ตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ของระบบพีเอชโดยใช้วิธีการ
สร้างแบบจำลองฟัซซีของทากาจิและสุจิโน

นางสาวณิชาพัชร พัชรรุ่งเรือง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545
ISBN 974-17-1688-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ADAPTIVE CONTROLLER OF PH SYSTEM USING TAKAGI-SUGENO FUZZZY MODELING METHOD

Miss Nichapat Patchararungruang

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering
Department of Chemical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2002
ISBN 974-17-1688-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ของระบบพีเอชโดยใช้วิธีการสร้างแบบจำลองฟัซซีของทากาจิและสุจีโน
โดย	นางสาวณิชาพัชร พัชรรุ่งเรือง
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.ปิยะสาร ประเสริฐธรรม)

.... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี)

.... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร)

.... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธงไชย ศรีนพคุณ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ณิชาพัชร พัชรรุ่งเรือง: ตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ของระบบพีเอชโดยวิธีการสร้างแบบจำลองฟัซซีของทากาจิและสุจีโน. (ADAPTIVE CONTROLLER OF PH SYSTEM USING TAKAGI-SUGENO FUZZY MODELING METHOD) อ.ที่ปรึกษา: ดร.มนตรี วงศ์ศรี, 122 หน้า. ISBN 974-17-1688-5.

งานวิจัยนี้เป็นการสร้างแบบจำลองฟัซซีของทากาจิและสุจีโนแบบแบ่งย่านการทำงาน โดยใช้ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทของกระบวนการผ่านอัลกอริธึมของฟัซซีคลัสเตอริงและวิธีลีสท์สแควร์ แบ่งการทดสอบการแบ่งย่านการทำงานเป็น 2 กรณีศึกษา ซึ่งพบว่าแบบจำลองที่ได้จากการแบ่งย่านด้วยอัลกอริธึมของฟัซซีคลัสเตอริงสามารถทำนายพฤติกรรมของกระบวนการได้ดีกว่าการแบ่งย่านโดยการสังเกตความไม่เป็นเชิงเส้นของกระบวนการ จากนั้นนำแบบจำลองที่ได้ใช้เป็นแบบจำลองภายในสำหรับการควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองภายในแบบแบ่งย่านการทำงาน การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีกระทำโดยการผกผันแบบจำลองฟัซซีของกระบวนการ ซึ่งผลการตอบสนองของตัวควบคุมเป็นการรวมกันของผลการตอบสนองในแต่ละย่านการทำงาน วิธีการนี้ประยุกต์ใช้กับการควบคุมค่าพีเอชในถังปฏิกรณ์ต่อเนื่อง ซึ่งเป็นระบบที่มีคุณลักษณ์ไม่เป็นเชิงเส้น โดยแบ่งการทดสอบตัวควบคุมออกเป็น 3 กรณี คือกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย ซึ่งจะทำการควบคุมที่ค่าสภาวะปกติ 3 ค่า คือ ค่าพีเอช 5, 7 และ 9 แล้วทำการเปลี่ยนค่าเป้าหมายไปจากสภาวะปกติ ± 0.5 กรณีที่มีการรบกวนระบบเป็นการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของกรดและความเข้มข้นของกรดไป $\pm 10\%$ และกรณีที่ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการผิดพลาด โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพื่อให้ค่าคงที่ของสมดุลไอออนในน้ำเปลี่ยนแปลงไป จากการศึกษาพบว่าตัวควบคุมฟัซซีที่ได้มีสมรรถนะในการควบคุมที่ดี เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอแบบกำหนดเกนต่างๆ กัน สามารถควบคุมค่าพีเอชให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้แม้ว่าจะมีตัวแปรรบกวนหรือพารามิเตอร์ของกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลง และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายระบบสามารถปรับตัวเข้าสู่ค่าเป้าหมายใหม่ได้เป็นอย่างดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่อนิสิต ....
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ....
ปีการศึกษา	2545	

4270326421: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: FUZZY MODELING / FUZZY CONTROL / PH CONTROL

NICHAPAT PATCHARARUNGRUANG: ADAPTIVE CONTROLLER OF PH SYSTEM USING TAKAGI-SUGENO FUZZY MODELING METHOD. THESIS ADVISER: DR.MONTREE WONGSRI, 122 pp. ISBN 974-17-1688-5.

This research concerns the design and implementation of fuzzy model-based controller for non-linear system. The process of study is nitric acid and sodium hydroxide neutralization system. The modeling of the process was using Takagi-Sugeno method. The partition of the domain of the process is devised 2 cases namely, c-mean clustering and manual partitioning. It was found that the model derived using of c-mean clustering method make a better prediction for the process behavior than the manual partitioning method. Then c-mean clustering model was used for constructing internal model controller with multi-region control scheme. For IMC, the fuzzy controller was obtained by inverting fuzzy model, which the controller output was the combination of all region outputs. The controller was used to control pH system. Investigated in this research were conducted in 3 cases. Firstly changing set points control system from 3 different values 5, 7, and 9 to new values (±0.5), secondly disturbing the system by changing flow rate and concentration of acid ±10%, thirdly testing the model mismatch by changing equilibrium the parameter of the model namely, the constant of ion in water. The performance is compared with a PI gain-scheduling controller. The fuzzy controller performed better than a PI gain-scheduling controller in all case.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department	Chemical Engineering	Student's signature ....
Field of study	Chemical Engineering	Adviser's signature ....
Academic year	2002	

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยความช่วยเหลือของอาจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้ข้อแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์มา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ปิยะสาร ประเสริฐธรรม รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธงไชย ศรีนพคุณ ที่กรุณามาร่วมเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ นางสาววิศณีย์ ตั้งยืนยง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้วยดี ตลอดจนเพื่อนๆ รุ่นพี่ รุ่นน้อง และบุคคลอื่นที่ไม่ได้กล่าวในที่นี้ ที่คอยแลกเปลี่ยนความคิดเห็นและเป็นกำลังใจมาโดยตลอด

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบุพการีที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจอย่างดีมาตลอดจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .... ง
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .... จ
กิตติกรรมประกาศ .... ฉ
สารบัญ .... ช
สารบัญภาพ .... ฎ
สารบัญตาราง .... ณ

บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3
1.6 เนื้อหาวิทยานิพนธ์ 3

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาฟัซซีลอจิกและแบบจำลองฟัซซี 5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมฟัซซี 8
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับตัวได้ 9
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวของกับการใช้ตัวควบคุมฟัซซีควบคุมระบบพีเอช 12

บทที่ 3 แบบจำลองฟัซซี 14
3.1 บทนำ 14
3.2 แบบจำลองฟัซซี 14
3.3 แบบจำลองฟัซซีสำหรับระบบสถิตย์ 16
3.3.1 แบบจำลองฟัซซีเชิงภาษา 16
3.3.2 แบบจำลองความสัมพันธ์ฟัซซี 17
3.3.3 แบบจำลองฟัซซีทากาจิ-สุจีโน 19

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4 แบบจำลองฟัซซีสำหรับระบบไดนามิก 20
3.4.1 แบบจำลองสเตทสเปซ 20
3.4.2 แบบจำลองอินพุท-เอาท์พุท 21
3.4.3 แบบจำลองผสม 22
3.5 วิธีการสร้างแบบจำลองฟัซซี 22
3.5.1 แบบจำลองฟัซซีจากความรู้และประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ 23
3.5.2 แบบจำลองฟัซซีจากข้อมูลเชิงตัวเลขของกระบวนการ และเทคนิคการระบุหา 23
3.6 เทคนิคการระบุหาแบบจำลองฟัซซี 23
3.6.1 การระบุหาโครงสร้างของแบบจำลอง 24
3.6.2 การระบุหาพารามิเตอร์ของแบบจำลอง 25
3.7 ฟัซซีคลัสเตอริง 27
3.7.1 ฟัซซีคลัสเตริงแบบซี-มีน 28
3.7.2 อัลกอริธึมของคลัสเตอริงแบบซี-มีน 30

บทที่ 4 ตัวควบคุมฟัซซี 32
4.1 บทนำ 32
4.2 วิธีการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีลอจิก 32
4.3 ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบผู้เชี่ยวชาญ 34
4.4 ตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลอง 36
4.5 ตัวควบคุมฟัซซีแบบแบ่งย่านการทำงาน 38

บทที่ 5 การระบุหาและทดสอบแบบจำลองฟัซซีของกระบวนการที่ศึกษา 41
5.1 กระบวนการที่ศึกษา 41
5.2 การสร้างแบบจำลองฟัซซี 45
5.2.1 การกำหนดตัวแปรของแบบจำลองฟัซซี 45
5.2.2 การกำหนดจำนวนกฎฟัซซีในแบบจำลองฟัซซี 46

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2.3 การกำหนดฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปรในส่วนเงื่อนไข
ของกฎฟัซซี 47
5.2.4 การระบุหาพารามิเตอร์ในส่วนผลของกฎฟัซซี 47
5.2.5 การทดสอบแบบจำลองฟัซซี 47
5.3 การระบุหาแบบจำลองฟัซซีในแต่ละกรณีศึกษา 47
5.3.1 กรณีศึกษาที่ 1 44
5.3.2 กรณีศึกษาที่ 2 61
5.4 ผลการทดสอบแบบจำลองฟัซซีในแต่ละกรณีศึกษา 74
5.5 การวิเคราะห์ผลการระบุหาและทดสอบแบบจำลองฟัซซี 76

บทที่ 6 การออกแบบและการทดสอบตัวควบคุมฟัซซี 78
6.1 การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลอง
ของระบบควบคุมค่าพีเอช 78
6.2 ตัวควบคุมพีไอแบบกำหนดเกนต่างๆ กัน 81
6.3 การทดสอบตัวควบคุม 81
6.3.1 กรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย 82
6.3.2 กรณีที่มีการรบกวนระบบ 94
6.3.3 กรณีที่ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการ
ผิดพลาด 98
6.4 การวิเคราะห์ผลการออกแบบและทดสอบตัวควบคุมฟัซซี 103

บทที่ 7 สรุปผลงานวิจัย 105
7.1 สรุปผลงานวิจัย 105
7.1.1 การสร้างแบบจำลองฟัซซี 105
7.1.2 การควบคุมด้วยตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลอง 106
7.2 ข้อเสนอแนะ 108

รายการอ้างอิง 109

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก 112
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 122

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 3.1 วิธีการกำหนดฟังก์ชันสมาชิกจากฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์ 25

รูปที่ 3.2 การระบุหากฎฟัซซีโดยวิธีคลัสเตอริง 28

รูปที่ 3.3 แผนผังการทำงานของการกำหนดจำนวนกฎฟัซซีที่เหมาะสม 31

รูปที่ 4.1 โครงสร้างโดยทั่วไปของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก 35

รูปที่ 4.2 โครงสร้างตัวควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองภายใน 37

รูปที่ 4.3 ความไม่เป็นเชิงเส้นของกระบวนการที่มีค่าเกนต่างกัน 39

รูปที่ 4.4 โครงสร้างตัวควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองภายใน
แบบแบ่งย่านการทำงาน 40

รูปที่ 5.1 ระบบควบคุมค่าพีเอช 42

รูปที่ 5.2 กราฟการไตเตรทของกรดและด่าง 43

รูปที่ 5.3 ค่าเกนของระบบพีเอช 44

รูปที่ 5.4 ย่านข้อมูลที่ได้จากการสังเกต 48

รูปที่ 5.5 ฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปรช่วยสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 49

รูปที่ 5.6 ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองฟัซซี
สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 1 49

รูปที่ 5.7 ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองฟัซซี
สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 2 50

รูปที่ 5.8 ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองฟัซซี
สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 3 50

รูปที่ 5.9 ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองฟัซซี
สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 4 51

รูปที่ 5.10 ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองฟัซซี
สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 5 51

รูปที่ 5.11 กราฟระหว่างค่าพีเอชกับฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์สำหรับกรณีศึกษาที่ 1
ย่านที่ 1 52

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.12 กราฟระหว่างค่าพีเอชกับฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 2 53
รูปที่ 5.13 กราฟระหว่างค่าพีเอชกับฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 3 53
รูปที่ 5.14 กราฟระหว่างค่าพีเอชกับฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 4 54
รูปที่ 5.15 กราฟระหว่างค่าพีเอชกับฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 5 54
รูปที่ 5.16 ฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไขของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 1 55
รูปที่ 5.17 ฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไขของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 2 55
รูปที่ 5.18 ฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไขของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 3 56
รูปที่ 5.19 ฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไขของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 4 56
รูปที่ 5.20 ฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไขของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 5 57
รูปที่ 5.21 กราฟระหว่างตัวแปรช่วยกับฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 61
รูปที่ 5.22 ฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปรช่วยสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 62
รูปที่ 5.23 ย่านข้อมูลที่ได้จากอัลกอริธึมของฟัซซีคลัสเตอริง 62
รูปที่ 5.24 ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองฟัซซี สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 1 63
รูปที่ 5.25 ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองฟัซซี สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 2 63

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.26 ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองฟัซซี
สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 3 64
รูปที่ 5.27 ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองฟัซซี
สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 4 64
รูปที่ 5.28 ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองฟัซซี
สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 5 65
รูปที่ 5.29 กราฟระหว่างค่าพีเอชกับฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์สำหรับกรณีศึกษาที่ 2
ย่านที่ 1 66
รูปที่ 5.30 กราฟระหว่างค่าพีเอชกับฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์สำหรับกรณีศึกษาที่ 2
ย่านที่ 2 66
รูปที่ 5.31 กราฟระหว่างค่าพีเอชกับฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์สำหรับกรณีศึกษาที่ 2
ย่านที่ 3 67
รูปที่ 5.32 กราฟระหว่างค่าพีเอชกับฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์สำหรับกรณีศึกษาที่ 2
ย่านที่ 4 67
รูปที่ 5.33 กราฟระหว่างค่าพีเอชกับฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์สำหรับกรณีศึกษาที่ 2
ย่านที่ 5 68
รูปที่ 5.34 ฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไขของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 2
ย่านที่ 1 68
รูปที่ 5.35 ฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไขของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 2
ย่านที่ 2 69
รูปที่ 5.36 ฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไขของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 2
ย่านที่ 3 69
รูปที่ 5.37 ฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไขของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 2
ย่านที่ 4 70
รูปที่ 5.38 ฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไขของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 2
ย่านที่ 5 70

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.39 ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทของกระบวนการที่ใช้ทดสอบแบบจำลองฟัซซี 75

รูปที่ 5.40 ผลการทดสอบแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 75

รูปที่ 5.42 ผลการทดสอบแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 76

รูปที่ 6.1 โครงสร้างตัวควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองภายในแบบแบ่งย่านการทำงานของกระบวนการควบคุมพีเอช 79

รูปที่ 6.2 แผนผังการควบคุมด้วยตัวควบคุม AFLC 80

รูปที่ 6.3 ภาพขยายจากกรอบเส้นประในรูปที่ 6.2 80

รูปที่ 6.4 ผลการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายแบบ Hussain 83

รูปที่ 6.5 ผลการควบคุมของตัวควบคุมพีไอเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายแบบ Hussain 83

รูปที่ 6.6 ผลการควบคุมของตัวควบคุม AFLC เมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายแบบ Hussain 84

รูปที่ 6.7 ผลการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 5 เป็น 4.5 85

รูปที่ 6.8 ผลการควบคุมของตัวควบคุมพีไอเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 5 เป็น 4.5 85

รูปที่ 6.9 ผลการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 5 เป็น 5.5 86

รูปที่ 6.10 ผลการควบคุมของตัวควบคุมพีไอเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 5 เป็น 5.5 86

รูปที่ 6.11 ภาพขยายของรูปที่ 6.9 87

รูปที่ 6.12 ภาพขยายของรูปที่ 6.10 87

รูปที่ 6.13 ผลการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 7 เป็น 6.5 88

รูปที่ 6.14 ผลการควบคุมของตัวควบคุมพีไอเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 7 เป็น 6.5 88

รูปที่ 6.15 ภาพขยายของรูปที่ 6.13 89

รูปที่ 6.16 ภาพขยายของรูปที่ 6.14 89

รูปที่ 6.17 ผลการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 7 เป็น 7.5 90

รูปที่ 6.18 ผลการควบคุมของตัวควบคุมพีไอเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 7 เป็น 7.5 90

รูปที่ 6.19 ผลการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 9 เป็น 8.5 91

รูปที่ 6.20 ผลการควบคุมของตัวควบคุมพีไอเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 9 เป็น 8.5 91

รูปที่ 6.21 ภาพขยายของรูปที่ 6.19 92

รูปที่ 6.22 ภาพขยายของรูปที่ 6.20 92

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 6.23 ผลการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 9 เป็น 9.5 93
รูปที่ 6.24 ผลการควบคุมของตัวควบคุมพีไอเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 9 เป็น 9.5 93
รูปที่ 6.25 ผลการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีเมื่ออัตราการไหลของกรดลดลง 10% 94
รูปที่ 6.26 ผลการควบคุมของตัวควบคุมพีไอเมื่ออัตราการไหลของกรดลดลง 10% 95
รูปที่ 6.27 ผลการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีเมื่ออัตราการไหลของกรดเพิ่มขึ้น 10% 95
รูปที่ 6.28 ผลการควบคุมของตัวควบคุมพีไอเมื่ออัตราการไหลของกรดเพิ่มขึ้น 10% 96
รูปที่ 6.29 ผลการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีเมื่อความเข้มข้นของกรดลดลง 10% 96
รูปที่ 6.30 ผลการควบคุมของตัวควบคุมพีไอเมื่อความเข้มข้นของกรดลดลง 10% 97
รูปที่ 6.31 ผลการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีเมื่อความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้น 10% 97
รูปที่ 6.32 ผลการควบคุมของตัวควบคุมพีไอเมื่อความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้น 10% 98
รูปที่ 6.33 ผลการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่อุณหภูมิ 30 ^{O}C 99
รูปที่ 6.34 ผลการควบคุมของตัวควบคุมพีไอเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่อุณหภูมิ 30 ^{O}C 99
รูปที่ 6.35 ผลการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่อุณหภูมิ 40 ^{O}C 100
รูปที่ 6.36 ผลการควบคุมของตัวควบคุมพีไอเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่อุณหภูมิ 40 ^{O}C 100
รูปที่ 6.37 ผลการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่อุณหภูมิ 30 ^{O}C
และความเข้มข้นของกรดลดลง 10% 101
รูปที่ 6.38 ผลการควบคุมของตัวควบคุมพีไอเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่อุณหภูมิ 30 ^{O}C
และความเข้มข้นของกรดลดลง 10% 101
รูปที่ 6.39 ผลการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่อุณหภูมิ 30 ^{O}C
และความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้น 10% 102
รูปที่ 6.40 ผลการควบคุมของตัวควบคุมพีไอเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่อุณหภูมิ 30 ^{O}C
และความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้น 10% 102

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 5.1 สภาวะในการปฏิบัติการของระบบ 44

ตารางที่ 5.2 ค่าความผิดพลาดของแบบจำลองที่มีโครงสร้างอินพุท และเอาท์พุทแบบต่างๆ 46

ตารางที่ 5.3 จำนวนกฎที่เหมาะสมในแต่ละย่านสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 52

ตารางที่ 5.4 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 1 57

ตารางที่ 5.5 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 2 58

ตารางที่ 5.6 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 3 58

ตารางที่ 5.7 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 4 58

ตารางที่ 5.8 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 5 59

ตารางที่ 5.9 จำนวนกฎที่เหมาะสมในแต่ละย่านสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 65

ตารางที่ 5.10 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 1 71

ตารางที่ 5.11 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 2 71

ตารางที่ 5.12 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 3 72

ตารางที่ 5.13 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 4 72

ตารางที่ 5.14 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 5 72

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 6.1 แฟกเตอร์การสเกลของตัวควบคุม AFLC 80
ตารางที่ 6.2 สมการค่าเกนของกระบวนการในแต่ละย่านการทำงาน 81
ตารางที่ 7.1 ผลการควบคุมเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและมีตัวแปรรบกวน 107
ตารางที่ 7.2 ผลการควบคุมเมื่อค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง
ของกระบวนการผิดพลาด 107

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันนี้การนำความรู้ด้านปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligent) ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานหลายด้าน ได้แก่ งานด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิค หุ่นยนต์ อุปกรณ์ไฟฟ้า งานวิจัยในตลาดหลักทรัพย์ การแพทย์ และ งานด้านวิศวกรรมต่างๆ ระบบฟัซซีลอจิกเป็นสาขาหนึ่งในงานด้านปัญญาประดิษฐ์นี้ ซึ่งมีการนำมาใช้เป็นตัวควบคุมในเครื่องซักผ้า เครื่องปรับอากาศ กล้องถ่ายรูปอัตโนมัติ และไมโครโปรเซสเซอร์ เป็นต้น

ที่ผ่านมาการควบคุมกระบวนการแบบต่อเนื่องโดยทั่วไปมักใช้ตัวควบคุมแบบเชิงเส้นชนิดพีไอดี (Proportional integral derivative; PID) เนื่องจากตัวควบคุมแบบนี้มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและง่ายต่อการปรับค่า ดังนั้นจึงเหมาะกับการควบคุมกระบวนการที่มีคุณลักษณ์ไม่ซับซ้อนหรือมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก แต่สำหรับกระบวนการที่มีความซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้นสูง การควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอดี ให้ผลไม่เป็นที่น่าพอใจนัก

การควบคุมด้วยระบบฟัซซีได้รับการพัฒนาขึ้นมาให้มีลักษณะเฉพาะที่สามารถจัดการกับปัญหาที่มีความสลับซับซ้อน ระบบที่ไม่สามารถนิยามได้ รวมไปถึงระบบที่ไม่สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ หรือระบบที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่สามารถให้ความแม่นยำเพียงพอ นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมได้ดีพอๆ กับผู้ควบคุมที่เป็นมนุษย์ ในกรณีที่การควบคุมแบบดั้งเดิมไม่สามารถควบคุมได้หรือควบคุมได้ไม่ดีพอ

แบบจำลองฟัซซีสามารถออกแบบได้โดยตรงจากความรู้และประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ แต่ในบางครั้งอาจขาดข้อมูลความรู้หรือความเข้าใจในบางส่วนของกระบวนการ หรือผู้เชี่ยวชาญอาจออกแบบกฎได้ไม่ครอบคลุมทั้งหมด การสร้างแบบจำลองฟัซซีจากข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทจำเป็นต้องอาศัยเทคนิคการระบุหาแบบจำลอง (Identification) เทคนิคการระบุหาแบบจำลองมีหลายเทคนิค เช่น ฟัซซีคลัสเตอริง (Fuzzy clustering) วิธีเรียนรู้แบบนิวรัล (Neural learning method) ออร์โธโกนัลลีสท์สแควร์ (Orthogonal least squares) เป็นต้น การที่จะเลือกใช้วิธีใดนั้นขึ้นอยู่กับข้อมูลเริ่มต้นที่มีอยู่ ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่เราไม่ทราบฟังก์ชันสมาชิกของฟัซซีเซตอ้างอิง สามารถประยุกต์ใช้ฟัซซีคลัสเตอริงเพื่อหาฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปรได้ ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาและประยุกต์ใช้วิธีฟัซซีคลัสเตอริงเพื่อระบุหาแบบจำลองฟัซซี

เนื่องจากว่าระบบที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทางเคมีนั้นเป็นระบบที่มีคุณลักษณ์ไม่เป็นเชิงเส้นทั้งสิ้น รวมทั้งระบบพีเอชที่นอกจากจะมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงแล้วค่าเกนของกระบวนการยังแตกต่างกันไปในแต่ละย่านการทำงาน ทำให้ยากต่อการควบคุม ในการนี้จึงได้มีการพัฒนาตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ที่สามารถปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของการควบคุมไปตามลักษณะของกระบวนการ ซึ่งตัวควบคุมฟัซซีก็ได้มีการพัฒนาเป็นตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับตัวได้ที่ค่าพารามิเตอร์และจำนวนกฎสามารถปรับเปลี่ยนได้ ที่ผ่านมาการควบคุมระบบพีเอชโดยใช้หลักการของฟัซซีลอจิกมักจะออกแบบโดยอาศัยความรู้ของผู้เชี่ยวชาญโดยตรงร่วมกับการแบ่งย่านการทำงานและจะทำการเลือกใช้กฎให้ตรงกับย่านของกระบวนการ เพื่อรักษาสมรรถนะของระบบให้เป็นไปอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งกระบวนการ ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาการสร้างแบบจำลองฟัซซีจากข้อมูลเชิงตัวเลขของกระบวนการร่วมกับการแบ่งย่านการทำงานจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถทำได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อนำหลักการทฤษฎีฟัซซีลอจิกมาประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลองฟัซซีด้วยวิธีการของทากาจิและสุจีโน และออกแบบตัวควบคุมแบบปรับตัวได้สำหรับระบบพีเอช

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สร้างแบบจำลองฟัซซีจากข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทโดยใช้วิธีคลัสเตอริงและลีสท์สแควร์
2. ออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลองแบบแบ่งย่านการทำงานของระบบพีเอช
3. แบบจำลองและตัวควบคุมที่สร้างขึ้นเขียนด้วยโปรแกรมแมทแลบ (MATLAB)

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ค้นคว้าเอกสารและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. สร้างโปรแกรมเลียนแบบระบบพีเอช
3. สร้างแบบจำลองฟัซซีโดยเขียนโปรแกรมระบุหาโครงสร้างและพารามิเตอร์ของแบบจำลอง
4. ทดสอบแบบจำลองฟัซซีที่สร้างขึ้น

5. สร้างโปรแกรมตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลองแบบแบ่งย่านการทำงาน
6. ทดสอบและเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมฟัซซีกับตัวควบคุมพีไอ
7. วิเคราะห์และสรุปงานวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจวิธีการระบุหาแบบจำลองฟัซซีและการควบคุมกระบวนการ
2. นำวิธีการสร้างแบบจำลองและตัวควบคุมนี้ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม

1.6 เนื้อหาวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 7 บท บทที่ 1 กล่าวถึงความสำคัญและที่มาของงานวิจัยที่เลือกใช้ตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับตัวได้ในการควบคุมระบบพีเอช โดยมีวัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัยคือการนำหลักการทฤษฎีฟัซซีลอจิกมาประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลองฟัซซีด้วยวิธีการของทากาจิและสุจีโน และออกแบบตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ในลักษณะแบ่งย่านการทำงานสำหรับระบบพีเอช ซึ่งคาดว่างานวิจัยนี้จะสามารถควบคุมระบบพีเอชได้เป็นอย่างดีและสามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม

บทที่ 2 กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วยแนวคิดของฟัซซีลอจิก การพัฒนาและการประยุกต์ใช้ฟัซซีลอจิกในการควบคุมกระบวนการ รวมทั้งงานวิจัยที่ใช้ฟัซซีลอจิกในการควบคุมระบบพีเอช

บทที่ 3 กล่าวถึงลักษณะโครงสร้างของแบบจำลองฟัซซีชนิดต่างๆ และการระบุหาโครงสร้างและพารามิเตอร์ของแบบจำลองฟัซซี รวมทั้งการระบุหาแบบจำลองฟัซซีโดยวิธีคลัสเตอริงและเทคนิคลีสท์สแควร์

บทที่ 4 กล่าวถึงตัวควบคุมฟัซซี การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลองซึ่งสามารถออกแบบได้โดยตรงจากแบบจำลองฟัซซี รวมทั้งตัวควบคุมฟัซซีแบบแบ่งย่านการทำงาน

บทที่ 5 กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบพีเอชที่ใช้ในการระบุหาแบบจำลองฟัซซี วิธีการแบ่งย่านการทำงานที่เหมาะสม การระบุหาแบบจำลองฟัซซีของกระบวนการในแต่ละย่านการทำงาน โดยใช้ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทของกระบวนการผ่านอัลกอริธึมของฟัซซีคลัสเตอริงและเทคนิคลีสท์สแควร์ จากนั้นทำการทดสอบแบบจำลองฟัซซีที่สร้างขึ้น เพื่อนำแบบจำลองฟัซซีที่สามารถทำนายค่าได้ดีที่สุดไปใช้เป็นตัวควบคุมฟัซซี

บทที่ 6 กล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลองของกระบวนการ โดยการผกผันแบบจำลองฟัซซีที่ได้จากบทที่ 5 และผลการทดสอบตัวควบคุมฟัซซีเทียบกับตัวควบคุมพีไอแบบกำหนดเกนต่างๆ กัน และ

บทที่ 7 เป็นการสรุปผลงานวิจัยทั้งหมด และข้อเสนอแนะ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาฟัซซีลอจิกและแบบจำลองฟัซซี (Fuzzy Logic and Fuzzy Modeling Development)

แนวความคิดที่เกี่ยวกับตรรกศาสตร์หลายค่าเป็นแนวความคิดที่มีผู้สนใจศึกษาอยู่หลายคนในช่วงเวลาที่ผ่านมา จนกระทั่งปี ค.ศ. 1965 ศาสตราจารย์ ดร. Lotfi A. Zadeh แห่งมหาวิทยาลัยเบิรคเลย์ แคลิฟอร์เนียได้คิดค้นและนำเสนอแนวความคิดตรรกศาสตร์รูปแบบใหม่ที่มีลักษณะที่สอดคล้องกับการให้เหตุผลของมนุษย์ที่มักมีการให้ระดับความเป็นไปได้ของตรรก ว่ามีลักษณะเช่นนั้นมาก ปานกลาง หรือน้อย ซึ่งยากแก่การกำหนดให้ชัดเจนได้ว่ามีกี่ระดับ แนวความคิดดังกล่าวนี้ถูกเสนอเป็นทฤษฎีที่เรียกว่า ทฤษฎีฟัซซีเซต

ในปี ค.ศ. 1973 Zadeh เสนองานวิจัยเกี่ยวกับวิธีการวิเคราะห์ระบบที่ซับซ้อน และกระบวนการตัดสินใจ จากแนวความคิดที่ว่า ตรรกศาสตร์ (Logic) ที่อยู่เบื้องหลังกระบวนการคิด การตัดสินใจ และการให้เหตุผลของมนุษย์นั้นไม่ได้เป็นตรรกแบบ 2 ค่า แต่เป็นตรรกหลายค่า (Multivalued logic) และได้นิยามคำว่า “ ฟัซซีเซต ” คือเซตที่มีความเป็นสมาชิกที่สามารถเพิ่มความเป็นสมาชิกจากไม่เป็นสมาชิกไปจนถึงเป็นสมาชิก “การเชื่อมต่อฟัซซี” “การอนุมานกฎฟัซซี” ซึ่งการอนุมานกฎฟัซซีนี้เปรียบได้กับความสามารถในการสรุปข้อมูลต่างๆของมนุษย์ และนำเสนอการใช้ตัวแปรเชิงภาษา (Linguistic variables) หรือที่เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเป็นตัวแปรฟัซซี (Fuzzy variables) มาใช้แทนหรือใช้ร่วมกับตัวแปรเชิงตัวเลข และให้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรฟัซซีเป็นไปในลักษณะของประโยคที่บอกเงื่อนไข (Condition statement) และคิดค้นอัลกอริธึมฟัซซี (Fuzzy algorithm) ไว้สำหรับคิดคำนวณฟังก์ชั่นความสัมพันธ์ที่ซับซ้อน

แนวคิดที่ Zadeh เสนอสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ระบบที่ซับซ้อน และกระบวนการตัดสินใจ เช่น นำไปประยุกต์ใช้ได้กับงานด้านเศรษฐศาสตร์ วิทยาศาสตร์การจัดการ (Management science) ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence) จิตวิทยา การแก้ไขซ่อมแซมข้อมูล เภสัชกรรม ชีววิทยา และอื่นๆอีกมากมาย

หลังจากการนำเสนอผลงานวิจัยในปี ค.ศ. 1973 ของศาสตราจารย์ ดร. Lotfi A. Zadeh หลักการของตรรกศาสตร์คลุมเครือ (Fuzzy logic) ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมควบคุมอย่างมากมายเช่นกัน ในปี ค.ศ.1974 งานวิจัยทางด้านฟัซซีในช่วงบุกเบิกได้เริ่มต้นโดย Mamdani E.H. และ Assilian S. แห่งมหาวิทยาลัยลอนดอน โดยนำหลักการและแนวคิดเกี่ยวกับทฤษฎีฟัซซีที่ Zadeh ได้เสนอเอาไว้ไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมการปรับความเร็วของเครื่องยนต์และระดับความดันภายในหม้อต้ม ซึ่งเป็นการจัดการกับความไม่เป็นเชิงเส้น สัญญาณรบกวนที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการ ผลการควบคุมแสดงว่า ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกสามารถจัดการกับกระบวนการได้ดี

จากนั้น การวิจัยและพัฒนาได้ขยายออกไปเป็นวงกว้าง มีการนำแนวความคิดทางด้านฟัซซีไปประยุกต์ใช้ในสาขาต่างๆ มากมาย บ้างก็เป็นการพัฒนาเทคนิคการสร้างแบบจำลองฟัซซีให้ได้แบบจำลองที่แม่นยำ มีความทนทานต่อสัญญาณรบกวน สะดวกในการใช้งาน บ้างก็นำเอาแบบจำลองฟัซซีไปใช้เป็นแบบจำลองที่ใช้สำหรับวิธีการควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองต่างๆ บ้างก็คิดค้นพัฒนาดัดแปลงทฤษฎีฟัซซีไปใช้ผสมร่วมกับแนวความคิดอื่น เช่น เครือข่ายนิวรอน และอัลกอริธึมพันธุศาสตร์ เพื่อให้ได้การควบคุมที่ดีขึ้น การควบคุมที่สามารถจัดการกับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นสูง การควบคุมระบบที่ไม่สามารถหาแบบจำลองได้

จากความสำเร็จในการนำแบบจำลองฟัซซีไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการจริง จึงมีผู้ให้ความสนใจในการพัฒนาเพื่อให้ได้แบบจำลองที่มีประสิทธิภาพในการจำลองกระบวนการได้ถูกต้องแม่นยำในสถานการณ์ต่างๆได้ดีขึ้น มีการเสนอการสร้างแบบจำลองฟัซซีไว้หลายวิธีการ แต่ละวิธีการมีพัฒนาการที่แตกต่างกันออกไป พอสรุปได้ ดังนี้

ในปี ค.ศ. 1985 Takagi และ Sugeno ได้เสนอวิธีการใหม่ในการสร้างแบบจำลองฟัซซีซึ่งเป็นวิธีการที่ง่าย แบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้มีลักษณะเป็นกฎเงื่อนไขของการแจกแจงเหตุสู่ผล (Implication) ซึ่งอธิบายปริภูมิ (Space) ของอินพุท และในส่วนผลสรุปเป็นการแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นของตัวแปรอินพุท-เอาท์พุท การระบุหาแบบจำลองจะอาศัยข้อมูลอินพุท-เอาท์พุท การระบุหาแบ่งเป็นสองส่วนคือการระบุหาโครงสร้างและพารามิเตอร์ของแบบจำลอง การระบุหาโครงสร้างประกอบด้วยการเลือกตัวแปรในส่วนเงื่อนไข และการกำหนดฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปร และได้ประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาแบบฮิวริสติค (Heuristic search) เพื่อทำการเลือก ตัวแปรในส่วนเงื่อนไข และใช้วิธีการกำลังสองน้อยที่สุดเพื่อระบุหาพารามิเตอร์ในส่วนผลสรุป วิธีการนี้สามารถประยุกต์ใช้เพื่อสร้างแบบจำลองกระบวนการทางอุตสาหกรรม เช่น กระบวนการทำน้ำให้สะอาด และคอนเวอร์เตอร์ (Converter) ของกระบวนการผลิตเหล็กกล้าได้เป็นอย่างดี

ในปี ค.ศ. 1994 Zhao, Wertz และ Gorez ได้ใช้วิธีการฟัซซีคลัสเตอริงในการระบุหาแบบจำลองฟัซซี แบบจำลองที่ได้เป็นแบบจำลอง Takagi-Sugeno โดยใช้จีเคอัลกอริธึม (Gustufson-Kessel algorithms) ซึ่งเป็นอัลกอริธึมที่ใช้ในการระบุหากลุ่มในลักษณะเชิงเส้น (Linear cluster) พบว่าเทคนิคที่เสนอสามารถที่จะรวมการระบุโครงสร้างและพารามิเตอร์ในส่วนผลสรุปได้ และได้ทำการทดสอบวิธีการนี้กับการจำลองระบบสถิตย์และระบบไดนามิกแบบไม่เชิงเส้น พบว่าวิธีการนี้สามารถให้แบบจำลองฟัซซีที่เหมาะสมของระบบได้ นอกจากนี้แบบจำลองฟัซซีที่ได้ยังสามารถประยุกต์ใช้ในการสร้างตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลอง

ในปี ค.ศ. 1996 Babuska และ Verbruggen เสนอวิธีการสร้างแบบจำลองฟัซซีเชิงภาษา (Linguistic fuzzy model) จากแบบจำลองฟัซซีเชิงเส้น (Fuzzy linear model) ซึ่งเป็นการรวมวีธีการระบุหาของแบบจำลองฟัซซีเชิงเส้นเข้ากับความสามารถในการตีความหมาย (Semantic interpretation) ที่ดีของแบบจำลองฟัซซีเชิงภาษา และได้ประยุกต์ใช้วิธีการนี้ในการระบุหาแบบจำลองเชิงเส้นของกระบวนการที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง (Highly nonlinear process) พบว่าแบบจำลองที่ได้ให้ความถูกต้องแม่นยำมากขึ้นเมื่อเทียบกับแบบจำลองเชิงเส้นแบบเดิม

ในปี ค.ศ. 1997 Euntin Kim เสนอวิธีการใหม่ในการสร้างแบบจำลองฟัซซีโดยวิธีการนี้ได้นำข้อดีของแบบจำลอง Takagi-Sugeno และแบบจำลองของ Sugeno-Yasukawa ไว้ด้วยกัน ซึ่งอัลกอริธึมประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือการปรับจูนหยาบ และการปรับจูนละเอียด สำหรับการปรับจูนหยาบนั้นอาศัยวิธีการ Fuzzy C-regression Model Clustering (FCRM) ซึ่งพัฒนามาจาก Fuzzy C-means Clustering (FCM) ส่วนการปรับจูนละเอียดนั้นอาศัย อัลกอริธึมเกรเดียนเดสเซ็นท์ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองฟัซซีแทนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมไม่เชิงเส้น (Nonlinear optimization method) นอกจากนี้ยังประยุกต์วิธีการใหม่นี้กับฟังก์ชันไม่เชิงเส้นที่ประกอบด้วยตัวแปรอินพุท 2 ตัว ตัวแปรเอาท์พุท 1 ตัว และประยุกต์ใช้กับข้อมูลที่ได้จากเตาเผาโดยใช้แก๊ส (Gas furnace) พบว่าวิธีการที่เสนอนี้มีค่าดัชนีสมรรถนะ (Performance index) น้อยกว่าวิธีอื่นๆ

ในปี ค.ศ. 1998 Babuska, Roubos และ Verbruggen งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นที่ระบบหลายตัวแปรอินพุทหลายตัวแปรเอาท์พุท (Multiple-input multiple-output system) ซึ่งประกอบด้วยคู่ของแบบจำลองหลายตัวแปรอินพุทหนึ่งตัวแปรเอาท์พุท (Mutiple-input single-output model) แบบ Takagi-Sugeno ทำการระบุหาโครงสร้างโดยใช้ฟัซซีจีเคคลัสเตอริงบนโปรแกรม MATLAB

toolbox และประยุกต์ใช้กับถังน้ำต่อกัน 4 ถัง (cascaded tanks) และเปรียบเทียบกับแบบจำลองสเตทสเปซเชิงเส้นลำดับ 4 (4^{th}-order linear state-space model) พบว่าแบบจำลองฟัซซีให้ความถูกต้องแม่นยำมากกว่า

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมฟัซซี (Fuzzy Controller)

ในปี ค.ศ. 1994 Postlethwaite ใช้แบบจำลองฟัซซีในการออกแบบตัวควบคุม ซึ่งเรียกว่าตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลอง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้แทนตัวควบคุมฟัซแบบผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งกฎการควบคุมออกแบบโดยใช้ความรู้และความชำนาญในการปฏิบัติการของผู้ปฏิบัติการ ดังนั้นตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบอาศัยแบบจำลองจึงเป็นการออกแบบเพื่อทำการจำลองกระบวนการตัดสินใจของมนุษย์โดยใช้แบบจำลองฟัซซี โครงสร้างของแบบจำลองนี้มีลักษณะคล้ายกับตัวควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองทั่วไป และได้ประยุกต์ใช้ตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลองกับกระบวนการควบคุมระดับน้ำ และการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในห้องปฏิบัติการ พบว่าตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดลให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ แต่วิธีการที่เสนอนี้ยังมีปัญหาบางอย่างในการกำหนดจำนวนของฟัซซีเซตอ้างอิงที่เหมาะสมของแบบจำลองเพื่อรับประกันค่าสมรรถนะของแบบจำลอง

ในปี ค.ศ. 1996 นฤพนธ์ มัญมณี ได้ออกแบบโปรแกรมตัวควบคุมกระบวนการแบบฟัซซีลอจิกแบบผู้เชี่ยวชาญในการควบคุมระดับของเหลวในถังกลม กฎการควบคุมออกแบบโดยใช้กลยุทธ์แบบแบ่งย่านการทำงานออกเป็นย่านเกนสูงและย่านเกนต่ำ แต่ละย่านมีชุดของกฎที่ใช้แตกต่างกัน ทำการประเมินสถานะของตัวควบคุมฟัซซีโดยการเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอดีแบบกำหนดค่าเกนต่าง ๆ กัน และตัวควบคุมพีไอดีธรรมดา ซึ่งจากผลการทดสอบตัวควบคุมฟัซซีลอจิกมีสมรรถนะในการควบคุมและความทนทานดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีแบบกำหนดค่าเกนต่าง ๆ กัน และตัวควบคุม พีไอดีธรรมดา

ในปี ค.ศ. 1997 Sousa, Babuska และ Verbruggen ได้ประยุกต์ใช้การควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองภายใน โดยอาศัยแบบจำลองฟัซซี ซึ่งแบบจำลองฟัซซีที่ใช้เป็นแบบทากาจิ-สุจิโน ได้มาจากการคลัสเตอริง (Clustering) การออกแบบตัวควบคุมวิธีนี้สามารถทำได้ง่ายโดยการผกผัน (Invert) แบบจำลองฟัซซี และทำการทดสอบตัวควบคุมกับระบบปรับอากาศและเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอดี พบว่าตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลองภายในให้ผลการตอบสนองเร็วกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี

ในปี ค.ศ. 1998 รุ่งจิตร์ กาญจนวัฒน์ได้ประยุกต์ใช้วิธีคลัสเตอริงเพื่อทำการระบุหาแบบจำลองฟัซซีของกระบวนการและออกแบบตัวควบคุมฟัซซีลอจิกโดยใช้แบบจำลองฟัซซี แบบจำลองฟัซซีแบบทากาจิ-ซูจีโน ถูกเลือกใช้และระบุหาได้จากข้อมูลของกระบวนการ การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้แบบจำลองกระทำได้โดยการใช้แบบจำลองผกผันของกระบวนการ วิธีนี้ประยุกต์ใช้กับการควบคุมระดับของเหลวในระบบถังทรงกลม ผลจากการ ซิมมูเลทแสดงให้เห็นว่า อัลกอริธึมที่ใช้ในการระบุหาแบบจำลองฟัซซีให้ค่าสมรรถนะที่ดี โครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้แบบจำลองสามารถออกแบบได้ง่ายจากแบบจำลองฟัซซี ผลการทดสอบพบว่าตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้แบบจำลองมีความสามารถในการติดตามเมื่อ ค่าเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลงและให้สมรรถนะที่ดีในการควบคุม

ในปี ค.ศ. 1998 ทัศนีย์ วัฒนเชาวน์พิสุทธิ์ ได้สร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ฟัซซีเพื่อใช้เป็นแบบจำลองภายในสำหรับการควบคุมแบบใช้แบบจำลองภายใน (Internal Model Control) โดยการเขียนโปรแกรมซิมูเลทกระบวนการและการควบคุมเพื่อทดสอบตัวควบคุมที่ได้ใน 2 กรณีคือ กรณีที่ค่าเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบสเต็พและกรณีที่มีการรบกวนแบบสเต็พ ผลการวิจัยพบว่าการควบคุมในลักษณะนี้สามารถควบคุมกระบวนการได้ดีกว่าการควบคุมแบบดั้งเดิม และสามารถใช้แทนการควบคุมแบบฐานจำลองที่เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้

ในปี ค.ศ. 2001 วิศณีย์ ตั้งยืนยง ได้ใช้แบบจำลองฟัซซีของทากาจิ-สุจีโนร่วมกับวิธีการคลัสเตอริงในการสร้างแบบจำลองฟัซซีของตัวย่อยเยื่อกระดาษและตัวประมาณค่าฟัซซีในการประมาณค่าแคปปา และออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้แบบจำลองโดยการใช้แบบจำลองผกผันของกระบวนการ ผลจากการซิมมูเลทแสดงให้เห็นว่า ตัวประมาณค่าฟัซซีสามารถประมาณค่าแคปปาได้อย่างมีประสิทธิภาพ และตัวควบคุมฟัซซีที่ใช้ร่วมกับตัวประมาณค่าที่ได้สามารถควบคุมค่าแคปปาค่าสุดท้ายให้เข้าใกล้ค่าเป้าหมายได้ในเวลาที่กำหนด แม้ว่าจะมีความผิดพลาดของค่าประมาณเริ่มต้น

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับตัวได้

ตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับตัวได้ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Procyk และ Mamdani ในปี ค.ศ. 1979 โดยใช้ชื่อว่า ตัวควบคุมเชิงภาษาที่สามารถปรับตัวได้เอง (Linguistic self-organizing controller, SOC) ซึ่งมีอัลกอริธึมของการเรียนรู้ที่สามารถสร้างหรือปรับปรุงกฎการควบคุมจาก

สมรรถภาพของระบบ แม้ว่าตัวควบคุมชนิดนี้เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นคือเกิดปรากฏการณ์วัฏจักร (Cyclic phenomena) ของผลการตอบสนอง ระบบใช้เวลานานในการเซตตัว และเมื่อมีสัญญาณรบกวน เช่น ตัวรบกวน การเปลี่ยนแปลงของค่าเป้าหมาย ระบบจะไม่มีเสถียรภาพ ต่อมาปี ค.ศ. 1992 Zha และคณะ ได้มีการปรับปรุงตัวควบคุมเชิงภาษาที่สามารถจัดการได้ด้วยตัวเอง โดยมีการเพิ่มกฎพิเศษเพื่อป้องกันการปรับตัวที่ไม่ถูกต้อง

การควบคุมแบบปรับตัวได้ที่มีแบบจำลองอ้างอิง (MRAC) เป็นที่รู้จักและมีการใช้อย่างกว้างขวาง เกิดจากการค้นคว้าเพื่อพัฒนาตัวควบคุมเชิงภาษาที่สามารถจัดการได้ด้วยตัวเอง โดยการควบคุมแบบปรับตัวได้ที่มีแบบจำลองอ้างอิง จะไม่ขึ้นกับแบบจำลองผกผันของ กระบวนการ แต่มีการนำแบบจำลองอ้างอิงมาใช้เพื่อหาผลการตอบสนองไปใช้ในการวิเคราะห์และจูนตัวควบคุมฟัซซี อัลกอริธึมนี้ใช้เวลาในการคำนวณมากเนื่องจากความซับซ้อนของ โครงสร้างทางคณิตศาสตร์ ทำให้เกิดปัญหาการควบคุมที่เวลาจริง ในปี ค.ศ. 1995 Park ได้นำเสนอตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกที่สามารถจัดการได้ด้วยตัวเองโดยใช้แบบจำลองฟัซซีที่มีการถดถอยโดยเฉลี่ย (Fuzzy auto-regressive moving average model, FARMA) โดยใช้ข้อมูลอินพุทและเอาท์พุทในอดีตทุกค่าของการสุ่ม ทำการเปลี่ยนกฎใหม่โดยอาศัยเงื่อนไขที่ว่าถ้ามีกฎใหม่ที่ให้ค่าเอาท์พุทใกล้เคียงกับเอาท์พุทอ้างอิง กฎเก่าจะถูกแทนที่ด้วยกฎใหม่ และในปี ค.ศ. 1996 Kim นำเสนอตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ที่สร้างจากการรวมกันแบบขนานของตัวควบคุม กฎที่เหมาะสมที่สุดจะถูกเลือกโดยตัวกำหนดระบบซึ่งสังเกตการเปลี่ยนแปลงในพารามิเตอร์ของระบบควบคุม ซึ่งรายละเอียดของการพัฒนาตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับตัวได้มีดังนี้

ในปี ค.ศ. 1990 Walter และคณะ ได้ออกแบบตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบปรับจูนอัตโนมัติ (Self tuning fuzzy logic controller) สำหรับควบคุมกระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยคะตะลิสต์ ในอุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมัน การควบคุมประกอบด้วยตัวควบคุมฟัซซีสองชุด ซึ่งใช้เป็นตัวควบคุมซุปเปอร์ไวเซอรี (Supervisory control) และใช้ออพติไมซ์ระบบ (System optimization) กลไกการปรับจูนอัตโนมัติของตัวควบคุมเป็นไปโดยอาศัยข้อมูลความผิดพลาดของตัวควบคุมไปปรับเปลี่ยนค่าแฟกเตอร์การสเกล (Scaling factor) ของอินพุท-เอาท์พุทของตัวควบคุมฟัซซีให้มีค่าที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการควบคุมที่สูงสุด

ในปี ค.ศ. 1992 Nomura, Hayashi และ Wakami เสนอวิธีการเรียนรู้ (Learning method) ในการอนุมานกฎฟัซซีซึ่งอาศัยวิธีเดสเซ็นท์ (Descent method) โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทเพื่อสร้างกฎ จากนั้นฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในส่วนเงื่อนไขและ

จำนวนจริงในส่วนผลสรุปจะถูกปรับค่าโดยวิธีเดสเซ็นท์ ข้อดีของวิธีนี้คือมีความเร็วการเรียนรู้สูงกว่าวิธีแบคโพรพาเกชันของนิวรัลเน็ตเวิร์คแบบดั้งเดิม (Conventional back propagation type neural network) และยังสามารถแสดงความสัมพันธ์ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทในรูปของกฎฟัซซีอีกด้วย นอกจากนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการนี้กับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ซึ่งสามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางที่เคลื่อนที่ได้เป็นอย่างดี

ในปี ค.ศ. 1994 Hunakuma และคณะ ได้ออกแบบตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบปรับตัวได้เองเพื่อใช้ในระบบการควบคุมหอกลั่นซึ่งเป็นการควบคุมในหลายรูปแบบ คือการควบคุมแบบป้อนหน้า (Feed forward control) ป้อนกลับ (Feed back control) การควบคุมอัตโนมัติทำได้โดยการปรับเกนของตัวควบคุมฟัซซีแบบป้อนกลับด้วยกฎการเรียนรู้ ซึ่งทำการเปรียบเทียบแนวโน้มของตัวแปรปรับจากตัวควบคุมป้อนหน้าและตัวควบคุมป้อนกลับ ทำการทดสอบโดยการควบคุมหอแยกมีเทน (Demethanizer column) ในกระบวนการผลิตเอทิลีนในส่วนของการควบคุมอุณหภูมิก้นหอ พบว่ากระบวนการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้สามารถประหยัดพลังงานในการผลิตได้อย่างมาก

ในปี ค.ศ. 1998 Kang และคณะ ได้นำเสนอรูปแบบการควบคุมฟัซซีแบบปรับตัวได้ทางอ้อม (Indirect adaptive fuzzy control) โดยใช้แบบจำลองฟัซซีของทากาจิ-สุจีโน โดยทำการเปรียบเทียบผลการควบคุมในเชิงทฤษฎีกับอัลกอริทึมของตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับตัวได้ที่ได้มาจากการทำให้เป็นเชิงเส้นแบบป้อนกลับ ซึ่งเป็นวิธีที่ต้องการอินพุทมาก เมื่อการประมาณค่าความผิดพลาดมีแนวโน้มเป็นอนันต์ พบว่าการควบคุมรูปแบบใหม่นี้สามารถกำหนดขอบเขตที่ชัดเจนของอินพุทและค่าประมาณความผิดพลาด แต่เนื่องรูปแบบการควบคุมนี้ตั้งอยู่บน สมมติฐานที่ว่าแบบจำลองฟัซซีของทากาจิ-สุจีโน ที่ได้มีความถูกต้องแน่นอน แต่ในความเป็นจริงอาจมีข้อผิดพลาดได้ ซึ่งจะได้มีการนำเสนอรูปแบบใหม่ต่อไป

ในปี ค.ศ. 1998 Tsay และคณะ ได้นำเสนอรูปแบบการควบคุมฟัซซีแบบปรับตัวได้ทางตรง (Direct adaptive fuzzy control) โดยใช้แบบจำลองฟัซซีของทากาจิ-สุจีโน ที่ไม่จำเป็นต้องถูกต้องแน่นอน พบว่าระบบลูปปิดที่ใช้การควบคุมรูปแบบนี้จะมีความเสถียรทั้งหมด ภายใต้ขอบเขตที่กำหนด อีกทั้งยังสามารถควบคุมระบบที่ไม่เสถียรได้เป็นอย่างดี

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวของกับการใช้ตัวควบคุมฟัซซีควบคุมระบบพีเอช

จากการที่ฟัซซีลอจิกสามารถประยุกต์ใช้ได้ดีในระบบไม่เชิงเป็นเส้น ระบบพีเอชเป็นระบบหนึ่งซึ่งมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง และพบได้ทั่วไปในอุตสาหกรรม เช่นการปรับสภาพน้ำในหม้อไอน้ำ ระบบหล่อเย็น ระบบบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น จึงได้มีการศึกษาเพื่อประยุกต์ใช้ฟัซซีลอจิกในการควบคุมระบบพีเอช ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

ในปี ค.ศ. 1990 Shah และ Rajamani ได้พัฒนาตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบสามารถปรับตัวได้เอง โดยโครงสร้างของตัวควบคุมจะการพัฒนารูปแบบของอัลกอริธึมตัวควบคุมฟัซซีเดิมที่มีจำนวนของกฎคงที่ให้สามารถให้สามารถปรับเปลี่ยนหรือเพิ่มเติมกฎการควบคุมได้เอง โดยเทคนิคการเรียนรู้และประเมินค่าสมรรถนะ ทำให้ตัวควบคุมมีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนคุณลักษณ์ของกระบวนการได้ดีกว่าตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบทั่วไป

ในปี ค.ศ. 1994 Kelkar และ Postlethwaite ได้ประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองภายใน ซึ่งแบบจำลองที่ใช้เป็นแบบจำลองความสัมพันธ์ฟัซซีที่ได้จากการคลัสเตอริง ปรากฏว่าแบบจำลองที่ได้มีค่าความผิดพลาดสูง ทำให้ไม่สามารถควบคุมให้ค่าพีเอชเข้าสู่เป้าหมายได้ และผลการตอบสนองมีการแกว่งตัวมากในช่วงที่ระดับพีเอชเป็นกลางที่มีค่าเกนสูง ทำให้มีแนวความคิดที่จะแบ่งย่านการควบคุมระบบพีเอช

ในปี ค.ศ. 1994 Qin และ Borders ได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมฟัซซีพีไอแบบแบ่งย่านการควบคุม โดยทำการแบ่งย่านการควบคุมออกเป็น 2 ย่าน คือ ย่านเกนสูงและย่านเกนต่ำ กับตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบไม่แบ่งย่าน พบว่าการควบคุมที่มีการแบ่งย่านให้ค่าโอเวอร์ชูตที่ต่ำ และสามารถควบคุมระบบที่มีการรบกวนได้เป็นอย่างดี

ในปี ค.ศ. 1997 Sing และ Postlethwaite ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองความสัมพันธ์ฟัซซีร่วมกับ ตัวควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟ (Model predictive controller) โดยใช้หลักการของตัวควบคุมภายใน เปรียบเทียบตัวควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟแบบเชิงเส้น และตัวควบคุมพีไอดี พบว่าการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมโมเดลพรีดิกทีฟแบบใช้แบบจำลองความสัมพันธ์ฟัซซีให้ผลการควบคุมที่ดีมากในการควบคุมกระบวนการซึ่งมีความไม่เชิงเส้นสูง เหมาะที่จะใช้ประยุกต์กับกระบวนการจริง

ในปี ค.ศ. 1999 Hussain, Elkanzi, Sang และ Nie ได้ประยุกต์ใช้ตัวควบคุมฟัซซีเชิงภาษาแบบปรับตัวได้ควบคุมระบบพีเอช โดยการแบ่งย่านการควบคุมเป็นย่านเกนสูงและย่านเกนต่ำ แล้วปรับเปลี่ยนค่าแฟกเตอร์การสเกล ทำการเปรียบเทียบกับตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบไม่แบ่งย่าน ซึ่งตัวควบคุม ฟัซซีแบบปรับตัวได้ให้ผลการตอบสนองที่ดีกว่าตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบไม่แบ่งย่านที่มีการแกว่งตัวเมื่อมีการเปลี่ยนค่าเป้าหมายและเข้าสู่ค่าเป้าหมายช้า

ในปี ค.ศ. 2001 Lai, Li และ Chiang ได้ประยุกต์ใช้ตัวควบคุมฟัซซีแบบฐานขอบเขต (Constraint – based fuzzy logic controller) ในการศึกษาการควบคุมค่าพีเอชของสารละลายภายในหอดูดซับของกระบวนการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งค่าพีเอชจะส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับของสารละลาย และเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ดูดซับ โดยอาศัยความรู้ของผู้เชี่ยวชาญในการระบุจำนวนขอบเขต ร่วมกับใช้ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทในการกำหนดความกว้างของขอบเขต พบว่าค่าพีเอชสามารถเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ในเวลาที่ต้องการ

ในปี ค.ศ. 2002 Khemliche, Mokeddem และ Khellaf ได้ประยุกต์ใช้ฟัซซีเชิงภาษาร่วมกับอัลกอริธึมพันธุศาสตร์ (Genetic algorithm) ในการระบุหากฎการควบคุมฟัซซีเชิงภาษา ทำตัวควบคุมฟัซซีสามารถเปลี่ยนตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกได้เองอัตโนมัติ โดยเทคนิกการเรียนรู้เพื่อปรับเปลี่ยนตำแหน่งที่เหมาะสม และใช้หลักการของแมมดานีร่วมกับการถ่วงน้ำหนักในการหาผลตอบสนองของการควบคุม โดยไม่อาศัยความรู้ความชำนาญของผู้เชี่ยวชาญ เพื่อใช้ความคุมระบบพีเอชที่ประกอบด้วยกรด 4 ชนิดที่ความเข้มข้นต่างกัน พบว่าสามารถควบคุมค่าพีเอชได้ดีกว่าอัลกอริธึมแบบเดิมที่ตำแหน่งของฟังก์ชันสมาชิกคงที่

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

แบบจำลองฟัซซี

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงลักษณะของแบบจำลองฟัซซี โดยเริ่มจากชนิดของแบบจำลอง ซึ่งในแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างและรูปแบบของกฎที่แตกต่างกันไป ต่อมาเป็นการกล่าวถึงวิธีการสร้างแบบจำลองฟัซซี โครงสร้างของแบบจำลองฟัซซี วิธีการระบุหาแบบจำลองฟัซซี ซึ่งประกอบด้วยการระบุหาโครงสร้างและพารามิเตอร์ของแบบจำลอง การระบุหาโครงสร้างของแบบจำลองทำโดยการใช้ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทของกระบวนการ และเทคนิคการระบุหา เช่นอัลกอริธึมของฟัซซีคลัสเตอริงและวิธีลีสท์สแควร์

3.1 บทนำ

หลักการของการสร้างแบบจำลองของระบบเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุทและเอาท์พุท ในปัจจุบันการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีความซับซ้อน ความไม่แน่นอนและความไม่เชิงเส้นสูง อาจจำเป็นต้องใช้เวลามากหรืออาจไม่ได้คุณภาพ ดังนั้นแบบจำลองฟัซซีจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการสร้างแบบจำลองของกระบวนการ ทั้งนี้เนื่องจากประสบความสำเร็จในการประยุกต์ใช้กับกระบวนการที่ซับซ้อน อีกทั้งปัจจุบันมีการศึกษาและประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองมากขึ้น และในส่วนของตัวควบคุมฟัซซีก็มีพัฒนาการเป็นตัวควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองมากขึ้น วิธีการสร้างแบบจำลองและกฎการควบคุมฟัซซีจากความรู้ของผู้เชี่ยวชาญ ในบางครั้งอาจขาดความรู้ความเข้าใจในบางส่วนของกระบวนการ ทำให้ออกแบบกฎได้ไม่ครอบคลุมทั้งหมด ดังนั้นตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลองที่สร้างจากข้อมูลเชิงตัวเลขของกระบวนการจึงมีบทบาทมากขึ้น ในที่นี้แบบจำลองฟัซซีเปรียบเสมือนเป็นฐานความรู้ของตัวควบคุมที่ออกแบบโดยอาศัยแบบจำลอง จำเป็นต้องมีแบบจำลองที่ถูกต้องและเหมาะสมที่สามารถทำนายค่าเอาท์พุทและพฤติกรรมของระบบได้อย่างแม่นยำ

3.2 แบบจำลองฟัซซี

แบบจำลองฟัซซีเป็นแบบจำลองระบบที่แสดงด้วยการอธิบายโดยใช้ภาษา ซึ่งอาศัยหลักการของฟัซซีลอจิก โดยปกติแล้วการอธิบายด้วยภาษานี้เป็นการแสดงความสัมพันธ์ของอินพุท

และเอาท์พุทในรูปของกฎทางภาษา ซึ่งอยู่ในลักษณะของกฎฟัซซีแบบมีเงื่อนไขถ้า-แล้ว (Fuzzy if-then rule) แสดงได้ดังนี้

$$\textit{If} \text{ (ส่วนเงื่อนไข) } \textit{Then} \text{ (ส่วนผล)} \tag{3.1}$$

โดยที่ส่วนเงื่อนไขและส่วนผลของกฎเป็นประพจน์แบบฟัซซี โดยส่วนเงื่อนไขอาจประกอบด้วยประพจน์ฟัซซีหลายๆ ประพจน์เชื่อมด้วยตัวเชื่อมเชิงตรรก นอกจากนี้ประพจน์แบบฟัซซีอาจประกอบด้วยนิเสธหรือคำขยายได้อีกด้วย แต่เพื่อให้ง่ายแก่ความเข้าใจจะทำการพิจารณากฎดังสมการ (3.2)

$$\textit{If } x_1 \textit{ is } A_1 \textit{ and } x_2 \textit{ is } A_2 \textit{ Then } y \textit{ is } B \tag{3.2}$$

โดยที่ A_1, A_2 และ B เป็นฟัซซีเซต ซึ่งกำหนดคุณลักษณะด้วยฟังก์ชันสมาชิก $\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2)$ และ $\mu_B(y)$ ตามลำดับ ตัวแปรระบบจะถูกแบ่งออกไปเป็นช่วงของฟัซซีโดยใช้ฟังก์ชันสมาชิก (Membership function) จากสมการที่ (3.2) ตัวแปรที่ปรากฏในส่วนของเงื่อนไข (Anticedent variable) คืออินพุท x_1 และ x_2 ส่วนตัวแปรที่ปรากฏในส่วนผลของกฎเรียกว่าตัวแปรส่วนผล (Consequent variable) คือเอาท์พุท y ตัวแปรเหล่านี้จะถูกแบ่ง (Partition) ออกเป็นช่วงของฟัซซีซึ่งนิยามบนช่วงของวาทยเอกภพ (Universe of discourse) โดยฟังก์ชันสมาชิกของกฎแต่ละข้อจะแสดงการแจกแจงช่วงฟัซซี (Fuzzy region) จากส่วนเงื่อนไขไปยังส่วนผล สมการ (3.2) สามารถเขียนในรูปความสัมพันธ์ฟัซซีได้ดังนี้

$$R = (A_1 * A_2) \rightarrow B \tag{3.3}$$

โดยที่ * เป็นตัวเชื่อมประพจน์ฟัซซี และ $\rightarrow$ เป็นฟังก์ชันการแจกแจงเหตุสู่ผล ซึ่งเป็นการเชื่อมแบบมีเงื่อนไข สำหรับฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ R กำหนดได้ดังนี้

$$\mu_R = \mu_{A_1}(x_1) * \mu_{A_2}(x_2) \rightarrow \mu_B(y) \tag{3.4}$$

3.3 **แบบจำลองฟัซซีสำหรับระบบสถิตย์** (Fuzzy Modeling of Static Systems)

ชนิดของแบบจำลองฟัซซีสามารถแบ่งได้ 3 ชนิดโดยพิจารณาจากโครงสร้างและรูปแบบของกฎฟัซซีดังนี้

3.3.1 **แบบจำลองฟัซซีเชิงภาษา** (Linguistic Fuzzy Model)

แนวคิดแบบจำลองฟัซซีเชิงภาษาถูกแนะนำโดย Zadeh (1965) ต่อมา Mamdani (1974) และผู้ร่วมงานได้ประยุกต์ใช้ในการควบคุมกระบวนการไดนามิก ดังนั้นในบางครั้งอาจเรียกแบบจำลองฟัซซีชนิดนี้ว่าแบบจำลองฟัซซีแบบแมมดานี ซึ่งหมายถึงรูปแบบกฎฟัซซีจะเป็นประพจน์ฟัซซีทั้งในส่วนเงื่อนไขและส่วนผลของกฎ

รูปแบบของแบบจำลองฟัซซีนี้มีลักษณะคล้ายกฎฟัซซีที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการในสมัยแรกเริ่ม รูปแบบของกฎฟัซซีแสดงได้ดังนี้

$$If\ x\ \ is\ A\ Then\ y\ \ is\ B \tag{3.5}$$

ตัวอย่างของกฎฟัซซี ถ้า-แล้ว ที่แสดงดังสมการที่ (3.5) ประกอบด้วย 2 ส่วนด้วยกัน ในส่วนของประพจน์ $x\ is A$ เรียกว่าส่วนเงื่อนไข และในส่วนของ $y\ is B$ เรียกว่าส่วนผล ส่วน x และ y นั้นเรียกว่า ตัวแปรทางภาษา (Linguistic variable) ซึ่งแสดงค่าทางภาษาโดยใช้ฟัซซีเซตบนโดเมน $X \subset R^n$ และ $Y \subset R^m$ ตามลำดับ A และ B เป็นเทอมทางภาษาซึ่งมักบอกความหมายของตัวแปรทางภาษา เช่น อุณหภูมิสูง ความดันต่ำ ฯลฯ เทอมทางภาษา (A_i) นี้จะนิยามบนโดเมนของหนึ่งตัวแปร ซึ่งอาจมีหลายๆ เทอมทางภาษาใน 1 ตัวแปรก็ได้ และการสะสมของฟัซซีเซต $[A_1, A_2, A_3,..., A_m]$ นี้เรียกว่า ฟัซซีพาร์ทิชัน (Fuzzy partition)

ในกรณีที่มีหลายตัวแปรอินพุท กฎฟัซซีที่แสดงในสมการ (3.5) สามารถเขียนในอีกรูปแบบหนึ่งได้ดังสมการ (3.6)

$$R^k : If\ x_1\ is\ A_{1,k}\ and ... and\ x_n\ is\ A_{n,k}\ ,... Then\ y\ is\ B_k \tag{3.6}$$

ยกตัวอย่างเช่น

$$If\ x_1\ is\ small\ and\ x_2\ is\ \ medium,...Then\ y\ is\ big \tag{3.7}$$

โดยทั่วไปแล้วตัวดำเนินการที่นิยมใช้คือตัวดำเนินการ Min ซึ่งใช้เป็นทั้งตัวเชื่อมการร่วมกันและการแจงเหตุสู่ผล และใช้ตัวดำเนินการ Max สำหรับรวมกลุ่มกฎต่างๆ ในฐานกฎ ซึ่งเป็นการประมาณด้วยผลประกอบการ $Max - Min$ จำนวนกฎฟัซซีในแบบจำลองฟัซซีชนิดนี้จะเป็นฟังก์ชันแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลกับขนาดของปริภูมิ (Space dimension) ของตัวแปรอินพุท

3.3.2 **แบบจำลองความสัมพันธ์ฟัซซี** (Fuzzy Relational Model)

กฎความสัมพันธ์ฟัซซีเป็นการประยุกต์มาจากกฎแบบแมมดานี แต่มีความแตกต่างกันที่การแสดงโครงสร้างกฎ โครงสร้างกฎของแบบจำลองความสัมพันธ์ฟัซซีแสดงโดยใช้ความสัมพันธ์ฟัซซี (R) ซึ่งเป็นการแจกแจงจากฟัซซีเซตของอินพุท A_i ไปยังฟัซซีของเอาท์พุท B_i ยกตัวอย่างเช่น แบบจำลองที่มีหนึ่งตัวแปรอินพุทหนึ่งตัวแปรเอาท์พุท ซึ่ง $x \in X$ และ $y \in Y$ โดยกำหนดให้

$$A = \{A_1, A_2, ..., A_M\} \tag{3.8}$$

$$B = \{B_1, B_2, ..., B_N\} \tag{3.9}$$

$$R = [r_{ij}]_{M\,x\,N} \tag{3.10}$$

โดยที่ A เป็นการสะสมของฟัซซีเซตซึ่งนิยามบนโดเมน X

B เป็นการสะสมของฟัซซีเซตซึ่งนิยามบนโดเมน Y

R เป็นความสัมพันธ์ฟัซซีที่นิยามการส่งจากเซตของเทอมทางภาษาของตัวแปรอินพุท A ไปยังเทอมทางภาษาของตัวแปรเอาท์พุท B, $A \to B$

ฟัซซีเซต X สำหรับอินพุท x แบบคริสพ์ เขียนดังสมการที่ (3.11) ซึ่งแสดงค่าระดับความเป็นสมาชิกในแต่ละเทอมทางภาษาได้ดังนี้

$$X = \{\mu_{A_1}(x), \mu_{A_2}(x), ..., \mu_{A_M}(x)\} \tag{3.11}$$

ดังนั้นฟัซซีเซต Y ของเอาท์พุทที่สอดคล้องกันเขียนได้ดังนี้

$$Y = \{\mu_1, \mu_2, ..., \mu_N\} \tag{3.12}$$

สามารถหาได้โดยใช้การประกอบการของความสัมพันธ์ฟัซซี

$$Y = X \circ R \tag{3.13}$$

ฟัซซีเซต จำเป็นต้องทำดีฟัซซิฟิเคชันดังสมการที่ (3.14)

$$b_i = \frac{\sum_{q=1}^{N_q} \mu_{B_i}(y_q)}{\sum_{q=1}^{N_q} \mu_{B_i}} \tag{3.14}$$

โดยที่ N_q เป็นจำนวนของระดับการแบ่งแยก (Discretization levels)

ค่าเอาท์พุทแบบคริสพ์ y_o ของแบบจำลองความสัมพันธ์ฟัซซีคำนวณได้โดยใช้ค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักของ b_i คำนวณได้โดยใช้สมการที่ (3.15)

$$y_o = \frac{\sum_{i=1}^{N} \mu_i b_i}{\sum_{i=1}^{N} \mu_i} \tag{3.15}$$

ความสัมพันธ์ฟัซซีที่แสดงในเทอมของกฎถ้า-แล้ว มีค่าเทียบเท่ากับกฎฟัซซีในสมการ (3.6) ของแบบจำลองฟัซซีเชิงภาษา ในกฎแต่ละข้อของแบบจำลองความสัมพันธ์ฟัซซีจะรวมค่าความเป็นสมาชิกในฟัซซีเซต (B_i) ด้วยน้ำหนักที่แตกต่างกัน การให้น้ำหนักสามารถปรับจูนละเอียดได้โดยไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนฟัซซีอ้างอิง

ตัวอย่างของแบบจำลองความสัมพันธ์ฟัซซี

พิจารณาแบบจำลองที่มีหนึ่งตัวแปรอินพุทและหนึ่งตัวแปรเอาท์พุท ทั้งตัวแปรอินพุทและเอาท์พุทถูกแบ่งออกเป็นสามฟัซซีอ้างอิง คือ $Low, Medium, High$ และเขียนความสัมพันธ์ฟัซซี R ได้ดังสมการที่ (3.16)

$$R = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.4 & 0.1 \\ 0.3 & 1.0 & 0.1 \\ 0.0 & 0.6 & 1.0 \end{bmatrix} \tag{3.16}$$

จากความสัมพันธ์ฟัซซี R สามารถเขียนกฎฟัซซีได้ 3 ข้อด้วยกันดังนี้

R^1 : *If x is Low Then y is Low* (0.9), *Medium* (0.4), *High* (0.1)

R^2 : *If x is Medium Then y is Low* (0.3), *Medium* (1.0), *High* (0.1)

R^3 : *If x is High Then y is Low* (0.0), *Medium* (0.6), *High* (1.0)

3.3.3 **แบบจำลองฟัซซีทากาจิ-ซูจีโน** (Takagi - Sugeno Fuzzy Model)

แบบจำลองฟัซซีชนิดนี้ถูกนำเสนอโดย Takagi และ Sugeno (1985) รูปแบบของกฎแสดงได้ดังสมการที่ (3.17)

$$R^i \ : \ If \ x_1 \ is \ A_1^i \ and \ldots and \ x_n \ is \ A_n^i \ Then \ y^i = f_i(x_1,\ldots,x_n) \tag{3.17}$$

พิจารณาส่วนของเงื่อนไขของกฎพบว่ารูปแบบเหมือนในแบบจำลองแมมดานี ส่วนผลของกฎฟัซซีแสดงด้วยฟังก์ชัน f_i ของอินพุท x_i เช่น f_i เป็นฟังก์ชันโพลิโนเมียลของอินพุท x_i โดยปกติแล้วฟังก์ชัน f_i มักนิยมแสดงด้วยความสัมพันธ์เชิงเส้นเช่น

$$R^i \ : \ If \ x_1 \ is \ A_1^i \ and \ldots and \ x_n \ is \ A_n^i \ Then \ y^i = p_0^i + p_1^i x_1,\ldots,p_n^i x_n \tag{3.18}$$

ขณะที่ y^i เป็นค่าเอาท์พุทจากการแจงเหตุสู่ผลของกฎที่ i และ A_j^i เป็นฟัซซีเซตที่แสดงลักษณะโดยใช้ฟังก์ชันสมาชิก p_j^i เป็นค่าพารามิเตอร์ของส่วนผลสามารถหาได้โดยวิธีลีสท์สแควร์

กำหนดให้อินพุทแบบคริสพ์เป็น $(x_1,\ldots,x_n)$ ดังนั้นค่าเอาท์พุทของแบบจำลองฟัซซีประมาณได้โดยใช้การเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (Weigthed average) ของ y^i ดังนี้

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^{k} w^i y^i}{\sum_{i=1}^{k} w^i} \tag{3.19}$$

โดยที่ k เป็นจำนวนของกฎฟัซซี

y^i เป็นเอาท์พุทของกฎข้อที่ i

w^i เป็นค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมดของส่วนเงื่อนไขของการแจงเหตุสู่ผลสำหรับตัวแปรอินพุท ซึ่งนิยามโดยใช้สมการที่ (3.20)

$$w^i = \prod_{k=1}^{n} A_k^i(x_k) = \frac{A_1^i(x_1) \wedge \ldots \wedge A_n^i(x_n)}{\sum_{i=1}^{n}(A_1^i(x_1) \wedge \ldots \wedge A_n^i(x_n))} \quad (3.20)$$

ตัวอย่างของแบบจำลองฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno

$$R^i : \textit{If } x_1 \textit{ is small and } x_2 \textit{ is big Then } y^i = 0.001 + 0.200x_1 + 1.023x_2 \quad (3.21)$$

3.4 **แบบจำลองฟัซซีสำหรับระบบไดนามิก** (Fuzzy Modelling of Dynamic Systems)

โครงสร้างทั้งหมดที่กล่าวข้างต้นเป็นแบบจำลองฟัซซีของระบบสถิตย์ สำหรับระบบไดนามิกโดยทั่วไปจะถูกสร้างแบบจำลองจากระบบสถิตย์ ซึ่งขึ้นกับการเลือกสเตทของระบบ (System’s state) แบบจำลองฟัซซีสำหรับระบบไดนามิกสามารถแบ่งได้ 3 แบบหลักดังจะกล่าวดังนี้

3.4.1 **แบบจำลองสเตทสเปซ** (State-Space Model)

แบบจำลองสเตทสเปซใช้ฟังก์ชันสเตททรานสิชัน (State-transition function) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์จากสเตทและอินพุทที่เวลาปัจจุบันไปสู่การเปลี่ยนแปลงของสเตท (Derivative of state) ในกรณีของเวลาต่อเนื่อง (Continuous-time case) หรือไปสู่สเตทที่เวลาถัดไปในกรณีเวลาไม่ต่อเนื่อง (Discrete-time case)

ตัวอย่างแบบจำลอง Discrete-time Takagi-Sugeno

$$\begin{aligned}&\textit{If } x(k) \textit{ is } A_i \textit{ and } u(k) \textit{ is } B_i\\&\textit{Then}\begin{cases}x_i(k+1) = A_i x(k) + B_i u(k)\\ y_i(k) \;\;= C_i x(k)\end{cases}\end{aligned} \quad (3.22)$$

โดย $x(k)$ คือ สเตทของระบบ

$u(k)$ คือ อินพุท

A_i, B_i, C_i คือ เมตริกซ์ที่มีขนาดสัมพันธ์กันของกฎที่ i

แบบจำลองนี้เหมาะที่จะเลือกใช้เมื่อความรู้อยู่มากพอที่จะสามารถหาโครงสร้างของระบบและระบุตัวแปรสเตทได้ ข้อดีของแบบจำลองนี้คือโครงสร้างของแบบจำลองจะสัมพันธ์กับระบบจริง ซึ่งส่งผลให้กฎและพารามิเตอร์มักแสดงให้เห็นถึงความเกี่ยวข้องทางกายภาพ

3.4.2 **แบบจำลองอินพุท-เอาท์พุท** (Input-Output Model)

การสร้างแบบจำลองฟัซซีจากข้อมูลเนื่องมาจากมีความเข้าใจในระบบไดนามิกไม่มากพอ จึงมักใช้การแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทมาประยุกต์ แทนที่จะใช้ความสัมพันธ์ทางกายภาพเช่นเวคเตอร์สเตท สเตทของแบบจำลองนี้แสดงโดยจำนวนของอินพุทและเอาท์พุทในอดีตของระบบ เรียกว่าโครงสร้าง NARX (Nonlinear Autoregressive with exogenous input) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทในอดีตกับค่าเอาท์พุทที่ต้องการทำนายค่า

$$y(k+1) = f(y(k),..., y(k-n+1),...u(k),..., u(k-m+1)) \quad (3.23)$$

โดย k คือ เวลาในการสุ่มตัวอย่าง

m,n คือ จำนวนเต็มที่สัมพันธ์กับลำดับของระบบ (System’s order)

ตัวอย่างแบบจำลองอินพุท-เอาท์พุท Takagi-Sugeno

$$If\ y(k)\ is\ A_{i,1}\ and \ldots y(k-n+1)\ is\ A_{i,n}\ and\ u(k)\ is\ B_{i,1}\ and \ldots u(k-m+1)\ is\ B_{i,m}$$

$$Then\ y(k+1) = \sum_{j=1}^{n} a_{i,j}\, y(k-j+1) + \sum_{j=1}^{m} b_{i,j}\, u(k-j+1) + c_i \tag{3.24}$$

โดย $a_{i,j}, b_{i,j}, c_i$ คือ พารามิเตอร์ในส่วนผล

3.4.3 **แบบจำลองผสม** (Hybrid Approaches)

ในหลายระบบเช่นกระบวนการทางเคมีและชีวเคมีสามารถแบ่งการสร้างแบบจำลองเป็น 2 ลักษณะ คือการสร้างแบบจำลองโดยเข้าใจกลไกของระบบเป็นอย่างดี เช่น สมดุลมวลสารและพลังงาน (Mass and energy balances) อีกลักษณะหนึ่ง คือเข้าใจกลไกแค่บางส่วนและต้องทำการประมาณค่าบางส่วน เช่น อัตราการเกิดปฏิกิริยาจำเพาะ (Specific reaction rates)

สำหรับกรณีหลังบ่อยครั้งจะเกี่ยวข้องกับการใช้แบบจำลองจากการทดลอง (Empirical models) ภายใต้สมมติฐานที่แน่นอนของกระบวนการ แบบจำลองเหล่านี้อาจจะทำนายได้ไม่แม่นยำถ้าสมมติฐานไม่ดีพอหรือมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการแค่บางส่วนเท่านั้น ซึ่งแก้ไขได้โดยรวมสมการอนุพันธ์ (Differential equations) เข้ากับแบบจำลองฟัซซี ก็จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ที่ไม่ทราบจากความรู้ที่มีอยู่ ประสบการณ์ หรือข้อมูลได้ ข้อดีของแบบจำลองฟัซซีชนิดนี้ คือทำหน้าที่เป็นตัวทำนายเชิงตัวเลข (Numerical predictors) ได้เป็นอย่างดี ในขณะเดียวกันยังสามารถจัดการกับข้อมูลข่าวสารเกี่ยวกับความสัมพันธ์ที่ไม่ทราบได้อย่างมีคุณภาพ

3.5 **วิธีการสร้างแบบจำลองฟัซซี** (Constructing Fuzzy Model)

แบบจำลองฟัซซีสามารถสร้างได้สองวิธีดังนี้

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5.1 **แบบจำลองฟัซซีจากความรู้และประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ** (As Fuzzy Expert System, Using Human Knowledge)

หลักการพื้นฐานของการสร้างแบบจำลองฟัซซีถูกเสนอโดย Zadeh ซึ่งเป็นการสร้างแบบจำลองฟัซซีโดยตรงจากความรู้ของผู้เชี่ยวชาญซึ่งเรียกว่า วิธีการโดยตรง (Direct approach) วิธีการนี้เป็นการแสดงเชิงภาษา (Linguistic description) โดยใช้ภาษาทางธรรมชาติ แล้วใช้ทฤษฎีการประมาณด้วยเหตุผล การอธิบายเชิงภาษานี้แสดงในรูปแบบกฎทางภาษา (Linguistic rule) ซึ่งมีลักษณะเป็นกฎเงื่อนไขที่ได้มาจากความรู้ของผู้เชี่ยวชาญโดยตรง ในบางครั้งอาจมีข้อจำกัดในการออกแบบกฎอยู่บ้าง เช่นผู้เชี่ยวชาญอาจออกแบบกฎได้ไม่ครอบคลุมทั้งหมด หรือในบางกรณีที่ความรู้ของผู้เชี่ยวชาญไม่เป็นจริง จะทำให้ได้แบบจำลองที่ไม่ถูกต้อง ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาวิธีการสร้างแบบจำลองที่เป็นทางการที่สามารถใช้ข้อมูลเชิงตัวเลขของระบบแทนความรู้ของมนุษย์

3.5.2 **แบบจำลองฟัซซีจากข้อมูลเชิงตัวเลขของกระบวนการและเทคนิคการระบุหา** (Using Numerical Data and Suitable Identification Techniques)

การสร้างแบบจำลองฟัซซีจากข้อมูลจะอยู่บนพื้นฐานของฟัซซีลอจิก (Fuzzy logic) และการประเมินความเป็นเหตุเป็นผล แบบจำลองฟัซซีมีศักยภาพสูงในความสามารถที่จะรวมข่าวสารจากแหล่งต่างๆ เช่น ข้อมูลหลัก ข้อมูลวัด หรือจากความรู้ที่มีมาแสดงเป็นกฎ

แต่แม้จะไม่มีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการมาก่อน กฎและฟังก์ชันสมาชิกของแบบจำลองฟัซซีก็สามารถสร้างได้จากข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทของกระบวนการร่วมกับเทคนิคการระบุหาแบบจำลองที่เหมาะสม การระบุหาแบบจำลองฟัซซีประกอบด้วยการระบุหาโครงสร้าง (Structure identification) และการระบุหาพารามิเตอร์ (Parameter identification) ของแบบจำลอง เช่นการเลือกตัวแปรอินพุท-เอาท์พุท รูปร่างของฟังก์ชันสมาชิก ค่าพารามิเตอร์ของกฎ จำนวนของกฎเป็นต้น ซึ่งจะกล่าวต่อไป

3.6 **เทคนิคการระบุหาแบบจำลองฟัซซี** (Fuzzy Identification Techniques)

แม้ว่าเราอาจจะไม่มีความรู้ความเข้าใจในระบบที่ศึกษามากนัก การได้มาของกฎฟัซซีและฟังก์ชันสมาชิกนั้น สามารถหาได้จากข้อมูลความสัมพันธ์ของอินพุท-เอาท์พุทได้ มีเทคนิคของการระบุหาแบบจำลองที่ได้มีการเสนอในวารสารต่างๆ หลายวิธีด้วยกัน เช่น ฟัซซีคลัสเตอริง (Fuzzy clustering) วิธีการเรียนรู้แบบนิวรัล การเรียนรู้แบบเหนี่ยวนำ (Inductive learning) ออร์โธโกนัล

กำลังสองน้อยที่สุด (Orthogonal least squares) ฯลฯ การระบุหาแบบจำลองฟัซซีแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกเป็นการระบุหาโครงสร้างของแบบจำลอง และขั้นตอนที่สอง เป็นการระบุหาพารามิเตอร์ของแบบจำลอง

3.6.1 การระบุหาโครงสร้างของแบบจำลอง

การระบุหาโครงสร้างของแบบจำลองสามารถหาได้จากข้อมูลอินพุท-เอาท์พุท โดยใช้เทคนิคการระบุหาที่เหมาะสม ขั้นตอนการระบุหาโครงสร้างของแบบจำลองฟัซซีประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือ การกำหนดตัวแปรในส่วนเงื่อนไขของกฎฟัซซี การกำหนดจำนวนกฎที่เหมาะสมและการกำหนดฟังก์ชันสมาชิก สำหรับงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ฟัซซีคลัสเตอริงในการระบุหาโครงสร้างของแบบจำลองฟัซซี วิธีการในการกำหนดของแต่ละขั้นตอนแสดงได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การกำหนดตัวแปรในส่วนเงื่อนไข

การกำหนดตัวแปรในส่วนเงื่อนไขของกฎ เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญต่อความถูกต้องและสมรรถนะของแบบจำลอง เนื่องจากว่าถ้าทำการเลือกตัวแปรมากหรือน้อยเกินไป จะส่งผลถึงค่าความถูกต้องของแบบจำลอง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกตัวแปรให้เหมาะสม ตัวแปรที่จะเลือกมักเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าเอาท์พุท และหลังจากการคลัสเตอริงให้พิจารณาฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์ ฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์แสดงถึงค่าระดับความเป็นสมาชิกของข้อมูลแต่ละจุดในแต่ละกลุ่ม โดยที่แต่ละกลุ่มเปรียบเสมือนกฎแต่ละข้อของแบบจำลองฟัซซี คลัสเตอริงจะทำการเลือกตัวแปรที่เหมาะสมอีกครั้งโดยสังเกตจากฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์ว่าสามารถแสดงเป็นฟังก์ชันสมาชิกรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งได้หรือไม่ ถ้าไม่แสดงความหมายเป็นฟังก์ชันสมาชิกรูปแบบใดเลย ตัวแปรนั้นจะไม่ถูกกำหนดเป็นตัวแปรในส่วนเงื่อนไข

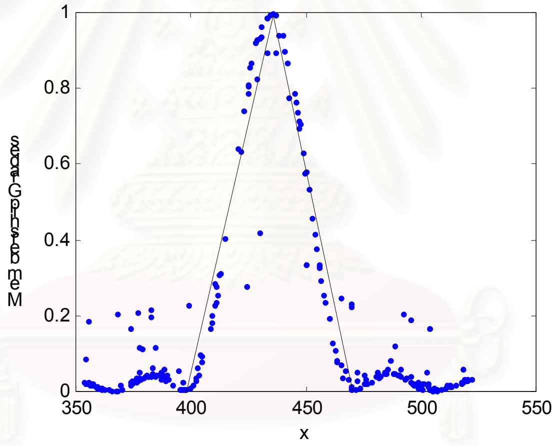
ขั้นตอนที่ 2 การกำหนดจำนวนกฎฟัซซีที่เหมาะสม

จากการพิจารณาอัลกอริธึมของฟัซซีคลัสเตอริงพบว่าจำเป็นต้องมีการกำหนดจำนวนกลุ่มเริ่มต้นก่อนโดยที่จำนวนกฎฟัซซีจะมีค่าเท่ากับจำนวนกลุ่มที่กำหนด ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการออฟติไมซ์เพื่อระบุหาจำนวนกลุ่มหรือกฎฟัซซีที่เหมาะสม โดยประยุกต์ใช้ค่าเกณฑ์ $J(c)$ เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดสินจำนวนกฎที่เหมาะสม ค่าเกณฑ์นี้เป็นการพิจารณาค่าความแตกต่างระหว่าง

ค่าความแปรปรวนของข้อมูลภายในกลุ่มและค่าความแปรปรวนของข้อมูลระหว่างกลุ่ม จำนวนกลุ่มที่เหมาะสมจะต้องทำให้ได้ค่าความแปรปรวนในแต่ละกลุ่มมีค่าต่ำที่สุดและให้ค่าความแปรปรวนระหว่างกลุ่มมีค่าสูงสุด การทำงานของขั้นตอนนี้แสดงดังรูปที่ 3.3

ขั้นตอนที่ 3 การกำหนดฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไขของกฎ

การกำหนดฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไขของกฎ ทำโดยใช้ฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์ (Fuzzy Partition Matrix) ซึ่งได้จากการฟัซซีคลัสเตอริงข้อมูล การหาฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปรในส่วนเงื่อนไขของแต่ละกฎ ทำได้โดยเขียนกราฟ (Plot) หรือฉาย (Project) ฟัซซีพาร์ทิชันของแต่ละกฎไปยังแกนของแต่ละตัวแปร ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เพื่อให้การประมาณกฎฟัซซีเป็นไปได้ง่ายควรเลือกประมาณด้วยฟังก์ชันที่ง่าย เช่น ฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม ฟังก์ชันรูปสี่เหลี่ยมคางหมู เป็นต้น



รูปที่ 3.1 วิธีการกำหนดฟังก์ชันสมาชิกจากฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับรายละเอียดเกี่ยวกับฟัซซีคลัสเตอริงได้แสดงไว้ในหัวข้อถัดไป

3.6.2 การระบุหาพารามิเตอร์ของแบบจำลอง

ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองฟัซซีประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ในส่วนเงื่อนไขของกฎและค่าพารามิเตอร์ในส่วนของผลของกฎ ค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไขทำการระบุได้โดยใช้ฟัซซีคลัสเตอริง ส่วนค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลของกฎหรือค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้นของแบบจำลองฟัซซีแบบทากาจิ-ซูจีโน สามารถหาได้โดยการประยุกต์ใช้วิธีลีสท์สแควร์

สมมติให้แบบจำลองฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno แสดงได้เป็นกฎเงื่อนไขดังนี้

$$
\begin{aligned}
&R^1 : \mathit{If}\ x_1\ \mathit{is}\ A_1^1, ..., \mathit{and}\ x_k\ \mathit{is}\ A_{k1}^1\ \ \mathit{Then}\ y = p_0^1 + p_1^1 . x_1 + ... + p_k^1 . x_k \\
&\vdots \\
&R^n : \mathit{If}\ x_1\ \mathit{is}\ A_1^n, ..., \mathit{and}\ x_k\ \mathit{is}\ A_{k1}^n\ \ \mathit{Then}\ y = p_0^n + p_1^n . x_1 + ... + p_k^n . x_k
\end{aligned}
\tag{3.25}
$$

ค่าเอาท์พุทของแบบจำลองหาได้จากสมการที่ (3.26)

$$
y = \frac{\sum_{i=1}^{n} (A_1^i(x_1) \wedge ... \wedge A_n^i(x_n)).(p_0^i + p_1^i . x_1 + ... + p_k^i . x_k)}{\sum_{i=1}^{n} (A_1^i(x_1) \wedge ... \wedge A_n^i(x_n))} \tag{3.26}
$$

$$
w_i = \frac{A_1^i(x_1) \wedge ... \wedge A_n^i(x_n)}{\sum_{i=1}^{n} (A_1^i(x_1) \wedge ... \wedge A_n^i(x_n))} \tag{3.27}
$$

$$
y = \sum_{i=1}^{n} w_i (p_0^i + p_1^i . x_1 + ... + p_k^i . x_k) \tag{3.28}
$$

$$
y = \sum_{i=1}^{n} (p_0^i . w_i + p_1^i . x_1 . w_i + ... + p_k^i . x_k . w_i) \tag{3.29}
$$

จากสมการที่ (3.29) เราสามารถหาค่าพารามิเตอร์ $p_0^i, p_1^i, ..., p_k^i,\ \ i = 1, 2, ..., n$ โดยใช้วิธีลีสท์สแควร์ดังนี้

กำหนดให้เซตของข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทเป็น $x_{1j}, x_{2j}, ..., x_{kj}$ และ $y_j,\ \ j = 1, ..., m$ ตามลำดับ

X เป็นเมตริกซ์ที่มีขนาด $m\,x\,n$ แสดงในสมการที่ (3.30)

Y เป็นเวคเตอร์เอาทพุทที่แสดงดังสมการที่ (3.32)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$X = \begin{bmatrix} w_{11},..., & w_{n1}, x_{11}.w_{11},..., & x_{11}.w_{n1},... & \\ . & ..., & x_{11}.w_{n1},..., & x_{k1}.w_{n} \\ . & & & . \\ w_{1m},..., & w_{nm}, x_{1m}.w_{1m},..., & x_{1m}.w_{1m},... & . \\ & ..., & x_{k1}.w_{1m},..., & x_{k1}.w_{nm} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$w_{ij} = \frac{A_{i1}(x_{1j}) \wedge ... \wedge A_{ik}(x_{kj})}{\sum_{j} A_{i1}(x_{1j}) \wedge ... \wedge A_{ik}(x_{kj})} \quad (3.31)$$

โดยที่ $\wedge$ เป็นตัวดำเนินการ *Min*

$$Y = [y_1,..., y_m]^T \quad (3.32)$$

$$P = [p_0^1,..., p_0^n, p_1^1,..., p_1^n, p_k^1,..., p_k^n]^T \quad (3.33)$$

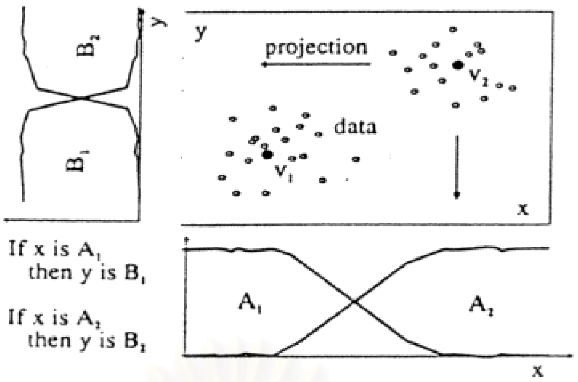
ดังนั้นเวคเตอร์พารามิเตอร์ (P) คำนวณได้จากสมการที่ (3.34)

$$P = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (3.34)$$

จะได้ค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลของแบบจำลองฟัซซี

3.7 ฟัซซีคลัสเตอร์ริง

วิธีการระบุหาแบบจำลองโดยใช้ฟัซซีคลัสเตอริงนั้น มีที่มาจากการวิเคราะห์ข้อมูล (Data analysis) และแพทเทิรินเรคคอกนิชัน (Pattern recognition) ซึ่งเป็นการหาโครงสร้างของข้อมูล แนวคิดพื้นฐานของคลัสเตอริงคือ การจัดกลุ่มข้อมูลออกเป็นกลุ่มย่อย ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวแทนของแบบจำลองได้ โดยใช้หลักการของระดับความเป็นสมาชิก (Graded of membership) เพื่อแสดงดีกรีของข้อมูลที่มีความคล้ายคลึงกับข้อมูลต้นแบบ (Prototypical object) ระดับความคล้ายคลึงกันสามารถคำนวณได้โดยการวัดระยะห่างที่เหมาะสม ด้วยวิธีการนี้ข้อมูล สามารถถูกจัดกลุ่ม โดยให้ข้อมูลภายในกลุ่มเดียวกันต้องมีความคล้ายคลึงกันเท่าที่จะเป็นไปได้ และข้อมูลที่อยู่ต่างกลุ่มควรมีความแตกต่างกันให้มากที่สุด



รูปที่ 3.2 การระบุหากฎฟัซซีโดยวิธีคลัสเตอริง

แนวคิดของฟัซซีคลัสเตอริงแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งข้อมูลถูกจัดเป็น 2 กลุ่ม โดยมีจุด v_1 และ v_2 เป็นต้นแบบ ด้วยการใช้การวัดระยะห่างแบบยุคลิด (Eulidean distance measure) การแบ่งข้อมูลถูกแสดงในรูปของฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์ (Fuzzy partition matrix) ที่มีส่วนประกอบเป็น μ_{ij} ในที่นี้ μ_{ij} เป็นค่าความเป็นสมาชิกของข้อมูลที่จุด $[x_i, y_j]$ ในกลุ่มฟัซซี (Fuzzy cluster) ที่มีจุด v_j เป็นจุดศูนย์กลางหรือต้นแบบ ทั้งฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์ และจุดต้นแบบหาได้โดยใช้วิธีการคลัสเตอริง

ด้วยวิธีการนี้กฎฟัซซีสามารถหาได้โดยฉายกลุ่มฟัซซีไปบนตัวแปรของแบบจำลอง ในรูปที่ 3.2 แสดงเซตของข้อมูลที่สามารถแยกได้เป็น 2 กลุ่ม ดังนั้นจึงมีกฎฟัซซีจำนวน 2 กฎ รูปแบบฟังก์ชันสมาชิกที่ได้โดยการฉายของกลุ่มฟัซซีขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของข้อมูล

มีการเสนอวิธีการคลัสเตอริงอยู่หลายวิธีด้วยกัน แต่สำหรับงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้คลัสเตอริงแบบซี-มีน (Fuzzy C-Mean Clustering) ในการระบุหาโครงสร้างของแบบจำลองฟัซซี

3.7.1 **ฟัซซีคลัสเตอริงแบบซี-มีน** (Fuzzy C-Mean Clustering)

วัตถุประสงค์ของฟัซซีคลัสเตอริงแบบซี-มีนคือการจัดแบ่งข้อมูลให้ได้ตามจำนวนกลุ่มฟัซซี (Fuzzy Cluster) ที่ได้กำหนดไว้อย่างเหมาะสม จำนวนกลุ่ม c ต้องมีอย่างน้อย 2 กลุ่ม เพราะถ้ามีกลุ่มเดียวนั่นหมายความว่าข้อมูลทุกจุดอยู่ในกลุ่มเพียงกลุ่มเดียวและ c จะต้องน้อยกว่า n ซึ่งคือจำนวนข้อมูลทั้งหมดเพราะถ้า $c = n$ นั่นหมายความว่าแต่ละกลุ่มจะมีข้อมูลเพียงจุดเดียว ฟัซซีคลัสเตอริงแบบซี-มีนเหมาะสำหรับข้อมูลที่กระจายตัวอยู่รอบๆจุดศูนย์กลางของกลุ่มคือ

เวคเตอร์ v_i $(i=1,2,...,c)$ ซึ่งเป็นต้นแบบของข้อมูลในกลุ่ม i โดยที่ v_i ไม่จำเป็นต้องเป็นข้อมูลในเซต

สมมติเซตของข้อมูลตัวอย่างมีทั้งหมด n ค่า $X=\{x_1,x_2,...,x_n\}$ และข้อมูลแต่ละจุดจะประกอบด้วย m โคออดิเนต (Coordinates) ดังนั้น $X=[x_{k1},x_{k2},...,x_{km}]$ โดย $k=1,2,...,n$ และข้อมูลแต่ละจุดจะมีค่าความเป็นสมาชิกตั้งแต่ 0 ถึง 1

$$\mu_{ik} \in [0,1] \qquad (1 \le i \le c, 1 \le k \le n) \tag{3.35}$$

สามารถเขียนพาร์ทิชันเมตริกซ์ซึ่งแสดงค่าความเป็นสมาชิกของข้อมูลแต่ละจุดในแต่ละกลุ่มดังนี้

$$U=\begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \cdots & \mu_{1n} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \cdots & \mu_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ \mu_{c1} & \mu_{c2} & \cdots & \mu_{cn} \end{bmatrix} \tag{3.36}$$

โดย $\sum_{i=1}^{c}\mu_{ik}=1$ ซึ่งหมายความว่าข้อมูลจุดหนึ่งจะมีค่าความเป็นสมาชิกอยู่ในทุกกลุ่มและผลรวมของค่าความเป็นสมาชิกจากทุกกลุ่มต้องมีค่าเท่ากับ 1

สำหรับจำนวนกฎที่เหมาะสมสามารถหาได้โดยการหาค่าที่น้อยที่สุด (Minimizing) ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function, $J(c)$) ดังสมการนี้

$$J(c)=\sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c}(\mu_{ik})^{w}(d_{ik})^2 \tag{3.37}$$

โดยที่ $w \in (1,\infty)$ เรียกว่าดัชนีฟัซซี (Fuzziness Index) เป็นค่าถ่วงน้ำหนักค่าความเป็นสมาชิกซึ่งยังไม่มีการรายงานถึงการหาค่า w ที่เหมาะสม แต่ส่วนใหญ่นิยมใช้ $w=2$ และ d_{ik} เป็นระยะทางระหว่างข้อมูลกับจุดศูนย์กลางของกลุ่ม นิยามตามสมการที่ (3.38)

$$d_{ik}^2=\left\| x_k - v_i \right\|^2 - \left\| v_i - \bar{x} \right\|^2 \tag{3.38}$$

ซึ่ง $\left\| x_k - v_i^{(t)} \right\| = \left[\sum_{j=1}^{m} (x_{kj} - v_{ij}^{(t)})^2 \right]^{1/2}$

3.7.2 **อัลกอริธึมของคลัสเตอริงแบบฟัซซีซี-มีน** (The Fuzzy C-Mean Algorithm)

ทำการคำนวณวนซ้ำตามขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดจำนวนกลุ่มที่ต้องการ กำหนดค่า $w=1$ สมมติฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์เริ่มต้น $U^{(0)}$ และตัวแปร t แสดงถึงรอบที่วนซ้ำ โดย $t=0$ เป็นค่าเริ่มต้น
2. คำนวณจุดศูนย์กลางของกลุ่ม $v_i^{(t)} = [v_{i1}^{(t)}\ v_{i2}^{(t)}, ..., v_{im}^{(t)}]$ โดยที่ $i=1,2,...,c$ ได้จากสมการที่ (3.39)

$$v_{ij}^{(t)} = \frac{\sum_{k=1}^{n} (u_{ik}^{(t)})^w . x_{kj}}{\sum_{k=1}^{n} (u_{ik}^{(t)})^w} \tag{3.39}$$

3. คำนวณระยะทางระหว่างจุดข้อมูลแต่ละจุดกับจุดศูนย์กลางของแต่ละกลุ่มหรือความคล้ายคลึงภายในกลุ่ม โดยใช้สมการที่ (3.40)

$$d_{ik}^{(t)} = \left\| x_k - v_i^{(t)} \right\| = \left[\sum_{j=1}^{m} (x_{kj} - v_{ij}^{(t)})^2 \right]^{1/2} \tag{3.40}$$

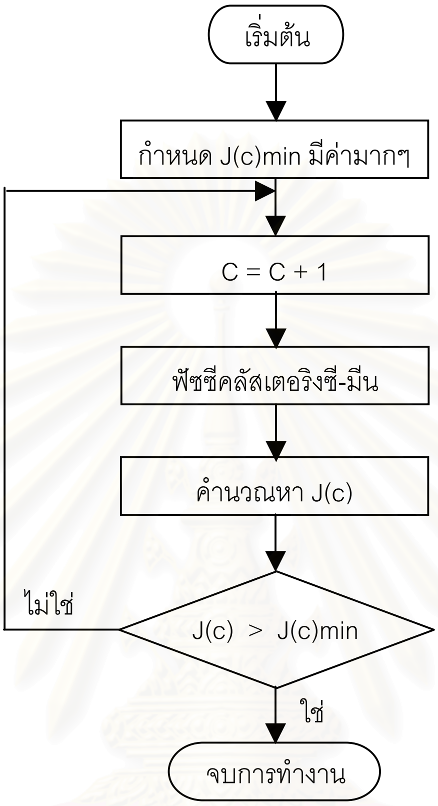
4. คำนวณค่าความเป็นสมาชิกค่าใหม่ของข้อมูลแต่ละจุด จากสมการที่ (3.41)

$$\mu_{ik}^{(t+1)} = \frac{1}{\left[\sum_{j=1}^{c} \left(\frac{d_{ik}^{(t)}}{d_{jk}^{(t)}} \right)^{2/(w-1)} \right]} \tag{3.41}$$

5. การคำนวณวนซ้ำจะหยุดเมื่อการคำนวณเป็นไปตามสมการที่ (3.42) มิเช่นนั้นจะกลับไปที่ ขั้นตอนที่ 2 โดย $t=t+1$

$$Max(Max(U_{ik}^{(t+1)} - U_{ik}^{(t)})) \le \varepsilon \quad (3.42)$$

โดย ε คือค่าระดับความถูกต้อง ในงานวิจัยนี้กำหนดให้เป็น 0.01



รูปที่ 3.3 แผนผังการทำงานของการกำหนดจำนวนกฎฟัซซีที่เหมาะสม

บทที่ 4

ตัวควบคุมฟัซซี

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงตัวควบคุมฟัซซี และการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีที่สามารถออกแบบได้หลายวิธี เช่น การออกแบบโดยใช้ความรู้ของผู้เชี่ยวชาญ การออกแบบโดยใช้ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทของกระบวนการ การออกแบบจากแบบจำลองฟัซซี และการออกแบบโดยอาศัยการเรียนรู้ จากนั้นกล่าวถึงรายละเอียดของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกที่ออกแบบโดยผู้เชี่ยวชาญ ตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลองภายใน และตัวควบคุมฟัซซีแบบแบ่งย่านการทำงาน

4.1 บทนำ

ตัวควบคุมฟัซซีถูกประยุกต์ใช้ครั้งแรกโดย Mamdani (1974) การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีในสมัยแรกๆ เป็นการออกแบบโดยอาศัยความรู้และประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ โดยผู้ออกแบบเป็นผู้ตั้งกฎควบคุมเอง แต่ในบางครั้งการออกแบบกฎโดยอาศัยประสบการณ์อาจไม่ครอบคลุมหรือขาดความเข้าใจในบางส่วนของกระบวนการ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาวิธีการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีจากแบบจำลองฟัซซี ซึ่งเรียกตัวควบคุมชนิดนี้ว่าตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลอง โดยที่แบบจำลองเปรียบเสมือนเป็นฐานความรู้ของตัวควบคุม ดังนั้นตัวควบคุมที่อาศัยแบบจำลองจำเป็นต้องมีแบบจำลองที่มีความถูกต้องและเหมาะสม เพื่อให้สามารถทำนายค่าเอาท์พุทและพฤติกรรมของระบบได้อย่างถูกต้อง

4.2 วิธีการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีลอจิก

ระบบการควบคุมโดยใช้ฟัซซีลอจิก คือระบบควบคุมที่อิงกับฐานกฎฟัซซี ซึ่งเซตของกฎเหล่านี้แสดงถึงกลไกการตัดสินใจในการควบคุมกระบวนการ เพื่อลดผลกระทบต่างๆ ที่เข้าสู่ระบบ การออกแบบกฎการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกสมัยแรกๆ เป็นการออกแบบโดยใช้ความรู้ ความเข้าใจ หรือประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ แต่ในปัจจุบันได้มีการเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีไว้หลายวิธี ซึ่งพอจะสรุปได้ 4 วิธี ดังนี้

1. วิธีการโดยตรง (Direct approach)

วิธีการนี้เป็นการออกแบบกฎฟัซซีจากวิธีการควบคุมกระบวนการของมนุษย์ โดยที่กฎและฟังก์ชันสมาชิกถูกออกแบบโดยผู้เชี่ยวชาญ ตัวควบคุมฟัซซีชนิดนี้มักเรียกว่า ตัวควบคุมฟัซซีเชิงภาษา (Linguistic fuzzy controller) ในการที่จะทำให้สมรรถนะการควบคุมที่ดีนั้น อาจจำเป็นต้องมีการทดลองและทดสอบกฎการควบคุมหลายๆ ครั้ง ซึ่งอาจจำเป็นต้องมีการลดหรือเพิ่มกฎ แต่อย่างไรก็ตามการอธิบายของผู้เชี่ยวชาญอาจจะไม่สมบูรณ์หรือไม่ถูกต้องได้ ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากข้อจำกัด หรือขาดข้อมูลความรู้ในบางส่วนของกระบวนการ

2. วิธีการออกแบบโดยใช้ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทของการควบคุมของผู้ปฏิบัติการ

วิธีการนี้เกิดจากการที่ผู้ปฏิบัติการสามารถดำเนินการควบคุมได้อย่างถูกต้องโดยใช้ความรู้ ความชำนาญและประสบการณ์ โดยที่ผู้ปฏิบัติการมิได้รู้ถึงแบบจำลองของกระบวนการเลย ซึ่งในบางครั้งอาจไม่สามารถระบุวิธีการตัดสินใจของการควบคุมออกมาได้ในลักษณะของคำหรือข้อความที่เหมาะสมได้ ในกรณีเช่นนี้กฎการควบคุมอาจสรุปได้จากข้อมูลอินพุทและเอาท์พุทของการปฏิบัติการ

3. วิธีการออกแบบโดยใช้จากแบบจำลองฟัซซี

วิธีการนี้เริ่มต้นจากการหาแบบจำลองฟัซซีของกระบวนการขึ้นมาก่อน แล้วจึงสร้างกฎการควบคุมฟัซซีจากการวิเคราะห์แบบจำลองนั้น แม้ว่าวิธีการนี้ข้างยุ่งยากและซับซ้อน แต่ให้สมรรถนะที่ดีและเชื่อถือได้ ซึ่งงานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้วิธีการออกแบบโดยใช้จากแบบจำลองฟัซซีในการสร้างตัวควบคุมฟัซซี

4. วิธีการออกแบบโดยอาศัยการเรียนรู้

วิธีการนี้เป็นการกำหนดให้ตัวควบคุมสามารถเรียนรู้ได้เองว่ากฎหรือพารามิเตอร์ที่สำคัญที่เหมาะสมควรเป็นอย่างไร แล้วทำการปรับให้ได้ค่าที่เหมาะสม โดยดูจากค่าสมรรถนะของการควบคุม ในปัจจุบันได้มีการศึกษาและประยุกต์ใช้นิวรัลเน็ทเวิร์กร่วมกับฟัซซีลอจิก เพื่อสร้างตัวควบคุมนิวโร-ฟัซซี (Neuro-fuzzy controller) โดยเป็นการอาศัยข้อดีด้านความสามารถในการเรียนรู้จากนิวรัลเน็ทเวิร์ก และความสามารถในการตีความหรือจัดการข้อมูลที่ไม่ชัดเจนของระบบฟัซซีลอจิก

4.3 ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบผู้เชี่ยวชาญ

ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกเป็นการอาศัยแนวคิดของการสร้างอัลกอริธึมของการควบคุม โดยใช้กฎเชิงตรรก (Logical rules) ซึ่งเป็นการพยายามที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของอัลกอริธึมของการควบคุมแบบทั่วไป (Conventional control algorithms) อัลกอริธึมการควบคุมที่ใช้กฎเชิงตรรกนี้มีลักษณะคล้ายแนวคิดแบบมนุษย์ ทฤษฎีฟัซซีเซตถูกใช้เป็นเครื่องมือในการอธิบายอัลกอริธึมเชิงภาษา และได้มีการประยุกต์ใช้ฟัซซีลอจิกในการควบคุมระบบที่มีความซับซ้อน ซึ่งตัวควบคุมนี้สร้างจากความรู้และประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ

กฎเชิงภาษาเป็นส่วนสำคัญของตัวควบคุมฟัซซีลอจิก ซึ่งเป็นการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุทและเอาท์พุท โดยแสดงในรูปกฎแบบมีเงื่อนไข โดยทั่วไปแล้วสามารถแสดงตัวควบคุมฟัซซีลอจิกในรูปแบบที่คล้ายกับกฎการควบคุมทั่วไปได้ดังนี้

$$u(k) = F(e(k), e(k-1), ..., e(k-v), u(k-1), u(k-2), ..., u(k-v)) \tag{4.1}$$

โดยที่ฟังก์ชัน F เป็นการอธิบายโดยใช้กฎเงื่อนไข ซึ่งไม่ได้มีความหมายเป็นสมการเชิงอนุพันธ์หรือทรานสเฟอร์ฟังก์ชันแต่อย่างใด

ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุม $\Delta u(k)$ กับค่าความผิดพลาด $e(k)$ และความเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด $\Delta e(k)$ สามารถเขียนกฎการควบคุมได้ดังนี้

$$\Delta u(k) = F(e(k), \Delta e(k)) \tag{4.2}$$

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \tag{4.3}$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \tag{4.4}$$

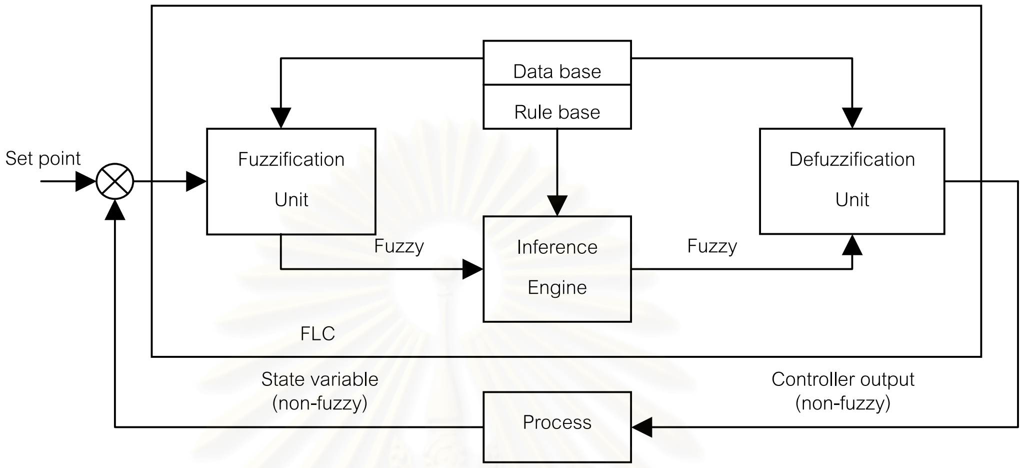
โดยที่สมมติให้ $v = 1$ ค่าเอาท์พุทของตัวควบคุม $u(k)$ สามารถหาได้ดังนี้

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \tag{4.5}$$

ยกตัวอย่างเช่น

If $e(k)$ *is negative and* $\Delta e(k)$ *is positive Then* $\Delta u(k)$ *is zero*

โครงสร้างหลักของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงขั้นตอนที่สำคัญของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกได้แก่ กระบวนการฟัซซิฟิเคชัน กระบวนการอนุมาน กระบวนการดีฟัซซิฟิเคชัน



รูปที่ 4.1 โครงสร้างโดยทั่วไปของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

ตัวแปรกระบวนการจะถูกวัดและเปรียบเทียบกับค่าปฏิบัติการเซ็ทพอยท์เพื่อใช้แสดงสถานการณ์ของการควบคุมจากนั้นจะทำการสเกลด้วยแฟกเตอร์การสเกลของอินพุท แล้วแปลงค่าตัวแปรให้อยู่ในขอบเขตของวาทยเอกภพของฟัซซีอินพุทนั้นๆ ค่าที่ได้จากการเชื่อมโยงจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของตัวแปรฟัซซีภายในกระบวนการฟัซซิฟิเคชัน โดยการแทนค่าลงในฟังก์ชันสมาชิก ที่ได้นิยามไว้สำหรับแต่ละฟัซซีเซต ตัวแปรฟัซซีที่ได้จะถูกส่งเข้าสู่หน่วยอนุมาน เพื่อทำการอนุมานกับกฎการควบคุมที่อยู่ในรูปแบบของข้อความ “If – Then” เพื่อให้ได้ข้อสรุปที่เป็นพฤติกรรมของการควบคุม ข้อสรุปฟัซซีที่ได้จะถูกเปลี่ยนกลับให้อยู่ในรูปของค่าตัวแปรแบบคริส์พ ซึ่งจะใช้เป็นเอาท์พุทของตัวควบคุมโดยกระบวนการดีฟัซซิฟิเคชัน แล้วทำการเปลี่ยนเปลี่ยนให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ของตัวแปรเอาท์พุทและสเกลค่าด้วยแฟกเตอร์การสเกลไปเป็นสัญญาณปรับกระบวนการ

สิ่งที่ต้องคำนึงในการออกแบบฐานความรู้

1. การเลือกตัวแปรอินพุทและเอาท์พุท

การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีลอจิกนั้น ขั้นตอนแรกจำเป็นที่จะต้องรู้ถึงจำนวนตัวแปรอินพุทและเอาท์พุทที่ใช้ในตัวควบคุม ซึ่งจำนวนของตัวแปรเหล่านี้ขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของกระบวนการที่ถูกควบคุม

2. การกำหนดฟังก์ชันสมาชิก

ฟังก์ชันสมาชิกสำหรับฟัซซีเซตนั้นสามารถ นิยามได้ 2 วิธีคือ นิยามโดยตัวเลข เป็นการกำหนดดีกรีของการเป็นสามาชิกของแต่ละฟัซซีเซตในลักษณะของเวคเตอร์จำนวน และนิยามโดยฟังก์ชัน ซึ่งดีกรีของความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซตจะเป็นลักษณะของฟังก์ชัน รูปร่างของฟังก์ชันที่นิยมได้แก่ ฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม ฟังก์ชันรูปสี่เหลี่ยมคางหมู และฟังก์ชันรูประฆัง เนื่องจากสามารถอธิบายในรูปของฟังก์ชันและพารามิเตอร์ได้ง่าย ใช้หน่วยความจำน้อย

3. การกำหนดแฟกเตอร์การสเกล

ค่าแฟกเตอร์ในการสเกล ใช้ในการแปลงค่าของตัวแปรอินพุททางกายภาพให้อยู่ในนอร์มัลไลซ์โดเมน และแปลงค่านอร์มอลไลซ์ของตัวแปรเอาท์พุทเป็นค่าทางกายภาพ ดังนั้นแฟกเตอร์การสเกลจึงมีความสำคัญต่อสมรรถนะของตัวควบคุม และเสถียรภาพของระบบ

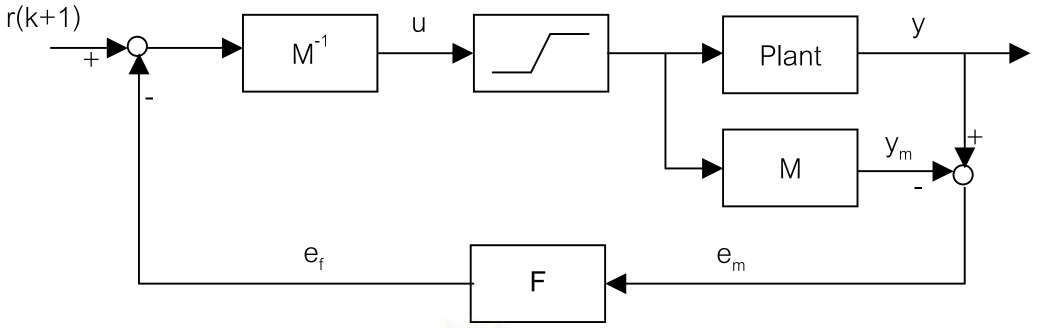
4. การพาร์ทิชันปรภูมิอินพุทและเอาท์พุท

การกำหนดจำนวนของฟัซซีเซตในปริภูมิของแต่ละตัวแปรจำเป็นต้องกำหนดให้เหมาะสม เนื่องจากจำนวนฟัซซีเซตที่นิยามสำหรับแต่ละตัวแปรจะมีผลโดยตรงต่อจำนวนกฎฟัซซี ซึ่งจำนวนกฎฟัซซีที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับความยากง่ายและความแม่นยำในการควบคุมที่ต้องการ โดยส่วนมากแล้วจะใช้การพิจารณาจากประสบการณ์และการลองผิดลองถูก

4.4 **ตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลอง** (Fuzzy Model-Based Controller)

การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีโดยวิธีทางตรง เป็นการออกแบบกฎการควบคุมโดยอาศัยผู้เชี่ยวชาญ แต่ในบางครั้งอาจพบปัญหาคือ กฎที่ได้จากการออกแบบไม่ครอบคลุมเหตุการณ์ทั้งหมดได้ หรือขาดข้อมูลความรู้ของกระบวนการในบางส่วน ดังนั้นจึงมีการพัฒนาการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีจากแบบจำลองฟัซซี

โครงสร้างของการควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นลักษณะของการควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองภายใน (Internal Model Control, IMC) เพียงแต่แบบจำลองที่ใช้ในการควบคุมถูกเปลี่ยนเป็นแบบจำลองฟัซซี เพื่อให้สามารถใช้ได้กับกระบวนการที่ไม่สามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้หรือกระบวนการที่มีความยุ่งยากซับซ้อน โดยโครงสร้างของการควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองภายในนี้ประกอบด้วย 4 ส่วนคือ แบบจำลองฟัซซี (M) ตัวควบคุมที่ได้จากการผกผันแบบจำลองฟัซซี (M^{-1}) ขอบเขตของสัญญาณควบคุม และตัวกรองสัญญาณ (F) ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 โครงสร้างตัวควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองภายใน

ลักษณะสำคัญของการควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองภายในนี้ สามารถจัดการกับความแตกต่างระหว่างเอาท์พุทที่ได้จากแบบจำลองและเอาท์พุทที่ได้จากกระบวนการจริง โดยที่ค่าเอาท์พุทจากตัวควบคุมจะถูกส่งไปใช้ในการควบคุมกระบวนการการและส่งไปที่แบบจำลองกระบวนการที่อยู่ขนานกับกระบวนการจริง ซึ่งเป็นแบบจำลองที่เหมือนกันกับแบบจำลองที่อยู่ในตัวควบคุมด้วย ค่าความแตกต่างของเอาท์พุทของกระบวนการจริงและเอาท์พุทของแบบจำลองที่ออกมานั้นแสดงถึงความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองและตัวรบกวนกระบวนการ ค่าความแตกต่างนี้ถูกส่งกลับเข้าไปที่ตัวควบคุมเพื่อใช้ในการชดเชยความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองและตัวรบกวนที่เกิดขึ้นในกระบวนการจริงซึ่งไม่มีในแบบจำลอง

จากกฎฟัซซี ส่วนผลของกฎฟัซซีดังสมการ (4.6)

$$y_i(k+1) = a_i\, x(k) + b_i\, u(k) + c_i \qquad i \text{ คือจำนวนกฎฟัซซี} \qquad (4.6)$$

ค่าเอาท์พุทจริง $y(k+1)$ หาได้ดังนี้

$$y(k+1) = \sum_{i=1}^{K} w_i\,(a_i\, x(k) + b_i\, u(k) + c_i) \qquad (4.7)$$

โดยค่า w_i คือค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมดในส่วนเงื่อนไข คำนวณได้จากสมการ (3.27)

K คือจำนวนกฎทั้งหมด

จากสมการ (4.6) สามารถเขียนในรูปทั่วไปได้ดังนี้

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$y(k+1) = f(x(k)) + g(x(k))u(k) \tag{4.8}$$

การคำนวณค่าเอาท์พุทของตัวควบคุม $u(k)$ ที่ทำให้เอาท์พุทของกระบวนการที่เวลาถัดไปมีค่าเท่ากับเอาท์พุทที่ต้องการหรืออ้างอิง $r(k+1)$ ทำโดยการผกผันสมการ (4.8) ได้ดังนี้

$$u(k) = \frac{y(k+1) - f(x(k))}{g(x(k))} \tag{4.9}$$

แทนค่า $y(k+1)$ ด้วยค่าที่ต้องการ $r(k+1)$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$u(k) = \frac{r(k+1) - \sum_{i=1}^{K} w_i (a_i x(k) + c_i)}{\sum_{i=1}^{K} w_i b_i} \tag{4.10}$$

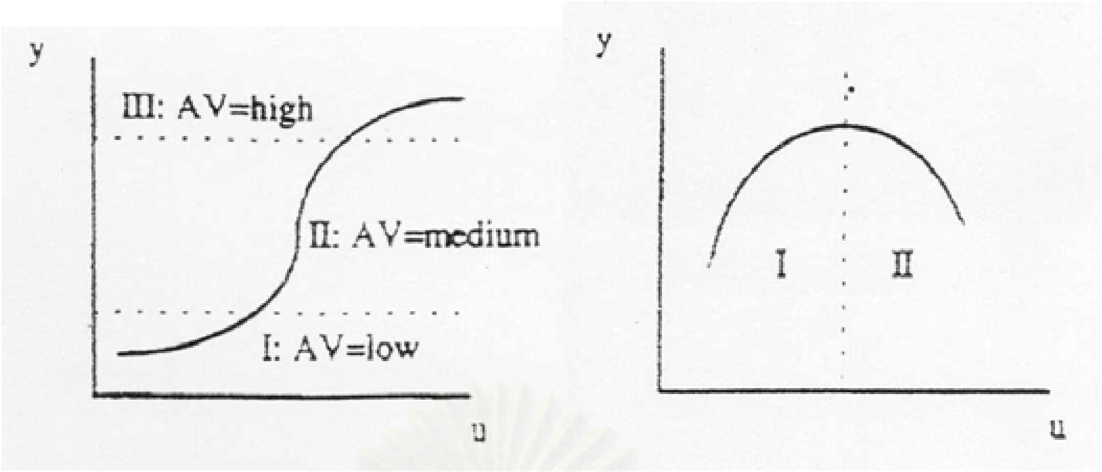
สำหรับตัวกรองสัญญาณทำหน้าที่ในการกรองสัญญาณรบกวนจากการวัดและเพื่อให้การควบคุมมีเสถียรภาพในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลอง สมการของตัวกรองที่ใช้ในการควบคุมแสดงดังสมการ (4.11)

$$e_f(k) = (e_f(k-1) x G_e) + (e_m(k) x\ (1-G_e)) \tag{4.11}$$

โดยค่า G_e คือแฟกเตอร์การปรับจูน

4.5 ตัวควบคุมฟัซซีแบบแบ่งย่านการทำงาน

ระบบที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทางเคมีนั้นเป็นระบบที่มีคุณลักษณ์ไม่เป็นเชิงเส้นทั้งสิ้น ลักษณะนี้เองทำให้กระบวนการมีย่านการทำงานที่แตกต่างกัน พฤติกรรมของระบบเช่น ค่าเกนสูง (High-gain) ค่าเกนต่ำ (Low-gain) ค่าเวลาคงที่มีค่ามาก (Large-time-constant) และค่าไทม์ดีเลย์สูง (Long-time-delay) จะเป็นตัวชี้บ่งย่านการทำงานของกระบวนการ



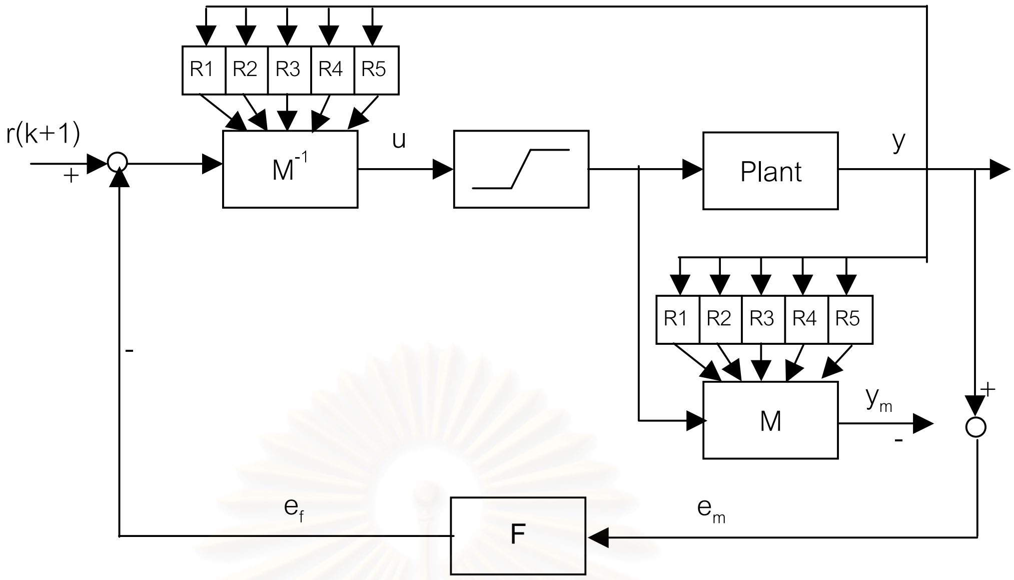
(ก) (ข)

รูปที่ 4.3 ความไม่เป็นเชิงเส้นของกระบวนการที่มีค่าเกนต่างกัน

(ก) ฟังก์ชันรูปตัวเอส (ข) ฟังก์ชันรูประฆังคว่ำ

รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะของความไม่เป็นเชิงเส้นของกระบวนการที่ทำให้ค่าเกนแตกต่างกัน ลักษณะของฟังก์ชันรูปตัวเอสในรูปที่ 4.3 (ก) มีย่านที่มีค่าเกนต่ำ 2 ย่านและค่าเกนสูง 1 ย่าน ทำให้ยากที่จะออกแบบตัวควบคุมของกระบวนการ ซึ่งหากออกแบบตัวควบคุมที่สามารถควบคุมได้ดีในย่านเกนสูงสมรรถนะของย่านเกนต่ำก็จะลดลง และในทางกลับกันหากออกแบบตัวควบคุมที่สามารถควบคุมได้ดีในย่านเกนต่ำสมรรถนะของย่านเกนสูงก็จะลดลง การรักษาสมรรถนะการควบคุมของกระบวนการที่มีค่าเกนแตกต่างกันมากให้ได้ดีตลอดทำได้ยาก ดังนั้นการการออกแบบตัวควบคุมในแต่ละย่านของกระบวนการ โดยมีตัวแปรช่วย (Auxiliary variable, AV) เป็นตัวแปรที่บ่งชี้ย่านปฏิบัติการภายในกระบวนการเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง

การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีในงานวิจัยนี้จะเป็นการออกแบบโดยคำนึงย่านของความไม่เชิงเส้นของกระบวนการ ซึ่งจำแนกได้เป็นย่านเกนสูงและย่านเกนต่ำ โดยมีตัวแปรช่วยเป็นตัวแปรที่บ่งชี้ย่านปฏิบัติการภายในกระบวนการและเป็นตัวกำหนดชุดของกฎที่สอดคล้องกับค่าเกนของกระบวนการในย่านนั้นๆ โครงสร้างของตัวควบคุมแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 โครงสร้างตัวควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองภายในแบบแบ่งย่านการทำงาน

ตัวแปรช่วยอาจเป็นเอาท์พุทของตัวควบคุม หรือตัวแปรควบคุม หรือระดับปฏิบัติการเซ็ทพอยท์ ขึ้นอยู่กับว่าใช้ตัวแปรใดในการนิยามหรือบ่งชี้ย่านปฏิบัติการ ซึ่งฟังก์ชันรูปตัวเอสมักใช้ตัวแปรควบคุมเป็นตัวแปรช่วย ฟังก์ชันรูประฆังคว่ำมักใช้ตัวแปรปรับเป็นตัวแปรช่วย ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวแปรควบคุม คือค่าพีเอชของกระบวนการเป็นตัวแปรช่วย ขั้นตอนและรายละเอียดการแบ่งย่านการควบคุมจะกล่าวในบทต่อไป

บทที่ 5

การระบุหาและทดสอบแบบจำลองฟัซซี ของกระบวนการที่ศึกษา

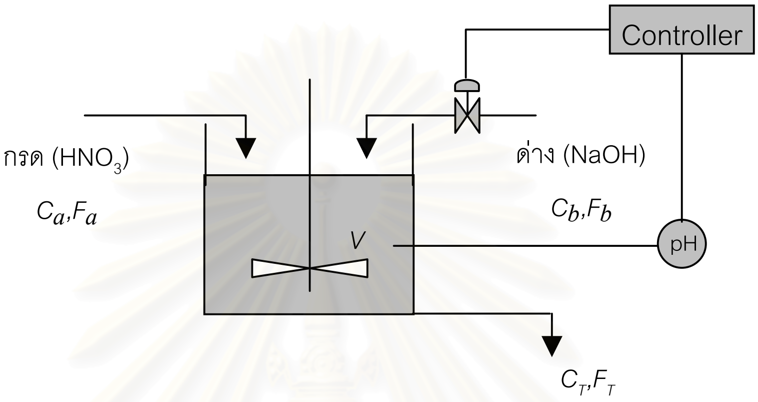
เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบพีเอชที่เป็นกระบวนการที่ใช้ในการศึกษา จากนั้นเป็นการระบุหาแบบจำลองฟัซซีที่เหมาะสม เริ่มต้นจากการทดสอบหาโครงสร้างของแบบจำลองฟัซซี โดยทำการเก็บข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทของกระบวนการและสร้างแบบจำลองฟัซซีที่มีโครงสร้างอินพุท-เอาท์พุทต่างๆ กัน จากนั้นทำการทดสอบหาความผิดพลาดของแบบจำลอง ซึ่งพบว่าโครงสร้างที่ให้ค่าความผิดพลาดของแบบจำลองต่ำที่สุด ประกอบด้วย ค่าอัตราการไหลของด่างและค่าพีเอชของระบบที่เวลาย้อนหลังหนึ่งค่า จากนั้นทำการระบุหาแบบจำลองฟัซซีของกระบวนการในแต่ละย่านการทำงานด้วยฟัซซีคลัสเตอริงและเทคนิคลีสท์สแควร์ ทำการทดสอบการแบ่งย่าน 2 กรณีศึกษาคือ การแบ่งย่านข้อมูลโดยการสังเกตความไม่เป็นเชิงเส้นของกระบวนการและการแบ่งย่านโดยใช้อัลกอริธึมของฟัซซีคลัสเตอริง พบว่าแบบจำลองที่ได้จากการแบ่งย่านด้วยอัลกอริธึมของฟัซซีคลัสเตอริงสามารถทำนายพฤติกรรมของกระบวนการได้ดีกว่าการแบ่งย่านโดยการสังเกตความไม่เป็นเชิงเส้นของกระบวนการ แบบจำลองที่ได้นี้จะนำไปใช้ในการสร้างตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลองต่อไป

5.1 กระบวนการที่ศึกษา

กระบวนการที่ใช้ในการศึกษาคือระบบพีเอช เป็นระบบที่พบมากในอุตสาหกรรม เช่นการปรับสภาพน้ำในระบบบำบัดน้ำเสีย ระบบหล่อเย็น ระบบหม้อไอน้ำ เป็นต้น ระบบพีเอชเป็นระบบแบบไม่เชิงเส้นที่มีความซับซ้อนที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาและขึ้นกับตัวแปรหลายชนิด อีกทั้งระบบพีเอชของกรดแก่และด่างแก่ยังมีค่าเกนที่สูงในช่วงของค่าพีเอชที่เป็นกลาง (พีเอช 6 – 8) ซึ่งเป็นค่าเป้าหมายของการควบคุม ทำให้ยากในการควบคุม ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมามีการศึกษาและพัฒนาตัวควบคุมเพื่อควบคุมระบบระบบพีเอชกว้างขวาง รวมทั้งประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ เพื่อเพิ่มสมรรถนะของการควบคุมให้ดีขึ้น

รูปที่ 5.1 เป็นการควบคุมค่าพีเอชในถังปฏิกรณ์ โดยมีสายขาเข้า 2 สายคือ สายกรด (HNO_3) และสายด่าง ($NaOH$) ซึ่งทำปฏิกิริยาเพื่อควบคุมพีเอชของสายออกให้ได้ตามต้องการโดยการปรับอัตราการไหลของด่าง ภายใต้สมมติฐานคือ

1. ปฏิกิริยาระหว่างกรดและด่างเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว
2. ไม่มีสิ่งเจือปนภายในถังปฏิกรณ์เช่น คาร์บอเนตและฟอสเฟต
3. อุณหภูมิของระบบคงที่
4. มีการผสมกันอย่างสมบูรณ์แบบ
5. ความหนาแน่นของสารในระบบมีค่าคงที่



รูปที่ 5.1 ระบบควบคุมค่าพีเอช

ปฏิกิริยาการแตกตัวของกรดและด่างที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์คือ

$$HNO_3 \rightarrow H^+ + NO_3^- \qquad (5.1)$$

$$NaOH \rightarrow OH^- + Na^+ \qquad (5.2)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของไอออนบวกและลบของระบบ

$$V\frac{dY}{dt} = F_a C_a - F_b C_b - F_T Y \qquad (5.3)$$

เมื่อ C_a คือ ความเข้มข้นของกรดสายเข้า (โมลต่อลิตร)

C_b คือ ความเข้มข้นของด่างสายเข้า (โมลต่อลิตร)

F_a คือ อัตราการไหลของกรด (ลิตรต่อนาที)

F_b คือ อัตราการไหลของด่าง (ลิตรต่อนาที)

F_T คือ อัตราการไหลสายออก (ลิตรต่อนาที)

V คือ ปริมาตรของสารละลายในถังกวน (ลิตร)

Y คือ ปริมาณของกรดที่เหลือจากปฏิกิริยา (โมลต่อลิตร)

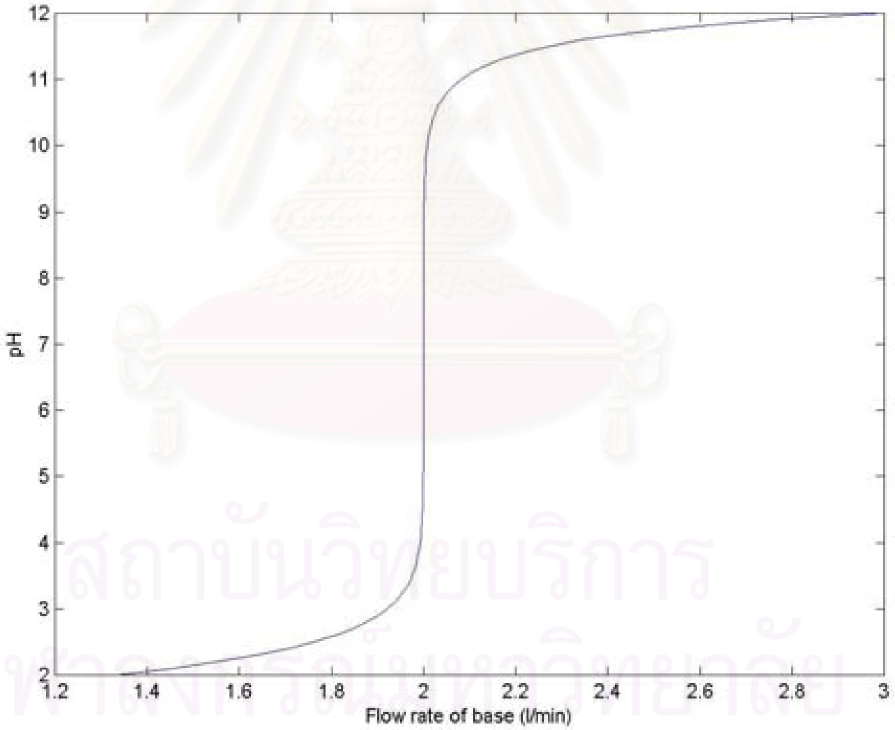
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่าพีเอชของระบบกรดแก่และด่างแก่คำนวณได้จาก Lakshmi, Krishnaswamy และ Rangaiah (1997)

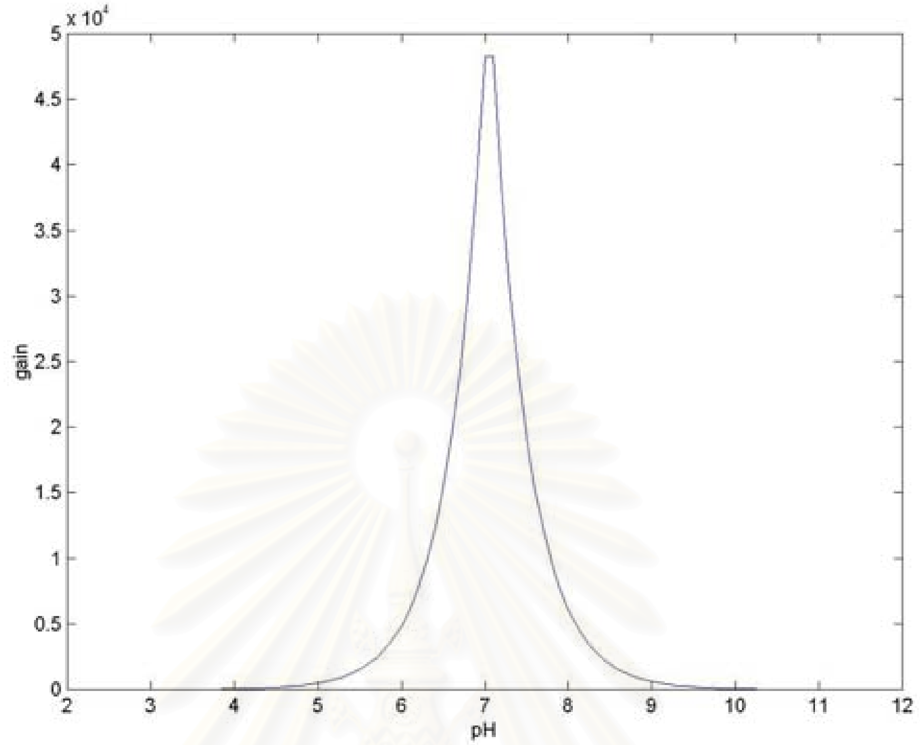
$$pH = -log_{10}\{[Y + \sqrt{Y^2 + (4Kw)}]/2\} \quad (5.4)$$

โดยที่ Kw คือ ค่าคงที่ของสมดุลไอออนในน้ำ ขึ้นกับอุณหภูมิของระบบ มีค่าเท่ากับ 1x10^{-14} ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส 2.95x10^{-14} ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และ 9.5x10^{-14} ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

รูปที่ 5.2 และ 5.3 แสดงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบพีเอช และค่าเกนที่แตกต่างกันของระบบที่ค่าความเข้มข้นของกรดและด่าง 0.05 โมลต่อลิตร



รูปที่ 5.2 กราฟการไตเตรทของกรดและด่าง



รูปที่ 5.3 ค่าเกนของระบบพีเอช

ตารางที่ 5.1 ค่าสภาวะในการปฏิบัติการของระบบ

สภาวะในการดำเนินการ	ค่าสภาวะ	หน่วย
ความเข้มข้นของกรดสายเข้า	0.05	โมลต่อลิตร
ความเข้มข้นของด่างสายเข้า	0.05	โมลต่อลิตร
อัตราการไหลของกรด	2	ลิตรต่อนาที
อัตราการไหลของด่าง	2	ลิตรต่อนาที
ปริมาตรของถังปฏิกรณ์	10	ลิตร
ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในถังปฏิกรณ์	1×10^{-7}	โมลต่อลิตร
ค่าพีเอชในถังปฏิกรณ์	7	-

5.2 การสร้างแบบจำลองฟัซซี

การสร้างแบบจำลองฟัซซีเริ่มจากการกำหนดตัวแปรของแบบจำลองฟัซซี เพื่อหาโครงสร้างของแบบจำลองที่เหมาะสม โดยการหาแบบจำลองฟัซซีที่มีโครงสร้างอินพุท-เอาท์พุทแบบต่างๆ แล้วทำการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของการทำนายผลของแบบจำลองโครงสร้างนั้นๆ จากนั้นทำการแบ่งย่านการทำงานของกระบวนการ และเก็บข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทของแต่ละย่าน เพื่อใช้ในการหาจำนวนกฎและฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปรในส่วนเงื่อนไขของแต่ละย่านด้วยเทคนิคคลัสเตอริง ทำการระบุหาพารามิเตอร์ในส่วนผลด้วยวิธีลีสท์สแควร์ แบบจำลองฟัซซีของกระบวนการเป็นการรวมกันของแบบจำลองฟัซซีในแต่ละย่านการทำงาน

5.2.1 การกำหนดตัวแปรของแบบจำลองฟัซซี

เนื่องจากประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการทำนายผลของแบบจำลองที่ได้เป็นสำคัญ โดยการทำนายผลจะใช้แบบจำลองที่ได้ลองทำนายเอาท์พุทของกระบวนการจากข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทของกระบวนการในอดีตที่มีอยู่แล้ว แล้วเปรียบเทียบความสามารถในการทำนายผลของแบบจำลองที่มีโครงสร้างอินพุทและเอาท์พุทแบบต่างๆ ด้วยการพิจารณาจากรากของกำลังสองเฉลี่ยของความผิดพลาด (Root mean square error, RMS) ดังสมการที่ (5.5) ค่าความผิดพลาดของผลการทดสอบในแต่ละโครงสร้างแสดงดังตารางที่ 5.2

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N}(y(k) - y_m(k))^2}{N}} \tag{5.5}$$

โดย $y(k)$ คือค่าเอาท์พุทของกระบวนการ

$y_m(k)$ คือค่าเอาท์พุทจากแบบจำลองฟัซซี

N คือจำนวนข้อมูลที่ใช้ทดสอบ

ตารางที่ 5.2 ค่าความผิดพลาดของแบบจำลองที่มีโครงสร้างอินพุทและเอาท์พุทแบบต่างๆ

ลำดับที่	โครงสร้างแบบจำลองฟัซซี	RMS
1	$pH(k) = f(F_b(k-1), pH(k-1))$	0.5966
2	$pH(k) = f(F_b(k-1), pH(k-2))$	0.7417
3	$pH(k) = f(F_b(k-1), pH(k-3))$	0.8753
4	$pH(k) = f(F_b(k-1), pH(k-1), pH(k-2))$	0.6835
5	$pH(k) = f(F_b(k-1), pH(k-1), pH(k-3))$	0.7158
6	$pH(k) = f(F_b(k-1), pH(k-1), pH(k-2), pH(k-3))$	0.7041
7	$pH(k) = f(F_b(k-2), pH(k-1))$	0.6140
8	$pH(k) = f(F_b(k-3), pH(k-1))$	0.8802
9	$pH(k) = f(F_b(k-1), F_b(k-2), pH(k-1))$	0.8328
10	$pH(k) = f(F_b(k-1), F_b(k-3), pH(k-1))$	3.1593
11	$pH(k) = f(F_b(k-1), F_b(k-2), F_b(k-3), pH(k-1))$	1.2873
12	$pH(k) = f(F_b(k-1), F_b(k-2), pH(k-1), pH(k-2))$	2.0784

ผลการทดสอบในตารางที่ 5.2 พบว่าโครงสร้างฟัซซีที่ให้ค่าความผิดพลาดต่ำที่สุดคือ โครงสร้าง $pH(k) = f(F_b(k-1), pH(k-1))$ ดังนั้นข้อมูลอินพุทที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง ได้แก่ $F_b(k-1)$ และ $pH(k-1)$ คือค่าอัตราการไหลของด่างที่เวลาย้อนหลังหนึ่งค่า และค่าพีเอชของระบบที่เวลาย้อนหลังหนึ่งค่า สำหรับข้อมูลเอาท์พุทได้แก่ $pH(k)$ ดังนั้นเวคเตอร์ข้อมูลคือ $Z = [F_b(k-1)\ \ pH(k-1)\ \ pH(k)]$ โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของด่างแบบขั้นอย่างสุ่มทุกๆ 50 นาที

5.2.2 การกำหนดจำนวนกฎฟัซซีในแบบจำลองฟัซซี

วิธีการกำหนดจำนวนกฎฟัซซีที่เหมาะสมของแบบจำลองทำได้โดยการใช้อัลกอริธึมของฟัซซีคลัสเตอริงร่วมกับการหาเกณฑ์ J(c) ดังที่กล่าวในหัวข้อ 3.7.1 งานวิจัยนี้จะทำการเก็บข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทแต่ละย่านการทำงานแล้วคลัสเตอริงข้อมูลในแต่ละย่าน ดังนั้นจำนวนกฎฟัซซีของแบบจำลองของกระบวนการ คือผลรวมของจำนวนกฎที่เหมาะสมของแต่ละย่านการทำงาน

5.2.3 การกำหนดฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปรในส่วนเงื่อนไขของกฎฟัซซี

การกำหนดฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปรในส่วนเงื่อนไขของกฎฟัซซี กระทำโดยพล็อทค่าพีเอชภายในถังปฏิกรณ์กับฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์ในแต่ละกลุ่ม ดังเช่นแสดงในรูปที่ 5.11 – 5.15 กรณีศึกษาที่1 จากนั้นทำการประมาณกราฟโดยใช้ฟังก์ชันสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมคางหมู ในงานวิจัยนี้ประมาณกราฟโดยใช้ Fuzzy toolbox ของโปรแกรมแมทแลบ จะได้ฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไขของกฎ ดังเช่นรูปที่ 5.16 – 5.20 กรณีศึกษาที่ 1

5.2.4 การระบุหาพารามิเตอร์ในส่วนผลของกฎฟัซซี

การระบุหาพารามิเตอร์ในส่วนผลของกฎฟัซซี สามารถหาได้จากวิธีการลีสท์สแควร์ โดยใช้อัลกอริธึมที่กล่าวในหัวข้อ 3.6.2 พารามิเตอร์เชิงเส้นในส่วนผล แสดงได้ดังตารางที่ 5.4 – 5.8

5.2.5 การทดสอบแบบจำลองฟัซซี

การทดสอบแบบจำลองฟัซซีเพื่อหาความสามารถในการทำนายค่าหรือสมรรถนะของแบบจำลอง สามารถพิจารณาได้จากรากของกำลังสองเฉลี่ยของความผิดพลาด (Root mean square error, RMS) ดังสมการที่ (5.5) งานวิจัยนี้จะทำการทดสอบและเปรียบเทียบค่าระหว่างแบบจำลอง 2 กรณีศึกษาคือ

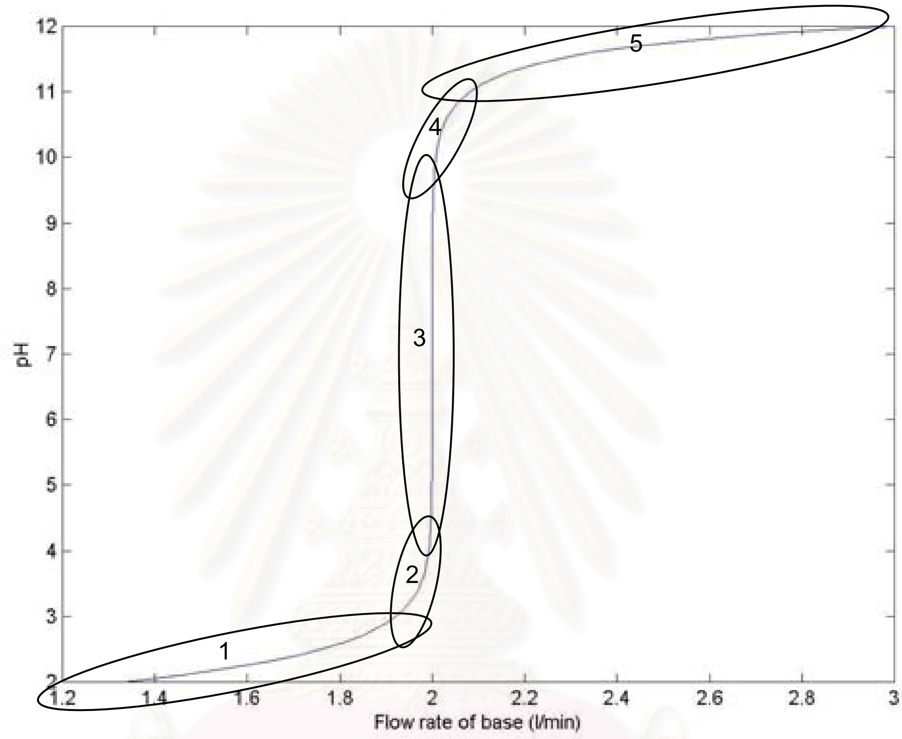
1. แบบจำลองฟัซซีแบบแบ่งย่านข้อมูลโดยการสังเกตความไม่เป็นเชิงเส้นของอินพุทและเอาท์พุทของกระบวนการ
2. แบบจำลองฟัซซีแบบแบ่งย่านข้อมูลโดยใช้อัลกอริธึมของฟัซซีคลัสเตอริง

5.3 การระบุหาแบบจำลองฟัซซีในแต่ละกรณีศึกษา

กรณีศึกษาของการระบุหาแบบจำลองของงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 กรณี ดังนี้

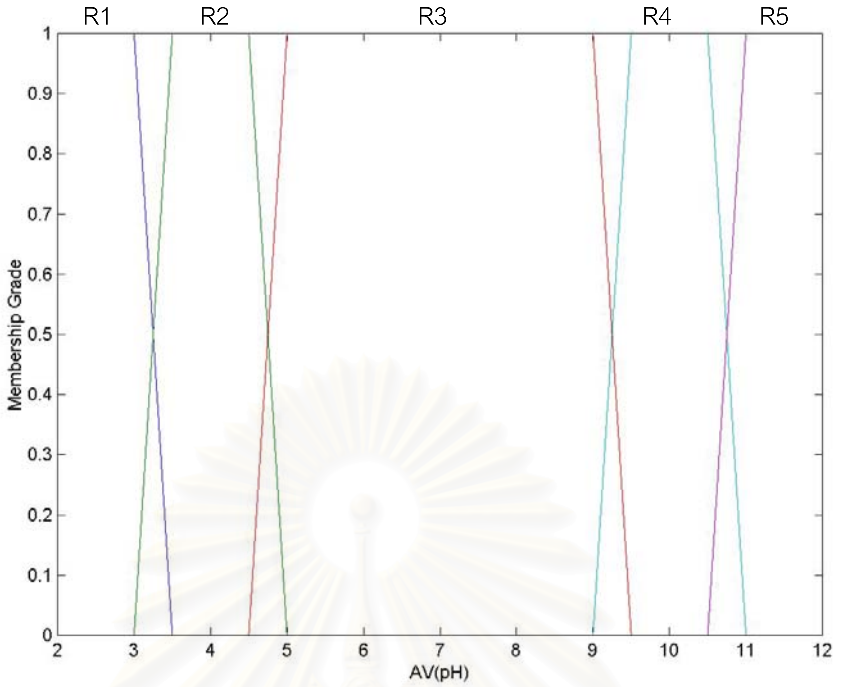
5.3.1 **กรณีศึกษาที่** 1

กรณีศึกษาที่ 1 เป็นการระบุหาแบบจำลองฟัซซีแบบแบ่งย่านข้อมูลโดยการสังเกตความไม่เป็นเชิงเส้นของอินพุทและเอาท์พุทของกระบวนการ จากการสังเกตพบว่าสามารถแบ่งข้อมูลของกระบวนการออกเป็น 5 ย่าน ดังรูปที่ 5.4



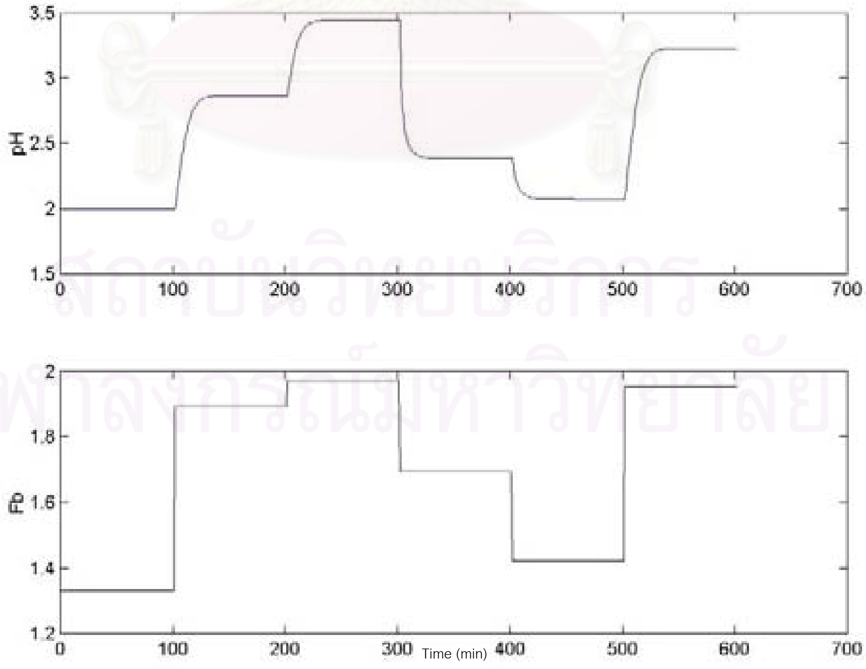
รูปที่ 5.4 ย่านข้อมูลที่ได้จากการสังเกต

ย่านที่ได้ 5 ย่านคือ ย่านที่ 1 ช่วงของค่าพีเอช 2 – 3.5, ย่านที่ 2 ช่วงของค่าพีเอช 3 – 5, ย่านที่ 3 ช่วงของค่าพีเอช 4.5 – 9.5, ย่านที่ 4 ช่วงของค่าพีเอช 9 – 11 และย่านที่ 5 ช่วงของค่าพีเอช 10.5 – 12 โดยมีตัวแปรช่วย (Auxiliary variable, AV) ในการบ่งชี้ความเป็นสมาชิกของย่านนั้นเป็นฟังก์ชันสมาชิกสี่เหลี่ยมคางหมู ดังรูปที่ 5.5

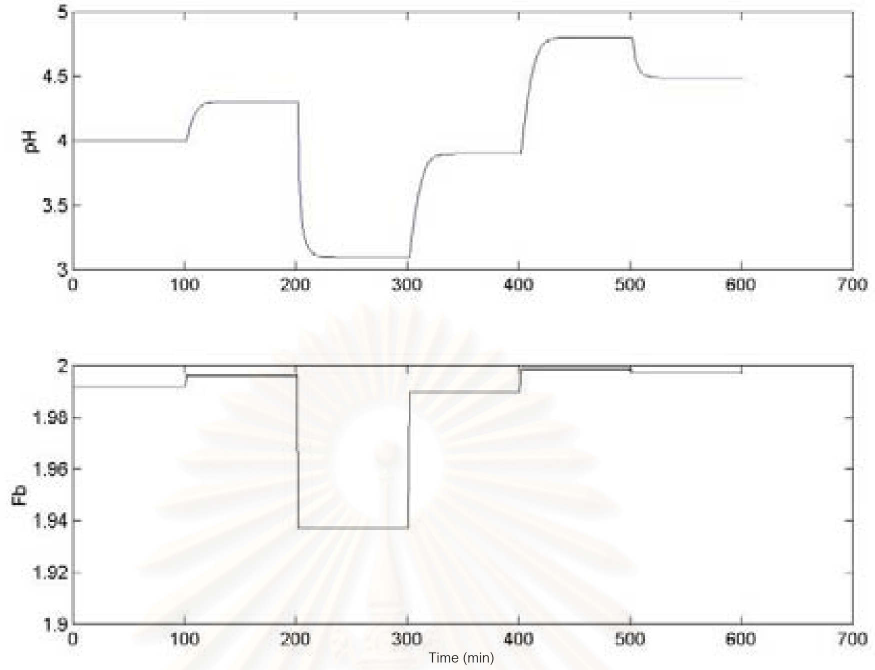


รูปที่ 5.5 ฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปรช่วยสำหรับกรณีศึกษาที่ 1

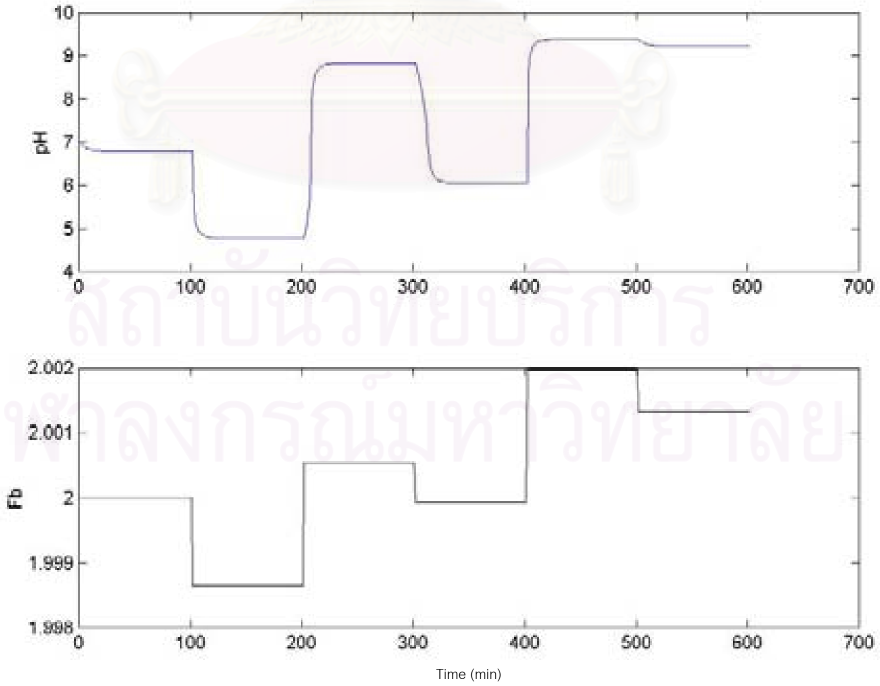
การระบุหาแบบจำลองของแต่ละย่าน ทำโดยใช้ข้อมูลอินพุทและเอาท์พุท ดังรูปที่ 5.6 – 5.10 ตามลำดับ ซึ่งได้จากการเก็บข้อมูลโดยทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของด่างแบบขั้นอย่างสุ่ม เป็นเวลา 600 นาที



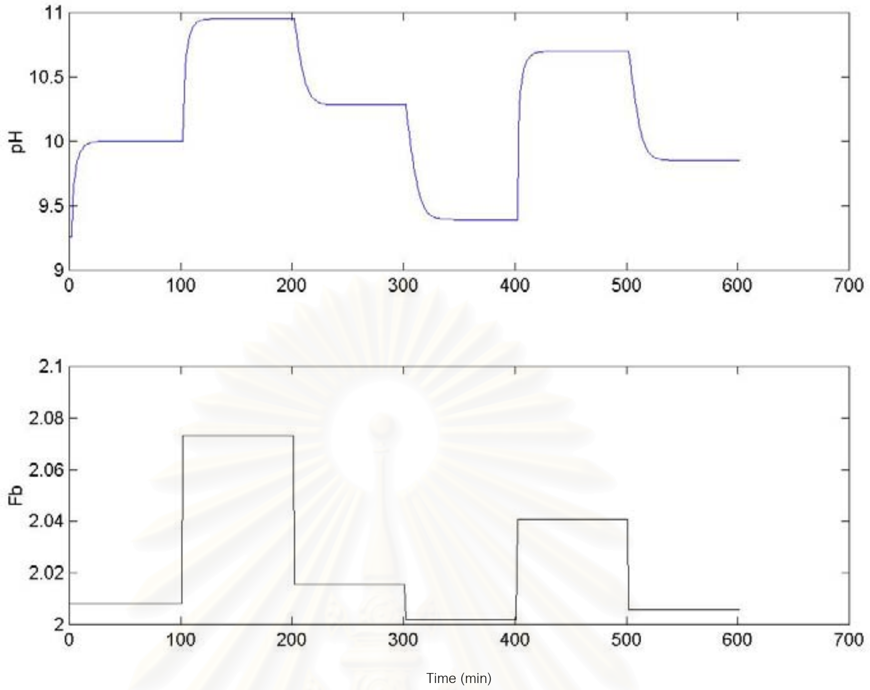
รูปที่ 5.6 ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองฟัซซี
สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 1



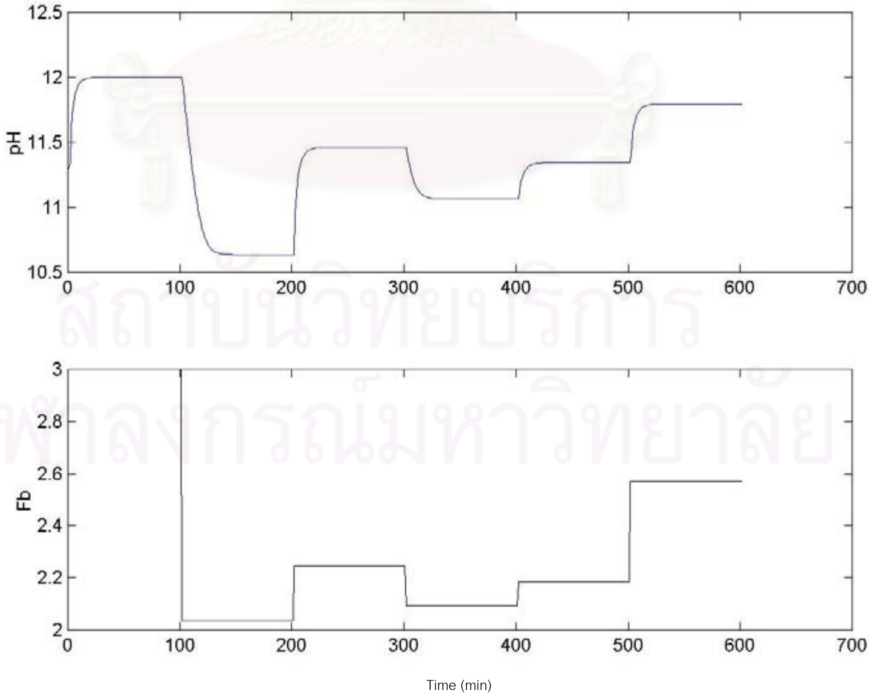
รูปที่ 5.7 ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองฟัซซี
สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 2



รูปที่ 5.8 ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองฟัซซี
สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 3



รูปที่ 5.9 ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองฟัซซี
สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 4



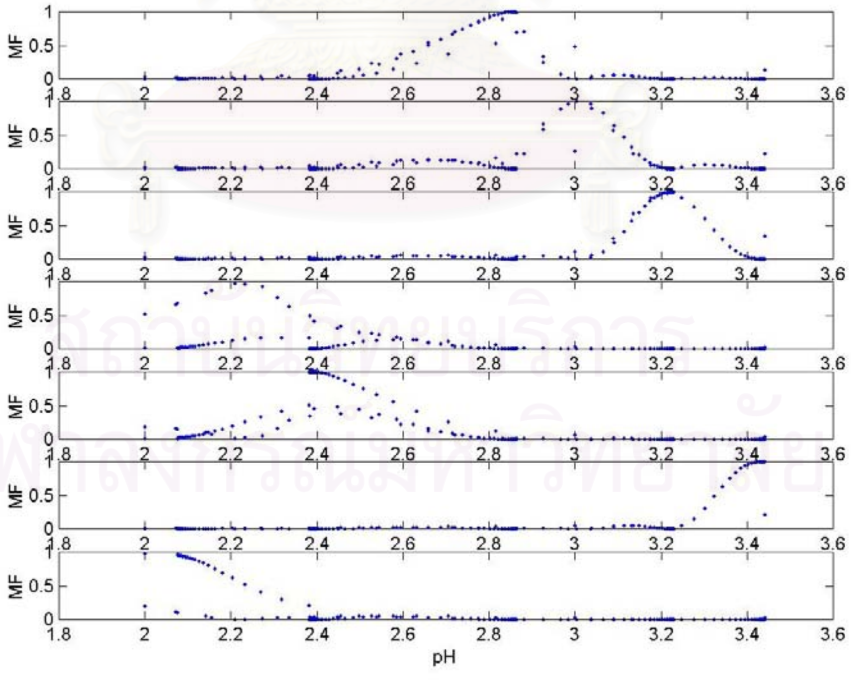
รูปที่ 5.10 ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองฟัซซี
สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 5

ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทที่ได้จากการสุ่มนำมาจัดให้อยู่ในรูปของเวคเตอร์ข้อมูล $Z = [F_b(k-1)\ pH(k-1)\ pH(k)]$ แล้วใช้ฟัซซีตลัสเตอริงร่วมกับค่าเกณฑ์ $J(c)$ เพื่อหาจำนวนกฎและฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์ของแต่ละย่าน พบว่าจำนวนกฎที่ให้ค่าเกณฑ์ $J(c)$ ต่ำที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 คือ 34 กฎแบ่งเป็นแต่ละย่านได้ดังนี้

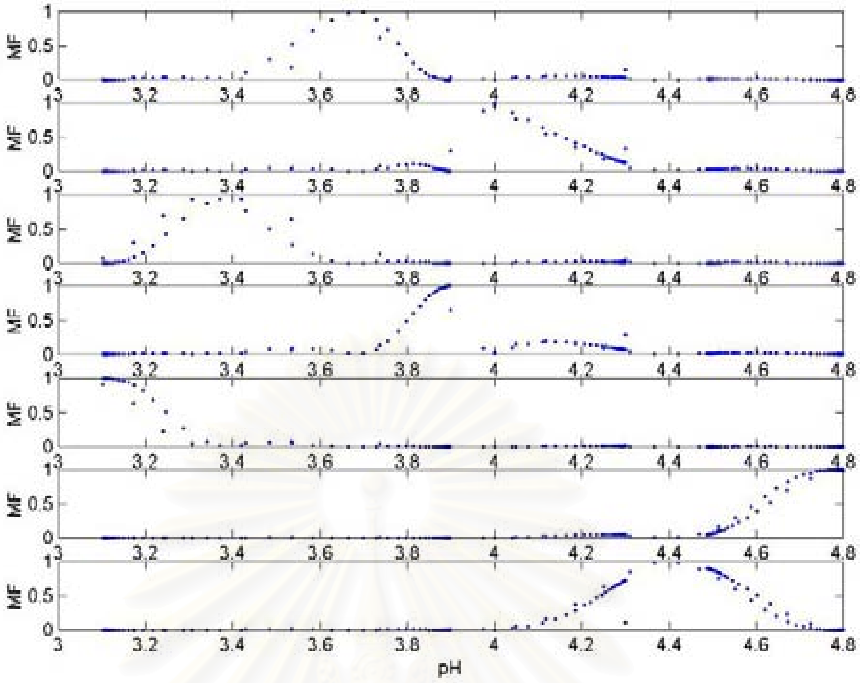
ตารางที่ 5.3 จำนวนกฎที่เหมาะสมในแต่ละย่านสำหรับกรณีศึกษาที่ 1

ย่านที่	ช่วงพีเอช	จำนวนกฎที่เหมาะสม
1	2 – 3.5	7
2	3 – 5	7
3	4.5 – 9.5	6
4	9 – 11	7
5	10.5 – 12	7

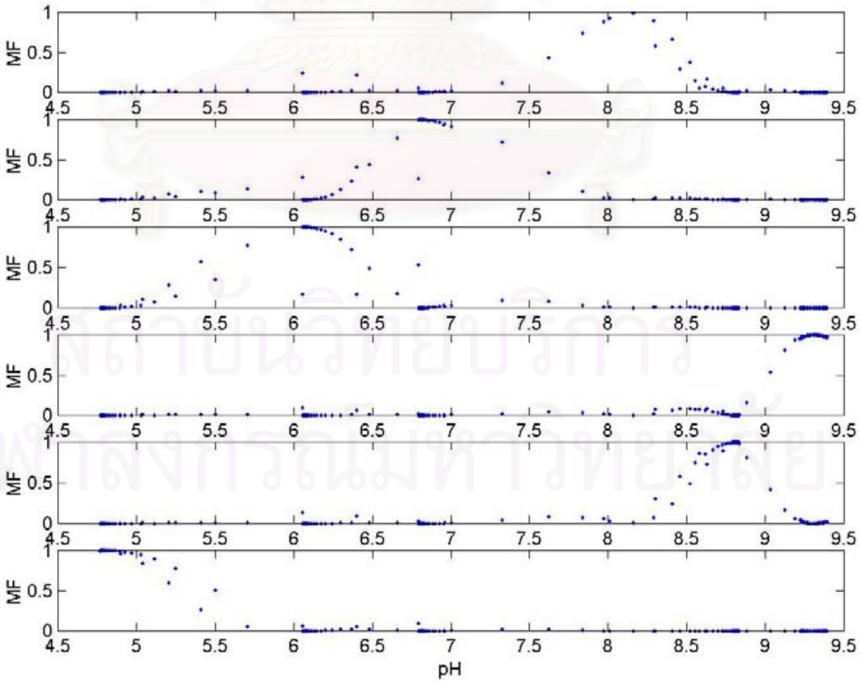
ฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์ที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.11 – 5.15



รูปที่ 5.11 กราฟระหว่างค่าพีเอชกับฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์
สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 1

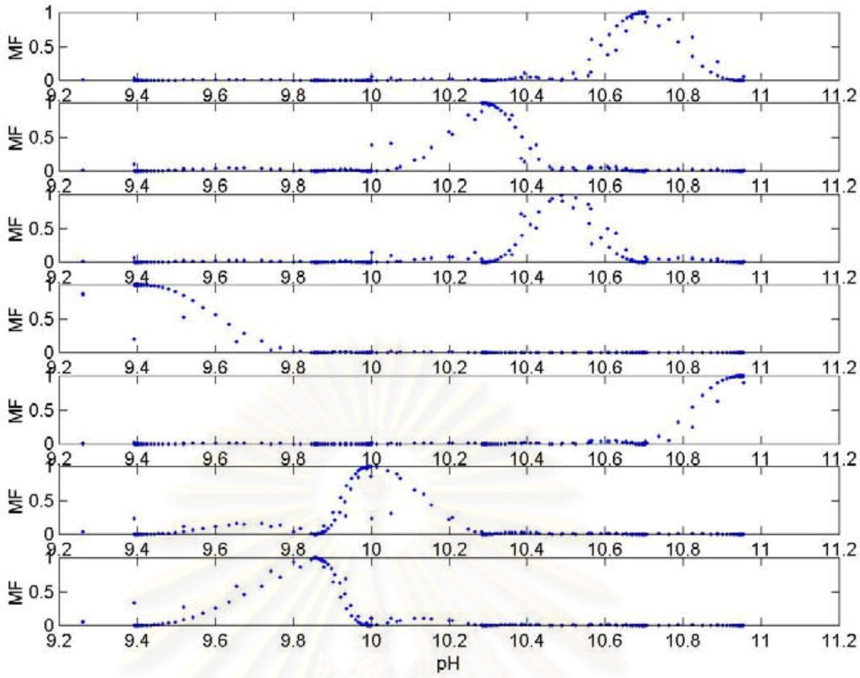


รูปที่ 5.12 กราฟระหว่างค่าพีเอชกับฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์
สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 2

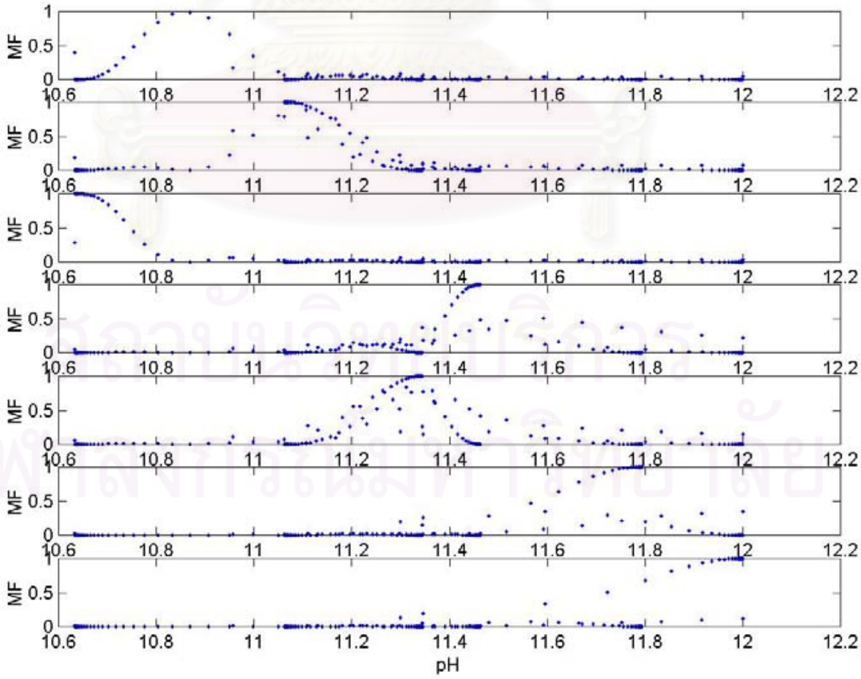


รูปที่ 5.13 กราฟระหว่างค่าพีเอชกับฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์
สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



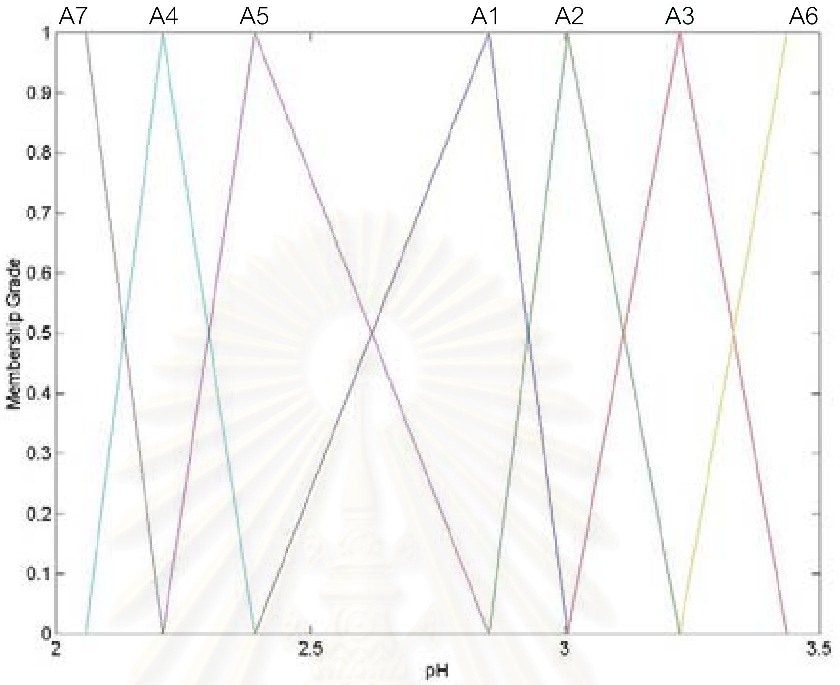
รูปที่ 5.14 กราฟระหว่างค่าพีเอชกับฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์
สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 4



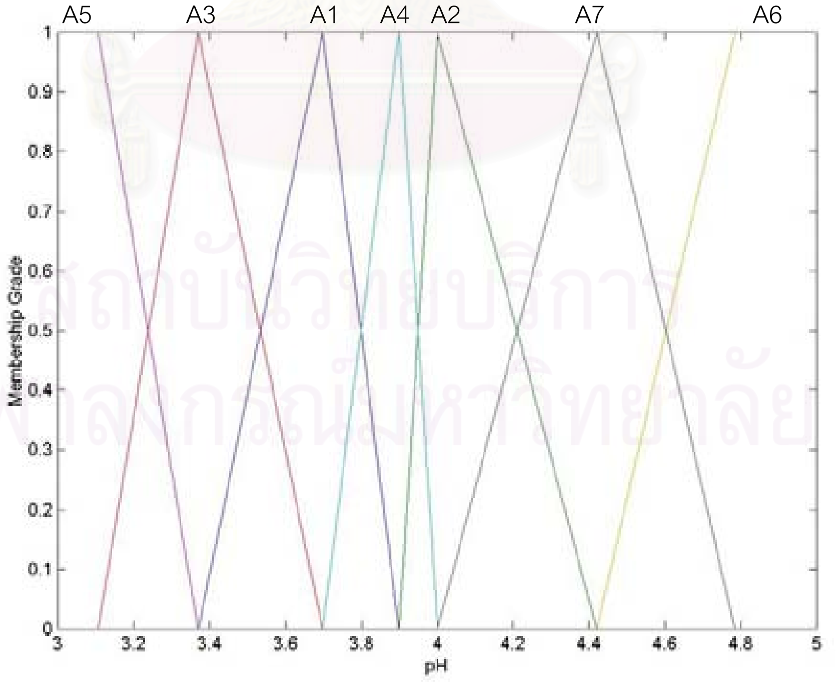
รูปที่ 5.15 กราฟระหว่างค่าพีเอชกับฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์
สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไขได้จากการประมาณกราฟระหว่างค่าพีเอชกับฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์ในแต่ละย่าน โดยใช้ฟังก์ชันสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมคางหมู ดังรูปที่ 5.16 – 5.20

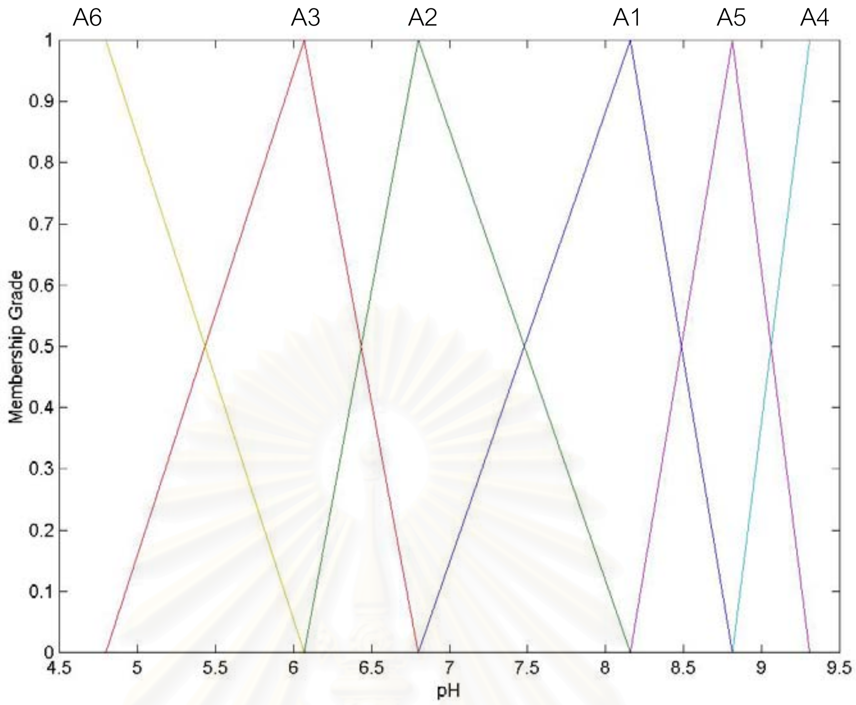


รูปที่ 5.16 ฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไขของแบบจำลองฟัซซี
สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่1

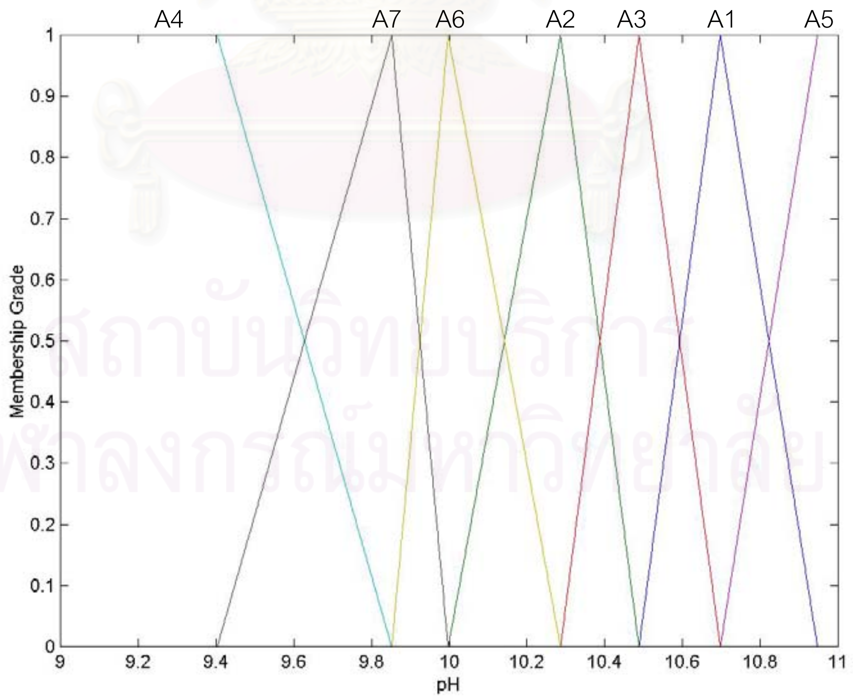


รูปที่ 5.17 ฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไขของแบบจำลองฟัซซี
สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

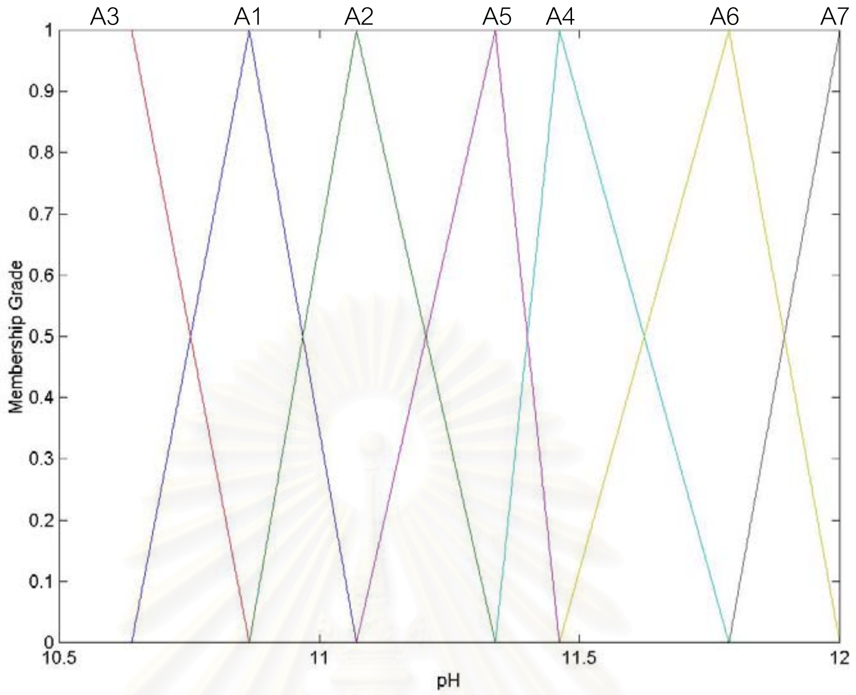


รูปที่ 5.18 ฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไขของแบบจำลองฟัซซี
สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 3



รูปที่ 5.19 ฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไขของแบบจำลองฟัซซี
สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.20 ฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไขของแบบจำลองฟัซซี
สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 5

ค่าพารามิเตอร์ส่วนผลหาได้จากการทำลีสท์สแควร์ พารามิเตอร์ของแต่ละย่าน แสดงดังตารางที่ 5.4 – 5.8

ตารางที่ 5.4 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 1

กฎ	P_0	P_1	P_2
1	-0.4644	0.4972	0.8335
2	-0.6679	0.7148	0.7700
3	-2.8190	1.8118	0.7770
4	-0.0369	0.0369	1.0166
5	0.1230	0.1561	0.8373
6	-4.9954	2.9898	0.7389
7	0.0319	0.0110	0.9782

ตารางที่ 5.5 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 2

กฎ	P_0	P_1	P_2
1	-5.8283	3.0644	0.9363
2	-19.2071	9.7496	0.9466
3	-3.7678	2.0567	0.9211
4	-9.7773	5.1309	0.8891
5	-2.7855	1.3194	1.0738
6	-101.6022	51.3050	0.8035
7	-44.6344	22.7055	0.8401

ตารางที่ 5.6 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 3

กฎ	P_0	P_1	P_2
1	-1040.5450	522.2850	0.4924
2	-6536.6454	3270.6157	0.3293
3	95.7628	-46.8273	0.6516
4	-83.1386	42.4155	0.8105
5	-211.2960	107.4133	0.5933
6	-67.2018	34.2003	0.7587

ตารางที่ 5.7 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 4

กฎ	P_0	P_1	P_2
1	-2.5850	1.7358	0.9105
2	-7.0531	3.9635	0.9090
3	-4.8587	2.9427	0.8947
4	-45.2523	23.4497	0.8196
5	-3.3461	1.1197	1.0936
6	-9.0884	5.9007	0.7239
7	-42.7053	22.6891	0.7155

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.8 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 5

กฎ	P_0	P_1	P_2
1	-2.2790	5.8192	0.1163
2	4.8285	0.1264	0.5397
3	21.4783	-6.2861	0.1830
4	3.3731	-0.1113	0.7275
5	3.6245	0.4120	0.6010
6	1.0023	0.4412	0.8189
7	8.7780	-1.8306	0.7261

เมื่อนำข้อมูลอินพุทเอาท์พุทของกระบวนการที่ได้จากการสุ่มแบบขั้นมาผ่านการคลัสเตอริงและลีสท์สแควร์แล้ว สามารถระบุหาโครงสร้างแบบจำลองฟัซซีได้ดังนี้

โครงสร้างของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 1

กฎที่ 1 : $If\ \ pH(k)\ \ is\ \ A1\ \ Then\ \ pH(k+1) = -0.4644 + 0.4972Fb(k) + 0.8335pH(k)$

กฎที่ 2 : $If\ \ pH(k)\ \ is\ \ A2\ \ Then\ \ pH(k+1) = -0.6679 + 0.7148Fb(k) + 0.7700pH(k)$

กฎที่ 3 : $If\ \ pH(k)\ \ is\ \ A3\ \ Then\ \ pH(k+1) = -2.8190 + 1.8118Fb(k) + 0.7770pH(k)$

กฎที่ 4 : $If\ \ pH(k)\ \ is\ \ A4\ \ Then\ \ pH(k+1) = -0.0369 + 0.0369Fb(k) + 1.0166pH(k)$

กฎที่ 5 : $If\ \ pH(k)\ \ is\ \ A5\ \ Then\ \ pH(k+1) = 0.1230 + 0.1561Fb(k) + 0.8373pH(k)$

กฎที่ 6 : $If\ \ pH(k)\ \ is\ \ A6\ \ Then\ \ pH(k+1) = -4.9954 + 2.9898Fb(k) + 0.73389pH(k)$

กฎที่ 7 : $If\ \ pH(k)\ \ is\ \ A7\ \ Then\ \ pH(k+1) = 0.0319 + 0.0110Fb(k) + 0.9782pH(k)$

โครงสร้างของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 2

กฎที่ 1 : $If\ \ pH(k)\ \ is\ \ A1\ \ Then\ \ pH(k+1) = -5.8283 + 3.0644Fb(k) + 0.9363pH(k)$

กฎที่ 2 : $If\ \ pH(k)\ \ is\ \ A2\ \ Then\ \ pH(k+1) = -19.2071 + 9.7496Fb(k) + 0.9466pH(k)$

กฎที่ 3 : $If\ \ pH(k)\ \ is\ \ A3\ \ Then\ \ pH(k+1) = -3.7678 + 2.0567Fb(k) + 0.9211pH(k)$

กฎที่ 4 : $If\ \ pH(k)\ \ is\ \ A4\ \ Then\ \ pH(k+1) = -9.7773 + 5.1309Fb(k) + 0.8891pH(k)$

กฎที่ 5 : $If\ \ pH(k)\ \ is\ \ A5\ \ Then\ \ pH(k+1) = -2.7855 + 1.3194Fb(k) + 1.0738pH(k)$

กฎที่ 6 : $If\ \ pH(k)\ \ is\ \ A6\ \ Then\ \ pH(k+1) = -101.6022 + 51.3050Fb(k) + 0.8035pH(k)$

กฎที่ 7 : $If\ \ pH(k)\ \ is\ \ A7\ \ Then\ \ pH(k+1) = -44.6344 + 22.7055Fb(k) + 0.8401pH(k)$

โครงสร้างของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 3

กฎที่ 1 : $If\ pH(k)\ is\ A1\ Then\ pH(k+1) = -1040.5450 + 522.2850Fb(k) + 0.4924pH(k)$

กฎที่ 2 : $If\ pH(k)\ is\ A2\ Then\ pH(k+1) = -6536.6454 + 3270.6157Fb(k) + 0.3293pH(k)$

กฎที่ 3 : $If\ pH(k)\ is\ A3\ Then\ pH(k+1) = 95.7628 - 46.8273Fb(k) + 0.6516pH(k)$

กฎที่ 4 : $If\ pH(k)\ is\ A4\ Then\ pH(k+1) = -83.1386 + 42.4155Fb(k) + 0.8105pH(k)$

กฎที่ 5 : $If\ pH(k)\ is\ A5\ Then\ pH(k+1) = -221.2960 + 107.4133Fb(k) + 0.5933pH(k)$

กฎที่ 6 : $If\ pH(k)\ is\ A6\ Then\ pH(k+1) = -67.2018 + 34.2003Fb(k) + 0.7587pH(k)$

โครงสร้างของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 4

กฎที่ 1 : $If\ pH(k)\ is\ A1\ Then\ pH(k+1) = -2.5850 + 1.7358Fb(k) + 0.9105pH(k)$

กฎที่ 2 : $If\ pH(k)\ is\ A2\ Then\ pH(k+1) = -7.0531 + 3.9635Fb(k) + 0.9090pH(k)$

กฎที่ 3 : $If\ pH(k)\ is\ A3\ Then\ pH(k+1) = -4.8587 + 2.9427Fb(k) + 0.8947pH(k)$

กฎที่ 4 : $If\ pH(k)\ is\ A4\ Then\ pH(k+1) = -45.2523 + 23.4497Fb(k) + 0.8196pH(k)$

กฎที่ 5 : $If\ pH(k)\ is\ A5\ Then\ pH(k+1) = -3.3461 + 1.1197Fb(k) + 1.0936pH(k)$

กฎที่ 6 : $If\ pH(k)\ is\ A6\ Then\ pH(k+1) = -9.0884 + 5.9007Fb(k) + 0.7239pH(k)$

กฎที่ 7 : $If\ pH(k)\ is\ A7\ Then\ pH(k+1) = -42.7053 + 22.6891Fb(k) + 0.7155pH(k)$

โครงสร้างของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ย่านที่ 5

กฎที่ 1 : $If\ pH(k)\ is\ A1\ Then\ pH(k+1) = -2.2790 + 5.8192Fb(k) + 0.1163pH(k)$

กฎที่ 2 : $If\ pH(k)\ is\ A2\ Then\ pH(k+1) = 4.8285 + 0.1264Fb(k) + 0.5397pH(k)$

กฎที่ 3 : $If\ pH(k)\ is\ A3\ Then\ pH(k+1) = 21.4783 - 6.2861Fb(k) + 0.1830pH(k)$

กฎที่ 4 : $If\ pH(k)\ is\ A4\ Then\ pH(k+1) = 3.3731 - 0.1113Fb(k) + 0.7275pH(k)$

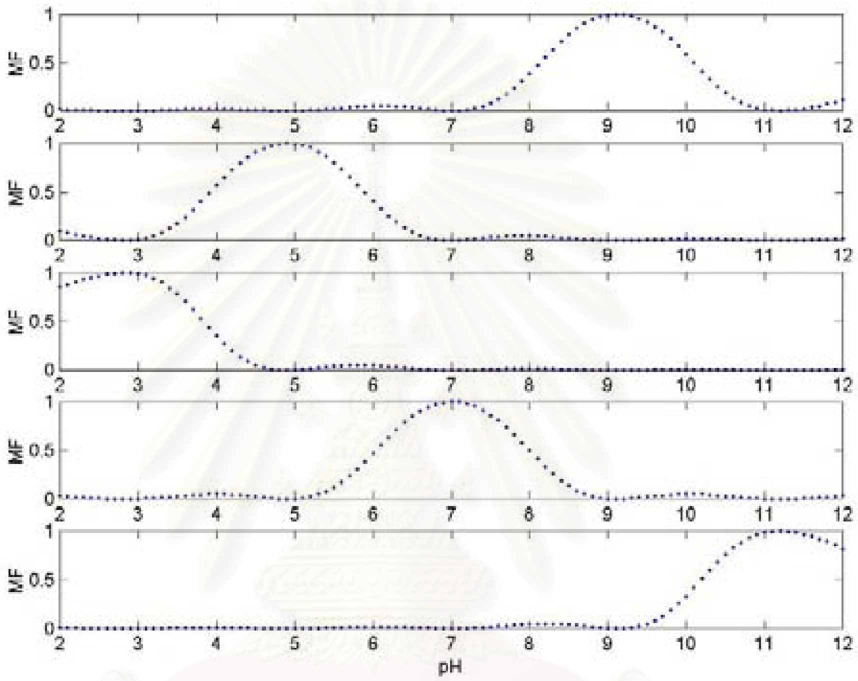
กฎที่ 5 : $If\ pH(k)\ is\ A5\ Then\ pH(k+1) = 3.6245 + 0.4120Fb(k) + 0.6010pH(k)$

กฎที่ 6 : $If\ pH(k)\ is\ A6\ Then\ pH(k+1) = 1.0023 + 0.4412Fb(k) + 0.8189pH(k)$

กฎที่ 7 : $If\ pH(k)\ is\ A7\ Then\ pH(k+1) = 8.7880 - 1.8306Fb(k) + 0.7261pH(k)$

5.3.2 กรณีศึกษาที่ 2

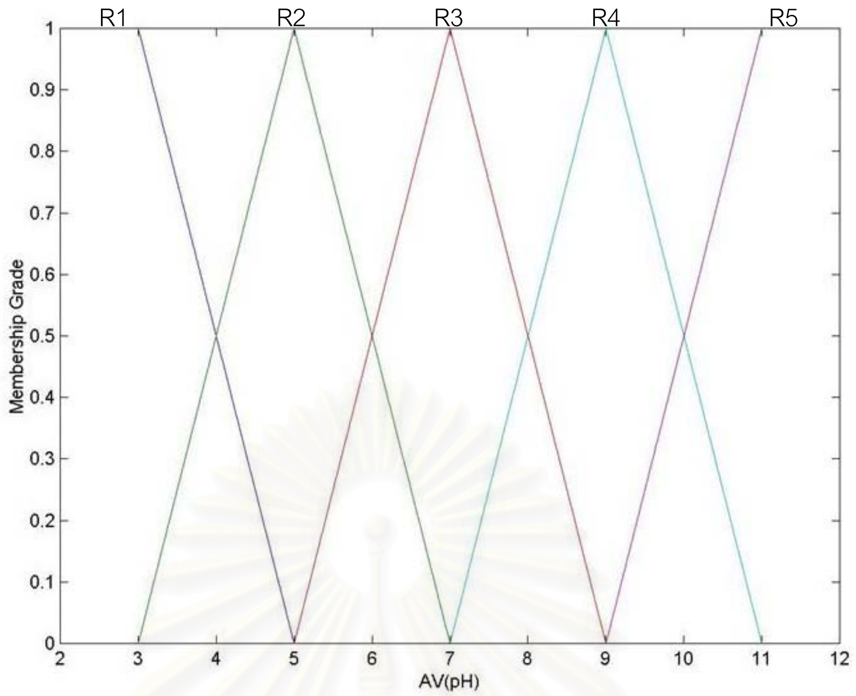
กรณีศึกษาที่ 2 เป็นการระบุหาแบบจำลองฟัซซีแบบแบ่งย่านข้อมูลโดยใช้อัลกอริธึมของฟัซซีคลัสเตอริง โดยเวคเตอร์ข้อมูลคือ $Z = [F_b(k)\ pH(k)]$ ได้ฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์ของตัวแปรช่วยดังรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.21 กราฟระหว่างตัวแปรช่วยกับฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์สำหรับกรณีศึกษาที่ 2

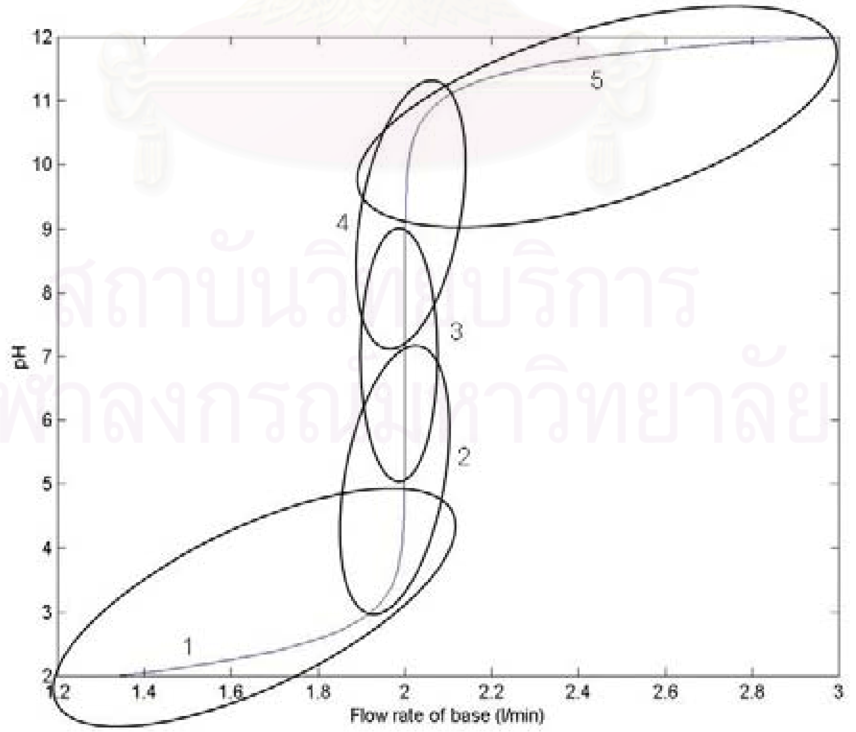
ประมาณกราฟระหว่างตัวแปรช่วยกับฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์ โดยใช้ฟังก์ชันสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมคางหมู จะได้ฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปรช่วย ดังรูปที่ 5.22

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



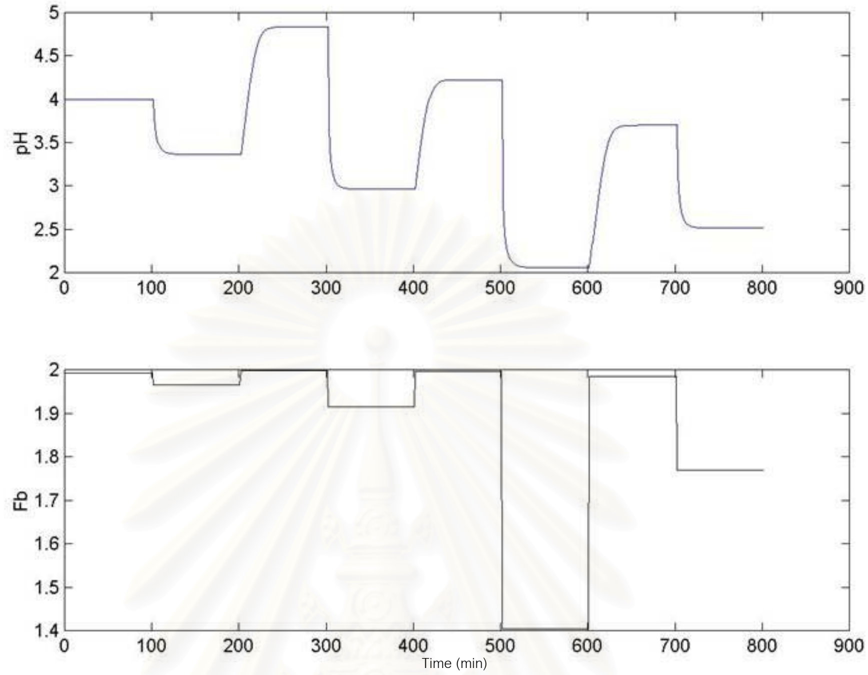
รูปที่ 5.22 ฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปรช่วยสำหรับกรณีศึกษาที่ 2

ย่านที่ได้จากการคลัสเตอริงแบ่งข้อมูลออกเป็น 5 ย่านคือย่านที่ 1 ช่วงของค่าพีเอช 2 – 5, ย่านที่ 2 ช่วงของค่าพีเอช 3 – 7, ย่านที่ 3 ช่วงของค่าพีเอช 5 – 9, ย่านที่ 4 ช่วงของค่าพีเอช 7 – 11 และย่านที่ 5 ช่วงของค่าพีเอช 9 – 12 สามารถเขียนย่านลงบนข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทของกระบวนการได้ดังรูปที่ 5.23

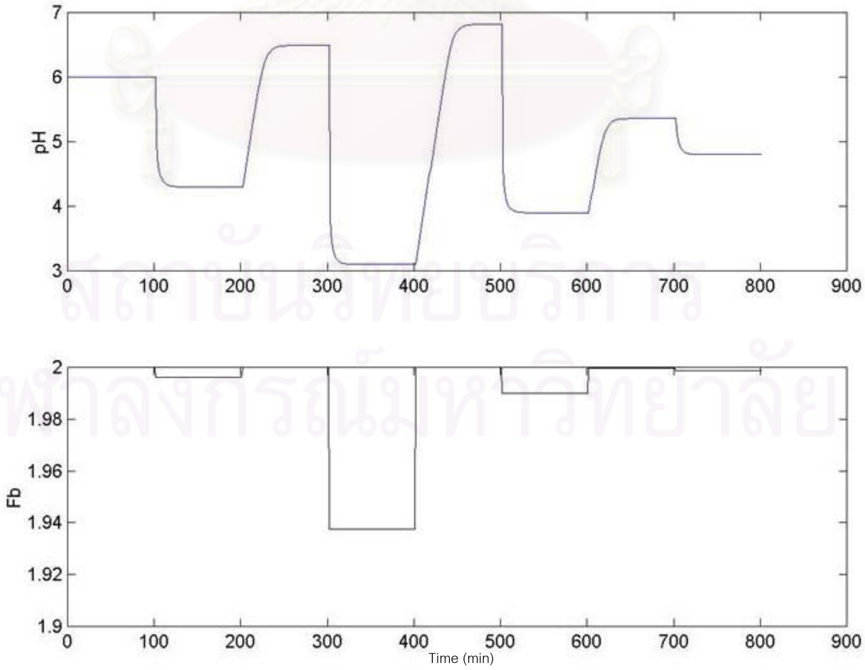


รูปที่ 5.23 ย่านข้อมูลที่ได้จากอัลกอริธึมของฟัซซีคลัสเตอริง

การระบุหาแบบจำลองของแต่ละย่าน ทำโดยใช้ข้อมูลอินพุทและเอาท์พุท ดังรูปที่ 5.24 – 5.28 ตามลำดับ ซึ่งได้จากการเก็บข้อมูลโดยทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของด่างแบบขั้นอย่างสุ่ม เป็นเวลา 800 นาที

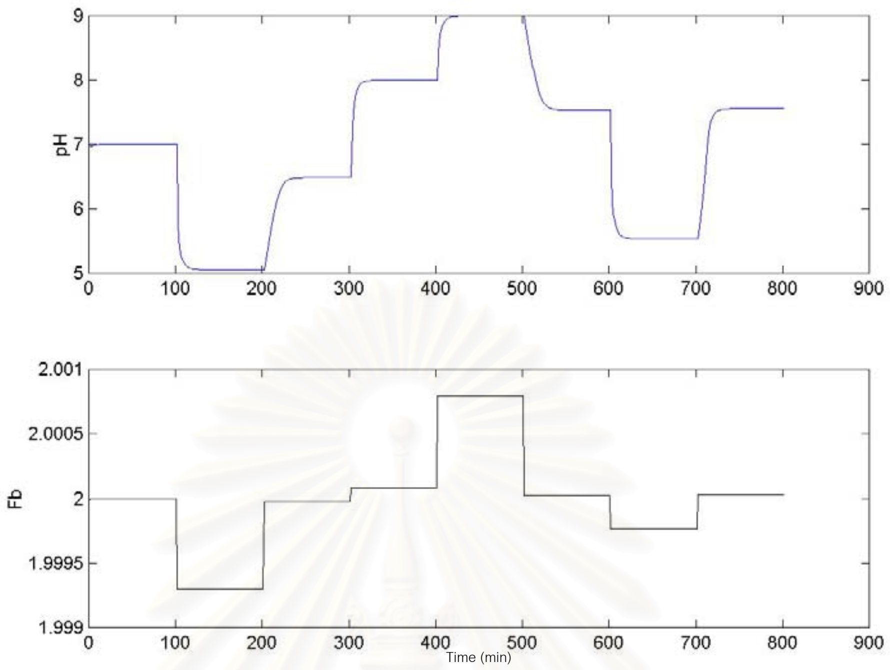


รูปที่ 5.24 ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองฟัซซี
สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 1

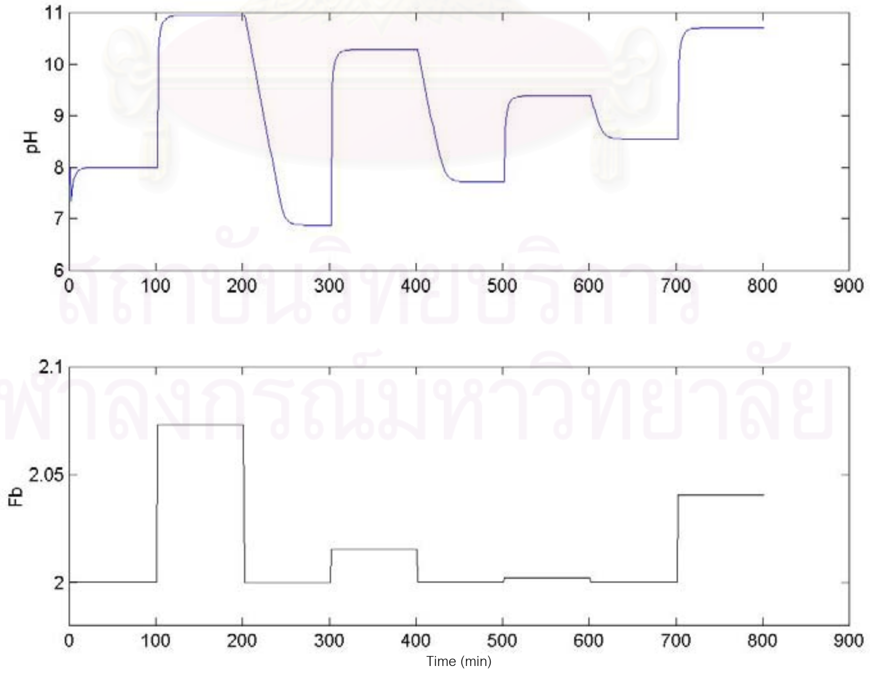


รูปที่ 5.25 ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองฟัซซี
สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 2

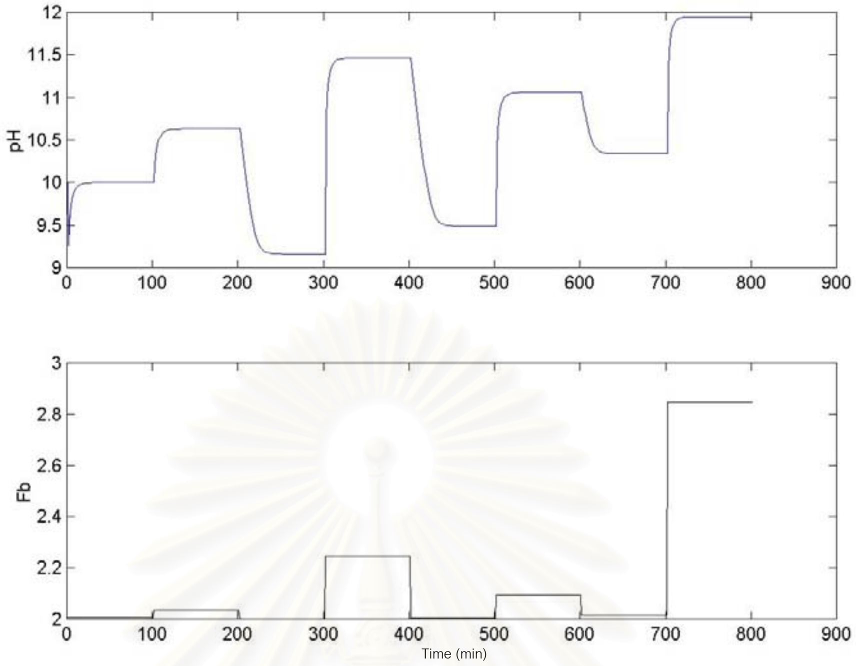
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.26 ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองฟัซซี สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 3



รูปที่ 5.27 ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองฟัซซี สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 4



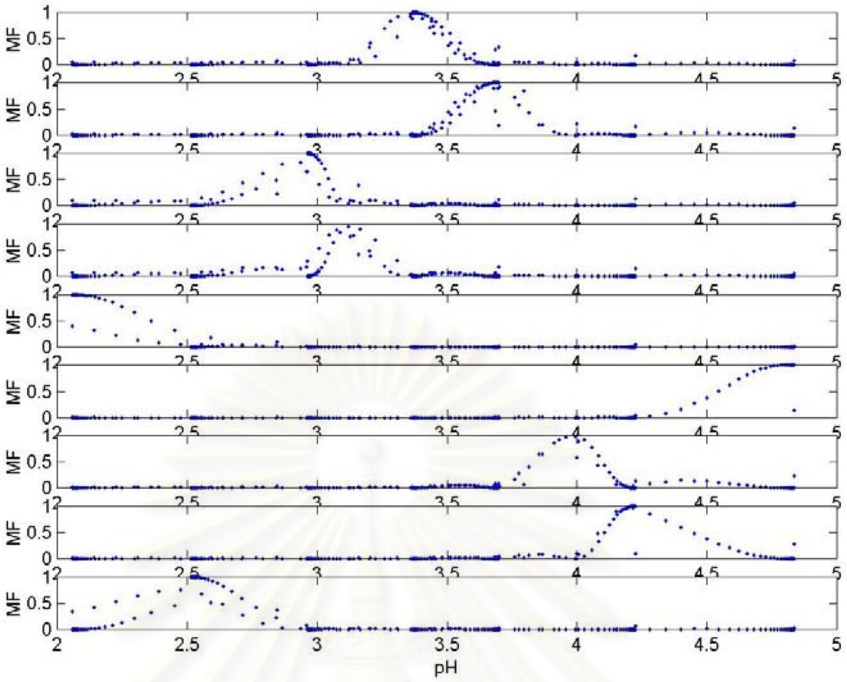
รูปที่ 5.28 ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองฟัซซี สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 5

ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทที่ได้จากการสุ่มนำมาจัดให้อยู่ในรูปของเวคเตอร์ข้อมูล $Z = [F_b(k-1)\ pH(k-1)\ pH(k)]$ แล้วใช้ฟัซซีตลัสเตอริงร่วมกับค่าเกณฑ์ $J(c)$ เพื่อหาจำนวนกฎและฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์ของแต่ละย่าน พบว่าจำนวนกฎที่ให้ค่าเกณฑ์ $J(c)$ ต่ำที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 คือ 39 กฎแบ่งเป็นแต่ละย่านได้ดังนี้

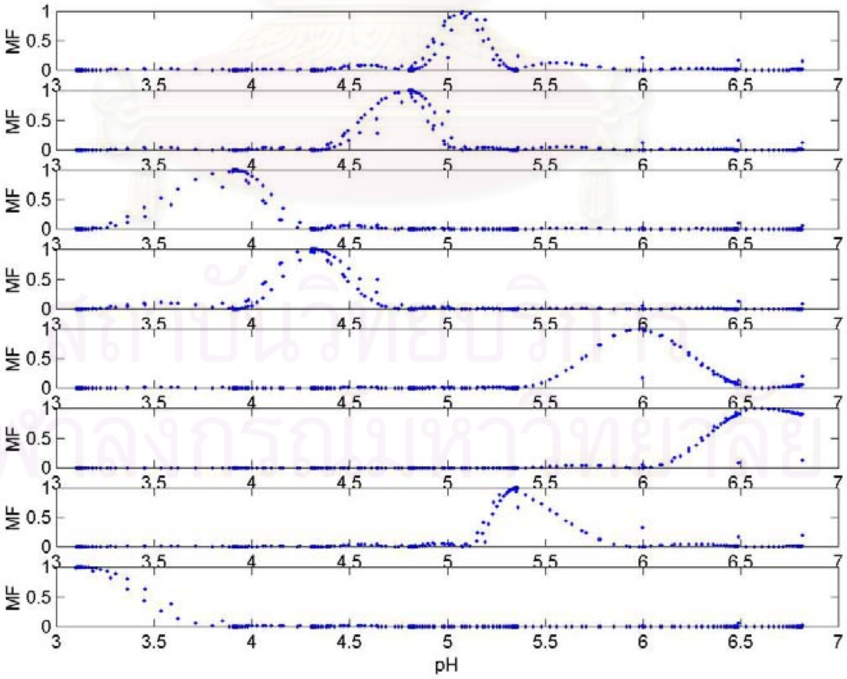
ตารางที่ 5.9 จำนวนกฎที่เหมาะสมในแต่ละย่านสำหรับกรณีศึกษาที่ 2

ย่านที่	ช่วงพีเอช	จำนวนกฎที่เหมาะสม
1	2 – 5	9
2	3 – 7	8
3	5 – 9	5
4	7 – 11	8
5	9 – 12	9

ฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์ที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.29 – 5.33

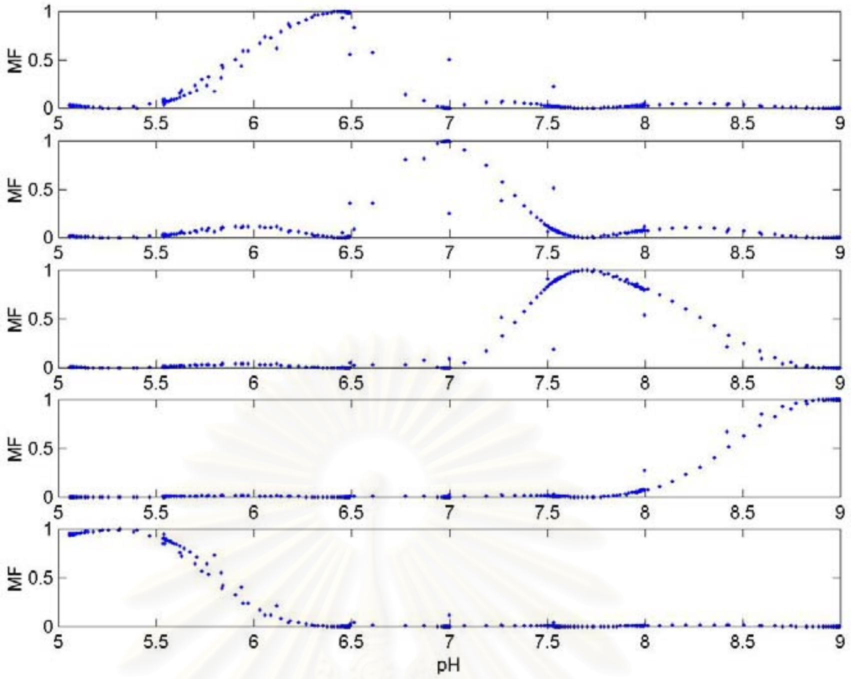


รูปที่ 5.29 กราฟระหว่างค่าพีเอชกับฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์
สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 1



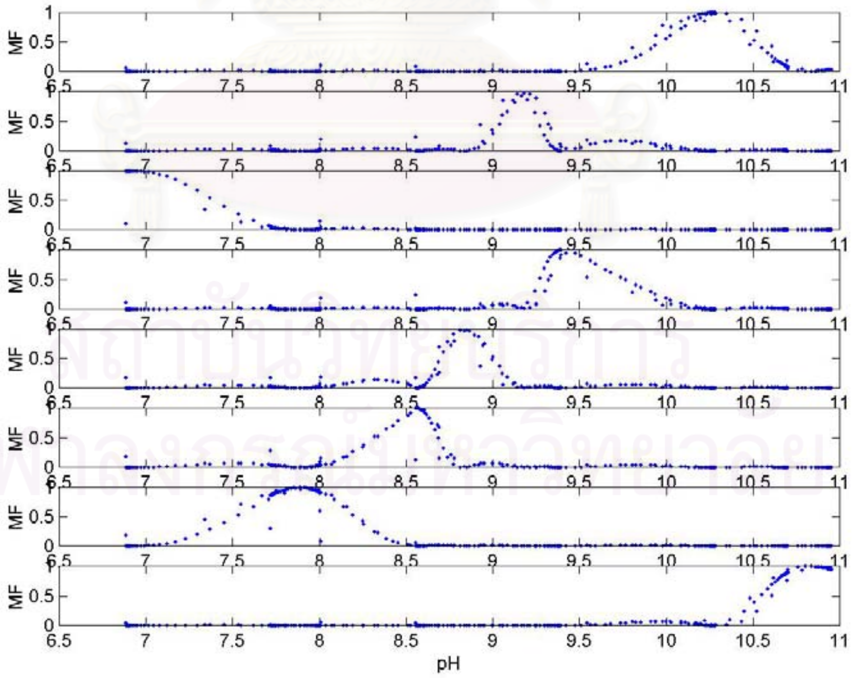
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.30 กราฟระหว่างค่าพีเอชกับฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์
สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 2



รูปที่ 5.31 กราฟระหว่างค่าพีเอชกับฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์

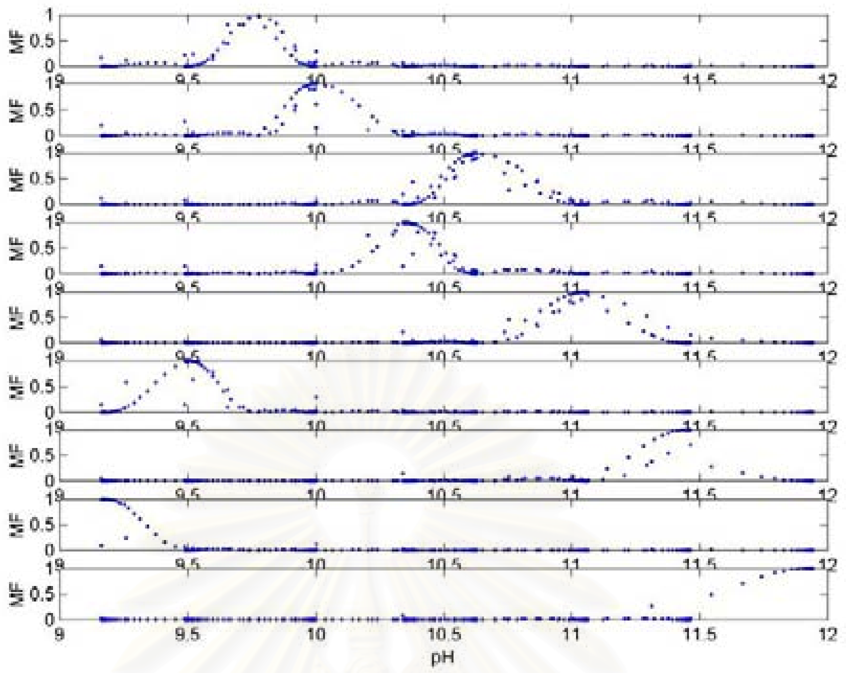
สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 3



รูปที่ 5.32 กราฟระหว่างค่าพีเอชกับฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์

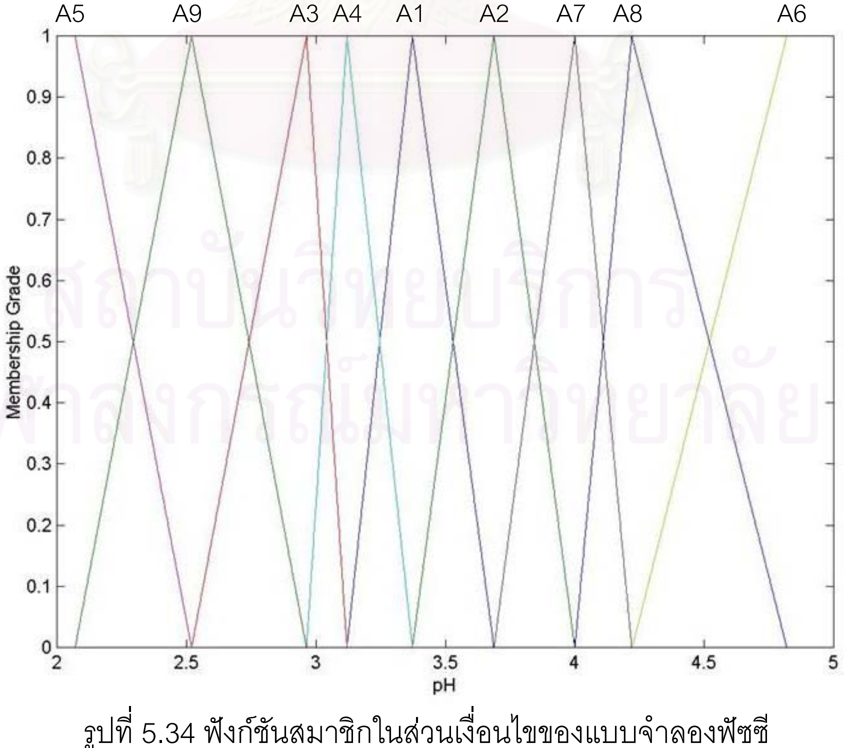
สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

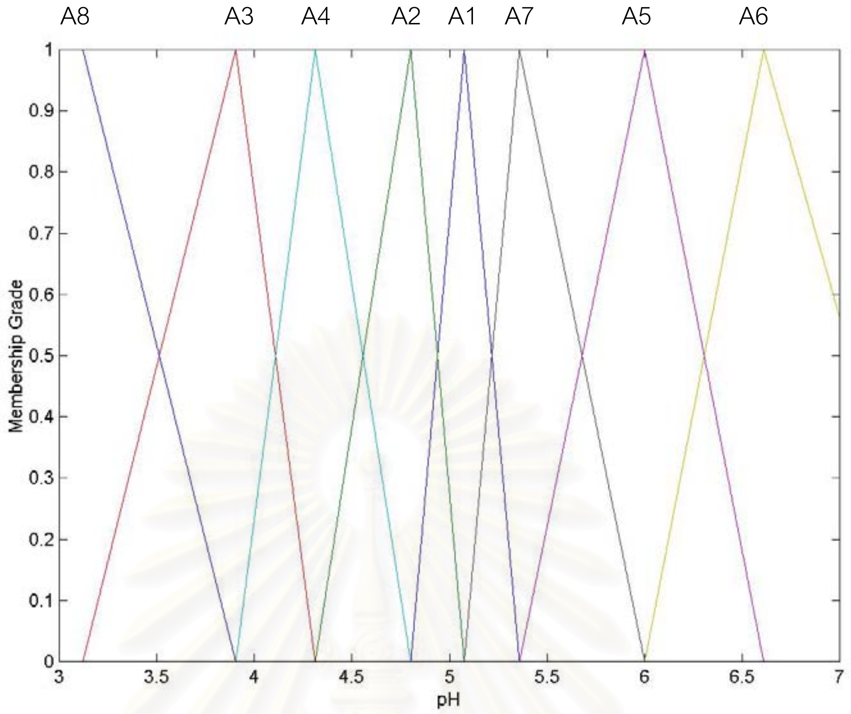


รูปที่ 5.33 กราฟระหว่างค่าพีเอชกับฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์
สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 5

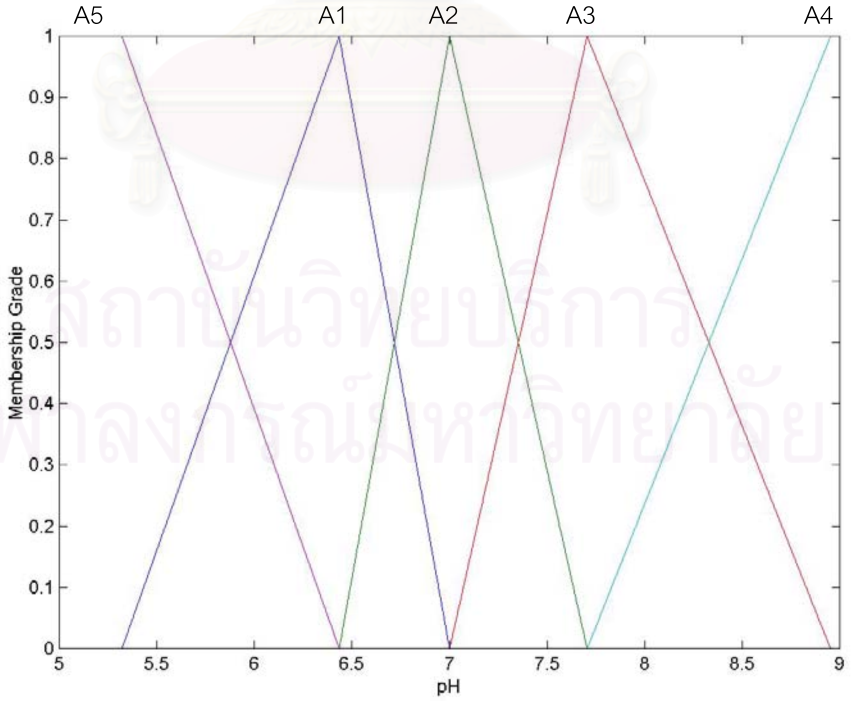
ฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไขได้จากการประมาณกราฟระหว่างค่าพีเอชกับฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์ในแต่ละย่าน โดยใช้ฟังก์ชันสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมคางหมู ดังรูปที่ 5.34 – 5.38



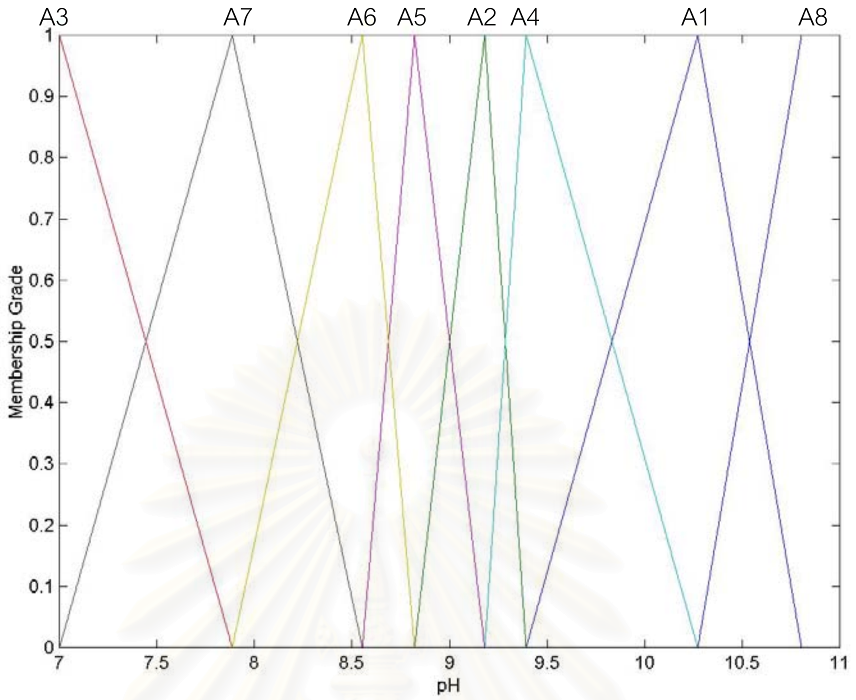
รูปที่ 5.34 ฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไขของแบบจำลองฟัซซี
สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่1



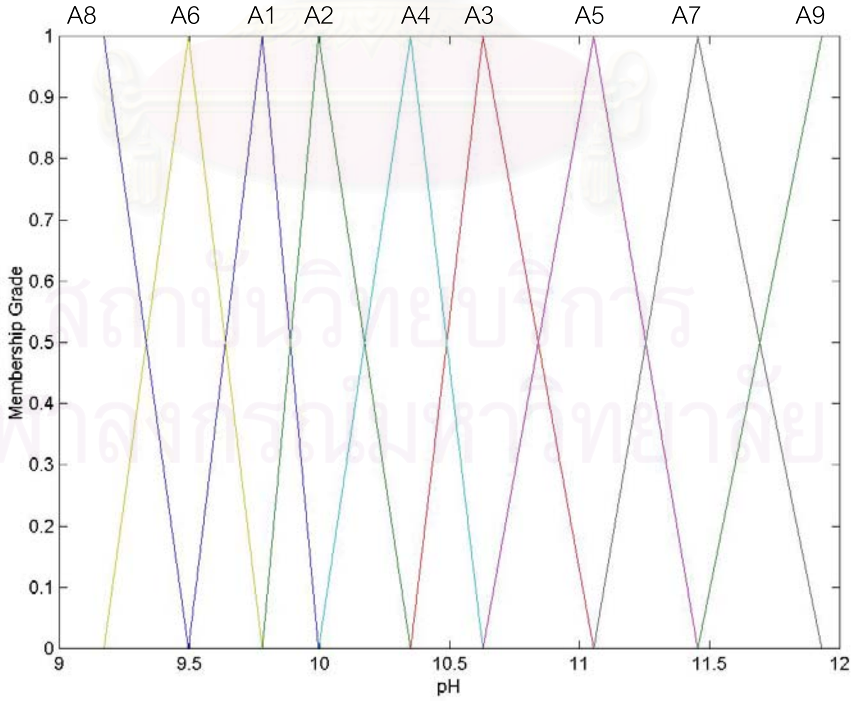
รูปที่ 5.35 ฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไขของแบบจำลองฟัซซี
สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 2



รูปที่ 5.36 ฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไขของแบบจำลองฟัซซี
สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 3



รูปที่ 5.37 ฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไขของแบบจำลองฟัซซี
สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 4



รูปที่ 5.38 ฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไขของแบบจำลองฟัซซี
สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 5

ค่าพารามิเตอร์ส่วนผลได้จากการทำลีสท์สแควร์ พารามิเตอร์ของแต่ละย่านแสดงตารางที่ 5.10 – 5.14

ตารางที่ 5.10 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 1

กฎ	P_0	P_1	P_2
1	-0.1620	1.3456	0.2628
2	-0.4011	1.4827	0.3120
3	-0.5758	0.5279	0.8527
4	0.0308	0.9648	0.3825
5	2.2183	-0.9682	0.5832
6	105.7375	-50.4066	-0.0318
7	10.8792	-3.1055	-0.1728
8	-78.6601	40.8556	0.3237
9	0.9474	0.0265	0.6049

ตารางที่ 5.11 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 2

กฎ	P_0	P_1	P_2
1	222.5879	-109.2758	0.2092
2	-52.1828	28.0591	0.1873
3	-3.6363	2.7173	0.5456
4	-24.7566	13.9745	0.2708
5	-3903.3063	1953.1850	0.5157
6	4490.1827	-2245.4428	1.1107
7	276.6549	-137.5423	0.7008
8	0.6774	0.8055	0.2796

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.12 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 3

กฎ	P_0	P_1	P_2
1	-1390.8701	695.9421	0.8463
2	-10993.8003	5498.5497	0. 5287
3	-25.9729	13.0268	0.9912
4	-181.4374	90.9028	0.9509
5	-203.5366	102.2839	0.8205

ตารางที่ 5.13 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 4

กฎ	P_0	P_1	P_2
1	0.7416	2.5181	0.4340
2	-191.0886	99.5756	0.1124
3	1515.3381	-754.5114	0.0841
4	-22.9524	12.4369	0.7931
5	-44.0043	24.7868	0.3607
6	1137.0481	-567.6059	0.8019
7	-2735.0316	1368.6567	0.6969
8	0.6488	1.0561	0.7389

ตารางที่ 5.14 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 5

กฎ	P_0	P_1	P_2
1	-13.4446	13.6883	-0.4331
2	1.8182	3.5336	0.1086
3	7.2975	0.6094	0.1970
5	7.7125	0.3499	0.2362
4	5.5185	1.4209	0.1896
6	-35.6358	25.3445	-0.5923
7	-4.3209	0.8687	1.2066
8	109.1367	-45.1316	-1.0536
9	28.1141	-9.5581	0.9261

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อนำข้อมูลอินพุทเอาท์พุทของกระบวนการที่ได้จากการสุ่มแบบขั้นมาผ่านการคลัสเตอริงและลีสท์สแควร์แล้ว สามารถระบุหาโครงสร้างแบบจำลองฟัซซีได้ดังนี้

โครงสร้างของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 1

กฎที่ 1 : $If\ pH(k)\ is\ A1\ Then\ pH(k+1) = -0.1620 + 1.3456Fb(k) + 0.2628pH(k)$

กฎที่ 2 : $If\ pH(k)\ is\ A2\ Then\ pH(k+1) = -0.4011 + 1.4827Fb(k) + 0.3120pH(k)$

กฎที่ 3 : $If\ pH(k)\ is\ A3\ Then\ pH(k+1) = -0.5758 + 0.5279Fb(k) + 0.8527pH(k)$

กฎที่ 4 : $If\ pH(k)\ is\ A4\ Then\ pH(k+1) = 0.0308 + 0.9648Fb(k) + 0.3825pH(k)$

กฎที่ 5 : $If\ pH(k)\ is\ A5\ Then\ pH(k+1) = 2.2183 - 0.9682Fb(k) + 0.5832pH(k)$

กฎที่ 6 : $If\ pH(k)\ is\ A6\ Then\ pH(k+1) = 105.7375 - 50.4066Fb(k) - 0.0318pH(k)$

กฎที่ 7 : $If\ pH(k)\ is\ A7\ Then\ pH(k+1) = 10.8792 - 3.1055Fb(k) - 0.1728pH(k)$

กฎที่ 8 : $If\ pH(k)\ is\ A8\ Then\ pH(k+1) = -78.6601 + 40.8556Fb(k) + 0.3237pH(k)$

กฎที่ 9 : $If\ pH(k)\ is\ A9\ Then\ pH(k+1) = 0.9474 + 0.0265Fb(k) + 0.6049pH(k)$

โครงสร้างของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 2

กฎที่ 1 : $If\ pH(k)\ is\ A1\ Then\ pH(k+1) = 222.5879 - 109.2758Fb(k) + 0.2092pH(k)$

กฎที่ 2 : $If\ pH(k)\ is\ A2\ Then\ pH(k+1) = -52.1828 + 28.0591Fb(k) + 0.1873pH(k)$

กฎที่ 3 : $If\ pH(k)\ is\ A3\ Then\ pH(k+1) = -3.6363 + 2.7173Fb(k) + 0.5456pH(k)$

กฎที่ 4 : $If\ pH(k)\ is\ A4\ Then\ pH(k+1) = -24.7566 + 13.945Fb(k) + 0.2708pH(k)$

กฎที่ 5 : $If\ pH(k)\ is\ A5\ Then\ pH(k+1) = -3903.3063 + 1953.1850Fb(k) + 0.5157pH(k)$

กฎที่ 6 : $If\ pH(k)\ is\ A6\ Then\ pH(k+1) = 4490.1827 - 2245.4428Fb(k) + 1.1107pH(k)$

กฎที่ 7 : $If\ pH(k)\ is\ A7\ Then\ pH(k+1) = 276.6549 - 137.5423Fb(k) + 0.7008pH(k)$

กฎที่ 8 : $If\ pH(k)\ is\ A8\ Then\ pH(k+1) = 0.6774 + 0.8055Fb(k) + 0.2796pH(k)$

โครงสร้างของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 3

กฎที่ 1 : $If\ pH(k)\ is\ A1\ Then\ pH(k+1) = -1390.8701 + 695.9421Fb(k) + 0.8463pH(k)$

กฎที่ 2 : $If\ pH(k)\ is\ A2\ Then\ pH(k+1) = -10993.8003 + 5498.5497Fb(k) + 0.5287pH(k)$

กฎที่ 3 : $If\ pH(k)\ is\ A3\ Then\ pH(k+1) = -25.9729 + 13.0268Fb(k) + 0.9912pH(k)$

กฎที่ 4 : $If\ pH(k)\ is\ A4\ Then\ pH(k+1) = -181.4374 + 90.9028Fb(k) + 0.9509pH(k)$

กฎที่ 5 : $If\ pH(k)\ is\ A5\ Then\ pH(k+1) = -203.5366 + 102.2839Fb(k) + 0.8205pH(k)$

โครงสร้างของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 4

กฎที่ 1 : $If\ pH(k)\ is\ A1\ Then\ pH(k+1) = 0.7416 + 2.5181Fb(k) + 0.4340pH(k)$

กฎที่ 2 : $If\ pH(k)\ is\ A2\ Then\ pH(k+1) = -191.0886 + 99.5756Fb(k) + 0.1124pH(k)$

กฎที่ 3 : $If\ pH(k)\ is\ A3\ Then\ pH(k+1) = 1515.3381 - 754.5114Fb(k) + 0.0841pH(k)$

กฎที่ 4 : $If\ pH(k)\ is\ A4\ Then\ pH(k+1) = -22.9524 + 12.4369Fb(k) + 0.7931pH(k)$

กฎที่ 5 : $If\ pH(k)\ is\ A5\ Then\ pH(k+1) = -44.0043 + 24.7868Fb(k) + 0.3607pH(k)$

กฎที่ 6 : $If\ pH(k)\ is\ A6\ Then\ pH(k+1) = 1137.0481 - 567.6059Fb(k) + 0.8019pH(k)$

กฎที่ 7 : $If\ pH(k)\ is\ A7\ Then\ pH(k+1) = -2735.0316 + 1368.6567Fb(k) + 0.6969pH(k)$

กฎที่ 8 : $If\ pH(k)\ is\ A8\ Then\ pH(k+1) = 0.6488 + 1.0561Fb(k) + 0.7389pH(k)$

โครงสร้างของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ย่านที่ 5

กฎที่ 1 : $If\ pH(k)\ is\ A1\ Then\ pH(k+1) = -13.4446 + 13.6883Fb(k) - 0.4331pH(k)$

กฎที่ 2 : $If\ pH(k)\ is\ A2\ Then\ pH(k+1) = 1.8182 + 3.5336Fb(k) + 0.1086pH(k)$

กฎที่ 3 : $If\ pH(k)\ is\ A3\ Then\ pH(k+1) = 7.2975 + 0.6094Fb(k) + 0.1970pH(k)$

กฎที่ 4 : $If\ pH(k)\ is\ A4\ Then\ pH(k+1) = 5.5185 + 1.4209Fb(k) + 0.1896pH(k)$

กฎที่ 5 : $If\ pH(k)\ is\ A5\ Then\ pH(k+1) = 7.7125 + 0.3499Fb(k) + 0.2362pH(k)$

กฎที่ 6 : $If\ pH(k)\ is\ A6\ Then\ pH(k+1) = -35.6358 + 25.3445Fb(k) - 0.5923pH(k)$

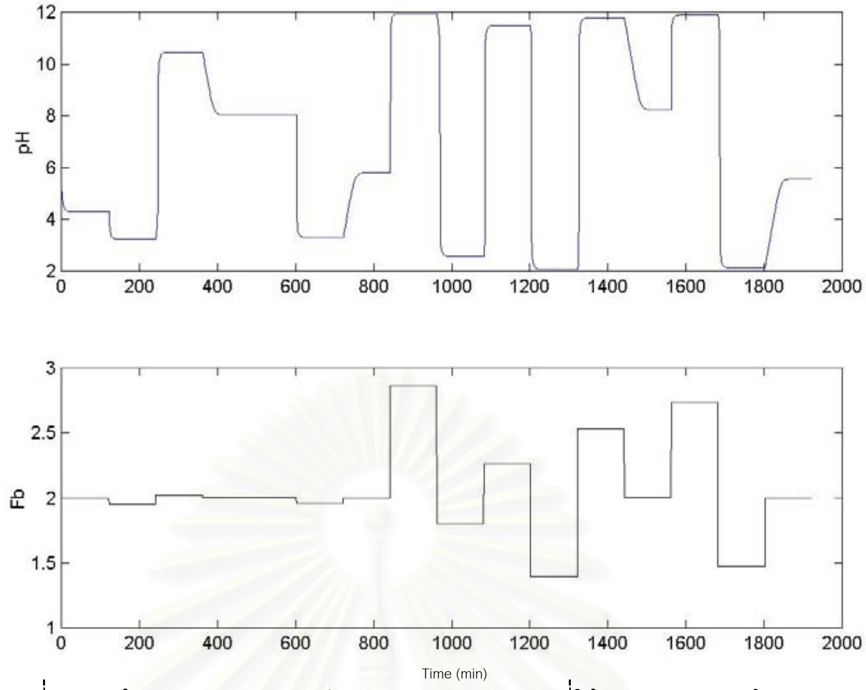
กฎที่ 7 : $If\ pH(k)\ is\ A7\ Then\ pH(k+1) = 109.1367 - 45.1316Fb(k) - 1.0536pH(k)$

กฎที่ 8 : $If\ pH(k)\ is\ A8\ Then\ pH(k+1) = -4.3209 + 0.8687Fb(k) + 1.2066pH(k)$

กฎที่ 9 : $If\ pH(k)\ is\ A9\ Then\ pH(k+1) = 28.1141 - 9.5581Fb(k) + 0.9261pH(k)$

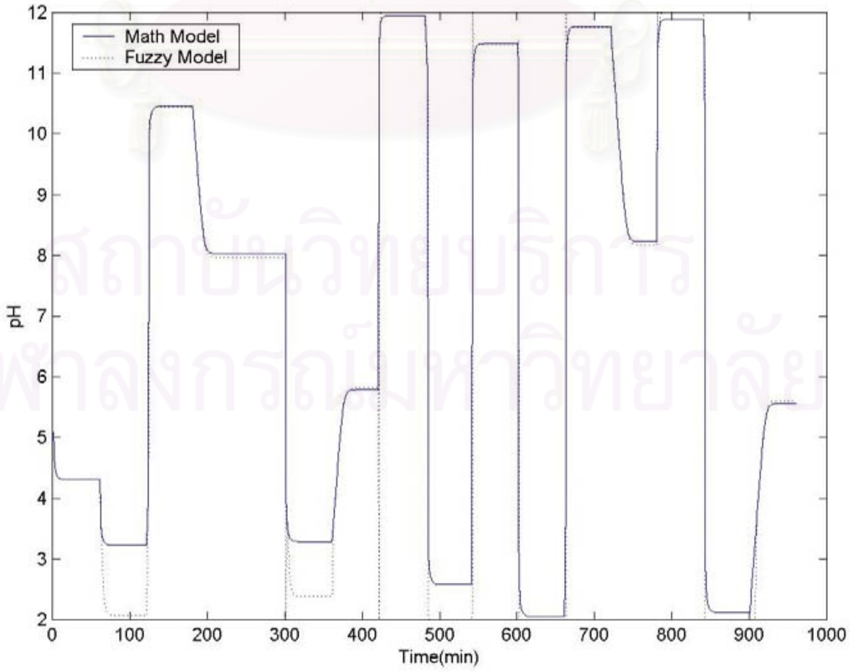
5.4 ผลการทดสอบแบบจำลองฟัซซีในแต่ละกรณีศึกษา

หลังจากได้แบบจำลองฟัซซีของแต่ละกรณีศึกษาแล้ว ทำการทดสอบแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลอินพุทและเอาท์พุทของกระบวนการทุกย่าน ดังรูปที่ 5.39 แล้วพิจารณาความสามารถในการทำนายค่าของแบบจำลองในแต่ละกรณี ด้วยค่ารากของกำลังสองเฉลี่ย



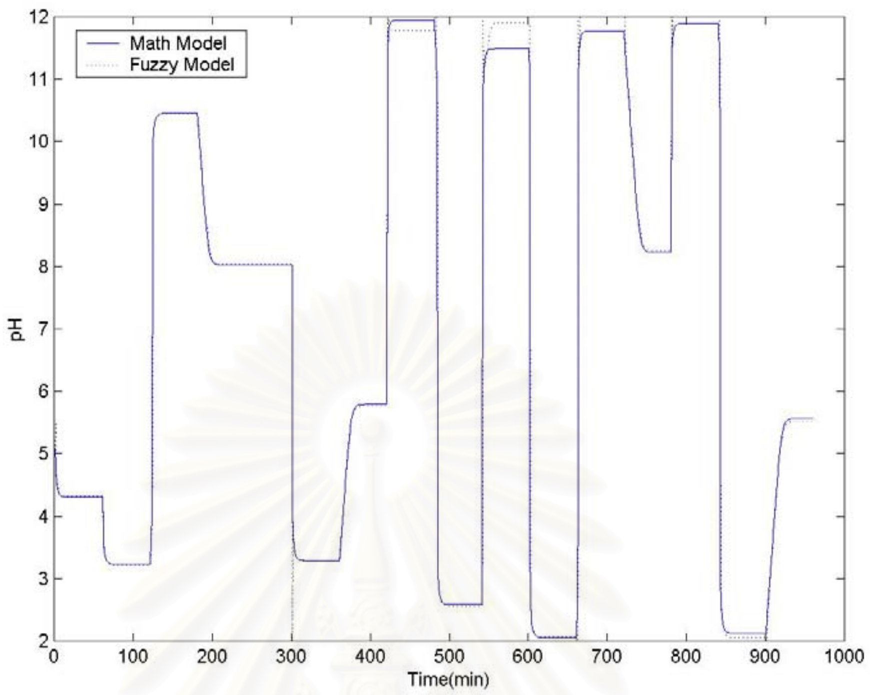
รูปที่ 5.39 ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทของกระบวนการที่ใช้ทดสอบแบบจำลองฟัซซี

ผลการทดสอบแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 แสดงดังรูปที่ 5.40 ซึ่งมีค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยเท่ากับ 0.5504 และผลการทดสอบสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 แสดงดังรูปที่ 5.41 ซึ่งมีค่ารากของกำลังสองเฉลี่ยเท่ากับ 0.3332



รูปที่ 5.40 ผลการทดสอบแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.41 ผลการทดสอบแบบจำลองฟัซซีสำหรับกรณีศึกษาที่ 2

ผลการทดสอบพบว่าแบบจำลองฟัซซีของกรณีศึกษาที่ 2 สามารถทำนายพฤติกรรมของกระบวนการได้ดีกว่าแบบจำลองของกรณีศึกษาที่ 1 โดยพิจารณาจากค่ารากของกำลังสองเฉลี่ย งานวิจัยนี้จึงเลือกแบบจำลองของกรณีศึกษาที่ 2 สำหรับใช้ในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลอง ซึ่งจะกล่าวในบทถัดไป

5.5 การวิเคราะห์ผลการระบุหาและทดสอบแบบจำลองฟัซซี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการระบุหาแบบจำลองฟัซซีของระบบพีเอช ซึ่งมีคุณลักษณ์ไม่เชิงเส้นโดยมีการเกนเปลี่ยนไปตามย่านปฏิบัติการ การระบุหาโครงสร้างของแบบจำลองกระทำโดยใช้ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทของกระบวนการ ร่วมกับวิธีการคลัสเตอริงและลีสท์สแควร์ สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

1. การหาโครงสร้างของแบบจำลองฟัซซีทำได้โดยการลองจัดกลุ่มของอินพุทของแบบจำลองที่สัมพันธ์กับเอาท์พุทด้วยการลองผิดลองถูก ซึ่งระบบพีเอชโครงสร้างฟัซซีที่เหมาะสม คือ โครงสร้าง $pH(k) = f(F_b(k-1), pH(k-1))$ เนื่องจากให้ค่าความผิดพลาดต่ำที่สุด ดังนั้นข้อมูล

อินพุทที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง ได้แก่ $F_b(k-1)$ และ $pH(k-1)$ คือค่าอัตราการไหลของด่างที่เวลาย้อนหลังหนึ่งค่า และค่าพีเอชของระบบที่เวลาย้อนหลังหนึ่งค่า สำหรับข้อมูลเอาท์พุทได้แก่ $pH(k)$ ดังนั้นเวคเตอร์ข้อมูลคือ $Z = [F_b(k-1)\ \ pH(k-1)\ \ pH(k)]$

2. การแบ่งย่านการทำงานโดยการสังเกตความไม่เป็นเชิงเส้นของข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทของกระบวนการ สามารถแบ่งได้เป็น 5 ย่าน และมีกฎฟัซซีทั้งหมด 34 กฎ และเมื่อทำการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองให้ค่า RMS เท่ากับ 0.5504

3. การแบ่งย่านการทำงานโดยใช้อัลกอริธึมของฟัซซีคลัสเตอริง สามารถแบ่งได้เป็น 5 ย่าน และมีกฎฟัซซีทั้งหมด 39 กฎ และเมื่อทำการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองให้ค่า RMS เท่ากับ 0.3332

4. การศึกษาลักษณะการแบ่งย่านของข้อมูลที่มีผลต่อโครงสร้างและความถูกต้องของแบบจำลองฟัซซี พบว่าการแบ่งย่านโดยใช้อัลกอริธึมของฟัซซีคลัสเตอริง ได้แบบจำลองที่ถูกต้องมากกว่าการแบ่งย่านโดยการสังเกตความไม่เป็นเชิงเส้นของข้อมูลอินพุทและเอาท์พุท ทั้งนี้จากการสังเกตย่านการทำงานที่ได้จากกรณีศึกษาที่ 2 (รูปที่ 5.23) พบว่าย่านการทำงานแต่ละย่านจะซ้อนทับกัน พีเอชค่าใดๆ จะมีความเป็นสมาชิกในย่านการทำงาน 2 ย่าน (รูปที่ 5.22) ที่ช่วงพีเอชเป็นกลาง (พีเอช 6 - 8) ที่มีค่าเกนสูงและแตกต่างกันมากจะมีการเฉลี่ยความเป็นสมาชิกของย่านกับย่านใกล้เคียง ทำให้การแบ่งย่านวิธีนี้สอดคล้องกับย่านของค่าเกนของกระบวนการในรูปที่ 5.3 มากกว่ากรณีศึกษาที่ 1 (รูปที่ 5.4) ที่ให้ช่วงพีเอช 4.5 – 9.5 ที่มีค่าเกนแตกต่างกันมากอยู่ในย่านการทำงานเดียวกัน ดังนั้นการพิจารณาแบ่งย่านข้อมูลควรคำนึงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของค่าเกนมากกว่าความไม่เป็นเชิงเส้นของอินพุท-เอาท์พุทของกระบวนการ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

การออกแบบและการทดสอบตัวควบคุมฟัซซี

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงวิธีการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลองภายในแบบแบ่งย่านการทำงานของระบบควบคุมค่าพีเอช ซึ่งมีค่าเกนของกระบวนการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปลี่ยนจุดปฏิบัติการ ตัวควบคุมฟัซซีสามารถออกแบบได้โดยทำการผกผันแบบจำลองฟัซซีที่ได้ จากนั้นทำการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะ และความทนทานของตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลองที่ได้กับตัวควบคุมพีไอแบบกำหนดเกนต่างๆ กัน โดยแบ่งออกเป็น 3 กรณี คือกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย ซึ่งจะทำการควบคุมที่ค่าสภาวะปกติ 3 ค่า คือ ค่าพีเอช 5, 7 และ 9 แล้วทำการเปลี่ยนค่าเป้าหมายไปจากสภาวะปกติ ± 0.5 รวมทั้งทำการควบคุมเพื่อเปรียบเทียบผลการควบคุมกับตัวควบคุม AFLC เพื่อศึกษาแนวโน้มของกราฟ กรณีที่มีการรบกวนระบบ เป็นการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของกรดและ ความเข้มข้นของกรดไป $\pm 10\%$ และกรณีที่ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการผิดพลาด โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพื่อให้ค่าคงที่ของสมดุลไอออนในน้ำเปลี่ยนแปลงไป เกณฑ์การตัดสินสมรรถนะการทำงานของ ตัวควบคุมจะใช้ค่าอินทิกรัลของความผิดพลาดสัมบูรณ์ ซึ่งพบว่าตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลองภายในแบบแบ่งย่านการทำงานสามารถควบคุมระบบได้ดีทั้ง 3 กรณี

6.1 การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลองของระบบควบคุมค่าพีเอช

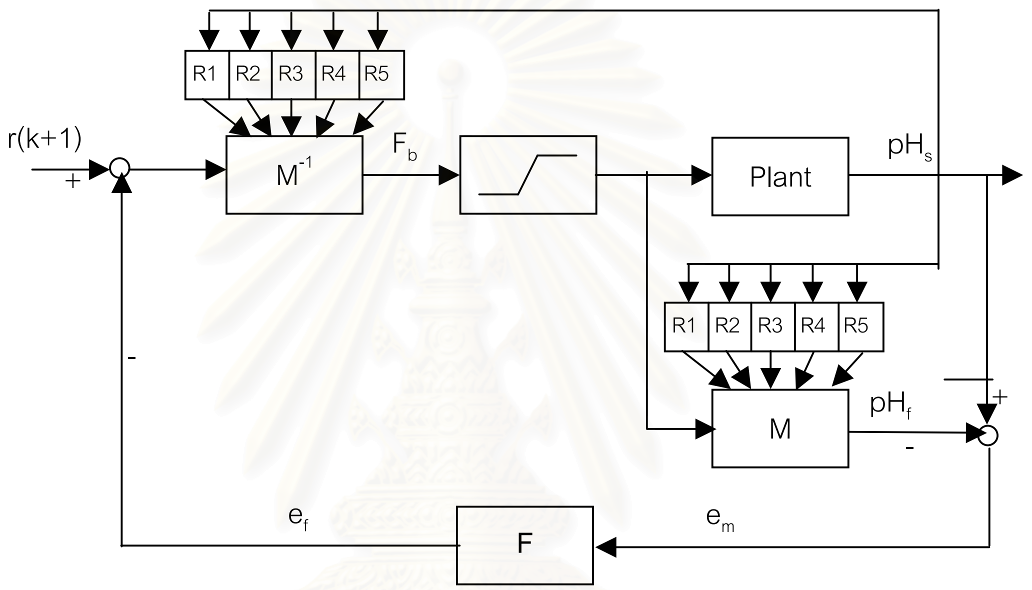
งานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงวิธีการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลอง ซึ่งเป็นลักษณะของการควบคุมแบบใช้แบบจำลองภายในดังที่กล่าวในบทที่ 4

การออกแบบตัวควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองภายในทำโดยการผกผันแบบจำลองฟัซซีของกระบวนการที่ได้จากหัวข้อ 5.3.2 ตามสมการที่ (4.10) จะได้

$$F_b(k+1) = \frac{r(k+1) - \sum_{i=1}^{K} w_i (p_0^i + p_2^i pH(k))}{\sum_{i=1}^{K} w_i p_1^i} \qquad (6.1)$$

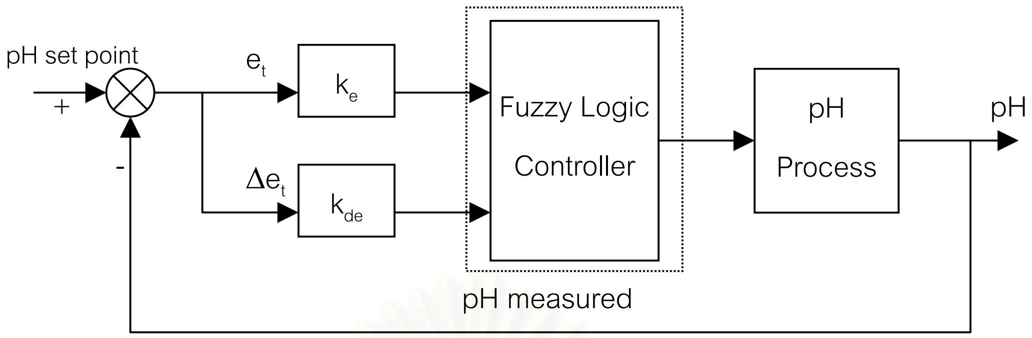
โดยที่ p_0^i, p_1^i, p_2^i เป็นค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้นในส่วนผลของกฎที่ i ของแบบจำลองฟัซซีของกรณีศึกษาที่ 2 ซึ่งมีค่าตามตารางที่ 5.10 – 5.14

รูปที่ 6.1 แสดงโครงสร้างการควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองฟัซซีภายในแบบแบ่งย่านการทำงานของกระบวนการควบคุมค่าพีเอชที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยที่ตัวแปรช่วยที่บ่งชี้ถึงย่านการทำงาน คือค่าพีเอชของกระบวนการ ซึ่งมีช่วงของย่านการทำงานและค่าความเป็นสมาชิกของแต่ละย่านดังรูปที่ 5.22 กล่าวคือ ค่าพีเอชของกระบวนการจะบ่งชี้ย่านการทำงานของกระบวนการรวมทั้งค่าความเป็นสมาชิกของย่านการทำงานนั้น ตัวควบคุมฟัซซีจะได้จากการผกผันแบบจำลองฟัซซีของย่านการทำงานนั้น

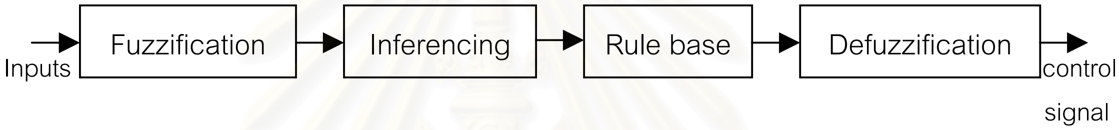


รูปที่ 6.1 โครงสร้างตัวควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองภายในแบบแบ่งย่านการทำงานของกระบวนการควบคุมพีเอช

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการควบคุมระบบพีเอชด้วยตัวควบคุมฟัซซีลอจิกต่างๆ กัน เช่นในปี ค.ศ.1999 Hussain และคณะ ได้ประยุกต์ใช้ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกเชิงภาษาร่วมกับการแบ่งย่านการทำงาน (AFLC) ซึ่งถือว่าเป็นฟัซซีแบบปรับตัวได้โครงสร้างหนึ่ง โดยทำการปรับเปลี่ยนแฟกเตอร์การสเกลของเอาท์พุทของตัวควบคุมเมื่อมีการเปลี่ยนย่านการทำงาน ฟังก์ชันสมาชิกและแฟกเตอร์การสเกลถูกกำหนดจากประสบการณ์ของผู้ออกแบบดังตารางที่ 6.1 ผลการศึกษาเมื่อมีการเปลี่ยนค่าเป้าหมายต่างๆ กันแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมสามารถควบคุมค่าพีเอชได้ตามต้องการในเวลาที่กำหนด แต่ถ้าไม่มีผู้เชี่ยวชาญหรือประสบการณ์มาก่อนจะไม่สามารถทำตามวิธีการนี้ได้ แผนผังการควบคุมแสดงดังรูปที่ 6.2 – 6.3



รูปที่ 6.2 แผนผังการควบคุมด้วยตัวควบคุม AFLC



รูปที่ 6.3 ภาพขยายจากกรอบเส้นประในรูปที่ 6.2

ตารางที่ 6.1 แฟกเตอร์การสเกลของตัวควบคุม AFLC

		pH_n				
	$K_{du,n}$	Vacid	Acid	Neutral	Base	Vbase
e_n	NL	C2	C2	C3	C3	C3
	NS	C2	C2	C2	C3	C3
	ZR	C2	C2	C1	C2	C2
	PS	C3	C3	C2	C2	C2
	PB	C3	C3	C3	C2	C2

ตารางที่ 6.1 ค่าแฟกเตอร์การสเกลถูกแบ่งเป็น 3 ค่า คือ C1 เท่ากับ 0.1 C2 เท่ากับ 0.4 และ C3 เท่ากับ 0.7 โดยแต่ละย่านจะมีค่าแฟกเตอร์ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับฟังก์ชันสมาชิกของความแตกต่างระหว่างค่าพีเอชเป้าหมายกับค่าพีเอชของกระบวนการ

สำหรับผลการควบคุมด้วยฟัซซีลอจิกเชิงภาษาแบบปรับตัวได้จากงานวิจัยข้างต้นได้นำมารวมไว้ในงานวิจัยนี้เพื่อแสดงแนวโน้มและลักษณะกราฟ

6.2 ตัวควบคุมพีไอแบบกำหนดเกนต่าง ๆ กัน

การปรับค่าตัวควบคุมแบบกำหนดเกนต่างๆ กัน เป็นการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอทั่วๆ ไปในการควบคุมค่าพีเอช แต่จะมีการปรับค่าเกนของตัวควบคุม (K_c) เปลี่ยนไปตามค่าเกนของกระบวนการ (K_p) เป็นสมการเส้นตรงที่ได้จากการประมาณกราฟตามรูปที่ 5.3 เป็น 6 ย่านการทำงาน โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างเกนของกระบวนการและเกนของตัวควบคุมมีแสดงดังสมการ (6.2)

$$K_c * K_p = \text{ค่าคงที่} \tag{6.2}$$

จากการปรับจูนได้ค่าคงที่ของสมการ (6.2) คือ 18 และค่า τ_I คือ 0.416 และสมการค่าเกนของกระบวนการแสดงดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 สมการค่าเกนของกระบวนการในแต่ละย่านการทำงาน

ช่วงพีเอชของย่านการทำงาน	เกนของกระบวนการ (K_p)
2.0 – 4.5	40 pH – 75.46
4.5 – 6.0	2500 pH – 11308.59
6.0 – 7.0	44444.44 pH – 266222.22
7.0 – 8.0	-47222.22 pH + 381833.33
8.0 – 9.5	-23913 pH + 233113.04
9.5 – 12.0	-35.48 pH + 470.71

6.3 การทดสอบตัวควบคุม

การทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลองแบบแบ่งย่านการทำงานกระทำโดยการเปรียบเทียบกับผลการควบคุมของตัวควบคุมพีไอแบบกำหนดเกนต่างๆ กัน ทดสอบโดยทดสอบผลการตอบสนองของกระบวนการใน 3 กรณีคือ กรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย กรณีที่มีการรบกวนระบบ และกรณีที่ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการผิดพลาด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เกณฑ์การตัดสินสมรรถนะการทำงานของตัวควบคุมจะใช้ค่าอินทิกรัลของความผิดพลาดสัมบูรณ์ (IAE) ดังสมการ

$$IAE = \int_{t_0}^{t} \left| pH_s(t) - pH_{SP}(t) \right| dt \tag{6.3}$$

เมื่อ t_0 เป็นระยะเวลาเริ่มต้น

t เป็นระยะเวลาสิ้นสุด

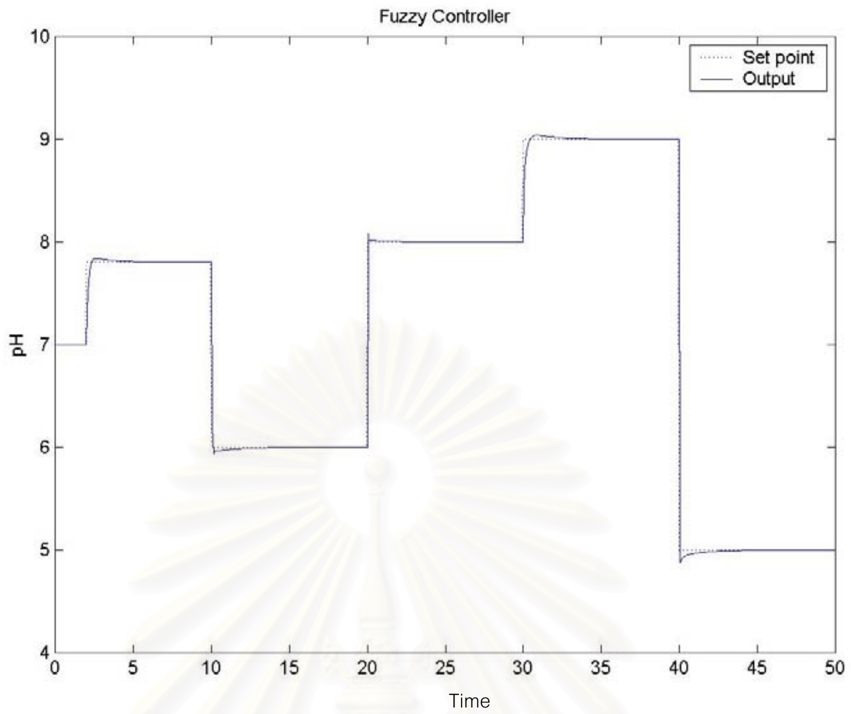
$pH_s(t)$ เป็นค่าพีเอชของระบบที่เวลาใดๆ

$pH_{SP}(t)$ เป็นค่าพีเอชเป้าหมายที่เวลาใดๆ

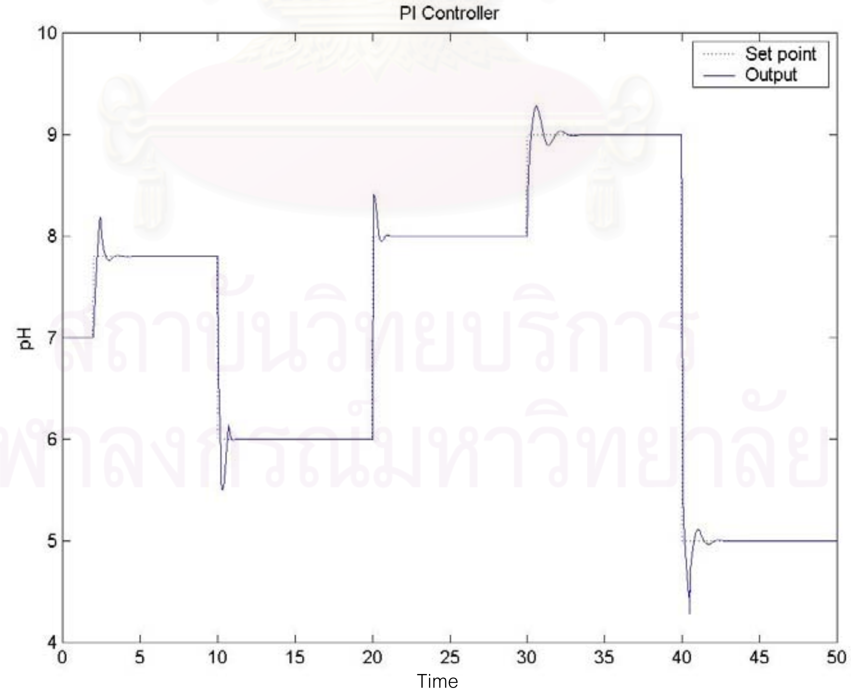
6.3.1 กรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย

วัตถุประสงค์ของการทดสอบนี้เพื่อเปรียบเทียบค่าสมรรถนะของการควบคุมกระบวนการเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายแบบขั้น โดยจะทำการควบคุมที่ค่าสภาวะปกติ 3 ค่า คือ ค่าพีเอช 5, 7 และ 9 แล้วทำการเปลี่ยนค่าเป้าหมายไปจากสภาวะปกติ ± 0.5 รวมทั้งทำการควบคุมเพื่อเปรียบเทียบผลการควบคุมกับตัวควบคุม AFLC เพื่อศึกษาแนวโน้มของกราฟ ซึ่งผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 6.4 – 6.6

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

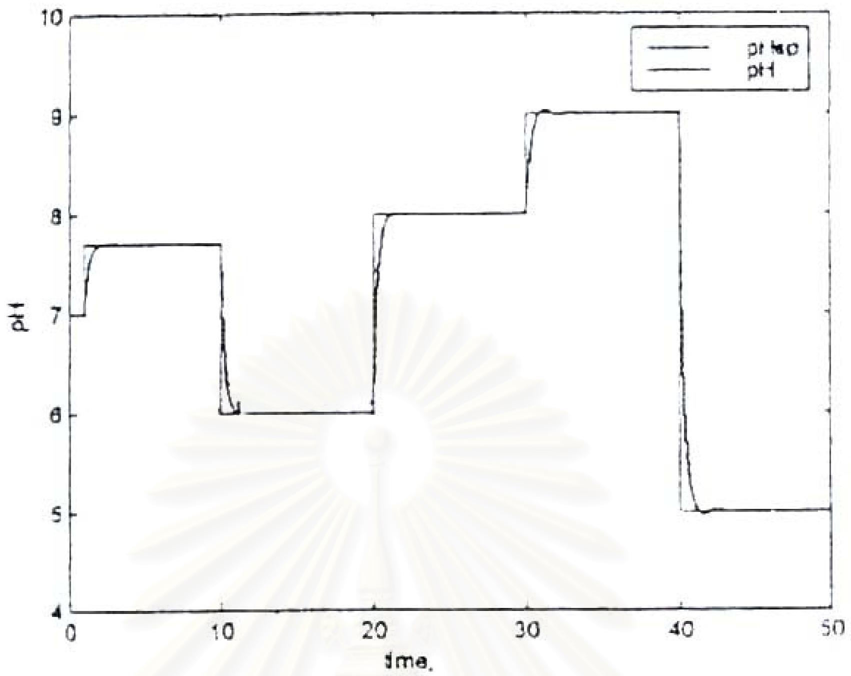


รูปที่ 6.4 ผลการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายแบบ Hussain



รูปที่ 6.5 ผลการควบคุมของตัวควบคุมพีไอเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายแบบ Hussain

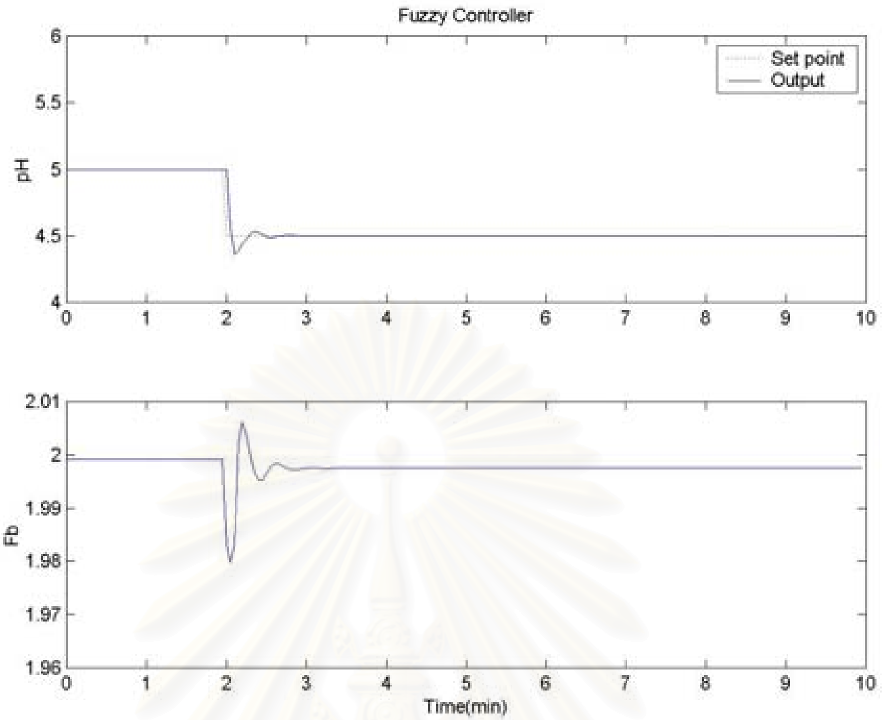
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



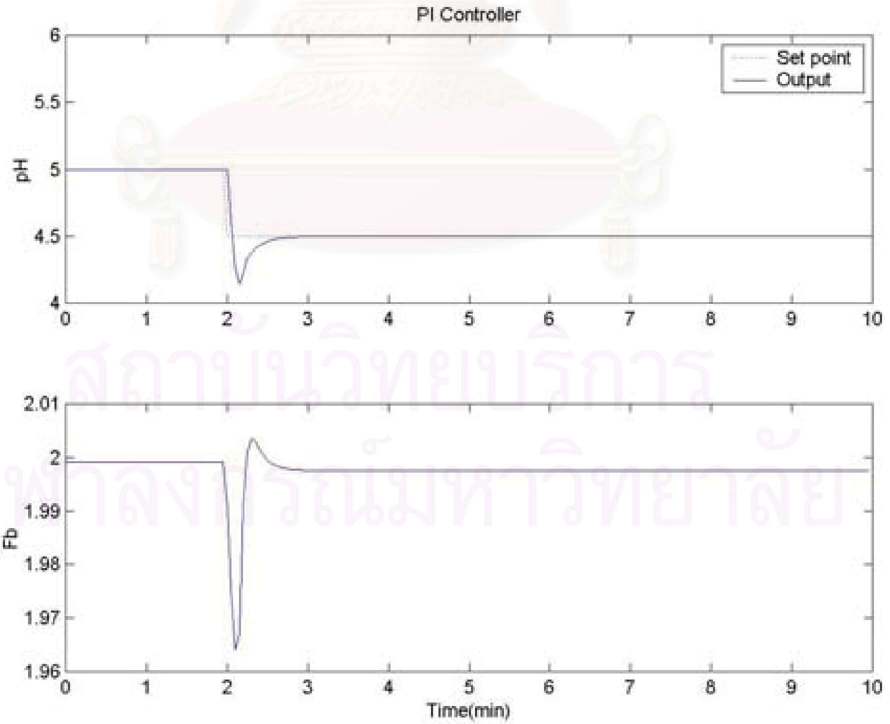
รูปที่ 6.6 ผลการควบคุมของตัวควบคุม AFLC เมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายแบบ Hussain

ค่า IAE ของตัวควบคุมฟัซซีเท่ากับ 0.9493 ของตัวควบคุมพีไอเท่ากับ 1.5381 พบว่าการควบคุมด้วยตัวควบคุมทั้ง 3 ชนิดสามารถควบคุมค่าพีเอชให้เข้าสู่เป้าหมายที่เปลี่ยนแปลงได้เป็นอย่างดี

การทดสอบกรณีที่มีการเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 5 เป็น 4.5 แสดงดังรูปที่ 6.7 และ 6.8 ได้ค่า IAE ของตัวควบคุมฟัซซีเท่ากับ 0.0516 ของตัวควบคุมพีไอเท่ากับ 0.1069

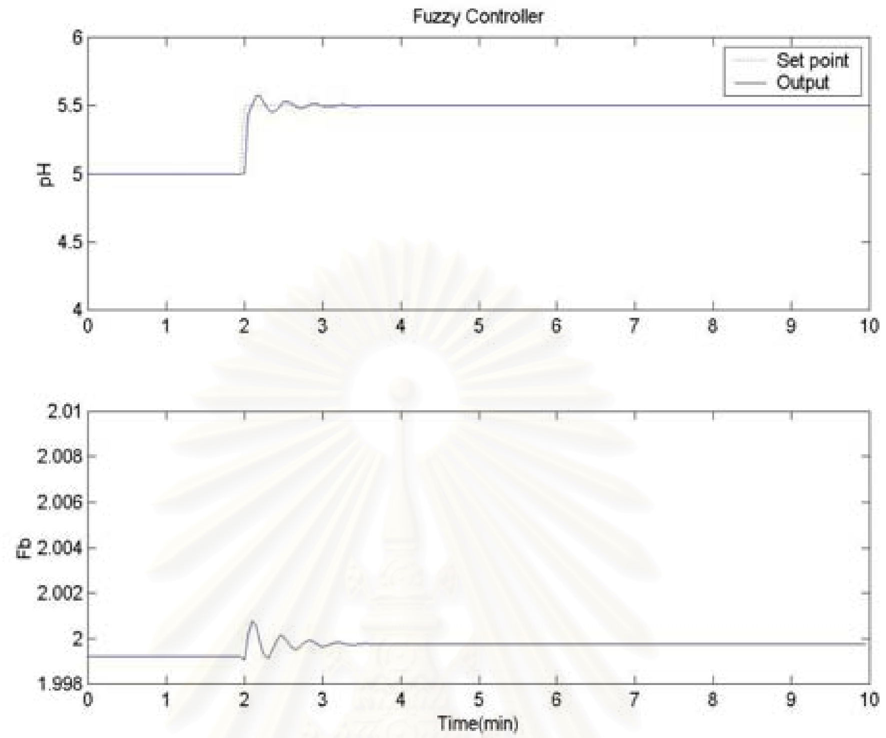


รูปที่ 6.7 ผลการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 5 เป็น 4.5

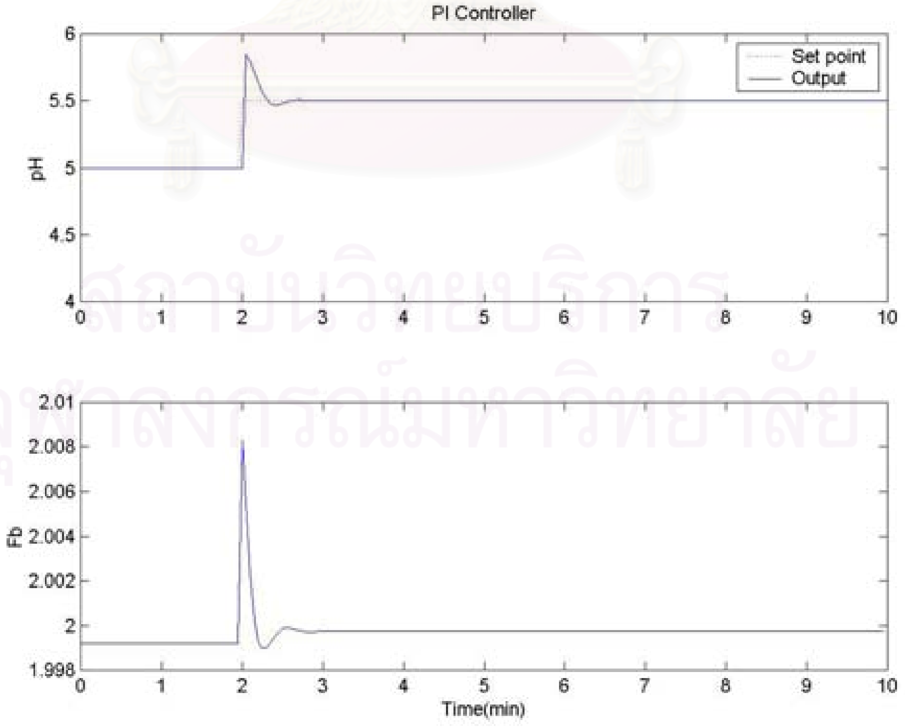


รูปที่ 6.8 ผลการควบคุมของตัวควบคุมพีไอเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 5 เป็น 4.5

การทดสอบกรณีที่มีการเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 5 เป็น 5.5 แสดงดังรูปที่ 6.9 และ 6.10 ได้ค่า IAE ของตัวควบคุมฟัซซีเท่ากับ 0.0533 ของตัวควบคุมพีไอเท่ากับ 0.0851



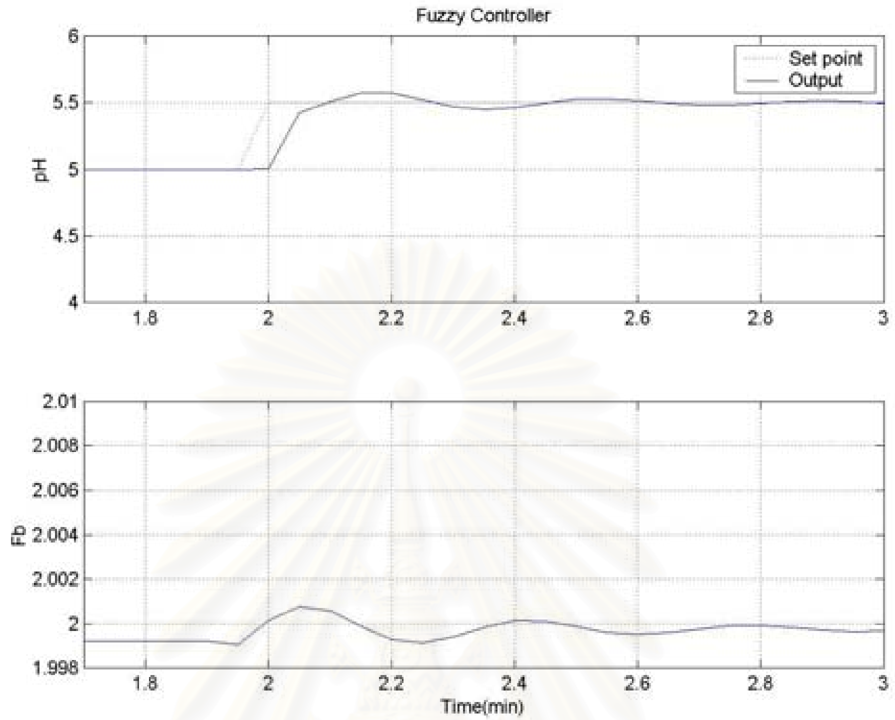
รูปที่ 6.9 ผลการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 5 เป็น 5.5



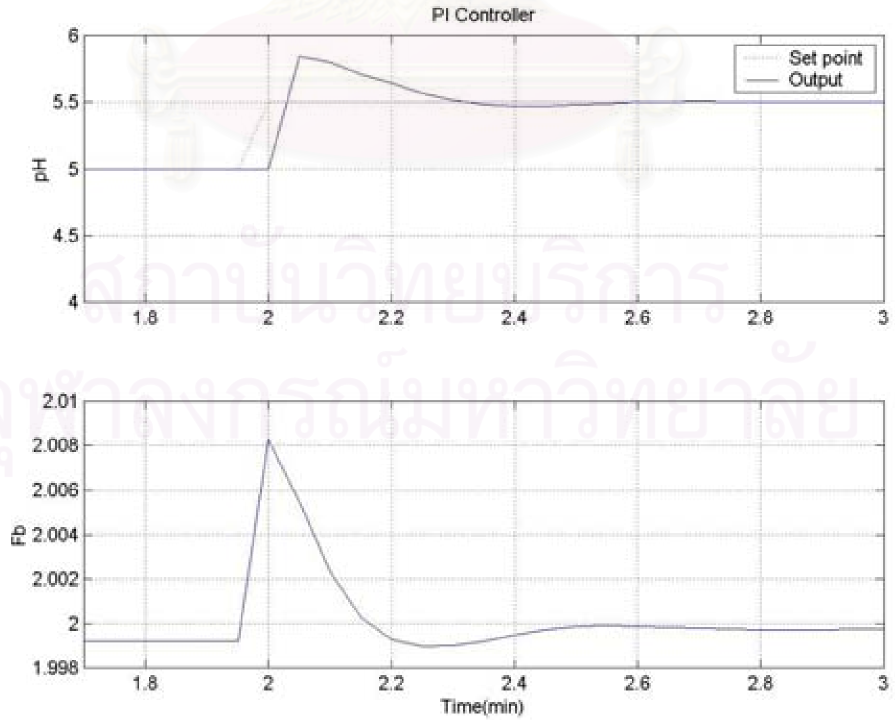
รูปที่ 6.10 ผลการควบคุมของตัวควบคุมพีไอเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 5 เป็น 5.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทำการขยายภาพเพื่อให้เห็นพฤติกรรมของระบบชัดเจนขึ้น แสดงดังรูปที่ 6.11 และ6.12



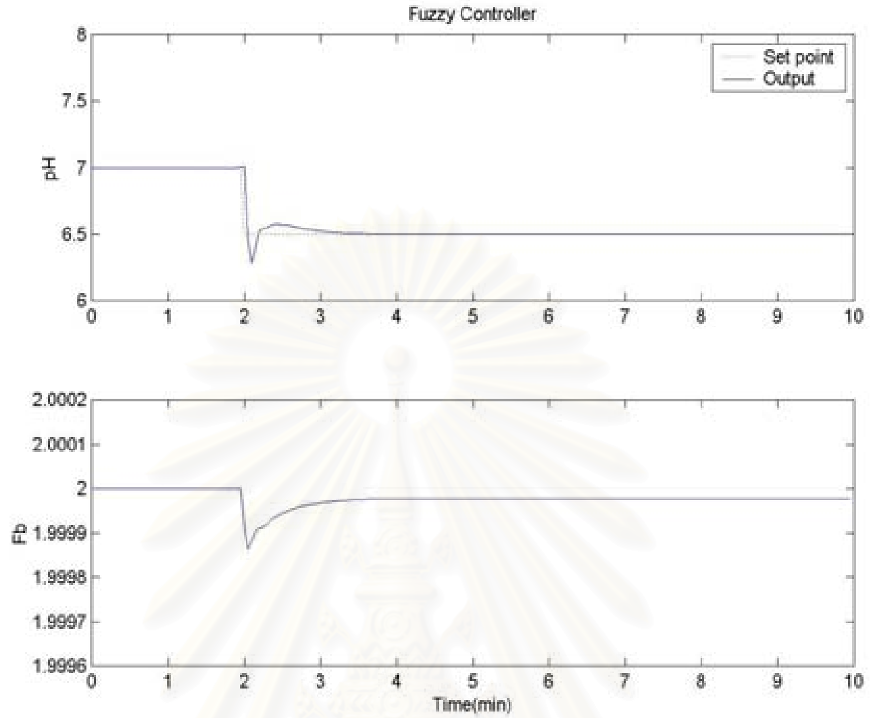
รูปที่ 6.11 ภาพขยายของรูปที่ 6.9



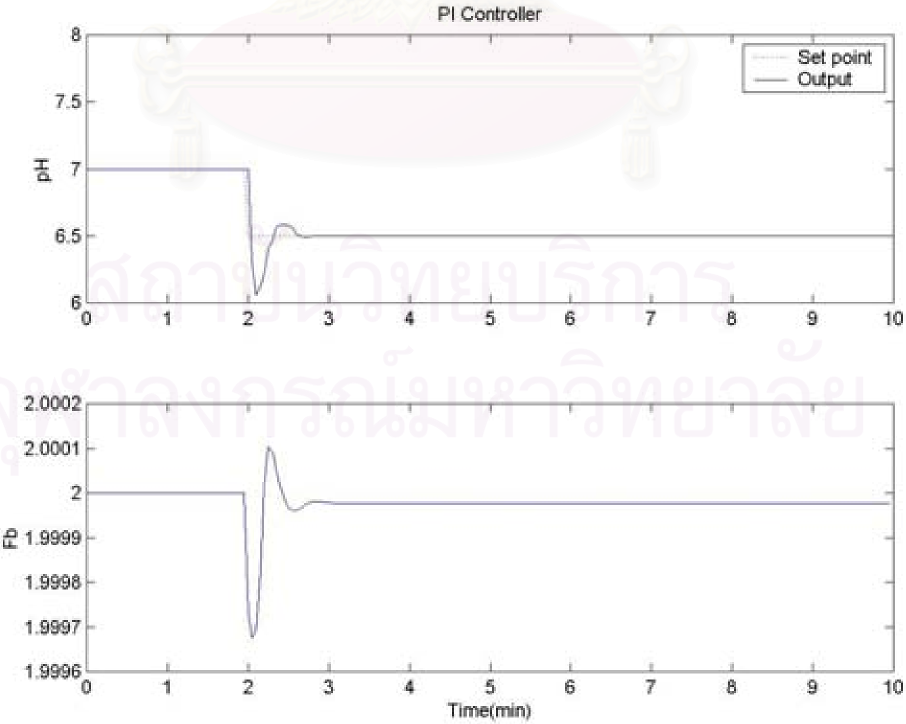
รูปที่ 6.12 ภาพขยายของรูปที่ 6.10

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดสอบกรณีที่มีการเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 7 เป็น 6.5 แสดงดังรูปที่ 6.13 และ 6.14 ได้ค่า IAE ของตัวควบคุมฟัซซีเท่ากับ 0.0886 ของตัวควบคุมพีไอเท่ากับ 0.1154



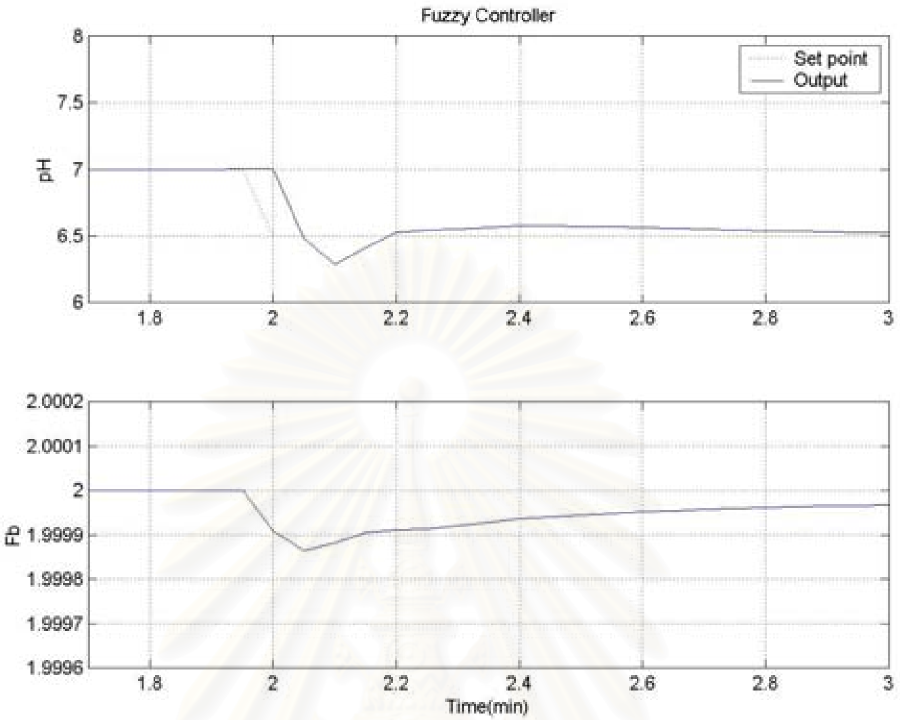
รูปที่ 6.13 ผลการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 7 เป็น 6.5



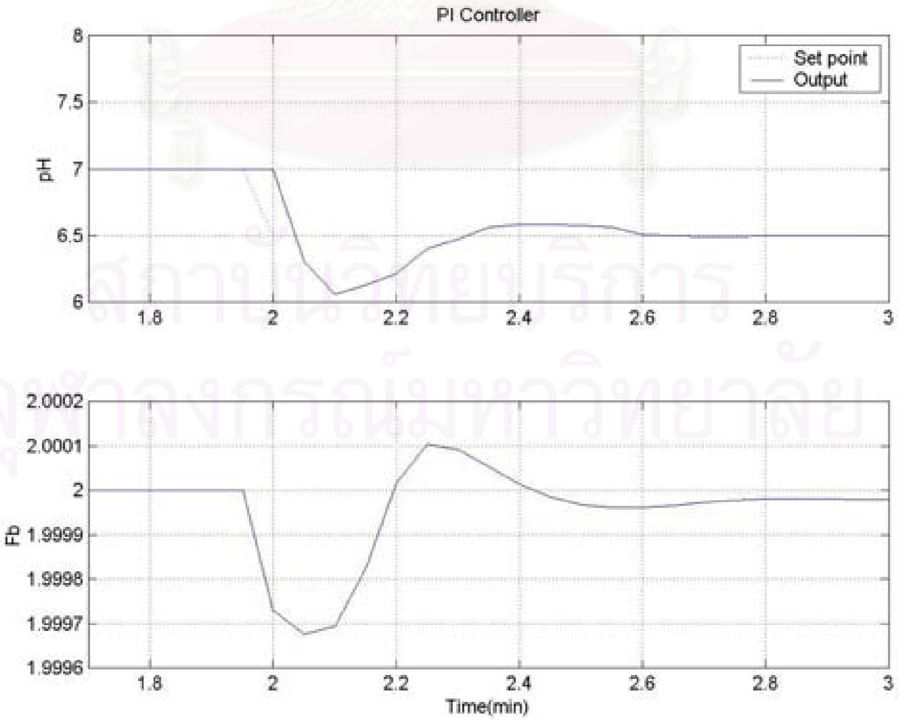
รูปที่ 6.14 ผลการควบคุมของตัวควบคุมพีไอเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 7 เป็น 6.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทำการขยายภาพเพื่อให้เห็นพฤติกรรมของระบบชัดเจนขึ้น แสดงดังรูปที่ 6.15 และ6.16

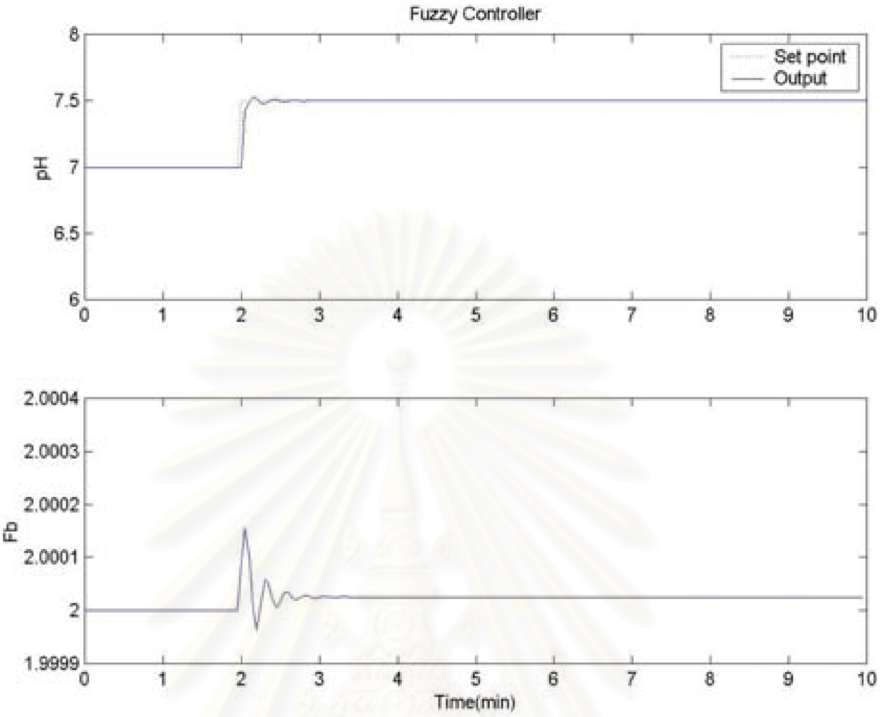


รูปที่ 6.15 ภาพขยายของรูปที่ 6.13

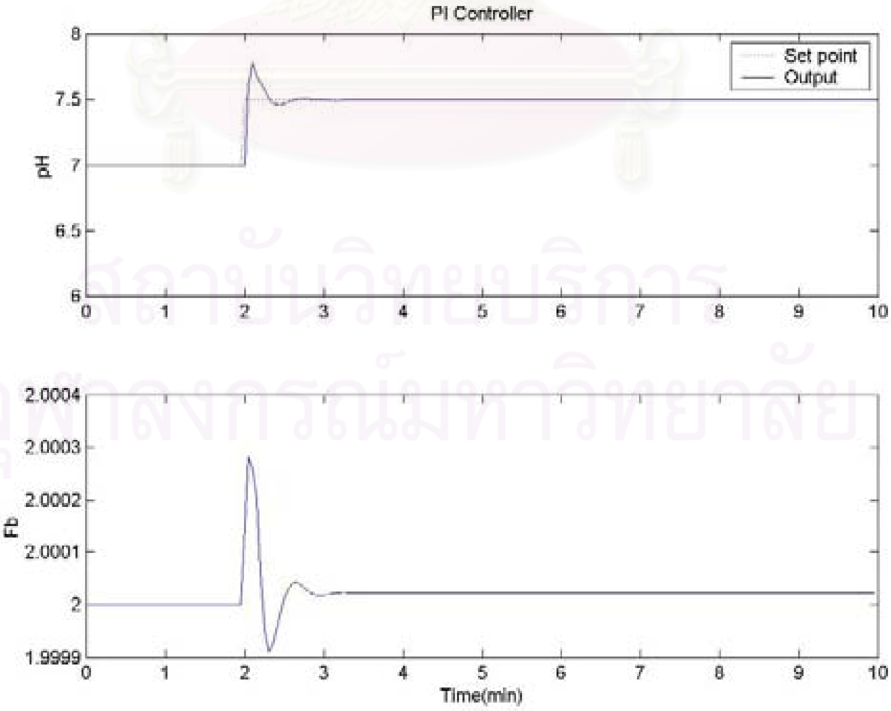


รูปที่ 6.16 ภาพขยายของรูปที่ 6.14

การทดสอบกรณีที่มีการเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 7 เป็น 7.5 แสดงดังรูปที่ 6.17 และ 6.18 ได้ค่า IAE ของตัวควบคุมฟัซซีเท่ากับ 0.0368 ของตัวควบคุมพีไอเท่ากับ 0.0747

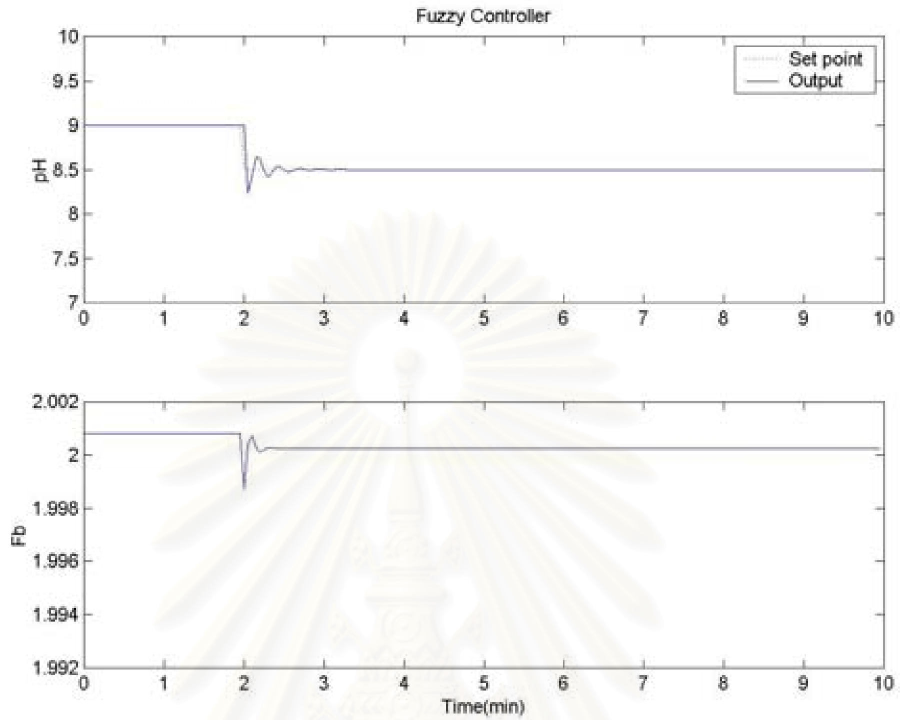


รูปที่ 6.17 ผลการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 7 เป็น 7.5

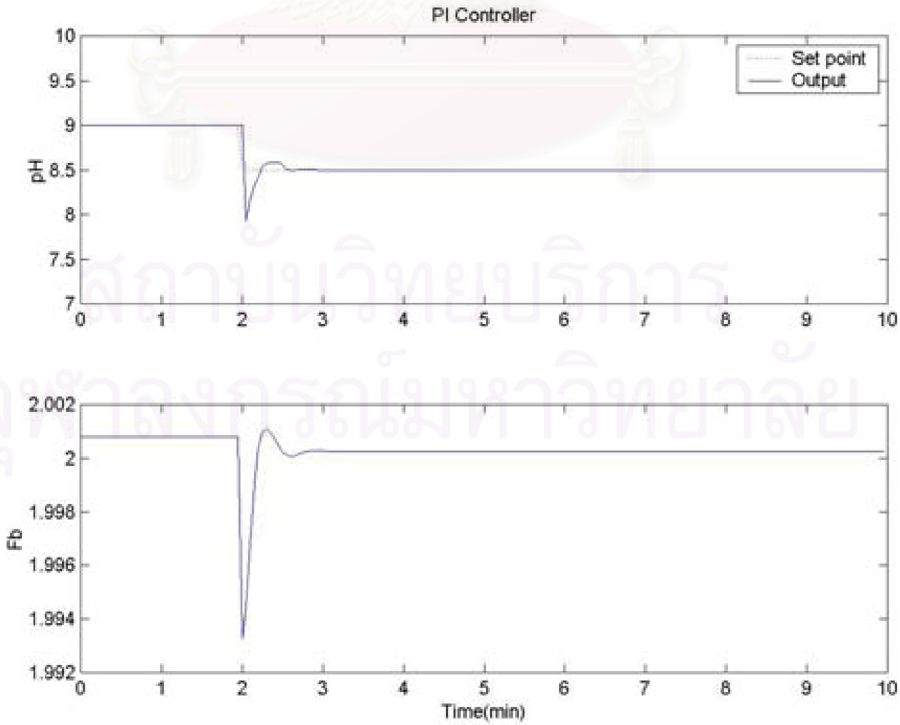


รูปที่ 6.18 ผลการควบคุมของตัวควบคุมพีไอเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 7 เป็น 7.5

การทดสอบกรณีที่มีการเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 9 เป็น 8.5 แสดงดังรูปที่ 6.19 และ 6.20 ได้ค่า IAE ของตัวควบคุมฟัซซีเท่ากับ 0.0686 ของตัวควบคุมพีไอเท่ากับ 0.1034



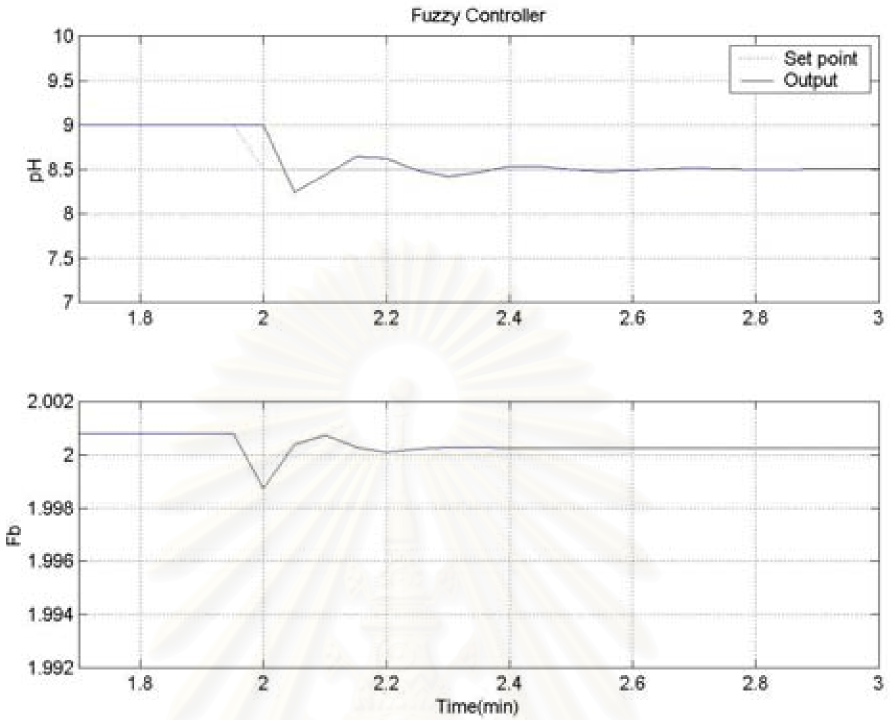
รูปที่ 6.19 ผลการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 9 เป็น 8.5



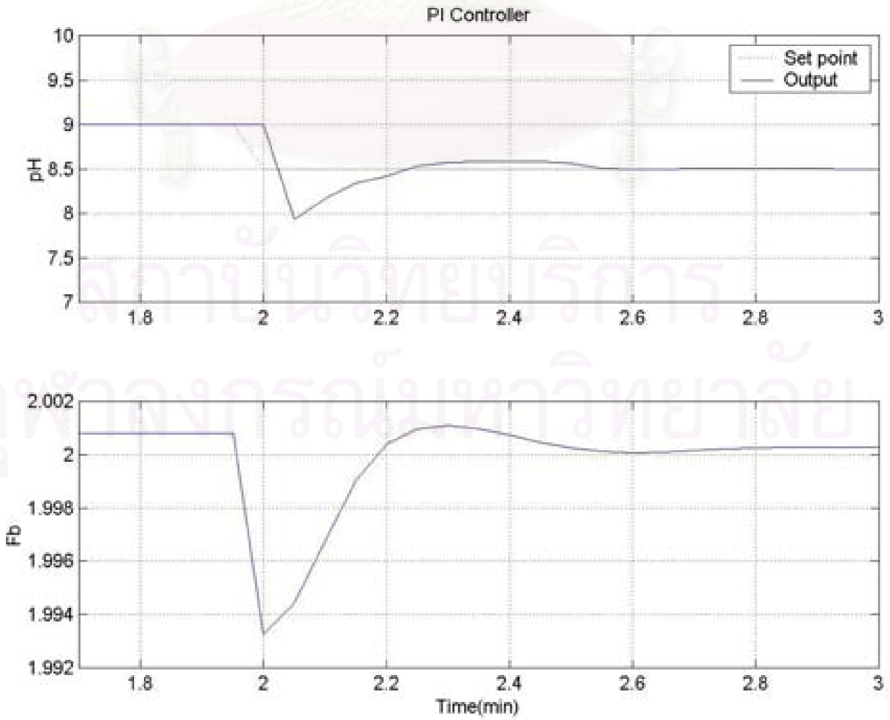
รูปที่ 6.20 ผลการควบคุมของตัวควบคุมพีไอเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 9 เป็น 8.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทำการขยายภาพเพื่อให้เห็นพฤติกรรมของระบบชัดเจนขึ้น แสดงดังรูปที่ 6.21 และ6.22

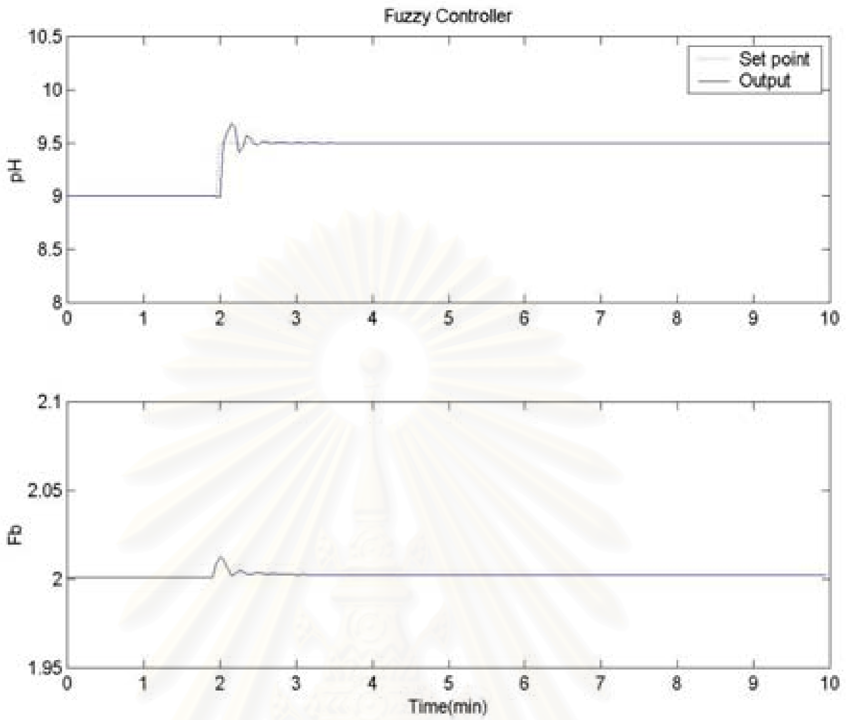


รูปที่ 6.21 ภาพขยายของรูปที่ 6.19

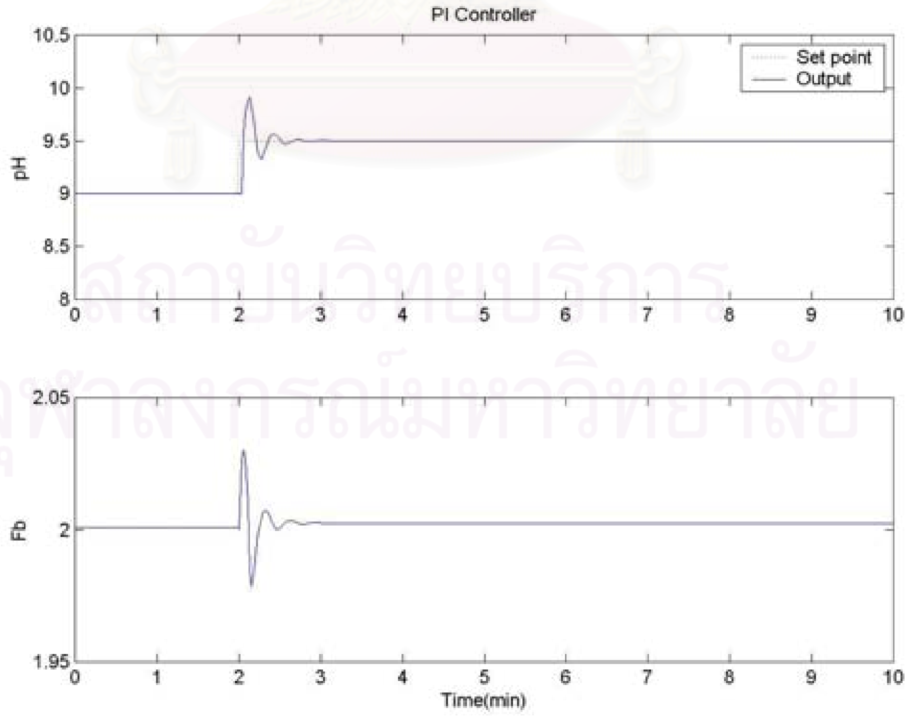


รูปที่ 6.22 ภาพขยายของรูปที่ 6.20

การทดสอบกรณีที่มีการเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 9 เป็น 9.5 แสดงดังรูปที่ 6.23 และ 6.24 ได้ค่า IAE ของตัวควบคุมฟัซซีเท่ากับ 0.0670 ของตัวควบคุมพีไอเท่ากับ 0.0923



รูปที่ 6.23 ผลการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 9 เป็น 9.5



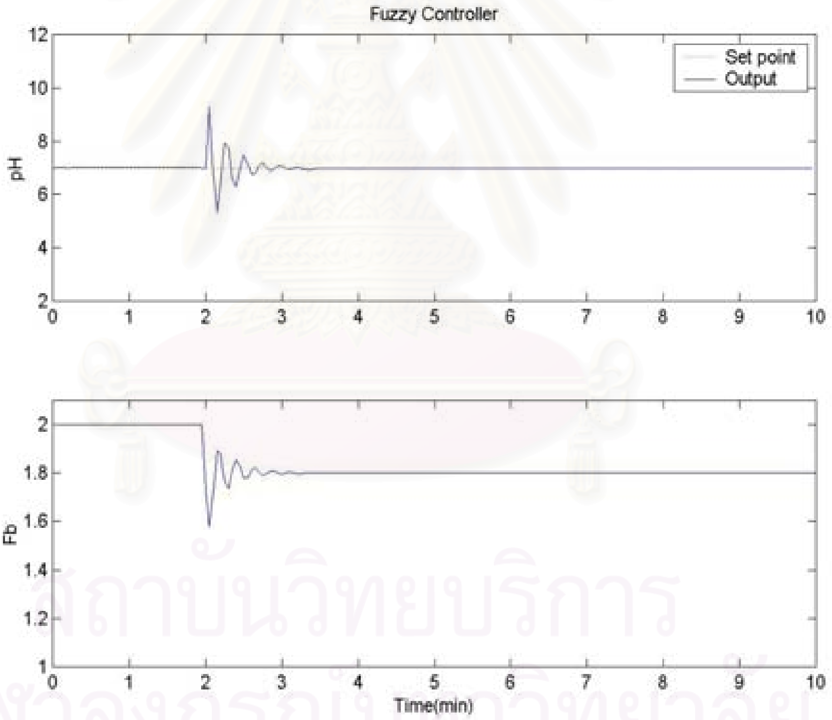
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 6.24 ผลการควบคุมของตัวควบคุมพีไอเมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 9 เป็น 9.5

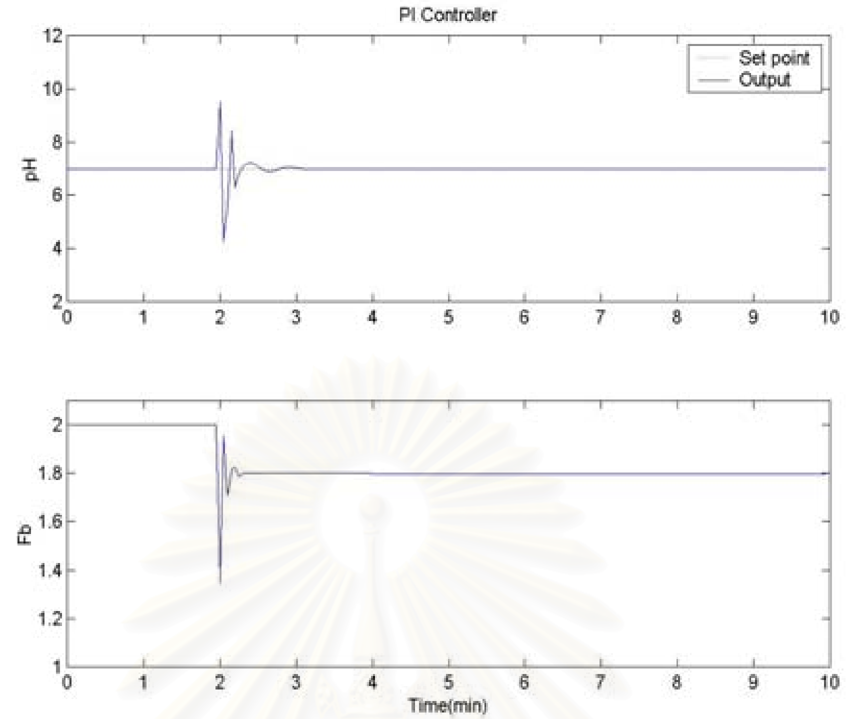
6.3.2 กรณีที่มีการรบกวนระบบ

วัตถุประสงค์ของการทดสอบนี้เพื่อเปรียบเทียบค่าสมรรถนะของการควบคุมกระบวนการเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของตัวรบกวนจากภายนอก เป็นการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของกรดที่เกิดจากการการเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดและ ความเข้มข้นของกรดที่เกิดจากการเตรียมสารละลายผิดพลาดไป $\pm 10\%$

การทดสอบกรณีที่อัตราการไหลของกรดลดลงจาก 2.0 ลิตรต่อนาทีเป็น 1.8 ลิตรต่อนาที (ปริมาณกรดลดลง 10 %) แสดงดังรูปที่ 6.25 และ 6.26 ได้ค่า IAE ของตัวควบคุมฟัซซีเท่ากับ 0.4750 ของตัวควบคุมพีไอเท่ากับ 0.5105

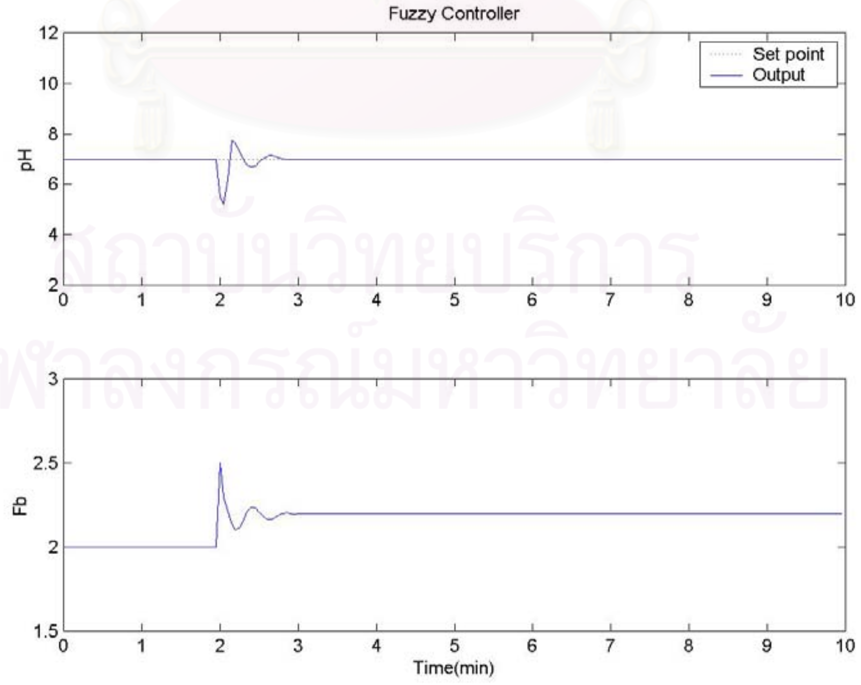


รูปที่ 6.25 ผลการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีเมื่ออัตราการไหลของกรดลดลง 10%

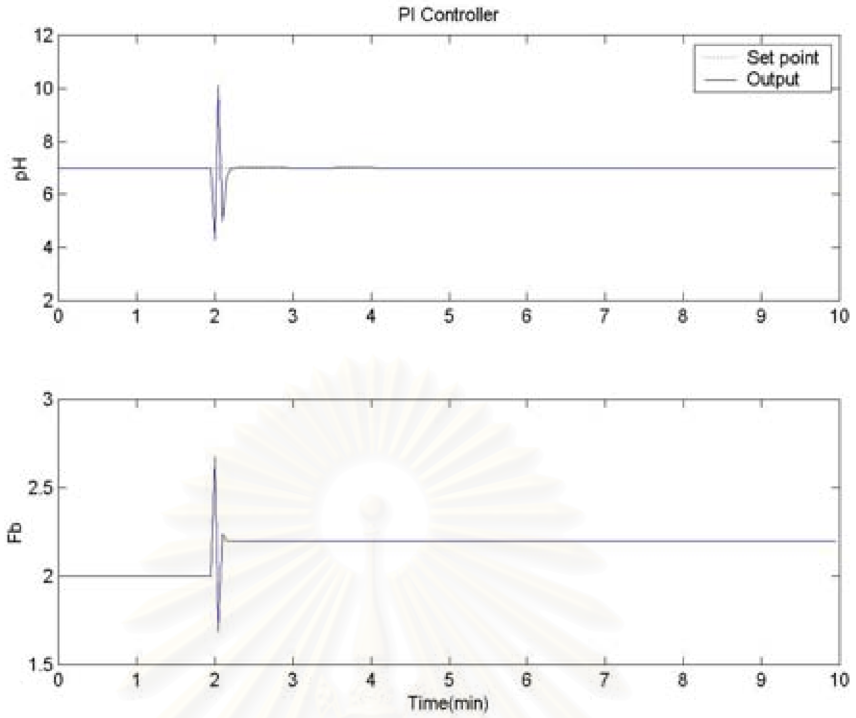


รูปที่ 6.26 ผลการควบคุมของตัวควบคุมพีไอเมื่ออัตราการไหลของกรดลดลง 10%

การทดสอบกรณีที่อัตราการไหลของกรดเพิ่มขึ้นงจาก 2.0 ลิตรต่อนาทีเป็น 2.2 ลิตรต่อนาที (ปริมาณกรดเพิ่มขึ้น 10 %) แสดงดังรูปที่ 6.27 และ 6.28 ได้ค่า IAE ของตัวควบคุมฟัซซีเท่ากับ 0.3580 ของตัวควบคุมพีไอเท่ากับ 0.4133

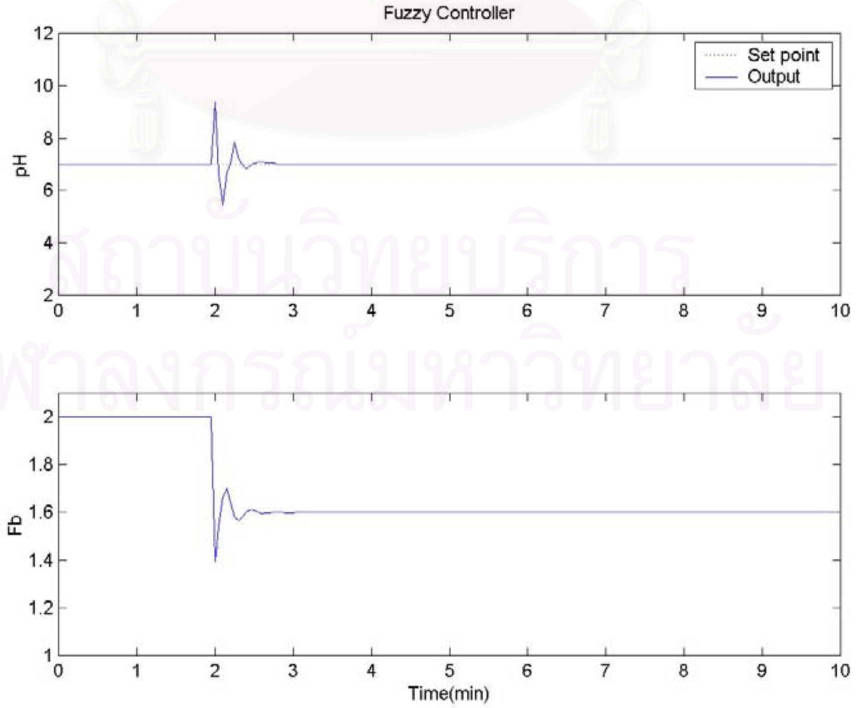


รูปที่ 6.27 ผลการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีเมื่ออัตราการไหลของกรดเพิ่มขึ้น 10%

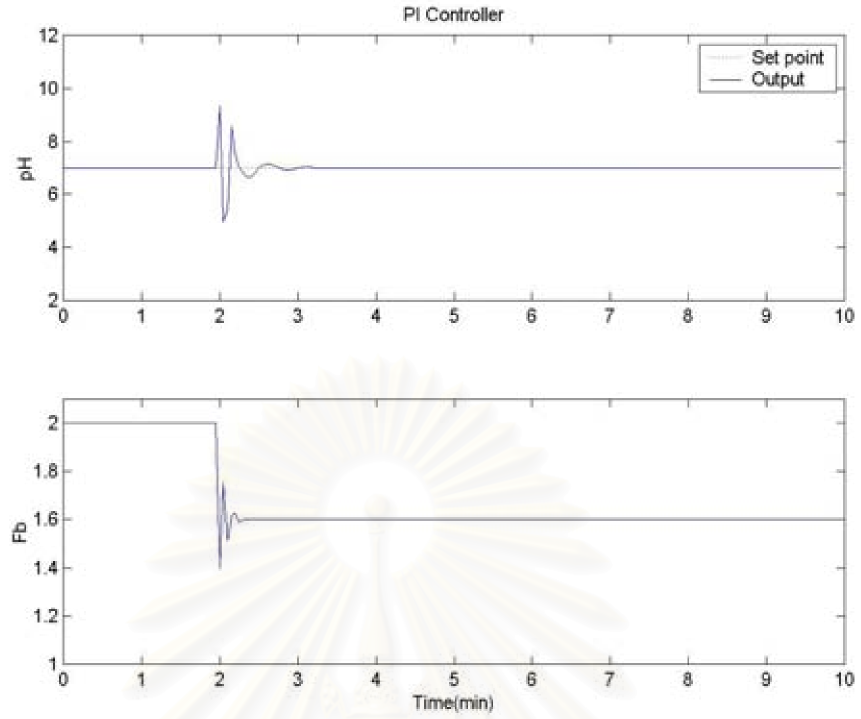


รูปที่ 6.28 ผลการควบคุมของตัวควบคุมพีไอเมื่ออัตราการไหลของกรดเพิ่มขึ้น 10%

การทดสอบกรณีที่ความเข้มข้นของกรดลดลงจาก 0.05 โมลต่อลิตรเป็น 0.04 โมลต่อลิตร (ความเข้มข้นกรดกรดลดลง 10 %) แสดงดังรูปที่ 6.29 และ 6.30 ได้ค่า IAE ของตัวควบคุมฟัซซีเท่ากับ 0.3105 ของตัวควบคุมพีไอเท่ากับ 0.4788

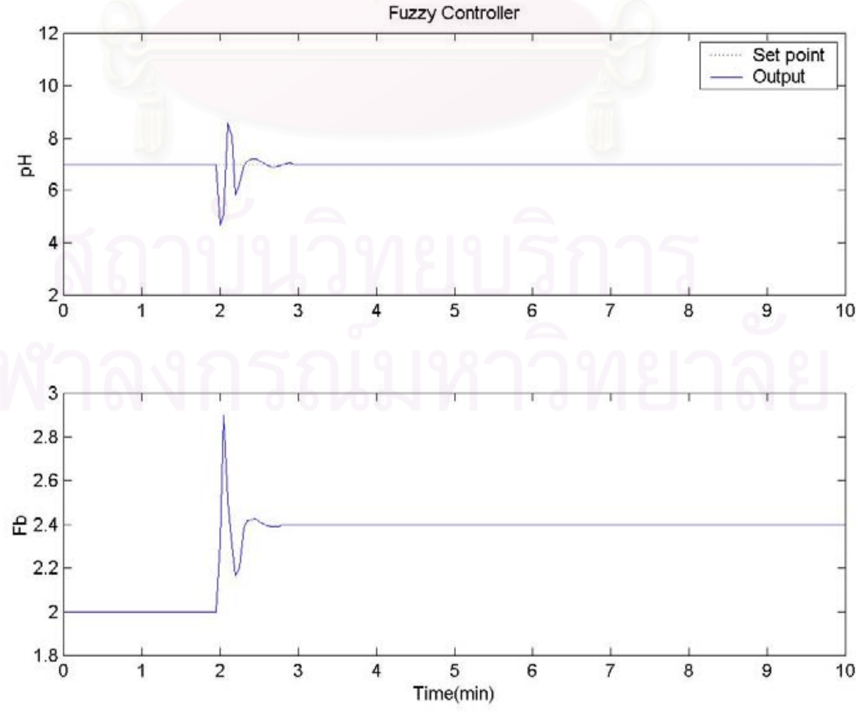


รูปที่ 6.29 ผลการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีเมื่อความเข้มข้นของกรดลดลง 10%

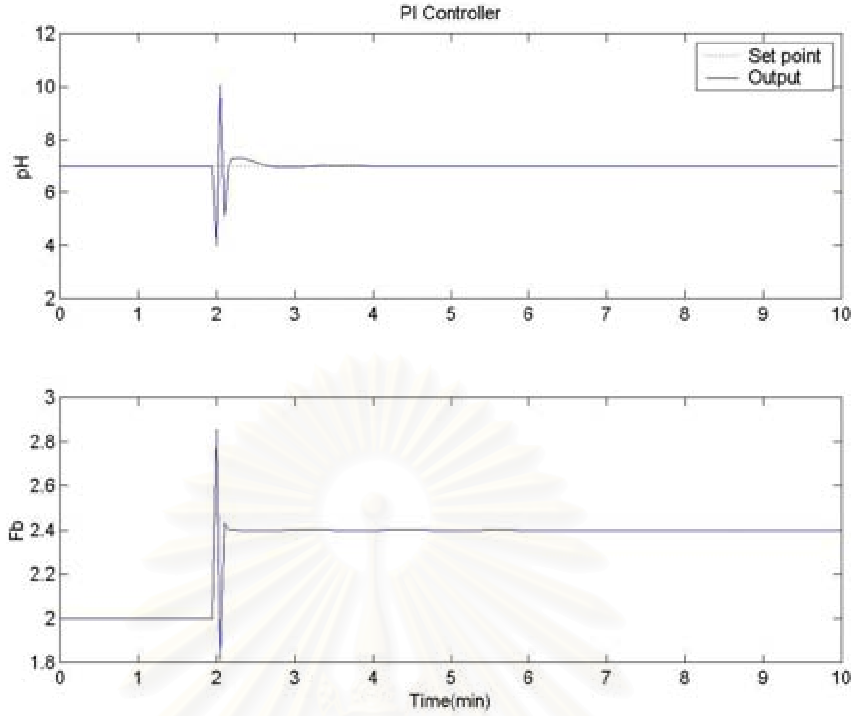


รูปที่ 6.30 ผลการควบคุมของตัวควบคุมพีไอเมื่อความเข้มข้นของกรดลดลง 10%

การทดสอบกรณีที่ความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้นจาก 0.05 โมลต่อลิตรเป็น 0.06 โมลต่อลิตร (ความเข้มข้นกรดกรดเพิ่มขึ้น 10 %) แสดงดังรูปที่ 6.31 และ 6.32 ได้ค่า IAE ของตัวควบคุมฟัซซีเท่ากับ 0.4984 ของตัวควบคุมพีไอเท่ากับ 0.5259



รูปที่ 6.31 ผลการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีเมื่อความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้น 10%

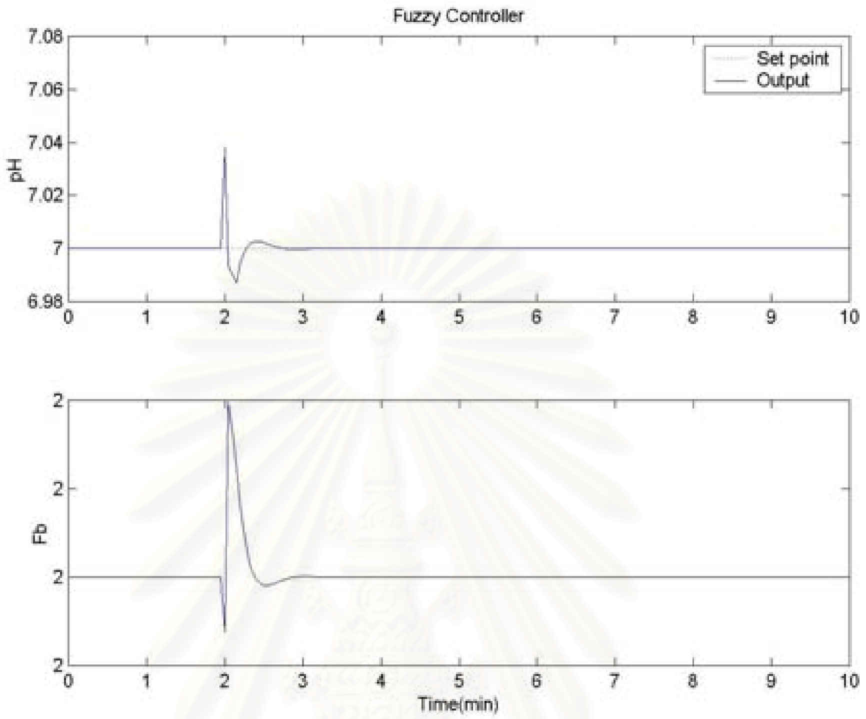


รูปที่ 6.32 ผลการควบคุมของตัวควบคุมพีไอเมื่อความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้น 10%

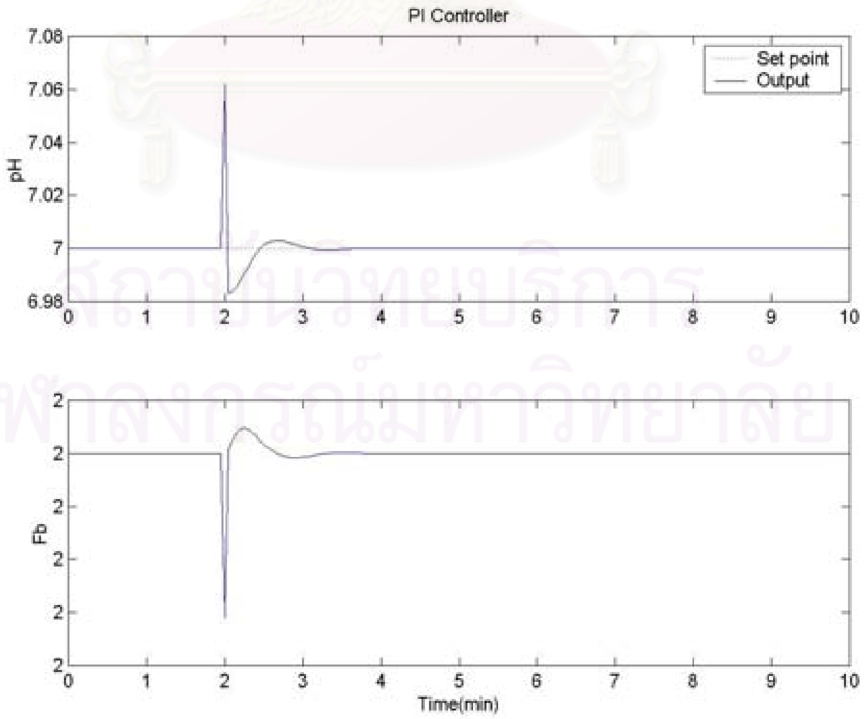
6.3.3 กรณีที่ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการผิดพลาด

วัตถุประสงค์ของการทดสอบนี้เพื่อศึกษาถึงความทนทานของตัวควบคุมฟัซซีเมื่อค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการผิดพลาด พารามิเตอร์ที่ผิดพลาดคือ ค่าคงที่ของสมดุลไอออนในน้ำ (Kw) ซึ่งจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ โดยจะมีค่าเท่ากับ 1×10^{-14} ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส งานวิจัยนี้จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์จากอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็น 30 และ 40 องศาเซลเซียส ค่าพารามิเตอร์ 1.33×10^{-14} และ 2.95×10^{-14} ตามลำดับ c]tทำการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของกรด $\pm$ 10% ที่ค่าพารามิเตอร์อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ค่าพารามิเตอร์ 1.33×10^{-14}

การทดสอบกรณีที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 30 องศาเซลเซียส ค่าพารามิเตอร์ 1.33×10^{-14} แสดงดังรูปที่ 6.33 และ 6.34 ได้ค่า IAE ของตัวควบคุมฟัซซีเท่ากับ 0.0045 ของตัวควบคุมพีไอเท่ากับ 0.0086

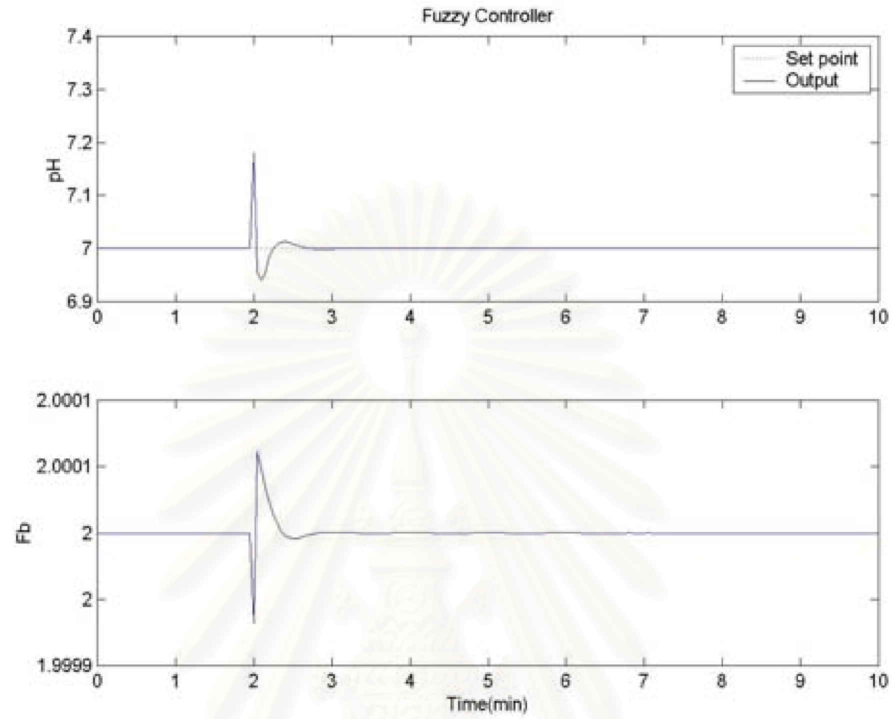


รูปที่ 6.33 ผลการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่อุณหภูมิ 30 ^{O}C

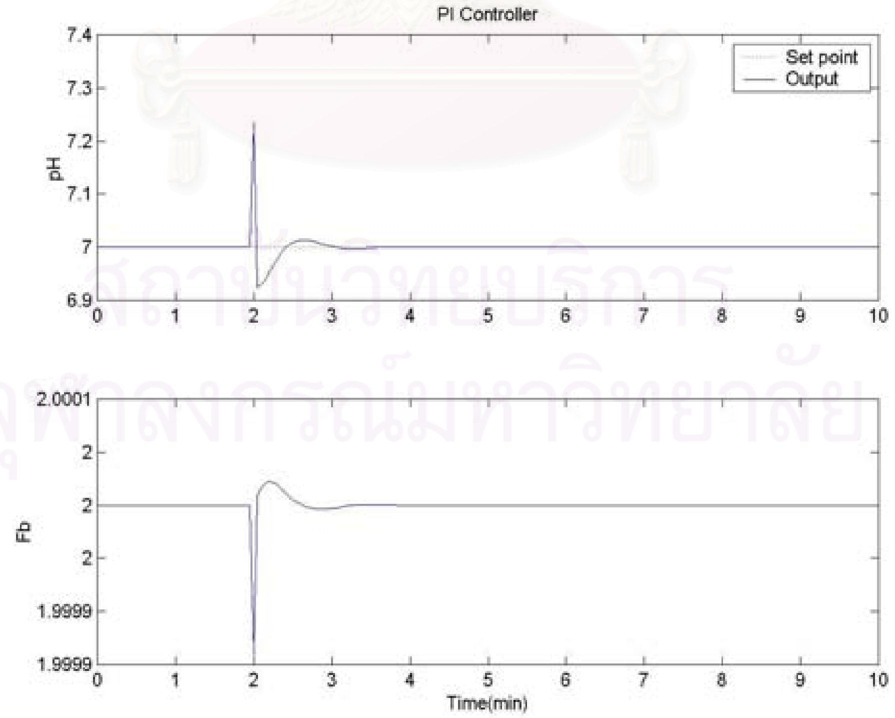


รูปที่ 6.34 ผลการควบคุมของตัวควบคุมพีไอเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่อุณหภูมิ 30 ^{O}C

การทดสอบกรณีที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 40 องศาเซลเซียส ค่าพารามิเตอร์ 2.95×10^{-14} แสดงดังรูปที่ 6.35 และ 6.36 ได้ค่า IAE ของตัวควบคุมฟัซซีเท่ากับ 0.0209 ของตัวควบคุมพีไอเท่ากับ 0.0344



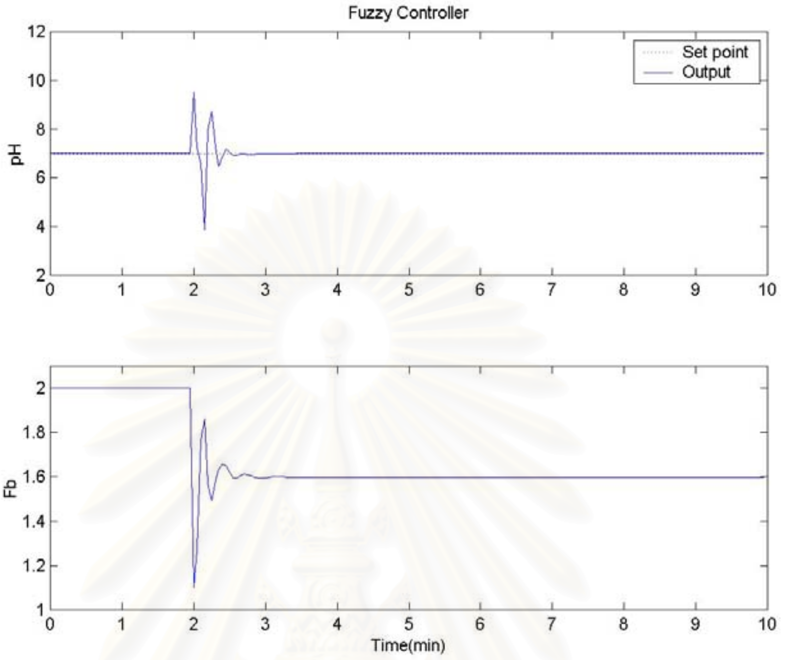
รูปที่ 6.35 ผลการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่อุณหภูมิ 40 ^{O}C



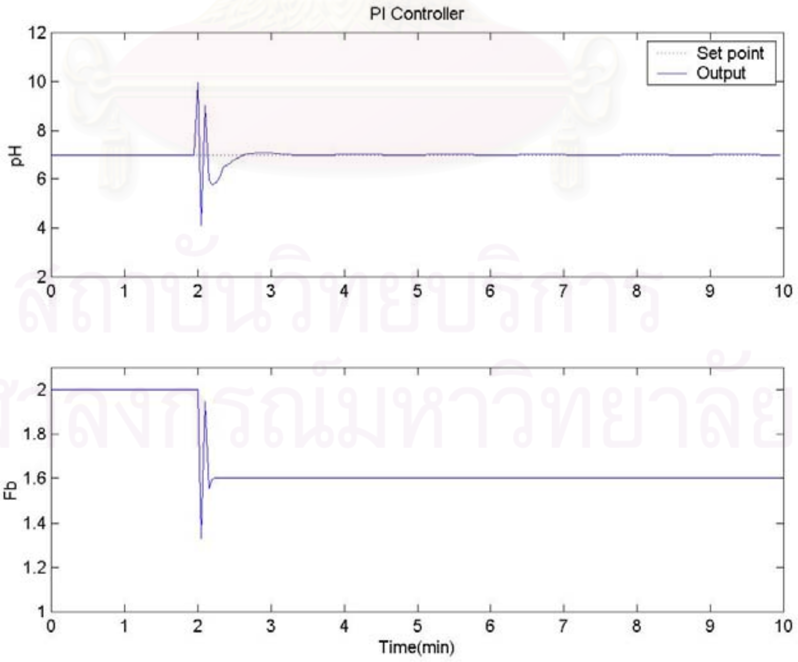
รูปที่ 6.36 ผลการควบคุมของตัวควบคุมพีไอเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่อุณหภูมิ 40 ^{O}C

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดสอบกรณีที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 30 องศาเซลเซียส ค่าพารามิเตอร์ 1.33×10^{-14} และความเข้มข้นของกรดลดลง 10% แสดงดังรูปที่ 6.37 และ 6.38 ได้ค่า IAE ของตัวควบคุมฟัซซีเท่ากับ 0.5305 ของตัวควบคุมพีไอเท่ากับ 0.7338

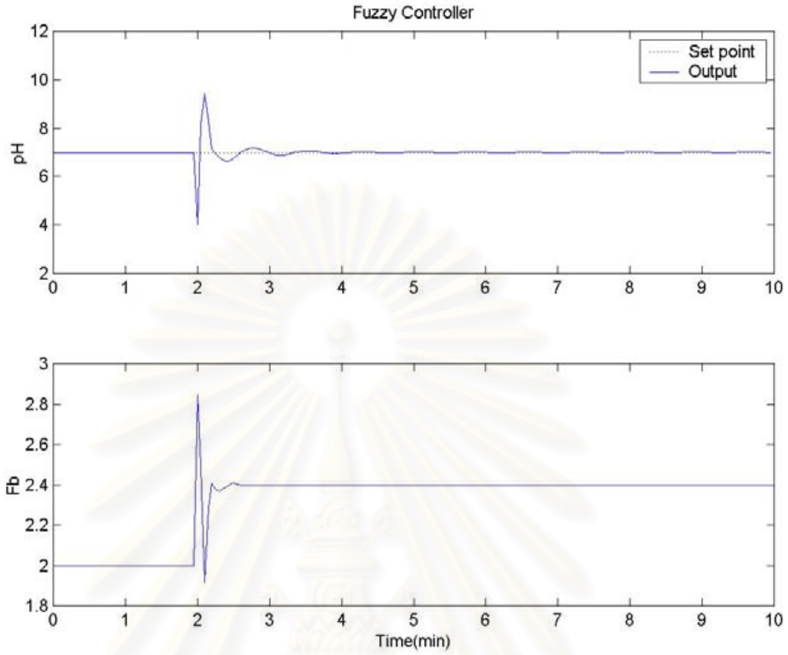


รูปที่ 6.37 ผลการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่อุณหภูมิ 30 ^{O}C และความเข้มข้นของกรดลดลง 10%

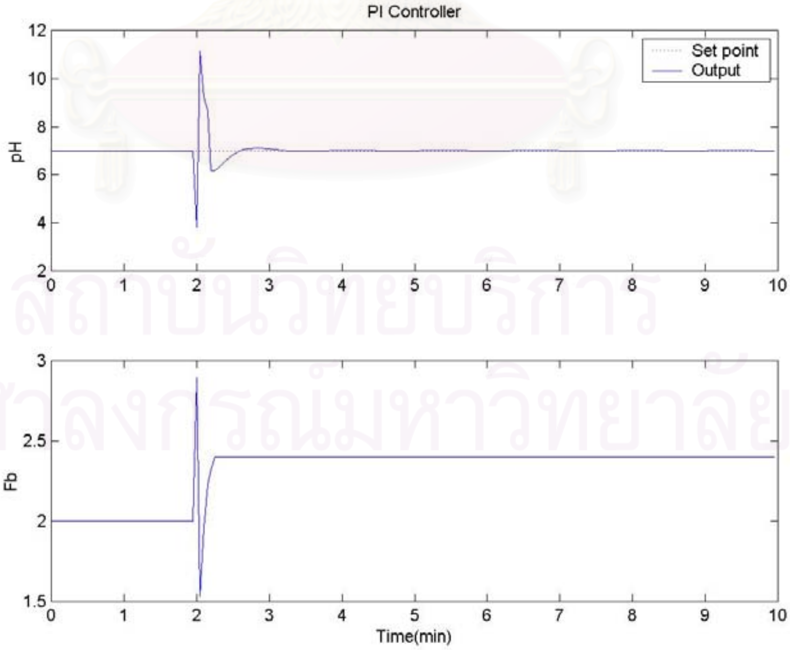


รูปที่ 6.38 ผลการควบคุมของตัวควบคุมพีไอเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่อุณหภูมิ 30 ^{O}C และความเข้มข้นของกรดลดลง 10%

การทดสอบกรณีที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 30 องศาเซลเซียส ค่าพารามิเตอร์ 1.33×10^{-14} และความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้น 10% แสดงดังรูปที่ 6.39 และ 6.40 ค่า IAE ของตัวควบคุมฟัซซีเท่ากับ 0.5918 ของตัวควบคุมพีไอเท่ากับ 0.7209



รูปที่ 6.39 ผลการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่อุณหภูมิ 30 ^{O}C และความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้น 10%



รูปที่ 6.40 ผลการควบคุมของตัวควบคุมพีไอเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่อุณหภูมิ 30 ^{O}C และความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้น 10%

6.4 การวิเคราะห์ผลการออกแบบและทดสอบตัวควบคุมฟัซซี

ตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลองในงานวิจัยนี้ ถูกออกแบบในลักษณะของการควบคุมแบบใช้แบบจำลองภายใน ซึ่งแบบจำลองที่อยู่ภายในเป็นแบบจำลองฟัซซีแบบแบ่งย่านการทำงานที่ระบุหาได้จากกรณีศึกษาที่ 2 ในบทที่ 5 และตัวควบคุมฟัซซีได้จากการผกผันแบบจำลองฟัซซีของกระบวนการนี้ โดยอินพุทของตัวควบคุมฟัซซีคือ ความแตกต่างระหว่างค่า พีเอชอ้างอิงกับค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง ส่วนเอาท์พุทที่ได้จากตัวควบคุมฟัซซี คือค่าอัตราการไหลของด่าง การทดสอบตัวควบคุมฟัซซีทำโดยการเปรียบเทียบค่า IAE กับตัวควบคุมพีไอแบบกำหนดเกนต่างๆ กัน โดยทำการศึกษาผลการตอบสนองของกระบวนการต่อการที่มี ตัวแปรรบกวน การเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย และเมื่อพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการผิดพลาดไปจากเดิม สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

1. การทดสอบกรณีที่มีการเปลี่ยนค่าเป้าหมายแบบ Hussain ตัวควบคุมทั้ง 3 ชนิด คือตัวควบคุมฟัซซีแบบแบ่งย่าน ตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุม AFLC สามารถควบคุมค่าพีเอชให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายใหม่ได้ โดยที่ผลการตอบสนองของตัวควบคุมฟัซซีมีการปรับตัวเพียงเล็กน้อย ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุม AFLC แล้วพบว่าให้ผลไปในแนวทางเดียวกัน สำหรับตัวควบคุมพีไอผลการตอบสนองมีการแกว่งตัวมากในระยะแรก และมีโอเวอร์ชูทมาก ทำให้มีค่า IAE สูงกว่าตัวควบคุมฟัซซี แต่ก็สามารถเข้าสู่เป้าหมายใหม่ได้ในเวลาใกล้เคียงกับตัวควบคุมอื่นๆ

2. การทดสอบกรณีที่เปลี่ยนค่าเป้าหมายจากสภาวะปกติ 3 ค่า คือ 5 7 และ 9 ไป ± 0.5 พบว่าตัวควบคุมฟัซซีให้ค่า IAE น้อยกว่าตัวควบคุมแบบพีไอ โดยที่มีระยะเวลาเข้าสู่ค่าเป้าหมายใหม่ใกล้เคียงกัน แต่ผลการตอบสนองของตัวควบคุมฟัซซีมีโอเวอร์ชูทน้อยกว่า

3. การทดสอบกรณีที่มีการตัวแปรรบกวน คือมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของกรดและความเข้มข้นของกรดไป $\pm 10\%$ พบว่าตัวควบคุมฟัซซีและตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมค่าพีเอชให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ในเวลาที่ใกล้เคียงกัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของกรดและความเข้มข้นของกรด ทั้งนี้ตัวควบคุมฟัซซีให้ผลการตอบสนองที่นุ่มนวลเกิดโอเวอร์ชูทน้อยกว่าและให้ค่า IAE ที่น้อยกว่าตัวควบคุมพีไอ

4. ผลการทดสอบความทนทานเมื่อค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการผิดพลาด โดยการเพิ่มอุณหภูมิเพื่อให้ค่าคงที่ของสมดุลไอออนในน้ำเปลี่ยนแปลงไป พบว่าตัวควบคุม

ฟัซซียังสามารถควบคุมระบบได้ และยังให้ค่า IAE น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอ และเมื่อมีการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของกรดร่วมกับการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ พบว่า ตัวควบคุมสามารถควบคุมค่าพีเอชได้เช่นเดียวกัน

5. ผลการการทดสอบตัวควบคุมฟัซซีเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอในทั้ง 3 กรณี พบว่าตัวควบคุมฟัซซีให้สมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ เมื่อพิจารณาจากค่า IAE และผลการตอบสนองที่ให้โอเวอร์ชูทน้อยกว่า ถึงแม้ว่าระยะเวลาในการปรับตัวของผลการตอบสนองจะใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากในการเปลี่ยนย่านการทำงานของตัวควบคุมพีไอสมการค่าเกนของตัวควบคุมมีการเปลี่ยนไปในทันทีทำให้ผลการตอบสนองที่ได้ไม่นุ่นนวล ดังนั้นหากมีการประยุกต์ใช้ฟัซซีลอจิกในการเชื่อมจุดต่อของย่านการทำงาน ประสิทธิภาพของตัวควบคุมพีไออาจดีขึ้น

6. งานวิจัยนี้ได้ออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลองแบบแบ่งย่านการทำงานโดยใช้ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทของกระบวนการ ซึ่งผลการตอบสนองที่ได้ใกล้เคียงกับตัวควบคุม AFLC ของ Hussain ที่มีการปรับเปลี่ยนแฟกเตอร์การสเกลของเอาท์พุทของตัวควบคุมเมื่อมีการเปลี่ยนย่านการทำงานเช่นเดียวกัน แต่ข้อเสียของตัวควบคุม AFLC คือฟังก์ชันสมาชิกและแฟกเตอร์การสเกลถูกกำหนดจากประสบการณ์ของผู้ออกแบบ ดังนั้นถ้าไม่มีผู้เชี่ยวชาญหรือประสบการณ์มาก่อนจะไม่สามารถทำตามวิธีการนี้ได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7

สรุปผลงานวิจัย

เนื้อหาในบทนี้เป็นการสรุปผลงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วยสรุปผลการสร้างแบบจำลองฟัซซี การทดสอบแบบจำลองฟัซซีที่ระบุได้ในแต่ละกรณีศึกษา การสร้างตัวควบคุมฟัซซี และการทดสอบตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลองแบบแบ่งย่านการทำงาน โดยเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอแบบกำหนดเกนต่างๆ กัน และตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับตัวได้ที่ออกแบบโดย Hussain สุดท้ายเป็นการกล่าวถึงข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลงานวิจัย

7.1.1 การสร้างแบบจำลองฟัซซี

งานวิจัยนี้ได้ทำการระบุหาแบบจำลองฟัซซีของระบบพีเอช ซึ่งมีคุณลักษณ์ไม่เชิงเส้นที่มีค่าเกนเปลี่ยนไปตามย่านปฏิบัติการ การระบุหาโครงสร้างของแบบจำลองกระทำโดยการหาโครงสร้างอินพุท-เอาท์พุทของแบบจำลองที่เหมาะสม จากนั้นแบ่งย่านของกระบวนการ โดยวิธีการแบ่งย่านแบ่งออกเป็น 2 กรณีศึกษาคือ การสังเกตความไม่เป็นเชิงเส้นของกระบวนการ และการใช้อัลกอริธึมของฟัซซีคลัสเตอริง จากนั้นทำการสุ่มเพื่อเก็บข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทของกระบวนการในแต่ละย่าน แล้วใช้วิธีการคลัสเตอริงร่วมกับเทคนิคลีสท์สแควร์เพื่อระบุหาแบบจำลองฟัซซี และทำการทดสอบความสามารถในการทำนายค่าของแบบจำลองที่ได้จากการแบ่งย่านทั้ง 2 กรณี สามารถสรุปได้ดังนี้

1. โครงสร้างของข้อมูลอินพุทเอาท์พุทที่เหมาะสมของแบบจำลองฟัซซีในงานวิจัยนี้ คือ โครงสร้างที่ประกอบด้วย ข้อมูลอินพุท ได้แก่ค่าอัตราการไหลของด่างที่เวลาย้อนหลังหนึ่งค่า และค่าพีเอชของระบบที่เวลาย้อนหลังหนึ่งค่า สำหรับข้อมูลเอาท์พุทได้แก่ ค่าพีเอชของระบบที่เวลาปัจจุบัน

2. การศึกษาลักษณะการแบ่งย่านของข้อมูลที่มีผลต่อโครงสร้างและความถูกต้องของแบบจำลองฟัซซี พบว่าการแบ่งย่านโดยใช้อัลกอริธึมของฟัซซีคลัสเตอริง ได้แบบจำลองที่ถูกต้องมากกว่าการแบ่งย่านโดยการสังเกตความไม่เป็นเชิงเส้นของข้อมูลอินพุทและเอาท์พุท เนื่องจาก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เป็นช่วงย่านที่สอดคล้องกับความไม่เป็นเชิงเส้นของค่าเกนของกระบวนการ ดังนั้นการพิจารณาแบ่งย่านข้อมูลควรคำนึงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของค่าเกนมากกว่าความไม่เป็นเชิงเส้นของอินพุท-เอาท์พุทของกระบวนการ

7.1.2 การควบคุมด้วยตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลอง

ตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลองในงานวิจัยนี้ ถูกออกแบบในลักษณะของการควบคุมแบบใช้แบบจำลองภายใน ซึ่งแบบจำลองที่อยู่ภายในเป็นแบบจำลองฟัซซีแบบแบ่งย่านการทำงานที่ระบุหาได้จากกรณีศึกษาที่ 2 และตัวควบคุมฟัซซีได้จากการผกผันแบบจำลองฟัซซีของกระบวนการนี้ ดังนั้นผลการตอบสนองของการควบคุมคือการรวมกันของผลการตอบสนองในแต่ละย่านการทำงาน การทดสอบตัวควบคุมฟัซซีทำโดยการเปรียบเทียบค่า IAE กับตัวควบคุมพีไอแบบกำหนดเกนต่างๆ กัน ที่มีค่าเกนเป็นสมการเส้นตรงที่ได้จะการประมาณกราฟค่าเกนของกระบวนการ และเปรียบเทียบแนวโน้มของกราฟกับตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับตัวได้ที่ออกแบบโดย Hussain การทดสอบจะทำการศึกษาผลการตอบสนองของกระบวนการที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย การมีตัวแปรรบกวน และเมื่อพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการผิดพลาดไปจากเดิม สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การทดสอบแนวโน้มของผลการตอบสนองเมื่อมีการเปลี่ยนค่าเป้าหมายแบบ Hussain พบว่าแนวโน้มของกราฟของตัวควบคุมทั้ง 3 ชนิด เป็นไปในแนวทางเดียวกัน แต่ตัวควบคุมพีไอมีโอเวอร์ชูทสูงกว่า

2. การทดสอบตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลองภายในแบบแบ่งย่านการทำงานต่อการเปลี่ยนค่าเป้าหมาย จากสภาวะปกติ 3 ค่า คือ 5 7 และ 9 ไป ± 0.5 และเมื่อมีตัวแปรรบกวนคือมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของกรดและความเข้มข้นของกรดไป $\pm$10% เปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอพบว่าตัวควบคุมฟัซซีให้ค่า IAE น้อยกว่าตัวควบคุมแบบพีไอ โดยที่มีระยะเวลาเข้าสู่ค่าเป้าหมายใหม่ใกล้เคียงกัน แต่ผลการตอบสนองของตัวควบคุมฟัซซีมีโอเวอร์ชูทน้อยกว่าค่า IAE แสดงผลดังตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 ผลการควบคุมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย

สภาวะที่ทดสอบ	IAE	
	ตัวควบคุมฟัซซี	ตัวควบคุมพีไอ
ค่าเป้าหมายเปลี่ยนตาม Hussain	0.9493	1.5381
ค่าเป้าหมายเปลี่ยนจาก 5 เป็น 4.5	0.0516	0.1069
ค่าเป้าหมายเปลี่ยนจาก 5 เป็น 5.5	0.0533	0.0850
ค่าเป้าหมายเปลี่ยนจาก 7 เป็น 6.5	0.0886	0.1154
ค่าเป้าหมายเปลี่ยนจาก 7 เป็น 7.5	0.0368	0.0747
ค่าเป้าหมายเปลี่ยนจาก 9 เป็น 8.5	0.0686	0.1034
ค่าเป้าหมายเปลี่ยนจาก 9 เป็น 9.5	0.0670	0.0923
อัตราการไหลของกรดลดลง 10%	0.4750	0.5105
อัตราการไหลของกรดเพิ่มขึ้น 10%	0.3580	0.4133
ความเข้มข้นของกรดลดลง 10%	0.3105	0.4788
ความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้น 10%	0.4984	0.5259

3. การทดสอบความทนทานของตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลองภายในแบบแบ่งย่านการทำงานเมื่อค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการผิดพลาด โดยการเพิ่มอุณหภูมิเพื่อให้ค่าคงที่ของสมดุลไอออนในน้ำเปลี่ยนแปลงไป พบวาตัวควบคุมฟัซซียังสามารถควบคุมระบบได้ และยังให้ค่า IAE น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอ ค่า IAE แสดงผลดังตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 ผลการควบคุมเมื่อค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองของกระบวนการผิดพลาด

	IAE	
	ตัวควบคุมฟัซซี	ตัวควบคุมพีไอ
อุณหภูมิ 30 ^{O}C พารามิเตอร์ 1.33×10^{-14}	0.0045	0.0086
อุณหภูมิ 40 ^{O}C พารามิเตอร์ 2.95×10^{-14}	0.0209	0.0344
อุณหภูมิ 30 ^{O}C พารามิเตอร์ 1.33×10^{-14} และค่าความเข้มข้นของกรดลดลง 10%	0.5305	0.7338
อุณหภูมิ 30 ^{O}C พารามิเตอร์ 1.33×10^{-14} และค่าความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้น 10%	0.5918	0.7209

4. การทดสอบสามารถสรุปได้ว่าตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลองภายในแบบแบ่งย่านการทำงานมีสมรรถนะการควบคุมที่ดี สามารถควบคุมค่าพีเอชให้เป็นไปตามเป้าหมายได้ในเวลารวดเร็ว อีกทั้งยังมีความทนทานต่อความผิดพลาดของพารามิเตอร์ อีกทั้งมีการปรับของตัวแปรปรับน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอ อีกทั้งยังออกแบบได้ง่ายโดยอาศัยข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทของกระบวนการ ไม่จำเป็นต้องอาศัยประสบการณ์ผู้เชี่ยวชาญ

7.2 ข้อเสนอแนะ

1. ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทของกระบวนการที่นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองฟัซซีมีความสำคัญอย่างมาก ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการระบุหาและทำนายค่าของแบบจำลองฟัซซี ดังนั้นจึงควรเลือกข้อมูลที่ครอบคลุมการเปลี่ยนแปลงบริเวณที่ต้องการระบุหาแบบจำลอง

2. การระบุหาแบบจำลองฟัซซีควรมีการประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ด้วยตัวเอง เพื่อปรับค่าฟังก์ชันสมาชิกและค่าพารามิเตอร์ของกฎ เพื่อความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น

3. แนวทางการพัฒนาขั้นต่อไปของการระบุหาแบบจำลองฟัซซี ควรมีการรวมฟังก์ชันสมาชิกของแต่ละย่านเข้าด้วยกัน และมีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลสรุปเพื่อลดจำนวนกฎและช่วยลดเวลาในการประมวลผล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ทัศนีย์ วัฒนเชาวน์พิสุทธิ์. การพัฒนาตัวควบคุมกระบวนการฟัซซีแบบฐานแบบจำลองสำหรับเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบถังกวนต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

นฤพนธ์ มัญมณี. ตัวควบคุมกระบวนการแบบฟัซซีลอจิก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

รุ่งจิตร์ กาญจนวัฒน์. การพัฒนาแบบจำลองฟัซซีของกระบวนการโดยวิธีคลัสเตอริงและการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีลอจิก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

วิศณีย์ ตั้งยืนยง. การสร้างแบบจำลองฟัซซีและการออกแบบตัวควบคุมของตัวย่อยเยื่อกระดาษ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.

ภาษาอังกฤษ

Babuska, R. Fuzzy Modeling: A Control Engineering Perspective. Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Fuzzy System Vol.4 (1995): 1897-1902.

Babuska, R.; Roubos, J. A.; Verburuggen, H. B. Identification of MIMO Systems by Input-output TS Fuzzy Models. The 1998 IEEE International Conference on Fuzzy Systems Proceeding Vol.1 (1998): 657-662.

Babuska, R.; Verbruggen, H. B. An Overview of Fuzzy Modeling for Control. Control Eng. Practice Vol.4, No.11 (1996): 1593-1606.

Hanakama, Y.; Irizuki, Y.; Adachai, M.; and Nakanishi, E. Design of a Selfiuning Fuzzy Control System and the Application to the Distillation Column. Internationall Chemical Engineering Vol.34, No.1 (1994): 91-96.

Hussain, M. A.; Elkanzi, E. M.; Sang, C. H.; and Nie, C. J. Adaptive Fuzzy Logic for pH Control. Regional Symposium on Chemical Engineering Vol.2 (November 1999): B22-1 – B22-5.

Kang, H. J.; Son, H.; Hwon, C.; and Park, M. A New Approch to Adaptive Fuzzy Control. IEEE World Congress on Computational Intelligence Fuzzy Systems proceeding Vol.1 (1998): 264-267.

Kelkar, B.; Postlethwaite, B. Fuzzy-Model Based pH Control. IEEE World Congress on Computational Fuzzy Systems Vol.1 (1994): 661-666.

Khemliche, M.; Mokeddem, D.; Khellaf, A. Design of a Fuzzy Controller of pH by the Genetic Algorithms. IEEE Vol.2 (2002): 912-916.

Kim, E.; Park, M.; Ji, S.; Park, M. A New approach to Fuzzy Modeling. IEEE Trans. on Fuzzy Systems Vol.5, No.3 (Aug 1997): 328-337.

Klier, G. J., and Yuan, B. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic Theory and Applications. USA., Prentic-Hall International. Inc, 1995.

Lakshmi, N. R.; Krishnaswamy, P. R.; Rangaiah, G. P. An Adaptive Internal Model Control Strategy for pH Neutralization. Chemical Engineering Science Vol.3, No.18 (1997): 3067-3074.

Lai, R.; Li, T.; Chiang, D. Application of Constraint-Based Fuzzy Logic Controller for pH Control of a Flue Gas Desulfurization System. IEEE International Fuzzy Systems Conference Vol.2 (2001): 630-633.

Mamdani, E. H., Applications of fuzzy algorithms for control of a simple dynamic plant. Proc. IEE Vol.121, No.12 (1974): 1585-1588.

Nomura, H.; Hayashi, I.; Wakami, N. A Learning Method of Fuzzy Inference Rules by Descent Method. IEEE International Fuzzy Systems Conference (Mar 1992): 203-210.

Ogunnaike, B. A., Ray W. H., Process Dynamics, Modeling, and Control. Oxford University Press. Inc, 1994.

Postlethwaite B. A Model-Based Fuzzy Controller. Trans IChemE Vol.72 (Jan 1994): Part A.

Qin, S. J.; Borders, G. A Multiregion Fuzzy Logic Controller for Nonlinear Process Control. IEEE Transactions on Fuzzy Systems Vol.2, No.1 (1994): 74-81.

Rojas, I.; Pomares, H.; Pelayo, F.J.; Anguita, M.; Ros, E.; and Prieto, A. New Methodology for the Development of Adaptive and Self-Learning Fuzzy Controllers in Real Time. International Journal of Approximate Reasoning Vol.21 (1999): 109-136.

Shah, I.; Rajamani, K. Self-Organizing Controller for Process pH Control. Control 90 Miner Metal Process Minerals & Metallurgical Processing (1990): 45-52.

Sing, C. H.; Postlethwaite, B. PH Control: Handling Nonlinearity and Deadtime with Relational Model-Based Control. IEE Proc. Control Theory Application Vol.144, No.3 (1997): 263-268.

Sousa, J. M.; Babuska, R.; Verbruggen, H. B. International Model Control with a Fuzzy Model: Application to an Air-Conditioning System. FUZ-IEEE (1997): 207-212.

Takagi, T.; Sugeno, M. Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control. IEEE Trans. on Syst. Man. and Cybern. Vol. SMC-15, No.1 (1995): 116-132.

Tsay, D. L.; Chung, H. Y.; Lee C. J. The Adaptive Control of Nonlinear Systems Using the Sugeno-Type of Fuzzy Logic. IEEE Transactions on Fuzzy Systems Vol.7, No.2 (1999): 225-229.

Walter, H. B.; Robert, J. M.; Sam, S. S. Design of a Self-Tuning Rule Base Controller for a Gasoline Refinery Catalytic Reformer. IEEE Trans. On Automatic Control Vol.35 (1990): 156-164.

Zhao, J.; Wertz, V.; Gorez, R. A Fuzzy Clustering Method for the Identification of Fuzzy Models for Dynamic Systems. IEEE International Symposium on Intelligent Control (Aug 1994): 172 – 177.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

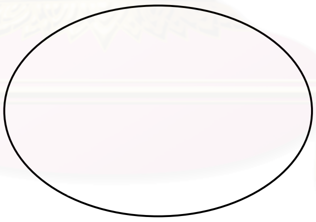
ภาคผนวก

ทฤษฎีตรรกศาสตร์ฟัซซี

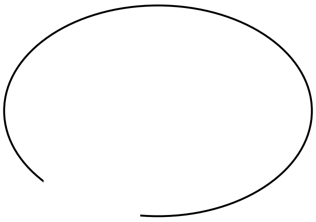
โดยหลักของตรรกศาสตร์ฟัซซีแล้ว ก็คือการแปลงสัญญาณจากขอบเขตสัญญาณขาเข้าไปยังขอบเขตสัญญาณขาออกโดยมีกลไกในการทำ คือการใช้ประโยคเงื่อนไข (If-then) ซึ่งจะเรียกว่ากฎ และในแต่ละกฎจะประมวลโดยไม่ขึ้นแก่กัน ดังนั้นลำดับของกฎจึงไม่มีความสำคัญ

1. **เซตฟัซซี** (Fuzzy set)

ตรรกศาสตร์ฟัซซี ฟัซซีเกิดขึ้นจากหลักการของเซตฟัซซี ซึ่งเป็นเซตที่มีขอบเขตไม่ชัดเจนของสมาชิกบางตัวซึ่งไม่สามารถบอกได้ว่าอยู่ในเซตหรือไม่ แต่จะอยู่ในเซตเพียงบางส่วนหรือที่เรียกว่ามีค่าความเป็นสมาชิก (Degree of membership) เพียงบางส่วน เพื่อให้เกิดความเข้าใจยิ่งขึ้นจะยกตัวอย่างเซตฟัซซี เช่น เซตของวันในแต่ละสัปดาห์ดังรูปที่ 1 เซตนี้เป็นเซตที่มีขอบเขตชัดเจน (Crisp set) กล่าวคือ จะไม่มีสมาชิกตัวใดที่เป็นวันในสัปดาห์และไม่เป็นวันในสัปดาห์พร้อมกัน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

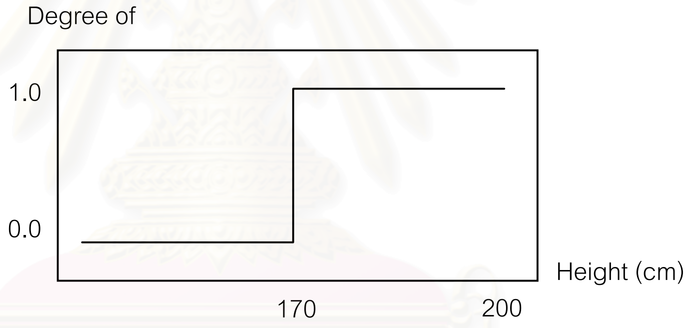


จากสมาชิกกลุ่มเดิมถ้าจะกล่าวถึงเซตของวันหยุดในแต่ละสัปดาห์ดังรูปที่ 2 จะเห็นว่าวันอาทิตย์เป็นวันหยุดในสัปดาห์ แต่วันเสาร์ “ รู้สึก ” ว่าเป็นส่วนหนึ่งของวันหยุดในสัปดาห์ แต่บางทีก็ไม่ใช่เสมอไป ดังนั้นจากรูปที่ 2 วันเสาร์จึงอยู่คร่อมระหว่างกลุ่มวันหยุดในสัปดาห์และไม่ใช่วันหยุดในสัปดาห์

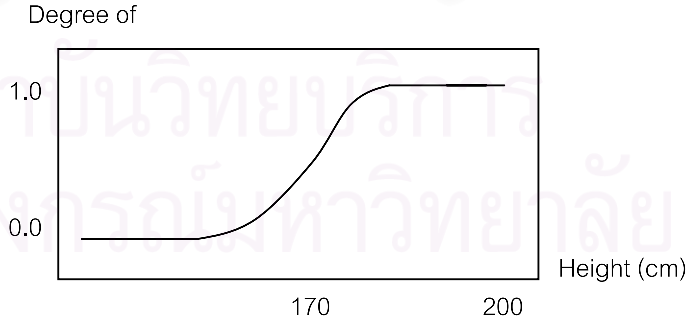
2. **ฟังก์ชันสมาชิก** (Membership function)

ฟังก์ชันสมาชิกเป็นกราฟที่กำหนดการแปลงสัญญาณขาเข้าในแต่ละจุดของขอบเขตสัญญาณขาเข้า (Input space) ไปยังค่าความเป็นสมาชิกที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

พิจารณาความสูงของคน โดยกำหนดให้คนที่มีความสูงจาก 170 ซม. จนถึง 200 ซม. ใช้คำว่า “ สูง ” แทนสมาชิกที่อยู่ในกลุ่มนี้ ถ้ากำหนดให้คนสูงเป็นเซตที่มีขอบเขตที่ชัดเจน สามารถเขียนฟังก์ชันสมาชิกได้ดังรูปที่ 3 (ก) แต่ถ้ากำหนดให้คนสูงเป็นเซตฟัซซีสามารถเขียนฟังก์ชันสมาชิกได้ดังรูปที่ 3 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3 ฟังก์ชันสมาชิกของเซตความสูงของคน

(ก) เซตที่มีการกำหนดขอบเขตที่ชัดเจน

(ข) เซตฟัซซี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

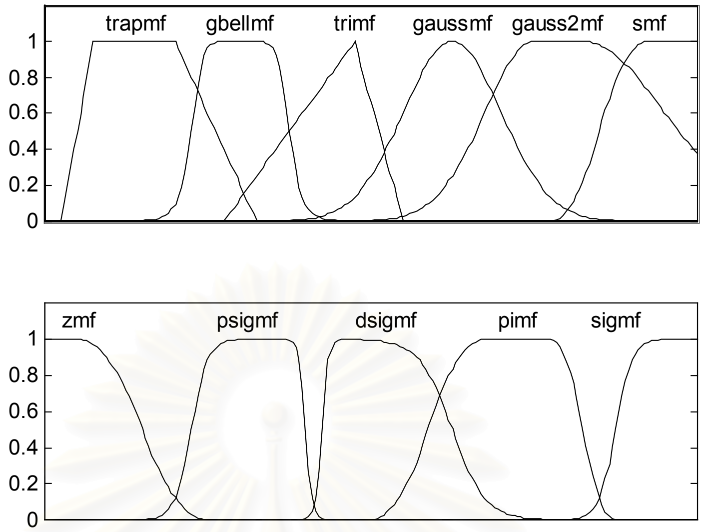
จากรูปที่ 3(ก) ฟังก์ชันสมาชิกแบบที่มีขอบเขตชัดเจน ซึ่งจะเห็นได้ว่าบุคคลหนึ่งจะจัดว่า ” สูง ” ก็ต่อเมื่ออยู่ในช่วงความสูง 170 ซม. จนถึง 200 ซม. เท่านั้น ถ้าหากมีความสูงเพียง 169.5 ซม. ก็จะถูกจัดว่า “ ไม่สูง ” ซึ่งในความเป็นจริงแล้วไม่อาจกล่าวว่า คนหนึ่งสูงแต่อีกคนไม่สูง เพียงแค่ความสูงต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ดังนั้นจึงนิยามความสูงเป็นเซตฟัซซี ดังรูปที่ 3(ข) คือฟังก์ชันสมาชิกเป็นแบบต่อเนื่อง จะเห็นได้ว่าบุคคลหนึ่งจะเป็นสมาชิกทั้งสองกลุ่ม โดยที่มีค่าความเป็นสมาชิกในแต่ละกลุ่มต่างๆกัน คือคนที่สูง 170 ซม. มีค่าความเป็นสมาชิกในกลุ่มคนไม่สูง 0.5 และอยู่ในกลุ่มคนสูง 0.5 หรือ 50% นั่นเอง

ฟังก์ชันสมาชิกมีอยู่ด้วยกัน 11 แบบดังรูปที่ 4

1. Triangular membership function: *trimf*
2. Trapezoidal membership function: *trapmf*
3. Simple gaussian membership function: *gaussmf*
4. Two-sided composite of two different gaussian membership function: *gauss2mf*
5. Generalized bell membership function: *gbellmf*
6. Sigmoidal membership function: *sigmf*
7. Different between two sigmoidal membership function: *dsigmf*
8. Product of two sigmoidal membership function: *psigmf*
9. Z-shaped curve membership function: *zmf*
10. S-shaped curve membership function: *smf*
11. Pi-shaped curve membership function: *pimf*

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4 ลักษณะฟังก์ชันสมาชิก

ฟังก์ชันสมาชิกแบบ Triangle เป็นที่นิยมนำมาใช้ในการคำนวณมากที่สุดเนื่องจากมีความสะดวกในการนิยามมากกว่าแบบอื่นและมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน เพียงแต่ระบุค่า 3 ค่า ค่าแรกเป็นจุดที่ฐานด้านซ้ายมีความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0 ค่าที่สองเป็นจุดสูงสุดของฟังก์ชัน มีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 และค่าที่ 3 เป็นค่าที่อยู่ด้านซ้ายสุดของฟังก์ชัน มีค่าความเป็นสมาชิกเป็น 0 แสดงในรูปแบบของเซตเป็น $A=(a_1,a_M,a_2)$ และสามารถเขียนเป็นฟังก์ชันดังนี้

$$Triangle(x,a,b,c)=\begin{cases} \dfrac{x-a_1}{a_M-a_1} & a_1 \le x \le a_M \\ \dfrac{x-a_2}{a_M-a_2} & a_M \le x \le a_2 \\ 0 & otherwise \end{cases} \qquad (1)$$

โดยจุดสูงสุดของฟังก์ชันเท่ากับ 1 อยู่ที่ $(a_M,1)$ โดยที่ $a_M \in (a_1,a_2)$ โดยถ้า a_M อยู่ที่จุดกึ่งกลางระหว่าง a_1 และ a_2 เราจะเรียกฟังก์ชันความเป็นสมาชิกนั้นๆว่าฟังก์ชันสมาชิกสามเหลี่ยมด้านเท่า (Central fuzzy membership function)

นอกจากนี้ฟังก์ชันสมาชิกแบบ Trapezoid ก็นิยมใช้เช่นกันเนื่องจากมีสูตรที่ค่อนข้างง่ายซึ่งใช้พารามิเตอร์ 4 ตัวในการกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ได้แก่ $\{a,b,c,d\}$ โดยที่ $(a< b\leq c< d)$ ดังสมการ

$$Trapezoid(x;a,b,c,d)=\begin{cases} \dfrac{x-a}{b-a} & a\leq x\leq b \\ 1 & b\leq x\leq c \\ \dfrac{d-x}{d-c} & c\leq x\, d \\ 0 & otherwise \end{cases} \qquad (2)$$

สำหรับบางระบบ บางครั้งการใช้ฟังก์ชัน Triangle และ Trapezoid ทำให้ได้ค่าความเป็นสมาชิกไม่ละเอียดพอเนื่องมาจากค่าที่เปลี่ยนแปลงอย่างไม่สม่ำเสมอในส่วนที่เป็นมุม จึงมีการใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ให้ค่าความเป็นสมาชิกที่สม่ำเสมอมากกว่า โดยเป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้น เช่น Gaussian ซึ่งใช้พารามิเตอร์ 2 ตัว ในการกำหนดฟังก์ชันดังสมการ

$$Gaussian(x;c,\sigma)=\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^{2}\right) \qquad (3)$$

ฟังก์ชัน Bell ใช้พารามิเตอร์ 3 ตัว ในการกำหนดรูปร่างความเป็นสมาชิกดังสมการ

$$Bell(x;a,b,c)=\frac{1}{1+\left|\dfrac{x-c}{a}\right|^{2b}} \qquad (4)$$

นอกจากนี้ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบอื่นๆ ยังถูกออกแบบตามความเหมาะสมและความต้องการใช้งานในระบบต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. **การดำเนินการทางตรรกศาสตร์ฟัซซี** (Fuzzy logic operations)

เพื่อให้สอดคล้องกับการดำเนินการแบบปกติของเซตที่มีขอบเขตชัดเจน การอธิบายจะทำการเปรียบเทียบการดำเนินการทางเซตฟัซซีกับการดำเนินการแบบปกติ เซตฟัซซีก็มีการดำเนินการอินเตอร์เซคชัน (Intersection) ยูเนียน (Union) และ คอมพลีเมนต์ (Complement) เช่นเดียวกันกับเซตที่มีขอบเขตชัดเจน

อินเตอร์เซคชัน(Intersection) ถ้าเปรียบเทียบกับการดำเนินการทางตรรกแล้วเปรียบเสมือน “ และ ” (AND) การนิยามอินเตอร์เซคชันของเซตฟัซซี 2 เซต คือ ค่าที่น้อยที่สุดของทั้ง 2 เซต

A	B	Min (A,B)
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

ยูเนียน (Union) ถ้าเทียบกับการดำเนินการทางตรรกแล้ว เปรียบได้กับ “ หรือ ” (OR) การนิยามยูเนียนของเซตฟัซซี 2 เซต คือค่าที่มากที่สุดของทั้ง 2 เซต

A	B	Max (A,B)
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

คอมพลีเมนต์ (Complement) ถ้าเทียบกับการดำเนินการทางตรรก คอมพลีเมนต์เปรียบได้กับ “ ไม่ ” (NOT) ถ้ากำหนดให้ A คือค่าความเป็นสมาชิกในเซตฟัซซีแล้วจะได้ว่าคอมพลีเมนต์ของ A คือ 1-A

A	1-A
0	1
1	0

4. ระบบการประมาณฟัซซี (Fuzzy Inference Systems)

แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนคือ การฟัซซิฟายสัญญาณขาเข้า การดำเนินการของเซตฟัซซี การตีความหมายกฎ การรวมส่วนผลของแต่ละกฎเข้าด้วยกัน และการดีฟัซซิฟาย ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 1 การฟัซซิฟิเคชัน (Fuzzification)

ขั้นตอนนี้เป็นการแปลงค่าสัญญาณขาเข้าให้อยู่ในรูปเซตฟัซซี โดยรับสัญญาณเข้าที่เป็นค่าที่อยู่ในเซตที่มีขอบเขตชัดเจน แล้วทำการหาค่าความเป็นสมาชิกของแต่ละเซตฟัซซี โดยใช้ฟังก์ชันสมาชิกในการแปลงค่าที่อยู่ในเซตที่มีขอบเขตชัดเจนไปยังเซตฟัซซี สัญญาณขาเข้าจะเป็นค่าที่มีขอบเขตและสัญญาณขาออกของขั้นตอนนี้เป็นค่าความเป็นสมาชิก มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 สังเกตได้ว่าในขั้นตอนนี้เป็นเพียงการแทนค่าฟังก์ชันเท่านั้นเอง

ขั้นตอนที่ 2 การดำเนินการของเซตฟัซซี (Apply fuzzy operators)

ในขั้นตอนแรกได้ทำการฟัซซิฟิเคชันทำให้ทราบค่าความเป็นสมาชิกของแต่ละประพจน์ฟัซซีในส่วนเงื่อนไข ถ้าส่วนเงื่อนไขของกฎที่กำหนดมีประพจน์ฟัซซีมากกว่าหนึ่งประพจน์จะต้องมีการดำเนินการทางเซตของแต่ละประพจน์ สัญญาณขาเข้าของขั้นตอนนี้เป็นค่าความเป็นสมาชิกที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 ส่วนสัญญาณขาออกเป็นค่าคงที่

จากที่กล่าวในหัวข้อการดำเนินการทางตรรกศาสตร์ฟัซซีนั้น ได้กล่าวถึงวิธีการที่จะใช้กับตัวดำเนินการ “ และ ” กับตัวดำเนินการ “ หรือ ” ซึ่งก็คือ Max และ Min ตามลำดับ แต่สำหรับขั้นตอนนี้ถ้ามีประพจน์ฟัซซี 2 พจน์ขึ้นไป จะใช้ตัวดำเนินการเป็น Max คือการเลือกค่าสูงสุดระหว่างค่าความเป็นสมาชิกของทุกประพจน์

ขั้นตอนที่ 3 การตีความหมายกฎ (Apply implication method)

สัญญาณขาเข้าในส่วนของการตีความหมายกฎเป็นค่าคงที่ที่ได้จากส่วนเงื่อนไขของกฎในขั้นตอนที่ 2 ส่วนสัญญาณขาออกเป็นเซตฟัซซี วิธีการตีความหมายปกติที่ใช้กันคือการใช้ตัวดำเนินการ Min แต่ถ้ากฎถ้า-แล้วเป็นแบบ Takagi-Sugeno สัญญาณขาออกของขั้นตอนนี้จะเป็นค่าคงที่ ที่ได้จากสมการเชิงเส้นในส่วนผลสรุปและจะไม่มีขั้นตอนที่ 4 และ 5 เนื่องจากมีการวิธีการหาเอาท์พุทของแบบจำลองแบบ Takagi-Sugenoโดยเฉพาะ

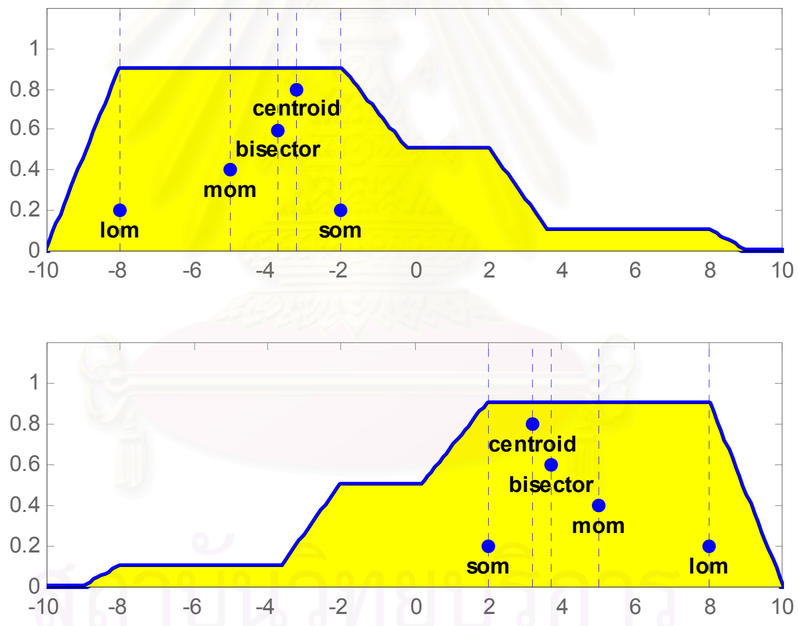
ขั้นตอนที่ 4 การรวมส่วนผลของกฎ (Aggregate all outputs)

จากผลการตีความหมายของกฎจะได้เซตฟัซซีของแต่ละกฎ นำมารวมกันให้เป็นเซตฟัซซีเพียงเซตเดียว เพื่อใช้ในการดีฟัซซิฟายซึ่งเป็นขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนที่ 5 ดีฟัซซิฟิเคชัน (Defuzzification)

จากขั้นตอนที่ 4 หลังจากรวมเซตฟัซซีที่ได้จากแต่ละกฎแล้วจะได้เซตฟัซซีเพียงเซตเดียว เซตฟัซซีที่ได้นี้จะนำมาใช้ในการดีฟัซซิฟาย ซึ่งจะให้ค่าที่ชัดเจนแน่นอนออกมาค่าหนึ่ง

วิธีดีฟัซซิฟิเคชันมีให้เลือกด้วยกัน 5 วิธี ดังรูปที่ 5 โดยแกนตั้งแสดงค่าความเป็นสมาชิก แต่วิธีที่นิยมใช้กันเป็นวิธีหาจุดศูนย์ถ่วง คือการหาจุดศูนย์ถ่วงของเซตฟัซซีที่ได้ ดังสมการที่ (5)



รูปที่ 5 แสดงวิธีการดีฟัซซิฟายด์

การดีฟัซซิฟายด์แบบจุดศูนย์ถ่วง (Centroid)

$$y = \frac{\sum_{i=1}^{k} (\mu_{yi})\, y_i}{\sum_{i=1}^{k} (\mu_{yi})} \qquad (5)$$

การดีฟัซซิฟายด์แบบไบเซ็คเตอร์ (Bisector) หมายถึงการแบ่งพื้นที่ใต้กราฟออกเป็น 2 ส่วนเท่าๆ กัน

การดีฟัซซิฟายด์แบบค่ากลางของค่าสูงสุด (Mom) หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ได้จากพื้นที่ใต้กราฟของบริเวณที่มีค่าความเป็นสมาชิกสูงสุด

การดีฟัซซิฟายด์แบบค่าน้อยที่สุดของความเป็นสมาชิกสูงสุด (Som) หมายถึงค่าที่น้อยที่สุดที่ยังคงมีค่าความเป็นสมาชิกสูงสุด

การดีฟัซซิฟายด์แบบค่ามากที่สุดของความเป็นสมาชิกสูงสุด (Lom) หมายถึงค่าที่มากที่สุดที่ยังคงมีค่าความเป็นสมาชิกสูงสุด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวณิชาพัชร พัชรรุ่งเรือง เกิดเมื่อวันที่ 13 มกราคม พ.ศ.2520 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีพ.ศ.2542

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย