค่าอัตราขยายของตัวควบคุม PI ในการควบคุมทั้ง 2 แบบสามารถกำหนดได้ในช่องด้านซ้าย อุณหภูมิวงรอบยอดหอ (T1) แสดงในช่อง PV ตรงกลางด้านบนและอุณหภูมิวงรอบฐานหอ (T8) แสดงในช่อง PV ตรงกลางด้านล่าง ผู้ปฏิบัติการสามารถกำหนดค่ากำหนดของอุณหภูมิวงรอบยอดหอและฐานหอในช่อง SV และกำหนดค่าเริ่มต้นของอัตราการป้อนไอสารที่ฐานหอในช่อง MV ด้านล่าง ส่วนค่าเริ่มต้นของอัตราการป้อนกลับสารที่ยอดหอกำหนดที่อุปกรณ์เชื่อมต่อกับหอกลิ้น อัตราการป้อนสารผสมเข้ากลางหอกำหนดในช่อง MV ด้านล่างขวา ผู้ปฏิบัติการสามารถไปยังหน้าต่าง HIS หน้าต่าง HEAT GRAPHIC หรือหน้าต่าง TANK GRAPHIC ผ่านทางปุ่มเลือกด้านบนขวา



รูปที่ ข.4: หน้าต่าง DISTILL GRAPHIC

หน้าต่าง THREE PLANTS TEST แสดงดังรูปที่ ข.5 หน้าต่างนี้รวบรวมส่วนแสดงผลและปุ่มเลือกการทำงานของหน้าต่าง HEAT GRAPHIC หน้าต่าง TANK GRAPHIC และหน้าต่าง DISTILL GRAPHIC เข้าไว้ด้วยกัน โดยส่วนของหน้าต่าง HEAT GRAPHIC อยู่ด้านบนซ้าย ส่วนของหน้าต่าง TANK GRAPHIC อยู่ด้านล่างซ้าย ส่วนของหน้าต่าง DISTILL GRAPHIC อยู่ด้านขวา ทั้งนี้การควบคุมแต่ละกระบวนการในหน้าต่างนี้เป็นใช้ตัวควบคุมขั้นสูงได้แก่ ตัวควบคุม PI แบบปรับอัตราขยายได้ การควบคุมระดับแบบเฉลี่ย และตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี ผู้ปฏิบัติการสามารถไปยังหน้าต่าง HIS หน้าต่าง HEAT GRAPHIC หน้าต่าง TANK GRAPHIC หรือหน้าต่าง DISTILL GRAPHIC ผ่านทางปุ่มเลือกด้านบนขวา



รูปที่ ข.5: หน้าต่าง THREE PLANTS TEST

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายปรเมษ เชียงจง เกิดเมื่อวันที่ 26 กันยายน พ.ศ. 2527 จังหวัดสมุทรปราการ เป็นบุตรของ นายนิพนธ์ และนางมาลี เชียงจง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปีการศึกษา 2548 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ในปีการศึกษาถัดมา ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สังกัดห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม โดยได้รับทุนอุดหนุนการศึกษาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มานพ วงศ์สายสุวรรณ

### ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

ปรเมษ เชียงจง และ วาัญญู คล้ายสงคราม. การควบคุมระดับแบบเฉลี่ยเหมาะที่สุดเชิงทำนายแบบจำลองที่มีการติดตามระดับโดยใช้การทำนายการรบกวนแบบลาด. *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 30*. หน้า 1141-1144, ตุลาคม 2550.

P. Cheingjong and M. Wongsaisuwan. Adaptive PI Control Application of a Heat Exchanger via Distributed Control System. *IEEE International Conference on Industrial Technology. (ICIT2008)*. April 2008, Sichuan, Chengdu, China.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย