ตัวควบคุม PI แบบเหมาะสมของหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิดโดยวิธีการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธีฟัซซีซีมีน ร่วมกับการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซี

นายกรรณวัฒน์ สมสังข์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4608-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

AN OPTIMAL PI CONTROLLER OF A BINARY DISTILLATION COLUMN BY FUZZY C-MEANS CLUSTERING COMBINED WITH FUZZY GAIN SCHEDULING

Mr. Kannawat Somsung

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2003

ISBN 974-17-4608-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ตัวควบคุม PI แบบเหมาะสมของหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิดโดยวิธีการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธีฟัซซีซีมีนร่วมกับการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซี
โดย	นายกรรณวัฒน์ สมสังข์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.สุวลัย ประดิษฐานนท์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุธรรม วาณิชเสนี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุวลัย ประดิษฐานนท์)

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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรรณวัฒน์ สมสังข์: ตัวควบคุม PI แบบเหมาะสมของหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิดโดยวิธีการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธีฟัซซีซีมีนร่วมกับการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซี (AN OPTIMAL PI CONTROLLER OF A BINARY DISTILLATION COLUMN BY FUZZY C-MEANS CLUSTERING COMBINED WITH FUZZY GAIN SCHEDULING), อ. ที่ปรึกษา: รศ.ดร.สุวลัย ประดิษฐานนท์, 97 หน้า, ISBN 974-17-4608-3

นำตัวปรับที่ใช้ระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีแบบปรับตัว มาประยุกต์ใช้กับการควบคุมวงรอบการทำงานของการควบคุมกระบวนการในอุตสาหกรรมร่วมกับตัวควบคุม PID ซึ่งเป็นตัวควบคุมแบบดั้งเดิม พบว่ามีประสิทธิภาพสูง อย่างไรก็ตามจากปัญหาการกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและฐานกฎที่เหมาะสมของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีนั้นทำได้ยุ่งยาก จำเป็นต้องอาศัยประสบการณ์และความชำนาญของผู้ปฏิบัติการ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเสนอการออกแบบตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี โดยการกำหนดโครงสร้างของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้หลักการพื้นฐานของการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ร่วมกับการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI

เทคนิคการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ใช้ในการกำหนดจำนวนและรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกตามลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลที่พิจารณา ส่วนเทคนิคการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI ใช้ในการสร้างกฎฟัซซี IF-THEN ที่เหมาะสมสอดคล้องกับกับจำนวนและรูปร่างฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ซึ่งกำหนดจากเทคนิคการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ดังนั้นการออกแบบระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีโดยวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ จึงทำให้ไม่จำเป็นต้องอาศัยประสบการณ์และความชำนาญของผู้ปฏิบัติการในการกำหนดโครงสร้างของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีที่ออกแบบได้ ประยุกต์การใช้กับการควบคุมสารผลิตภัณฑ์ของหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนสารเข้าที่กลางหอ ผลการควบคุมแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพกับกระบวนการที่เป็นแบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก และมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ..... **ลายมือชื่อนิสิต** .....
สาขาวิชา ..... **ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา** .....
ปีการศึกษา .....

##4470203021: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD: FUZZY SUPERVISORY CONTROL / FUZZY SYSTEM / PI CONTROLLER / FUZZY C-MEANS CLUSTERING / FUZZY GAIN SCHEDULING / DISTILLATION COLUMN

KANNAWAT SOMSUNG: AN OPTIMAL PI CONTROLLER OF A BINARY DISTILLATION COLUMN BY FUZZY C-MEANS CLUSTERING COMBINED WITH FUZZY GAIN SCHEDULING, THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. SUVALAI PRATISHTHANANDA, Ph.D., 97 pp., ISBN 974-17-4608-3

Control loops in process control, controlled by conventional PID controllers could be improved by the application of fuzzy logic-based adapter. However, to obtain an optimal set of fuzzy membership functions and rules is not an easy task. In this research, a fuzzy supervisory PI controller is developed based on a fuzzy c-means clustering technique and a fuzzy gain scheduling technique. A fuzzy c-means clustering technique is used in selecting appropriate number of membership functions and constructing the shape of membership functions. Then, fuzzy IF-THEN rules are determined using a fuzzy gain scheduling technique. By implementation of a fuzzy c-means clustering and a fuzzy gain scheduling, the need for heuristic method for designing fuzzy membership functions and rules from expert knowledge is omitted. The proposed fuzzy supervisory PI controller is applied to a binary distillation column. The task of the controller is to maintain the product composition when the disturbance enters the column in the form of the changes in feed flow rate. The results show that the fuzzy supervisory PI controllers operate this nonlinear, multivariable process efficiently.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department ..... **Student's signature** .....
Field of study ..... **Advisor's signature** .....
Academic year .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รศ. ดร. สุวลัย ประดิษฐานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดต่างๆที่เป็นประโยชน์ทั้งในส่วนของงานวิจัย การใช้ชีวิต และเป็นต้นแบบที่ดีสำหรับผู้วิจัย จึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย และนอกจากนี้ต้องขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ซึ่งได้แก่ รศ. ดร. สุธรรม วาณิชเสนี และผศ. ดร. มานพ วงศ์สายสุวรรณ ที่กรุณาสละเวลาและให้คำแนะนำต่างๆในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่สังกัดห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม สำหรับการถ่ายทอดความรู้หลายอย่างที่เกี่ยวข้องกับสาขาวิชาระบบควบคุม อย่างมุ่งมั่นและตั้งใจ ตลอดจนให้ความเอาใจใส่ผู้วิจัยเสมอมา

ขอขอบคุณ นายเกียรติขจร วรปรัชญา (เป้) สำหรับคำแนะนำเกี่ยวกับความรู้พื้นฐานของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี และช่วยเหลือผู้วิจัยในด้านการทำงานมาตลอด

ขอขอบคุณ นายวทัญญู คล้ายสงคราม (ซัน) และนายสุทธิพงษ์ วชิรพงศ์ (นัท) สำหรับการตอบคำถามของผู้วิจัย ทั้งในส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย และคอมพิวเตอร์

ขอขอบคุณ นายกิตติชัย รุจิราพันธุ์ (หลวง) และนางสาวอุบลวรรณ ตันตินุชวงศ์ (อ้อย) สำหรับความมีน้ำใจต่อผู้วิจัยในการเดินทางกลับที่พักยามค่ำคืน และช่วยเหลือผู้วิจัยในด้านการทำงานมาตลอด

ขอขอบคุณ พี่หนึ่ง พี่มล พี่จี๋ และพี่เอด สำหรับความช่วยเหลือในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการใช้งาน LaTeX และการแก้ปัญหาเกี่ยวกับคอมพิวเตอร์

ขอขอบคุณ เพื่อนๆพี่ๆและน้องๆในห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมทุกคน สำหรับความหวังดี ความเอื้อเฟื้อเผื่อแผ่ขนมนมเนยและสร้างรอยยิ้มอันสดใสได้เสมอ

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งให้กำเนิด สั่งสอนอบรมเลี้ยงดู ให้ความรัก ความห่วงใย และกำลังใจอันมีค่ายิ่งแก่ผู้วิจัยเสมอมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญภาพ ..... ญ

1 บทนำ **1**

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 ขอบเขตวิทยานิพนธ์ 6

1.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน 6

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 6

2 การกำหนดโครงสร้างของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี **7**

2.1 การกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกโดยวิธีการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means 8

2.2 การกำหนดฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสมโดยใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีของตัวควบคุม PI 12

2.3 การกำหนดโครงสร้างของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี 15

2.4 ลักษณะสมบัติของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 16

2.5 การจำลองระบบการควบคุมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 17

2.6 สรุป 26

3 การควบคุมหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด **27**

3.1 การจำลองระบบการควบคุมหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด 27

3.2 การควบคุมหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิดของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม 48

3.2.1 โครงสร้างหอกลั่นแบบแยกสารผสมสองชนิด 48

3.2.2 ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี 51

3.3 สรุป 74

4 บทสรุปและข้อเสนอแนะ **75**

4.1 บทสรุป 75

4.2 ข้อเสนอแนะ 76

รายการอ้างอิง **77**

ภาคผนวก **80**

ก การรวมกลุ่มข้อมูล **81**

ก.1 การรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี hard c-means 81

ก.1.1 ขั้นตอนวิธีการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี hard c-means 83

ก.2 การรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means 83

ก.2.1 ขั้นตอนวิธีการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means 84

ข ตารางค่าอัตราขยายฟัซซี **85**

ค โครงสร้างหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด **89**

ค.1 ลักษณะสมบัติของกระบวนการกลั่น 89

ค.2 โครงสร้างการควบคุม 90

ค.3 แบบจำลองหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด 91

ค.4 แบบจำลองหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิดที่ประมาณเป็นเชิงเส้น 94

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ **97**

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

2.1 (a) ฐานกฎฟัซซีสำหรับ K_p' (b) ฐานกฎฟัซซีสำหรับ K_i' 14
2.2 การกำหนดฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสมจากการกระจายตัวของข้อมูลจากรูปที่ 2.9 15
2.3 (a) ฐานกฎฟัซซีสำหรับ K_p' ของแบบจำลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (b) ฐานกฎฟัซซีสำหรับ K_i' ของแบบจำลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 25

3.1 ตารางแสดงรายละเอียดการทดลองของแบบจำลองหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด 28
3.2 (a) ฐานกฎฟัซซีสำหรับ K_p' ของการทดลองที่1 (b) ฐานกฎฟัซซีสำหรับ K_i' ของการทดลองที่1 35
3.3 (a) ฐานกฎฟัซซีสำหรับ K_p' ของการทดลองที่2 (b) ฐานกฎฟัซซีสำหรับ K_i' ของการทดลองที่2 43
3.4 ตารางแสดงรายละเอียดการทดลองหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด UOP3CC 52
3.5 (a) ฐานกฎฟัซซีสำหรับ K_p' ของการทดลองที่ 2 (UOP3CC) (b) ฐานกฎฟัซซีสำหรับ K_i' ของการทดลองที่ 2 (UOP3CC) 61
3.6 (a) ฐานกฎฟัซซีสำหรับ K_p' ของการทดลองที่ 3 (UOP3CC) (b) ฐานกฎฟัซซีสำหรับ K_i' ของการทดลองที่ 3 (UOP3CC) 70

ข.1 ฐานกฎฟัซซีสำหรับ K_p' 88
ข.2 ฐานกฎฟัซซีสำหรับ K_d' 88
ข.3 ฐานกฎฟัซซีสำหรับ α 88

ค.1 ค่าเริ่มต้นที่ภาวะสมดุล และพารามิเตอร์ต่างๆของหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด (ข้อมูลจาก Perry Chemical Handbook) 96

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

2.1 โครงสร้างระบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีแบบสองระดับ 7
2.2 ระบบควบคุมแบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI โดยวิธีการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ร่วมกับการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI 8
2.3 แผนภาพขั้นตอนการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means 9
2.4 การกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกโดยการฉาย (projection) 10
2.5 การประมาณฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยม 10
2.6 แผนภาพขั้นตอนการกำหนดจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสม 11
2.7 ระบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI 12
2.8 ผลตอบต่อสัญญาณแบบขั้นหนึ่งหน่วย 13
2.9 การกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของกระจายตัวของข้อมูลแบบ 2 มิติ 14
2.10 โครงสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 17
2.11 การกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตเริ่มต้น 19
2.12 การกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตสุดท้าย 19
2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $e(k)$ และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลอินพุต 21
2.14 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุต $e(k)$ 21
2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta e(k)$ และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลอินพุต 22
2.16 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุต $\Delta e(k)$ 22
2.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K_p' และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลเอาท์พุต 23
2.18 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ K_p' 23
2.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K_i' และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลเอาท์พุต 24
2.20 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ K_i' 24
2.21 ผลตอบของกระบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 25
2.22 สัญญาณควบคุมของกระบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 25
2.23 ผลตอบของกระบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกรณีเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ 26
2.24 สัญญาณควบคุมของกระบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกรณีเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ . . 26

3.1 การกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตเริ่มต้นของการทดลองที่ 1 29
3.2 การกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตสุดท้ายของการทดลองที่ 1 30
3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $e(k)$ และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลอินพุตของการทดลองที่ 1 31

3.4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุต $e(k)$ ของการทดลองที่ 1 31
3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta e(k)$ และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลอินพุตของการทดลองที่ 1 32
3.6 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุต $\Delta e(k)$ ของการทดลองที่ 1 32
3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K_p' และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลเอาท์พุตของการทดลองที่ 1 33
3.8 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ K_p' ของการทดลองที่ 1 33
3.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K_i' และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลเอาท์พุตของการทดลองที่ 1 34
3.10 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ K_i' ของการทดลองที่ 1 34
3.11 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ยอดหอในการทดลองที่ 1 35
3.12 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ฐานหอในการทดลองที่ 1 36
3.13 ค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_i ของวงรอบยอดหอในการทดลองที่ 1 36
3.14 การกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตเริ่มต้นของการทดลองที่ 2 37
3.15 การกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตสุดท้ายของการทดลองที่ 2 38
3.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $e(k)$ และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลอินพุตของการทดลองที่ 2 39
3.17 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุต $e(k)$ ของการทดลองที่ 2 39
3.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta e(k)$ และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลอินพุตของการทดลองที่ 2 40
3.19 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุต $\Delta e(k)$ ของการทดลองที่ 2 40
3.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K_p' และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลเอาท์พุตของการทดลองที่ 2 41
3.21 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ K_p' ของการทดลองที่ 2 41
3.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K_i' และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลเอาท์พุตของการทดลองที่ 2 42
3.23 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ K_i' ของการทดลองที่ 2 42
3.24 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ยอดหอในการทดลองที่ 2 43
3.25 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ฐานหอในการทดลองที่ 2 44
3.26 ค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_i ของวงรอบฐานหอในการทดลองที่ 2 44
3.27 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ยอดหอในการทดลองที่ 3 45
3.28 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ฐานหอในการทดลองที่ 3 46
3.29 ค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_i ของวงรอบยอดหอในการทดลองที่ 3 46
3.30 ค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_i ของวงรอบฐานหอในการทดลองที่ 3 47

3.31 หอกลั่นแยกสารผสมสองชนิดในห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมของบริษัท Armfield รุ่น UOP3CC 49
3.32 แผนภาพอย่างง่ายของหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิดในห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมของบริษัท Armfield รุ่น UOP3CC 50
3.33 อุณหภูมิที่ยอดหอและเวลาการป้อนสารกลับที่ยอดหอของการทดลองที่ 1 (UOP3CC) 53
3.34 อุณหภูมิที่ฐานหอและพลังงานที่หม้อต้มซ้ำที่ฐานหอของการทดลองที่ 1 (UOP3CC) 53
3.35 การกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตเริ่มต้นของการทดลองที่ 2 (UOP3CC) 56
3.36 การกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตสุดท้ายของการทดลองที่ 2 (UOP3CC) 56
3.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $e(k)$ และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลอินพุตของการทดลองที่ 2 (UOP3CC) 57
3.38 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุต $e(k)$ ของการทดลองที่ 2 (UOP3CC) 57
3.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta e(k)$ และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลอินพุตของการทดลองที่ 2 (UOP3CC) 58
3.40 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุต $\Delta e(k)$ ของการทดลองที่ 2 (UOP3CC) 58
3.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K_p' และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลเอาท์พุตของการทดลองที่ 2 (UOP3CC) 59
3.42 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ K_p' ของการทดลองที่ 2 (UOP3CC) 59
3.43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K_i' และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลเอาท์พุตของการทดลองที่ 2 (UOP3CC) 60
3.44 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ K_i' ของการทดลองที่ 2 (UOP3CC) 60
3.45 อุณหภูมิที่ยอดหอและเวลาการป้อนสารกลับที่ยอดหอของการทดลองที่ 2 (UOP3CC) 61
3.46 อุณหภูมิที่ฐานหอและพลังงานที่หม้อต้มซ้ำที่ฐานหอของการทดลองที่ 2 (UOP3CC) 62
3.47 ค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_i ของวงรอบยอดหอของการทดลองที่ 2 (UOP3CC) 62
3.48 การกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตเริ่มต้นของการทดลองที่ 3 (UOP3CC) 65
3.49 การกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตสุดท้ายของการทดลองที่ 3 (UOP3CC) 65
3.50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $e(k)$ และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลอินพุตของการทดลองที่ 3 (UOP3CC) 66
3.51 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุต $e(k)$ ของการทดลองที่ 3 (UOP3CC) 66
3.52 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta e(k)$ และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลอินพุตของการทดลองที่ 3 (UOP3CC) 67
3.53 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุต $\Delta e(k)$ ของการทดลองที่ 3 (UOP3CC) 67
3.54 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K_p' และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลเอาท์พุตของการทดลองที่ 3 (UOP3CC) 68
3.55 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ K_p' ของการทดลองที่ 3 (UOP3CC) 68

3.56 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K_i' และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลเอาท์พุตของการทดลองที่ 3 (UOP3CC) 69
3.57 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ K_i' ของการทดลองที่ 3 (UOP3CC) 69
3.58 อุณหภูมิที่ยอดหอและเวลาการป้อนสารกลับที่ยอดหอของการทดลองที่ 3 (UOP3CC) 70
3.59 อุณหภูมิที่ฐานหอและพลังงานที่หม้อต้มซ้ำที่ฐานหอของการทดลองที่ 3 (UOP3CC) 71
3.60 ค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_i ของวงรอบฐานหอของการทดลองที่ 3 (UOP3CC) 71
3.61 อุณหภูมิที่ยอดหอและเวลาการป้อนสารกลับที่ยอดหอของการทดลองที่ 4 (UOP3CC) 72
3.62 อุณหภูมิที่ฐานหอและพลังงานที่หม้อต้มซ้ำที่ฐานหอของการทดลองที่ 4 (UOP3CC) 73
3.63 ค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_i ของวงรอบยอดหอของการทดลองที่ 4 (UOP3CC) 73
3.64 ค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_i ของวงรอบฐานหอของการทดลองที่ 4 (UOP3CC) 74

ก.1 รูปแบบการกระจายตัวของข้อมูลแบบ 2 มิติ 81

ข.1 โครงสร้างของตัวควบคุม PID แบบกำกับดูแลด้วยตรรกศาสตร์ฟัซซี 85
ข.2 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ $e(k)$ และ $\Delta e(k)$ 86
ข.3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ K_p' และ K_i' 86
ข.4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ α 86
ข.5 ผลตอบต่อสัญญาณแบบขั้นหนึ่งหน่วย 87

ค.1 โครงสร้างการควบคุมหอกลั่นแบบ (L, V) 90
ค.2 แผนภาพหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด 92

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

การกลั่นเป็นกระบวนการแยกสารผสมที่สำคัญอย่างหนึ่งในอุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเคมี การควบคุมกระบวนการกลั่นของหอกลั่นจำเป็นต้องมีประสิทธิภาพและความเชื่อถือได้สูงสุด เพื่อให้คุ้มค่ากับการลงทุนที่มีมูลค่าสูง อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มความปลอดภัยและประหยัดค่าใช้จ่าย

กระบวนการกลั่นคือ การแยกของเหลวหรือไอผสมของสารผสมตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปออกจากกันโดยอาศัยความสามารถในการกลายเป็นไอของสารแต่ละชนิด เพื่อให้ได้ความบริสุทธิ์ตามที่กำหนดไว้ ด้วยลักษณะสมบัติของหอกลั่นที่เป็นระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (mutiple input mutiple output) มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง และมีการกระทำ (interaction) ระหว่างวงรอบการควบคุม และมีการรบกวนในระบบโดยทั่วไปได้แก่ การเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนสารเข้ากลางหอ และการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารเข้ากลางหอ ดังนั้นการควบคุมการทำงานของหอกลั่นจึงต้องอาศัยทฤษฎีระบบควบคุมระดับสูงเพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะสมบัติของหอกลั่น โดยสามารถควบคุมสารผลิตภัณฑ์ของหอกลั่นให้ได้ความบริสุทธิ์ตามที่กำหนด และกำจัดการรบกวนภายในระบบได้

ตัวควบคุมที่ใช้กันโดยทั่วไปสำหรับกระบวนการกลั่นคือตัวควบคุมแบบ PID (proportional-integral-derivative) ทั้งนี้เพราะให้ผลการควบคุมที่ยอมรับได้ มีโครงสร้างการควบคุมที่ง่ายต่อการทำความเข้าใจของผู้ปฏิบัติการ และสามารถปรับจูนหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมได้โดยอาศัยประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติการ แต่ในระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออกนั้นการปรับจูนหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมทำได้ยาก

การปรับจูนพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมโดยอาศัยประสบการณ์และการตัดสินใจแบบมีเหตุผลของผู้ปฏิบัติการเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับการยอมรับและใช้งานในอุตสาหกรรมทั่วไป ระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีเป็นวิธีหนึ่งที่นำเอาประสบการณ์และการตัดสินใจแบบมีเหตุผลมาประยุกต์ใช้กับระบบควบคุม เพื่อสร้างตัวควบคุมฟัซซี ซึ่งเป็นตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้น ดังนั้นการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมทำให้ตัวควบคุมฟัซซีที่ได้สามารถควบคุมระบบไม่เชิงเส้นได้อย่างเหมาะสมด้วย เนื่องจากการควบคุมแบบนี้ไม่จำเป็นต้องสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถเข้าใจและออกแบบได้ง่าย และเนื่องจากลักษณะการทำงานของหอกลั่น ซึ่งอาจมีความไม่แน่นอนหรือการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในระบบ ดังนั้นจึงต้องออกแบบการควบคุมที่สามารถทำให้การทำงานของหอกลั่นมีความต่อเนื่องสม่ำเสมอ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการกลั่นเป็นกระบวนการที่ปัญหาด้านการควบคุมมากเนื่องจากการทำงานของหอกลั่นมีความสลับซับซ้อน ดังนั้นการออกแบบระบบควมคุมการทำงานของหอกลั่นจึงเป็นปัญหาที่น่าสนใจ การประยุกต์ใช้ทฤษฎีการควมคุมสมัยใหม่ ที่อาศัยแบบจำลองทางคณิตาสตร์เพื่อกำหนดขั้นตอนการออกแบบ

ระบบควบคุมเป็นเทคนิคที่ค่อนข้างยุ่งยาก จำเป็นต้องอาศัยบุคลากรหรือผู้เชี่ยวชาญในการออกแบบ โดยเฉพาะหอกลั่นซึ่งมีความยุ่งยากในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และมีข้อกำหนดสมรรถนะที่ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ แนวทางการแก้ปัญหาเหล่านี้วิธีหนึ่งที่น่าสนใจและได้รับการยอมรับคือ ระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี ซึ่งเป็นการอาศัยฐานความรู้ ข้อมูลของระบบ และประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน เพื่อออกแบบระบบควบคุมที่สามารถเรียนแบบการทำงานของผู้ปฏิบัติการที่มีความเชี่ยวชาญ

ระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีมีรากฐานมาจากแนวความคิดเรื่องฟัซซีเซต ซึ่งนำเสนอโดย Zadeh [1] ในช่วงปี ค.ศ. 1965 โดยนำเสนอบทความเกี่ยวกับเซตฟัซซีขึ้นเป็นครั้งแรก เป็นการอธิบายเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองของความไม่แน่นอนของภาษาธรรมชาติ และ Zadeh [2] แนะนำหลักการของตรรกศาสตร์ฟัซซีและการใช้เหตุผลโดยประมาณ มาใช้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการจำลองระบบหรือการแก้ปัญหาในชิวิตประจำวันโดยอาศัยเซตฟัซซี ต่อมาในปี ค.ศ. 1975 Mamdani [3] ประยุกต์ใช้งานระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี โดยสร้างตัวควบคุมตรรกศาสตร์ฟัซซีเพื่อใช้ควบคุมเครื่องจักรไอน้ำ (Stream Engine) พบว่าตัวควบคุมที่สร้างขึ้น สามารถออกแบบได้ง่ายและควบคุมระบบที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดี และในปี ค.ศ. 1978 Holmblad และ Ostergard [4] พัฒนาตัวควบคุมตรรกศาสตร์ฟัซซีสำหรับใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นการควบคุมกระบวนการเตาเผาซีเมนต์ (Cement Kiln) ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 เป็นต้นมาจึงมีการนำระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีมาประยุกต์ใช้ในหลายๆด้าน เช่นอุตสาหกรรมในกระบวนการทางเคมี เครื่องมือทางอิเล็คทรอนิกส์ และในสาขาอื่นอีกมากมาย

ระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีมีการประยุกต์ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะเทคโนโลยีที่ต้องอาศัยการควบคุมขั้นสูง ทั้งนี้เพราะระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีสามารถใช้งานได้จริง ง่ายต่อการทำความเข้าใจและออกแบบ สำหรับหอกลั่นซึ่งเป็นระบบที่มีความซับซ้อน ไม่เป็นเชิงเส้น และมีการกระทำระหว่างวงรอบการควบคุม การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหอกลั่นทำได้ยาก จึงมีผลงานวิจัยต่างๆเพื่อควบคุมกระบวนการกลั่นโดยไม่จำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แม่นยำเพื่อมาอธิบายระบบหอกลั่น

Cartwright และ Thomson [5] เสนอการหาแบบจำลองของหอกลั่นโดยใช้ระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมมาควบคุมความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ แบบจำลองของหอกลั่นที่ได้ให้ผลการควบคุมที่น่าพอใจ และ Klett [6] นำระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการทางเคมีแบบไม่ต่อเนื่อง ผลการควบคุมแสดงให้เห็นว่าระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีช่วยลดระยะเวลาในการแยกสารของหอกลั่นได้ซึ่งดีกว่าการปรับจูนโดยผู้ปฏิบัติงาน

Santhanam และ Langari [7] เสนอเทคนิคการปรับตัวของตัวควบคุมตรรกศาสตร์ฟัซซี โดยใช้กฎการปรับตัวในรูปแบบของตัวแปรเชิงภาษา และประยุกต์ใช้กับระบบหอกลั่นแยกสารผสมระหว่างเบนซีนกับโทลูอีน เพื่อควบคุมความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ ผลการควบคุมโดยการจำลองระบบแสดงให้เห็นว่าผลตอบของกระบวนการมีสมรรถนะที่ดีขึ้น

ปัจจุบันตัวควบคุม PI และ PID เป็นที่นิยมและใช้กันมากสำหรับการควบคุมกระบวนการในอุตสาหกรรม เพราะมีโครงสร้างการควบคุมที่ง่ายและให้ประสิทธิภาพการควบคุมที่ดี การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ การกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่ตลอดระยะเวลาการควบคุม และการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ตลอดระยะเวลาการควบคุม โดยเฉพาะแบบที่ 2 เป็นวิธีที่

มีประสิทธิภาพสูงและให้ผลการควบคุมที่ดี จึงมีแนวความคิดที่จะนำระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีมากำกับดูแลการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI เพื่อให้ผลการควบคุมมีประสิทธิภาพ โดยปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI ตลอดเวลา

Luyben [8] เสนอการออกแบบตัวควบคุม PID สำหรับระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออกโดยวิธี Biggest Log Modulus Tuning (BLT) ซึ่งมีลักษณะเป็นตัวควบคุม PID แบบหลายวงรอบ โครงสร้างตัวควบคุมมีลักษณะเป็นแบบแยกศูนย์ ผลการจำลองกับระบบที่มีอันดับต่างๆกัน พบว่าผลการควบคุมที่ได้เป็นที่น่าพอใจ

Viljamaa และ Koivo [9] เสนอการใช้ข้อมูลของอัตราขยายสถิตและค่าอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของผลตอบต่อสัญญาณขั้น ในการปรับจูนอัตราขยายเชิงสัดส่วน และอัตราขยายเชิงอินทิกรัล ตามลำดับ ดังนั้นตัวควบคุมตรรกศาสตร์ฟัซซีจึงเป็นแบบ PI เมื่อใช้กับระบบที่ไม่ทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าให้ผลการควบคุมที่มีความแม่นยำ

He, Wang และ Lee [10] เสนอการปรับจูนตัวควบคุม PI และ PID โดยใช้วิธี Linear Quadratic Regulator (LQR) ซึ่งหลักเกณฑ์ในการเลือกเมตริกซ์ Q และ R นั้น พิจารณาจากค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนการหน่วงของผลตอบระบบวงปิด เปรียบเทียบผลกับการปรับจูนด้วยวิธี Gain Phase Margin (GPM) กับระบบที่มีการหน่วงเวลาและอันดับต่ำๆ พบว่าผลการปรับจูนตัวควบคุมด้วยวิธี LQR ให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าการปรับจูนตัวควบคุมด้วยวิธี GPM

เนื่องจากปัญหาการออกแบบส่วนกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี ซึ่งไม่มีหลักเกณฑ์แน่นอนในการเลือกรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ลักษณะการทับซ้อนและฐานกฎที่เหมาะสม จำเป็นต้องใช้วิธีลองผิดลองถูกในการปรับจูนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและฐานกฎที่เหมาะสม ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่เป็นการประยุกต์ใช้วิธีการใหม่ๆ ในการหาฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและฐานกฎที่เหมาะสม เช่น วิธีขั้นตอนทางพันธุกรรมแบบลำดับขั้น (Hierarchical Genetic Algorithm) [11] การใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Networks) [12] วิธี Simulated Annealing [13] การใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซี (Fuzzy Gain Scheduling) [14] และวิธีการรวมกลุ่มข้อมูลฟัซซี (Fuzzy Clustering) [29] เป็นต้น

Tang *et al.* [11] ทำการออกแบบตัวกรองเชิงเลข (digital filter) โดยใช้วิธีขั้นตอนทางพันธุกรรมแบบลำดับชั้น ในการหาทั้งโครงสร้างและค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวกรอง ซึ่งโครโมโซมแบบลำดับชั้นจะประกอบไปด้วย ยีนควบคุมซึ่งกำหนดอันดับและโครงสร้างของตัวกรอง และยีนพารามิเตอร์ซึ่งกำหนดค่าสัมประสิทธิของตัวกรอง จากนั้นได้ทำการออกแบบตัวกรองแบบต่างๆ เปรียบเทียบกับวิธีออกแบบดั้งเดิม ผลการจำลองพบว่ามีสมรรถนะเป็นไปตามที่กำหนด

Zhao, Tomizuka และ Isaka [14] เสนอแนวคิดการนำหลักการของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม PID แบบปรับค่าได้ ซึ่งเรียกวิธีนี้ว่า การใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซี (Fuzzy Gain Scheduling) โดยกฎฟัซซีที่ใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมนั้น ใช้การพิจารณาจากผลตอบของกระบวนการเป็นสำคัญ โครงสร้างของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีประกอบด้วยสัญญาณเข้าคือ สัญญาณค่าผิดพลาด และการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณค่าผิดพลาด ส่วนสัญญาณออกคือ อัตราขยายแบบสัดส่วน อัตราขยายแบบอินทิกรัล และอัตราขยายแบบอนุพันธ์ ผลของการใช้ตัวควบคุม PID

แบบปรับค่าได้กับระบบอันดับต่างๆ พบว่าให้ผลการควบคุมที่ดี เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุม PID แบบกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่

Klawonn และ Kruse [15] เสนอวิธีการสร้างตัวควบคุมฟัซซีโดยอาศัยลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุต ซึ่งเป็นการกำหนดกฎฟัซซี IF-THEN จากข้อมูลและการทดสอบของผู้ปฏิบัติการ การกำหนดลักษณะรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทำได้โดยอาศัยลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุต โดยใช้วิธีการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means เพื่อหา fuzzy partition matrix ซึ่งเป็นเมตริกซ์ที่ใช้แสดงค่าระดับความเป็นสมาชิกของข้อมูลแต่ละจุดในแต่ละกลุ่มข้อมูล โดยแต่ละกลุ่มเปรียบเหมือนกฎแต่ละข้อ จากนั้นจึงพล็อต fuzzy partition matrix ของแต่ละกลุ่มข้อมูลไปยังแกนของแต่ละตัวแปร ทำให้ได้ฐานกฎที่เหมาะสมกับตัวควบคุม วิธีที่นำเสนอนี้เป็นวิธีที่ง่าย และให้ผลการควบคุมที่ดี จึงมีการนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยต่างๆมากมาย

การนำตัวควบคุม PI ที่กำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีมาใช้ในการควบคุมกระบวนการนั้น ปัญหาหนึ่งที่สำคัญคือความยุ่งยากในการกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและฐานกฎที่เหมาะสม ซึ่งแต่เดิมนั้นใช้วิธีลองผิดลองถูก ดังนั้นจากคุณสมบัติของการใช้การรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ร่วมกับการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีแบบกำกับดูแลตัวควบคุม PI แต่เมื่อพิจารณาโดยละเอียดแล้วพบว่า คุณสมบัติของวิธีการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีคือสามารถสร้างกฎฟัซซี IF-THEN ที่เหมาะสมกับกระบวนการได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือ ไม่สามารถกำหนดค่าขอบเขตที่แน่นอนของสัญญาณเข้าและสัญญาณออกของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีได้ จำเป็นต้องใช้วิธี scaling factor ในการหาขอบเขตที่แน่นอนเพื่อให้ผลการควบคุมมีประสิทธิภาพดี ทำให้เสียเวลาและค่าขอบเขตที่ได้อาจไม่ใช่ค่าขอบเขตที่แท้จริง นอกจากนี้จำนวนกฎฟัซซีที่ใช้มีจำนวนทั้งสิ้น 49 กฎ ทั้งที่ในบางกระบวนการไม่จำเป็นต้องใช้กฎทั้งหมด

จากปัญหาดังกล่าวทำให้เกิดแนวคิดที่จะหาขอบเขตที่แน่นอนของสัญญาณเข้าและสัญญาณออกของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี และลดจำนวนกฎฟัซซีให้เหมาะสมกับการทำงานของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี ดังนั้นหากมองปัญหาการหาค่าขอบเขตเป็นการกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุต จึงสามารถประยุกต์ใช้คุณสมบัติของการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ในการกำหนดขอบเขตที่แน่นอนและคำนวณจำนวนกฎฟัซซีที่เหมาะสมได้ โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means มีดังนี้

Ruspini [16] ได้แนะนำ M_{fcm} ซึ่งเป็น fuzzy c-partition ของข้อมูล บางครั้งเรียกว่า partitional clustering algorithm และได้นำเสนอฟังก์ชันวัตถุประสงค์ฟัซซี (fuzzy objective function) เป็นครั้งแรกเพื่อใช้กำหนด fuzzy c-partition ของข้อมูลที่ต้องการรวมกลุ่ม โดยมีพื้นฐานอยู่บนความสัมพันธ์ของข้อมูล (relational data) ซึ่งใช้หลักการวัดความไม่เหมือนกันของข้อมูล ดังนั้นวิธีนี้จึงสามารถนำไปใช้กับข้อมูลใดๆก็ได้ที่ต้องการพิจารณา เห็นได้ว่าการรวมกลุ่มข้อมูลฟัซซีส่วนใหญ่มีพื้นฐานอยู่บนแนวคิดนี้

Gitman และ Levin [17] เสนองานวิจัยแรก ซึ่งเป็นการรวมกลุ่มข้อมูลโดยใช้เซตฟัซซี แนวความคิดนี้ไม่เกี่ยวข้องกับการรวมกลุ่มข้อมูลเชิงสถิติ โดยพื้นฐานสำคัญของการรวมกลุ่มข้อมูลที่เป็นเซตฟัซซีคือการวัดความสำคัญของเวกเตอร์จุดเด่น (feature vector) หลังจากนั้นก็รวมกลุ่มข้อมูลทั้งหมดให้กลายเป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลต้นฉบับ

Dunn [18] ได้เสนอฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในรูปแบบมาตรฐาน ซึ่งเป็น least square error function เพื่อใช้สำหรับการรวมกลุ่มข้อมูล โดยมีการกำหนดตัวแปรเพิ่มเข้ามาคือ $m' \in [1, \infty]$ ซึ่งเป็นองค์ประกอบน้ำหนัก (weighting exponent) เพื่อกำหนดความละเอียดในการรวมกลุ่มข้อมูล และได้ทดลองกับข้อมูลหลายๆชุดเพื่อดูลักษณะการรวมกลุ่มของข้อมูล และรายงานผลด้วยฟังก์ชันวัดความถูกต้องของการรวมกลุ่มข้อมูล ต่อมา Bezdek [19], [28] เสนอวิธีการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means หรือ fuzzy ISODATA โดยพัฒนามาจากแนวความคิดของ Dunn จนกลายเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการรู้จำรูปแบบ (pattern recognition)

ในการรวมกลุ่มข้อมูล ปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ การกำหนดจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสม ทั้งนี้เพราะงานวิจัยที่นำเสนอเกี่ยวกับวิธีของการรวมกลุ่มข้อมูลนั้นจะเป็นการสร้าง c-partition และเกือบทุกวิธีจะให้ผลที่แตกต่างกันในข้อมูลชุดเดียวกัน ดังนั้นจึงมีการนำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวกับการวัดความถูกต้องของการรวมกลุ่มข้อมูล เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ได้ว่า จำนวนกลุ่มของข้อมูลที่เหมาะสมในแต่ละลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลควรเป็นเท่าใด โดยหลักสำคัญในการวัดความถูกต้องของการรวมกลุ่มข้อมูลคือคุณสมบัติของข้อมูลเอง

Windham [20] ได้เสนอการใช้ (uniform data function หรือ UDF) ในงานด้านการรวมกลุ่มข้อมูลด้วยวิธีการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ซึ่งแสดงถึงการรวมแนวความคิดระหว่าง แนวคิดที่ว่าผลของขั้นตอนวิธีของการรวมกลุ่มข้อมูลสามารถบอกถึงลักษณะโครงสร้างของข้อมูลได้ และแนวคิดเกี่ยวกับคุณสมบัติทางสถิติของข้อมูลคือการกระจายตัวของข้อมูลจะอยู่ในทิศทางที่เป็นเหตุเป็นผลกัน

Bezdek และ Jain [21] ได้เสนอวิธีการจัดอันดับ (ranking) ความเหมาะสมของการรวมกลุ่มข้อมูลด้วยวิธีต่างๆโดยใช้หลักการ เปรียบเทียบกับเป้าหมายโดยตรง (goal directed comparison) แทนการคำนวณกับ partition ของกลุ่มข้อมูลหรือตัวข้อมูลโดยตรง

Xie และ Beni [22] อาศัยพื้นฐานจากงานของ Dunn ได้เสนอฟังก์ชัน compactness and separation validity function ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ใช้ในการระบุหาจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสม โดยเป็นการอธิบายลักษณะทางเรขาคณิตของการกระจายตัวของข้อมูล ผลที่ได้คือค่าความหนาแน่นของข้อมูลที่เป็นเหตุเป็นผลกับลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลทั้งหมด

จากคุณสมบัติของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี และข้อดีของการใช้ตัวควบคุม PI ดังนั้นการประยุกต์ใช้ระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีในการปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวควบคุม PI จึงมีความน่าสนใจ แม้จะมีความยุ่งยากในการกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิก และฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสมของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี แต่จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทำให้มีความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ร่วมกับการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI เพื่อสร้างระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีมากำกับดูแลการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI

งานวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตัวควบคุม PI ที่กำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี มาควบคุมการทำงานของหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด โดยออกแบบให้ระบบควบคุมสามารถควบคุมคุณภาพของสารผลิตภัณฑ์ ให้มีความบริสุทธิ์เป็นไปตามที่กำหนด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนสารเข้าที่กลางหอ โดยในส่วนของโครงสร้างของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีนั้น ใช้เทคนิคการ

รวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ในการกำหนดจำนวนและรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ร่วมกับการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI ในการกำหนดฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสม

1.2 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

1. ออกแบบตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีเหมาะสมของหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด โดยใช้หลักการของการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means เพื่อใช้กำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ร่วมกับการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีเพื่อใช้กำหนดฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสม
2. นำระบบควบคุมที่ได้มาทดสอบการควบคุมโดยการจำลองระบบด้วยคอมพิวเตอร์
3. ทดสอบตัวควบคุมกับหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิดของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม ซึ่งเป็นของบริษัท Armfield รุ่น UOP3CC โดยเกณฑ์ที่ใช้พิจารณาคือ การลดผลของสัญญาณรบกวนซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนสารเข้าที่กลางหอ และเสถียรภาพของระบบตลอดระยะเวลาในการดำเนินกระบวนการกลั่น

1.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาลักษณะทางกายภาพทั่วไปของหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด และเลือกโครงสร้างการควบคุมที่เหมาะสม
2. ศึกษาหลักการของตัวควบคุม PI สำหรับใช้ในการควบคุมหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด
3. ศึกษาพื้นฐานของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี และการประยุกต์ใช้ในการควบคุมกระบวนการ
4. ศึกษาหลักการและพื้นฐานของการรวมกลุ่มข้อมูลฟัซซีแบบวิธี fuzzy c-means และการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI
5. ศึกษาการประยุกต์ใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี โดยใช้การรวมกลุ่มข้อมูลฟัซซีแบบวิธี fuzzy c-means ในการกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิก และการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีในการกำหนดฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสม เพื่อใช้ควบคุมกระบวนการกลั่น
6. สรุปและวิเคราะห์ผลของการออกแบบระบบควบคุม

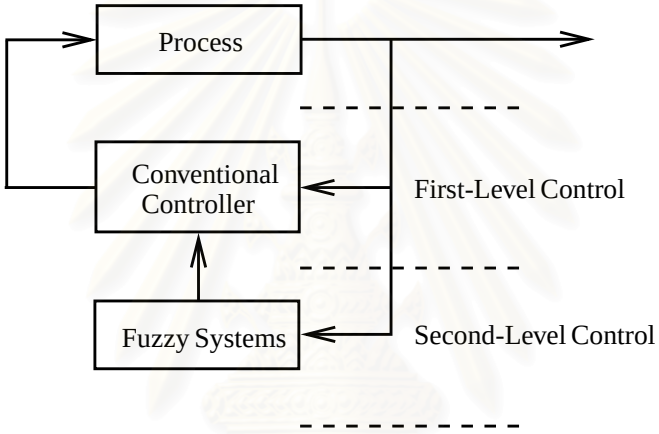
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ความรู้พื้นฐานของกระบวนการกลั่น และลักษณะทางกายภาพของหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด
2. ความรู้พื้นฐานของตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีและการประยุกต์ใช้งาน
3. ความรู้พื้นฐานของการรวมกลุ่มข้อมูลฟัซซีแบบวิธี fuzzy c-means และการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI

บทที่ 2

การกำหนดโครงสร้างของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี

งานวิจัยนี้เสนอแนวทางการออกแบบระบบควบคุมแบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี [24] ซึ่งเป็นการควบคุมแบบสองระดับดังรูปที่ 2.1 โดยการควบคุมระดับที่หนึ่งนั้นใช้ตัวควบคุม PI เป็นตัวควบคุมหลักทำหน้าที่ควบคุมกระบวนการโดยตรง ส่วนการควบคุมระดับที่สองนั้นใช้ระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีทำหน้าที่เป็นตัวกำกับดูแลการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI

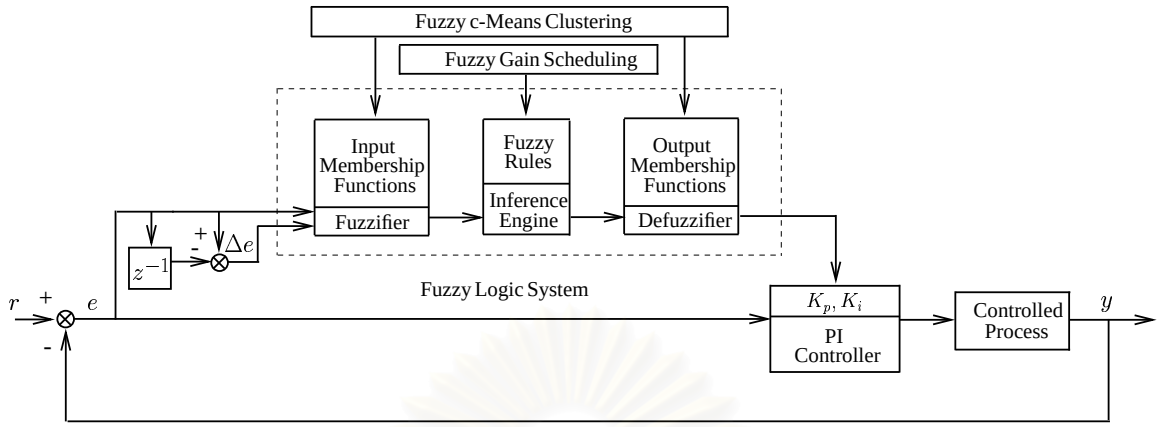


รูปที่ 2.1: โครงสร้างระบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีแบบสองระดับ

จากปัญหาการออกแบบระบบควบคุมตรรกศาสตร์ฟัซซีที่ผ่านมา คือการกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและฐานกฎฟัซซีของระบบควบคุมตรรกศาสตร์ฟัซซี ซึ่งมักใช้วิธีการลองผิดลองถูก จำเป็นต้องอาศัยประสบการณ์และความชำนาญของผู้ปฏิบัติการ ทำการปรับจูนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและฐานกฎฟัซซีจนกระทั่งผลการควบคุมเป็นที่น่าพอใจ ดังนั้นการออกแบบระบบควบคุมตรรกศาสตร์ฟัซซีจึงไม่มีหลักเกณฑ์และแบบแผนที่แน่นอน นอกจากนี้ผลการควบคุมที่ได้อาจจะไม่ใช่ผลการควบคุมที่ดีที่สุด

ดังนั้นการกำหนดโครงสร้างของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี สามารถประยุกต์ใช้การรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ในการกำหนดจำนวนและรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก โดยพิจารณาจากลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุต ร่วมกับการพิจารณาผลตอบทางพลวัตของกระบวนการ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุต โดยใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI ในการหาฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสม ดังนั้นสามารถสรุปโครงสร้างของระบบควบคุมแบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI [25] ได้ดังรูปที่ 2.2

การกำหนดรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก เมื่อพิจารณาจากลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุต สามารถทำได้โดยการใช้การรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ทั้งนี้เพราะมีขั้นตอนการทำงานที่ง่าย มีความแม่นยำสูงในการลำดับความสำคัญของข้อมูลแต่ละจุด และจากความ



รูปที่ 2.2: ระบบควบคุมแบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI โดยวิธีการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ร่วมกับการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI

รู้เกี่ยวกับฟังก์ชันวัดความถูกต้องของการรวมกลุ่มข้อมูล ทำให้สามารถกำหนดจำนวนของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่เหมาะสมได้

การกำหนดฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสม [14] เป็นการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI อธิบายลักษณะทางพลวัตของกระบวนการ ซึ่งเป็นการพิจารณาผลตอบของกระบวนการเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุต [33] วิธีนี้มีความซับซ้อนแต่ให้ผลการควบคุมที่มีประสิทธิภาพสูงและมีความน่าเชื่อถือ

ดังนั้นการกำหนดโครงสร้างฟัซซี ซึ่งประกอบด้วยการกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสม เป็นการมองปัญหาในรูปแบบความสัมพันธ์ของการกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตกับการเปลี่ยนแปลงผลตอบของกระบวนการ จากคุณสมบัติของวิธีที่ใช้ในการกำหนดโครงสร้างฟัซซีทำให้มีความเป็นไปได้ที่สามารถเพิ่มความรวดเร็วในการคำนวณ เพื่อกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสมของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี และให้ผลการควบคุมที่มีประสิทธิภาพ

2.1 การกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกโดยวิธีการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means

การรวมกลุ่มของข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ทำได้โดยกำหนดเซตของข้อมูล $X = \{x_1, x_2 \ldots, x_n\}$ และเซตจุดศูนย์กลางของกลุ่มข้อมูล $\mathbf{v}= \{v_1, v_2 \ldots, v_c\}$ สามารถหา fuzzy partition matrix (M_{fc}) สำหรับข้อมูลที่มี c กลุ่มและ n ข้อมูล

$$M_{fc} = \{U|\mu_{ik} \in [0,1];\ \sum_{i=1}^{c} \mu_{ik} = 1;\ 0 < \sum_{k=1}^{n} \mu_{ik} < n\} \tag{2.1}$$

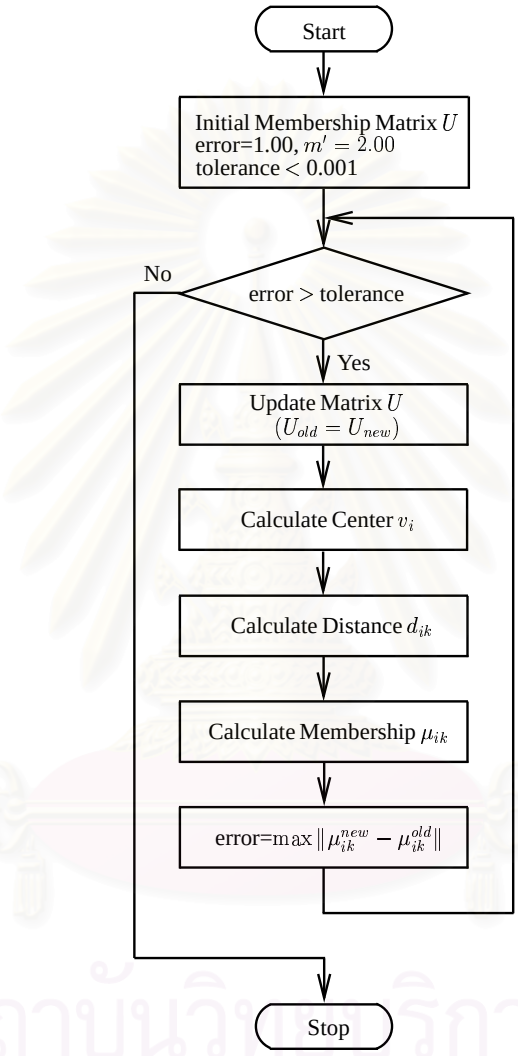
เมื่อ $i = 1, 2, \ldots, c$ และ $k = 1, 2, \ldots, n$

ดังนั้นขั้นตอนการทำงานของ fuzzy c-means แสดงดังรูปที่ 2.3 โดยมีเป้าหมายเพื่อหาค่า U และ $\mathbf{v}$ ที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าต่ำที่สุด

$$J_m(U, \mathbf{v}) = \sum_{k=1}^{n} \sum_{i=1}^{c} (\mu_{ik})^{m'} (d_{ik})^2 \tag{2.2}$$

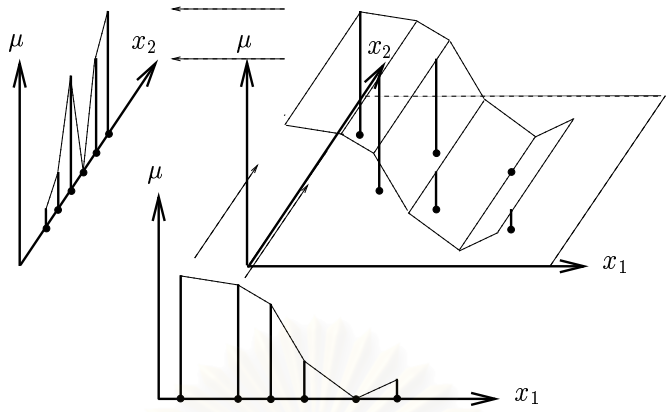
เมื่อ $d_{ik} \in R^m$ เป็นระยะทางยูคลิเดียนระหว่างข้อมูล x_k และจุดศูนย์กลางของกลุ่มข้อมูล v_i กำหนดโดย

$$d_{ik} = d(x_k - v_i) = \left[\sum_{j=1}^{m} (x_{kj} - v_{ij})^2 \right]^{1/2} \tag{2.3}$$

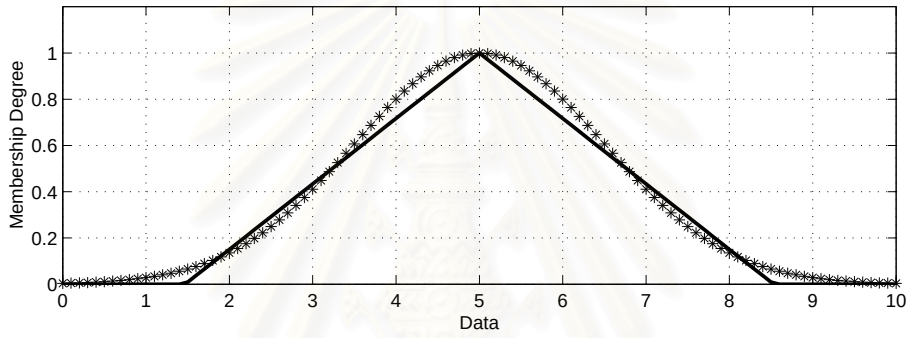


รูปที่ 2.3: แผนภาพขั้นตอนการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means

การกำหนดรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกโดยใช้การรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means เป็นการหา fuzzy partition matrix ซึ่งแสดงค่าระดับความเป็นสมาชิกของข้อมูลแต่ละจุดในแต่ละกลุ่มของข้อมูล โดยแต่ละกลุ่มเปรียบเหมือนกฎฟัซซีแต่ละกฎ จากนั้นทำการฉาย (project) หรือพล็อต fuzzy partition matrix ของแต่ละกลุ่มข้อมูลไปยังแกนของแต่ละตัวแปร ผลของการฉาย (projection) ทำให้ได้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกดังรูปที่ 2.4 และเพื่อให้ง่ายต่อการสร้างกฎฟัซซี ดังนั้นจึงทำการประมาณฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ได้เป็นแบบสามเหลี่ยม [29] ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4: การกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกโดยการฉาย (projection)



รูปที่ 2.5: การประมาณฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยม

ส่วนการกำหนดจำนวนของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ทำได้โดยอาศัยหลักการพื้นฐานของการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ที่เกี่ยวกับการระบุจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสมจากลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลทั้งหมด โดยใช้ความรู้เกี่ยวกับฟังก์ชันวัดความถูกต้องของการรวมกลุ่มข้อมูล เพื่อเป็นเกณฑ์ในการระบุหาจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสม เกณฑ์ดังกล่าวนี้เรียกว่าเกณฑ์ S โดยจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสม คือจำนวนกลุ่มข้อมูลที่ทำให้ค่าเกณฑ์ S มีค่าต่ำที่สุด สำหรับเกณฑ์ S ที่นิยมใช้ทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ การระบุหาจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสมจาก uniform data function [20] และการระบุหาจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสมจาก compactness and separation validity function [22]

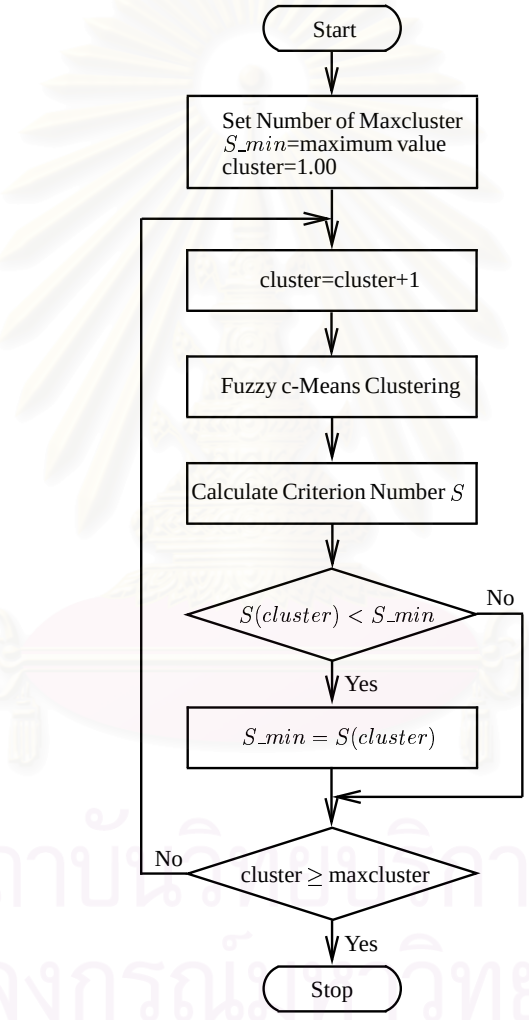
$$S = \sum_{i=1}^{c}\sum_{k=1}^{n}(\mu_{ik})^{m'}(\|x_k - v_i\|^2 - \|v_i - \bar{x}\|^2) \tag{2.4}$$

จากสมการที่ 2.4 เป็นการใช้ uniform data function ในการพิจารณาค่าความแตกต่างระหว่างค่าความแปรปรวนของข้อมูลภายในกลุ่ม กับค่าความแปรปรวนของกลุ่มเอง ดังนั้นจำนวนกลุ่มที่เหมาะสมจึงเป็นการพิจารณาให้ค่าความแปรปรวนในแต่ละกลุ่มมีค่าต่ำที่สุด และให้ค่าความแปรปรวนระหว่างกลุ่มมีค่าสูงที่สุด

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{c}\sum_{k=1}^{n}(\mu_{ik})^{m'}(\|v_i - x_k\|)^2}{n \min_{i,k}\|v_i - v_k\|^2} \tag{2.5}$$

จากสมการที่ 2.5 เป็นการใช้ compactness and separation validity function เพื่ออธิบายลักษณะทางเรขาคณิตของการกระจายตัวของข้อมูล ผลที่ได้คือค่าความหนาแน่นของข้อมูลที่เป็นเหตุเป็นผลกับลักษณะของการกระจายตัวของข้อมูลทั้งหมด

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเกณฑ์ S ทั้ง 2 แบบ โดยทดสอบกับการกระจายของข้อมูลหลายลักษณะ พบว่าการระบุหาจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสมจาก compactness and separation validity function มีความถูกต้องและแม่นยำสูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เกณฑ์ S แบบที่ 2 ในการระบุหาจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสม โดยแผนภาพการกำหนดจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสมแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6: แผนภาพขั้นตอนการกำหนดจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสม

ดังนั้นการกำหนดจำนวนและรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก โดยใช้การรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means พบว่ามีหลักการและขั้นตอนวิธีการทำงานที่ง่าย ไม่ยุ่งยากซับซ้อน แต่สามารถกำหนดจำนวนและรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกได้อย่างเหมาะสม สอดคล้องกับลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลทั้งหมด และยังส่งผลให้ทราบถึงขอบเขตที่แน่นอนของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ดังนั้นในขั้นตอนการทำงานของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีจึงสามารถมั่นใจได้ว่า กฎฟัซซีทุกกฎที่ใช้นั้นมีความเหมาะสมเพียง

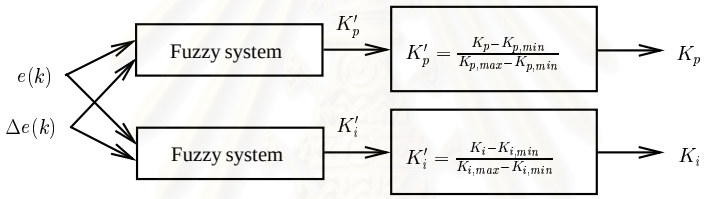
พอต่อการทำงาน ทำให้ไม่เกิดปัญหาในกรณีที่กฎฟัซซีบางกฎไม่ได้ใช้งาน ทั้งนี้เพราะจำนวนของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกนั้นเป็นตัวกำหนดฐานกฎฟัซซี

2.2 การกำหนดฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสมโดยใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีของตัวควบคุม PI

Zhao [14] เสนอวิธีการสร้างฐานกฎฟัซซีของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี เพื่อใช้ปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในงานวิจัยนี้นำเอาหลักเดียวกันมาประยุกต์ใช้สำหรับตัวควบคุม PI [30] โดยกำหนดให้ $K_p \in [K_{p,min}, K_{p,max}] \subset \Re$ และ $K_i \in [K_{i,min}, K_{i,max}] \subset \Re$ ค่า K_{min} และ K_{max} สามารถหาได้จากการทดลอง การสร้างฐานกฎฟัซซีวิธีนี้เป็นการอธิบายการปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุม PI ในสภาวะหนึ่งๆ ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI สามารถหาได้จาก

$$K_p = (K_{p,max} - K_{p,min})K'_p + K_{p,min} \tag{2.6}$$

$$K_i = (K_{i,max} - K_{i,min})K'_i + K_{i,min} \tag{2.7}$$



รูปที่ 2.7: ระบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI

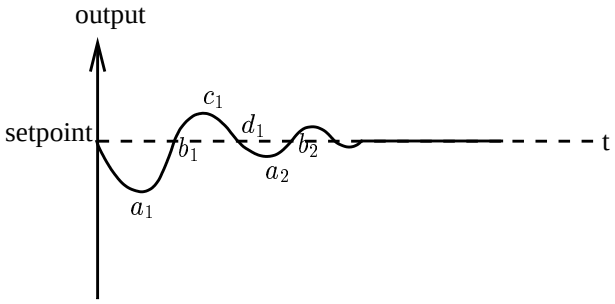
จากรูปที่ 2.7 เมื่อข้อมูลอินพุตของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีคือ สัญญาณค่าผิดพลาด $e(k)$ และการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณค่าผิดพลาด $\Delta e(k)$ เมื่อข้อมูลเอาท์พุตของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีคือ K'_p และ K'_i ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของกฎฟัซซี IF-THEN ได้ดังนี้

$$IF\ e(k)\ is\ A^l\ and\ \Delta e(k)\ is\ B^l\ ,\ THEN\ K'_p\ is\ C^m\ K'_i\ is\ D^m$$

เมื่อ A^l, B^l, C^m และ D^m คือเซตฟัซซี โดยที่ $l = 1, 2, \ldots, 7$ และ $m = 1, 2$ นิยามตัวแปรเชิงภาษาสำหรับ $e(kh)$ และ $\Delta e(kh)$ ไว้ 7 ตัว ได้แก่ ค่าลบมาก (NB) ค่าลบปานกลาง (NM) ค่าลบน้อย (NS) ค่าศูนย์ (ZO) ค่าบวกน้อย (PS) ค่าบวกปานกลาง (PM) และค่าบวกมาก (PB) สำหรับตัวแปรเชิงภาษาของ K'_p และ K'_I นิยามไว้ 2 ตัวคือ เล็ก (S) และใหญ่ (B)

เซตฟัซซีของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี สามารถหาได้จากผลตอบที่มีเสถียรภาพของกระบวนการต่อสัญญาณแบบขั้นหนึ่งหน่วย เซตฟัซซีที่ได้นำไปสร้างกฎฟัซซี IF-THEN เพื่อที่จะสามารถกำหนดฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสมได้ ดังนั้นในการสร้างกฎฟัซซี IF-THEN สามารถทำได้โดยการพิจารณารูปที่ 2.8

ในเวลาเริ่มแรก ช่วง a_1 สัญญาณค่าผิดพลาดมีค่ามาก ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณค่าผิดพลาดมีค่าน้อย เนื่องจากเพิ่งเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณค่าอ้างอิง ที่จุดนี้มีเพียงการควบคุม



รูปที่ 2.8: ผลตอบต่อสัญญาณแบบขั้นหนึ่งหน่วย

แบบสัดส่วนเท่านั้นที่มีผลต่อผลตอบของระบบ โดยทำให้สัญญาณเอาท์พุตมีค่าเพิ่มขึ้นเพื่อให้ถึงค่ากำหนดโดยเร็ว ดังนั้นจึงควรปรับค่าอัตราขยายแบบสัดส่วนให้มีค่ามาก เพื่อให้สัญญาณควบคุมมีค่าสูงซึ่งมีผลให้สัญญาณเอาท์พุตมีค่าถึงค่าที่อ้างอิงโดยเร็ว

ช่วง a_1 ถึง b_1 สัญญาณค่าผิดพลาดเริ่มมีค่าลดลง ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณค่าผิดพลาดเริ่มมีค่าลบมากขึ้น ดังนั้นในช่วงนี้จึงควรเพิ่มค่าอัตราขยายแบบสัดส่วนและอัตราขยายแบบอินทิกรัล เพื่อให้สัญญาณเอาท์พุตมีค่าเพิ่มขึ้นเข้าสู่ค่าที่อ้างอิง

ช่วง b_1 เนื่องจากสัญญาณค่าผิดพลาดมีค่าน้อยมาก การควบคุมแบบสัดส่วนจึงไม่มีผลต่อผลตอบของระบบมากนัก ที่จุดนี้มีเพียงการควบคุมแบบอินทิกรัลเท่านั้นที่มีผลต่อผลตอบของระบบ ซึ่งต้องการให้ระบบไม่มีค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว ดังนั้นจึงควรเพิ่มค่าอัตราขยายแบบอินทิกรัล

จากการวิเคราะห์ลักษณะของผลตอบของกระบวนการต่อสัญญาณแบบขั้นหนึ่งหน่วย ตั้งแต่ช่วง a_1 จนถึง b_1 ดังนั้นสามารถสร้างกฎการควบคุมดังนี้

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

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

สำหรับสัญญาณควบคุม ตั้งแต่ช่วง c_1 จนถึง d_1 ใช้การวิเคราะห์เช่นเดียวกับช่วง a_1 จนถึง b_1 ดังนั้นจากการพิจารณาทำให้สามารถสร้างกฎฟัซซีได้ทั้งหมด 49 กฎ ทำให้สามารถกำหนดเป็นฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสมได้ดังแสดงดังตารางที่ 2.1

ในบางกระบวนการ จำนวนกฎฟัซซีที่สร้างขึ้นอาจมีจำนวนมากเกินความจำเป็น ทำให้เสียเวลาในการคำนวณ ดังนั้นการลดจำนวนกฎฟัซซีลงเพื่อให้เหมาะสมกับปัญหาจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ สำหรับกระบวนการกำหนดฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสมนั้น มีความสัมพันธ์กับการวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตโดยการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means กล่าวคือกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสมซึ่งได้จากการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means เป็นตัวกำหนดจำนวนของกฎฟัซซีที่สร้างขึ้น เมื่อนำหลักการการกำหนดฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสมจากการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI มาประยุกต์ใช้ จึงสามารถสร้างฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสมได้ โดยมีจำนวนของกฎฟัซซีซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลทั้งหมด

ตารางที่ 2.1: (a) ฐานกฎฟัซซีสำหรับ K_p' (b) ฐานกฎฟัซซีสำหรับ K_i'

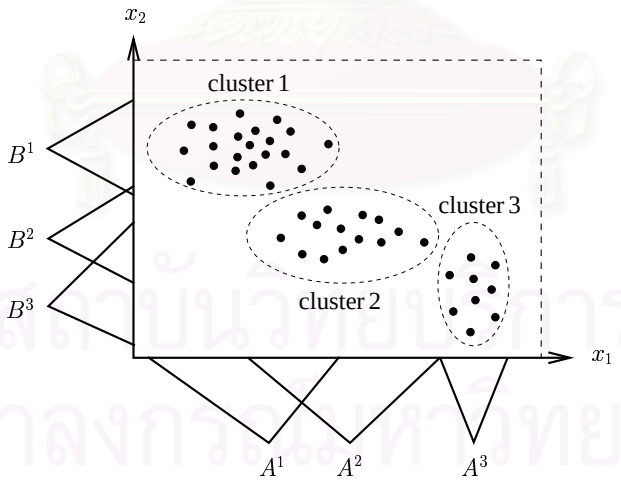
		$\Delta e(k)$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$e(k)$	NB	B	B	B	B	B	B	B
	NM	S	B	B	B	B	B	S
	NS	S	S	B	B	B	S	S
	ZO	S	S	S	B	S	S	S
	PS	S	S	B	B	B	S	S
	PM	S	B	B	B	B	B	S
	PB	B	B	B	B	B	B	B

(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)

เมื่อพิจารณาข้อมูลอินพุตของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีคือ $e(k)$ และ $\Delta e(k)$ ซึ่งกำหนดจำนวนเซตฟัซซีของข้อมูลอินพุตแต่ละตัวไว้ 7 เซต ดังนั้นสามารถสร้างกฎฟัซซี IF-THEN ได้ทั้งหมด 49 กฎ จากเทคนิคการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ทำให้สามารถสร้างและปรับเปลี่ยนเซตฟัซซีได้ 2-7 เซต เป็นผลให้กฎฟัซซี IF-THEN สามารถเปลี่ยนแปลงได้ 4, 9, 16, 25, 36 และ 49 กฎ ทั้งนี้เพราะการฉายหรือพล็อต fuzzy partition matrix ของแต่ละกลุ่มข้อมูลไปยังแกนของ $e(k)$ และ $\Delta e(k)$ ทำให้จำนวนเซตฟัซซีของข้อมูลอินพุตแต่ละตัวมีจำนวนเท่ากัน สำหรับข้อมูลเอาท์พุตของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีคือ K_p' และ K_i' กำหนดจำนวนเซตฟัซซีของข้อมูลเอาท์พุตแต่ละตัวไว้คงที่ 2 เซต



รูปที่ 2.9: การกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของกระจายตัวของข้อมูลแบบ 2 มิติ

เพื่อให้เกิดความเข้าใจ สมมติว่าการฉายหรือพล็อต fuzzy partition matrix ของแต่ละกลุ่มข้อมูลไปยังแกนของ $e(k)$ และ $\Delta e(k)$ ทำให้ได้จำนวนและรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกดังรูปที่ 2.9 จำนวนเซตฟัซซีของข้อมูลอินพุตแต่ละตัวเท่ากับ 3 ดังนั้นจำนวนกฎฟัซซี IF-THEN ที่เป็นไปได้มีทั้งหมด 9 กฎ เมื่อพิจารณานำหลักการการกำหนดฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสมจากการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI มาประยุกต์ใช้ ทำให้สามารถกำหนดฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสมได้ดังตารางที่ 2.2

$$IF\ x_1\ is\ A^1\ and\ \Delta x_2\ is\ B^1\ ,\ THEN\ K'_p\ is\ B\ K'_i\ is\ B$$

$$IF\ x_1\ is\ A^1\ and\ \Delta x_2\ is\ B^2\ ,\ THEN\ K'_p\ is\ B\ K'_i\ is\ B$$

$$IF\ x_1\ is\ A^1\ and\ \Delta x_2\ is\ B^3\ ,\ THEN\ K'_p\ is\ B\ K'_i\ is\ B$$

$$IF\ x_1\ is\ A^2\ and\ \Delta x_2\ is\ B^1\ ,\ THEN\ K'_p\ is\ S\ K'_i\ is\ B$$

$$IF\ x_1\ is\ A^2\ and\ \Delta x_2\ is\ B^2\ ,\ THEN\ K'_p\ is\ B\ K'_i\ is\ B$$

$$IF\ x_1\ is\ A^2\ and\ \Delta x_2\ is\ B^3\ ,\ THEN\ K'_p\ is\ S\ K'_i\ is\ B$$

$$IF\ x_1\ is\ A^3\ and\ \Delta x_2\ is\ B^1\ ,\ THEN\ K'_p\ is\ B\ K'_i\ is\ B$$

$$IF\ x_1\ is\ A^3\ and\ \Delta x_2\ is\ B^2\ ,\ THEN\ K'_p\ is\ B\ K'_i\ is\ B$$

$$IF\ x_1\ is\ A^3\ and\ \Delta x_2\ is\ B^3\ ,\ THEN\ K'_p\ is\ B\ K'_i\ is\ B$$

ตารางที่ 2.2: การกำหนดฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสมจากการกระจายตัวของข้อมูลจากรูปที่ 2.9

		x_2		
		B^1	B^2	B^3
x_1	A^1	B	B	B
	A^2	S	B	S
	A^3	B	B	B

(a)

		x_2		
		B^1	B^2	B^3
x_1	A^1	B	B	B
	A^2	B	B	B
	A^3	B	B	B

(b)

2.3 การกำหนดโครงสร้างของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี

โครงสร้างของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีประกอบด้วย 2 ส่วนที่สำคัญคือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและฐานกฎฟัซซี ซึ่งไม่มีหลักเกณฑ์ที่แน่นอนในการออกแบบ ดังนั้นจึงประยุกต์ใช้การรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ร่วมกับการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI เพื่อช่วยในการกำหนดโครงสร้างของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี โดยแบ่งขั้นตอนการทำงานเป็น 2 ส่วนคือ

- ขั้นตอนการกำหนดจำนวนและรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

1. พล็อตกราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลทั้งหมด ทั้งในส่วนที่เป็นข้อมูลอินพุต ($e(k)$ และ $\Delta e(k)$) และส่วนที่เป็นข้อมูลเอาท์พุต (K'_p และ K'_i)
2. กำหนดจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสมจากข้อมูลทั้งหมด โดยการประยุกต์ใช้เกณฑ์ S ซึ่งจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสมคือจำนวนกลุ่มข้อมูลที่ทำให้ค่าเกณฑ์ S มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งจำนวนกลุ่มข้อมูลที่ได้นั้นมีค่าเท่ากับจำนวนของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกด้วย

3. ประยุกต์ใช้การรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means เพื่อจัดกลุ่มข้อมูลให้มีความเหมาะสมสอดคล้องกับค่าเกณฑ์ S และเพื่อเป็นการประหยัดเวลาในการคำนวณ สามารถใช้การรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี hard c-means มาช่วยในการแบ่งกลุ่มข้อมูลแบบหยาบๆ ก่อนที่จะเข้าสู่การรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means

4. พล็อต fuzzy partition matrix ของแต่ละกลุ่มข้อมูลไปยังแกนของ $e(k)$ และ $\Delta e(k)$ สำหรับข้อมูลที่เป็นอินพุตของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี ในส่วนของข้อมูลที่เป็นเอาท์พุตของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี ให้พล็อต fuzzy partition matrix ของแต่ละกลุ่มข้อมูลไปยังแกนของ K_p' และ K_i'

5. ประมาณฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ได้ไปเป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยม

- ขั้นตอนการกำหนดฐานกฎที่เหมาะสม

ในขั้นตอนนี้สามารถทำได้โดยการพิจารณาผลตอบของกระบวนการ ตามหลักการของการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI แต่จำนวนกฎฟัซซีที่นำมาสร้างฐานกฎฟัซซีนั้น ต้องสอดคล้องกับจำนวนของกลุ่มข้อมูลของข้อมูลที่เข้าสู่ระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี และฐานกฎฟัซซีที่ได้จะให้ผลการควบคุมที่มีประสิทธิภาพ แต่หากผลการควบคุมไม่เป็นที่น่าพอใจ สามารถปรับช่วงค่าของ K_p และ K_i เพื่อให้ผลการควบคุมมีประสิทธิภาพดีเพียงพอ

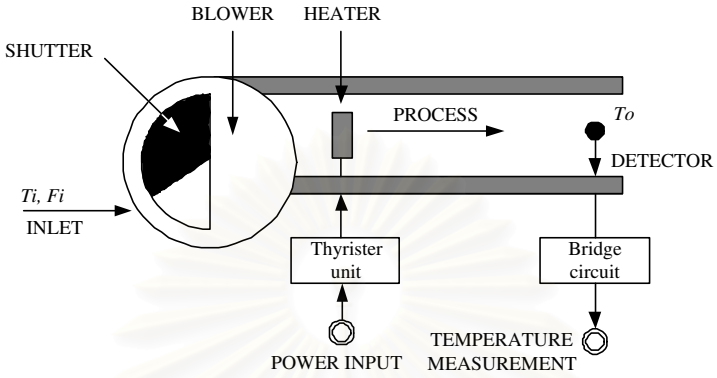
จากทฤษฎีที่เกี่ยวกับ พื้นฐานความรู้การควบคุมแบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI โดยการประยุกต์ใช้วิธีการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ร่วมกับการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI ในการกำหนดโครงสร้างฟัซซี ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องนำความรู้ที่ได้ศึกษา มาทำการทดสอบเพื่อแสดงให้เห็นว่าสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้ดีกับกระบวนการง่ายๆ โดยเปรียบเทียบสมรรถนะของการควบคุมโดยวิธีที่นำเสนอกับการควบคุมแบบดั้งเดิม

ดังนั้นจึงเลือกพิจารณา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นกระบวนการตัวอย่าง ทั้งนี้เพราะลักษณะสมบัติของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เป็นระบบแบบหนึ่งสัญญาณเข้าหนึ่งสัญญาณออก (single input single output) มีความไม่เป็นเชิงเส้น เหมาะกับการประยุกต์ใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยตรรกศาสต์ฟัซซีมาควบคุมกระบวนการนี้ และวิเคราะห์ผลการควบคุมที่ได้เปรียบเทียบกับการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI แบบกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ความรู้ จากทฤษฎีการใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีในการควบคุมกระบวนการ โดยการจำลองระบบด้วยคอมพิวเตอร์

2.4 ลักษณะสมบัติของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนดังรูปที่ 2.10 เป็นระบบการทำความร้อนอากาศที่ประกอบด้วย blower ทำหน้าที่ดูดอากาศให้หมุนเวียนภายในท่อนำอากาศโดยตั้งให้มีความเร็วคงที่ สามารถตั้งอัตราการไหลของอากาศโดยการปรับ shutter อากาศจะไหลผ่านเครื่องทำความร้อนไปยังท่อนำอากาศ เครื่องทำความร้อนนี้มี thyrister เป็นตัวขับเร้าและสร้างกำลังงานให้แก่เครื่องทำความร้อนตามสัญญาณควบคุมที่

ส่งออกมาจากตัวควบคุม อากาศที่ผ่านเครื่องนำความร้อนผ่านไปยังปลายท่อนำอากาศ ซึ่งมี thermister ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิติดตั้งอยู่ และส่งสัญญาณออกเป็นแรงดันไฟฟ้าโดยการผ่าน wheatstone bridge เพื่อใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุมต่อไป



รูปที่ 2.10: โครงสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เนื่องจากระยะทางระหว่าง thyrister และ thermister ทำให้เกิดการหน่วงเวลา (time delay) คือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศด้านขาเข้า อุณหภูมิยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ปลายด้านออกของท่อนำอากาศจนกระทั่งผ่านไป τ วินาทีต่อมา โดยที่ τ คือเวลาที่อากาศไหลผ่านท่อ ปรากฏการณ์เช่นนี้ทำให้การควบคุมทำได้ยากขึ้น นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศซึ่งมีผลต่อพลวัตของระบบและคุณลักษณะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นในสภาวะอยู่ตัว ทำให้ต้องใช้ตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพในการควบคุม ดังนั้นอุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจึงเป็นตัวแทนของการประยุกต์ใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีกับกระบวนการในอุตสาหกรรมทั่วๆไป โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อดูประสิทธิภาพของการควบคุมที่นำมาประยุกต์ใช้

สำหรับเป้าหมายหลักของการควบคุมกระบวนการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคือ การควบคุมอุณหภูมิด้านขาออกของกระบวนการให้มีค่าคงที่ตามที่กำหนดไว้ นอกจากนี้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจุดทำงานหรือมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการ ระบบควบคุมที่ใช้ควรมีความสามารถในการจัดการกับผลตอบของกระบวนการ ให้เข้าสู่สภาวะคงตัวได้อย่างรวดเร็ว และมีเสถียรภาพ

2.5 การจำลองระบบการควบคุมเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

การทดสอบการจำลองระบบด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งเป็นระบบอันดับหนึ่งที่มีการหน่วงเวลา มีฟังก์ชันถ่ายโอน

$$G(s) = \frac{10e^{-0.13s}}{0.33s + 1} \tag{2.8}$$

โดยที่ สัญญาณเข้าเป็นแรงดันไฟฟ้า (โวลต์) และสัญญาณออกเป็นอุณหภูมิที่ปลายท่อ (องศาเซลเซียส)

ข้อมูลที่เข้าสู่ระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีคือ $e(k)$ และ $\Delta e(k)$ ส่วนข้อมูลที่ออกจากระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีคือ K_p' และ K_i' กำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาออกที่เวลา 5 วินาที จาก 20 องศาเซลเซียส

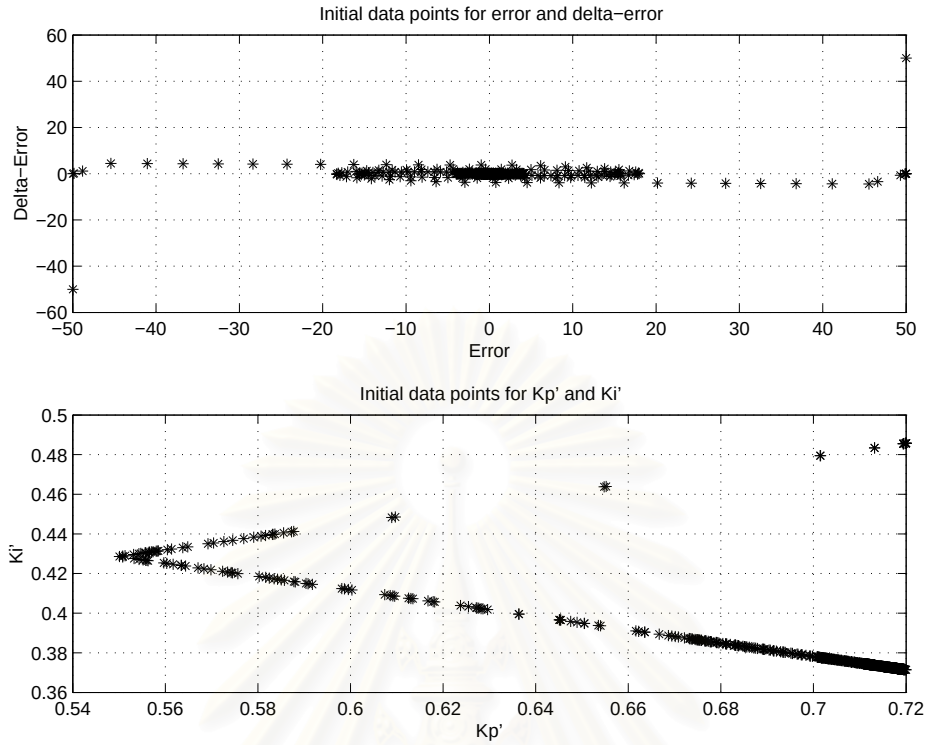
เป็น 70 องศาเซลเซียส และที่เวลา 10 วินาที ลดลงสู่ 20 องศาเซลเซียส

- ค่าพารามิเตอร์ของการรวมกลุ่มข้อมูล และตารางค่าอัตราขยายฟัซซี
  - กำหนดให้จำนวนเซตฟัซซีของข้อมูลที่เข้าสู่ระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีเปลี่ยนแปลงได้ 2-7 เซต และจำนวนเซตฟัซซีของข้อมูลที่ออกจากระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีคงที่ 2 เซต
  - เลือกใช้การรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means และกำหนดให้ $m' = 2.00$ และ $\epsilon = 0.001$
  - เลือกใช้การระบุหาจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสม โดยใช้ compactness and separation validity function
  - เลือกใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI
- ค่าพารามิเตอร์ของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี
  - $e(k) \in [-50, 50]$ และ $\Delta e(k) \in [-60, 60]$
  - $K_p \in [0.41, 0.01]$ และ $K_i \in [0.43, 0.36]$
  - เลือกใช้การแปลงฟัซซีแบบสามเหลี่ยม
  - เลือกใช้กลไกการตัดสินใจฟัซซีแบบ minimum
  - เลือกใช้การแปลงกลับฟัซซีแบบจุดศูนย์ถ่วง

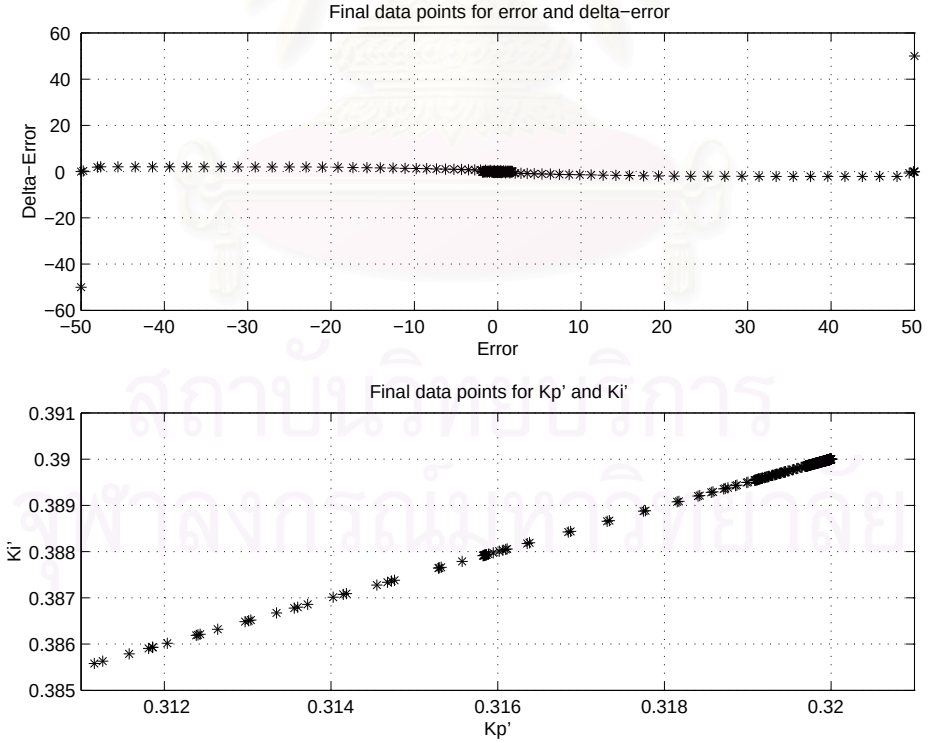
จากลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตเริ่มต้นแสดงดังรูปที่ 2.11 พบว่าผลตอบของกระบวนการมีการแกว่งค่อนข้างมาก ดังนั้นสามารถระบุหาจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสมของข้อมูลอินพุตเริ่มต้นได้ โดยคำนวณค่าเกณฑ์ S ซึ่งเป็นเกณฑ์วัดความถูกต้องของการรวมกลุ่มข้อมูล จากลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลอินพุตเริ่มต้น สามารถคำนวณหาค่าเกณฑ์ S ได้เท่ากับ 0.0258 ซึ่งเป็นค่าเกณฑ์ที่ต่ำที่สุดเมื่อจำนวนกลุ่มข้อมูลอินพุตเท่ากับ 5 กลุ่ม ส่วนจำนวนกลุ่มของข้อมูลเอาท์พุตนั้นกำหนดให้เท่ากับ 2 กลุ่ม และใช้การรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ในการกำหนดรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่เหมาะสมกับการกระจายตัวของข้อมูลอินพุตเริ่มต้นระหว่าง $e(k)$ และ $\Delta e(k)$ และข้อมูลเอาท์พุตเริ่มต้นระหว่าง K'_p และ K'_i

ส่วนลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตสุดท้ายดังรูปที่ 2.12 ซึ่งให้ผลตอบของกระบวนการเหมาะสม โดยสามารถกำหนดจำนวนกลุ่มของข้อมูลอินพุตเท่ากับ 3 กลุ่ม ซึ่งทำให้ค่าเกณฑ์ S เท่ากับ 0.0024 เป็นค่าเกณฑ์ที่ต่ำที่สุด และจำนวนกลุ่มของข้อมูลเอาท์พุตกำหนดให้เท่ากับ 2 กลุ่มเช่นเดิม ดังนั้นสังเกตได้ว่า เมื่อทำการปรับโครงสร้างของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีในแต่ละรอบของการทำงานจนกระทั่งผลตอบของกระบวนการดีที่สุด ลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลทั้งหมดนั้นมีการเปลี่ยนแปลงโดยมีความราบเรียบสม่ำเสมอดีกว่าก่อนที่จะทำการปรับโครงสร้างของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ลักษณะการกระจายของข้อมูลทั้งหมดมีผลต่อผลตอบของกระบวนการ

เมื่อทราบค่าเกณฑ์ S ต่ำที่สุดสำหรับการกระจายตัวของข้อมูลอินพุต ซึ่งจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสมเท่ากับ 3 ดังนั้นรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุต หาได้จากการพล็อต fuzzy partition matrix ของแต่ละกลุ่มข้อมูลอินพุตไปยังแกนของ $e(k)$ และ $\Delta e(k)$ ดังรูปที่ 2.13 และ 2.15 ตามลำดับ



รูปที่ 2.11: การกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตเริ่มต้น



รูปที่ 2.12: การกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตสุดท้าย

ส่วนรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลเอาท์พุต ซึ่งระบุจำนวนกลุ่มข้อมูลไว้เท่ากับ 2 หาได้โดยการพล็อต fuzzy partition matrix ของแต่ละกลุ่มข้อมูลเอาท์พุตไปยังแกนของ K_p' และ K_i' ดังรูปที่ 2.17 และรูปที่ 2.19 ตามลำดับ

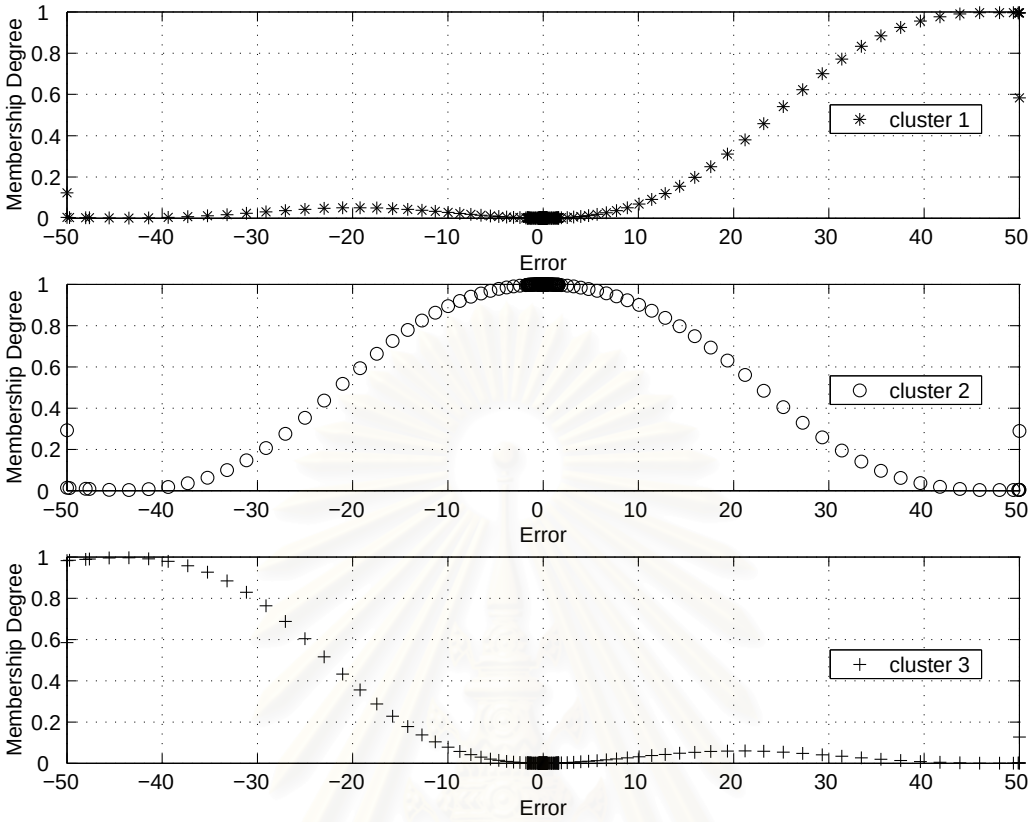
จากลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลในแต่ละกลุ่มทั้งในส่วนที่เป็นข้อมูลอินพุตและเอาท์พุต สามารถกำหนดรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกได้ โดยทำการประมาณเป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยม ดังนั้นสามารถกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุต $e(k)$ และ $\Delta e(k)$ ได้ดังรูปที่ 2.14 และ 2.16 ตามลำดับ และกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลเอาท์พุต K_p' และ K_i' ได้ดังรูปที่ 2.18 และรูปที่ 2.20 ตามลำดับ

การใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI ในการกำหนดฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ทำได้โดยพิจารณาจากผลตอบของกระบวนการ อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุต จากนั้นทำการปรับฐานกฎฟัซซีจนกระทั่งผลตอบของกระบวนการมีส่วนพุ่งเกินสูงสุดน้อยและมีช่วงเวลาเข้าที่เร็ว ดังนั้นเมื่อทำการปรับฐานกฎฟัซซี โดยพิจารณาผลตอบของกระบวนการพร้อมกับการกำหนดจำนวนและรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ทำให้สามารถกำหนดฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสมได้ดังตารางที่ 2.3

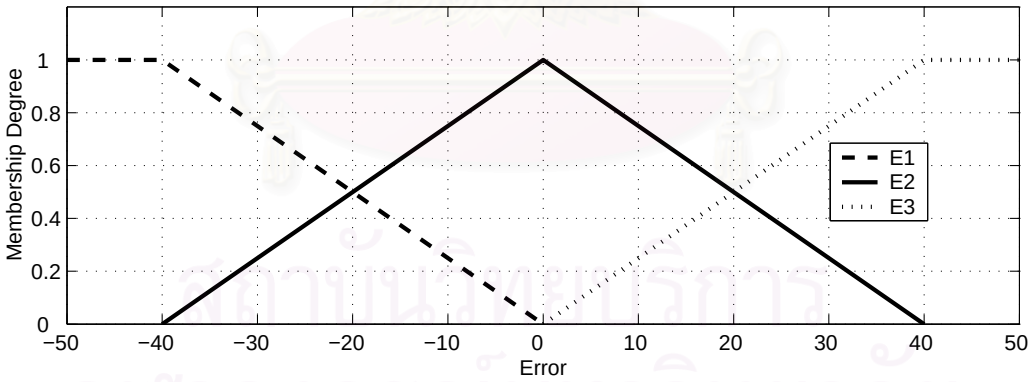
พิจารณาผลตอบของกระบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและสัญญาณควบคุมดังรูปที่ 2.21 และรูปที่ 2.22 ตามลำดับพบว่า การกำหนดโครงสร้างของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีโดยการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ร่วมกับการกำหนดฐานกฎฟัซซีโดยใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI นั้น ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีสามารถควบคุมอุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีกว่าตัวควบคุม PI แบบกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่ เพราะมีช่วงเวลาเข้าที่เร็ว และมีส่วนพุ่งเกินสูงสุดน้อย นอกจากนี้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จากค่าคงที่ทางเวลา 0.33 วินาที เปลี่ยนไปเป็น 0.40 วินาที ผลตอบของกระบวนการแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีสามารถควบคุมอุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีเช่นเดิม แม้ว่ามีส่วนพุ่งเกินสูงสุดมากขึ้นกว่ากรณีการเปลี่ยนจุดทำงานก็ตาม

ดังนั้นการกำหนดโครงสร้างของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีโดยการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ร่วมกับการกำหนดฐานกฎฟัซซีโดยใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI เป็นการใช้ประโยชน์จากข้อดีของทั้ง 2 วิธี กล่าวคือ การรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ทำให้สามารถทราบขอบเขตที่แน่นอนสำหรับการกระจายตัวของข้อมูล ตลอดจนความหนาแน่นของข้อมูลทั้งหมด ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่ช่วยให้การกำหนดจำนวนและรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นมาชิกมีความเหมาะสมกับลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลทั้งหมด

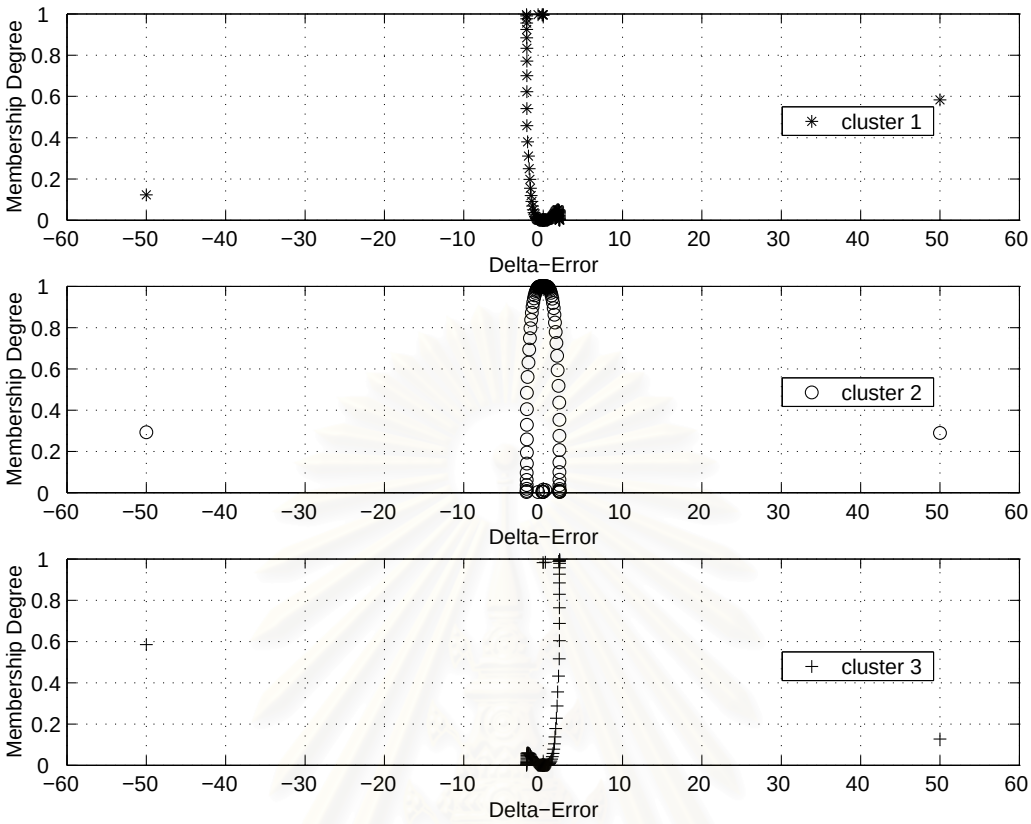
ส่วนการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI นั้นมีประสิทธิภาพมาก ทั้งนี้เพราะเป็นการพิจารณาจากผลตอบของกระบวนการโดยตรง ซึ่งส่งผลให้สามารถปรับฐานกฎฟัซซีได้อย่างรวดเร็วและมีความเหมาะสมกับผลตอบของกระบวนการ จากการทดลองกำหนดโครงสร้างของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีสำหรับปรับจูนค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวควบคุม PI เพื่อควบคุมกระบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน พบว่าสามารถกำหนดโครงสร้างฟัซซีได้อย่างรวดเร็วและให้ผลการควบคุมที่มีประสิทธิภาพสูง



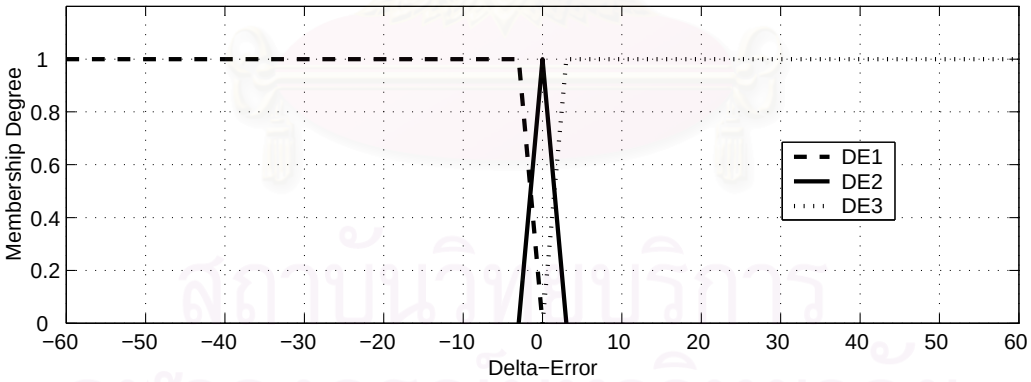
รูปที่ 2.13: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $e(k)$ และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลอินพุต



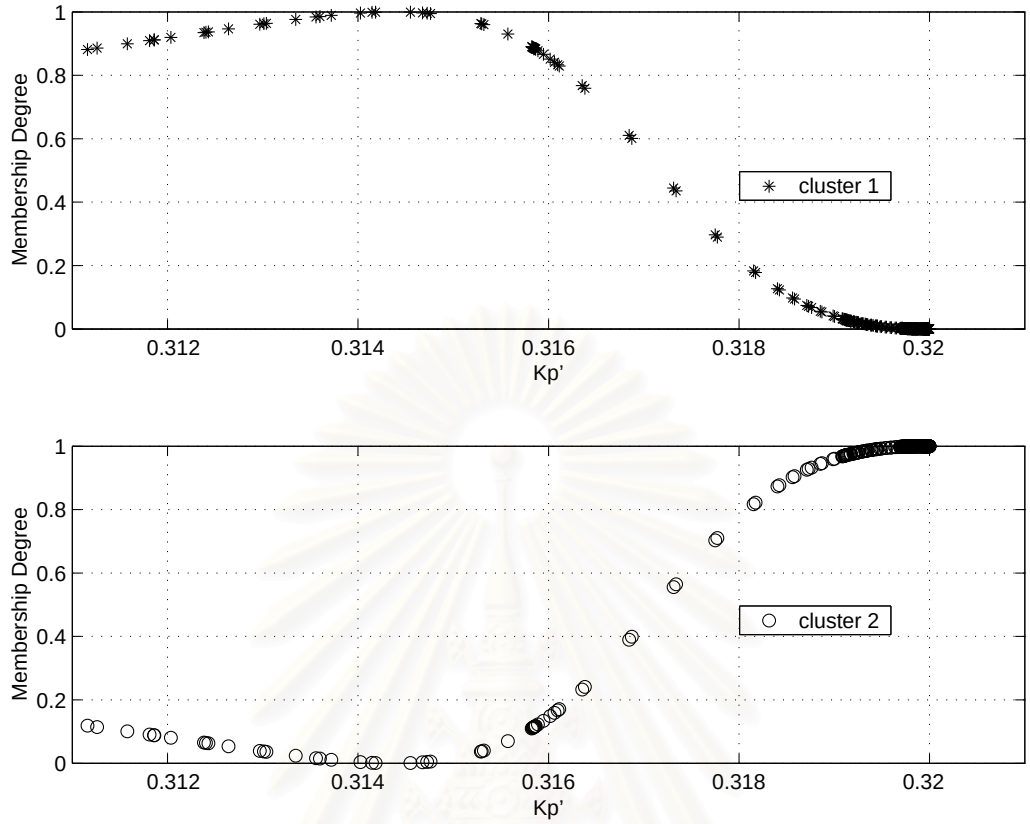
รูปที่ 2.14: ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุต $e(k)$



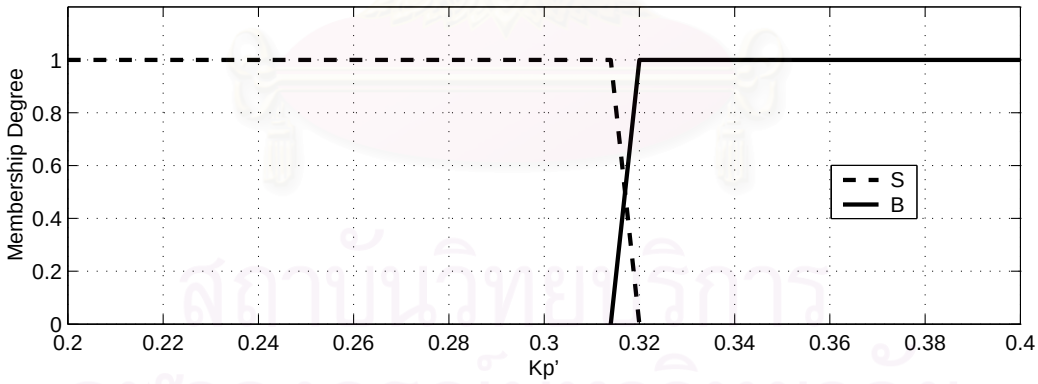
รูปที่ 2.15: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta e(k)$ และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลอินพุต



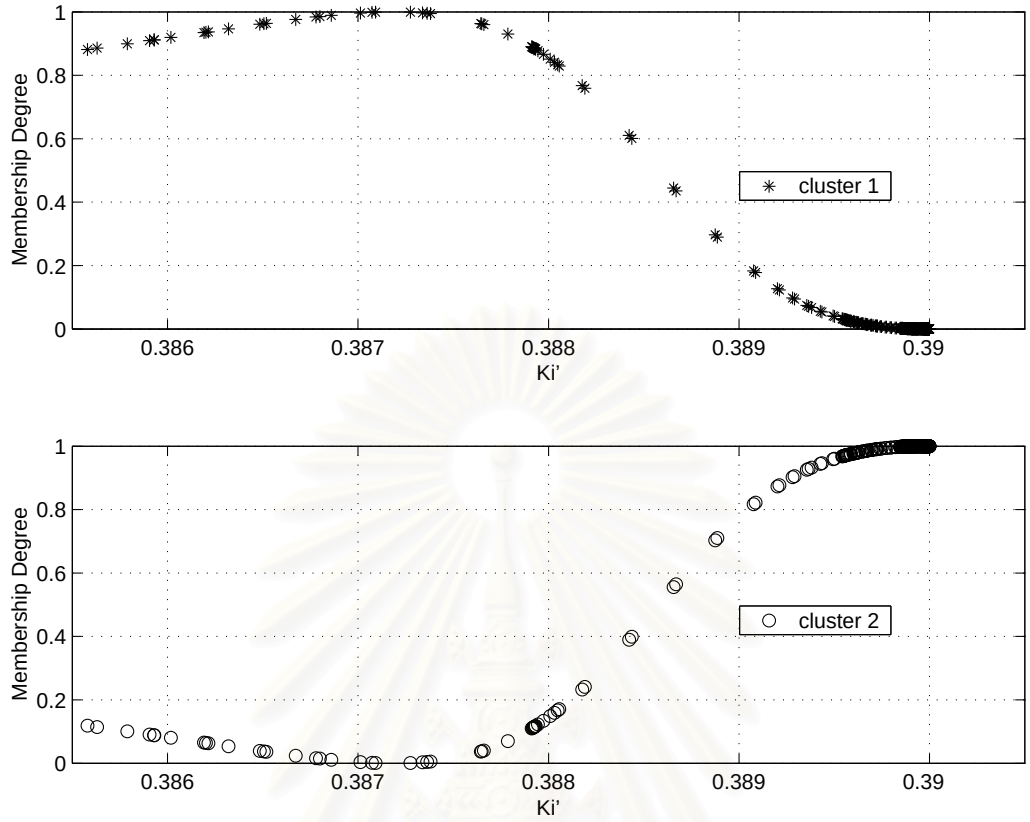
รูปที่ 2.16: ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุต $\Delta e(k)$



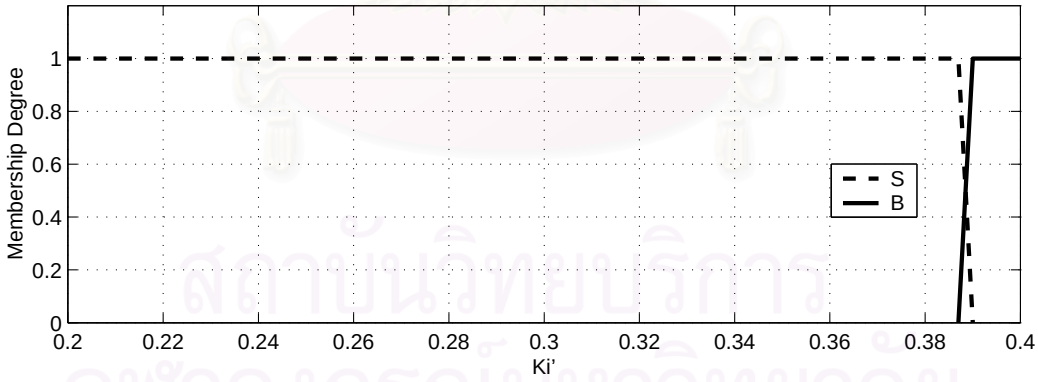
รูปที่ 2.17: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K'_p และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลเอาท์พุต



รูปที่ 2.18: ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ K'_p



รูปที่ 2.19: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K_i' และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลเอาท์พุต



รูปที่ 2.20: ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ K_i'

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

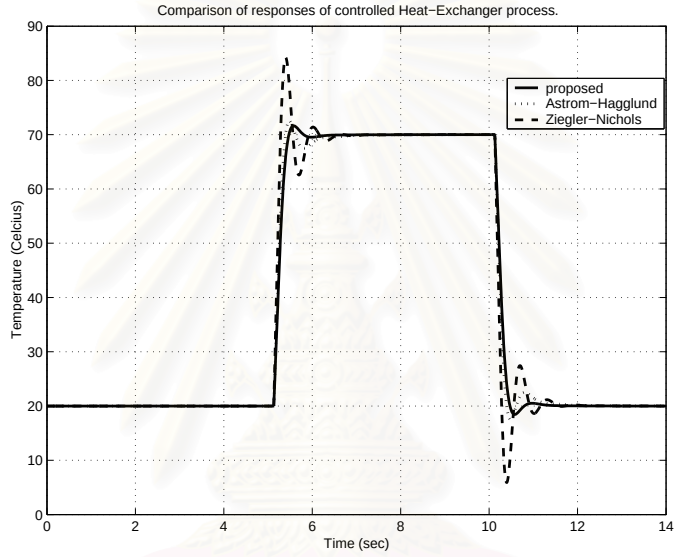
ตารางที่ 2.3: (a) ฐานกฎฟัซซีสำหรับ K'_p ของแบบจำลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (b) ฐานกฎฟัซซีสำหรับ K'_i ของแบบจำลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

		x_2		
		B^1	B^2	B^3
x_1	A^1	B	B	B
	A^2	S	B	S
	A^3	B	B	B

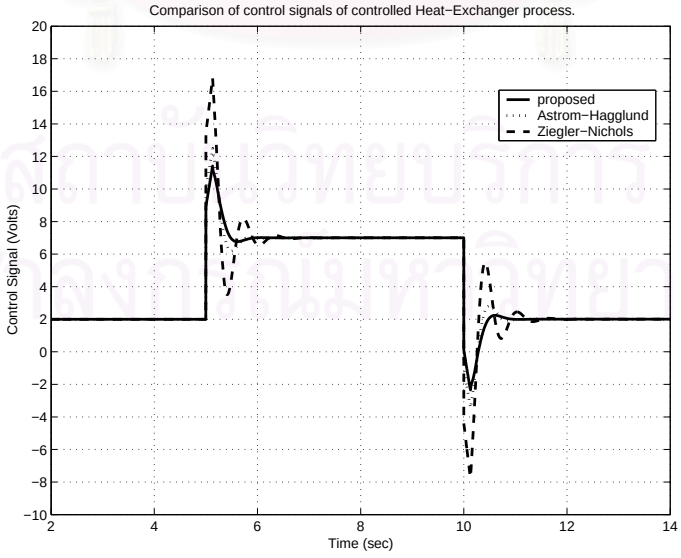
(a)

		x_2		
		B^1	B^2	B^3
x_1	A^1	B	B	B
	A^2	B	B	B
	A^3	B	B	B

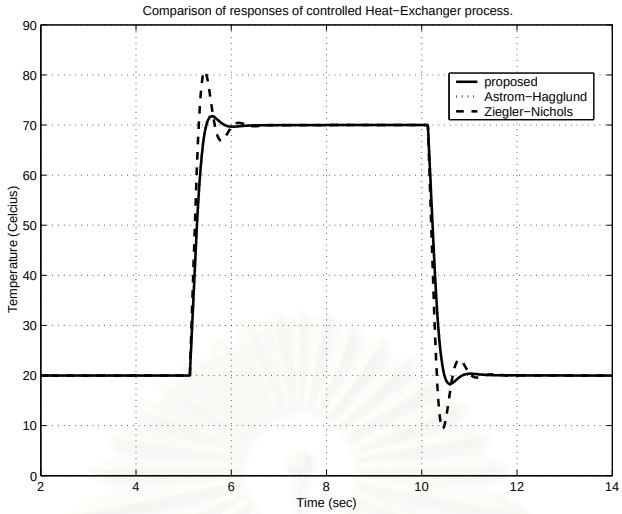
(b)



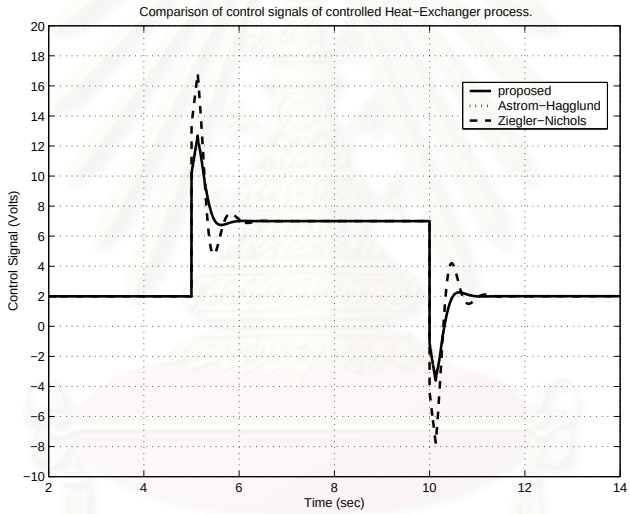
รูปที่ 2.21: ผลตอบของกระบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 2.22: สัญญาณควบคุมของกระบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 2.23: ผลตอบของกระบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกรณีเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์



รูปที่ 2.24: สัญญาณควบคุมของกระบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกรณีเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์

2.6 สรุป

ในการออกแบบโครงสร้างของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีสำหรับกำกับดูแลตัวควบคุม PI พบว่าการใช้การรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ร่วมกับการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI ในการกำหนดจำนวนและรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกตลอดจนฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสมนั้นสามารถช่วยลดปัญหาการกำหนดโครงสร้างของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี ซึ่งแต่เดิมใช้วิธีลองผิดลองถูก ทำการทดลองโดยประยุกต์ใช้วิธีที่นำเสนอกับการควบคุมกระบวนการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อเปรียบเทียบผลการควบคุมที่ได้กับตัวควบคุม PI แบบกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่ของ Ziegler-Nichols และ Åström-Hägglund [32] พบว่าผลตอบของกระบวนการที่ได้จากตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีนั้น มีส่วนพุ่งเกินสูงสุดน้อย และมีช่วงเวลาเข้าที่เร็ว ดีกว่าตัวควบคุม PI แบบกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่ของ Ziegler-Nichols [23] และ Åström-Hägglund [26]

บทที่ 3

การควบคุมหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด

การใช้การรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ร่วมกับการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI ในการกำหนดโครงสร้างของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีเพื่อใช้ในการกำกับดูแลการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI พบว่ามีประสิทธิภาพสูงเมื่อประยุกต์ใช้กับการควบคุมกระบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้นในบทนี้จึงประยุกต์ใช้วิธีที่นำเสนอกับกระบวนการหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด ซึ่งเป็นระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง มีการกระทำระหว่างวงรอบการควบคุมและมีการรบกวนในระบบ ทำให้การควบคุมมีความซับซ้อนมากขึ้น การศึกษาทำทั้งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด และการประยุกต์ใช้งานจริงกับหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิดของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม วิเคราะห์ผลการควบคุมที่ได้ เปรียบเทียบกับการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI แบบกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่ของ Ziegler-Nichols

3.1 การจำลองระบบการควบคุมหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด

ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้แบบจำลองหอกลั่นของ Luyben [37] สำหรับรายละเอียดทางกายภาพและการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก ภาคผนวก ค. วัตถุประสงค์ของการควบคุมหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิดคือ การควบคุมความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ที่ยอดหอและสารผลิตภัณฑ์ที่ฐานหอ ให้เป็นไปตามค่าที่กำหนดไว้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนสารเข้าที่กลางหอ

ในการออกแบบระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีแบบกำกับดูแลตัวควบคุม PI สามารถทำได้โดยการกำหนดข้อมูลที่เข้าสู่ระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีคือ $e(k)$ และ $\Delta e(k)$ และข้อมูลที่ออกจากระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีคือ K_p' และ K_i' กำหนดให้มีการรบกวนในระบบโดยการเพิ่มอัตราการป้อนสารเข้าที่กลางหอที่เวลา 80 นาที จาก 100 ปอนด์-โมล/นาที เป็น 110 ปอนด์-โมล/นาที และที่เวลา 180 นาที ทำการลดอัตราการป้อนสารเข้าที่กลางหอลงมาเหลือ 100 ปอนด์-โมล/นาที กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีดังนี้

- ค่าพารามิเตอร์ของการรวมกลุ่มข้อมูล และการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซี
  - กำหนดให้จำนวนเซตฟัซซีของข้อมูลที่เข้าสู่ระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีเปลี่ยนแปลงได้ 2-7 เซต และจำนวนเซตฟัซซีของข้อมูลที่ออกจากระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีคงที่ 2 เซต
  - เลือกใช้การรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means และกำหนดให้ $m' = 2.00$ และ $\epsilon = 0.001$
  - เลือกใช้การระบุหาจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสม โดยใช้ compactness and separation validity function
  - เลือกใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI

- ค่าพารามิเตอร์ของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีในวงรอบยอดหอ
  - $e(k) \in [-8 \times 10^{-4}, 8 \times 10^{-4}]$ และ $\Delta e(k) \in [-1 \times 10^{-4}, 1 \times 10^{-4}]$
  - $K_p \in [2000, 500]$ และ $K_i \in [1000, 500]$
  - เลือกใช้การแปลงฟัซซีแบบสามเหลี่ยม
  - เลือกใช้กลไกการตัดสินใจฟัซซีแบบ minimum
  - เลือกใช้การแปลงกลับฟัซซีแบบจุดศูนย์ถ่วง
- ค่าพารามิเตอร์ของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีในวงรอบฐานหอ
  - $e(k) \in [-3 \times 10^{-4}, 3 \times 10^{-4}]$ และ $\Delta e(k) \in [-0.8 \times 10^{-4}, 0.8 \times 10^{-4}]$
  - $K_p \in [3000, 2000]$ และ $K_i \in [2000, 1000]$
  - เลือกใช้การแปลงฟัซซีแบบสามเหลี่ยม
  - เลือกใช้กลไกการตัดสินใจฟัซซีแบบ minimum
  - เลือกใช้การแปลงกลับฟัซซีแบบจุดศูนย์ถ่วง

โดยออกแบบการทดลองเป็น 3 การทดลองเพื่อศึกษาการควบคุมหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด ดังตารางที่ 3.1

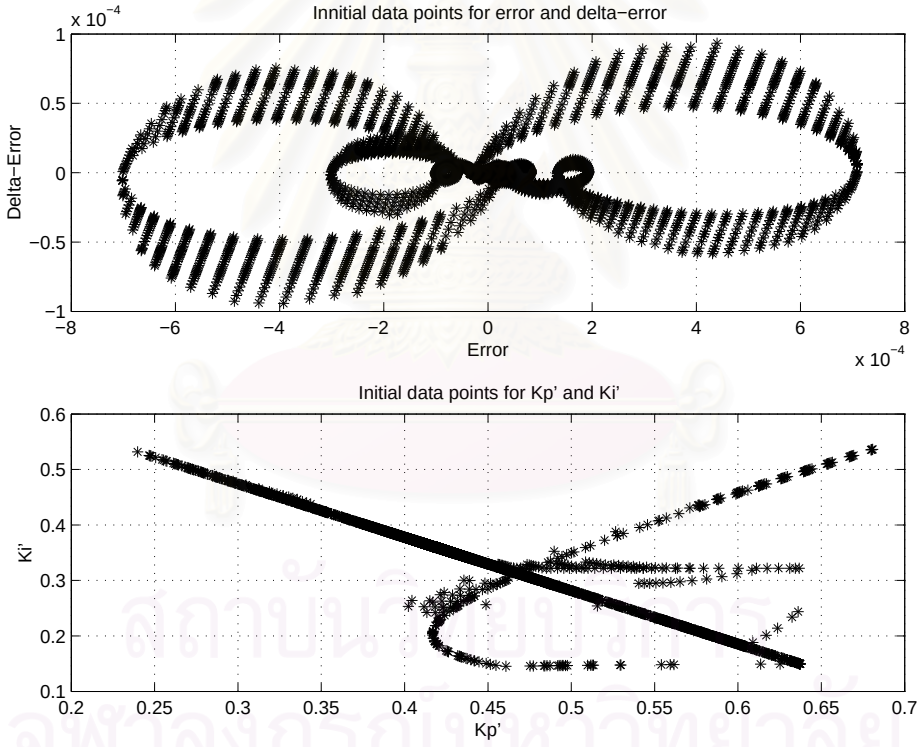
ตารางที่ 3.1: ตารางแสดงรายละเอียดการทดลองของแบบจำลองหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด

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

การทดลองที่ 1

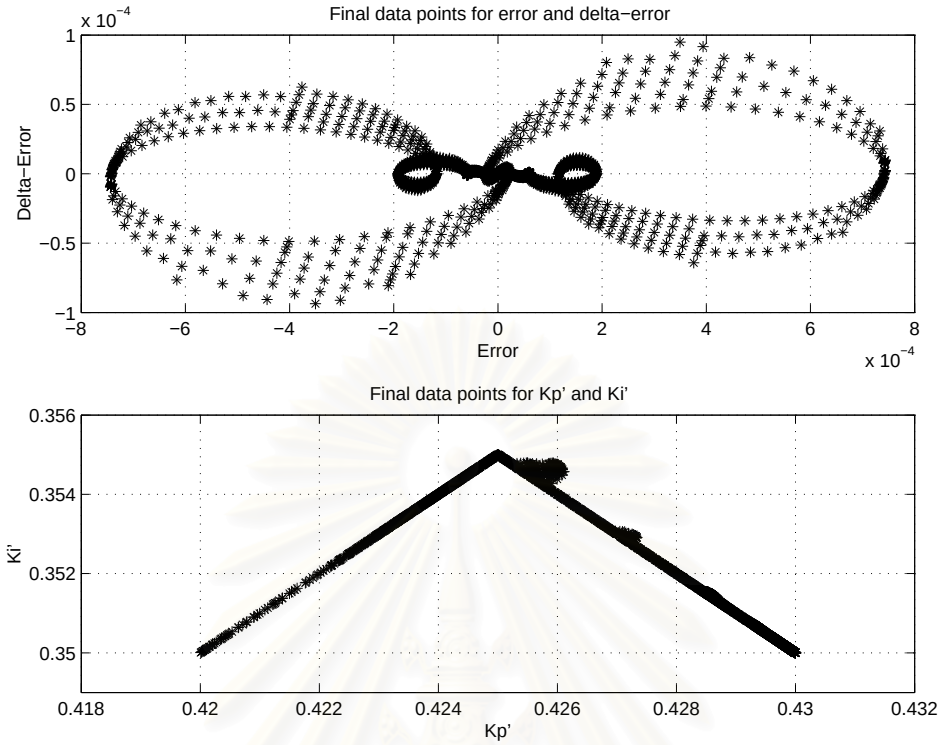
ใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีในการควบคุมวงรอบยอดหอ และใช้ตัวควบคุม PI แบบกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่ในการการควบคุมวงรอบฐานหอจากลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตเริ่มต้นแสดงดังรูปที่ 3.1 พบว่าผลตอบของกระบวนการมีการแกว่งค่อนข้างสูง ดังนั้นสามารถระบุหาจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสมของข้อมูลอินพุตเริ่มต้นได้ โดยการคำนวณหาค่าเกณฑ์ S

จากลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตสุดท้ายดังรูปที่ 3.2 ซึ่งให้ผลตอบของกระบวนการเหมาะสม โดยสามารถกำหนดจำนวนกลุ่มของข้อมูลอินพุตได้เท่ากับ 3 กลุ่ม ซึ่งทำให้ค่าเกณฑ์ $S = 0.0043$ เป็นค่าเกณฑ์ที่ต่ำที่สุด และจำนวนกลุ่มของข้อมูลเอาท์พุตกำหนดให้เท่ากับ 2 กลุ่มเช่นเดิม และใช้การรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ในการกำหนดรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่เหมาะสมกับการกระจายตัวของข้อมูลอินพุต $e(k)$ และ $\Delta e(k)$ และข้อมูลเอาท์พุต K_p' และ K_i'



รูปที่ 3.1: การกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตเริ่มต้นของการทดลองที่ 1

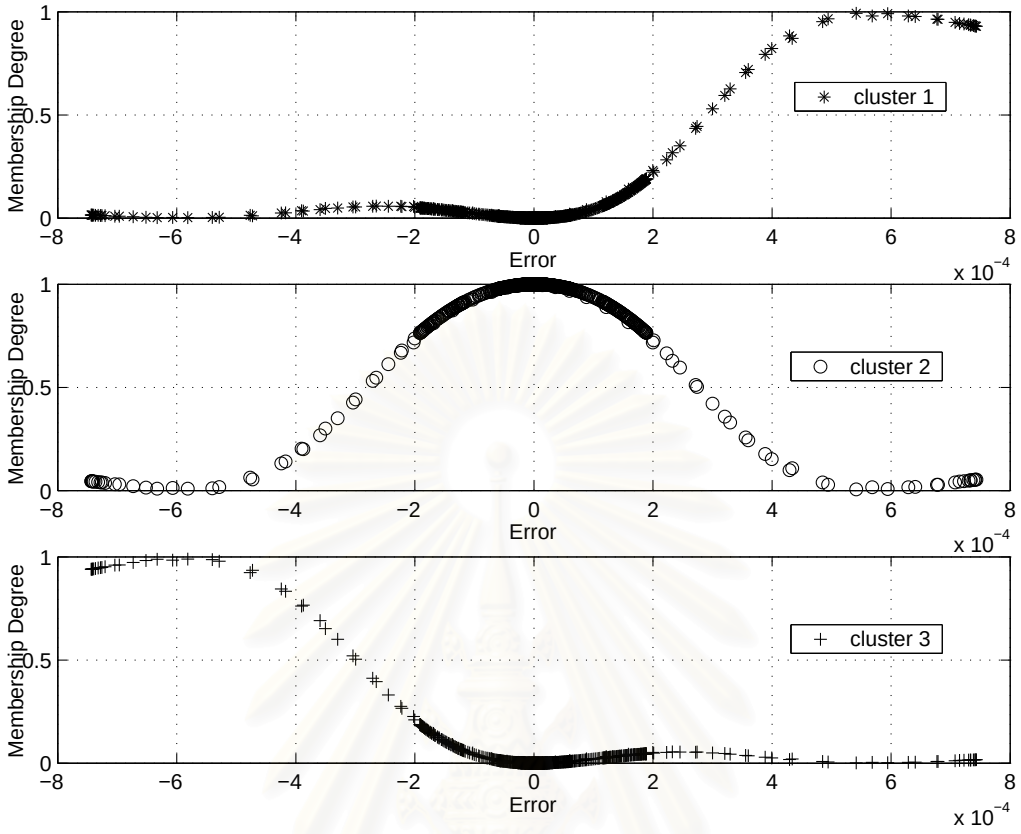
รูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุต หาได้จากการพล็อต fuzzy partition matrix ของแต่ละกลุ่มข้อมูลอินพุตไปยังแกนของ $e(k)$ และ $\Delta e(k)$ ดังรูปที่ 3.3 และ 3.5 ตามลำดับ และพล็อต fuzzy partition matrix ของแต่ละกลุ่มข้อมูลเอาท์พุตไปยังแกนของ K_p' และ K_i' ดังรูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.9 ตามลำดับ จากนั้นนำค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลในแต่ละกลุ่มมาประมาณเป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยม



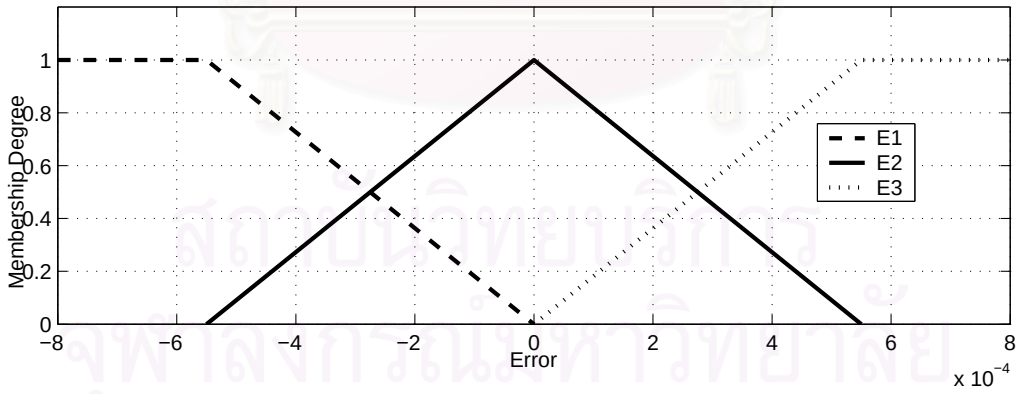
รูปที่ 3.2: การกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตสุดท้ายของการทดลองที่ 1

ดังนั้นสามารถกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุต $e(k)$ และ $\Delta e(k)$ ได้ดังรูปที่ 3.4 และ 3.6 ตามลำดับ และกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลเอาท์พุต K_p' และ K_i' ได้ดังรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.10 ตามลำดับ

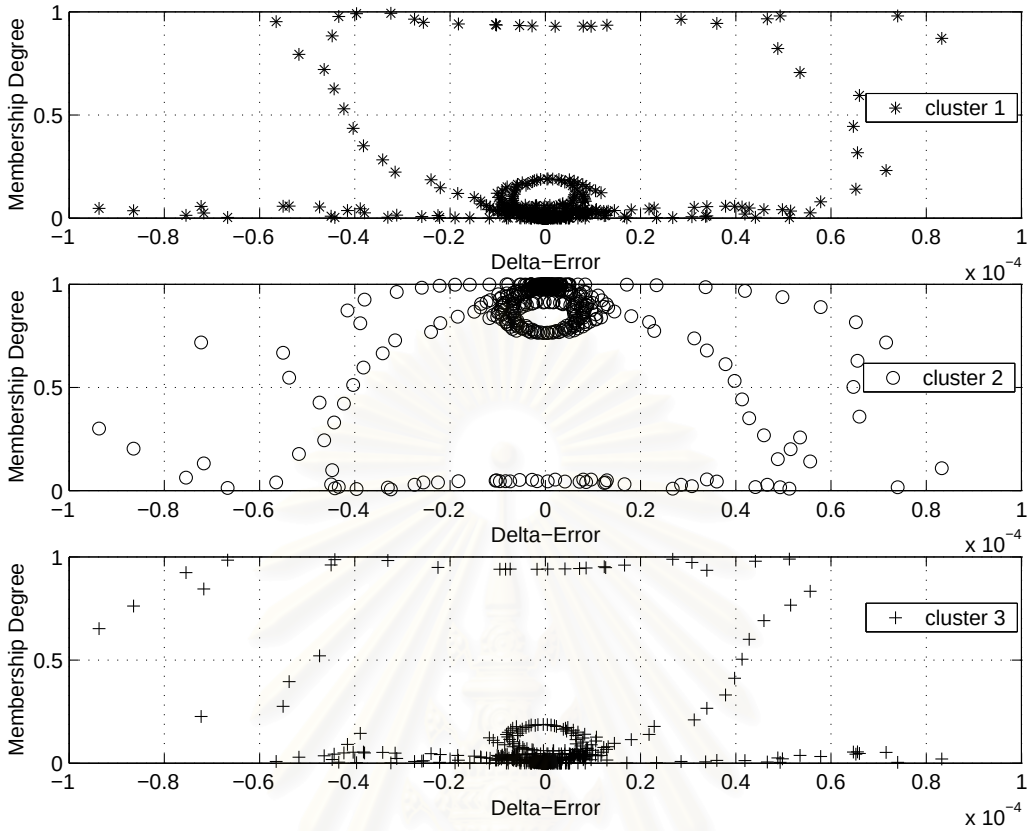
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



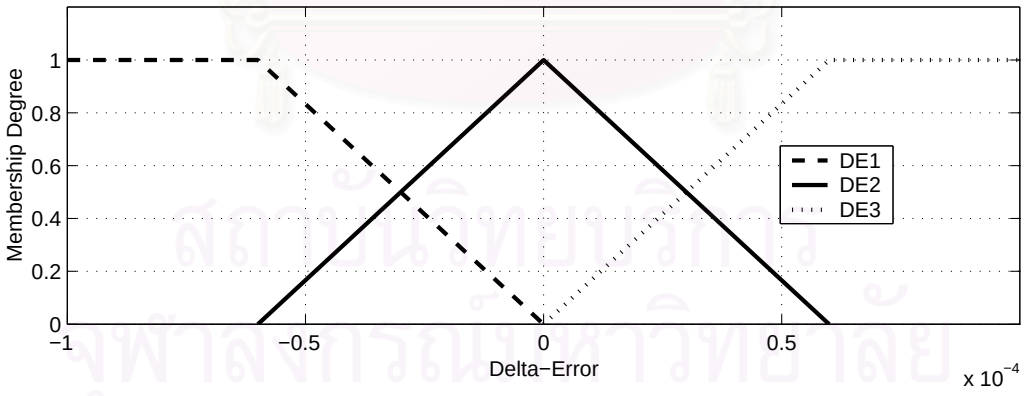
รูปที่ 3.3: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $e(k)$ และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลอินพุตของการทดลองที่ 1



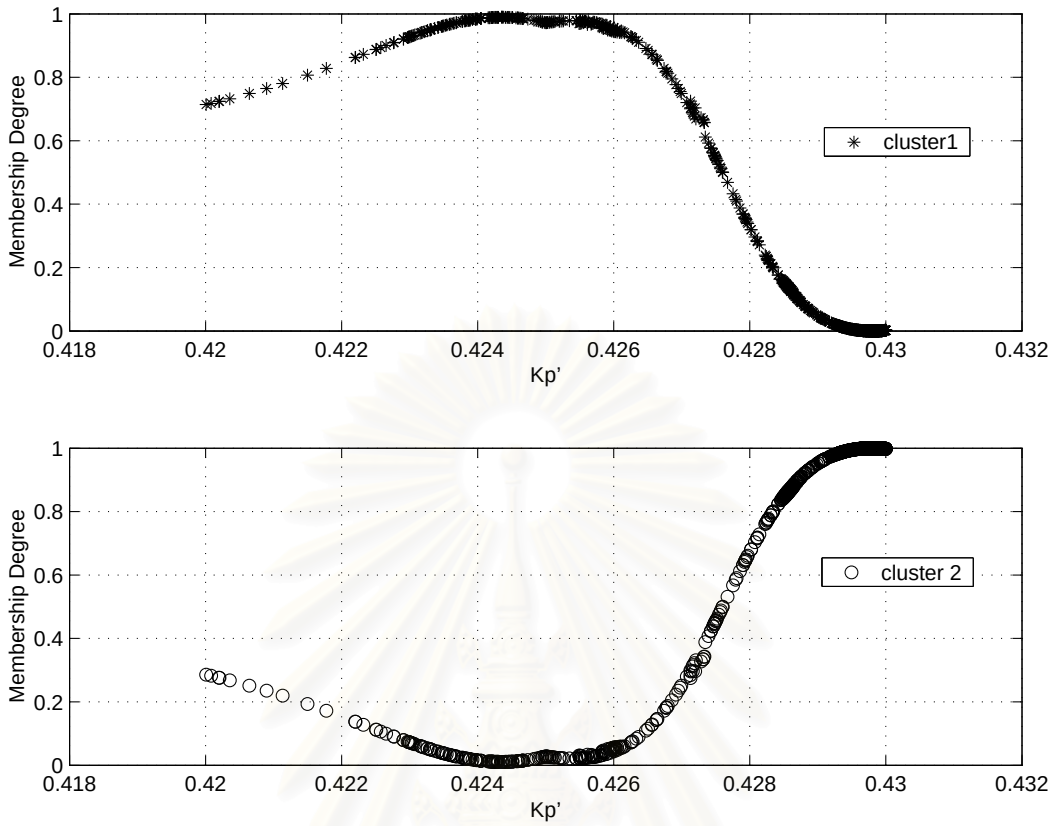
รูปที่ 3.4: ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุต $e(k)$ ของการทดลองที่ 1



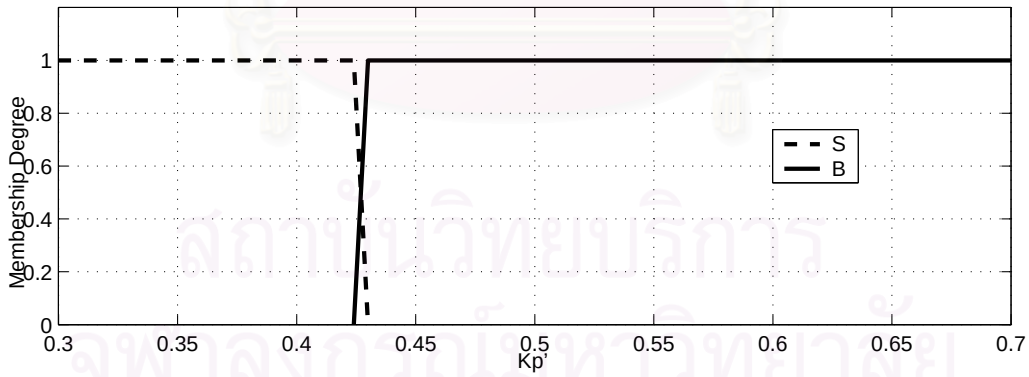
รูปที่ 3.5: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta e(k)$ และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลอินพุตของการทดลองที่ 1



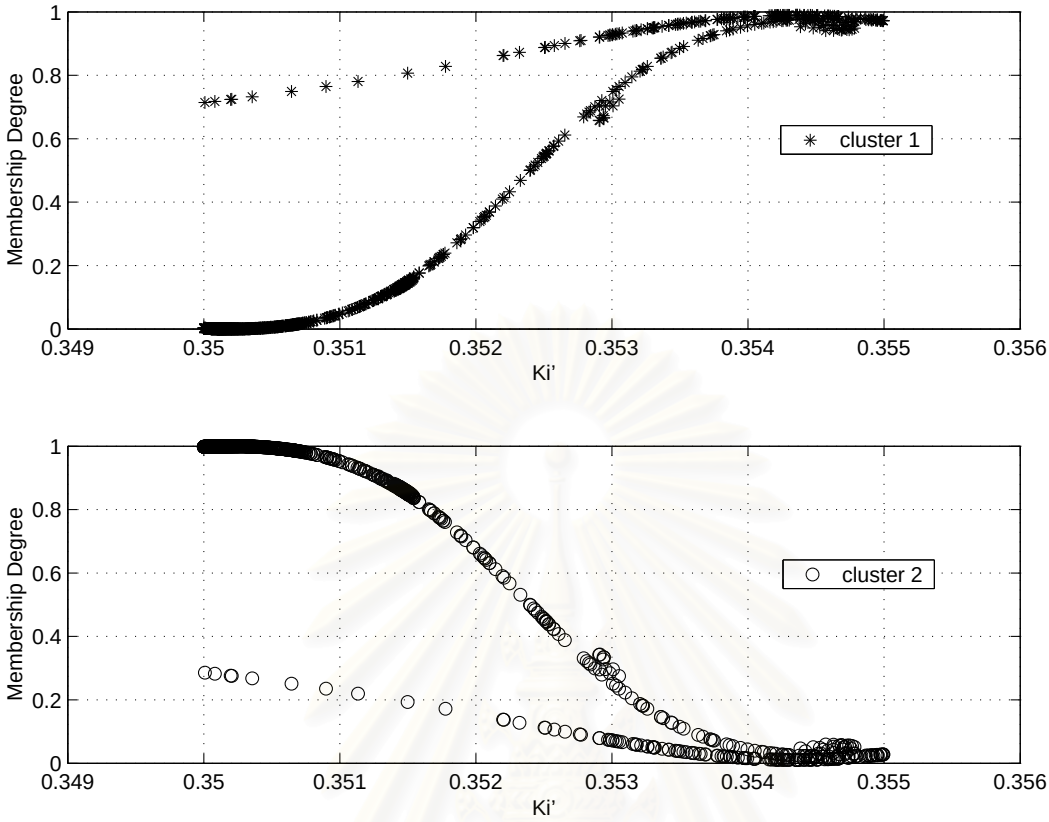
รูปที่ 3.6: ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุต $\Delta e(k)$ ของการทดลองที่ 1



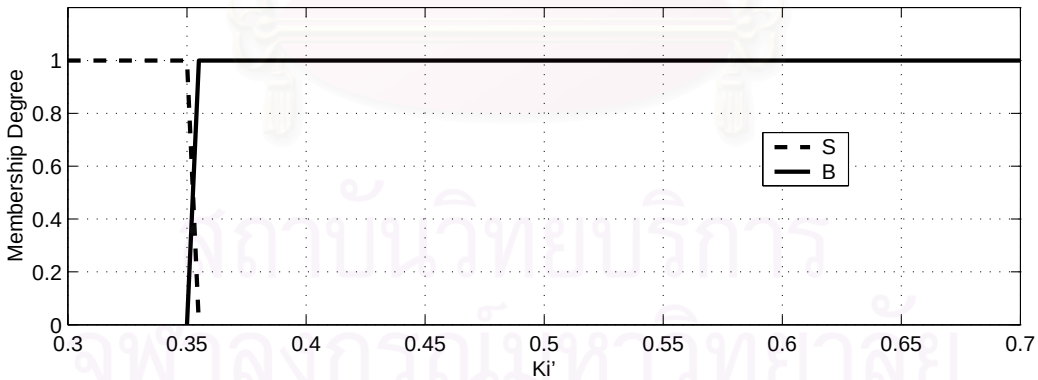
รูปที่ 3.7: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K_p' และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลเอาท์พุตของการทดลองที่ 1



รูปที่ 3.8: ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ K_p' ของการทดลองที่ 1



รูปที่ 3.9: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K_i' และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลเอาท์พุตของการทดลองที่ 1



รูปที่ 3.10: ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ K_i' ของการทดลองที่ 1

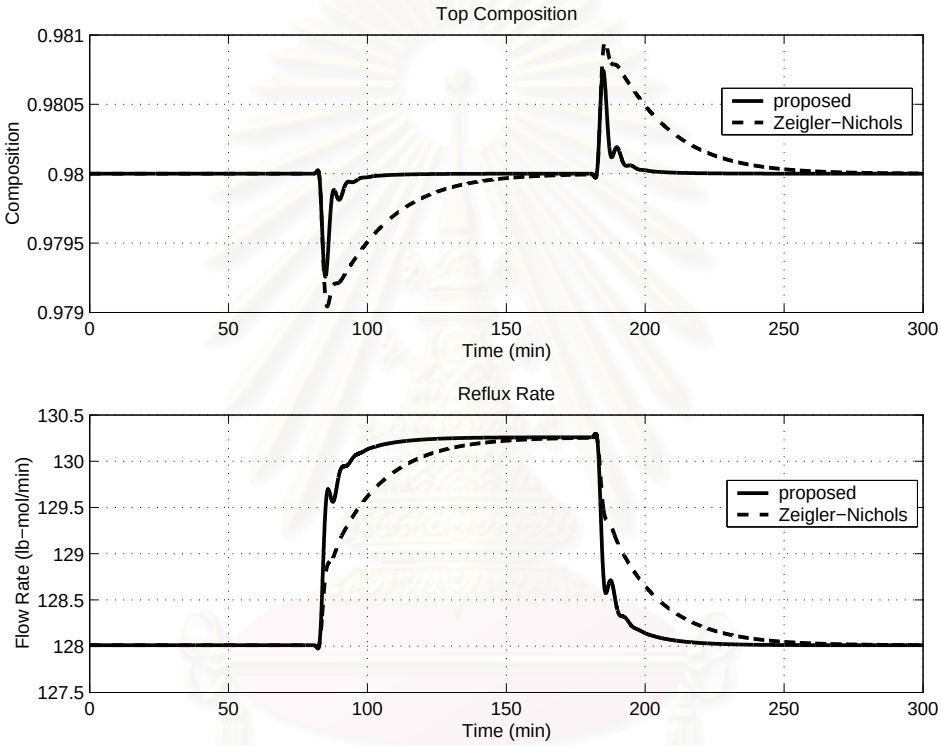
ตารางที่ 3.2: (a) ฐานกฎฟัซซีสำหรับ K_p' ของการทดลองที่1 (b) ฐานกฎฟัซซีสำหรับ K_i' ของการทดลองที่1

		x_2		
		B^1	B^2	B^3
x_1	A^1	B	B	B
	A^2	S	B	S
	A^3	B	B	B

(a)

		x_2		
		B^1	B^2	B^3
x_1	A^1	B	B	B
	A^2	B	B	B
	A^3	B	B	B

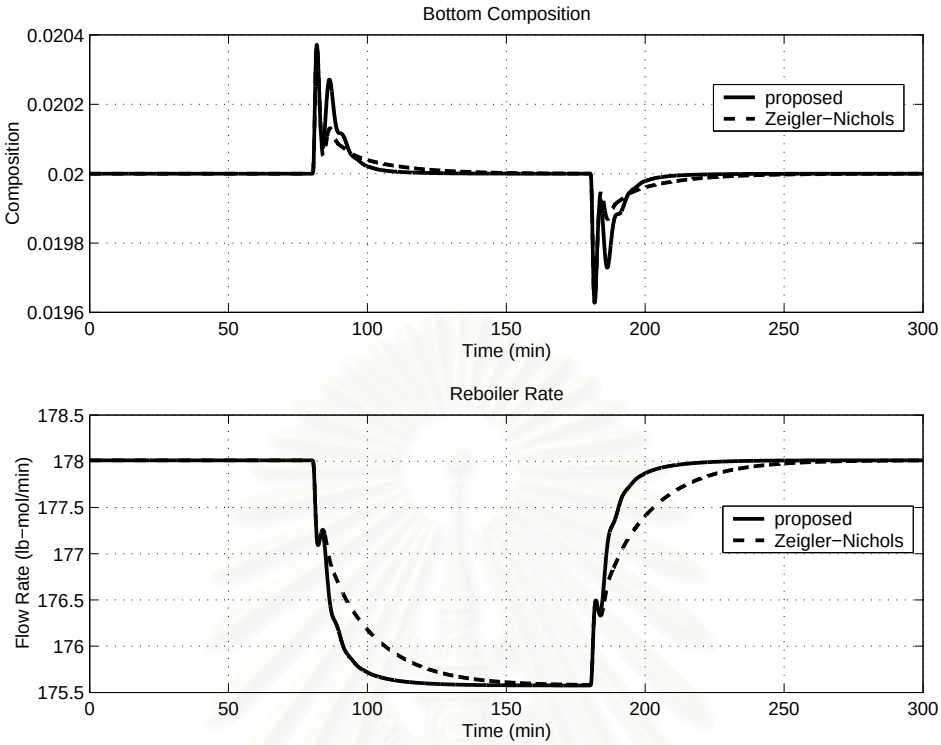
(b)



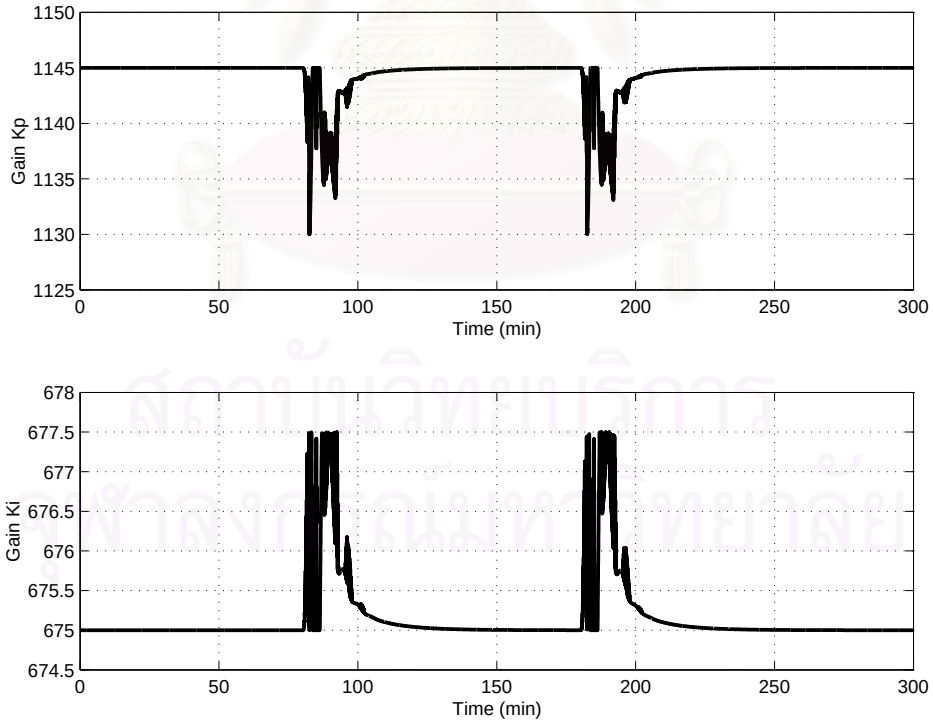
รูปที่ 3.11: ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ยอดหอในการทดลองที่ 1

เมื่อพิจารณาจากผลตอบของกระบวนการหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุต ทำให้สามารถกำหนดฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมวงรอบยอดหอของหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด เมื่อจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสมคือ 3 กลุ่ม ดังนั้นจากความรู้ในการกำหนดฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสมโดยใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI ทำให้ได้ฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสมดังตารางที่ 3.2

พิจารณาผลตอบของกระบวนการและสัญญาณควบคุมดังรูปที่ 3.11 และรูปที่ 3.12 ตามลำดับ ตลอดจนค่าอัตราขยาย K_p และ K_i ดังรูปที่ 3.13 พบว่า ผลการควบคุมสารผลิตภัณฑ์ที่ยอดหอดีกว่าการควบคุมโดยการปรับจูนตัวควบคุม PI แบบกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่ของ Ziegler-Nichols ทั้งนี้เพราะมีช่วงเวลาเข้าที่เร็ว และส่วนพุ่งเกินสูงสุดมีค่าต่ำ ส่วนที่วงรอบฐานหอให้ผลการควบคุมที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 3.12: ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ฐานหอในการทดลองที่ 1

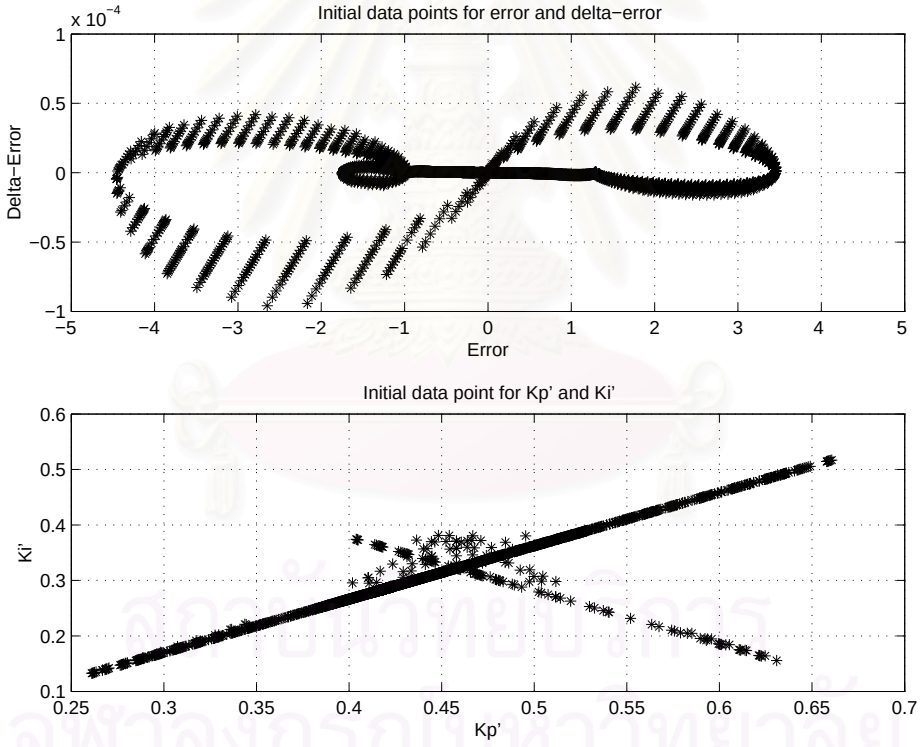


รูปที่ 3.13: ค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_i ของวงรอบยอดหอในการทดลองที่ 1

การทดลองที่ 2

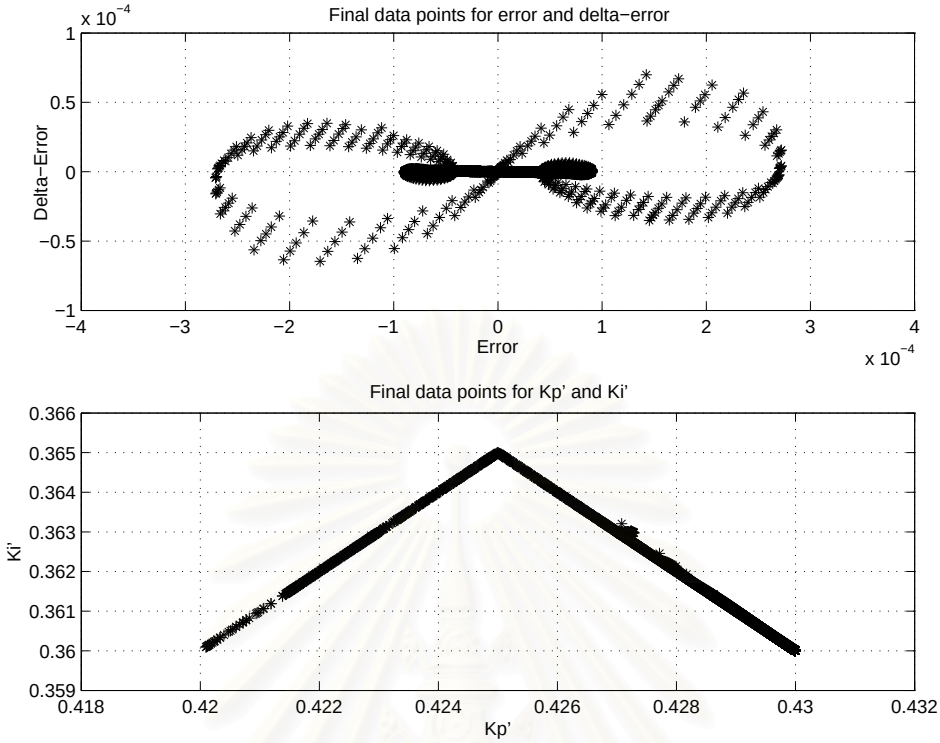
ใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีในการควบคุมวงรอบฐานหอ และใช้ตัวควบคุม PI แบบกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่ในการการควบคุมวงรอบยอดหอ จากลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตเริ่มต้นแสดงดังรูปที่ 3.14 พบว่าผลตอบของกระบวนการมีการแกว่งค่อนข้างสูง ดังนั้นสามารถระบุหาจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสมของข้อมูลอินพุตเริ่มต้นได้ โดยการคำนวณหาค่าเกณฑ์ S

จากลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตสุดท้ายดังรูปที่ 3.15 ซึ่งให้ผลตอบของกระบวนการเหมาะสม โดยสามารถกำหนดจำนวนกลุ่มของข้อมูลอินพุตได้เท่ากับ 3 กลุ่ม ซึ่งทำให้ค่าเกณฑ์ $S = 0.0087$ เป็นค่าเกณฑ์ที่ต่ำที่สุด และจำนวนกลุ่มของข้อมูลเอาท์พุตกำหนดให้เท่ากับ 2 กลุ่มเช่นเดิม และใช้การรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ในการกำหนดรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่เหมาะสมกับการกระจายตัวของข้อมูลอินพุต $e(k)$ และ $\Delta e(k)$ และข้อมูลเอาท์พุต K_p' และ K_i'



รูปที่ 3.14: การกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตเริ่มต้นของการทดลองที่ 2

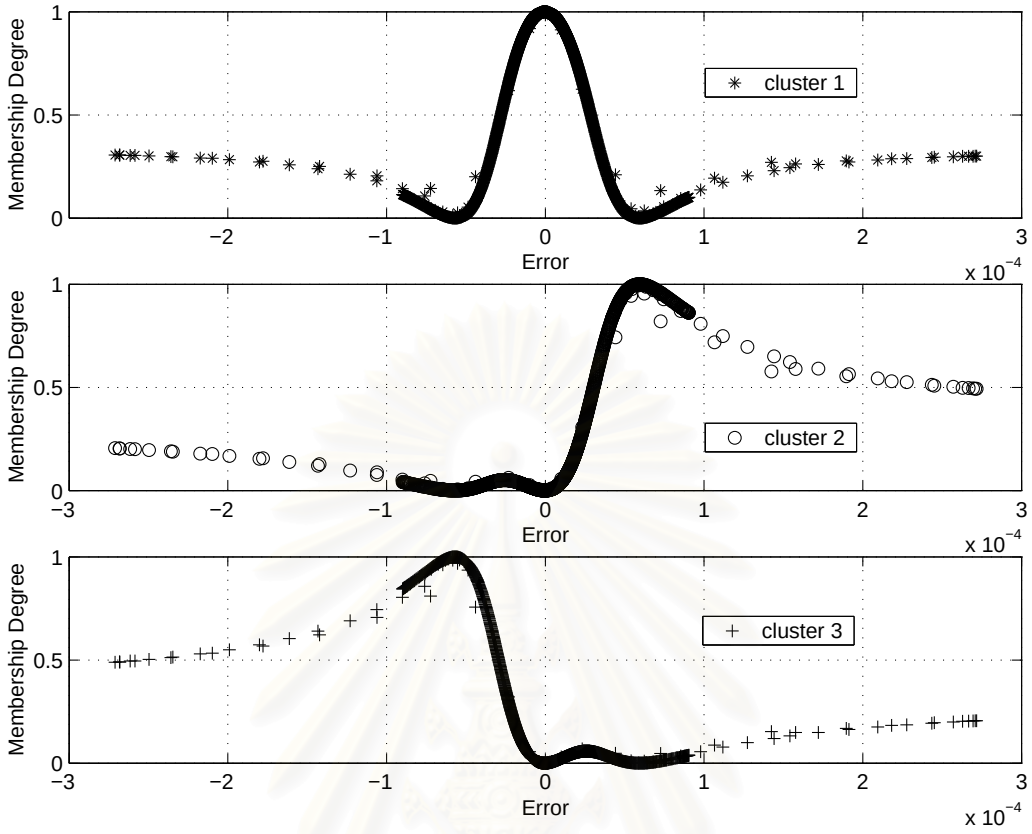
รูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุต หาได้จากการพล็อต fuzzy partition matrix ของแต่ละกลุ่มข้อมูลอินพุตไปยังแกนของ $e(k)$ และ $\Delta e(k)$ ดังรูปที่ 3.16 และ 3.18 ตามลำดับ และพล็อต fuzzy partition matrix ของแต่ละกลุ่มข้อมูลเอาท์พุตไปยังแกนของ K_p' และ K_i' ดังรูปที่ 3.20 และรูปที่ 3.22 ตามลำดับ จากนั้นนำค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลแต่ละกลุ่มมาประมาณเป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยม



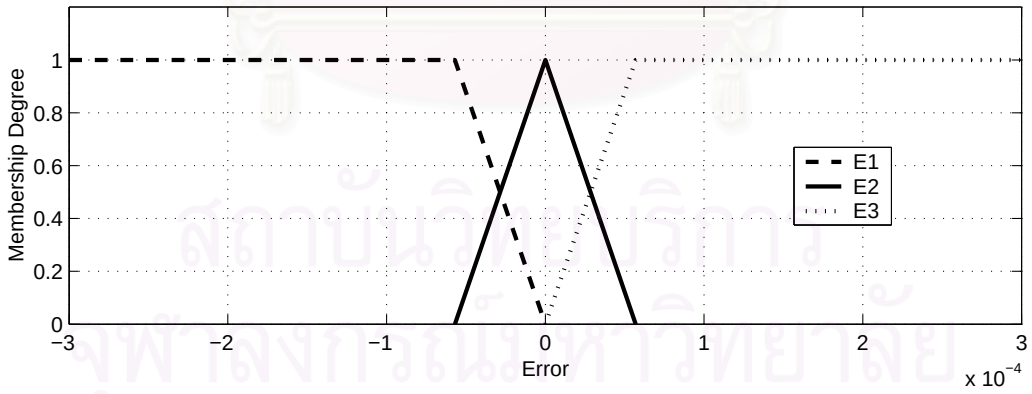
รูปที่ 3.15: การกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตสุดท้ายของการทดลองที่ 2

ดังนั้นสามารถกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุต $e(k)$ และ $\Delta e(k)$ ได้ดังรูปที่ 3.17 และ 3.19 ตามลำดับ และกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลเอาท์พุต K_p' และ K_i' ได้ดังรูปที่ 3.21 และรูปที่ 3.23 ตามลำดับ

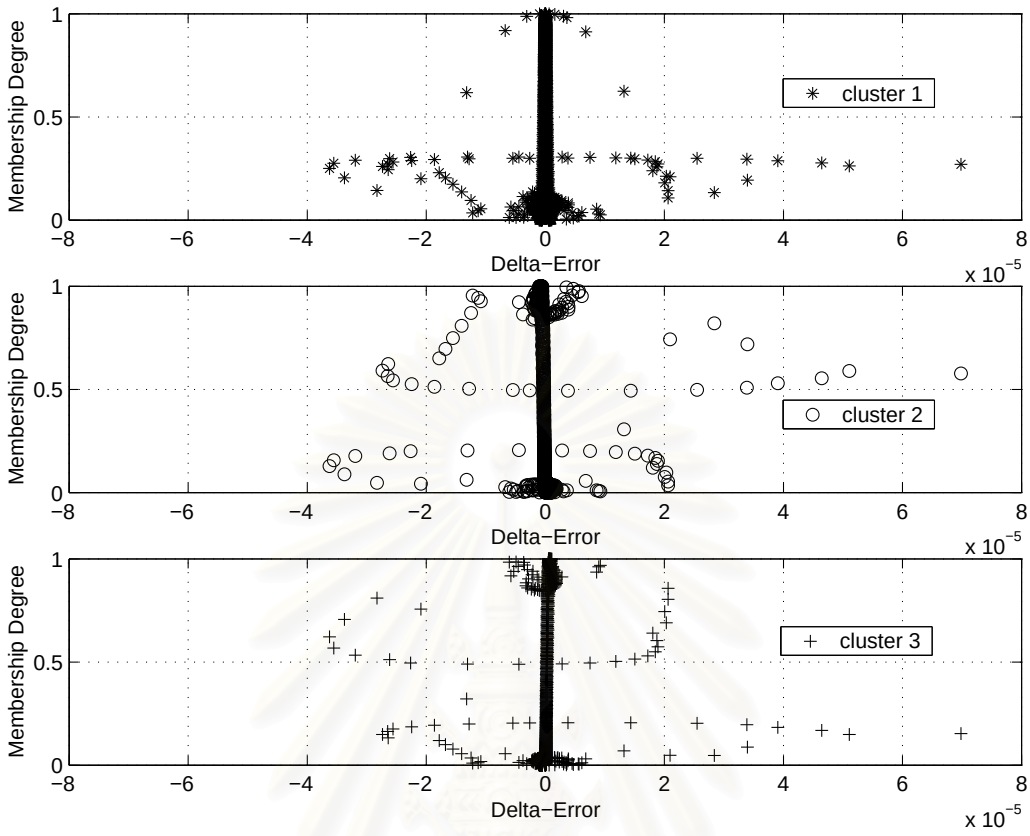
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



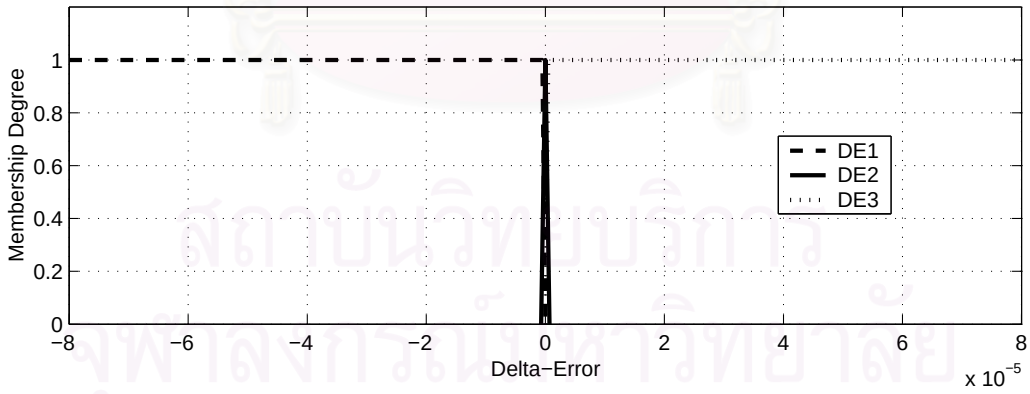
รูปที่ 3.16: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $e(k)$ และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลอินพุตของการทดลองที่ 2



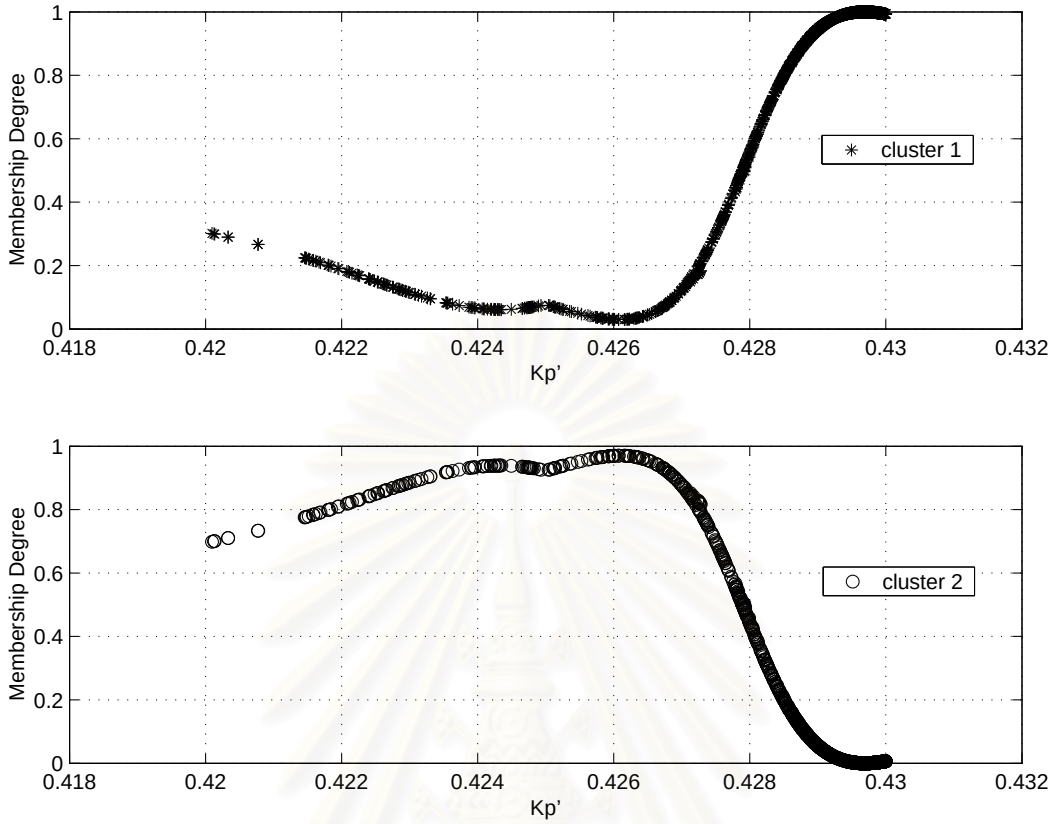
รูปที่ 3.17: ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุต $e(k)$ ของการทดลองที่ 2



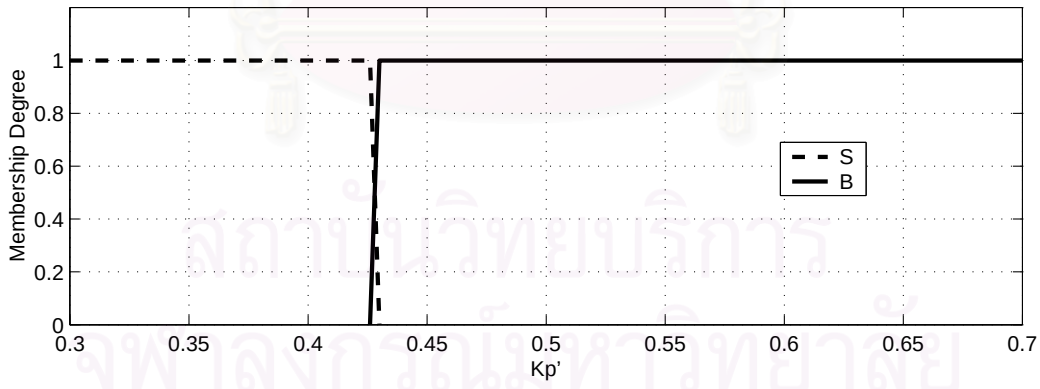
รูปที่ 3.18: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta e(k)$ และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลอินพุตของการทดลองที่ 2



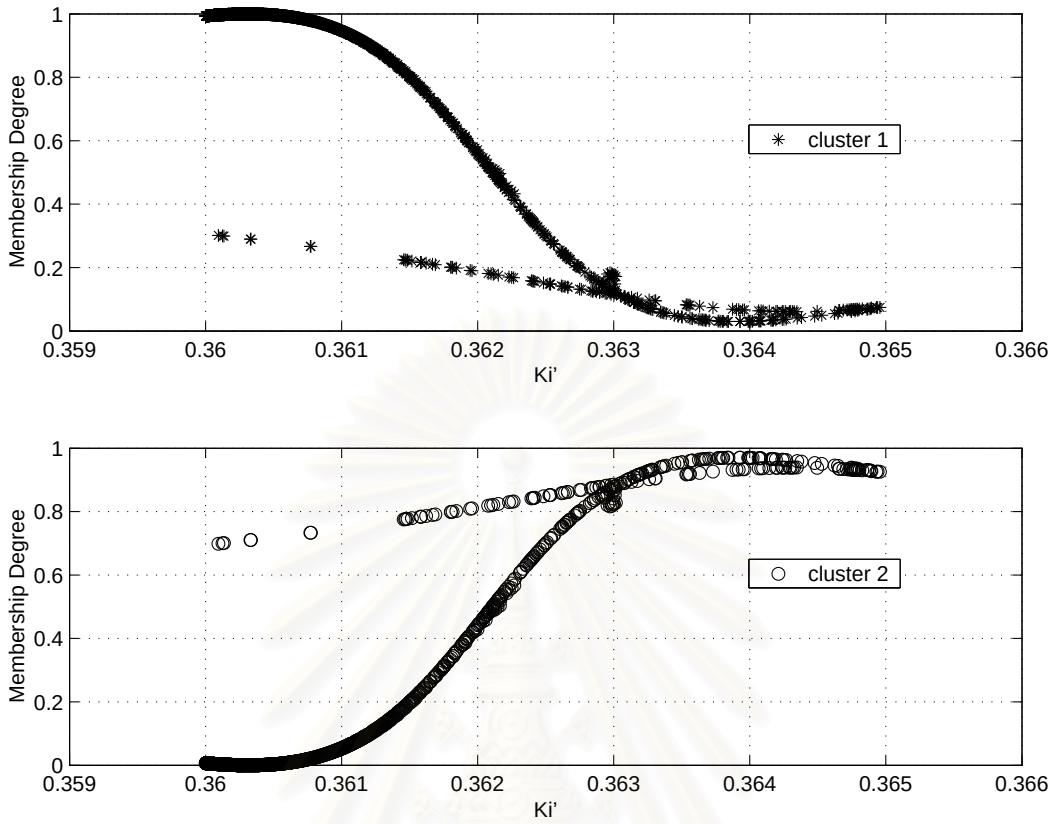
รูปที่ 3.19: ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุต $\Delta e(k)$ ของการทดลองที่ 2



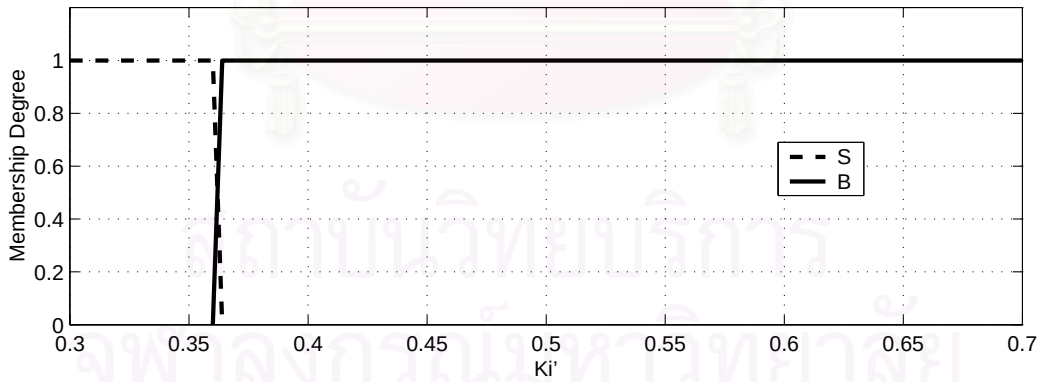
รูปที่ 3.20: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K_p' และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลเอาท์พุตของการทดลองที่ 2



รูปที่ 3.21: ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ K_p' ของการทดลองที่ 2



รูปที่ 3.22: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K_i' และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลเอาท์พุตของการทดลองที่ 2



รูปที่ 3.23: ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ K_i' ของการทดลองที่ 2

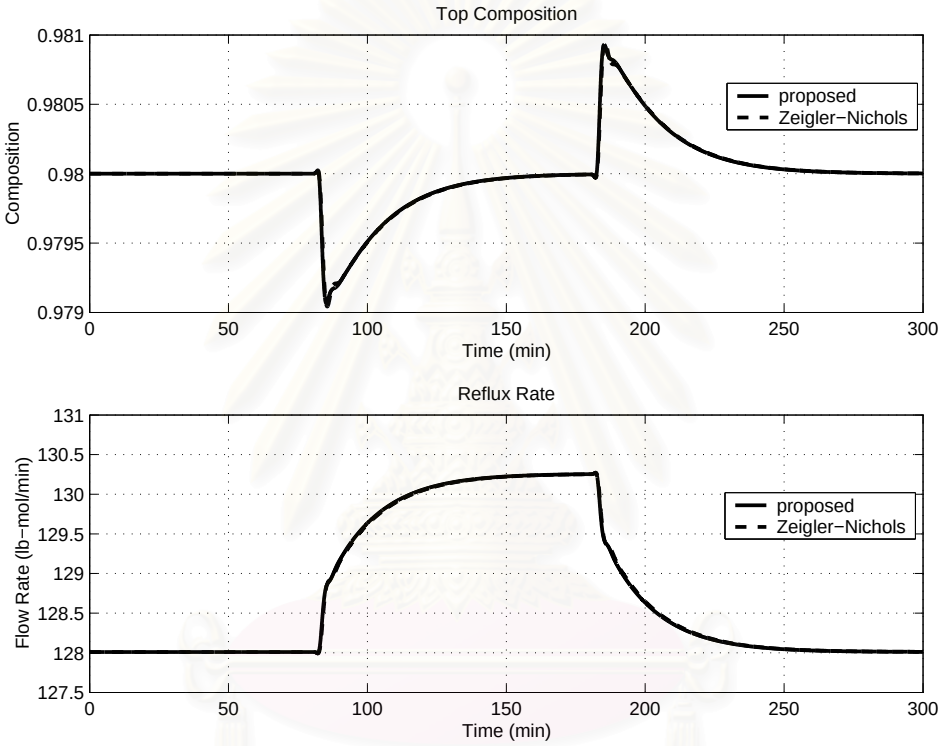
ตารางที่ 3.3: (a) ฐานกฎฟัซซีสำหรับ K_p' ของการทดลองที่2 (b) ฐานกฎฟัซซีสำหรับ K_i' ของการทดลองที่2

		x_2		
		B^1	B^2	B^3
x_1	A^1	B	B	B
	A^2	S	B	S
	A^3	B	B	B

(a)

		x_2		
		B^1	B^2	B^3
x_1	A^1	B	B	B
	A^2	B	B	B
	A^3	B	B	B

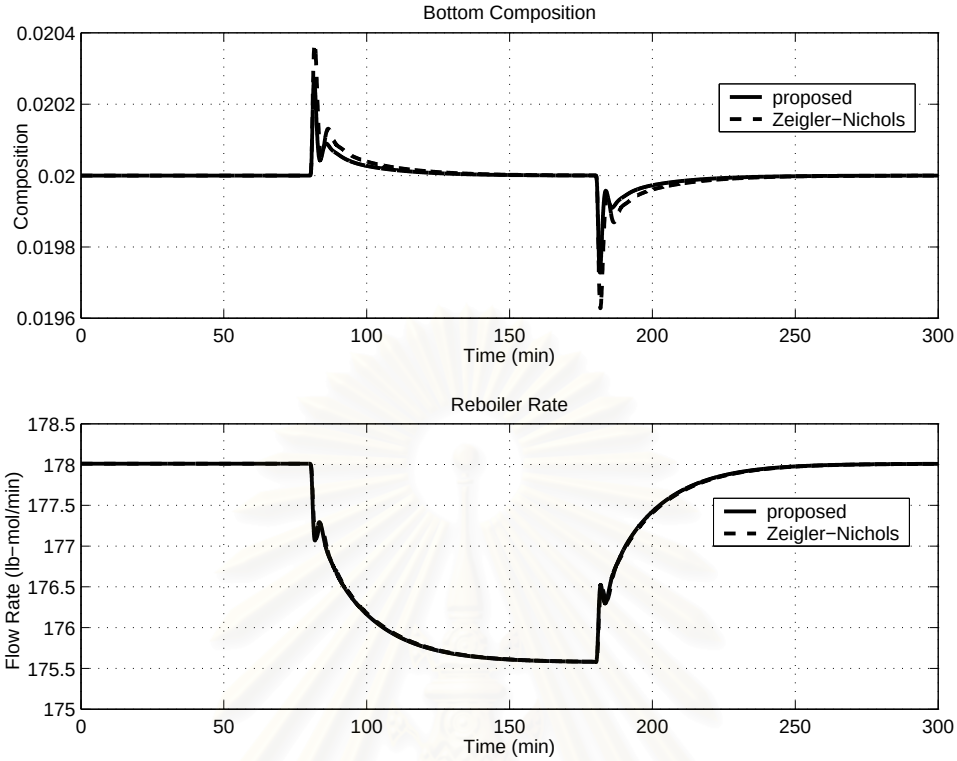
(b)



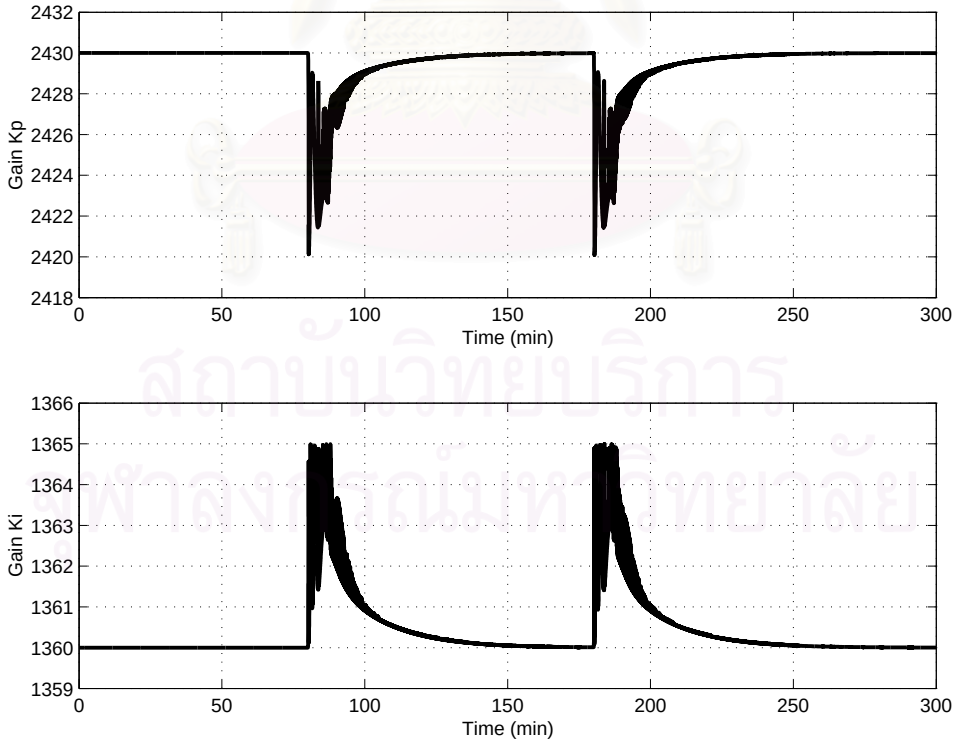
รูปที่ 3.24: ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ยอดหอในการทดลองที่ 2

เมื่อพิจารณาจากผลตอบของกระบวนการหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุต ทำให้สามารถกำหนดฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมวงรอบฐานหอของหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด เมื่อจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสมคือ 3 กลุ่ม ดังนั้นจากความรู้ในการกำหนดฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสมโดยการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI ทำให้ได้ฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสมดังตารางที่ 3.3

พิจารณาผลตอบของกระบวนการและสัญญาณควบคุมดังรูปที่ 3.24 และรูปที่ 3.25 ตลอดจนค่าอัตราขยาย K_p และ K_i ดังรูปที่ 3.26 พบว่า ผลการควบคุมสารผลิตภัณฑ์ที่ยอดหอมีความใกล้เคียงกับการควบคุมโดยการปรับจูนตัวควบคุม PI แบบกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่ของ Ziegler-Nichols ส่วนการควบคุมสารผลิตภัณฑ์ที่ฐานหอนั้น ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีให้ผลการควบคุมที่ดีกว่า ทั้งนี้เพราะมีช่วงเวลาเข้าที่เร็ว และส่วนพุ่งเกินสูงสุดมีค่าต่ำ



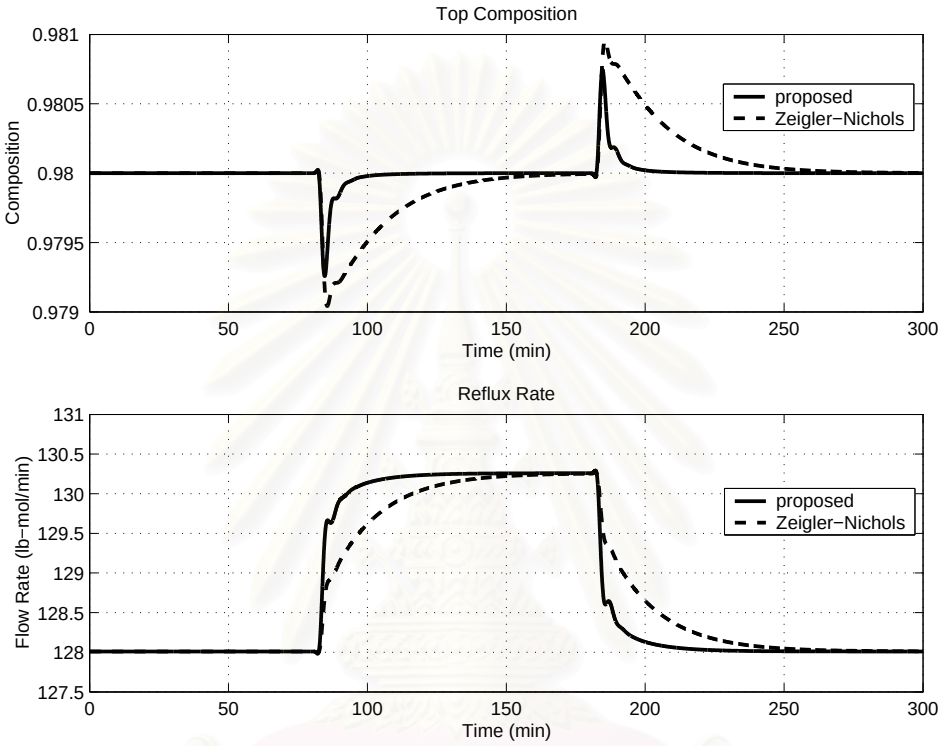
รูปที่ 3.25: ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ฐานหอในการทดลองที่ 2



รูปที่ 3.26: ค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_i ของวงรอบฐานหอในการทดลองที่ 2

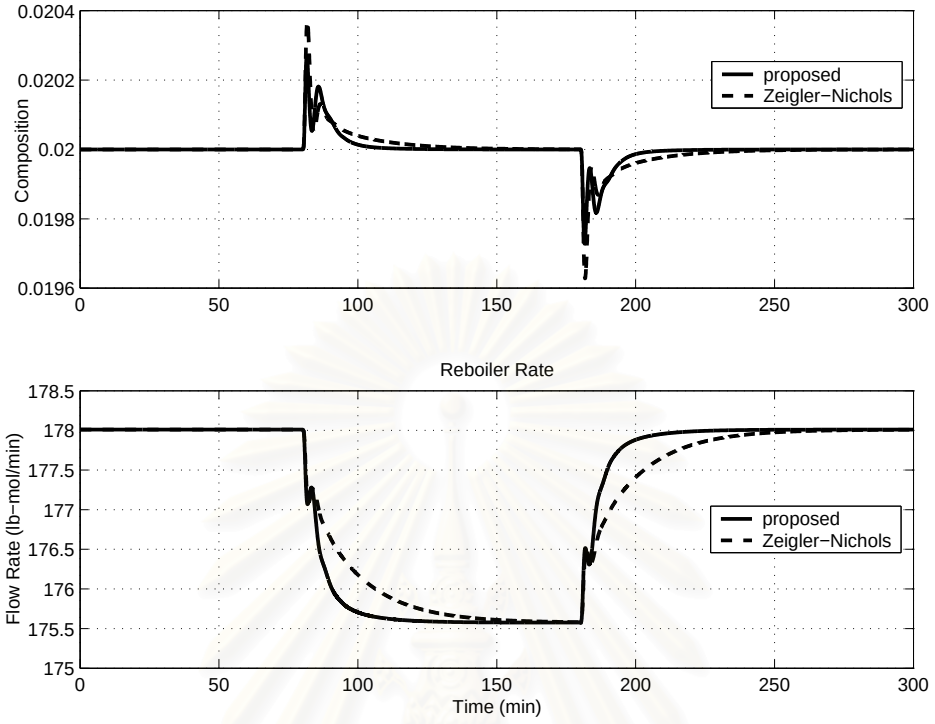
การทดลองที่ 3

ใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี ในการควบคุมวงรอบฐานหอและวงรอบยอดหอ โดยเปรียบเทียบผลการควบคุมกับการควบคุมด้วยตัวควบคุม PI แบบกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่

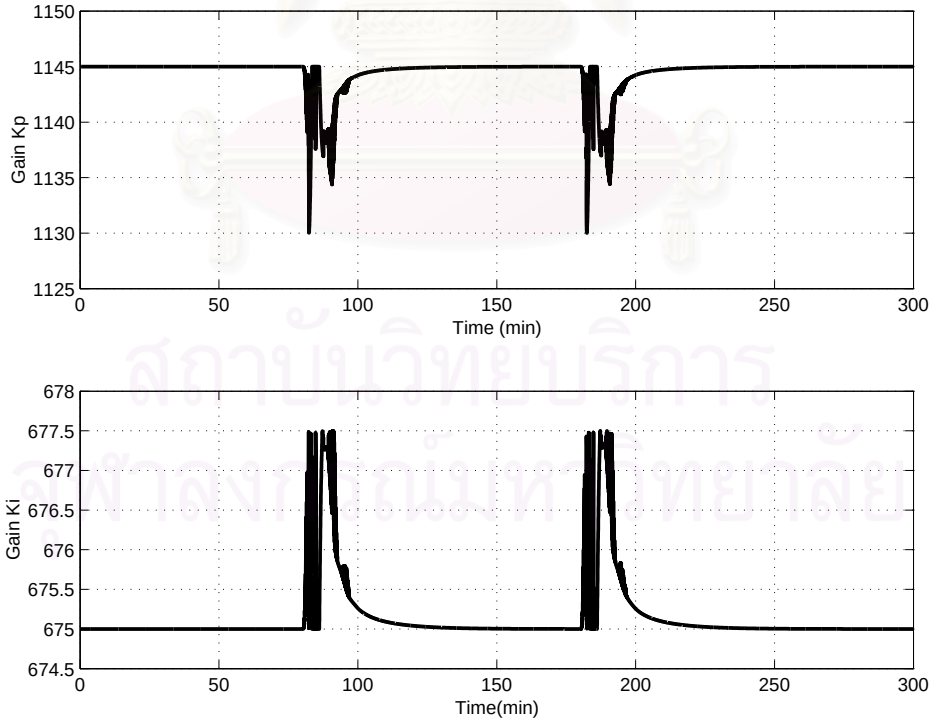


รูปที่ 3.27: ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ยอดหอในการทดลองที่ 3

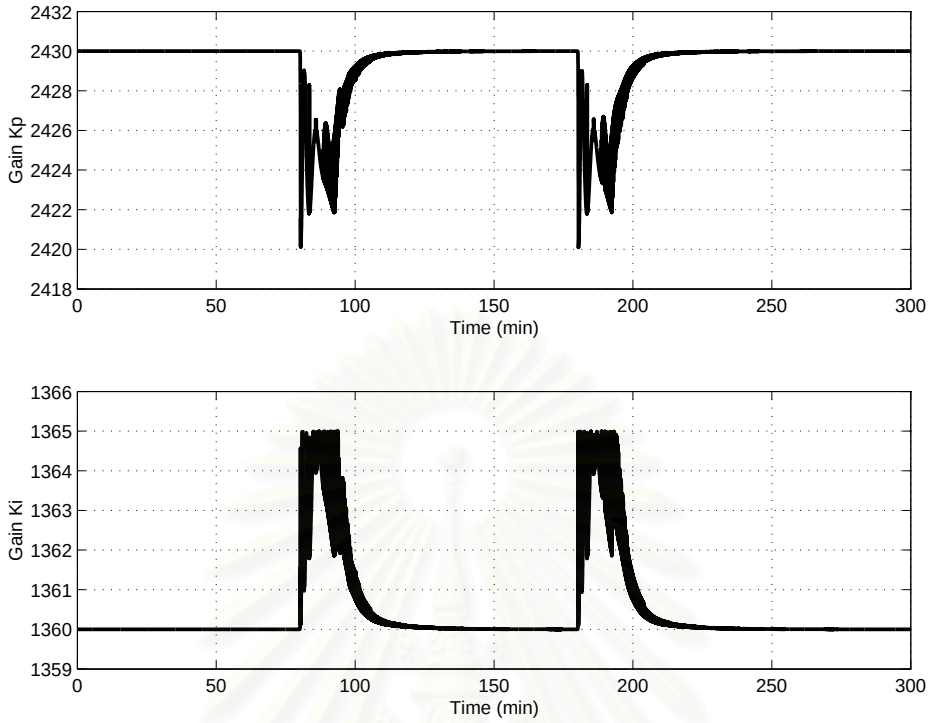
พิจารณาผลตอบของกระบวนการและสัญญาณควบคุมที่วงรอบยอดหอและฐานหอ ดังรูปที่ 3.27 และรูปที่ 3.28 ตามลำดับและค่าอัตราขยาย K_p และ K_i ที่วงรอบยอดหอและฐานหอ ดังรูปที่ 3.29 และรูปที่ 3.30 พบว่าตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีสามารถควบคุมสารผลิตภัณฑ์ที่ยอดหอและฐานหอมีประสิทธิภาพดีกว่าการควบคุมโดยการปรับจูนตัวควบคุม PI แบบกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่



รูปที่ 3.28: ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ฐานหอในการทดลองที่ 3



รูปที่ 3.29: ค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_i ของวงรอบยอดหอในการทดลองที่ 3



รูปที่ 3.30: ค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_i ของวงรอบฐานหอในการทดลองที่ 3

จากผลการจำลองระบบการควบคุมหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิดของทั้ง 3 การทดลองแสดงให้เห็นว่า การออกแบบโครงสร้างของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีแบบกำกับดูแลตัวควบคุม PI โดยการใช้การรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ร่วมกับการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI เมื่อทดสอบการจำลองระบบการควบคุมกระบวนการหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิดด้วยคอมพิวเตอร์ โดยมีเป้าหมายหลักในการควบคุมกระบวนการหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิดคือ การควบคุมความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ที่ยอดหอและฐานหอ ให้เป็นไปตามค่าที่กำหนด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนสารเข้าที่กลางหอ จากผลการจำลองพบว่าการใช้ระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีแบบกำกับดูแลตัวควบคุม PI มาควบคุมทั้งในวงรอบยอดหอและฐานหอพร้อมกันในการทดลองที่ 3 ให้ผลการควบคุมที่มีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้ระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีแบบกำกับดูแลตัวควบคุม PI มาควบคุมเพียงวงรอบเดียวดังเช่นในการทดลองที่ 1 และการทดลองที่ 2

3.2 การควบคุมหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิดของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม

3.2.1 โครงสร้างหอกลั่นแบบแยกสารผสมสองชนิด

หอกลั่นแบบแยกสาร 2 ชนิดของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมเป็นของบริษัท Armfield รุ่น UOP3CC ดังรูปที่ 3.31 พิจารณาจากแผนภาพอย่างง่ายดังรูปที่ 3.32 จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ต่างๆบนหอกลั่นถูกติดตั้งบนโครงเหล็ก (หมายเลข 1) ซึ่งมีขาตั้งที่ปรับระดับได้ (หมายเลข 2) ประกอบด้วยตัวหอกลั่นที่ทำจากแก้ว มีทั้งหมด 2 ส่วนคือ ส่วนบน (หมายเลข 4) ส่วนล่าง (หมายเลข 3) แต่ละส่วนมี 4 ชั้น แต่ละชั้นเป็นแบบแผ่นตะแกรง (Sieve Plate) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ตัวหอทั้ง 2 หุ้มฉนวนโดยรอบเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน ระหว่างตัวหอส่วนบนและส่วนล่างเป็นส่วนการป้อนเข้าสารที่กลางหอซึ่งทั้งหมดต่อเชื่อมกันในแนวตั้งเพื่อให้ไอและของเหลวไหลสวนทางกันได้

นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์อื่นๆอีกได้แก่ หม้อต้มซ้ำ (หมายเลข 13) ภาชนะที่ใช้บรรจุสารที่ใช้ป้อนเข้าหอขนาด 5 ลิตรจำนวน 2 ใบ (หมายเลข 5 และ 6) มอเตอร์สูบสารเข้าหอแบบ Peristaltic (หมายเลข 7) เครื่องควบแน่น (หมายเลข 8) ภาชนะบรรจุสารผลิตภัณฑ์ที่ฐานหอ (หมายเลข 9) และภาชนะบรรจุผลิตภัณฑ์ที่ยอดหอ (หมายเลข 10) อุปกรณ์ รินน้ำออก (Decanter) (หมายเลข 11) วาล์วป้อนสารกลับยอดหอ (หมายเลข 12) ภาชนะบรรจุสารช่วยในกรณีกลั่นแบบ จุดเดือดคงที่ (Azeotropic Dosing Vessel) (หมายเลข 24) เครื่องสูบสูญญากาศ (หมายเลข 20)

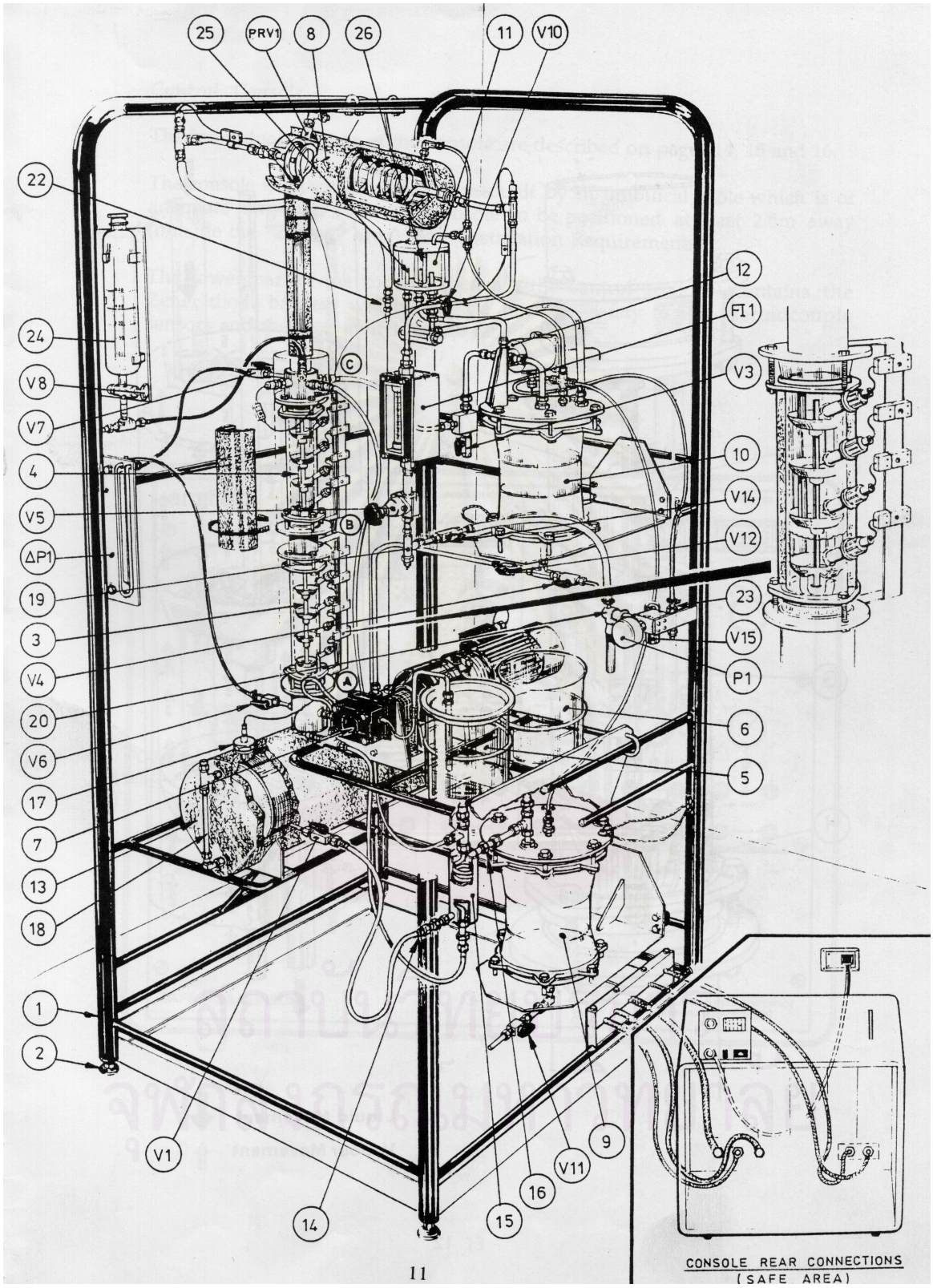
ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นอุปกรณ์หลักๆที่ประกอบอยู่ในหอกลั่นแบบแยกสาร 2 ชนิด แต่องค์ประกอบที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคืออุปกรณ์วัดแบบต่างๆที่ใช้ในหอกลั่นแบบแยกสาร 2 ชนิด ซึ่งประกอบด้วย

1. อุปกรณ์วัดอุณหภูมิและความดัน

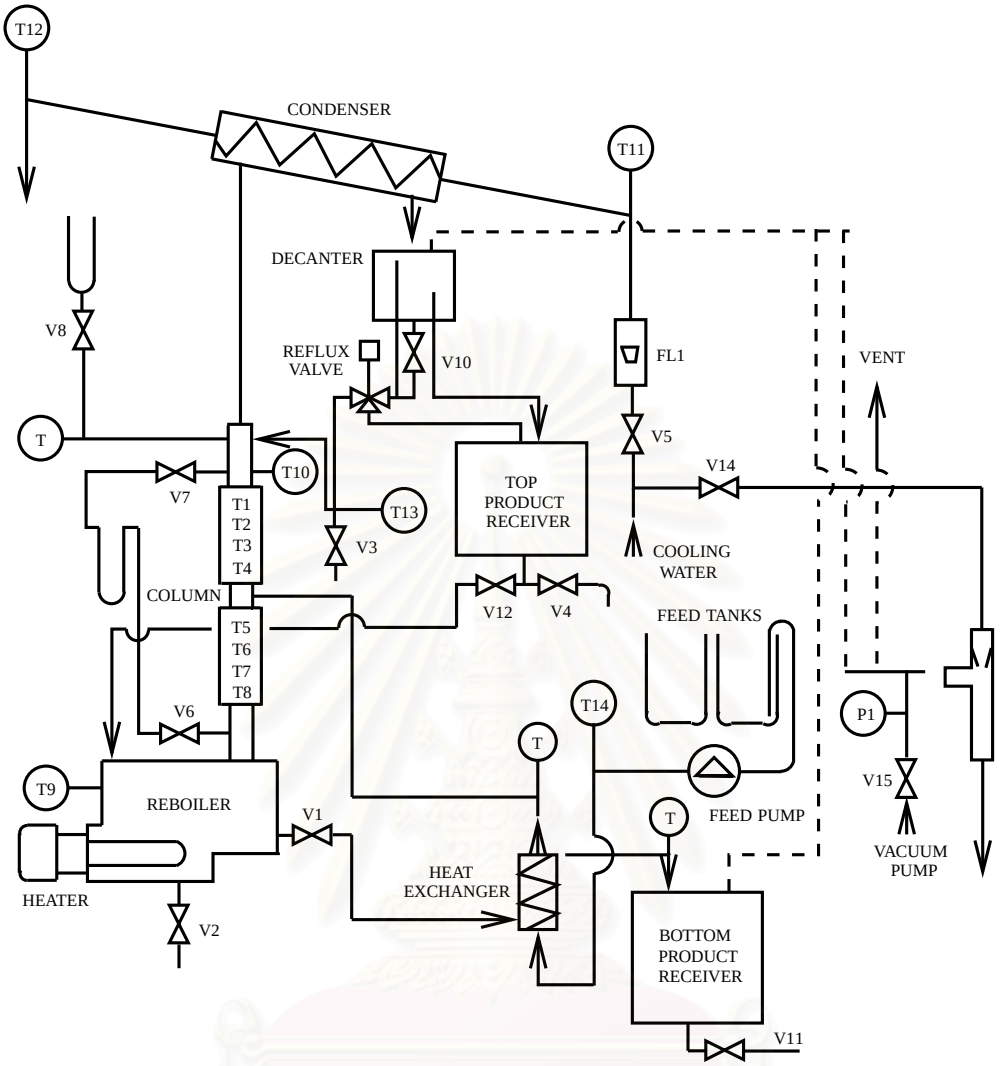
   การวัดอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆภายในระบบทำได้โดยใช้คู่ควบความร้อน (Thermocouple) ซึ่งติดตั้งไว้ 14 ตำแหน่ง (T1-T14) ได้แก่ T1-T8 ติดตั้งอยู่ภายในตัวของหอกลั่นเพื่อวัดอุณหภูมิของของเหลวในแต่ละชั้น นับตั้งแต่ชั้นบนสุด (T1) จนถึงชั้นล่างสุด (T8) ส่วน T9-T14 อยู่ภายในหม้อต้มซ้ำทางเข้าและทางออกของเครื่องควบแน่น ตำแหน่งป้อนสารกลับยอดหอ และตำแหน่งป้อนสารเข้าหอ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีอีก 3 ตำแหน่งที่สามารถวัดอุณหภูมิได้แต่ไม่มี Thermocouple ติดตั้งอยู่ ถ้าต้องการวัดอุณหภูมิก็สามารถทำได้โดยการถอด Thermocouple ที่ตำแหน่งอื่นมาใส่แทน ในส่วนของการวัดความดันตกคร่อมหอกลั่น (Pressure Drop) สามารถวัดได้ จากมาตรวัดความดันของของไหลรูปตัว U (Manometer) ($\Delta P1$) โดยการเปิดวาล์ว V6 และ V7 ตามลำดับ

2. อุปกรณ์วัดระดับและอัตราการไหล

   ส่วนของน้ำหล่อเย็นที่ใช้ในเครื่องควบแน่นจะมีแทงก์น้ำ ซึ่งมีอุปกรณ์วัดระดับแบบลูกลอย (Float type) ภายในหม้อต้มซ้ำจะมีอุปกรณ์วัดระดับของเหลว (หมายเลข 17) ซึ่งเป็นแบบหลอดแก้วมองระดับที่ติดอยู่กับหม้อต้มซ้ำ เครื่องควบแน่นจะมีน้ำหล่อเย็นที่ไหลในท่อซึ่งขดเป็นเกลียว น้ำหล่อเย็นนี้ไหลเข้าเครื่องควบแน่นผ่านมาตรวัดอัตราการไหลแบบลูกลอย (Rotameter) (Fl1) สามารถควบคุมโดยใช้วาล์ว V5



รูปที่ 3.31: หอกลั่นแยกสารผสมสองชนิดในห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมของบริษัท Armfield รุ่น UOP3CC



รูปที่ 3.32: แผนภาพอย่างง่ายของหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิดในห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมของบริษัท Armfield รุ่น UOP3CC

3. อุปกรณ์วัดความเข้มข้น

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารจำเป็นต้องใช้เครื่องมือพิเศษ และต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์ทำให้ไม่สะดวกในการควบคุม และเนื่องจากสารที่ใช้กลั่นเป็นสารผสมของเอทานอลและน้ำ ดังนั้นจึงใช้อุปกรณ์วัดความเข้มข้นแบบไฮโดรมิเตอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีความสะดวกในการใช้งานเพราะสามารถอ่านค่าความเข้มข้นเป็น % โดยปริมาตรได้ทันที ถึงแม้ว่าอาจมีค่าผิดพลาดแต่ก็อยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้

3.2.2 ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี

ในการศึกษาใช้โครงสร้างการควบคุมแบบสองวงรอบ คือวงรอบการควบคุมยอดหอและวงรอบการควบคุมฐานหอ โดยวัตถุประสงค์ของการควบคุมหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิดคือ การควบคุมความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ที่ยอดหอและสารผลิตภัณฑ์ที่ฐานหอ ให้เป็นไปตามค่าที่กำหนดไว้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนสารเข้าที่กลางหอ ดังนั้นจึงออกแบบการทดลองให้ใช้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นในหม้อต้มซ้ำประมาณ 25 % โดยปริมาตร มีการรบกวนระบบโดยการเพิ่มอัตราการไหลของสารป้อนเข้ากลางหอที่เวลา 60 นาทีเป็น 50 โมล/นาที และที่เวลา 80 นาที ลดลงสู่ค่าปกติคือ 30 โมล/นาที

- กำหนดจุดทำงานของหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด
  - ความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ที่ยอดหอเท่ากับ 91 % โดยปริมาตร และอุณหภูมิที่ยอดหอเท่ากับ 82.0 องศาเซลเซียส
  - ความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ที่กลางหอเท่ากับ 40 % โดยปริมาตร อุณหภูมิที่กลางหอเท่ากับ 55.0 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลเข้ากลางหอเท่ากับ 30 มิลลิลิตรต่อนาที
  - ความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ที่ฐานหอเท่ากับ 20 % โดยปริมาตร และอุณหภูมิที่ฐานหอเท่ากับ 85.3 องศาเซลเซียส
- ค่าพารามิเตอร์ของการรวมกลุ่มข้อมูล และตารางค่าอัตราขยายฟัซซี
  - กำหนดให้จำนวนเซตฟัซซีของข้อมูลที่เข้าสู่ระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีไม่เกิน 7 เซต และจำนวนเซตฟัซซีของข้อมูลที่ออกจากระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีคงที่ 2 เซต
  - เลือกใช้การรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means และกำหนดให้ $m' = 2.00$ และ $\epsilon = 0.001$
  - เลือกใช้การระบุหาจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสม โดยใช้ compactness and separation validity function
  - เลือกใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI
- ค่าพารามิเตอร์ของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีในวงรอบยอดหอ
  - $e(k) \in [-1.5, 1.5]$ และ $\Delta e(k) \in [-0.8, 1.2]$
  - $K_p \in [5, 0.01]$ และ $K_i \in [3, 0]$
  - กำหนดอัตราการสุ่มเลือกข้อมูลทุก 10 วินาที
  - เลือกใช้การแปลงฟัซซีแบบสามเหลี่ยม
  - เลือกใช้กลไกการตัดสินใจฟัซซีแบบ minimum
  - เลือกใช้การแปลงกลับฟัซซีแบบจุดศูนย์ถ่วง

- ค่าพารามิเตอร์ของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีในวงรอบฐานหอ
  - $e(k) \in [-0.6, 0.8]$ และ $\Delta e(k) \in [-0.8, 0.6]$
  - $K_p \in [1, 0.01]$ และ $K_i \in [0.7, 0]$
  - กำหนดอัตราการสุ่มเลือกข้อมูลทุก 10 วินาที
  - เลือกใช้การแปลงฟัซซีแบบสามเหลี่ยม
  - เลือกใช้กลไกการตัดสินใจฟัซซีแบบ minimum
  - เลือกใช้การแปลงกลับฟัซซีแบบจุดศูนย์ถ่วง

โดยออกแบบการทดลองเป็น 4 การทดลองเพื่อศึกษาการควบคุมหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด ดังตารางที่ 3.4

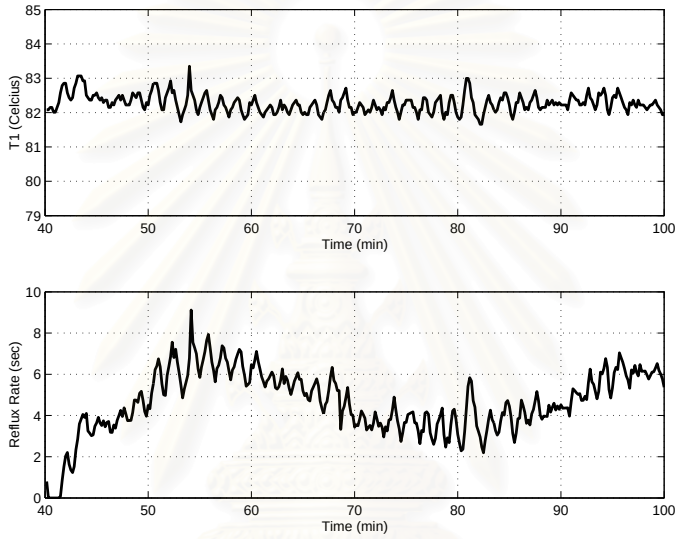
ตารางที่ 3.4: ตารางแสดงรายละเอียดการทดลองหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด UOP3CC

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

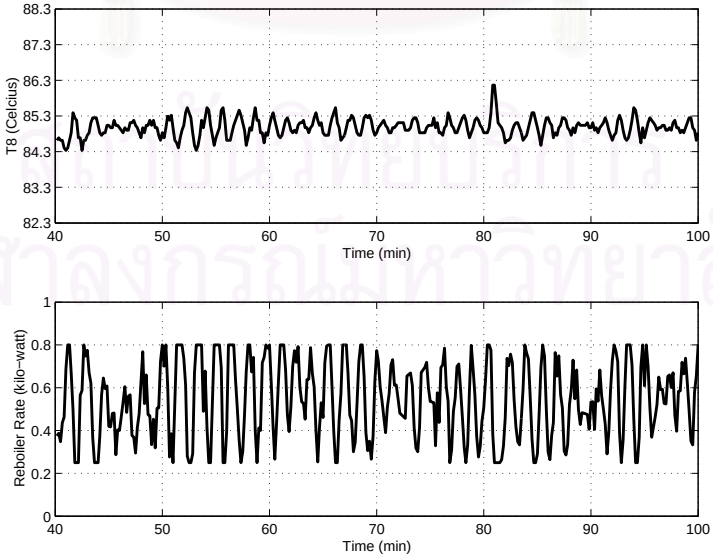
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองที่ 1 (UOP3CC)

ใช้ตัวควบคุม PI แบบกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่แบบวิธี Ziegler-Nichols ในการควบคุมวงรอบยอดหอและวงรอบฐานหอ โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI ที่วงรอบยอดหอมีค่า $K_p = 2.667$ และ $K_i = 2.690$ และ กำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI ที่วงรอบฐานหอมีค่า $K_p = 0.718$ และ $K_i = 0.240$ เมื่อพิจารณาจากผลตอบของกระบวนการและสัญญาณควบคุมในวงรอบยอดหอและฐานหอดังรูปที่ 3.33 และรูปที่ 3.34 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารเข้าที่กลางหอ ตัวควบคุม PI สามารถควบคุมอุณหภูมิที่วงรอบยอดหอและฐานหอได้ แต่มีการแกว่งของสัญญาณค่อนข้างสูง



รูปที่ 3.33: อุณหภูมิที่ยอดหอและเวลาการป้อนสารกลับที่ยอดหอของการทดลองที่ 1 (UOP3CC)



รูปที่ 3.34: อุณหภูมิที่ฐานหอและพลังงานที่หม้อต้มซ้ำที่ฐานหอของการทดลองที่ 1 (UOP3CC)

การทดลองที่ 2 (UOP3CC)

ใช้ตัวควบคุม PI แบบกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่แบบวิธี Ziegler-Nichols ในการควบคุมวงรอบฐานหอและใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีในการควบคุมวงรอบยอดหอ จากลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตเริ่มต้นแสดงดังรูปที่ 3.35 ดังนั้นสามารถระบุหาจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสมของข้อมูลอินพุตเริ่มต้นได้ โดยคำนวณค่าเกณฑ์ S

สำหรับการทดลองนี้ เมื่อทำการคำนวณค่าเกณฑ์ S แล้วพบว่าจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสมไม่เป็นไปตามทฤษฎี กล่าวคือจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสมที่คำนวณได้ ไม่สอดคล้องกับการป้อนสัญญาณรบกวนที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นที่สมมาตร ซึ่งจำนวนกลุ่มข้อมูลที่คำนวณได้ควรเป็น 3, 5 หรือ 7 แต่เมื่อนำข้อมูลไปคำนวณจริงผลปรากฏว่า จำนวนกลุ่มข้อมูลที่คำนวณได้กลับเป็น 2, 4 หรือ 6 แต่จากการสังเกตพบว่าค่าเกณฑ์ S ของจำนวนกลุ่มข้อมูลตั้งแต่ 2-7 นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นหากจำนวนของข้อมูลทั้งหมดมีจำนวนน้อยแล้ว การเกิดความผิดพลาดในการทำงานของกระบวนการ ซึ่งทำให้ข้อมูลบางส่วนมีการกระจายตัวแตกต่างจากข้อมูลส่วนใหญ่ ทำให้การระบุหาจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสมอาจเกิดการผิดพลาดได้

เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว จึงระบุจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสม โดยกำหนดให้สอดคล้องกับผลของการระบุจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสมจากการจำลองระบบด้วยคอมพิวเตอร์ของการทดลองในหัวข้อ 3.1 ทั้งนี้เพราะมีรูปแบบการกระจายตัวของข้อมูลอินพุตที่คล้ายกัน

ดังนั้นจากลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตสุดท้ายดังรูปที่ 3.36 จึงระบุจำนวนกลุ่มของข้อมูลอินพุตให้เท่ากับ 3 กลุ่ม และจำนวนกลุ่มของข้อมูลเอาท์พุตกำหนดให้เท่ากับ 2 กลุ่ม และใช้การรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ในการกำหนดรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่เหมาะสมกับการกระจายตัวของข้อมูลอินพุตเริ่มต้นระหว่าง $e(k)$ และ $\Delta e(k)$ และข้อมูลเอาท์พุตเริ่มต้นระหว่าง K_p' และ K_i'

รูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุต หาได้จากการพล็อต fuzzy partition matrix ของแต่ละกลุ่มข้อมูลอินพุตไปยังแกนของ $e(k)$ และ $\Delta e(k)$ ดังรูปที่ 3.37 และ 3.39 ตามลำดับ และพล็อต fuzzy partition matrix ของแต่ละกลุ่มข้อมูลเอาท์พุตไปยังแกนของ K_p' และ K_i' ดังรูปที่ 3.41 และรูปที่ 3.43 ตามลำดับ จากนั้นนำค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลในแต่ละกลุ่มมาประมาณเป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยม

ดังนั้นสามารถกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุต $e(k)$ และ $\Delta e(k)$ ได้ดังรูปที่ 3.38 และ 3.40 ตามลำดับ และกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลเอาท์พุต K_p' และ K_i' ได้ดังรูปที่ 3.42 และรูปที่ 3.44 ตามลำดับ

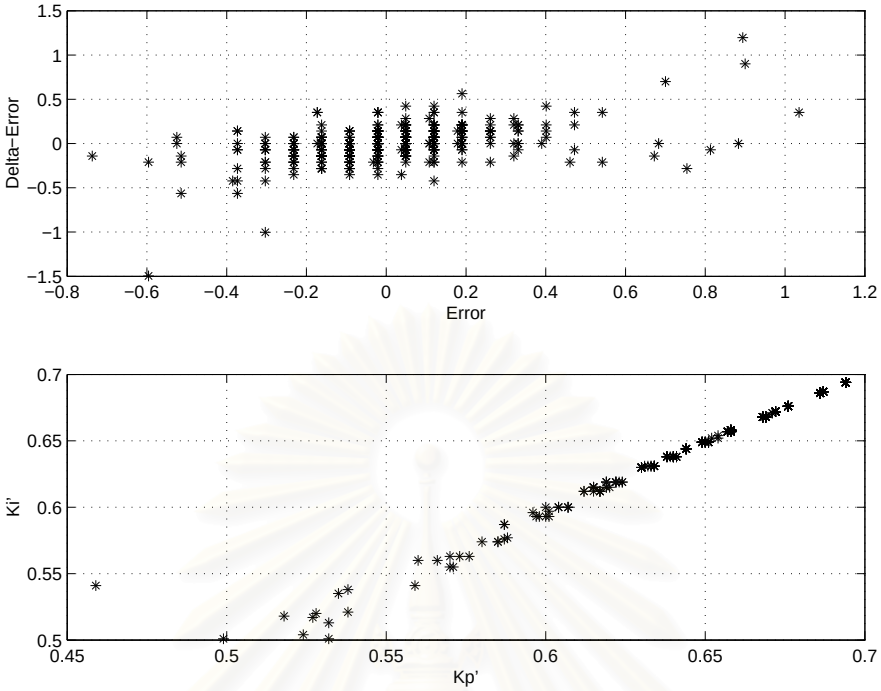
เมื่อพิจารณาจากผลตอบของกระบวนการ อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุต ทำให้สามารถกำหนดฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมวงรอบยอดหอของหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด เมื่อจำนวนกลุ่มข้อมูลคือ 3 กลุ่ม ดังนั้นจากความรู้ในการกำหนดที่เหมาะสมโดยใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI ทำให้ได้ฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสมดังตาราง

ที่ 3.5

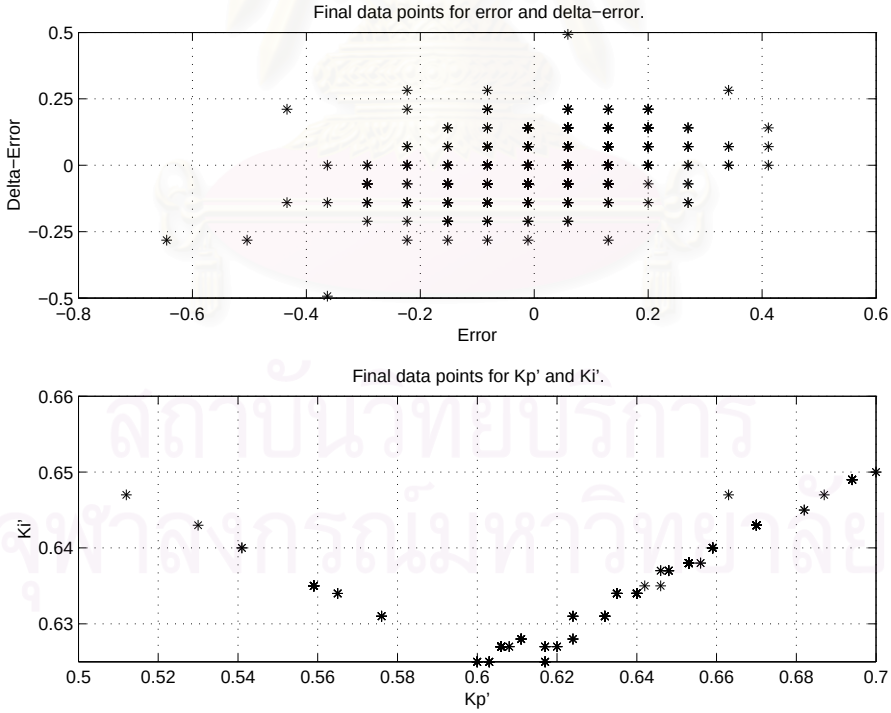
พิจารณาผลตอบของกระบวนการและสัญญาณควบคุมดังรูปที่ 3.45 และรูปที่ 3.46 ตลอดจนค่าอัตราขยาย K_p และ K_i ดังรูปที่ 3.47 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารเข้าที่กลางหอ อุณหภูมิที่ยอดหอและฐานหอจะลดลงเล็กน้อย ในขณะลดอัตราการป้อนสารเข้าที่กลางหอ อุณหภูมิที่ยอดหอและฐานหอจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเช่นกัน ซึ่งให้ผลตรงตามทฤษฎี และตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีสามารถควบคุมอุณหภูมิที่ยอดหอได้ดี และตัวควบคุม PI แบบกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่แบบวิธี Ziegler-Nichols ก็สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ฐานหอได้ดีเช่นเดียวกัน ดังนั้นสารผลิตภัณฑ์ที่ยอดหอและฐานหอจึงเป็นไปตามที่กำหนด

เป็นที่น่าสังเกตว่าในการทดลองนี้ เมื่อมีการเพิ่มอัตราการป้อนสารเข้าที่กลางหอ เวลาในการป้อนสารกลับที่ยอดหอมีค่าลดลง แต่พลังงานที่หม้อต้มซ้ำมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อมีการลดอัตราการป้อนสารเข้าที่กลางหอ ก็จะเกิดผลในทางกลับกัน ดังนั้นจึงเป็นการแสดงให้เห็นการชดเชยสัญญาณควบคุมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนสารเข้าที่กลางหอ

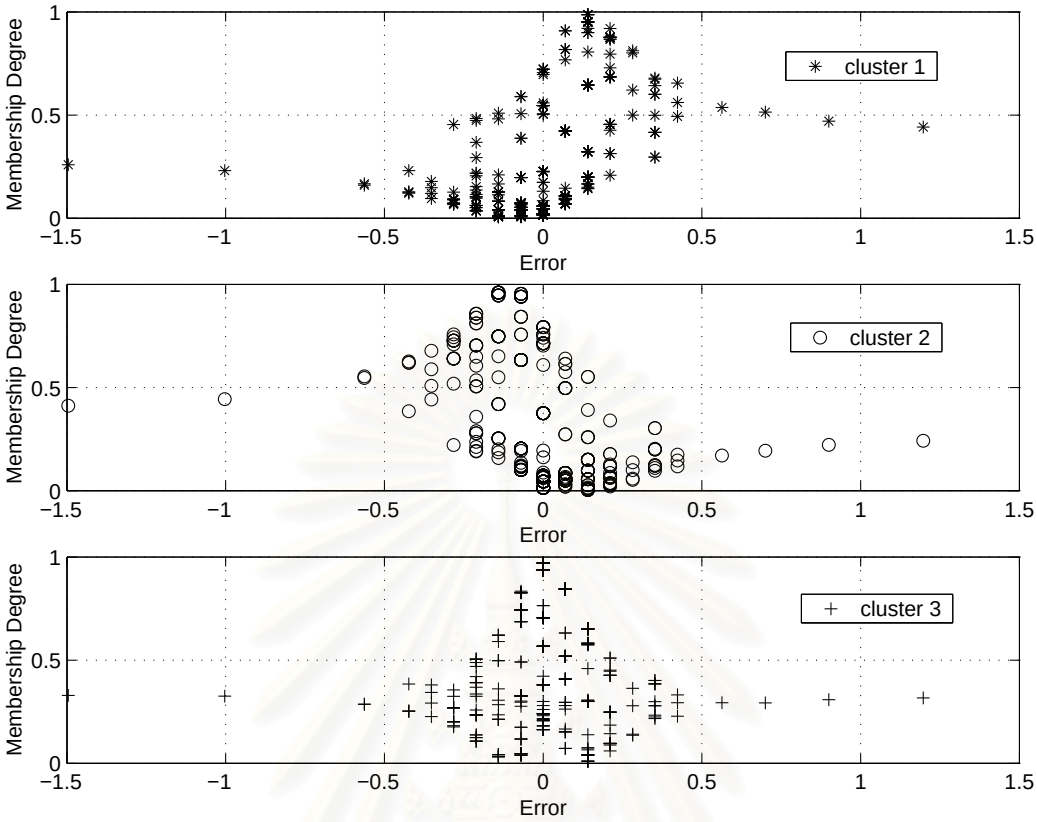
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



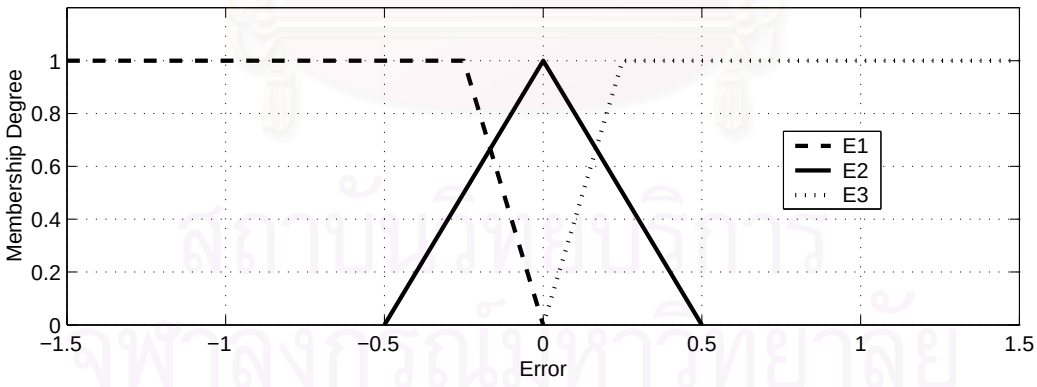
รูปที่ 3.35: การกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตเริ่มต้นของการทดลองที่ 2 (UOP3CC)



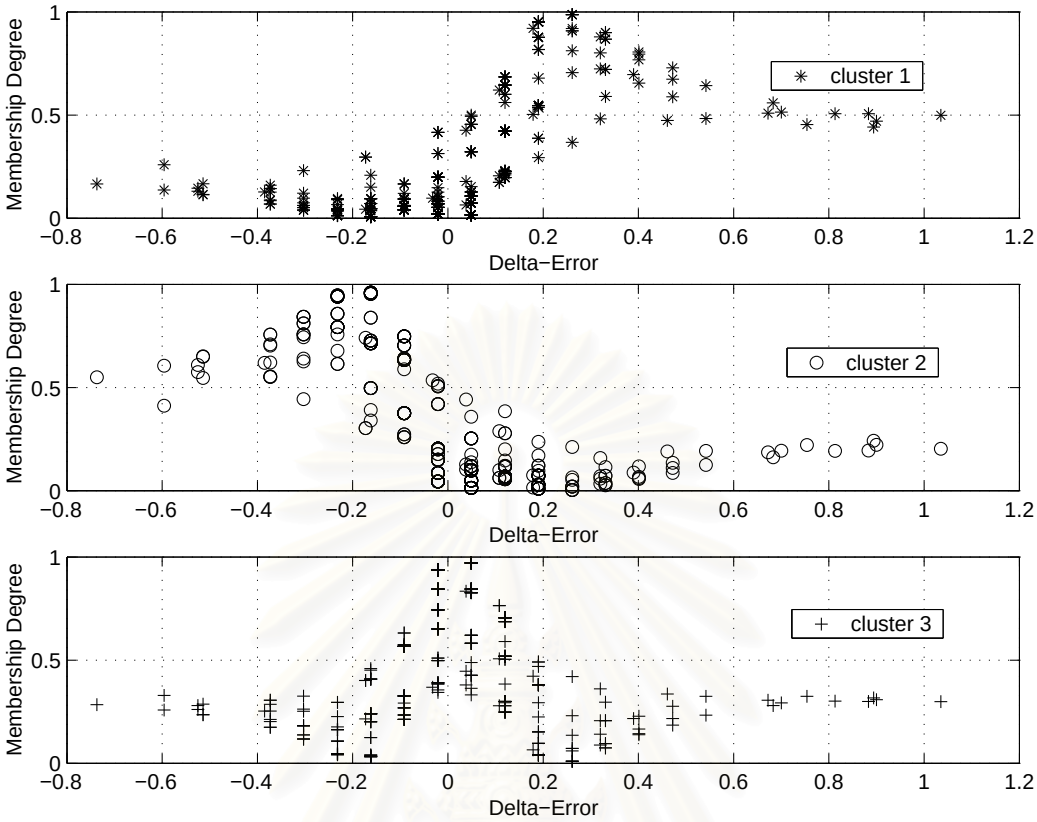
รูปที่ 3.36: การกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตสุดท้ายของการทดลองที่ 2 (UOP3CC)



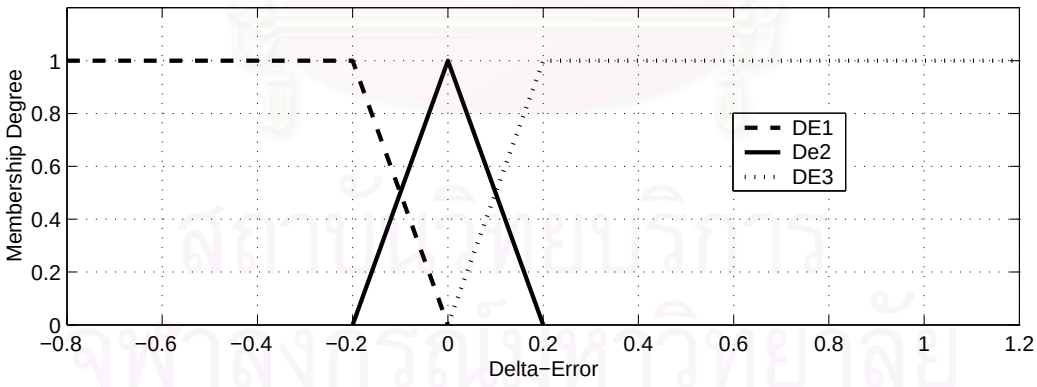
รูปที่ 3.37: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $e(k)$ และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลอินพุตของการทดลองที่ 2 (UOP3CC)



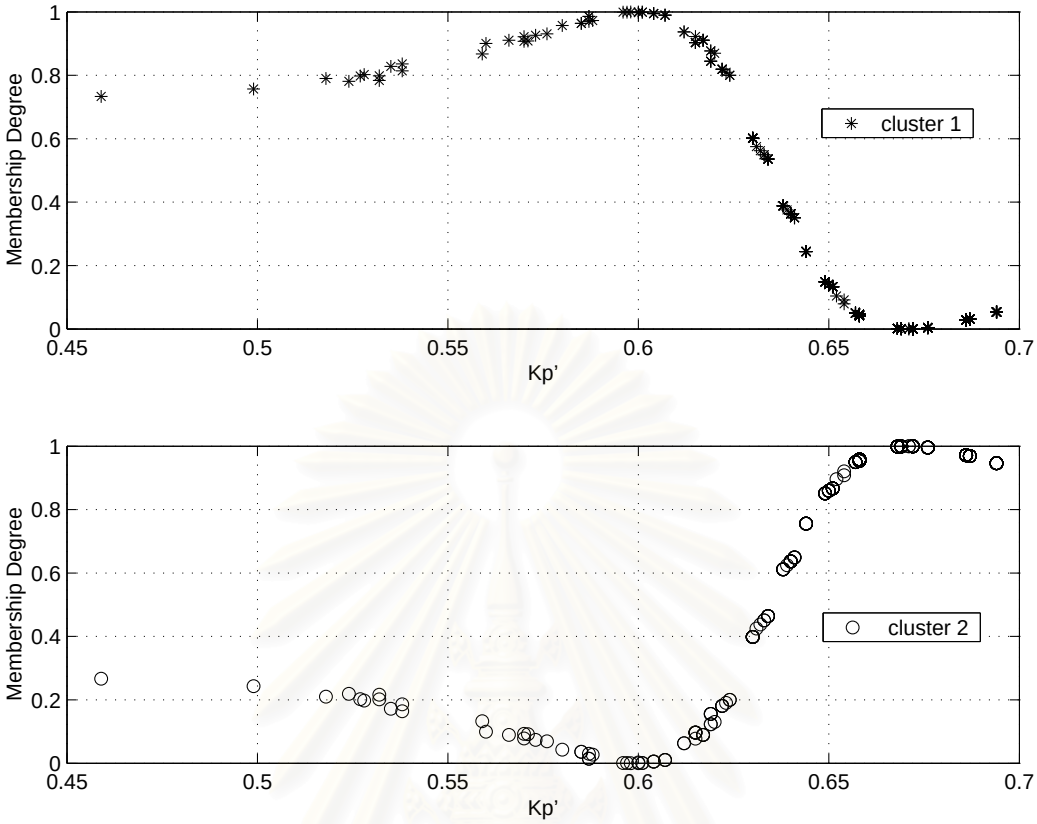
รูปที่ 3.38: ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุต $e(k)$ ของการทดลองที่ 2 (UOP3CC)



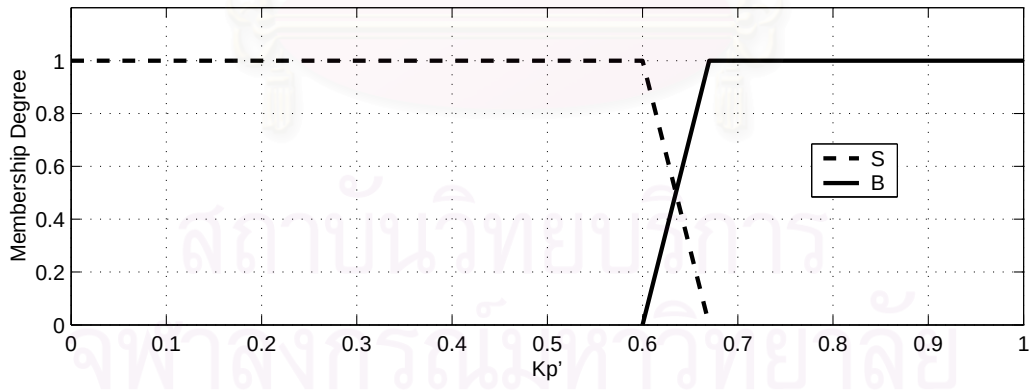
รูปที่ 3.39: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta e(k)$ และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลอินพุตของการทดลองที่ 2 (UOP3CC)



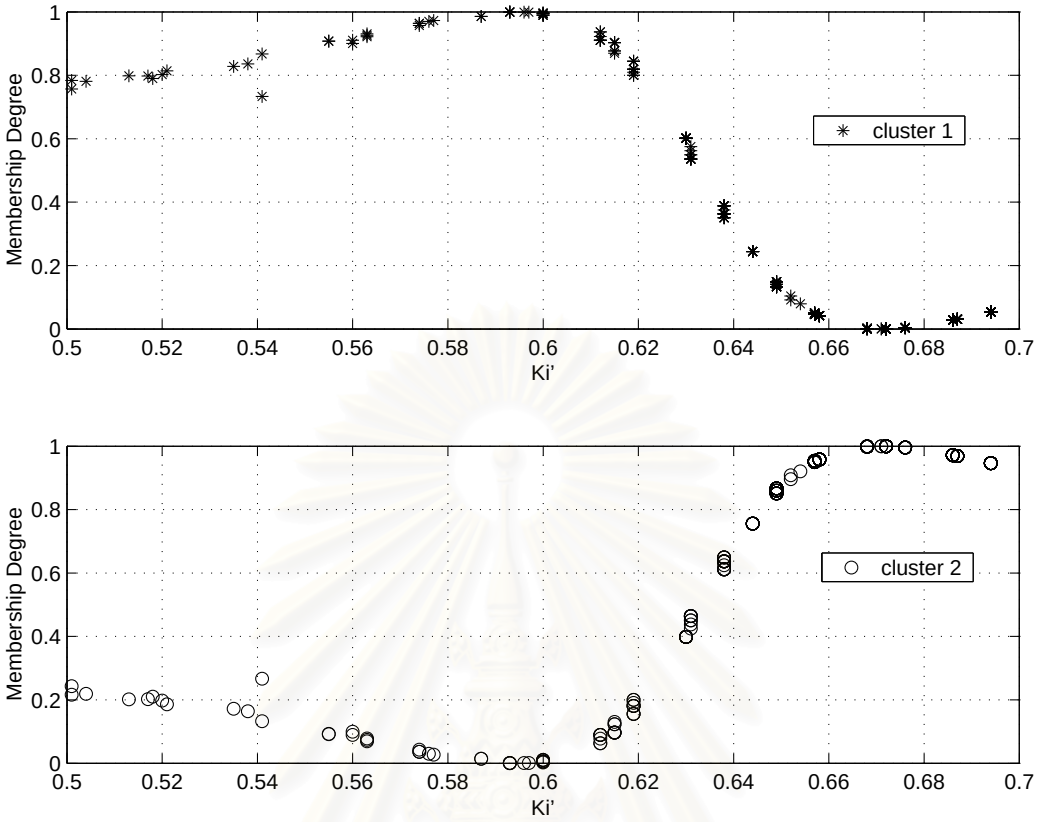
รูปที่ 3.40: ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุต $\Delta e(k)$ ของการทดลองที่ 2 (UOP3CC)



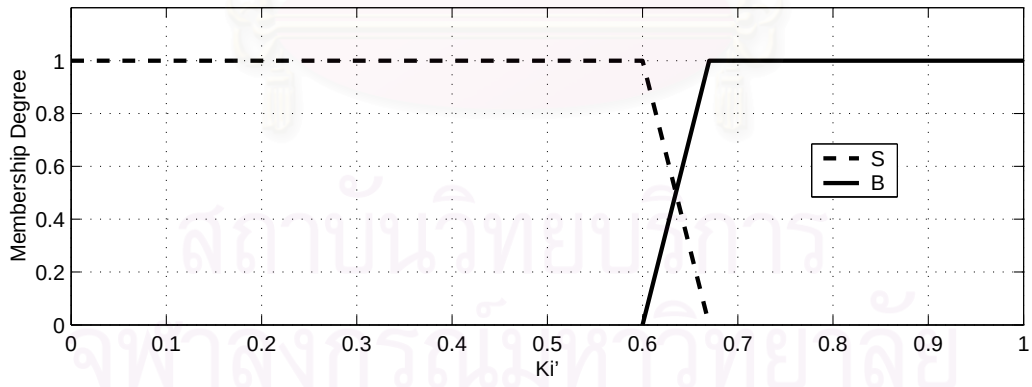
รูปที่ 3.41: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K_p' และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลเอาท์พุตของการทดลองที่ 2 (UOP3CC)



รูปที่ 3.42: ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ K_p' ของการทดลองที่ 2 (UOP3CC)



รูปที่ 3.43: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K_i' และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลเอาท์พุตของการทดลองที่ 2 (UOP3CC)



รูปที่ 3.44: ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ K_i' ของการทดลองที่ 2 (UOP3CC)

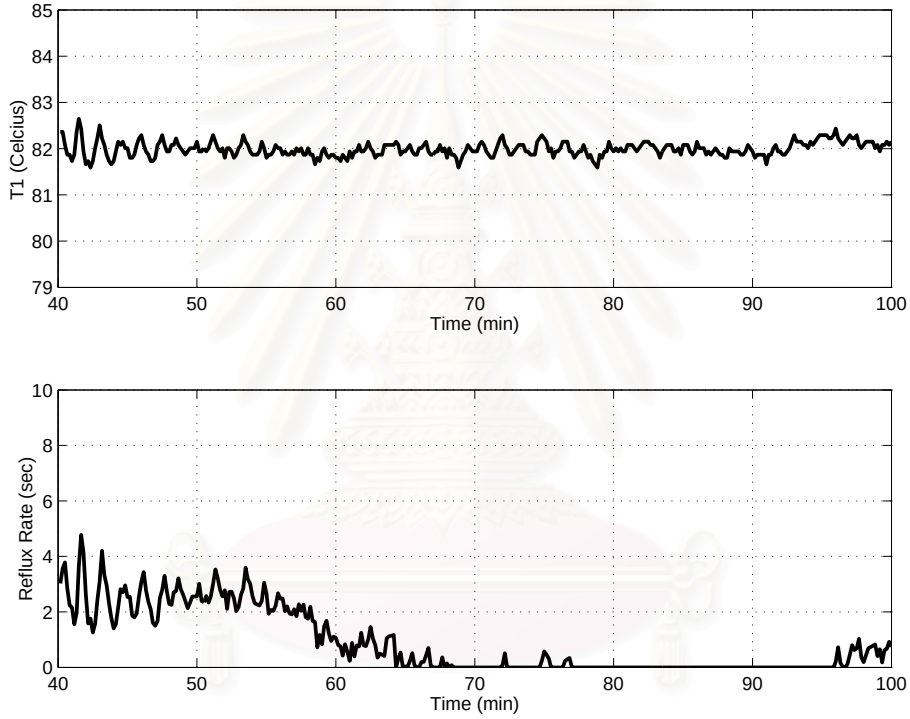
ตารางที่ 3.5: (a) ฐานกฎฟัซซีสำหรับ K_p' ของการทดลองที่ 2 (UOP3CC) (b) ฐานกฎฟัซซีสำหรับ K_i' ของการทดลองที่ 2 (UOP3CC)

		$\Delta e(k)$		
		DE_1	DE_2	DE_3
$e(k)$	E_1	B	B	B
	E_2	S	B	S
	E_3	B	B	B

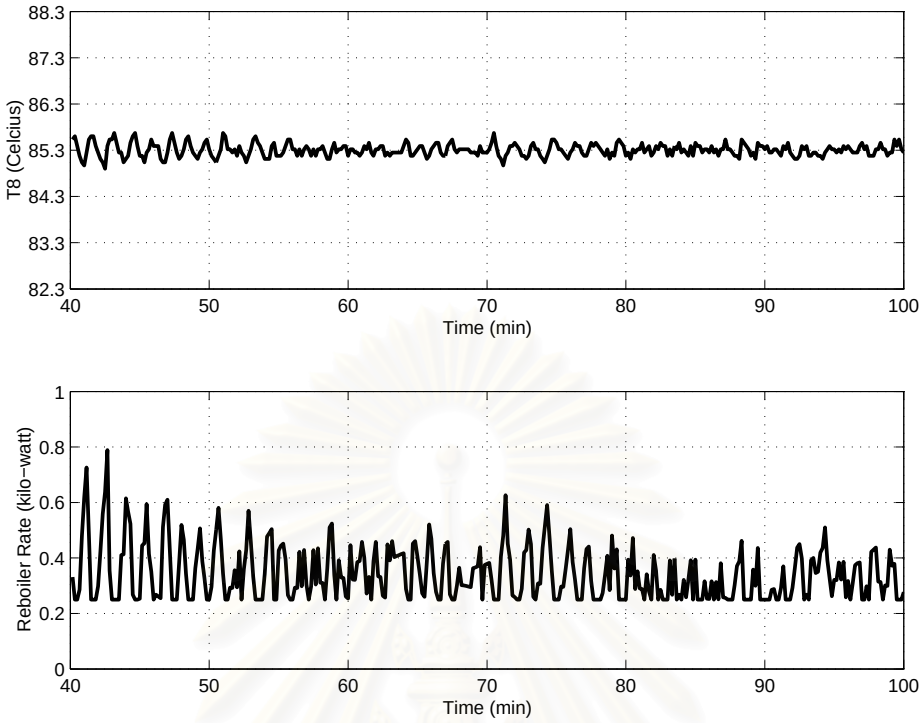
(a)

		$\Delta e(k)$		
		DE_1	DE_2	DE_3
$e(k)$	E_1	B	B	B
	E_2	B	B	B
	E_3	B	B	B

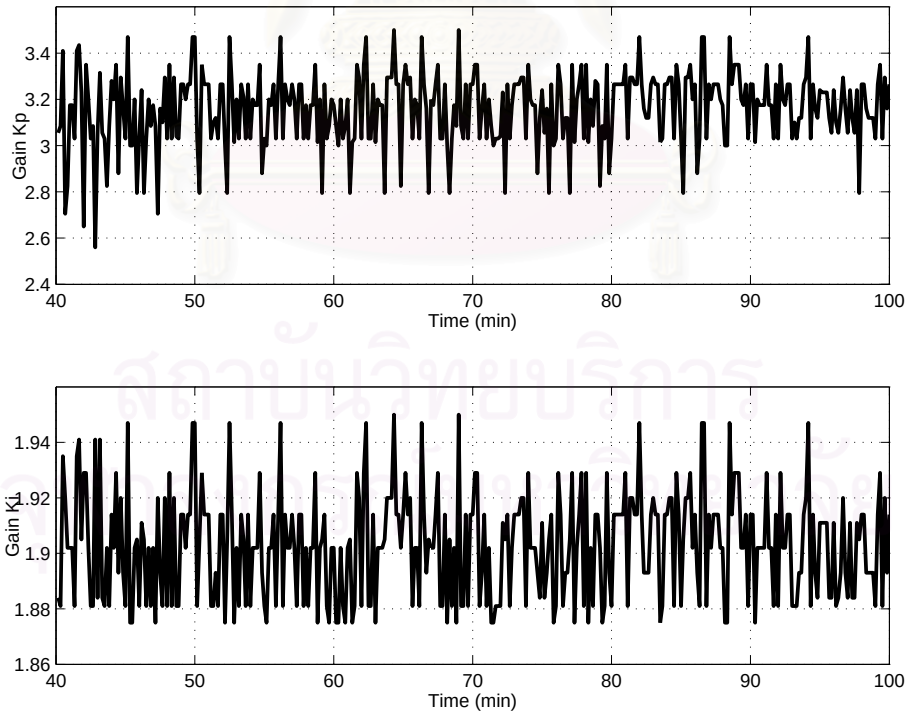
(b)



รูปที่ 3.45: อุณหภูมิที่ยอดหอและเวลาการป้อนสารกลับที่ยอดหอของการทดลองที่ 2 (UOP3CC)



รูปที่ 3.46: อุณหภูมิที่ฐานหอและพลังงานที่หม้อต้มซ้ำที่ฐานหอของการทดลองที่ 2 (UOP3CC)



รูปที่ 3.47: ค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_i ของวงรอบยอดหอของการทดลองที่ 2 (UOP3CC)

การทดลองที่ 3 (UOP3CC)

ใช้ตัวควบคุม PI แบบกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่แบบวิธี Ziegler-Nichols ในการควบคุมวงรอบยอดหอและใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีในการควบคุมวงรอบฐานหอ จากลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตเริ่มต้นแสดงดังรูปที่ 3.48 และลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตสุดท้ายดังรูปที่ 3.49 ด้วยเหตุผลเดียวกันกับการทดลองที่ 2 (UOP3CC) ดังนั้นจึงระบุหาจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสมของข้อมูลอินพุตให้เท่ากับ 3 กลุ่ม และจำนวนกลุ่มของข้อมูลเอาท์พุตกำหนดให้เท่ากับ 2 กลุ่ม และใช้การรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ในการกำหนดรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่เหมาะสมกับการกระจายตัวของข้อมูลอินพุตเริ่มต้นระหว่าง $e(k)$ และ $\Delta e(k)$ และข้อมูลเอาท์พุตเริ่มต้นระหว่าง K_p' และ K_i'

รูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุต หาได้จากการพล็อต fuzzy partition matrix ของแต่ละกลุ่มข้อมูลอินพุตไปยังแกนของ $e(k)$ และ $\Delta e(k)$ ดังรูปที่ 3.50 และ 3.52 ตามลำดับ และพล็อต fuzzy partition matrix ของแต่ละกลุ่มข้อมูลเอาท์พุตไปยังแกนของ K_p' และ K_i' ดังรูปที่ 3.54 และรูปที่ 3.56 ตามลำดับ จากนั้นนำค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลแต่ละกลุ่มมาประมาณเป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยม

ดังนั้นสามารถกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุต $e(k)$ และ $\Delta e(k)$ ได้ดังรูปที่ 3.51 และ 3.53 ตามลำดับ และกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลเอาท์พุต K_p' และ K_i' ได้ดังรูปที่ 3.55 และรูปที่ 3.57 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาจากผลตอบของกระบวนการ อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุต ทำให้สามารถกำหนดฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมวงรอบยอดหอของหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด เมื่อจำนวนกลุ่มข้อมูลคือ 3 กลุ่ม ดังนั้นจากความรู้ในการกำหนดที่เหมาะสมโดยใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI ทำให้ได้ฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสมดังตารางที่ 3.6

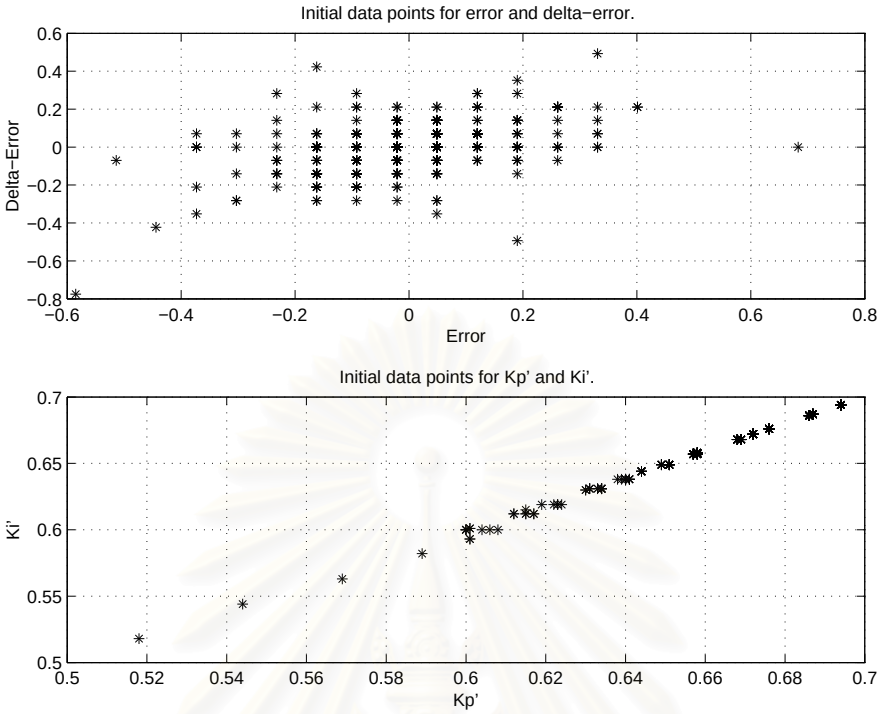
พิจารณาผลตอบของกระบวนการและสัญญาณควบคุมดังรูปที่ 3.58 และรูปที่ 3.59 ตามลำดับ ตลอดจนค่าอัตราขยาย K_p และ K_i ดังรูปที่ 3.60 พบว่า ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีสามารถควบคุมอุณหภูมิที่ฐานหอได้ดีเป็นที่น่าพอใจ ส่วนตัวควบคุม PI แบบกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่แบบวิธี Ziegler-Nichols สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ยอดหอได้ดี แต่เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ 2 (UOP3CC) ที่วงรอบยอดหอจะเห็นได้ว่า เมื่อใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีในการควบคุมจะให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าการใช้ตัวควบคุม PI แบบกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่แบบวิธี Ziegler-Nichols ในการควบคุม

ส่วนการใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีในการควบคุมอุณหภูมิในวงรอบฐานหอ เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ 2 (UOP3CC) พบว่าให้ผลการควบคุมที่ใกล้เคียงกันกับการใช้ตัวควบคุม PI แบบกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่แบบวิธี Ziegler-Nichols ในการควบคุม

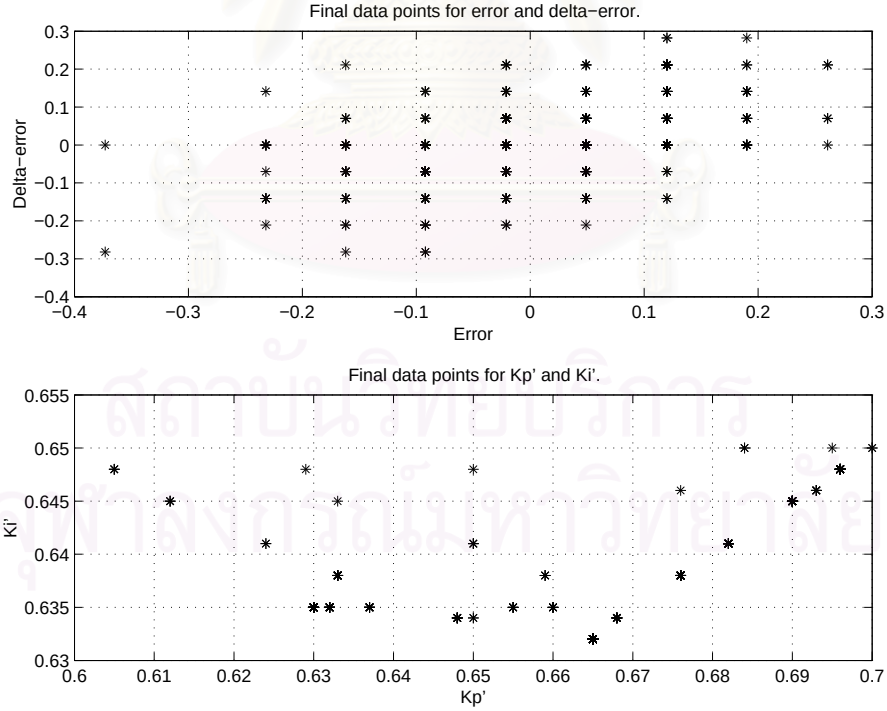
เมื่อทำการทดลองหลายครั้ง ทำให้ทราบว่าหากสามารถควบคุมพลังงานที่หม้อต้มซ้ำให้คงที่ได้ ผลของการกระทำระหว่างวงรอบจะส่งผลให้การควบคุมอุณหภูมิที่ยอดหอทำได้ง่ายขึ้น สังเกตได้จากเวลาการป้อนสารกลับที่ยอดหอซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงที่เหมาะสมไม่เข้าสู่ค่าสูงสุด (10 วินาที) หรือต่ำสุด (0 วินาที) ของการควบคุม ซึ่งแตกต่างจากการทดลองที่ 2 (UOP3CC) ที่เวลาการป้อนสารกลับที่ยอดหอมีการเปลี่ยนแปลงเข้าสู่ค่าที่ต่ำสุด (0 วินาที)

ดังนั้นการใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีในการควบคุมวงรอบยอดหอ (การทดลองที่ 2 (UOP3CC)) และควบคุมวงรอบฐานหอ (การทดลองที่ 3 (UOP3CC)) จะให้ผลการควบคุมที่ดีสำหรับวงรอบที่ควบคุม จึงมีความเป็นไปได้ที่ผลการควบคุมทั้งวงรอบยอดหอและฐานหอจะมีประสิทธิภาพสูง เมื่อใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี มาควบคุมทั้งวงรอบยอดหอและฐานหอพร้อมกัน

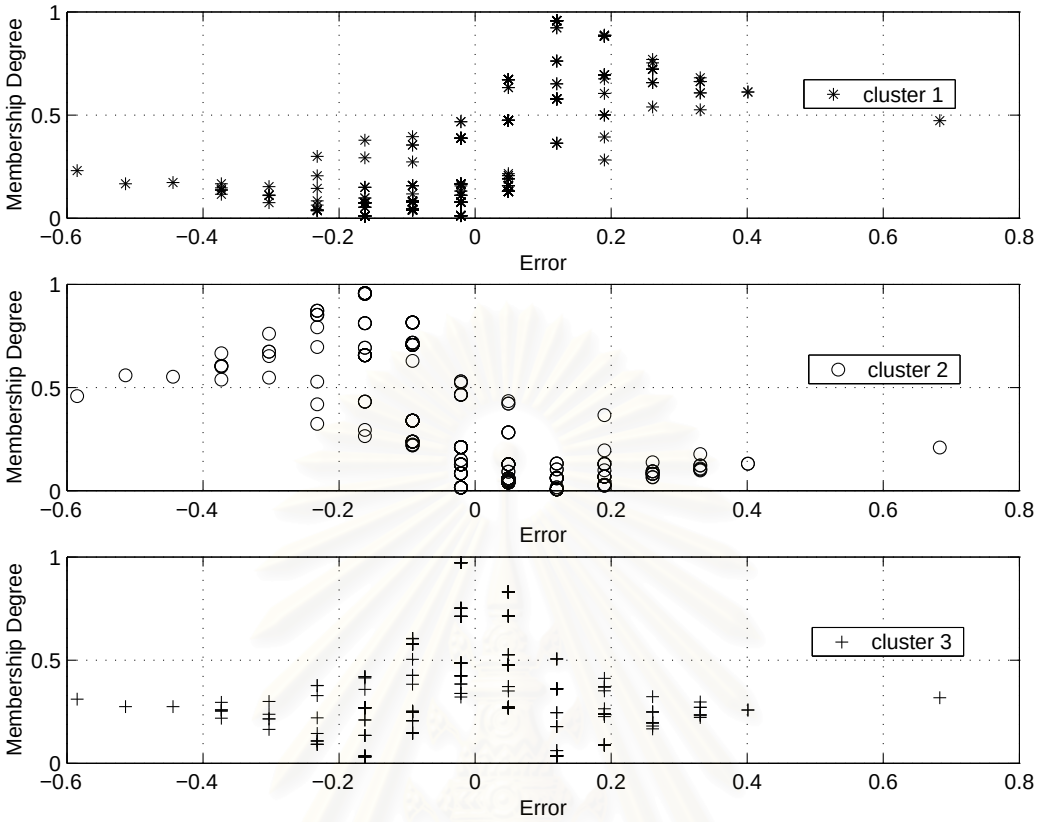
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



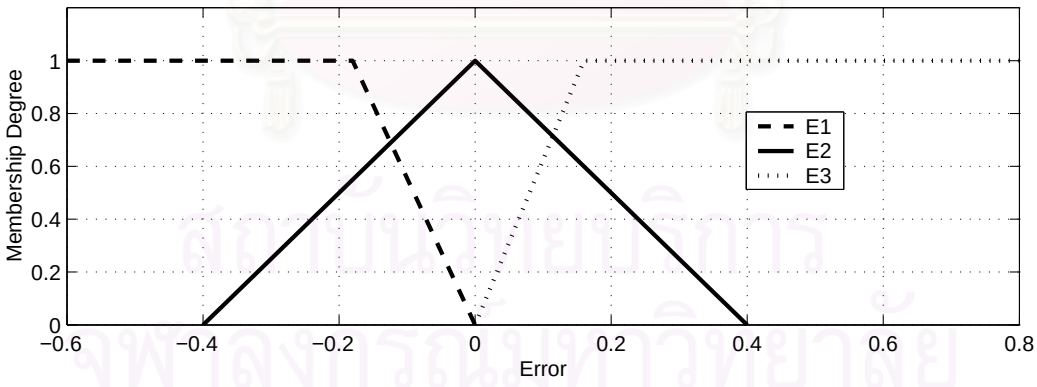
รูปที่ 3.48: การกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตเริ่มต้นของการทดลองที่ 3 (UOP3CC)



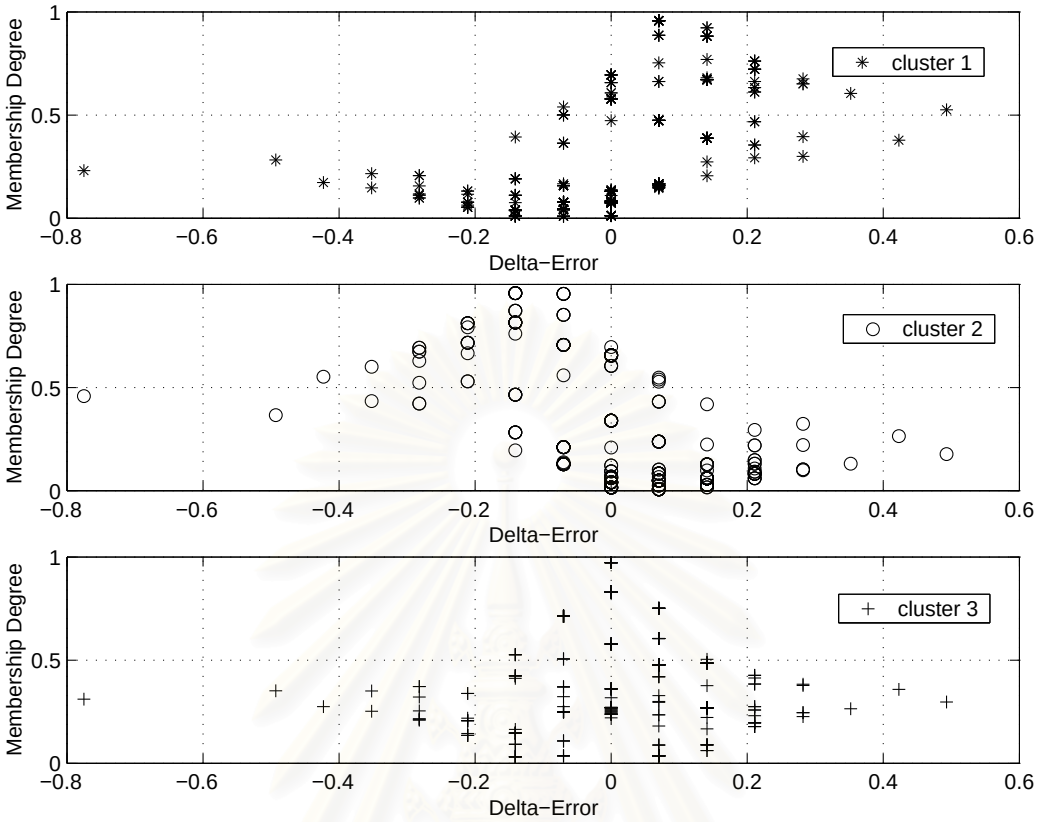
รูปที่ 3.49: การกระจายตัวของข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตสุดท้ายของการทดลองที่ 3 (UOP3CC)



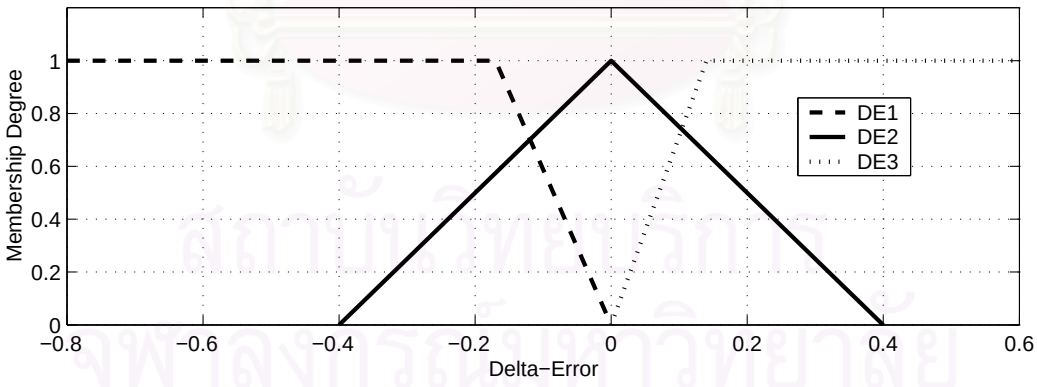
รูปที่ 3.50: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $e(k)$ และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลอินพุตของการทดลองที่ 3 (UOP3CC)



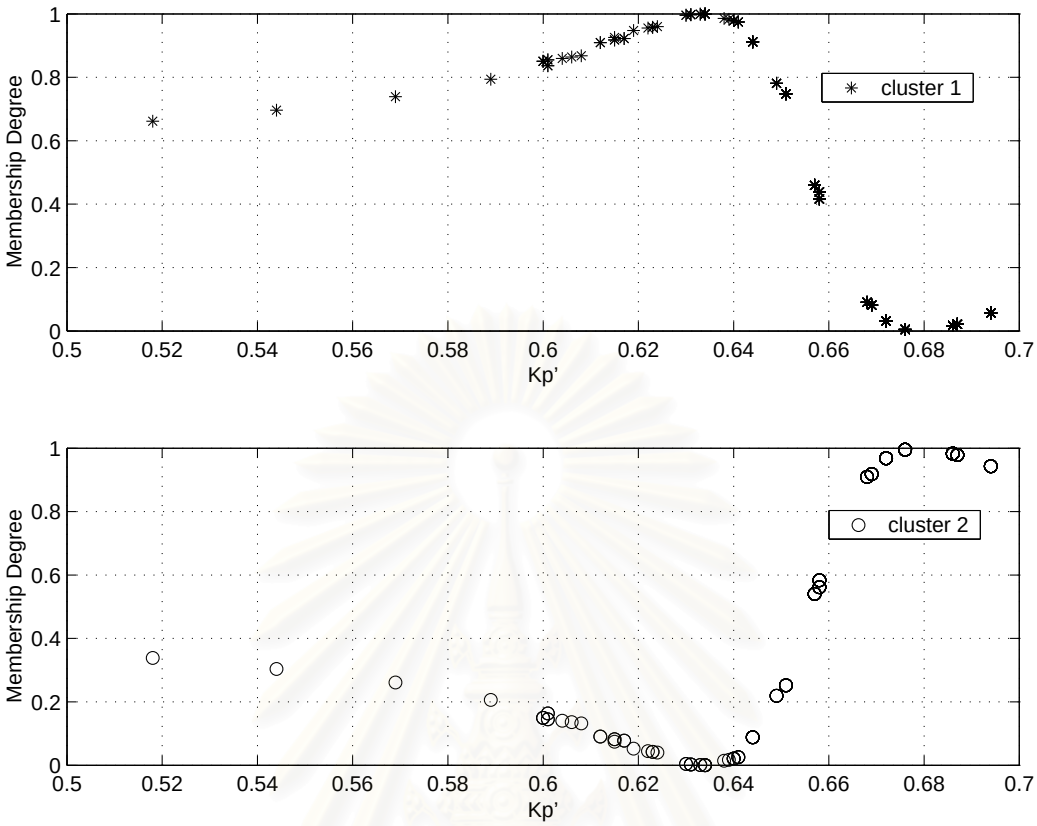
รูปที่ 3.51: ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุต $e(k)$ ของการทดลองที่ 3 (UOP3CC)



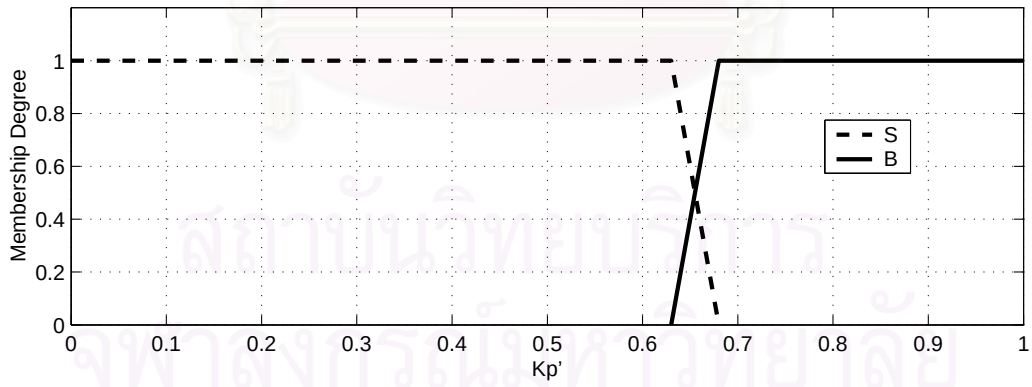
รูปที่ 3.52: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta e(k)$ และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลอินพุตของการทดลองที่ 3 (UOP3CC)



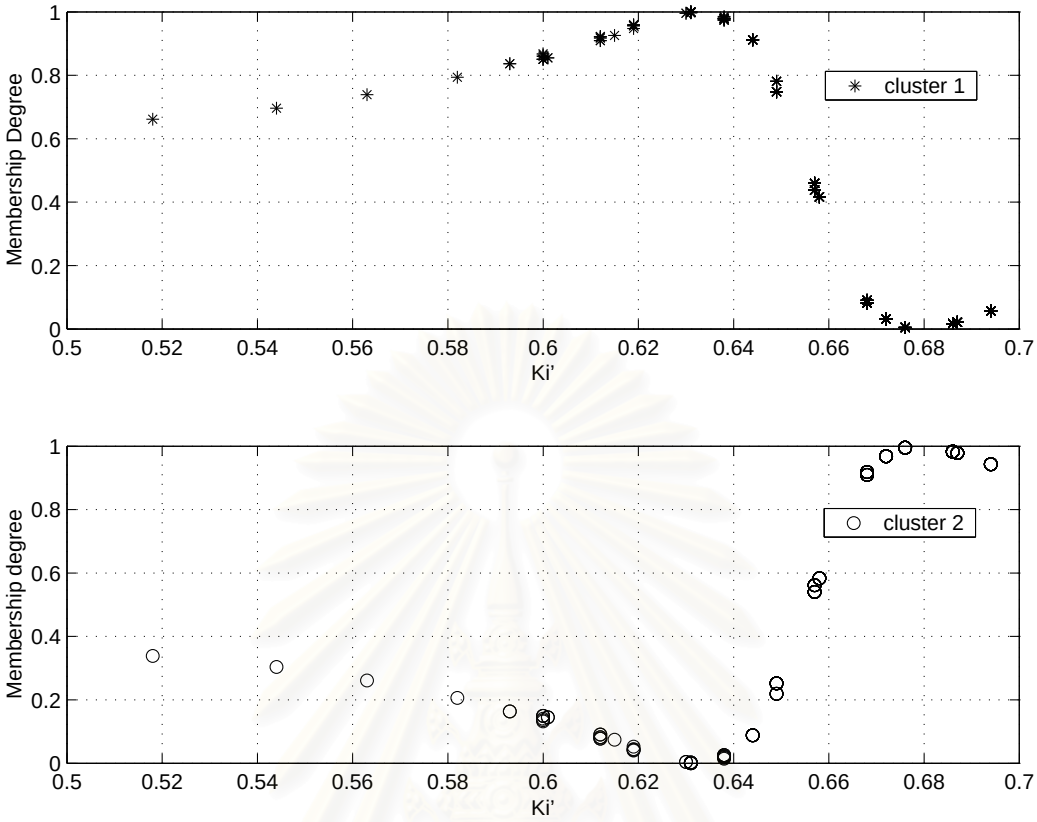
รูปที่ 3.53: ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุต $\Delta e(k)$ ของการทดลองที่ 3 (UOP3CC)



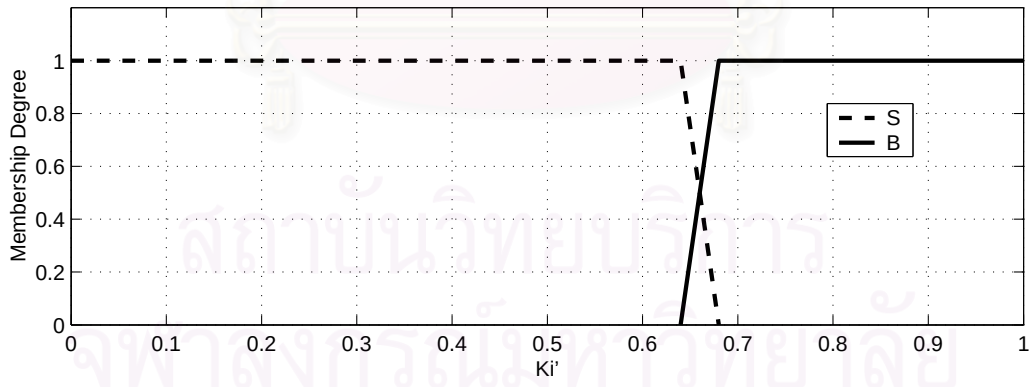
รูปที่ 3.54: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K_p' และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลเอาท์พุตของการทดลองที่ 3 (UOP3CC)



รูปที่ 3.55: ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ K_p' ของการทดลองที่ 3 (UOP3CC)



รูปที่ 3.56: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K_i' และ fuzzy partition matrix ของข้อมูลเอาท์พุตของการทดลองที่ 3 (UOP3CC)



รูปที่ 3.57: ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ K_i' ของการทดลองที่ 3 (UOP3CC)

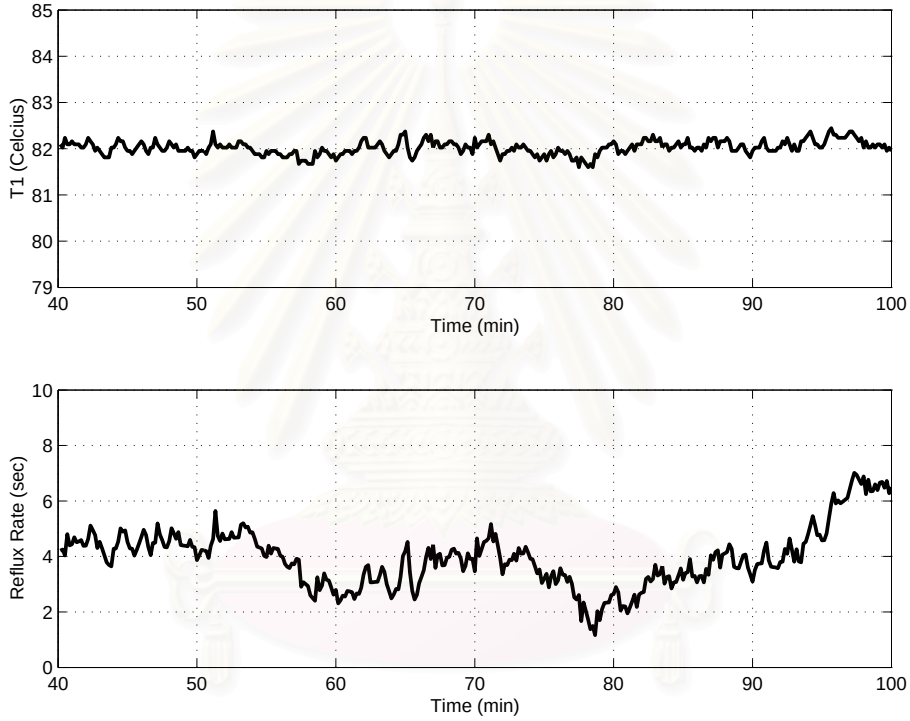
ตารางที่ 3.6: (a) ฐานกฎฟัซซีสำหรับ K_p' ของการทดลองที่ 3 (UOP3CC) (b) ฐานกฎฟัซซีสำหรับ K_i' ของการทดลองที่ 3 (UOP3CC)

		$\Delta e(k)$		
		DE_1	DE_2	DE_3
$e(k)$	E_1	B	B	B
	E_2	S	B	S
	E_3	B	B	B

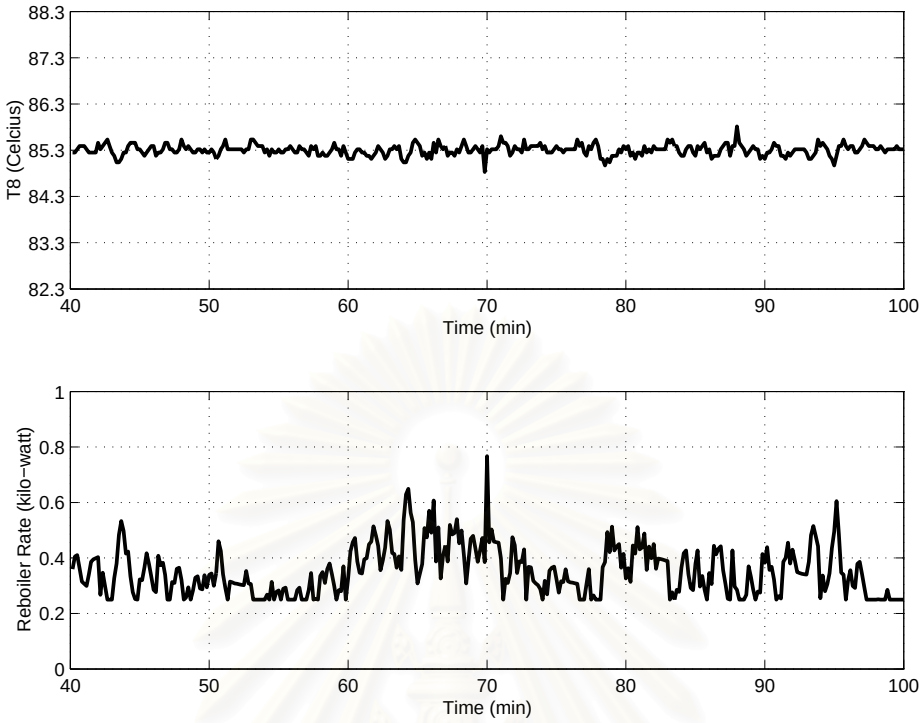
(a)

		$\Delta e(k)$		
		DE_1	DE_2	DE_3
$e(k)$	E_1	B	B	B
	E_2	B	B	B
	E_3	B	B	B

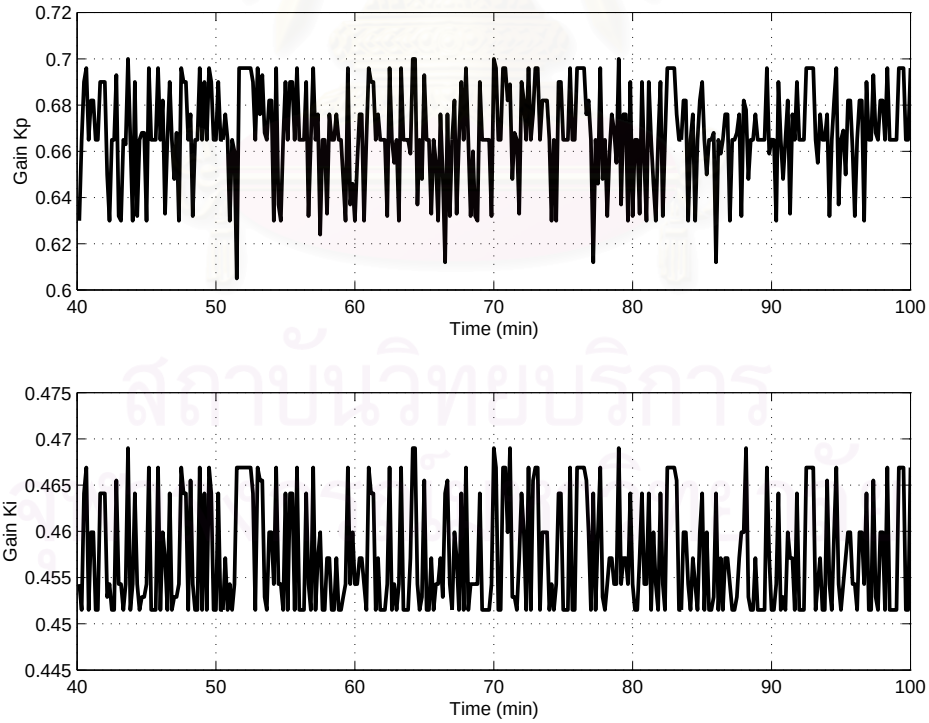
(b)



รูปที่ 3.58: อุณหภูมิที่ยอดหอและเวลาการป้อนสารกลับที่ยอดหอของการทดลองที่ 3 (UOP3CC)



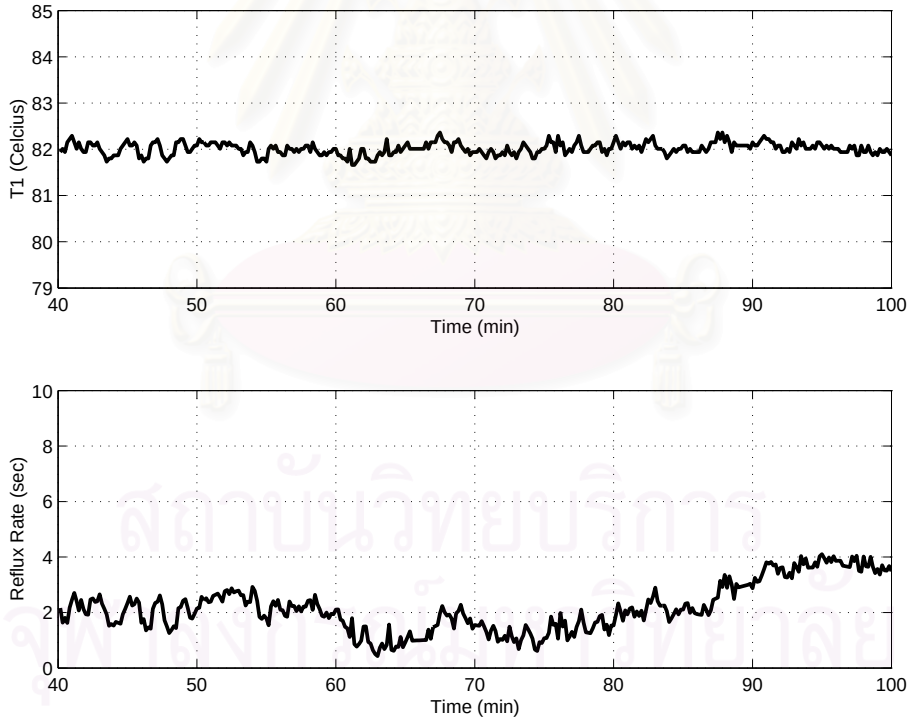
รูปที่ 3.59: อุณหภูมิที่ฐานหอและพลังงานที่หม้อต้มซ้ำที่ฐานหอของการทดลองที่ 3 (UOP3CC)



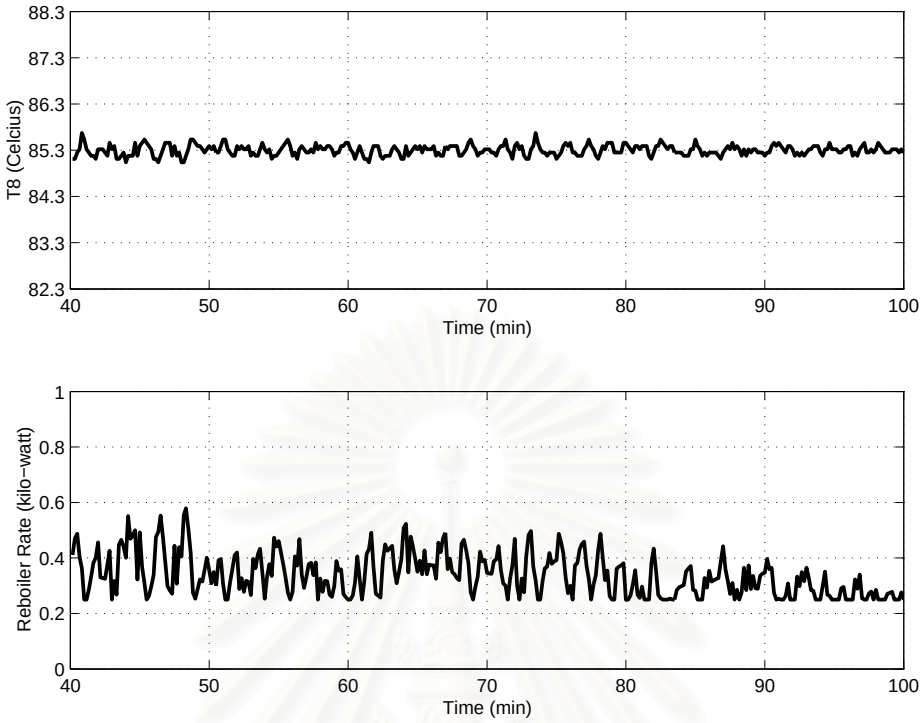
รูปที่ 3.60: ค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_i ของวงรอบฐานหอของการทดลองที่ 3 (UOP3CC)

การทดลองที่ 4 (UOP3CC)

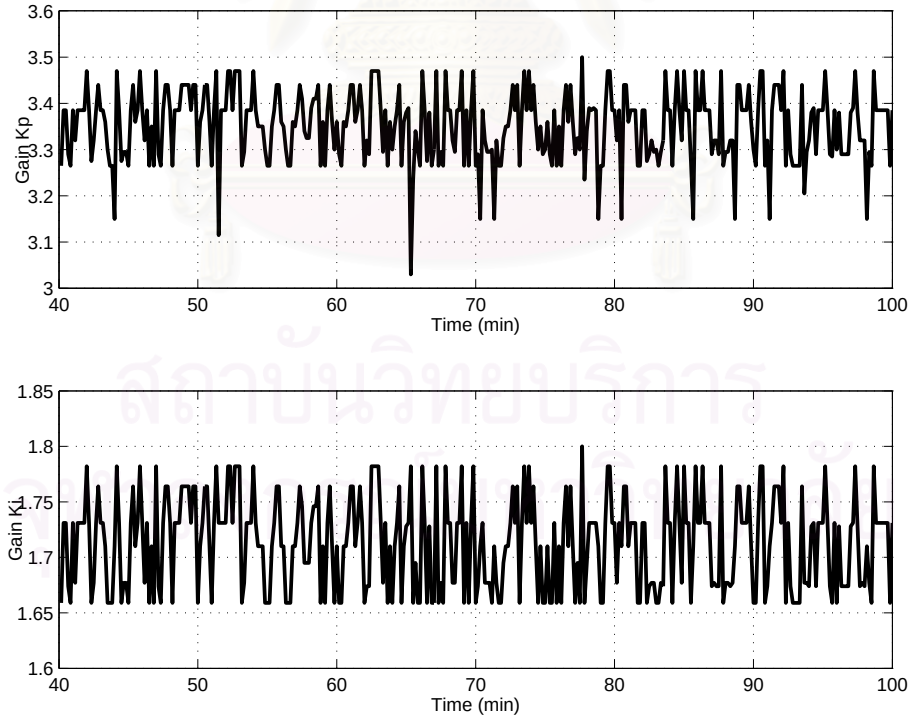
ใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีในการควบคุมวงรอบฐานหอและวงรอบยอดหอ (ใช้โครงสร้างของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีในการทดลองที่ 2 (UOP3CC) และการทดลองที่ 3 (UOP3CC)) เมื่อพิจารณาจากผลตอบของกระบวนการและสัญญาณควบคุมดังรูปที่ 3.61 และรูปที่ 3.62 ตามลำดับค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_i ดังรูปที่ 3.63 และรูปที่ 3.64 ตามลำดับ พบว่าตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี ให้ผลการควบคุมที่มีประสิทธิภาพ สามารถควบคุมอุณหภูมิทั้งในวงรอบยอดหอและฐานหอได้ โดยไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากนักเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนสารเข้าที่กลางหอ และผลการควบคุมดีกว่าการทดลองที่ 1 และหากเปรียบเทียบกับการทดลองที่ 2 (UOP3CC) และการทดลองที่ 3 (UOP3CC) ผลการควบคุมมีแนวโน้มที่ดีจะดีกว่า สังเกตจากเวลาการป้อนกลับสารที่ยอดหอมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงไม่กว้างนักเมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ 3 (UOP3CC) และพลังงานที่หม้อต้มซ้ำก็มีการแกว่งตัวที่น้อยกว่าการทดลองที่ 2 (UOP3CC) ดังนั้นการใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีทั้งสองวงรอบการควบคุม ให้ผลตอบของกระบวนการดีกว่าการควบคุมเพียงวงรอบเดียว



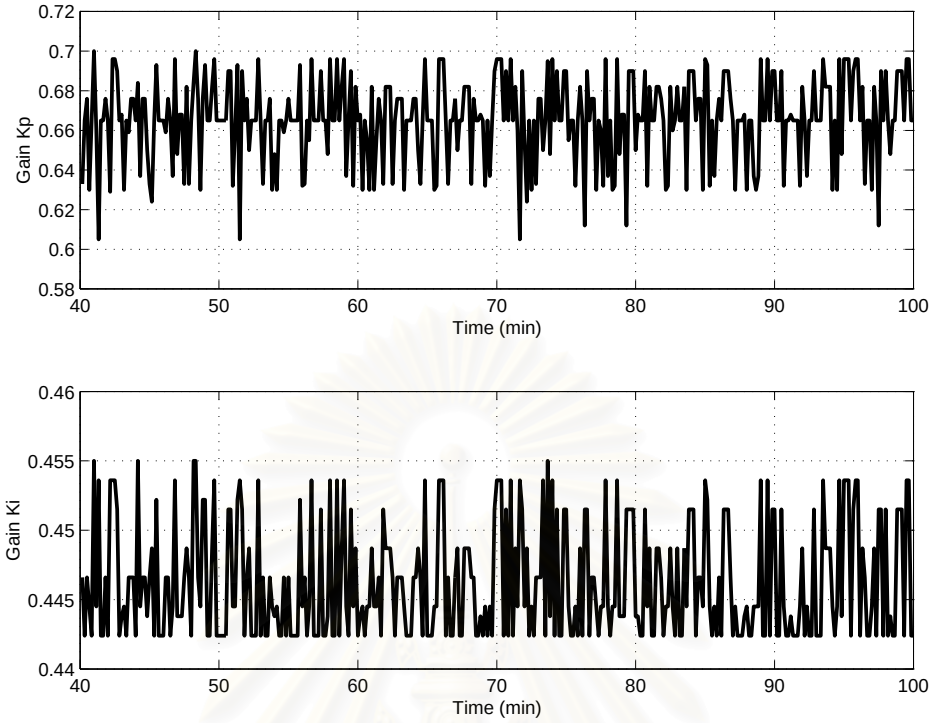
รูปที่ 3.61: อุณหภูมิที่ยอดหอและเวลาการป้อนสารกลับที่ยอดหอของการทดลองที่ 4 (UOP3CC)



รูปที่ 3.62: อุณหภูมิที่ฐานหอและพลังงานที่หม้อต้มซ้ำที่ฐานหอของการทดลองที่ 4 (UOP3CC)



รูปที่ 3.63: ค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_i ของวงรอบยอดหอของการทดลองที่ 4 (UOP3CC)



รูปที่ 3.64: ค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_i ของวงรอบฐานหอของการทดลองที่ 4 (UOP3CC)

การออกแบบตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีสำหรับหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิดสำหรับห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม จากผลการทดลองทั้ง 4 การทดลอง แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีสามารถควบคุมอุณหภูมิที่ยอดหอและฐานหอได้ดีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนสารเข้าที่กลางหอ โดยเฉพาะในการทดลองที่ 4 (UOP3CC) นั้น พบว่าการใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี ในการควบคุมทั้งวงรอบยอดหอและวงรอบฐานหอพร้อมกัน ให้ผลการควบคุมที่มีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีในการควบคุมเพียงวงรอบใดวงรอบหนึ่ง

3.3 สรุป

ในการควบคุมหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด ทั้งการจำลองระบบควบคุมหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด และการควบคุมหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิดของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม พบว่าผลการทดลองมีความสอดคล้องกัน กล่าวคือการใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีสำหรับการควบคุมในแต่ละวงรอบการควบคุมนั้น ให้ผลการควบคุมที่มีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้ตัวควบคุม PI แบบกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่แบบวิธี Ziegler-Nichols ในการควบคุม นอกจากนี้การใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีในการควบคุมทั้งวงรอบยอดหอและวงรอบฐานหอพร้อมกัน ให้ผลการควบคุมที่มีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้ตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีในการควบคุมเพียงวงรอบใดวงรอบหนึ่ง

บทที่ 4

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

4.1 บทสรุป

งานวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการพัฒนาการออกแบบตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี ซึ่งใช้ตัวควบคุม PI เป็นตัวควบคุมหลักทำหน้าที่ควบคุมกระบวนการโดยตรง และใช้ระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีกำกับดูแลการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI โดยในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงทฤษฎีการพัฒนาการออกแบบโครงสร้างของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี และการประยุกต์ใช้กับกระบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ต่อมาในบทที่ 3 ประยุกต์ใช้กับกระบวนการกลั่นของหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิดที่เป็นระบบแบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง มีการกระทำระหว่างวงรอบการควบคุมและมีการรบกวนในระบบ พบว่าตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี ให้ผลการควบคุมที่มีประสิทธิภาพ โดยออกแบบให้ระบบควบคุมสามารถควบคุมคุณภาพสารผลิตภัณฑ์ ให้มีความบริสุทธิ์เป็นไปตามที่กำหนด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนเข้าของสารที่กลางหอ โดยในส่วนของโครงสร้างของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีนั้น ใช้เทคนิคการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ในการกำหนดจำนวนและรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ร่วมกับการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI ในการกำหนดฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสม

การใช้เทคนิคการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ในการกำหนดจำนวนและรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อมูลทั้งในส่วนที่เป็นอินพุตและเอาท์พุตของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี มีข้อดี คือ สามารถกำหนดขอบเขตที่แน่นอนของการกระจายตัวของข้อมูลทั้งหมดได้ ทำให้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ได้สามารถคลอบคลุมข้อมูลส่วนอินพุตได้พอดี ไม่มากเกินไปหรือน้อยเกินไป ทั้งนี้เพราะถ้าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ได้มีขอบเขตของข้อมูลส่วนอินพุตมากเกินไป จึงมีความเป็นไปได้ที่ทำให้เกิดปัญหากรณีที่กฎฟัซซีที่ใช้ในการทำงานมีอยู่เพียงกฎเดียว แต่ถ้าหากฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ได้มีขอบเขตของข้อมูลส่วนอินพุตน้อยเกินไป ก็จะทำให้เกิดปัญหากรณีที่กฎฟัซซีที่ใช้ในการทำงานมีไม่เพียงพอ ปัญหาเหล่านี้มักทำให้เกิดความผิดพลาดในการควบคุมกระบวนการได้ ดังนั้นการรู้ขอบเขตที่แน่นอนของข้อมูลส่วนอินพุต ทำให้ได้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่คลอบคลุมปัญหาพอดี ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการลดขั้นตอนในการลองผิดลองถูกเพื่อกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่เหมาะสม

การกำหนดฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสมโดยการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI เป็นการสร้างกฎฟัซซี IF-THEN โดยพิจารณาจากผลตอบของกระบวนการโดยตรง ซึ่งเป็นการกำหนดฐานกฎฟัซซีที่มีประสิทธิภาพ ทั้งนี้เพราะเป็นการมองปัญหาที่ผลตอบของกระบวนการโดยตรงและมีหลักการและขั้นตอนการกำหนดฐานกฎฟัซซีที่ง่าย แต่จากบทความเดิมของ Zhao [14] นั้นจะกำหนดกฎฟัซซีคงที่ไว้ทั้งหมด 49 กฎ ซึ่งโดยแท้จริงแล้วในบางกระบวนการที่ต้องการควบคุม ไม่มีความจำเป็นต้องใช้กฎฟัซ

ซีทั้ง 49 กฎ จากปัญหาดังกล่าวจึงนำหลักการของการกำหนดฐานกฎฟัซซีมาใช้ให้มีความยืดหยุ่นขึ้น โดยกำหนดให้จำนวนกฎฟัซซีสามารถเปลี่ยนแปลงได้ โดยการใช้การวัดความถูกต้องของการรวมกลุ่มข้อมูล ซึ่งเป็นความรู้ส่วนหนึ่งของเทคนิคการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ทำให้สามารถระบุจำนวนกฎฟัซซีที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้เป็น 4, 9, 16, 25, 36 และ 49 กฎ กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ จำนวนเซตฟัซซีของข้อมูลที่เข้าสู่ระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตั้งแต่ 2-7 เซต ดังนั้นฐานกฎฟัซซีที่ได้จึงมีประสิทธิภาพ และเหมาะสมกับการกระจายตัวของข้อมูลทั้งหมดของกระบวนการที่ต้องการควบคุม

การใช้เทคนิคการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ในการกำหนดจำนวนและรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ร่วมกับการใช้ตารางค่าอัตราขยายฟัซซีสำหรับตัวควบคุม PI ในการกำหนดฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสม ทำให้ลดปัญหาการใช้วิธีการลองผิดลองถูกในการกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสมได้ และให้ผลการควบคุมที่มีประสิทธิภาพสูง แต่มีข้อเสียอยู่ตรงที่การนำไปประยุกต์ใช้งานจริงกับการควบคุม กระบวนการที่ไม่สามารถเก็บข้อมูลได้เพียงพอต่อการพิจารณาการวัดความถูกต้องของการรวมกลุ่มข้อมูล ส่งผลให้การคำนวณค่าเกณฑ์ S ซึ่งใช้ในการระบุจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสมนั้น ค่าที่คำนวณได้ไม่ใช่ค่าที่แท้จริง ดังนั้นจึงควรเก็บค่าข้อมูลให้มากขึ้นหรือทำการทดลองหลายๆครั้งแล้ววิเคราะห์ดูการกระจายตัวของข้อมูล จากนั้นจึงคำนวณหาค่าเกณฑ์ S เพื่อใช้ในการระบุหาจำนวนกลุ่มข้อมูลที่เหมาะสมต่อไป นอกจากนี้การกำหนดช่วงของ ค่าอัตราขยายแบบสัดส่วนและค่าอัตราขยายแบบอินทิกรัลที่เหมาะสมนั้น จำเป็นต้องทำการปรับช่วงของค่าอัตราขยายอีกครั้ง เพื่อให้การควบคุมมีประสิทธิภาพดีเป็นที่น่าพอใจ แต่อย่างไรก็ตามการปรับช่วงค่าอัตราขยายสามารถทำได้สะดวกและรวดเร็ว

ดังนั้นการกำหนดโครงสร้างของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีโดยวิธีที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ สามารถนำมาใช้ในการออกแบบระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีเพื่อใช้ในการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI และสามารถประยุกต์ใช้ในการควบคุมความเข้มข้นสารผลิตภัณฑ์ของหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิดได้ดี เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนสารเข้าที่กลางหอ ผลการควบคุมที่ได้มีประสิทธิภาพสูงเมื่อเปรียบเทียบกับการปรับจูนตัวควบคุม PI แบบกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่ของ Ziegler-Nichols

4.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากการประมาณฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นแบบสามเหลี่ยมในขั้นตอนของการกำหนดรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกนั้น ยังต้องใช้วิธีกำหนดโดยผู้ปฏิบัติการเอง ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการเขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในการประมาณฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นแบบสามเหลี่ยม
2. ปรับปรุงขั้นตอนการหาช่วงค่าของ K_p และ K_i ให้เหมาะสม ทำให้ไม่ต้องมีการปรับละเอียดอีกครั้งหลังจากได้ผลตอบที่ดีแล้ว
3. นำตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี มาประยุกต์ใช้กับระบบอื่นที่เป็นระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก เพื่อสังเกตประสิทธิภาพการทำงานของตัวควบคุม PI แบบกำกับดูแลด้วยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี

รายการอ้างอิง

1. Zadeh, L. A.; Fuzzy sets. Inform. Control vol. 8, 1965. pp. 338-353.
2. Zadeh, L. A.; Outline of new approach to the analysis of complex systems and decussion processed. IEEE Trans. Syst. Man. Cybern. vol. SMC-3, no. 1, 1973. pp. 28-44.
3. Mamdani, E. H.; Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. Proc. IEE. vol. 121, no. 12, 1974. pp. 1585-1588.
4. Holmblad, L. P.; and Ostergaard, J. J.; Control of a cement kiln by fuzzy logic. in M.M. Gupta, and E. Sanchez (eds.). Fuzzy Information and Decision Process Amsterdam: North-Holland, 1982.
5. Cartwright, P.; and Thomson, M.; Knowledge based control of a binary distillation column. IEE Colloguium. on Knowledge. Based. Control 1987.
6. Klett, G.; Application of fuzzy control in chemical distillation process. IEEE Int. Conf. Fuzzy system vol. 1, 1993. pp. 375-377.
7. Santhanam, S.; and Langari, R.; Supervisory fuzzy adaptive control of a binary distillation column Trans. Com. vol. 2, 1994. pp. 1063-1068.
8. Luyben, W. L.; Simple method for tuning SISO controllers in multivariable systems Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. vol. 25, 1968. pp. 654-660.
9. Viljamaa, P.; and Kovio, H. N.; Tuning of multivariable fuzzy logic controller IEEE Int. Conf. Fuzzy system vol. 2, 1993. pp. 697-701.
10. He, J. B.; Wang, Q. G.; and Lee, T. H.; PI/PID controller tuning via LQR approach IEEE Conf. Decision. and Control vol. 1, 1998. pp. 1177-1182.
11. Tang, K. S.; Man, K. F.; Kwong, S.; and Liu, Z. F.; Minimal Fuzzy Memberships and Rule Using Hierarchical Genetic Algorithms IEEE Trans. Ind. Electron. vol. 45, No. 1, 1998. pp. 162-169.
12. Jang, R.; Fuzzy controller design without domain experts IEEE Int. Conf. Fuzzy Systems 1992. pp. 289-296.
13. Huyghe, E.; and Hamam, Y.; Simulated annealing for fuzzy controller optimization: Principles and applications IEEE Int. Conf. Syst. Man. and Cyber. vol. 5, No. 1, 1995. pp. 4509-4514.

14. Zhao, Z. Y.; Tomizuka, M.; and Isaka, S.; Fuzzy Gain Scheduling of PID Controller IEEE Trans. Syst. Man. Cyber. vol. 23, no. 5, 1993. pp. 1392-1398.

15. Klawonn, F.; and Kruse, R.; Constructing a fuzzy controller from data Fuzzy Sets and Systems vol. 85, 1997. pp. 177-193.

16. Ruspini, E.; A new approach to clustering Inf. Control vol. 15, 1969. pp. 22-32.

17. Gitman, I.; and Levine, M. D.; An algorithm for detecting unimodal fuzzy sets and its application as a clustering technique Trans. Com. vol. C-19, no. 7, 1970. pp. 583-593.

18. Dunn, J. C.; A fuzzy relative of the ISODATA process and its use in detecting compact well-separated clusters J. Cyber. vol. 3, no. 3, 1973. pp. 32-57.

19. Bezdek, J. C.; A covariance theorem for the fuzzy ISODATA clustering algorithm IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. vol. PAMI-2, no. 1, 1980. pp. 1-8.

20. Windham, M. P.; Cluster validity for the fuzzy c-means clustering algorithm IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. vol. PAMI-4, no. 4, 1982. pp. 357-363.

21. Backer, E.; and Jain, A. K.; A clustering performance measure based on fuzzy set decomposition IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. vol. PAMI-3, no. 1, 1981. pp. 66-75.

22. Xie, X. L.; and Beni, G.; A validity measure for fuzzy clustering IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. vol. PAMI-13, no. 8, 1991. pp. 841-847.

23. Ziegler, J. G.; and Nichols, N. B.; Optimum Setting for Automatic Controllers IEEE Trans. Syst. Man. Cyber. vol. 64, 1942. pp. 759-768.

24. Wang, L. X.; A supervisory controller for fuzzy control systems that guarantees stability IEEE Trans. on Automatic Control. vol. 39, no. 9, 1994. pp. 1845-1848.

25. Glankwamdee, S.; Tarathammatikorn, K.; and Chatthana-anan, T.; Fuzzy supervisory control system of a binary distillation column Proceeding of The IEEE Regions 10 Conference (TENCON) vol. 2, 1999. pp. 1055-1058.

26. Åström, K. J.; and Hägglund, T.; PID Controllers: Theory, Design and Tuning ISA press, 1993.

27. Gustafson, D. E.; and Kessel, W. C.; Fuzzy clustering with a fuzzy covariance matrix IEEE CDC. San Diego. CA. 1979. pp. 761-766.

28. Bezdek, J. C.; Hathaway, R. J.; Sabin, M. J.; and Tucker, W. T.; Convergence theory for fuzzy c-means:Counterexample and repairs IEEE Trans. Syst. Man. Cybern. vol. SMC-17, no. 5, 1987. pp. 873-877.

29. Genther, H.; and Glesner, M.; Automatic generation of a fuzzy classification system using fuzzy clustering methods ACM Sym. on Applied Comp. (SAC) 1994. pp. 180-183.

30. Chang, C. S.; and Fu, W.; Area load frequency control using fuzzy gain scheduling of PI controllers Electr. Power Syst. Res. vol. 42, 1997. pp. 145-152.

31. Khaisongkram, W.; and Banjerdpongchai, D.; Performance computation of linear dynamical systems under disturbance with bounded magnitudes and bounded derivatives Proc. of the 26th Electrical Engineering Conf. (EECON) November 6-7, 2003. pp. 835-840.

32. O'Dwyer, A.; PI and PID controllers for time delay processes: performance and robustness issues Proceedings of the Wismarer Automatisierungssymposium September 1999. pp. 227-234.

33. Wang, L. X.; A course in fuzzy systems and control Prentice-Hall, 1997. pp. 249-258.

34. Bezdek, J. C.; Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms Prenum: New York, 1981.

35. Ross, T. J.; Fuzzy logic with engineering applications Mc Graw Hill, 1995.

36. Höppner, F.; Klawonn, F.; Kruse, R.; and Runkler, T.; Fuzzy cluster analysis John Wiley & Sons, 1999.

37. Luyben, W. L.; Process modeling simulation and control for chemical engineering McGraw-Hill & Sons, 1990. pp 64-132.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การรวมกลุ่มข้อมูล

การรวมกลุ่มข้อมูลโดยทั่วไป [34], [36] อาศัยหลักการของการจัดกลุ่มชุดข้อมูลความสัมพันธ์ของข้อมูลอินพุตและข้อมูลเอาท์พุต โดยใช้มาตรวัดระยะทางที่แตกต่างกันเป็นเครื่องมือในการวัดระดับความคล้ายคลึงกันของข้อมูลทั้งหมด เช่น การรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means ใช้มาตรวัดระยะทางแบบยูคลิเดียน (Euclidean Distance Measure) [19] และการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy Gustafson-Kessel ใช้มาตรวัดระยะทางแบบปรับตัวได้ (Adaptive Distance Measure) [27] เป็นต้น

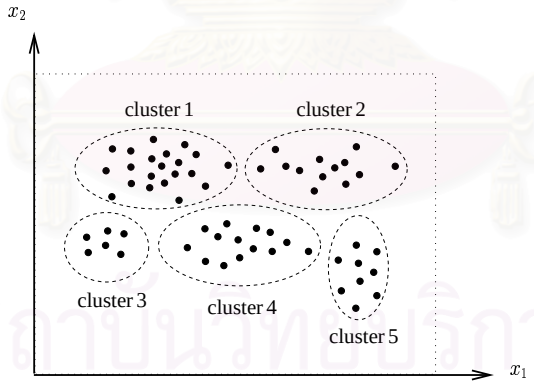
Bezdek [19] ได้พัฒนาวิธีการรวมกลุ่มของข้อมูลฟัซซี เป็นที่รู้จักกันในชื่อ c-means โดยวิธีนี้เป็นการกำหนดเซตของข้อมูล n ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์

$$X = \{x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n\} \tag{ก.1}$$

แต่ละ x_i กำหนดโดย

$$x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \ldots, x_{im}\} \tag{ก.2}$$

เมื่อ $x_i \in X$ และเป็นจุดในปริภูมิสถานะ m มิติ



รูปที่ ก.1: รูปแบบการกระจายตัวของข้อมูลแบบ 2 มิติ

ก.1 การรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี hard c-means

การรวมกลุ่มของข้อมูลวิธีนี้ [35] ข้อมูลแต่ละจุดมีค่าเป็น 1 และแต่ละกลุ่มของข้อมูลเรียกว่า partition กำหนดเซต $\{A_i, i = 1, 2, \ldots, c\}$ เป็น hard c-partition ของ X โดยสอดคล้องกับเงื่อนไข

$$\bigcup_{i=1}^{c} A_i = X \tag{ก.3}$$

$$A_i \cap A_j = \emptyset \quad \text{all } i \neq j \tag{ก.4}$$

$$\emptyset \subset A_i \subset X \qquad \text{all } i \tag{ก.5}$$

เมื่อ $X = \{x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n\}$ คือเซตของข้อมูลทั้งหมด และ c คือจำนวนกลุ่มของข้อมูล กำหนดโดย

$$2 \leq c < n \tag{ก.6}$$

จากสมการที่ ก.6 แสดงให้เห็นว่าเซตของกลุ่มของข้อมูลทั้งหมดจะมีค่าเท่ากับเซตของข้อมูลทั้งหมด ส่วนสมการที่ ก.7 พบว่าแต่ละกลุ่มของข้อมูลจะมีคุณสมบัติที่แยกกันอย่างอิสระ และสมการที่ ก.8 นั้นเป็นการบอกให้ทราบว่ากลุ่มของข้อมูลจะไม่ใช่เซตว่างและไม่ใช่เซตของข้อมูลทั้งหมด

กำหนด μ_{ik} คือค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ซึ่งใช้บอกระดับความน่าจะเป็นที่ x_k จะเป็นสมาชิกของเซต A_i ดังนั้นสมการที่ ก.6, ก.7 และ ก.8 สามารถเขียนให้อยู่ในรูป

$$\bigvee_{i=1}^{c} \mu_{A_i}(x_k) = 1 \quad \text{for all } k \tag{ก.7}$$

$$\mu_{A_i}(x_k) \wedge \mu_{A_j}(x_k) = 0 \quad \text{for all } k \tag{ก.8}$$

$$0 < \sum_{k=1}^{n} \mu_{A_i}(x_k) < n \tag{ก.9}$$

ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเซต A_i คือ

$$\mu_{ij} \doteq \mu_{A_i}(x_k) = \left\{ \begin{array}{ll} 1 & x_k \in A_i \\ 0 & x_k \notin A_i \end{array} \right\} \tag{ก.10}$$

ให้ U เป็น partition matrix ซึ่งเป็นเซตของ $\mu_{ij}(i = 1, 2, \ldots, c; j = 1, 2, \ldots, n)$ ดังนั้น U จึงเป็นเมตริกซ์ c แถว และ n คอลัมน์ กำหนด hard c-partition สำหรับ X คือ

$$M_{hc} = \left\{ U | \mu_{ij} \in \{0, 1\}, \sum_{k=1}^{n} \mu_{ik} = 1, 0 < \sum_{k=1}^{n} \mu_{ik} < n \right\} \tag{ก.11}$$

เมื่อ $U \in M_{hc}$ เป็น hard c-partition ดังนั้น M_{hc} ที่เป็นไปได้ทั้งหมดสามารถคำนวณจาก

$$\eta_{M_{hc}} = \left(\frac{1}{c!}\right) \left[\sum_{i=1}^{c} \left(\begin{array}{c} c \\ i \end{array} \right) (-1)^{c-i} \cdot i^n \right] \tag{ก.12}$$

ขั้นตอนวิธีของ hard c-means มีเป้าหมายเพื่อหาค่า U ซึ่งเป็น partition matrix และ v ซึ่งเป็นจุดศูนย์กลางกลุ่มข้อมูล ที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าต่ำที่สุด

$$J_m(U, v) = \sum_{k=1}^{n} \sum_{i=1}^{c} \mu_{ik} (d_{ik})^2 \tag{ก.13}$$

เมื่อ $d_{ik} \in R^m$ เป็นระยะทางยูคลีเดียนระหว่างข้อมูล x_k และจุดศูนย์กลางของกลุ่มข้อมูล v_i กำหนดโดย

$$d_{ik} = d(x_k - v_i) = \|x_k - v_i\| = \left[\sum_{j=1}^{m} (x_{kj} - v_{ij})^2 \right]^{1/2} \tag{ก.14}$$

ก.1.1 ขั้นตอนวิธีการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี hard c-means

1. กำหนดค่าเริ่มต้นของ $U^0 \in M_{hcm}$ และจำนวนกลุ่มข้อมูล c โดยที่ $2 \leq c < n$ ซึ่งเป็นเงื่อนไขหยุดการทำงานของขั้นตอนวิธี

2. คำนวณหาจุดศูนย์กลางของกลุ่มข้อมูล c

$$v_{ij}^{\ell} = \frac{\sum_{k=1}^{n} \mu_{ik}^{\ell} \cdot x_{kj}}{\sum_{k=1}^{n} \mu_{ik}^{\ell}}$$

เมื่อ $\ell = 0, 1, 2, \ldots$ คือ จำนวนรอบการทำงาน และ $i = 0, 1, 2, \ldots, c$ คือ จำนวนกลุ่มข้อมูล

3. ปรับค่า $U^{(\ell)}$ ไปเป็น $U^{(\ell+1)}$ โดยอาศัยความสัมพันธ์

$$\mu_{ik} = \begin{cases} 1 & \|x_k - v_i^{(\ell)}\| = \min_{j \in c}\{\|x_k - v_j^{(\ell)}\|\} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

4. เปรียบเทียบ $U^{(\ell)}$ และ $U^{(\ell+1)}$ ถ้า

$$\|U^{(\ell+1)} - U^{(\ell)}\| \leq \varepsilon$$

จบการทำงานมิฉะนั้น $\ell = \ell + 1$ จะกลับไปทำในขั้นตอนที่ 2

ก.2 การรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means

การรวมกลุ่มของข้อมูลวิธีนี้ [35] กำหนดเซตฟัซซี $\{A_i, i = 1, 2, \ldots, c\}$ เป็น fuzzy c-partition ของ $X = \{x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n\}$ ดังนั้นค่าความเป็นสมาชิกของแต่ละจุดข้อมูลของเซตฟัซซี โดยความสัมพันธ์ของค่าความเป็นสมาชิกของจุดข้อมูลที่ k กลุ่มที่ i คือ

$$\mu_{ik} = \mu_{Ai}(x_k) \in [0, 1] \tag{ก.15}$$

พบว่าผลรวมของค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมดของข้อมูลเพียงจุดเดียวในทุกกลุ่มจะมีค่าเป็น 1 และไม่มีกลุ่มข้อมูลใดที่เป็นเซตว่างรวมทั้งไม่มีกลุ่มข้อมูลใดที่บรรจุข้อมูลทั้งหมด

$$\sum_{i=1}^{c} \mu_{ik} = 1 \quad \text{for all } k = 1, 2, \ldots, n \tag{ก.16}$$

$$0 < \sum_{k=1}^{n} \mu_{ik} < n \tag{ก.17}$$

เพราะว่าข้อมูลแต่ละตัวสามารถมีค่าความเป็นสมาชิกได้มากกว่า 1 กลุ่ม ดังนั้น

$$\mu_{ik} \wedge \mu_{jk} \neq 0 \tag{ก.18}$$

$$\bigvee_{i=1}^{c} \mu_{A_i}(x_k) = 1 \quad \text{for all k} \tag{ก.19}$$

$$0 < \sum_{k=1}^{n} \mu_{A_i}(x_k) < n \quad \text{for all i} \tag{ก.20}$$

สามารถหาเมตริกซ์ fuzzy partition M_{fc} สำหรับข้อมูลที่มี c กลุ่มและจำนวนข้อมูลเป็น n

$$M_{fc} = \{U|\mu_{ik} \in [0,1]; \sum_{i=1}^{c} \mu_{ik} = 1; 0 < \sum_{k=1}^{n} \mu_{ik} < n\} \quad \text{(ก.21)}$$

เมื่อ $i = 1, 2, \ldots, c$ และ $k = 1, 2, \ldots, n$

ดังนั้นขั้นตอนวิธีของ fuzzy c-means มีเป้าหมายเพื่อหาค่า U ซึ่งเป็น partition matrix และ v ซึ่งเป็นจุดศูนย์กลางกลุ่มข้อมูล ที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าต่ำที่สุด

$$J_m(U, v) = \sum_{k=1}^{n} \sum_{i=1}^{c} (\mu_{ik})^{m'} (d_{ik})^2 \quad \text{(ก.22)}$$

เมื่อ $m' \in [1, \infty]$ คือองค์ประกอบน้ำหนัก และ $d_{ik} \in R^m$ เป็นระยะทางยูคลิเดียนระหว่างข้อมูล x_k และจุดศูนย์กลางของกลุ่มข้อมูล v_i กำหนดโดย

$$d_{ik} = d(x_k - v_i) = \left[\sum_{j=1}^{m} (x_{kj} - v_{ij})^2 \right]^{1/2} \quad \text{(ก.23)}$$

ก.2.1 ขั้นตอนวิธีการรวมกลุ่มข้อมูลแบบวิธี fuzzy c-means

1. กำหนดค่าเริ่มต้นของ $U^0 \in M_{hcm}$ จำนวนกลุ่มข้อมูล c โดยที่ $2 \leq c < n$ และค่าพารามิเตอร์ถ่วงน้ำหนัก $m' \in (1, \infty)$

2. คำนวณหาจุดศูนย์กลางของกลุ่มข้อมูล c

$$v_{ij}^{\ell} = \frac{\sum_{k=1}^{n} (\mu_{ik}^{\ell})^{m'} \cdot x_{kj}}{\sum_{k=1}^{n} (\mu_{ik}^{\ell})^{m'}} \quad 1 \leq k \leq c$$

เมื่อ $\ell = 0, 1, 2, \ldots$ คือ จำนวนรอบการทำงาน

3. ปรับค่า $U^{(\ell)}$ ไปเป็น $U^{(\ell+1)}$ โดยอาศัยความสัมพันธ์

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

4. เปรียบเทียบ $U^{(\ell)}$ และ $U^{(\ell+1)}$ ถ้า

$$\|U^{(\ell+1)} - U^{(\ell)}\| \leq \varepsilon$$

จบการทำงานมิฉะนั้น $\ell = \ell + 1$ จะกลับไปทำในขั้นตอนที่ 2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ตารางค่าอัตราขยายฟัซซี

Zhao [14] เสนอวิธีการสร้างฐานกฎฟัซซีของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี ซึ่งเป็นการอธิบายการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในสภาวะหนึ่งๆ โดยมีโครงสร้างการควบคุมดังรูปที่ ข.1 กำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม P และ D ให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 และ 1 โดย $K_p \in [K_{p,min}, K_{p,max}] \subset \Re$ และ $K_d \in [K_{d,min}, K_{d,max}] \subset \Re$ ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_d สามารถหาได้จาก

$$K'_p = \frac{K_p - K_{p,min}}{K_{p,max} - K_{p,min}} \tag{ข.1}$$

$$K'_d = \frac{K_d - K_{d,min}}{K_{d,max} - K_{d,min}} \tag{ข.2}$$

ค่า K_{min} และ K_{max} สามารถหาได้จากการทดลอง ซึ่งได้แนะนำไว้ [14]

$$K_{p,min} = 0.32K_u, \quad K_{p,max} = 0.6K_u \tag{ข.3}$$

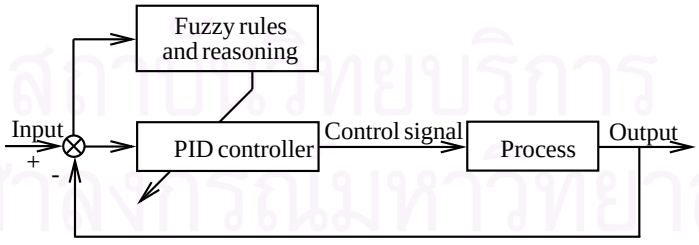
$$K_{d,min} = 0.08K_uT_u, \; K_{d,max} = 0.15K_u \tag{ข.4}$$

เมื่อ K_u และ T_u คือ ค่าอัตราขยายวิกฤต และค่าคาบการแกว่งตัวของสัญญาณออก ตามลำดับ สมมติว่าค่าคงที่ทางเวลาอินทิกรัลมีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ทางเวลาอนุพันธ์ดังสมการ

$$T_i = \alpha T_d$$

ค่าพารามิเตอร์ K_i กำหนดโดย

$$K_i = \frac{K_p}{\alpha T_d} = \frac{K_p^2}{\alpha K_d} \tag{ข.5}$$

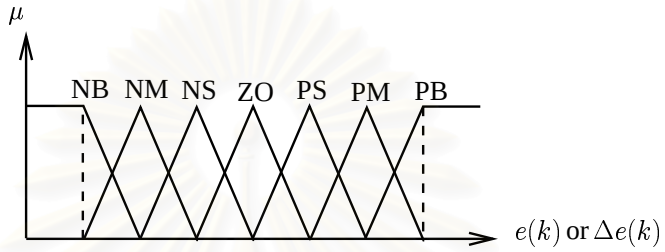


รูปที่ ข.1: โครงสร้างของตัวควบคุม PID แบบกำกับดูแลด้วยตรรกศาสตร์ฟัซซี

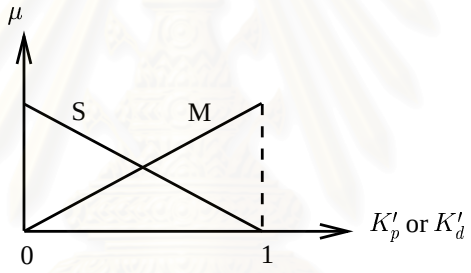
ค่าพารามิเตอร์ที่ถูกปรับจูนโดยระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีคือ K'_p, K'_d และ α ข้อมูลอินพุตของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีคือ สัญญาณค่าผิดพลาด $e(k)$ และการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณค่าผิดพลาด $\Delta e(k)$ และข้อมูลเอาท์พุตของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซีคือ K'_p, K'_d และ α ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของกฎฟัซซี IF-THEN ได้ดังนี้

$$IF\ e(k)\ is\ A^l\ and\ \Delta e(k)\ is\ B^l\ ,\ THEN\ K'_p\ is\ C^m,\ K'_i\ is\ D^m,\ \alpha\ is\ E^n$$

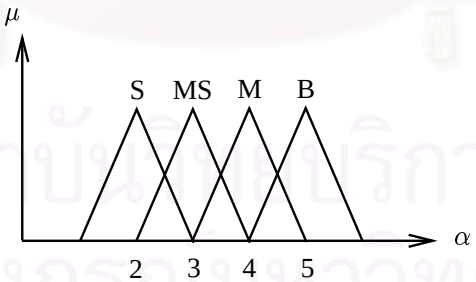
เมื่อ A^l, B^l, C^m, D^m และ E^n คือเซตฟัซซี โดยที่ $l = 1, 2, \ldots, 7; m = 1, 2$ และ $n = 1, \ldots .4$ ซึ่งนิยามตัวแปรเชิงภาษาสำหรับ $e(k)$ และ $\Delta e(k)$ ไว้ 7 ตัว ได้แก่ ค่าลบมาก (NB) ค่าลบปานกลาง (NM) ค่าลบน้อย (NS) ค่าศูนย์ (ZO) ค่าบวกน้อย (PS) ค่าบวกปานกลาง (PM) และค่าบวกมาก (PB) ดังรูปที่ ข.2 สำหรับตัวแปรเชิงภาษาของ K_p' และ K_I' นิยามไว้ 2 ตัวคือ เล็ก (S) และใหญ่ (B) ดังรูปที่ ข.3 และตัวแปรเชิงภาษาของ α นิยามไว้ 4 ตัวคือ ค่าน้อย (2) ค่าปานกลางน้อย (3) ค่าปานกลาง (4) และค่ามาก (5) ดังรูปที่ ข.4



รูปที่ ข.2: ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ $e(k)$ และ $\Delta e(k)$



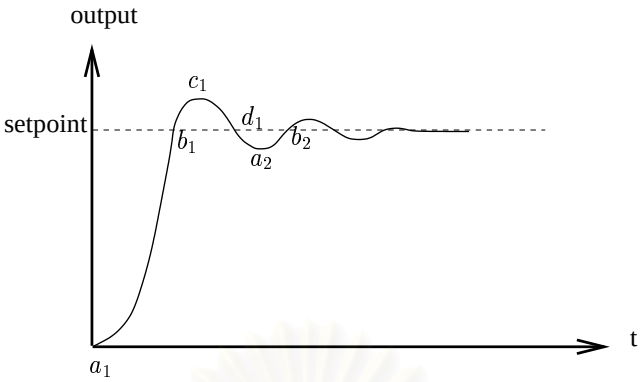
รูปที่ ข.3: ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ K_p' และ K_i'



รูปที่ ข.4: ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ α

เซตฟัซซีข้อมูลอินพุตและเอาท์พุตของระบบตรรกศาสตร์ฟัซซี สามารถหาได้จากผลตอบที่มีเสถียรภาพของกระบวนการต่อสัญญาณแบบขั้นหนึ่งหน่วย เซตฟัซซีที่ได้นำไปสร้างกฎฟัซซี IF-THEN เพื่อที่จะสามารถกำหนดฐานกฎที่เหมาะสมได้ ดังนั้นในการสร้างกฎฟัซซี IF-THEN สามารถทำได้โดยการพิจารณารูปที่ ข.5

ในเวลาเริ่มแรก ช่วง a_1 สัญญาณค่าผิดพลาดมีค่ามาก ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณค่าผิดพลาดมีค่าน้อย เนื่องจากเพิ่งเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณค่าอ้างอิง ที่จุดนี้มีเพียงการควบคุมแบบ



รูปที่ ข.5: ผลตอบต่อสัญญาณแบบขั้นหนึ่งหน่วย

สัดส่วนเท่านั้นที่มีผลต่อผลตอบของระบบ ดังนั้นจึงควรปรับค่าอัตราขยายแบบสัดส่วนให้มีค่ามาก เพื่อให้สัญญาณควบคุมมีค่าสูงซึ่งมีผลให้สัญญาณเอาท์พุตมีค่าถึงค่าที่อ้างอิงโดยเร็ว

ช่วง a_1 ถึง b_1 สัญญาณค่าผิดพลาดเริ่มมีค่าลดลง ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณค่าผิดพลาดเริ่มมีค่าลบมากขึ้น ดังนั้นในช่วงนี้การควบคุมแบบสัดส่วนและการควบคุมแบบอินทิกรัล ทำให้สัญญาณออกมีค่าเพิ่มขึ้นเข้าสู่ค่าที่อ้างอิง ในขณะที่การควบคุมแบบอนุพันธ์ทำหน้าที่เสมือนไปยับยั้งไม่ให้สัญญาณออกมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากที่จุดนี้ต้องการให้สัญญาณออกมีค่าเพิ่มขึ้นอีก จึงควบปรับค่าอัตราขยายแบบอนุพันธ์ให้มีค่าน้อยลงเพื่อไปลดผลการยับยั้งดังกล่าว ขณะที่ควรทำให้อัตราขยายแบบสัดส่วนและอัตราขยายแบบอินทิกรัลมีค่ามากพอเหมาะสำหรับทำให้สัญญาณออกมีค่าเพิ่มขึ้นต่อไป

ช่วง b_1 สัญญาณออกมีค่าเข้าใกล้ค่าอ้างอิง การควบคุมแบบสัดส่วนจึงไม่มีผลต่อผลตอบของระบบ เนื่องจากสัญญาณค่าผิดพลาดมีค่าน้อยมาก การควบคุมที่มีผลต่อผลตอบของระบบคือ การควบคุมแบบอินทิกรัลและการควบคุมแบบอนุพันธ์ นั่นคือการควบคุมแบบอินทิกรัลทำให้สัญญาณออกเพิ่มขึ้น ในขณะที่การควบคุมแบบอนุพันธ์ทำหน้าที่ยับยั้งไม่ให้สัญญาณออกมีค่าเพิ่มขึ้นไปอีกอันเนื่องมาจากอาจมีค่าเกินค่าอ้างอิงมากเกินไป ที่จุดนี้สัญญาณออกไม่ควรมีค่าเพิ่มขึ้นต่อไปอีกเพราะจะทำให้มีส่วนพุ่งเกินสูงสุดมากเกินไป ดังนั้นจึงควรเพิ่มอัตราขยายแบบอนุพันธ์ให้มีค่ามากกว่าปกติ เพื่อให้ทำหน้าที่เหนือการควบคุมแบบอนุพันธ์

วิเคราะห์ลักษณะของผลตอบของกระบวนการต่อสัญญาณแบบขั้นหนึ่งหน่วย ตั้งแต่ช่วง a_1 จนถึง b_1 ดังนั้นสามารถสร้างกฎการควบคุมดังนี้

$$IF\ e(k)\ is\ PB\ and\ \Delta e(k)\ is\ ZO\ ,\ THEN\ K_p'\ is\ B,\ K_d'\ is\ S,\ \alpha\ is\ 2$$

$$IF\ e(k)\ is\ ZO\ and\ \Delta e(k)\ is\ NB\ ,\ THEN\ K_p'\ is\ S,\ K_d'\ is\ B,\ \alpha\ is\ 5$$

สำหรับสัญญาณควบคุม ตั้งแต่ช่วง c_1 จนถึง d_1 ใช้การวิเคราะห์เช่นเดียวกับช่วง a_1 จนถึง b_1 ดังนั้นผลของการพิจารณาสามารถกำหนดกฎฟัซซีได้ทั้งหมด 49 กฎ ทำให้สามารถกำหนดเป็นฐานกฎฟัซซีที่เหมาะสมได้ดังตารางที่ ข.1- ข.3

ตารางที่ ข.1: ฐานกฎฟัซซีสำหรับ 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 ข.2: ฐานกฎฟัซซีสำหรับ K'_d

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

ตารางที่ ข.3: ฐานกฎฟัซซีสำหรับ α

		$\Delta e(k)$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$e(k)$	NB	2	2	2	2	2	2	2
	NM	3	3	2	2	2	3	3
	NS	4	3	3	2	3	3	4
	ZO	5	4	3	3	3	4	5
	PS	4	3	3	2	3	3	4
	PM	3	3	2	2	2	3	3
	PB	2	2	2	2	2	2	2

หลังจากคำนวณหาค่า K'_p, K'_d และ α จึงสามารถหาค่าอัตราขยายของตัวควบคุม PID ได้ดังนี้

$$K_p = (K_{p,max} - K_{p,min})K'_p + K_{p,min} \quad \text{(ข.6)}$$

$$K_d = (K_{d,max} - K_{d,min})K'_d + K_{d,min} \quad \text{(ข.7)}$$

$$K_i = \frac{K_p}{\alpha T_d} = \frac{K_p^2}{\alpha K_d} \quad \text{(ข.8)}$$

ภาคผนวก ค

โครงสร้างหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด

การกลั่นเป็นกระบวนการที่สำคัญอย่างหนึ่งในกระบวนการอุตสาหกรรมเคมี วัตถุประสงค์หลักในการควบคุมการทำงานของหอกลั่นคือ ควบคุมคุณภาพของสารผลิตภัณฑ์ให้เป็นไปตามที่กำหนดไว้ โดยดำเนินการอย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพมากที่สุด ด้วยคุณลักษณะของหอกลั่นที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง มีการกระทำระหว่างวงรอบการควบคุม ทำให้การควบคุมหอกลั่นมีความยุ่งยากซับซ้อน

ค.1 ลักษณะสมบัติของกระบวนการกลั่น

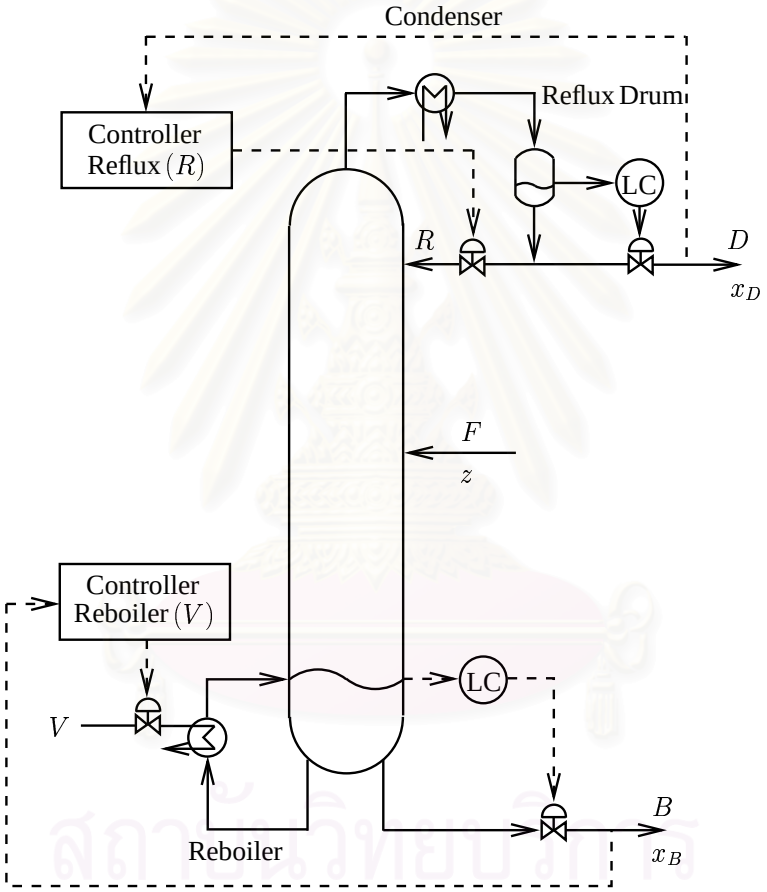
กระบวนการกลั่น คือ กระบวนการแยกสารผสมโดยอาศัยคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ จุดเดือดที่แตกต่างกันของสารต่างชนิดกัน เพื่อให้ได้ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ตามต้องการ เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพได้แก่ จุดเดือด สามารถใช้ในการแยกสารผสมเพื่อให้สารที่กลั่นได้มีความบริสุทธิ์สูง จนมีการประยุกต์ใช้คุณสมบัตินี้และพัฒนาจนมาเป็นหอกลั่นในปัจจุบัน

กล่าวคือเมื่อให้ความร้อนแก่สารผสมที่ก้นหอ จนสารที่เบากว่าซึ่งมีค่าความหนาแน่นจำเพาะต่ำกว่าจุดเดือดต่ำกว่าสารอื่นในสารผสม สารเบานี้จะเดือดกลายเป็นไอร้อน ไอร้อนนี้จึงลอยขึ้นสู่ชั้นที่อยู่สูงขึ้นไปและถ่ายเทความร้อนให้แก่สารที่อยู่ชั้นบนต่อไป ความร้อนนี้ทำให้สารผสมในชั้นบนเดือด ระเหยกลายเป็นไอร้อน และถ่ายเทความร้อนให้กับชั้นบนขึ้นไปอีกเช่นนี้ไปยังชั้นสูงๆขึ้นไป นอกจากนั้นของเหลวที่เป็นสารผสมในชั้นบน ถ้าอุณหภูมิไม่สูงพอที่ระเหยได้ ก็จะไหลวนสวนทางกับไอร้อน เป็นการป้อนกลับภายใน (internal refrux) ลงสู่ชั้นล่างอีกด้วย ทำให้สารผสมในชั้นบนๆมีความบริสุทธิ์ของสารเบาสูงขึ้น และสารที่ก้นหอก็จะมีสารหนักซึ่งมีความบริสุทธิ์สูงขึ้นเช่นกัน

เมื่อเริ่มต้นกระบวนการ เป็นการให้ความร้อนแก่สารผสมที่อยู่ภายในหม้อต้มซ้ำบริเวณฐานหอ จนกระทั่งสารผสมมีอุณหภูมิสูงพอ เกิดการเดือดกลายเป็นไอ ไอของสารผสมนี้จะผ่านเข้าไปยังถาด (tray) ต่างๆภายในหอ และเกิดการกลั่นแบบลำดับส่วนขึ้นภายในแต่ละชั้นไอของสารที่ยอดหอจะมีความเข้มข้นของสารที่จุดเดือดต่ำกว่าเป็นปริมาณมาก และจะผ่านไปยังเครื่องควบแน่นเพื่อทำให้กลายเป็นของเหลว จากนั้นก็ผ่านไปยังวาล์วป้อนกลับสาร (Reflux valve) ยอดหอ เพื่อเป็นการควบคุมความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ยอดหอ ดังนั้นเป้าหมายหลักของการควบคุมกระบวนการของหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิดคือ การควบคุมสารผลิตภัณฑ์ให้มีความเข้มข้นตามที่กำหนดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนสารเข้ากลางหอ

ค.2 โครงสร้างการควบคุม

โครงสร้างการควบคุมของหอกลั่นที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรมมีหลายแบบ [31] ซึ่งแต่ละแบบก็มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป การเลือกโครงสร้างของการควบคุมขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดและลักษณะโครงสร้างของหอกลั่น สารที่ต้องการกลั่น การรบกวนของระบบ ฯลฯ ในที่นี้จะเลือกโครงสร้างการควบคุมแบบ LV ดังรูปที่ ค.1 เพื่อให้สอดคล้องกับโครงสร้างการควบคุมที่สามารถทำได้ของหอกลั่นที่ใช้ในห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม ลักษณะของโครงสร้างแบบนี้คือ จะใช้อัตราส่วนการป้อนกลับ และอัตราการต้มซ้ำ เพื่อควบคุมสารผลิตภัณฑ์ที่ยอดหอ และฐานหอตามลำดับ



รูปที่ ค.1: โครงสร้างการควบคุมหอกลั่นแบบ (L, V)

ข้อดีของโครงสร้างการควบคุมแบบ LV คือ

1. ง่ายต่อการสร้างเป็นระบบเพื่อใช้งานจริง เพราะโครงสร้างไม่ซับซ้อนมากนัก และง่ายต่อการทำความเข้าใจในวิธีการควบคุมของผู้ปฏิบัติการควบคุมกระบวนการกลั่น
2. เมื่อมีการรบกวนเข้าสู่ระบบโดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่ป้อนเข้ากลางหอ พิจารณาระบบวงเปิด ผลตอบของระบบจะมีความไวต่อการรบกวนนี้ไม่มากนักเมื่อเทียบกับโครงสร้างการควบคุมแบบอื่นๆ

ข้อเสียของโครงสร้างการควบคุมแบบ LV คือ

1. มีการกระทำระหว่างวงรอบการควบคุมที่ยอดหอและฐานหอค่อนข้างสูง
2. ระบบมีความไวต่อการรบกวนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนสารค่อนข้างมาก
3. การปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทำได้ไม่ง่ายนัก เพราะมีการเชื่อมโยงกันในวงรอบการควบคุมยอดหอและฐานหอ

ค.3 แบบจำลองหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด

สำหรับแบบจำลองของหอกลั่นแยกสาร 2 ชนิด ใช้แบบจำลองของ Luyben [37] ซึ่งจะมีคุณสมบัติแบบอุดมคติโดยมีสมมติฐานและสิ่งที่ละเลยดังต่อไปนี้

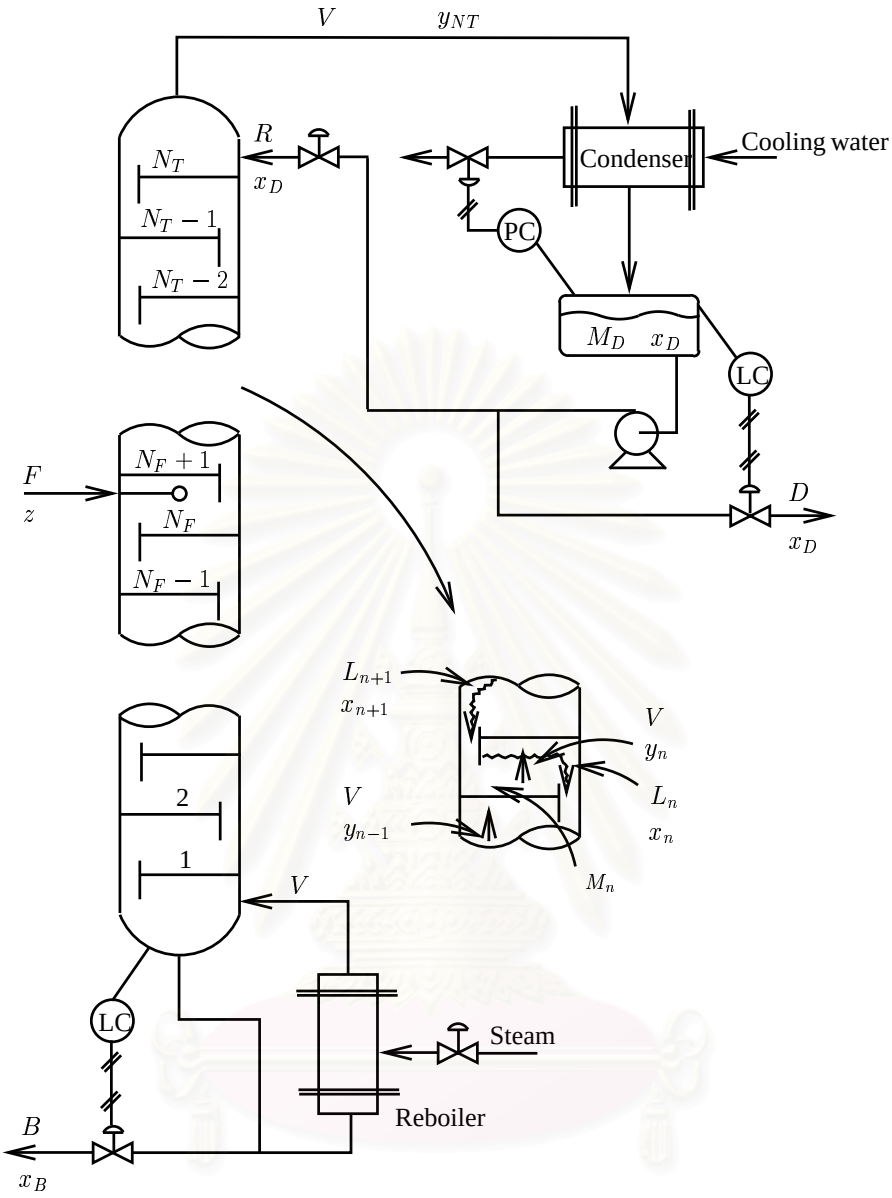
สมมุติฐาน

1. การกลายเป็นไอสัมพัทธ์มีค่าคงที่ (constant relative volatility) ตลอดทั่งหอ และพิจารณาให้ไอที่ออกจากแต่ละชั้นสมดุลกับของเหลวบนชั้นนั้น
2. ของเหลวในหม้อต้มซ้ำและในฐานหอผสมกันอย่างสมบูรณ์ และมีความเข้มข้นเท่ากัน
3. เมื่อไอ 1 โมลกลั่นตัวจะได้เป็นของเหลว 1 โมลด้วย ดังนั้นจึงไม่ต้องมีสมการพลังงาน (Energy equation) สำหรับแต่ละชั้น
4. ไม่คิดการหน่วงเวลาในการเคลื่อนที่ของไอจากด้านบนของหอไปยังเครื่องป้อนเวียนรอบ และจากเครื่องป้อนเวียนรอบกลับไปยังชั้นยอดหอ
5. ไม่มีปริมาณของไอที่ค้างอยู่ในแต่ละชั้น (vapor holdup) ดังนั้นอัตราการไหลของไอจะเท่ากันหมดตลอดทั้งหอ ทั้งช่วงพลวัตและช่วงสถานะอยู่ตัว

$$V = V_1 = V_2 = V_3 = \ldots = V_{N_T}$$

6. ไม่คิดการสูญเสียความร้อนในหอ
7. ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจากชั้นหนึ่งไปสู่อีกชั้นหนึ่ง
8. ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงทางพลวัตของเครื่องควบแน่นและหม้อต้มหมุนเวียน เนื่องจากผลตอบสนองของการแลกเปลี่ยนความร้อนเร็วกว่าผลตอบสนองของหอมาก

จากรูปที่ ค.2 กระบวนการกลั่นเริ่มจากการป้อนสารผสมที่มีความเข้มข้น z เข้าที่กลางหอ (N_F) ด้วย อัตราการป้อนสารเป็น F (โมลต่อนาที) ไอน้ำที่ได้จากชั้นบนสุด (ชั้น N_T) จะไหลผ่านเครื่องควบแน่นเป็นของเหลวไปที่ เครื่องป้อนเวียนรอบ (Reflux drum) ซึ่งบรรจุปริมาณของเหลวเท่ากับ M_D (โมล) และมีความเข้มข้นสารเบาในสถานะของเหลว x_D และถูกส่งกลับไปยังส่วนบนของหอกลั่น (ชั้น N_T) ด้วยอัตรา R และอีกส่วนจะถูกส่งออกไปเป็นผลิตภัณฑ์ยอดหอด้วยอัตรา D ในส่วนของแต่ละชั้น จะมีจำนวนของ



รูปที่ ค.2: แผนภาพหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด

เหลวในชั้นปริมาณ M_n และมีความเข้มข้นในสถานะของเหลวเท่ากับ x_n และมีการระเหยของไอด้วยอัตรา V และมีอัตราการไหลลงของของเหลวด้วยอัตรา L_n ในส่วนก้นของหอกลั่นมีของเหลวปริมาณ M_B ซึ่งคงที่โดยมีความเข้มข้นสารเบา x_B ซึ่งจะถูกป้อนออกเป็นผลิตภัณฑ์ด้วยอัตรา B และถูกส่งไปไปยังหม้อต้มซ้ำ ไอน้ำจากหม้อต้มจะไหลด้วยอัตรา V หลับไปยังก้นหอโดยมีความเข้มข้นในสถานะไอเท่ากับ y_n

จากสมมติฐานดังกล่าวมาแล้ว เราจะเขียนสมการอธิบายระบบซึ่งมีรูปแบบเป็นสมการอนุพันธ์แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณต่างๆ ในระบบ ประกอบด้วยสมการความต่อเนื่องรวม (total continuity) และสมการความต่อเนื่องขององค์ประกอบ (component continuity) ตามลำดับ ซึ่งแยกตามส่วนประกอบของหอกลั่นดังต่อไปนี้

เครื่องควบแน่นและเครื่องป้อนเวียนรอบ

$$\frac{dM_D}{dt} = V - R - D \quad \text{(ค.1)}$$

$$\frac{d(M_D x_D)}{dt} = V y_{N_T} - V x_D \quad \text{(ค.2)}$$

ชั้นบนสุด (ชั้น N_T)

$$\frac{dM_{N_T}}{dt} = R - L_{N_T} \quad \text{(ค.3)}$$

$$\frac{d(M_{N_T} x_{N_T})}{dt} = R x_D - L_{N_T} x_{N_T} + V y_{N_T - 1} - V y_{N_T} \quad \text{(ค.4)}$$

(ค.5)

ชั้นที่ n ของหอกลั่น

$$\frac{dM_n}{dt} = L_{n+1} - L_n \quad \text{(ค.6)}$$

$$\frac{d(M_n x_n)}{dt} = L_{n+1} x_{n+1} - L_n x_n + V y_{n-1} - V y_n \quad \text{(ค.7)}$$

$$L_n = \overline{L}_n + (M_n - \overline{M}_n)/\beta \quad \text{(ค.8)}$$

โดย $\overline{L}_n$และ $\overline{M}_n$ คือค่าเริ่มต้นสถานะคงตัว (initial steady-state) β คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับของเหลวบนถาด

ชั้นที่มีการป้อนสารผสมเข้าสู่หอกลั่นชั้น (N_F)

$$\frac{dM_{N_F}}{dt} = F + L_{N_F+1} - L_{N_F} \quad \text{(ค.9)}$$

$$\frac{d(M_{N_F} x_{N_F})}{dt} = F z + L_{N_F+1} x_{N_F+1} - L_{N_F} x_{N_F} + V y_{N_F-1} - V y_{N_F} \quad \text{(ค.10)}$$

ชั้นแรกของหอกลั่น

$$\frac{dM_1}{dt} = L_2 - L_1 \quad \text{(ค.11)}$$

$$\frac{d(M_1 x_1)}{dt} = L_2 x_2 - L_1 x_1 + V y_B - V y_1 \quad \text{(ค.12)}$$

หม้อต้มซ้ำและฐานของหอกลั่น

$$\frac{dM_B}{dt} = L_1 - V - B \quad \text{(ค.13)}$$

$$\frac{d(M_B x_B)}{dt} = L_1 x_1 - V y_B - B x_B \quad \text{(ค.14)}$$

และความสัมพันธ์สมดุลไอ-ของเหลวของสารผสมคือ

$$y_n = \frac{\alpha x_n}{1 + (\alpha - 1) x_n} \quad \text{(ค.15)}$$

โดยที่

- x_n คือ องค์ประกอบสารเบาในสารผสมสถานะของเหลว
- y_n คือ องค์ประกอบสารเบาในสารผสมสถานะก๊าซ
- α คือค่าความสามารถในการกลายเป็นไอ

ค.4 แบบจำลองหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิดที่ประมาณเป็นเชิงเส้น

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น จึงต้องประมาณให้เป็นระบบเชิงเส้นที่จุดทำงาน ซึ่งจากสมการไม่เชิงเส้นทั้งหมดข้างต้นจะได้แบบจำลองคณิตศาสตร์ดังนี้

เครื่องควบแน่นและเครื่องป้อนเวียนรอบ

$$\begin{aligned} \Delta V &= \Delta R + \Delta D \\ M_D \Delta \dot{x}_D &= -V\Delta x_D + K_{N_T}\Delta x_{20} + (y_{N_T} - x_D)\Delta V \end{aligned} \qquad \text{(ค.16)}$$

ชั้นบนสุด (ชั้น N_T)

$$\begin{aligned} \beta \Delta \dot{L}_{N_T} &= \Delta R - \Delta L_{N_T} \\ M_{N_T} \Delta \dot{x}_{N_T} &= R\Delta x_D - (K_{N_T} + R)\Delta x_{N_T} + K_{N_T-1}\Delta x_{N_T-1} + (x_D - x_{N_T})\Delta R \\ &\quad -(y_{N_T} - y_{N_T-1})\Delta V \end{aligned} \qquad \text{(ค.17)}$$

ชั้นที่ n ของหอกลั่น

$$\begin{aligned} \beta \Delta \dot{L}_{n+1} &= \Delta R - \Delta L_n \\ M_n \Delta \dot{x}_n &= L_{n+1}\Delta x_{n+1} - (K_n + L_{n+1})\Delta x_n + K_{n-1}\Delta x_{n-1} + (x_{n+1} - x_n)\Delta L_{n+1} \\ &\quad -(y_n - y_{n-1})\Delta V \end{aligned} \qquad \text{(ค.18)}$$

ชั้นที่มีการป้อนสารผสมเข้าสู่หอกลั่นชั้น (N_F)

$$\begin{aligned} \beta \Delta \dot{L}_{N_F} &= \Delta L_{N_F+1} - \Delta L_{N_F} + \Delta F \\ M_{N_F} \Delta \dot{x}_{N_F} &= L_{N_F+1}\Delta x_{N_F+1} - (K_{N_F} + L_{N_F+1})\Delta x_{N_F} + K_{N_F-1}\Delta x_{N_F-1} \\ &\quad +(x_{N_F+1} - x_{N_F})\Delta L_{N_F+1} - (y_{N_F} - y_{N_F-1})\Delta V + F\Delta z \qquad \text{(ค.19)} \\ &\quad +(z - x_{N_F})\Delta F \qquad \text{(ค.20)} \end{aligned}$$

ชั้นแรกของหอกลั่น

$$\begin{aligned} \beta \Delta \dot{L}_1 &= \Delta L_2 - \Delta L_1 \\ M_1 \Delta \dot{x}_1 &= L_2\Delta x_2 - (K_1 + L_2)\Delta x_1 + K_B\Delta x_B + (x_2 - x_1)\Delta L_2 - (y_1 - y_B)\Delta V \end{aligned} \qquad \text{(ค.21)}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หม้อต้มซ้ำและฐานของหอกลั่น

$$\begin{aligned} \Delta V &= \Delta L_1 + \Delta B \\ M_B \Delta \dot{x}_B &= L_1 \Delta x_1 - (K_B + B)\Delta x_B + x_1 \Delta L_1 - y_B \Delta V \end{aligned} \quad \text{(ค.22)}$$

โดยที่

$$K_n = \frac{\alpha V}{(1+(\alpha-1)x_n)^2}\ ,\ n = 1, 2, 3, ..., N_T \quad \text{(ค.23)}$$

$$K_B = \frac{\alpha V}{(1+(\alpha-1)x_B)^2} \quad \text{(ค.24)}$$

เมื่อตัวแปรทั้งหมดคือ

- M_D คือ ปริมาณของของเหลวในเครื่องป้อนเวียนรอบ
- M_B คือ ปริมาณของของเหลวในฐานหอกลั่น
- M_n คือ ปริมาณของของเหลวในแต่ละชั้น
- x_n คือ องค์ประกอบสารในสารผสมในสถานะของเหลว
- y_n คือ องค์ประกอบสารในสารผสมในสถานะก๊าซ
- L_n คือ อัตราไหลของของเหลวในแต่ละชั้น
- D คือ อัตราการไหลของสารผลิตภัณฑ์ตอนบน
- B คือ อัตาการไหลของสารผลิตภัณฑ์ตอนล่าง
- F คือ อัตราการป้อนเข้าของสารที่กลางหอ
- z คือ องค์ประกอบของสารที่ป้อนเข้ากลางหอ
- V คือ อัตราการป้อนกลับสารที่กลางหอ
- R คือ อัตราการป้อนกลับสารที่ยอดหอ
- x_D คือ สารผลิตภัณฑ์ที่ยอดหอ
- x_B คือ สารผลิตภัณฑ์ที่ฐานหอ
- α คือ ค่าความสามารถในการกลายเป็นไอสัมพัทธ์

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ประมาณเป็นเชิงเส้นแล้วนั้น นำมาทำการหาแบบจำลองในรูปปริภูมิสถานะ โดยการแทนค่าจุดทำงานของหอกลั่นแบบแยกสารผสมสองชนิดลงไปในแบบจำลองที่ได้ทำการประมาณเป็นเชิงเส้นแล้ว ได้แบบจำลองในรูปปริภูมิสถานะโดยมีตัวแปรสถานะทั้งหมด 42 ตัว แบ่งออกเป็น 3 ส่วน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- ตัวแปรที่ต้องการควบคุม คือ Δx_D และ Δx_B
- ตัวแปรสถานะของระบบ คือ Δx_D, Δx_1,..., Δx_{20}, Δx_B และ ΔL_1,..., ΔL_{20}
- ตัวแปรที่เป็นสัญญาณเข้า คือ ΔR และ ΔV

แบบจำลองทั่วไปในรูปปริภูมิสถานะ คือ

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + D \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ A, B, C และ B นำไปหาฟังก์ชันถ่ายโอนจากสัญญาณเข้าไปยังสัญญาณออก โดยที่ระบบนี้เป็นระบบ MIMO ดังนั้นสามารถเขียน steady state model ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \triangle x_D \\ \triangle x_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \triangle R \\ \triangle V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{1F} \\ G_{2F} \end{bmatrix} \triangle F$$

ตารางที่ ค.1: ค่าเริ่มต้นที่ภาวะสมดุล และพารามิเตอร์ต่างๆของหอกลั่นแยกสารผสมสองชนิด (ข้อมูลจาก Perry Chemical Handbook)

ค่าคงที่		ความเข้มข้นเฟสของเหลวแต่ละชั้น
$M_D = 100$	lb-mol	$x_D = 0.98000$
$M_B = 100$	lb-mol	$x_{20} = 0.96079$
$\alpha = 2$		$x_{19} = 0.93458$
$\beta = 0.1$	min.	$x_{18} = 0.89995$
$N_T = 20$	ชั้นที่	$x_{17} = 0.85603$
$N_F = 10$	ชั้นที่	$x_{16} = 0.80319$
ค่าคงที่แต่ละชั้น		$x_{15} = 0.74345$
$L_n = 128.01,\ n = 11, \ldots, 20$	(lb-mol)/min.	$x_{14} = 0.68052$
$= 228.01,\ n = 1, \ldots, 10$	(lb-mol)/min.	$x_{13} = 0.61896$
$M_n = 10$	lb-mol	$x_{12} = 0.56295$
ค่า set point		$x_{11} = 0.51526$
$x_D^{set} = 0.98$		$x_{10} = 0.47688$
$x_B^{set} = 0.02$		$x_9 = 0.43391$
ค่าจากภายนอก		$x_8 = 0.37948$
$F = 100$	(lb-mol)/min.	$x_7 = 0.31618$
$z = 0.5$	(lb-mol)/min.	$x_6 = 0.24951$
ค่าอื่นๆ		$x_5 = 0.18622$
$D = 50$	(lb-mol)/min.	$x_4 = 0.13180$
$B = 50$	(lb-mol)/min.	$x_3 = 0.08885$
$V = 178.01$	(lb-mol)/min.	$x_2 = 0.05719$
$R = 128.01$	(lb-mol)/min.	$x_1 = 0.03500$
		$x_D = 0.02000$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกรรณวัฒน์ สมสังข์ เกิดเมื่อวันที่ 11 เมษายน พ.ศ. 2522 ที่อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา เป็นบุตรของ นายธีระพงศ์ สมสังข์ และ นางสมจิตร สมสังข์ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เมื่อปีการศึกษา 2543 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2544

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

Somsung, K.; and Pratishthananda, S.; “Constructing fuzzy structure using fuzzy c-means clustering combined with fuzzy gain scheduling” the 5th Asian Control Conf. (ASCC2004) July 2004, Melbourne, Australia, to be appeared.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย