การสร้างแบบจำลองฟัซซีและการออกแบบตัวควบคุมของตัวย่อยเยื่อกระดาษ

นางสาววิศณีย์   ตั้งยืนยง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0750-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FUZZY MODELING AND CONTROLLER DESIGN OF
A PULP DIGESTER

Miss Wisanee Tungyuenyong

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 2001
ISBN 974-03-0750-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสร้างแบบจำลองฟัซซีและการออกแบบตัวควบคุมของตัวย่อยเยื่อกระดาษ
โดย	นางสาววิศณีย์ ตั้งยืนยง
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
(อาจารย์ ดร. เหมือนเดือน พิศาลพงศ์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิศณีย์ ตั้งยืนยง: การสร้างแบบจำลองฟัซซีและการออกแบบตัวควบคุมของตัวย่อยเยื่อกระดาษ (FUZZY MODELING AND CONTROLLER DESIGN OF A PULP DIGESTER) อาจารย์ที่ปรึกษา: ดร. มนตรี วงศ์ศรี; 120 หน้า. ISBN 974-03-0750-7

งานวิจัยนี้เป็นการสร้างแบบจำลองฟัซซีทากาจิ-ซูเกโนโดยใช้ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทของกระบวนการผ่านอัลกอริธึมคลัสเตอริงและวิธีลีสท์สแควร์เพื่อใช้เป็นแบบจำลองภายในสำหรับการควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองภายใน (Fuzzy IMC) ของตัวย่อยเยื่อกระดาษ และใช้ตัวประมาณค่าฟัซซีในการประมาณค่าแคปปา เนื่องจากค่าแคปปาเป็นตัวแปรควบคุมที่ไม่สามารถวัดค่าได้ จากการศึกษาพบว่าตัวประมาณค่าฟัซซีสามารถประมาณค่าได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับตัวควบคุมฟัซซีที่ใช้ร่วมกับตัวประมาณค่าฟัซซีสามารถควบคุมค่าแคปปาค่าสุดท้ายให้เข้าใกล้ค่าเป้าหมายได้ในเวลาที่กำหนด แม้ว่าจะมีความผิดพลาดของค่าประมาณเริ่มต้น ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงชนิดไม้และความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ทำปฏิกิริยา รวมทั้งเมื่อมีสัญญาณรบกวนจากการวัด นอกจากนี้ผลการศึกษายังแสดงว่าระบบการควบคุมนี้ไวต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการบางตัว แต่ยังให้สมรรถนะในการควบคุมที่ดีเมื่อมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์ส่วนใหญ่

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่อนิสิต ....
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ....
ปีการศึกษา	2544	

4170526521: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: FUZZY MODELING / FUZZY CONTROL / INTERNAL MODEL CONTROL / PULP DIGESTER

WISANEE TUNGYUENYONG: FUZZY MODELING AND CONTROLLER DESIGN OF A PULP DIGESTER. THESIS ADVISER: DR.MONTREE WONGSRI. 120 PP. ISBN 974-03-0750-7

In this research, a pulp digester is modeled using fuzzy Takagi-Sugeno clustering method. The fuzzy model is used for the process model in the internal model control scheme. Since the key variable of this process is kappa number which is unmeasurable. So the second fuzzy model is constructed to estimate the kappa number from the process output. It is found that the fuzzy estimator performs very well even in the case that some initial inputs or parameters having some significant errors. The fuzzy controller together with the fuzzy estimator is found to work efficiently in most cases. However, they are quite sensitive to big errors of certain parameters.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department	Chemical Engineering	Student's signature ……………………..
Field of study	Chemical Engineering	Adviser's signature ……………………..
Academic year	2001	

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ก็โดยอาศัยความช่วยเหลือ คำแนะนำ และกำลังใจจากบุคคลรอบข้างมากมาย ซึ่งเป็นพระคุณกับผู้วิจัยเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งบุคคลดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร. มนตรี วงศ์ศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้ข้อแนะนำและความคิดเห็นต่างๆ ตลอดการวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร. ปิยะสาร ประเสริฐธรรม รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติศุภกร และอาจารย์ ดร. เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ ที่กรุณามาร่วมเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ รุ่นน้อง ตลอดจนบุคคลอื่นที่ไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้ ที่คอยแลกเปลี่ยนความคิดเห็นและเป็นกำลังใจมาโดยตลอด

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบุพการีที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจอย่างดีมาตลอดจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .... ง
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .... จ
กิตติกรรมประกาศ .... ฉ
สารบัญ .... ช
สารบัญภาพ .... ญ
สารบัญตาราง .... ฐ

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 4
2.1 แนวความคิดและการพัฒนาฟัซซีลอจิก 4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาแบบจำลองฟัซซี 6
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมฟัซซี 9
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแบบฟัซซีของห้องปฏิบัติการควบคุมกระบวนการ 12
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตัวย่อยเยื่อกระดาษ 13

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 แบบจำลองฟัซซี 15
3.1 แบบจำลองฟัซซี 16
3.2 แบบจำลองฟัซซีสำหรับระบบสถิตย์.. 16
3.2.1 แบบจำลองฟัซซีเชิงภาษา 16
3.2.2 แบบจำลองความสัมพันธ์ฟัซซี.. 17
3.2.3 แบบจำลองฟัซซีทากาจิ-ซูเกโน 19
3.3 แบบจำลองฟัซซีสำหรับระบบไดนามิก 21
3.3.1 แบบจำลองสเตทสเปซ 21
3.3.2 แบบจำลองอินพุท-เอาท์พุท 22
3.3.3 แบบจำลองผสม 22
3.4 วิธีการสร้างแบบจำลองฟัซซี 23
3.4.1 แบบจำลองฟัซซีจากความรู้และประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ …….. 23
3.4.2 แบบจำลองฟัซซีจากข้อมูลเชิงตัวเลขของกระบวนการและเทคนิคการระบุหา 23
3.5 เทคนิคการระบุหาแบบจำลองฟัซซี 24
3.5.1 การระบุหาโครงสร้างของแบบจำลอง 24
3.5.2 การระบุหาพารามิเตอร์ของแบบจำลอง 26

บทที่ 4 ฟัซซีคลัสเตอริงและตัวควบคุมฟัซซี 28
4.1 ฟัซซีคลัสเตอริงแบบซี-มีน 29
4.2 อัลกอริธึมของคลัสเตอริงแบบซี-มีน 30
4.3 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ฟัซซีคลัสเตอริงแบบซี-มีน 32
4.4 ตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลอง 35

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ 37

5.1 สมมติฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 38

5.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวย่อยเยื่อกระดาษ 39

บทที่ 6 ผลการทดลอง วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย 48

6.1 การเลียนแบบกระบวนการ 48

6.2 การสร้างแบบจำลองฟัซซี 48

6.2.1 แบบจำลองฟัซซีของกระบวนการ 48

6.2.2 แบบจำลองฟัซซีของตัวประมาณค่า 54

6.3 การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลอง 58

6.4 ผลการควบคุม 62

6.4.1 กรณีที่ใช้สารป้อนตัวอย่าง 63

6.4.2 การทดสอบตัวควบคุมและตัวประมาณค่า 64

6.4.2.1 กรณีมีการเปลี่ยนแปลงสารป้อน 64

6.4.2.2 กรณีที่มีสัญญาณรบกวนจากการวัด 69

6.4.2.3 กรณีที่ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ผิดพลาด 71

6.5 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง 84

6.6 ข้อเสนอแนะ 87

รายการอ้างอิง 88

ภาคผนวก 91

ภาคผนวก ก. ทฤษฎีตรรกศาสตร์ฟัซซี 92

ภาคผนวก ข. ตัวอย่างโปรแกรมที่สำคัญ 100

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 120

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 3.1	วิธีการกำหนดฟังก์ชันสมาชิกจากฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์ ……………....	25
รูปที่ 4.1	การระบุหากฎฟัซซีโดยวิธีคลัสเตอริง …………………………….…	28
รูปที่ 4.2	แผนผังการทำงานของการกำหนดจำนวนกฎฟัซซีที่เหมาะสม …………	31
รูปที่ 4.3	แผนผังตัวควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองภายใน ………………………..	35
รูปที่ 5.1	แผนผังของกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ …………………………...	37
รูปที่ 5.2	ตัวย่อยเยื่อกระดาษแบบกะ ……………………………………………..	38
รูปที่ 5.3	ผลของกระบวนเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ของ Lee และ Datta ……………..	46
รูปที่ 5.4	ผลของกระบวนเมื่อใช้ค่าพลังงานกระตุ้นอันดับหนึ่ง ขององค์ประกอบที่ 1 ในไม้เป็น 10.5 x 10^3 kcal/kmole ………………..	47
รูปที่ 5.5	ผลของกระบวนเมื่อใช้ค่าพลังงานกระตุ้นอันดับหนึ่ง ขององค์ประกอบที่ 1 ในไม้ เป็น 2.4 x 10^3 kcal/kmole ………………..	47
รูปที่ 6.1	ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองของกระบวนการ …..	49
รูปที่ 6.2	กราฟระหว่างฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์กับค่าลิกนิน ……………………...	50
รูปที่ 6.3	กราฟระหว่างฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์กับค่าอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ ….	50
รูปที่ 6.4	กราฟระหว่างฟัซซีพาร์ทิชันเมตรกซ์กับค่าอุณหภูมิของสายหมุนเวียน ...	51
รูปที่ 6.5	กราฟระหว่างฟัซซีพาร์ทิชันเมตรกซ์กับค่าอัตราการไหล ของสายหมุนเวียน ……………………………………………………...	51
รูปที่ 6.6	ฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไขของแบบจำลองฟัซซี สำหรับกระบวนการ ……………………………………………………	52
รูปที่ 6.7	ผลการทดสอบแบบจำลองฟัซซีของกระบวนการ …………………...	53
รูปที่ 6.8	ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองของตัวประมาณค่า ...	54
รูปที่ 6.9	กราฟระหว่างฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์กับค่าลิกนิน ……………………...	55
รูปที่ 6.10	กราฟระหว่างพาร์ทิชันเมตริกซ์กับค่าอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ ……….	55
รูปที่ 6.11	กราฟระหว่างพาร์ทิชันเมตริกซ์กับค่าความเข้มข้น ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ………………………………………………	56
รูปที่ 6.12	ฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไขของแบบจำลองฟัซซี สำหรับตัวประมาณค่า ……………………………………………….	56
รูปที่ 6.13	ผลการทดสอบแบบจำลองฟัซซีของตัวประมาณค่า ……………………	58

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 6.14 โครงสร้างการควบคุมแบบ Fuzzy IMC 59

รูปที่ 6.15 ภาพขยายจากกรอบเส้นประในรูปที่ 6.14 60

รูปที่ 6.16 แผนผังการควบคุมด้วย MPC และตัวประมาณค่า EKF 60

รูปที่ 6.17 แผนผังการควบคุมด้วยตัวควบคุม FLC และตัวประมาณค่า FNN 61

รูปที่ 6.18 ผลการควบคุมในกรณีที่ใช้สารป้อนตัวอย่าง 63

รูปที่ 6.19 ผลการควบคุมในกรณีที่ 1 66

รูปที่ 6.20 ผลการควบคุมในกรณีที่ 2 67

รูปที่ 6.21 ผลการควบคุมในกรณีที่ 3 68

รูปที่ 6.22 ผลการควบคุมในกรณีที่ 4 69

รูปที่ 6.23 ผลการควบคุมในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนจากการวัด 70

รูปที่ 6.24 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 1 ขององค์ประกอบที่ 1 (E_{11}) เปลี่ยนแปลงไป +50% 72

รูปที่ 6.25 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 1 ขององค์ประกอบที่ 1 (E_{11}) เปลี่ยนแปลงไป -50% 72

รูปที่ 6.26 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 1 ขององค์ประกอบที่ 2 (E_{12}) เปลี่ยนแปลงไป +50% 73

รูปที่ 6.27 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 1 ขององค์ประกอบที่ 2 (E_{12}) เปลี่ยนแปลงไป -50% 73

รูปที่ 6.28 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 1 ขององค์ประกอบที่ 3 (E_{13}) เปลี่ยนแปลงไป +50% 74

รูปที่ 6.29 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 1 ขององค์ประกอบที่ 3 (E_{13}) เปลี่ยนแปลงไป -50% 74

รูปที่ 6.30 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 1 ขององค์ประกอบที่ 4 (E_{14}) เปลี่ยนแปลงไป +50% 75

รูปที่ 6.31 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 1 ขององค์ประกอบที่ 4 (E_{14}) เปลี่ยนแปลงไป -50% 75

รูปที่ 6.32 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 1 ขององค์ประกอบที่ 5 (E_{15}) เปลี่ยนแปลงไป +50% 76

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 6.33 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 1 ขององค์ประกอบที่ 5 (E_{15}) เปลี่ยนแปลงไป -50% 76
รูปที่ 6.34 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 2 ขององค์ประกอบที่ 1 (E_{21}) เปลี่ยนแปลงไป +50% 77
รูปที่ 6.35 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 2 ขององค์ประกอบที่ 1 (E_{21}) เปลี่ยนแปลงไป -50% 77
รูปที่ 6.36 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 2 ขององค์ประกอบที่ 2 (E_{22}) เปลี่ยนแปลงไป +50% 78
รูปที่ 6.37 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 2 ขององค์ประกอบที่ 2 (E_{22}) เปลี่ยนแปลงไป -50% 78
รูปที่ 6.38 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 2 ขององค์ประกอบที่ 3 (E_{23}) เปลี่ยนแปลงไป +50% 79
รูปที่ 6.39 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 2 ขององค์ประกอบที่ 3 (E_{23}) เปลี่ยนแปลงไป -50% 79
รูปที่ 6.40 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 2 ขององค์ประกอบที่ 4 (E_{24}) เปลี่ยนแปลงไป +50% 80
รูปที่ 6.41 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 2 ขององค์ประกอบที่ 4 (E_{24}) เปลี่ยนแปลงไป -50% 80
รูปที่ 6.42 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 2 ขององค์ประกอบที่ 5 (E_{25}) เปลี่ยนแปลงไป +50% 81
รูปที่ 6.43 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 2 ขององค์ประกอบที่ 5 (E_{25}) เปลี่ยนแปลงไป -50% 81
รูปที่ 6.44 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 1 ขององค์ประกอบที่ 2 (E_{12}) เปลี่ยนแปลงไป -10% 82
รูปที่ 6.45 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 1 ขององค์ประกอบที่ 5 (E_{15}) เปลี่ยนแปลงไป -40% 83
รูปที่ 6.46 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 2 ขององค์ประกอบที่ 2 (E_{22}) เปลี่ยนแปลงไป -15% 83

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 สรุปผลงานวิจัยการสร้างแบบจำลองฟัซซี 8

ตารางที่ 2.2 สรุปผลงานวิจัยการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี 11

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 43

ตารางที่ 5.2 ค่าเริ่มต้นของตัวแปรสเตท 44

ตารางที่ 5.3 ค่าสภาวะในการปฏิบัติการ 44

ตารางที่ 5.4 ข้อจำกัดในการปฏิบัติการ 45

ตารางที่ 5.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยเทียบกับของ Lee และ Datta (1994) 46

ตารางที่ 6.1 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกระบวนการ 52

ตารางที่ 6.2 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลของแบบจำลองฟัซซีสำหรับตัวประมาณค่า 57

ตารางที่ 6.3 จุดกึ่งกลางของฟังก์ชันสมาชิกแบบสามเหลี่ยม 61

ตารางที่ 6.4 กฎการควบคุมทั้ง 9 กฎสำหรับตัวควบคุม FLC 62

ตารางที่ 6.5 การเปลี่ยนแปลงสารป้อนในกรณีต่างๆ 65

ตารางที่ 6.6 ผลการควบคุมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสารป้อน 85

ตารางที่ 6.7 ผลการควบคุมเมื่อค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองผิดพลาด 86

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

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

การควบคุมด้วยระบบฟัซซีได้รับการพัฒนาขึ้นมาให้มีลักษณะเฉพาะที่สามารถจัดการกับปัญหาที่มีความสลับซับซ้อน ระบบที่ไม่สามารถนิยามได้ รวมไปถึงระบบที่ไม่สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ หรือระบบที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่สามารถให้ความแม่นยำเพียงพอ นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมได้ดีพอๆ กับผู้ควบคุมที่เป็นมนุษย์ ในกรณีที่การควบคุมแบบดั้งเดิมไม่สามารถควบคุมได้หรือควบคุมได้ไม่ดีพอ

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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เนื่องจากว่าระบบที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทางด้านเคมีนั้นเป็นระบบที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นทั้งสิ้นและหลายครั้งการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาจัดการกับระบบที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นนั้น ไม่สามารถจัดการได้สะดวกนัก เนื่องจากใช้เวลานาน มีค่าพารามิเตอร์หลายค่ามาก และพารามิเตอร์บางตัวก็ไม่สามารถประมาณค่าได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทางชีวเคมี ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาบาง

กระบวนการ เป็นต้น ดังนั้นการสร้างแบบจำลองฟัซซีจากข้อมูลเชิงตัวเลขของกระบวนการจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถทำได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อนำหลักการทฤษฎีฟัซซีลอจิกมาประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลองฟัซซีและออกแบบตัวควบคุมสำหรับตัวย่อยเยื่อกระดาษ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

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

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ค้นคว้าเอกสารและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. สร้างโปรแกรมเลียนแบบตัวย่อยเยื่อกระดาษ
3. สร้างแบบจำลองฟัซซีโดยเขียนโปรแกรมระบุหาโครงสร้างและพารามิเตอร์ของแบบจำลอง
4. ทดสอบแบบจำลองฟัซซีที่สร้างขึ้น
5. สร้างโปรแกรมตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลอง
6. ทดสอบตัวควบคุมและตัวประมาณค่าฟัซซี
7. เปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมฟัซซีกับตัวควบคุม PI
8. วิเคราะห์ และสรุปผลงานวิจัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจวิธีการระบุหาแบบจำลองฟัซซีและการควบคุมกระบวนการ
2. เป็นประโยชน์ในการนำวิธีการสร้างแบบจำลองและตัวควบคุมนี้ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม

1.6 เนื้อหาวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 6 บท บทที่ 1 กล่าวถึงความสำคัญและที่มาของงานวิจัย วัตถุประสงค์ ขอบเขตของงานวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ บทที่ 2 กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วยแนวคิดของฟัซซี การพัฒนาและการประยุกต์ใช้ฟัซซีลอจิก บทที่ 3 กล่าวถึงแบบจำลองฟัซซีชนิดต่างๆ และการระบุหาโครงสร้างและพารามิเตอร์ของแบบจำลองฟัซซี บทที่ 4 เน้นการระบุหาแบบจำลองฟัซซีโดยวิธีคลัสเตอริงและการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี บทที่ 5 อธิบายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวย่อยเยื่อกระดาษซึ่งเป็นกระบวนการที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ และบทที่ 6 เป็นผลการทดลองการระบุหาแบบจำลองฟัซซีและผลการควบคุมกระบวนการในกรณีต่างๆ รวมไปถึงการวิเคราะห์ สรุปผลงานวิจัย และข้อเสนอแนะ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวความคิดและการพัฒนาฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic Initiation and Developement)

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 ซึ่งเป็นการจัดการกับความไม่เป็นเชิงเส้นสัญญาณรบกวนที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการ ผลการควบคุมแสดงว่า ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกสามารถจัดการกับกระบวนการได้ดี

ต่อมาในปี ค.ศ. เดียวกัน Kickert และคณะได้นำฟัซซีลอจิกไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการทำน้ำอุ่น ในระดับห้องปฏิบัติการ กระบวนการเป็นถังน้ำถูกแบ่งออกเป็นช่องหลายๆช่อง ทำการควบคุมอุณหภูมิของน้ำอุ่นขาออกโดยการปรับอัตราไหลขาเข้าของน้ำผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อยู่ภายในถัง นอกจากนี้ยังควบคุมให้สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายแบบสเต็พ เพื่อทำให้อุณหภูมิของน้ำขาออกเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้อย่างรวดเร็ว

และในปี ค.ศ. 1976 ได้มีการทดลองนำเอาตัวควบคุมฟัซซีลอจิกไปใช้ในระดับโรงงานอุตสาหกรรมเป็นครั้งแรก โดย Rutherford D.A. และ Carter G.A. ซึ่งเป็นการใช้ตัวควบคุมในการควบคุมความสามารถในการซึมผ่านในกระบวนการแยกสินแร่ แต่ในครั้งนั้นปรากฏว่าการควบคุมด้วยฟัซซีลอจิกเพียงแต่ทำงานได้ดีกว่าการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

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

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาแบบจำลองฟัซซี (Fuzzy Modelling Developement)

ในช่วงแรกของการศึกษาเกี่ยวกับหลักการฟัซซี เป็นการศึกษาในเรื่องของการให้เหตุผล การอนุมานฟัซซี การสร้างแบบจำลองฟัซซี ซึ่งประสบความสำเร็จในการนำแบบจำลองฟัซซีไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการจริง จึงมีผู้ให้ความสนใจในการพัฒนาเพื่อให้ได้แบบจำลองที่มีประสิทธิภาพในการจำลองกระบวนการได้ถูกต้องแม่นยำในสถานการณ์ต่างๆได้ดีขึ้น มีการเสนอการสร้างแบบจำลองฟัซซีไว้หลายวิธีการ แต่ละวิธีการมีพัฒนาการที่แตกต่างกันออกไป พอสรุปได้ ดังนี้

ในปี ค.ศ. 1985 Takagi และ Sugeno ได้เสนอวิธีการใหม่ในการสร้างแบบจำลองฟัซซี ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่าย แบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้มีลักษณะเป็นกฎเงื่อนไขของการแจกแจงเหตุสู่ผล (Implication) ซึ่งอธิบายปริภูมิ (Space) ของอินพุท และในส่วนผลสรุปเป็นการแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นของตัวแปรอินพุท-เอาท์พุท การระบุหาแบบจำลองจะอาศัยข้อมูลอินพุท-เอาท์พุท การระบุหาแบ่งเป็นสองส่วนคือการระบุหาโครงสร้างและพารามิเตอร์ของแบบจำลอง การระบุหาโครงสร้างประกอบด้วยการเลือกตัวแปรในส่วนเงื่อนไข และการกำหนดฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปร และได้ประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาแบบฮิวริสติค (Heuristic search) เพื่อทำการเลือกตัวแปรในส่วนเงื่อนไข และใช้วิธีการกำลังสองน้อยที่สุดเพื่อระบุหาพารามิเตอร์ในส่วนผลสรุป วิธี การนี้สามารถประยุกต์ใช้เพื่อสร้างแบบจำลองกระบวนการทางอุตสาหกรรม เช่น กระบวนการทำน้ำให้สะอาด และคอนเวอร์เตอร์ (Converter) ของกระบวนการผลิตเหล็กกล้าได้เป็นอย่างดี

ในปี ค.ศ. 1992 Nomura, Hayashi และ Wakami เสนอวิธีการเรียนรู้ (Learning method) ในการอนุมานกฎฟัซซีซึ่งอาศัยวิธีเดสเซ็นท์ (Descent method) โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทเพื่อสร้างกฎ จากนั้นฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในส่วนเงื่อนไขและจำนวนจริงในส่วนผลสรุปจะถูกปรับค่าโดยวิธีเดสเซ็นท์ ข้อดีของวิธีนี้คือมีความเร็วการเรียนรู้สูงกว่าวิธีแบคโพรพาเกชันของนิวรัลเน็ตเวิร์คแบบดั้งเดิม (Conventional back propagation type neural network) และยังสามารถแสดงความสัมพันธ์ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทในรูปของกฎฟัซซีอีกด้วย นอกจากนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการนี้กับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ซึ่งสามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางที่เคลื่อนที่ได้เป็นอย่างดี

ในปี ค.ศ. 1993 Sugeno และ Yasukawa ได้เสนอวิธีการสร้างแบบจำลองเชิงคุณภาพซึ่งอยู่บนพื้นฐานของฟัซซีลอจิก วิธีการสร้างแบ่งเป็นสองส่วนคือการสร้างแบบจำลองฟัซซี

และการประมาณเชิงภาษา (Linguistic approximatation) โดยใช้วิธีฟัซซีคลัสเตอริงที่เรียกว่า ฟัซซีซี-มีน (Fuzzy C-means) เพื่อทำการระบุหาโครงสร้างของแบบจำลองฟัซซี แบบจำลองที่ได้เป็นแบบจำลองเชิงภาษาที่อธิบายด้วยเทอมทางภาษา และได้ใช้เกณฑ์สม่ำเสมอ (Regularity criterion) เพื่อระบุหาตัวแปรในส่วนเงื่อนไขของกฎ นอกจากนี้ยังประยุกต์ใช้วิธีการทางออพติไมเซชันในการกำหนดจำนวนกฎที่เหมาะสม อัลกอริธึมที่เสนอนี้ได้ประยุกต์ใช้ในการจำลองกระบวนการไดนามิก และจำลองระบบการควบคุมของผู้ปฏิบัติการ พบว่าแบบจำลองฟัซซีให้ค่าดัชนีสมรรถนะเป็นที่น่าพอใจ

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. 1995 Babuska และ Verbruggen เสนอวิธีการสร้างแบบจำลองฟัซซีเชิงภาษา (Linguistic fuzzy model) จากแบบจำลองฟัซซีเชิงเส้น (Fuzzy linear model) ซึ่งเป็นการรวมวิธีการระบุหาของแบบจำลองฟัซซีเชิงเส้นเข้ากับความสามารถในการตีความหมาย (Semantic interpretation) ที่ดีของแบบจำลองฟัซซีเชิงภาษา และได้ประยุกต์ใช้วิธีการนี้ในการระบุหาแบบจำลองเชิงเส้นของกระบวนการที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง (Highly nonlinear process) พบว่าแบบจำลองที่ได้ให้ความถูกต้องแม่นยำมากขึ้นเมื่อเทียบกับแบบจำลองเชิงเส้นแบบเดิม

ในปี ค.ศ. 1996 Mohammad, Burhan และ Andrew ได้เสนอขั้นตอนการระบุหาโครงสร้างฟัซซีโดยใช้ฟัซซี-มีน เริ่มจากการระบุหาโครงสร้างฟัซซีโดยการหาจำนวนกฎด้วยฟัซซีคลัสเตอริงและทำการเลือกตัวแปรอินพุท จากนั้นระบุหาค่าพารามิเตอร์ซึ่งในขั้นตอนนี้ประกอบไปด้วยการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและทำการปรับค่าอีกครั้ง ทำการทดสอบวิธีการนี้กับระบบสถิตย์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งมีตัวแปรอินพุท 2 ตัว และ ตัวแปรเอาท์พุท 1 ตัว พบว่าวิธีการนี้ง่ายและมีประสิทธิภาพสูง

ในปี ค.ศ. 1997 Euntin Kim เสนอวิธีการใหม่ในการสร้างแบบจำลองฟัซซีโดยวิธีการนี้ได้นำข้อดีของแบบจำลอง Takagi-Sugeno และแบบจำลองของ Sugeno-Yasukawa ไว้ด้วยกัน ซึ่งอัลกิริธึมประกอบด้วย 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) และเปรียบเทียบกับแบบจำลอง สเตทสเปซเชิงเส้นลำดับ 4 (4^{th}-order linear state-space model) พบว่าแบบจำลองฟัซซีให้ความถูกต้องแม่นยำมากกว่า

ตารางที่ 2.1 สรุปผลงานวิจัยการสร้างแบบจำลองฟัซซี

ปี ค.ศ.	ผู้วิจัย	วิธีการ	การประยุกต์ใช้
1985	Takagi และ Sugeno	ระบุหาโครงสร้างด้วยวิธีค้นหาแบบฮิวริสติคและระบุหาพารามิเตอร์ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด	การทำน้ำให้บริสุทธิ์และคอนเวอร์เตอร์ของกระบวนการผลิตเหล็กกล้า
1992	Nomura, Hayashi และ Wakami	วิธีเดสเซ็นท์	หุ่นยนต์เคลื่อนที่
1993	Sugeno และ Yasukara	ฟัซซีซี-มีนคลัสเตอริง	กระบวนการไดนามิกและการจำลองการควบคุมของผู้ปฏิบัติการ

1994	Zhao, Wertz และ Gorez	จี-เคคลัสเตอริง	ระบบสถิตย์และระบบไดนามิกแบบไม่เชิงเส้น
1995	Babuska และ Verbruggen	สร้างแบบจำลองฟัซซีเชิงภาษาจากแบบจำลองฟัซซีเชิงเส้น	กระบวนการที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง
1996	Mohammad, Burhan และ Andrew	ฟัซซีซี-มีนคลัสเตอริง	ระบบสถิตย์ไม่เป็นเชิงเส้น
1997	Euntin Kim	ฟัซซีซี-รีเกรสชันคลัสเตอริง	ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นและเตาเผาโดยใช้แก๊ส
1998	Babuska, Roubos และ Verbruggen	ฟัซซีจี-เคคลัสเตอริง	ถังน้ำต่อกัน 4 ถัง

2.3 การวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมฟัซซี (Fuzzy controller)

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

ในปี ค.ศ. 1995 Taur, Tao และ Tsai ประยุกต์ใช้ฟัซซีพีไอดีในการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องอัดหลอมพลาสติก ตัวควบคุมฟัซซีนี้อยู่บนพื้นฐานของการควบคุมแบบพีไอดีฟัซซีที่อาศัยกฎเงื่อนไขและฟังก์ชันสมาชิกแบบสามเหลี่ยม วิธีการนี้ช่วยแก้ไขข้อจำกัดของตัวควบคุมฟัซซีแบบเดิม (Traditional fuzzy controller) คือไม่สามารถปรับปรุงสมรรถนะที่สภาวะคง

ตัว สำหรับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Time-varying system) จากการควบคุมแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมฟัซซีพีไอดีให้ผลการควบคุมดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี

ในปี ค.ศ. 1996 Hwang และ Jeong เสนอการออกแบบระบบควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมฟัซซีในการควบคุมหม้อต้มน้ำไอพ่น (Boiler-turbine) ซึ่งมีการใช้ตัวรวมสัญญาณ (Integrator) เมตริกซ์เกนสัมพัทธ์ (Relative gain matrix) จากการทดสอบพบว่าวิธีนี้มีความทนทาน (Robustness) และมีความสามารถในการติดตามที่เหมาะสมถึงแม้จะมีความผิดพลาดของโมเดล มีตัวรบกวนและความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์

ในปี ค.ศ. 1997 Abonyi, Nagy และ Szeifert ได้ประยุกต์ใช้ตัวควบคุมฟัซซี Takagi-Sugeno ในการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ผลิตสไตรีนแบบกะ โดยอาศัยวิธี Controller Output Error Method (COEM) ซึ่งวิธีนี้สามารถปรับจูนแบบออนไลน์ได้และได้ทำการเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีดีที่ไม่ได้ใช้ร่วมกับวิธีนี้ พบว่าวิธี COEM นี้สามารถปรับปรุงสมรรถนะของตัวควบคุมแบบพีดีได้และมีประสิทธิภาพสูงกว่า

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

ในปี ค.ศ. 1999 Gamero และ Flores กล่าวถึงการประยุกต์ตัวควบคุมฟัซซีในการควบคุมกระบวนการเทคโนโลยีชีวภาพ (Biotechnology) โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง ในการเปลี่ยนเฟอรัสไอออน (Fe^{2+}) ไปเป็น เฟอริคไอออน (Fe^{3+}) อาศัยธิโอแบซิลลัส เฟอโรออกซิแดนท์ (thiobacillus ferrooxidants) ผ่านกระบวนการ ซัลไฟด์ไบโอออกซิเดชัน ตัวควบคุมฟัซซีถูกออกแบบบนพื้นฐานของแบบจำลองเชิงภาษา ทำการทดสอบตัวควบคุมฟัซซีและเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอดี พบว่าตัวควบคุมฟัซซีมีสมรรถภาพในการควบคุมดีกว่าตัวควบคุมพีไอดี แต่จำเป็นต้องมีการออกแบบที่ดีกว่านี้เพื่อให้การตอบสนองเร็วขึ้นและรุนแรงน้อยลง

ในปี ค.ศ. 2000 Rey-Chue Hwang, Huang-Chu Huang และ Wei-Shen Chi ได้พัฒนาตัวควบคุมฟัซซีพีไอดี ซึ่งตัวควบคุมนี้ประกอบด้วยตัวควบคุมฟัซซี 2 ตัวซึ่งเป็นอิสระต่อกัน ลักษณะของตัวควบคุมพีไอแสดงอยู่ในตัวควบคุมฟัซซีตัวแรก ส่วนตัวควบคุมฟัซซีตัวที่สองจะแสดงลักษณะของส่วนอินทิกรัล และได้ทดสอบตัวควบคุมนี้กับระบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ซับซ้อนโดยเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอดี พบว่าตัวควบคุมฟัซซีพีไอดีให้สมรรถนะในการควบคุมที่ดีกว่า

ตารางที่ 2.2 สรุปผลงานวิจัยการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี

ปี ค.ศ.	**ผู้วิจัย**	**วิธีการ**	**การประยุกต์ใช้**
1994	Postlethwaite	ตัวควบคุมโดยอาศัยแบบจำลอง	การควบคุมอุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
1995	Taur, Tao และ Tsai	ตัวควบคุมฟัซซีพีไอดี	เครื่องอัดหลอมพลาสติก
1996	Hwang และ Jeong	ตัวควบคุมฟัซซีโดยอาศัยเมตริกซ์เกนสัมพัทธ์	หม้อต้มน้ำไอพ่น
1997	Abonyi, Nagy และ Szeifert	ตัวควบคุมฟัซซี Takagi-Sugeno โดยอาศัยวิธี COEM	เครื่องปฏิกรณ์แบบกะในกระบวนการผลิตสไตรีน
1997	Sousa, Babuska และ Verbruggen	ตัวควบคุมฟัซซีอาศัยแบบจำลองภายใน	ระบบปรับอากาศ
1999	Gamero และ Flores	ตัวควบคุมฟัซซีจากแบบจำลองแมมดานี	เครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่องของกระบวนการเทคโนโลยีชีวภาพ
2000	Rey-Chue Hwang, Huang-Chu Huang และ Wei-Shen Chi	ตัวควบคุมฟัซซีพีไอดี	ระบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ซับซ้อน

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแบบฟัซซีของห้องปฏิบัติการควบคุมกระบวนการ (Fuzzy Control in Computer Process Control Laboratory)

ในปี พ.ศ. 2539 นฤพนธ์ มัญมณี ได้ประยุกต์ใช้ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบผู้เชี่ยวชาญในการควบคุมระดับน้ำในถังทรงกลม โดยใช้การแบ่งย่านการควบคุมออกเป็นย่านเกนสูงและย่านเกนต่ำ ผลการทดสอบพบว่าตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดลมีความสามารถในการติดตามเมื่อค่าเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลงและให้สมรรถนะในการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ

ในปี พ.ศ. 2541 รุ่งจิตร์ กาญจนวัฒน์ได้ประยุกต์ใช้วิธีคลัสเตอริงเพื่อทำการระบุหาแบบจำลองฟัซซีของกระบวนการและออกแบบตัวควบคุมฟัซซีลอจิกโดยใช้แบบจำลองฟัซซี แบบจำลองฟัซซีแบบทาคาจิ-ซูเกโน ถูกเลือกใช้และระบุหาได้จากข้อมูลของกระบวนการ การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดลกระทำได้โดยการใช้แบบจำลองผกผันของกระบวนการ วิธีนี้ประยุกต์ใช้กับการควบคุมระดับของเหลวในระบบถังทรงกลม ผลจากการซิมมูเลทแสดงให้เห็นว่า อัลกอริธึมที่ใช้ในการระบุหาแบบจำลองฟัซซีให้ค่าสมรรถนะที่ดี โครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดลสามารถออกแบบได้ง่ายจากแบบจำลองฟัซซี ผลการทดสอบพบว่าตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดลมีความสามารถในการติดตามเมื่อค่าเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลงและให้สมรรถนะที่ดีในการควบคุม

ในปี พ.ศ. 2541 ทัศนีย์ วัฒนเชาวน์พิสุทธิ์ ได้สร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ฟัซซีเพื่อใช้เป็นแบบจำลองภายในสำหรับการควบคุมแบบใช้แบบจำลองภายใน (Internal Model Control) โดยการเขียนโปรแกรมซิมูเลทกระบวนการและการควบคุมเพื่อทดสอบตัวควบคุมที่ได้ใน 2 กรณีคือ กรณีที่ค่าเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบสเต็พและกรณีที่มีการรบกวนแบบสเต็พ ผลการวิจัยพบว่าการควบคุมในลักษณะนี้สามารถควบคุมกระบวนการได้ดีกว่าการควบคุมแบบดั้งเดิมและสามารถใช้แทนการควบคุมแบบฐานจำลองที่เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมตัวย่อยเยื่อกระดาษ (Pulp Digester Control)

ในปี ค.ศ. 1994 Datta และ Lee สนใจศึกษาการควบคุมตัวย่อยเยื่อกระดาษแบบกะซึ่งเป็นการควบคุมแบบอาศัยแบบจำลอง แบบจำลองนี้ประกอบไปด้วยสเตททั้งหมด 14 ตัว โดยใช้เทคนิคเอกซ์เทนเดดคาลมานฟิลเตอร์ (Extended Kalman Filter) ร่วมกับการควบคุมแบบ

โมเดลพรีดิกทีฟ (Model Predictive Control) ในการควบคุมและประมาณค่าแคปปา ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการกำจัดลิกนินออกจากไม้และเป็นค่าที่ไม่สามารถวัดได้จึงต้องประมาณค่าจากค่าที่วัดได้ค่าอื่น ค่าแคปปาสุดท้ายควรเข้าใกล้ค่าที่ต้องการเท่าที่จะเป็นไปได้แม้ว่าจะมีความคลาดเคลื่อนจากการประมาณค่าเริ่มต้นและมีสิ่งรบกวน จากผลการวิจัยพบว่าเทคนิคที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถควบคุมค่าแคปปาและเวลาในการดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในปี ค.ศ. 1994 Datta และ Lee ได้พยายามแก้ไขข้อบกพร่องของงานวิจัยก่อนหน้านี้ โดยทำการทดลองเพื่อลดจำนวนสเตทของตัวย่อยเยื่อกระดาษ (Pulp digester) ซึ่งใช้กลุ่มของสารประกอบในไม้เช่น กลุ่มของลิกนิน หรือกลุ่มของคาร์โบไฮเดรตแทนที่จะใช้ลิกนินแต่ละชนิดหรือคาร์โบไฮเดรตแต่ละชนิด ทำให้สามารถลดจำนวนสเตทจาก 14 ตัวเหลือเพียง 11 ตัว และเมื่อทำการทดสอบพบว่าแบบจำลองที่ทำการลดจำนวนสเตทแล้วนั้นมีสมรรถนะดีพอๆ กับแบบจำลองที่มีสเตท 14 ตัว และยังสามารถแก้ปัญหาความผิดพลาดในการประมาณค่าแคปปา คือแบบจำลองที่มีสเตทต่ำกว่าสามารถประมาณค่าได้ใกล้เคียงมากกว่า

ในปี ค.ศ. 1997 Srinivasan Vanchinathan และ Gopal A/ Krishnagopalan ได้พัฒนาแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นของกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษซึ่งอาศัยการวัดค่าออนไลน์ ค่าที่วัดได้จากของเหลวได้แก่ เอฟเฟคทีฟอัลค่าไลน์ ความเข้มข้นของซัลไฟด์ ความเข้มข้นของของแข็งรวม และประมาณลิกนิน ซึ่งค่าเหล่านี้วัดได้โดยการวิเคราะห์จากค่าการนำไฟฟ้าไอออนโครมาโตรกราฟี ค่าดัชนีรีเฟรคทีฟ และค่าการดูดซับรังสีอัลตราไวโอเลต ตามลำดับ ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่ระบุหาได้จากข้อมูลการทดลองถูกนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา เมื่อทำการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าสามารถทำนายค่าได้ดีใกล้เคียงกับการทดลอง นอกจากนี้ยังสามารถใช้เทคนิคการวิเคราะห์ออนไลน์นี้กับการประมาณค่าด้วยคาลมานฟิลเตอร์และการควบคุมแบบโมเดลพรีดิคทีฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในปี ค.ศ. 2000 Belarbi, Betton และ Mezaache ได้ประยุกต์ใช้ฟัซซีนิวรัลเน็ตเวิร์ค (Fuzzy neural networks) ในการประมาณค่าแคปปาและออกแบบตัวควบคุมฟัซซีสำหรับตัวย่อยเยื่อกระดาษแบบกะ ค่าแคปปาเป็นตัวแปรควบคุม ส่วนอุณหภูมิและอัตราไหลของสายหมุนเวียนเป็นตัวแปรปรับ ฟัซซีนิวรัลเน็ตเวิร์คถูกใช้ในการเรียนรู้การเลียนแบบกระบวนการจริงและการปรัมาณค่า นอกจากนี้ยังใช้ในการกำหนดกฎฟัซซีของตัวควบคุม และถึงแม้ว่าตัวควบคุมฟัซซีประกอบด้วยกฎเพียง 9 กฎ แต่ผลที่ได้แสดงว่ามีความทนทานที่ดีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์และสภาวะในการดำเนินการ

ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้ฟัซซีลอจิกยังมีการพัฒนาต่อไปอย่างต่อเนื่อง สำหรับงานวิจัยที่กล่าวถึงข้างต้นนี้เป็นแนวทางในการทำการวิจัยฉบับนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

แบบจำลองฟัซซี

หลักการของการสร้างแบบจำลองของระบบเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุทและเอาท์พุท ในปัจจุบันการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีความซับซ้อน ความไม่แน่นอนและความไม่เชิงเส้นสูง อาจจำเป็นต้องใช้เวลามากหรืออาจไม่ได้คุณภาพ ดังนั้นแบบจำลองฟัซซีจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการสร้างแบบจำลองของกระบวนการ ทั้งนี้เนื่องจากประสบความสำเร็จในการประยุกต์ใช้กับกระบวนการที่ซับซ้อน อีกทั้งในปัจจุบันได้มีการศึกษาและประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองมากขึ้น และในส่วนของตัวควบคุมฟัซซีก็มีพัฒนาการเป็นตัวควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความซับซ้อนของกระบวนการเองทำให้การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีจากความรู้ของผู้เชี่ยวชาญเป็นไปได้ยาก ดังนั้นตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลองจึงมีบทบาทมากขึ้น ในที่นี้แบบจำลองฟัซซีเปรียบเสมือนเป็นฐานความรู้ของตัวควบคุมที่ออกแบบโดยอาศัยแบบจำลองจำเป็นต้องมีแบบจำลองที่ถูกต้องและเหมาะสมที่สามารถทำนายค่าเอาท์พุทและพฤติกรรมของระบบได้อย่างแม่นยำ

3.1 แบบจำลองฟัซซี

แบบจำลองฟัซซีเป็นแบบจำลองระบบที่แสดงด้วยการอธิบายโดยใช้ภาษา ซึ่งอาศัยหลักการของฟัซซีลอจิก โดยปกติแล้วการอธิบายด้วยภาษานี้เป็นการแสดงความสัมพันธ์ของอินพุทและเอาท์พุทในรูปของกฎทางภาษา ซึ่งอยู่ในลักษณะของกฎฟัซซีแบบมีเงื่อนไขถ้า-แล้ว (Fuzzy if-then rule) แสดงได้ดังนี้

If (ส่วนเงื่อนไข) *Then* (ส่วนผล) (3.1)

โดยที่ส่วนเงื่อนไขและส่วนผลของกฎเป็นประพจน์แบบฟัซซี โดยส่วนเงื่อนไขอาจประกอบด้วยประพจน์ฟัซซีหลายๆ ประพจน์เชื่อมด้วยตัวเชื่อมเชิงตรรก นอกจากนี้ประพจน์แบบฟัซซีอาจประกอบด้วยนิเสธหรือคำขยายได้อีกด้วย แต่เพื่อให้ง่ายแก่ความเข้าใจจะทำการพิจารณากฎดังสมการ (3.2)

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

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 ส่วน $\rightarrow$ เป็นฟังก์ชันการแจกแจงเหตุสู่ผล ซึ่งเป็นการเชื่อมแบบมีเงื่อนไข ส่วนฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ R กำหนดได้ดังนี้

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

3.2 แบบจำลองฟัซซีสำหรับระบบสถิตย์ (Fuzzy Modeling of Static Systems)

ชนิดของแบบจำลองฟัซซีสามารถแบ่งได้ 3 ชนิดโดยพิจารณาจากโครงสร้างและรูปแบบของกฎฟัซซีดังนี้

3.2.1 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 $y\ \ is\ B$ เรียกว่าส่วนผลส่วน 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

3.2.2 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, $A \rightarrow B$

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)

3.2.3 แบบจำลองฟัซซีทากาจิ-ซูเกโน (Takagi - Sugeno Fuzzy Model)

แบบจำลองฟัซซีชนิดนี้ถูกนำเสนอโดย Takagi และ Sugeno (1985) รูปแบบของกฎแสดงได้ดังสมการที่ (3.17)

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

พิจารณาส่วนของเงื่อนไขของกฎพบว่ารูปแบบเหมือนในแบบจำลองแมมดานี ส่วนผลของกฎฟัซซีแสดงด้วยฟังก์ชัน f_i ของอินพุท x_i เช่น f_i เป็นฟังก์ชันโพลิโนเมียยลของอินพุท 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)

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

ตัวอย่างของแบบจำลองฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno

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

3.3 แบบจำลองฟัซซีสำหรับระบบไดนามิก (Fuzzy Modelling of Dynamic Systems)

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

3.3.1 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

$$\text{If } x(k) \text{ is } A_i \text{ and } u(k) \text{ is } B_i$$

$$\text{Then } \begin{cases} x_i(k+1) = A_i x(k) + B_i u(k) \\ y_i(k) \quad = C_i x(k) \end{cases} \tag{3.22}$$

โดย $x(k)$ คือ สเตทของระบบ

$u(k)$ คือ อินพุท

A_i, B_i, C_i คือ เมตริกซ์ที่มีขนาดสัมพันธ์กันของกฎที่ i

แบบจำลองนี้เหมาะที่จะเลือกใช้เมื่อความรู้อยู่มากพอที่จะสามารถหาโครงสร้างของระบบและระบุตัวแปรสเตทได้ ข้อดีของแบบจำลองนี้คือโครงสร้างของแบบจำลองจะสัมพันธ์กับระบบจริง ซึ่งส่งผลให้กฎและพารามิเตอร์มักแสดงให้เห็นถึงความเกี่ยวข้องทางกายภาพ

3.3.2 แบบจำลองอินพุท-เอาท์พุท (Input-output model)

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

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

โดย k คือ เวลาในการสุ่มตัวอย่าง

m,n คือ จำนวนเต็มที่สัมพันธ์กับลำดับของระบบ (System's order)

ตัวอย่างแบบจำลองอินพุท-เอาท์พุท Takagi-Sugeno

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

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

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

3.3.3 แบบจำลองผสม (Hybrid approaches)

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

สำหรับกรณีหลังบ่อยครั้งจะเกี่ยวข้องกับการใช้แบบจำลองจากการทดลอง (Empirical models) ภายใต้สมมติฐานที่แน่นอนของกระบวนการ แบบจำลองเหล่านี้อาจจะทำนายได้ไม่

แม่นยำถ้าสมมติฐานไม่ดีพอหรือมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการแค่บางส่วนเท่านั้น ซึ่งแก้ไขได้โดยรวมสมการอนุพันธ์ (Differential equations) เข้ากับแบบจำลองฟัซซี ก็จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ที่ไม่ทราบจากความรู้ที่มีอยู่ ประสบการณ์ หรือข้อมูลได้ ข้อดีของแบบจำลองฟัซซีชนิดนี้ คือทำหน้าที่เป็นตัวทำนายเชิงตัวเลข (Numerical predictors) ได้เป็นอย่างดี ในขณะเดียวกันยังสามารถจัดการกับข้อมูลข่าวสารเกี่ยวกับความสัมพันธ์ที่ไม่ทราบได้อย่างมีคุณภาพ

3.4 วิธีการสร้างแบบจำลองฟัซซี (Constructing Fuzzy Model)

แบบจำลองฟัซซีสามารถสร้างได้สองวิธีดังนี้

3.4.1 แบบจำลองฟัซซีจากความรู้และประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ (As fuzzy expert System, Using human knowledge)

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

3.4.2 แบบจำลองฟัซซีจากข้อมูลเชิงตัวเลขของกระบวนการและเทคนิคการระบุหาที่เหมาะสม (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) ของแบบ

จำลอง เช่นการเลือกตัวแปรอินพุท-เอาท์พุท รูปร่างของฟังก์ชันสมาชิก ค่าพารามิเตอร์ของกฎ จำนวนของกฎ เป็นต้น ซึ่งจะกล่าวต่อไป

3.4.2 เทคนิคการระบุหาแบบจำลองฟัซซี (Fuzzy Identification Techniques)

แม้ว่าเราอาจจะไม่มีความรู้ความเข้าใจในระบบที่ศึกษามากนัก การได้มาของกฎฟัซซีและฟังก์ชันสมาชิกนั้น สามารถหาได้จากข้อมูลความสัมพันธ์ของอินพุท-เอาท์พุทได้ มีเทคนิคของการระบุหาแบบจำลองที่ได้มีการเสนอในวารสารต่างๆ หลายวิธีด้วยกัน เช่น ฟัซซีคลัสเตอริง (Fuzzy clustering) วิธีการเรียนรู้แบบนิวรัล การเรียนรู้แบบเหนี่ยวนำ (Inductive learning) ออร์โธโกนัลกำลังสองน้อยที่สุด (Orthogonal least squares) ฯลฯ การระบุหาแบบจำลองฟัซซีแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกเป็นการระบุหาโครงสร้างของแบบจำลอง ส่วนขั้นตอนที่ 2 เป็นการระบุหาพารามิเตอร์ของแบบจำลอง

3.5.1 การระบุหาโครงสร้างของแบบจำลอง

การระบุหาโครงสร้างของแบบจำลองสามารถหาได้จากข้อมูลอินพุท-เอาท์พุท โดยใช้เทคนิคการระบุหาที่เหมาะสม ขั้นตอนการระบุหาโครงสร้างของแบบจำลองฟัซซีประกอบด้วย การกำหนดตัวแปรในส่วนเงื่อนไขของกฎฟัซซี การกำหนดจำนวนกฎที่เหมาะสมและการกำหนดฟังก์ชันสมาชิก สำหรับงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ฟัซซีคลัสเตอริงในการระบุหาโครงสร้างของแบบจำลองฟัซซี วิธีการในการกำหนดของแต่ละขั้นตอนแสดงได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การกำหนดตัวแปรในส่วนเงื่อนไข

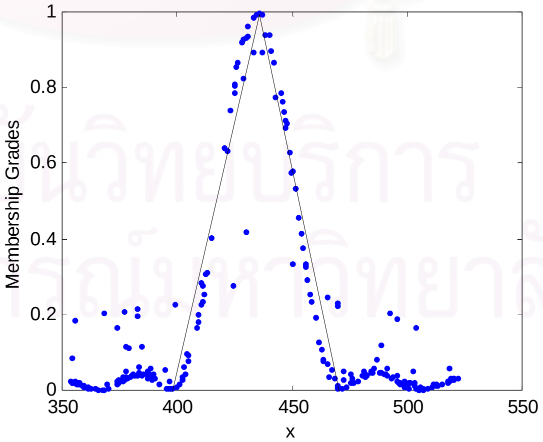
การกำหนดตัวแปรในส่วนเงื่อนไขของกฎ เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญต่อความถูกต้องและสมรรถนะของแบบจำลอง เนื่องจากว่าถ้าทำการเลือกตัวแปรมากหรือน้อยเกินไป อาจส่งผลถึงค่าความถูกต้องของแบบจำลอง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกตัวแปรให้เหมาะสม ตัวแปรที่จะเลือกมักเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าเอาท์พุท และหลังจากการคลัสเตอริงให้พิจารณาฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์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

ขั้นตอนที่ 2 การกำหนดจำนวนกฎฟัซซีที่เหมาะสม

จากการพิจารณาอัลกอริธึมของฟัซซีคลัสเตอริงพบว่าจำเป็นต้องมีการกำหนดจำนวนกลุ่มเริ่มต้นก่อนโดยที่จำนวนกฎฟัซซีจะมีค่าเท่ากับจำนวนกลุ่มที่กำหนด ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการออฟติไมซ์เพื่อระบุหาจำนวนกลุ่มหรือกฎฟัซซีที่เหมาะสม โดยประยุกต์ใช้ค่าเกณฑ์ $J(c)$ เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดสินจำนวนกฎที่เหมาะสม ค่าเกณฑ์นี้เป็นการพิจารณาค่าความแตกต่างระหว่างค่าความแปรปรวนของข้อมูลภายในกลุ่มและค่าความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม จำนวนกลุ่มที่เหมาะสมจะต้องทำให้ได้ค่าความแปรปรวนในแต่ละกลุ่มมีค่าต่ำที่สุดและให้ค่าความแปรปรวนระหว่างกลุ่มมีค่าสูงสุด การทำงานของขั้นตอนนี้แสดงดังรูปที่ 4.2

ขั้นตอนที่ 3 การกำหนดฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไขของกฎ

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



รูปที่ 3.1 วิธีการกำหนดฟังก์ชันสมาชิกจากฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์

สำหรับรายละเอียดเกี่ยวกับฟัซซีคลัสเตอริงได้แสดงไว้ในบทที่ 4

3.5.2 การระบุหาพารามิเตอร์ของแบบจำลอง

ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองฟัซซีประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ในส่วนเงื่อนไขของกฎและค่าพารามิเตอร์ในส่วนของผลของกฎ ค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไข ทำการระบุได้โดยใช้ฟัซซีคลัสเตอริง ส่วนค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลของกฎหรือค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้นของแบบจำลองฟัซซีแบบทากาจิ-ซูเกโน สามารถหาได้โดยการประยุกต์ใช้วิธีลีสท์สแควร์

สมมติให้แบบจำลองฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno แสดงได้เป็นกฎเงื่อนไขดังนี้

$$
\begin{aligned}
&R^{1} : If\ x_{1}\ is\ A_{1}^{1},...,and\ x_{k}\ is\ A_{k1}^{1}\ \ Then\ y=p_{0}^{1}+p_{1}^{1}.x_{1}+...+p_{k}^{1}.x_{k} \\
&\vdots \\
&R^{n} : If\ x_{1}\ is\ A_{1}^{n},...,and\ x_{k}\ is\ A_{k1}^{n}\ \ Then\ y=p_{0}^{n}+p_{1}^{n}.x_{1}+...+p_{k}^{n}.x_{k}
\end{aligned}
\tag{3.25}
$$

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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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)

$$X = \begin{bmatrix} w_{11},..., & w_{n1}, x_{11} . w_{11},..., & x_{11} . w_{n1},... & \\ \cdot & ..., & x_{11} . w_{n1},..., & x_{k1}.w_n \\ \cdot & & & \cdot \\ w_{1m},..., & w_{nm}, x_{1m} . w_{1m},..., & x_{1m}.w_{1m},... & \cdot \\ & ..., & x_{k1}. w_{1m},..., & x_{k1}. w_{nm} \end{bmatrix} \tag{3.30}$$

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

โดยที่ $\wedge$ เป็นตัวดำเนินการ *Min*

$$Y = [y_1, ..., y_m]^T \tag{3.32}$$

$$P = [p_0^1, ..., p_0^n, p_1^1, ..., p_1^n, p_k^1, ..., p_k^n]^T \tag{3.33}$$

ดังนั้นเวคเตอร์พารามิเตอร์ (P) คำนวณได้จากสมการที่ (3.34)

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

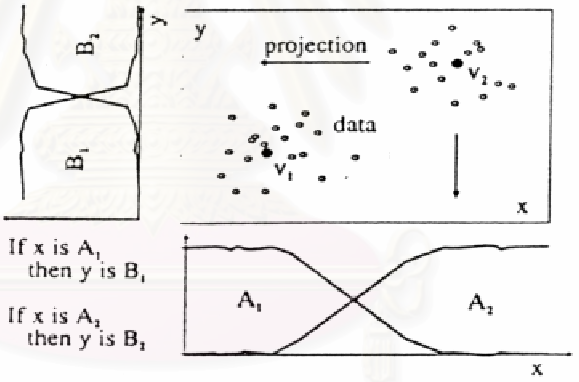
จะได้ค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลของแบบจำลองฟัซซี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ฟัซซีคลัสเตอริงและตัวควบคุมฟัซซี

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



รูปที่ 4.1 การระบุหากฎฟัซซีโดยวิธีคลัสเตอริง

แนวคิดของฟัซซีคลัสเตอริงแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ด้วยวิธีการนี้กฎฟัซซีสามารถหาได้โดยฉายกลุ่มฟัซซีไปบนตัวแปรของแบบจำลอง ในรูปที่ 4.1 แสดงเซตของข้อมูลที่สามารถแยกได้เป็น 2 กลุ่ม ดังนั้นจึงมีกฎฟัซซีจำนวน 2 กฎ รูปแบบฟังก์ชันสมาชิกที่ได้โดยการฉายของกลุ่มฟัซซีขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของข้อมูล

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

4.1 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-มีนเหมาะสำหรับข้อมูลที่กระจายตัวอยู่รอบๆจุดศูนย์กลางของกลุ่มคือเวคเตอร์ 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

$$\mu_{ik} \in [0,1] \qquad (1 \le i \le c, 1 \le k \le n) \tag{4.1}$$

สามารถเขียนพาร์ทิชันเมตริกซ์ซึ่งแสดงค่าความเป็นสมาชิกของข้อมูลแต่ละจุดในแต่ละกลุ่มดังนี้

$$U = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \cdots & \mu_{1n} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \cdots & \mu_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ \mu_{c1} & \mu_{c2} & \cdots & \mu_{cn} \end{bmatrix} \tag{4.2}$$

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

สำหรับจำนวนกฎที่เหมาะสมสามารถหาได้โดยการหาค่าที่น้อยที่สุด (Minimizing) ของ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function, $J(c)$) ดังสมการนี้

$$J(c)=\sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{c}(\mu_{ik})^{w}(d_{ik})^{2} \tag{4.3}$$

โดยที่ $w \in (1,\infty)$ เรียกว่าดัชนีฟัซซี (Fuzziness Index) เป็นค่าถ่วงน้ำหนักค่าความเป็นสมาชิกซึ่งยังไม่มีการรายงานถึงการหาค่า w ที่เหมาะสม แต่ส่วนใหญ่นิยมใช้ $w=2$ และ d_{ik} เป็นระยะทางระหว่างข้อมูลกับจุดศูนย์กลางของกลุ่ม นิยามตามสมการที่ (4.4)

$$d_{ik}^{2}=\left\| x_{k}-v_{i}\right\|^{2}-\left\| v_{i}-\bar{x}\right\|^{2} \tag{4.4}$$

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

4.2 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 (4.5)

$$v_{ij}^{(t)}=\frac{\sum_{k=1}^{n}(u_{ik}^{(t)})^{w}.x_{kj}}{\sum_{k=1}^{n}(u_{ik}^{(t)})^{w}} \tag{4.5}$$

3. คำนวณระยะทางระหว่างจุดข้อมูลแต่ละจุดกับจุดศูนย์กลางของแต่ละกลุ่มหรือความคล้ายคลึงภายในกลุ่ม โดยใช้สมการที่ (4.6)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$d_{ik}^{(t)} = \left\| x_k - v_i^{(t)} \right\| = \left[\sum_{j=1}^{m} (x_{kj} - v_{ij}^{(t)})^2 \right]^{1/2} \qquad (4.6)$$

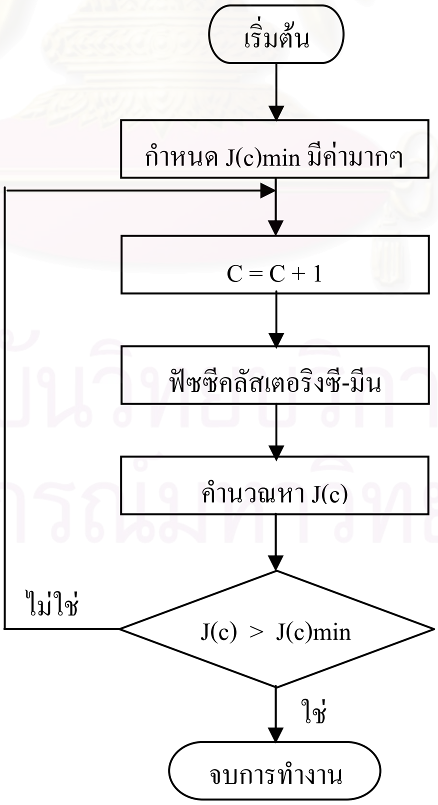
4. คำนวณค่าความเป็นสมาชิกค่าใหม่ของข้อมูลแต่ละจุด จากสมการที่ (4.7)

$$\mu_{ik}^{(t+1)} = \frac{1}{\left[\sum_{j=1}^{c} \left(\frac{d_{ik}^{(t)}}{d_{jk}^{(t)}} \right)^{2/(w-1)} \right]} \qquad (4.7)$$

5. การคำนวณวนซ้ำจะหยุดเมื่อการคำนวณเป็นไปตามสมการที่ (4.8) มิเช่นนั้นจะกลับไปที่ ขั้นตอนที่ 2 โดย $t = t + 1$

$$Max(Max(U_{ik}^{(t+1)} - U_{ik}^{(t)})) \leq \varepsilon \qquad (4.8)$$

โดย ε คือค่าระดับความถูกต้อง ในงานวิจัยนี้กำหนดให้เป็น 0.01



รูปที่ 4.2 แผนผังการทำงานของการกำหนดจำนวนกฎฟัซซีที่เหมาะสม

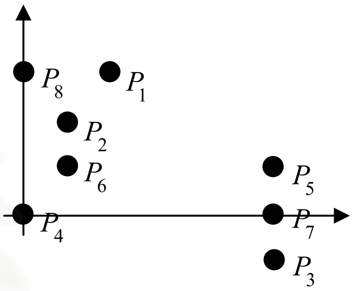
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ฟัซซีคลัสเตอริงแบบซี-มีน

สมมติว่ามีข้อมูลทั้งหมด 8 จุด ($n=8$) และต้องการแบ่งข้อมูลเป็น 2 กลุ่ม ($c=2$)

$$X=\{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8\}$$

Point	x	y
P_1	2.0	3.0
P_2	1.0	2.0
P_3	5.0	-1.0
P_4	0.0	0.0
P_5	5.0	1.0
P_6	1.0	1.0
P_7	5.0	0.0
P_8	0.0	3.0



จะเห็นได้ว่าข้อมูลประกอบด้วยโคออดิเนต x และ y ดังนั้น $m=2$ ตัวอย่างนี้ได้กำหนด $w=2$ และ $\varepsilon=0.01$ จากนั้นคำนวณตามอัลกอริธึม

ขั้นตอนที่ 1 สมมติพาร์ทิชันเมตริกซ์เริ่มต้น $U^{(0)}$

ข้อมูลจุดที่ k	1	2	3	4	5	6	7	8	รวม
กลุ่มที่ $i=1$	0.7	0.9	0.1	0.7	0.1	0.9	0.1	0.7	1
กลุ่มที่ $i=2$	0.3	0.1	0.9	0.3	0.9	0.1	0.9	0.3	1

$$U^{(0)} = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.9 & 0.1 & 0.7 & 0.1 & 0.9 & 0.1 & 0.7 \\ 0.3 & 0.1 & 0.9 & 0.3 & 0.9 & 0.1 & 0.9 & 0.3 \end{bmatrix}$$

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหาจุดศูนย์กลาง v_{ij}

$v_{11} = [0.7^2(2.0) + 0.9^2(1.0) + 0.1^2(5.0) + 0.7^2(0.0) + 0.1^2(5.0) + 0.9^2(1.0) + 0.1^2(5.0) + 0.7^2(0.0)]/[0.7^2 + 0.9^2 + 0.1^2 + 0.0^2 + 0.1^2 + 0.9^2 + 0.1^2 + 0.7^2]$

$= [0.98 + 0.81 + 0.05 + 0.00 + 0.05 + 0.81 + 0.05 + 0.00]/$

$[0.49 + 0.81 + 0.01 + 0.49 + 0.00 + 0.81 + 0.01 + 0.49] = 2.75 / 2.63 = 1.05$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$v_{12} = [0.7^2(3.0) + 0.9^2(2.0) + 0.1^2(-1.0) + 0.7^2(0.0) + 0.1^2(1.0) + 0.9^2(1.0) + 0.1^2(0.0) + 0.7^2(3.0)]/[0.7^2 + 0.9^2 + 0.1^2 + 0.0^2 + 0.1^2 + 0.9^2 + 0.1^2 + 0.7^2]$

$= [1.47 + 1.62 - 0.01 + 0.00 + 0.01 + 0.81 + 0.00 + 1.47]/ 3.12 = 1.72$

$v_{21} = [0.3^2(2.0) + 0.1^2(1.0) + 0.9^2(5.0) + 0.3^2(0.0) + 0.9^2(5.0) + 0.1^2(1.0) + 0.9^2(5.0) + 0.3^2(0.0)]/[0.3^2 + 0.1^2 + 0.9^2 + 0.3^2 + 0.9^2 + 0.1^2 + 0.9^2 + 0.3^2]$

$= [0.18 + 0.01 + 4.05 + 0.00 + 4.05 + 0.01 + 4.05 + 0.00]/$

$[0.09 + 0.01 + 0.81 + 0.09 + 0.81 + 0.01 + 0.81 + 0.09] = 12.35 / 2.72 = 4.54$

$v_{22} = [0.3^2(3.0) + 0.1^2(2.0) + 0.9^2(-1.0) + 0.3^2(0.0) + 0.9^2(1.0) + 0.1^2(1.0) + 0.9^2(0.0) + 0.3^2(3.0)]/[0.3^2 + 0.1^2 + 0.9^2 + 0.3^2 + 0.9^2 + 0.1^2 + 0.9^2 + 0.3^2]$

$= [0.27 + 0.02 - 0.81 + 0.00 + 0.81 + 0.01 + 0.00 + 0.27]/$

$[0.09 + 0.01 + 0.81 + 0.09 + 0.81 + 0.01 + 0.81 + 0.09] = 0.57 / 2.72 = 0.21$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณระยะทาง d_{ik}

สำหรับกลุ่มที่ 1

$d_{11} = [(2.0 - 1.05)^2 + (3.0 - 1.72)^2]^{1/2} = [0.95^2 + 1.28^2]^{1/2} = (0.9025 + 1.6384)^{1/2} = 1.59$

$d_{12} = [(1.0 - 1.05)^2 + (2.0 - 1.72)^2]^{1/2} = [-0.05^2 + 0.28^2]^{1/2} = (0.0025 + 0.0784)^{1/2} = 0.28$

$d_{13} = [(5.0 - 1.05)^2 + (-1.0 - 1.72)^2]^{1/2} = [3.95^2 + 2.78^2]^{1/2} = (15.6025 + 7.3984)^{1/2} = 4.80$

$d_{14} = [(0.0 - 1.05)^2 + (0.0 - 1.72)^2]^{1/2} = [-1.05^2 + 1.72^2]^{1/2} = (1.1025 + 2.9584)^{1/2} = 2.02$

$d_{15} = [(5.0 - 1.05)^2 + (1.0 - 1.72)^2]^{1/2} = [3.95^2 + 0.72^2]^{1/2} = (15.6025 + 0.5184)^{1/2} = 4.02$

$d_{16} = [(1.0 - 1.05)^2 + (1.0 - 1.72)^2]^{1/2} = [-0.05^2 + 0.72^2]^{1/2} = (0.0025 + 0.5184)^{1/2} = 0.72$

$d_{17} = [(5.0 - 1.05)^2 + (0.0 - 1.72)^2]^{1/2} = [3.95^2 + 1.72^2]^{1/2} = (15.6025 + 2.9584)^{1/2} = 4.31$

$d_{18} = [(0.0 - 1.05)^2 + (3.0 - 1.72)^2]^{1/2} = [-1.05^2 + 1.28^2]^{1/2} = (1.1025 + 1.6384)^{1/2} = 1.66$

สำหรับกลุ่มที่ 2

$d_{11} = [(2.0 - 4.54)^2 + (3.0 - 0.21)^2]^{1/2} = [-2.54^2 + 2.79^2]^{1/2} = (6.4516 + 7.7841)^{1/2} = 3.77$

$d_{12} = [(1.0 - 4.54)^2 + (2.0 - 0.21)^2]^{1/2} = [-3.54^2 + 1.79^2]^{1/2} = (12.5316 + 3.2041)^{1/2} = 3.97$

$d_{13} = [(5.0 - 4.54)^2 + (-1.0 - 0.21)^2]^{1/2} = [0.46^2 + 1.21^2]^{1/2} = (0.2116 + 1.4641)^{1/2} = 1.29$

$d_{14} = [(0.0 - 4.54)^2 + (0.0 - 0.21)^2]^{1/2} = [-4.54^2 + 0.21^2]^{1/2} = (20.6116 + 0.0441)^{1/2} = 4.54$

$d_{15} = [(5.0 - 4.54)^2 + (1.0 - 0.21)^2]^{1/2} = [0.46^2 + 0.79^2]^{1/2} = (0.2116 + 0.6241)^{1/2} = 0.91$

$d_{16} = [(1.0 - 4.54)^2 + (1.0 - 0.21)^2]^{1/2} = [-3.54^2 + 0.79^2]^{1/2} = (12.5316 + 0.6241)^{1/2} = 3.63$

$d_{17} = [(5.0 - 4.54)^2 + (0.0 - 0.21)^2]^{1/2} = [0.46^2 + 0.21^2]^{1/2} = (0.2116 + 0.0441)^{1/2} = 0.51$

$d_{18} = [(0.0 - 4.54)^2 + (3.0 - 0.21)^2]^{1/2} = [-4.54^2 + 2.79^2]^{1/2} = (20.6116 + 7.7841)^{1/2} = 4.33$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่าความเป็นสมาชิกค่าใหม่

สำหรับกลุ่มที่ 1

$$\mu_{11} = 1/[(d_{11}/d_{11})^2 + (d_{11}/d_{12})^2] = 1/[1+(d_{11}/d_{12})^2] = 0.83$$

$$\mu_{12} = 1/[(d_{21}/d_{21})^2 + (d_{21}/d_{22})^2] = 1/[1+(d_{21}/d_{22})^2] = 0.99$$

$$\mu_{13} = 1/[(d_{31}/d_{31})^2 + (d_{31}/d_{32})^2] = 1/[1+(d_{31}/d_{32})^2] = 0.06$$

$$\mu_{14} = 1/[(d_{41}/d_{41})^2 + (d_{41}/d_{42})^2] = 1/[1+(d_{41}/d_{42})^2] = 0.85$$

$$\mu_{15} = 1/[(d_{51}/d_{51})^2 + (d_{51}/d_{52})^2] = 1/[1+(d_{51}/d_{52})^2] = 0.04$$

$$\mu_{16} = 1/[(d_{61}/d_{61})^2 + (d_{61}/d_{62})^2] = 1/[1+(d_{61}/d_{62})^2] = 0.96$$

$$\mu_{17} = 1/[(d_{71}/d_{71})^2 + (d_{71}/d_{72})^2] = 1/[1+(d_{71}/d_{72})^2] = 0.01$$

$$\mu_{18} = 1/[(d_{81}/d_{81})^2 + (d_{81}/d_{82})^2] = 1/[1+(d_{81}/d_{82})^2] = 0.92$$

สำหรับกลุ่มที่ 2 คำนวณในทำนองเดียวกันเช่น

$$\mu_{21} = 1/[(d_{12}/d_{21})^2 + (d_{12}/d_{11})^2] = 1/[1+(d_{12}/d_{11})^2] = 0.17$$

จะได้พาร์ทิชันเมตริกซ์ใหม่ดังนี้

$$U^{(1)} = \begin{bmatrix} 0.83 & 0.99 & 0.06 & 0.85 & 0.04 & 0.96 & 0.01 & 0.92 \\ 0.17 & 0.01 & 0.94 & 0.15 & 0.96 & 0.04 & 0.99 & 0.08 \end{bmatrix}$$

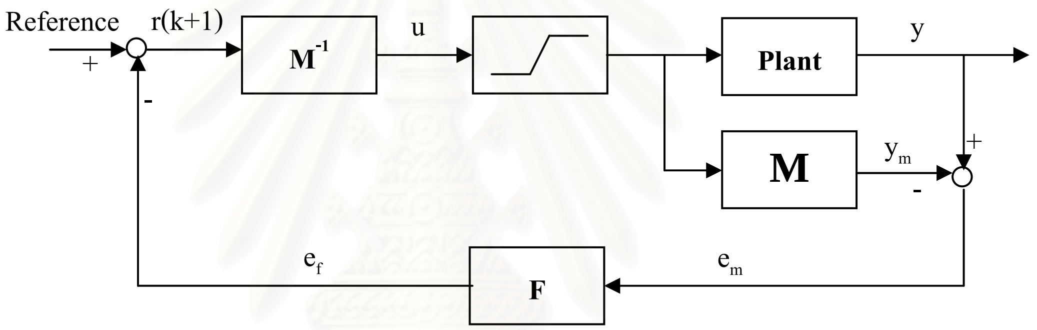
ขั้นตอนที่ 5 คำนวณตามสมการที่ (4.8) หลังจากการคำนวณซ้ำรอบที่ 3 พจน์ทางซ้ายของสมการที่ (4.8) เหลือ 0.0032 ซึ่งน้อยกว่า ε ที่กำหนดคือ 0.01 เป็นอันสิ้นสุดการคำนวณ

4.4 ตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลอง (Fuzzy Model-Based Controller)

ตัวควบคุมฟัซซีถูกประยุกต์ใช้ครั้งแรกโดย Mamdani (1974) การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีในสมัยแรกๆ เป็นการออกแบบโดยอาศัยความรู้และประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ โดยผู้ออกแบบเป็นผู้ตั้งกฎควบคุมเอง แต่ในบางครั้งการออกแบบกฎโดยอาศัยประสบการณ์อาจไม่ครอบคลุมหรือขาดความเข้าใจในบางส่วนของกระบวนการ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาวิธีการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีจากแบบจำลองฟัซซี ซึ่งเรียกตัวควบคุมชนิดนี้ว่าตัวควบคุมฟัซซีแบบ

อาศัยแบบจำลอง โดยที่แบบจำลองเปรียบเสมือนเป็นฐานความรู้ของตัวควบคุม ดังนั้นตัวควบคุมที่อาศัยแบบจำลองจำเป็นต้องมีแบบจำลองที่มีความถูกต้องและเหมาะสม เพื่อให้สามารถทำนายค่าเอาท์พุทและพฤติกรรมของระบบได้อย่างถูกต้อง

โครงสร้างของการควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นลักษณะของการควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองภายใน (Internal Model Control, IMC) เพียงแต่แบบจำลองที่ใช้ในการควบคุมถูกเปลี่ยนเป็นแบบจำลองฟัซซี เพื่อให้สามารถใช้ได้กับกระบวนการที่ไม่สามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้หรือกระบวนการที่มีความยุ่งยากซับซ้อน โดยโครงสร้างของการควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองภายในนี้ประกอบด้วย 4 ส่วนคือ แบบจำลองฟัซซี (M) ตัวควบคุมที่ได้จากการผกผันแบบจำลองฟัซซี (M^{-1}) ขอบเขตของสัญญาณควบคุม และตัวกรองสัญญาณ (F) ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แผนผังตัวควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองภายใน

ลักษณะสำคัญของการควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองภายในนี้ สามารถจัดการกับความแตกต่างระหว่างเอาท์พุทที่ได้จากแบบจำลองและเอาท์พุทที่ได้จากกระบวนการจริง โดยที่ค่าเอาท์พุทจากตัวควบคุมจะถูกส่งไปใช้ในการควบคุมกระบวนการการและส่งไปที่แบบจำลองกระบวนการที่อยู่ขนานกับกระบวนการจริง ซึ่งเป็นแบบจำลองที่เหมือนกันกับแบบจำลองที่อยู่ในตัวควบคุมด้วย ค่าความแตกต่างของเอาท์พุทของกระบวนการจริงและเอาท์พุทของแบบจำลองที่ออกมานั้น แสดงถึงความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองและตัวรบกวนกระบวนการ ค่าความแตกต่างนี้ถูกส่งกลับเข้าไปที่ตัวควบคุมเพื่อใช้ในการชดเชยความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองและตัวรบกวนที่เกิดขึ้นในกระบวนการจริงซึ่งไม่มีในแบบจำลอง

จากกฎฟัซซี ส่วนผลของกฎฟัซซีดังสมการ (4.9)

$$y_i(k+1) = a_i\, x(k) + b_i u(k) + c_i \qquad i \text{ คือจำนวนกฎฟัซซี} \qquad (4.9)$$

ค่าเอาท์พุทจริง $y(k+1)$ หาได้ดังนี้

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

โดยค่า w_i คือค่าความเป็นสมาชิกทั้งหมดในส่วนเงื่อนไข คำนวณได้จากสมการ (3.20)

K คือจำนวนกฎทั้งหมด

จากสมการ (4.9) สามารถเขียนในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$y(k+1) = f(x(k)) + g(x(k))u(k) \tag{4.11}$$

การคำนวณค่าเอาท์พุทของตัวควบคุม $u(k)$ ที่ทำให้เอาท์พุทของกระบวนการที่เวลาถัดไปมีค่าเท่ากับเอาท์พุทที่ต้องการหรืออ้างอิง $r(k+1)$ ทำโดยการผกผันสมการ (4.11) ได้ดังนี้

$$u(k) = \frac{y(k+1) - f(x(k))}{g(x(k))} \tag{4.12}$$

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

$$u(k) = \frac{r(k+1) - \sum_{i=1}^{K} w_i (a_i x(k) + c_i)}{\sum_{i=1}^{K} w_i b_i} \tag{4.13}$$

สำหรับตัวกรองสัญญาณทำหน้าที่ในการกรองสัญญาณรบกวนจากการวัดและเพื่อให้การควบคุมมีเสถียรภาพในกรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลอง สมการของตัวกรองที่ใช้ในการควบคุมแสดงดังสมการ (4.14)

$$e_f(k) = (e_f(k-1) x G_e) + (e_m(k) x (1-G_e)) \tag{4.14}$$

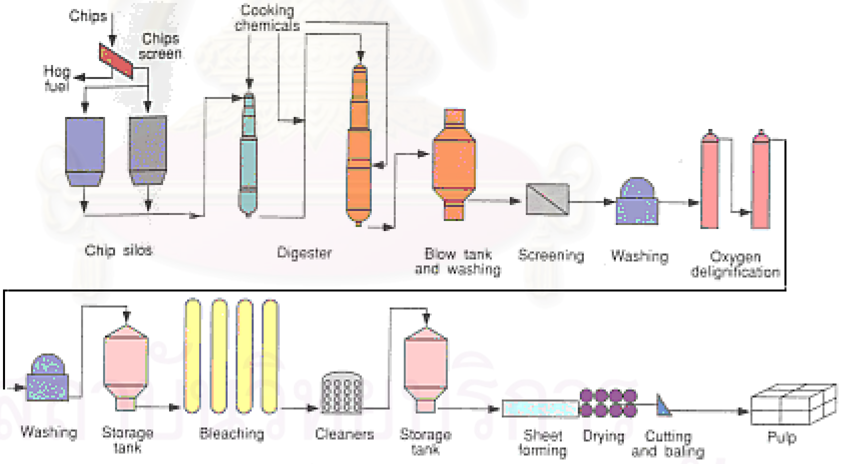
โดยค่า G_e คือแฟกเตอร์การปรับจูน

บทที่ 5

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ

เนื้อหาในบทนี้อธิบายถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวย่อยเยื่อกระดาษที่ใช้สร้างเป็นโปรแกรมเลียนแบบพลวัตของกระบวนการจริงเพื่อทดสอบตัวควบคุม ซึ่งต้องใช้ตัวควบคุมฟัซซีที่อาศัยแบบจำลองในการควบคุมอัตราการกำจัดลิกนิน (Delignification) ให้เหมาะสม

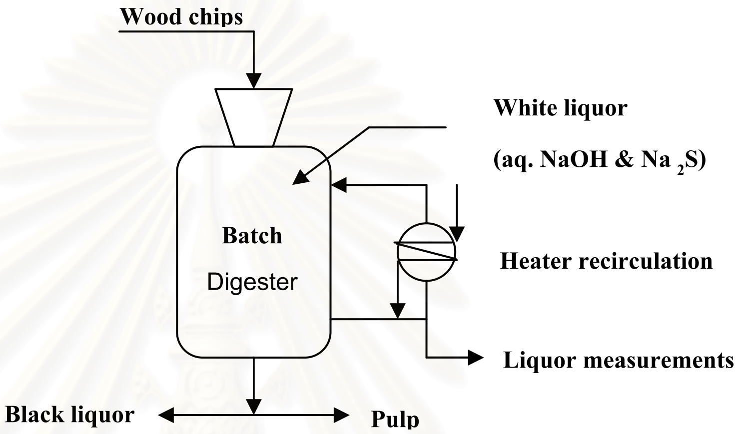
ตัวย่อยเยื่อกระดาษเป็นหน่วยปฏิบัติการที่สำคัญในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ ซึ่งจะทำหน้าที่ในการเปลี่ยนชิ้นไม้ให้เป็นเยื่อไม้ คุณภาพของเยื่อไม้ขึ้นอยู่กับค่าแคปปา (Kappa Number) จึงต้องควบคุมค่าแคปปาให้เป็นไปตามต้องการ ซึ่งค่าแคปปานี้บ่งบอกถึงอัตราการกำจัดลิกนินหรือปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อกระดาษ มิเช่นนั้นแล้วจะต้องสิ้นเปลืองสารเคมีในขั้นตอนการฟอกเยื่อ (Bleaching of Pulp) และนำไปสู่การได้มาของของเสียที่เป็นพิษ (Toxic Wastes) ต่อสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 5.1 แผนผังของกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ

การผลิตเยื่อกระดาษสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน แต่โดยทั่วไปแล้วมักใช้กระบวนการคราฟท์ (Kraft process) ซึ่งกระบวนการนี้จะใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะในการผลิต โดยผ่านขั้นตอนการกำจัดลิกนินออกจากเซลลูโลสในไม้ การกำจัดลิกนินนั้นอาศัยสารละลายสีขาว (White liquor) ที่ประกอบด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodiumhydroxide) และโซเดียมซัลไฟด์ (Sodiumsulphide) ในปริมาณที่มากเกินพอ และความเป็นกรด-เบส (pH) มากกว่า 12 มีการให้

ความร้อนโดยไหลเวียนของเหลวบางส่วนจากเครื่องปฏิกรณ์ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายนอก ซึ่งอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาได้ดีนั้นอยู่ในช่วง 160-180 องศาเซลเซียส หลังจากครบกำหนดเวลา 2 ชั่วโมง วาล์วที่ก้นถังปฏิกรณ์จะถูกเปิดออกแล้วความดันจะผลักดันชิ้นไม้ที่อ่อนนุ่มแล้วให้เคลื่อนไปยังถังเก็บ ซึ่งแรงที่ดันชิ้นไม้นั้นจะทำให้ชิ้นไม้แตกย่อยออกเป็นเส้นใยหรือเยื่อไม้นั่นเองและเยื่อไม้นี้ก็จะผ่านหน่วยการผลิตหรือขั้นตอนอื่นๆ ต่อไปจนได้ผลิตภัณฑ์เป็นกระดาษที่สมบูรณ์



รูปที่ 5.2 ตัวย่อยเยื่อกระดาษแบบกะ

การผลิตเยื่อกระดาษเพื่อให้ได้คุณภาพที่ต้องการนั้นจะต้องทำการควบคุมค่าแคปปาค่าสุดท้ายให้เข้าใกล้ค่าเป้าหมายมากที่สุด โดยการปรับตัวแปรปรับซึ่งก็คืออุณหภูมิและอัตราการไหลของสายหมุนเวียน แต่มีปัญหาสำหรับการควบคุมตัวย่อยเยื่อกระดาษอยู่ 2 ประการคือ ขากความเข้าใจในกระบวนการและค่าแคปปาเป็นค่าที่ไม่สามารถวัดได้ จึงต้องทำการประมาณค่าจากค่าอื่นที่วัดได้ ค่าเหล่านั้นก็คืออุณหภูมิของสารละลายในถังปฏิกรณ์และปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสายหมุนเวียน ซึ่งสามารถวัดได้จากค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย (Conductivity)

5.1 สมมติฐาน (Assumptions) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1. สารละลายอยู่ในสภาวะสมดุลกับชิ้นไม้ ดังนั้นองค์ประกอบในสารละลายสามารถอ้างอิงถึงองค์ประกอบในไม้ได้
2. การแพร่ของสารละลายเข้าสู่ชิ้นไม้มีอัตราการแพร่เท่ากันทุกทิศทาง

3. เวลาที่ใช้ในการถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer) มีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงไม่มีความแตกต่างของอุณหภูมิ (Temperature gradients) เกิดขึ้นในชิ้นไม้
4. กระบวนการผลิตเยื่อนี้เป็นปฏิกิริยาผันกลับไม่ได้
5. องค์ประกอบหลักของไม้คือ ลิกนิน คาร์โบไฮเดรต และ เซลลูโลส ส่วนองค์ประกอบอื่นๆ ละลายในทันทีที่สัมผัสกับสารละลายในเครื่องปฏิกรณ์

5.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวย่อยเยื่อกระดาษ

5.2.1 สมดุลมวลสาร (Mass balance)

ความเข้มข้นใน Wood phase

$$\frac{dX_i}{dt} = R_i \qquad (1 \leq i \leq 5) \tag{5.1}$$

โดย X_i คือ สัดส่วนเชิงมวลขององค์ประกอบ i ในไม้

R_i คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของแต่ละองค์ประกอบ i ในไม้

สมการ (5.1) แสดงสมดุลองค์ประกอบในไม้ โดยที่ องค์ประกอบที่ 1 คือ ลิกนินชนิดที่ 1 องค์ประกอบที่ 2 คือ ลิกนินชนิดที่ 2 องค์ประกอบที่ 3 คือ เซลลูโลส องค์ประกอบที่ 4 คือ เฮมิเซลลูโลสชนิดที่ 1 องค์ประกอบที่ 5 คือ เฮมิเซลลูโลสชนิดที่ 2

ความเข้มข้นใน Entrapped liquor phase

$$V_e \frac{dC_{e_i}}{dt} = M_w G_i - M_i A(C_{e_i} - C_{f_i}) \qquad (1 \leq i \leq 4) \tag{5.2}$$

โดยที่ V_e คือปริมาตรของของเหลวในเอนแทพเฟสหรือในรูพรุนของไม้

C_{e_i} คือความเข้มข้นขององค์ประกอบ i ในรูพรุนของไม้

C_{f_i} คือความเข้มข้นขององค์ประกอบ i ในของเหลวฟรีเฟส

M_w คือมวลของไม้แห้ง

M_i คือค่าคงที่การถ่ายโอนมวลสารแสดงในสมการ (5.12)

A คือพื้นที่สัมผัสที่ใช้ในการถ่ายโอนมวลสาร

G_i แสดงในสมการที่ (5.8)-(5.11)

ความเข้มข้นใน Free liquor phase

$$V_f \frac{dC_{f_i}}{dt} = M_i A(C_{e_i} - C_{f_i}) - F_r (C_{f_i} - C_{r_i}) \quad (1 \le i \le 4) \tag{5.3}$$

โดยที่ V_f คือปริมาตรของของเหลวในฟรีเฟส

F_r คืออัตราการไหลของสายหมุนเวียน

สมการ (5.2) และ (5.3) แสดงสมดุลองค์ประกอบในเอนแทรพลิเควอร์ (Entrapped liquor) และ ฟรีลิเควอร์ (Free liqour) ตามลำดับ โดยที่องค์ประกอบที่ 1 คือ ลิกนินละลาย (Dissolved lignin) องค์ประกอบที่ 2 คือ ของแข็งละลาย (Dissolved solid) องค์ประกอบที่ 3 คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ องค์ประกอบที่ 4 คือ โซเดียมซัลไฟด์ องค์ประกอบที่ 5 คือ น้ำ

5.2.2 สมดุลพลังงาน (Energy balance)

อุณหภูมิ

$$K_t \frac{dT}{dt} = M_w \sum_{i=1}^{N_w} (-R_i)(-\Delta H_i) + F_r \sum_{i=1}^{N_f+1} C_{r_i} C_{p_r} (T_r - T) \tag{5.4}$$

โดย K_t คือค่าความจุความร้อนรวมแสดงดังสมการที่ (5.13)

ΔH_i คือความร้อนที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา

T คืออุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์

T_r คืออุณหภูมิของสายหมุนเวียน

C_{r_i} คือความเข้มข้นขององค์ประกอบ i ในสายในหมุนเวียนสมมติให้เท่ากับ C_f

C_{p_r} คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของ C_{r_i} สมมติให้เท่ากับ C_{p_f}

N คือจำนวนองค์ประกอบทั้งหมดในแต่ละเฟส

อัตราการเกิดปฏิกิริยา (Reaction rates)

$$R_i = -[k_{1_i} C_{e_3} + k_{2_i} C_{e_3}^a C_{e_4}^b](X_i - X_{u_i}) \tag{5.5}$$

$$k_{1_i} = A_{1_i} e^{-E_{1_i}/RT} \tag{5.6}$$

$$k_{2_i} = A_{2_i} e^{-E_{2_i}/RT} \quad (5.7)$$

โดยที่ k_{1i}, k_{2i} คือค่าคงที่ของปฏิกิริยาขององค์ประกอบ i ในไม้

A_{1i}, A_{2i} คือแฟกเตอร์ความถี่ขององค์ประกอบ i ในไม้

E_{1i}, E_{2i} พลังงานกระตุ้นขององค์ประกอบ i ในไม้

อัตราการเกิดใน Entrapped liquor phase (Generation rates in entrapped liquor)

$$Lignin: G_1 = -\sum_{j=1}^{2} R_j \quad (5.8)$$

$$Solid: G_2 = -\sum_{j=3}^{5} R_j \quad (5.9)$$

$$NaOH: G_3 = \sum_{j=1}^{5} S_{c_{3j}} R_j \quad (5.10)$$

$$NaSH: G_4 = \sum_{j=1}^{5} S_{c_{4j}} R_j \quad (5.11)$$

โดยที่ $S_{c_{ij}}$ คือสัมประสิทธิ์ Stoichiometric

สัมประสิทธ์การถ่ายเทมวลสารระหว่าง Entrapped liquor และ Free liquor phase (Mass transfer coefficient between entrpped liquor and free liquor phases)

$$M_i = M_{1_i} + M_{2_i} T \quad (5.12)$$

ค่าความจุความร้อนที่ใช้ในสมดุลพลังงาน (Total heat capacity used in the energy balance)

$$K_t = [M_w \sum_{i=1}^{N_w} Cp_{w_i} X_i + V_e \sum_{i=1}^{N_e+1} Cp_{e_i} C_{e_i} + V_f \sum_{i=1}^{N_f+1} Cp_{f_i} C_{f_i}] \quad (5.13)$$

โดยที่ C_{p_w} คือค่าความจุความร้อนจำเพาะขององค์ประกอบในไม้

C_{p_e} คือค่าความจุความร้อนจำเพาะขององค์ประกอบในเอนแทรพเฟส

C_{p_e} คือค่าความจุความร้อนจำเพาะขององค์ประกอบในฟรีเฟส

5.2.3 ค่าแคปปา (Kappa number)

$$K = 653.6(X_1 + X_2) \qquad (5.14)$$

ค่าแคปปาสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าแคปปากับสัดส่วนเชิงมวลของลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อไม้ ดังสมการที่ (5.14) ซึ่งอ้างอิงมาจาก Williams and Smith (1975)

จากสมการแบบจำลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่าเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนหรือเป็นกระบวนการมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง (High nonlinear process) โดยสังเกตได้จากสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาซึ่งมีพจน์ที่เป็นเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponential term) เป้าหมายของกระบวนการนี้คือต้องการควบคุมค่าแคปปาค่าสุดท้ายให้เข้าใกล้ค่าที่ต้องการภายในเวลา 2 ชั่วโมง โดยการปรับอุณหภูมิ (Tr) และอัตราการไหล (Fr) ของสายเหลวหมุนเวียน

ค่าแคปปาคือค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการกำจัดลิกนินออกจากไม้ และค่าแคปปาที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของไม้ และการนำเยื่อไม้ไปใช้งาน เช่นถ้าจะนำเยื่อไม้ไปผ่านกระบวนการฟอก ค่าแคปปาที่เหมาะสมเมื่อใช้ไม้เนื้ออ่อนคือ 20-35 สำหรับไม้เนื้อแข็งคือ 12-18 สำหรับการนำเยื่อไปผลิตถุงกระดาษ ค่าแคปปา 35-50 เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ค่าที่ต้องการคือค่าแคปปาที่ 50

ตัวแปรที่ใช้ในการประมาณค่าแคปปามีด้วยกัน 4 ตัวคือ อุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งสามารถวัดได้โดยตรง ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นของของแข็งรวม (Total Solid Concentration) และปริมาณลิกนิน (Lignin Content) การวัดค่าของตัวแปร 3 ตัวหลังอาศัยเทคนิคการวัดค่าการนำไฟฟ้า การวัดค่าการดูดซับรังสีอัลตราไวโอเลต (UV absorption) และการวัดค่าดัชนีการหักเหของแสง (Refractive Index) ตามลำดับ สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ค่าวัดเพียง 2 ตัวเท่านั้นคือ อุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์และความเข้มข้นของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากความเข้มข้นของของแข็งรวมมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากและแปรตามการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ของลิกนิน สำหรับปริมาณลิกนินขึ้นกับความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ไปเช่นเดียวกัน ดังนั้นวัดเพียงค่าอุณหภูมิและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ก็เพียงพอ

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแสดงในตารางที่ 5.1 ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง สำหรับตารางที่ 5.2 แสดงค่าเริ่มต้นของตัวแปรสเตท ส่วนสภาวะและข้อจำกัดในการปฏิบัติการแสดงไว้ในตารางที่ 5.3 และ 5.4 ตามลำดับ

ตาราง ที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สัญลักษณ์	ค่าพารามิเตอร์	หน่วย
A_{1i}	19.41, $4.16 x 10^{12}$, 445.12, 108.00, $7.05 x 10^{5}$	$h^{-1}(kg/m^{3})^{-1}$
A_{2i}	$7.00 x 10^{3}$, $2.75 x 10^{4}$, $8.30 x 10^{3}$, $6.00 x 10^{3}$, $1.75 x 10^{4}$	$h^{-1}(kg/m^{3})^{-a-b}$
E_{1i}	$6.45 x 10^{3}$, $29.10 x 10^{3}$,$17.55 x 10^{3}$,$14.85 x 10^{3}$,$22.05 x 10^{3}$	kcal / kg-mol
E_{2i}	$21.90 x 10^{3}$,$12.35 x 10^{3}$,$19.85 x 10^{3}$, $17.45 x 10^{3}$,$18.25 x 10^{3}$	kcal / kg-mol
a	0.5	-
b	0.5	-
X_{ui}	0, 0, 0.071, 0.025, 0	mass fraction
S_{c3j}	0.166, 0.166, 0.395, 0.395, 0.395	kg/kg
S_{c4j}	0.0546, 0.0546, 0, 0, 0	kg/kg
M_{1i}	-0.07	m/h
M_{2i}	$2.00 x 10^{-4}$	m / h.K
dH_{i}	102.8	kcal/kg wood component reacted
Cp_{wi}	0.36	kcal / kg.K
Cp_{ei}	1	kcal / kg.K
Cp_{fi}	1	kcal / kg.K
A	105.75	m^{2}
V_{e}	0.1175	m^{3}
V_{f}	0.2325	m^{3}

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.2 ค่าเริ่มต้นของตัวแปรสเตท

ตัวแปร	ค่าตัวแปร	หน่วย
X_1	0.0528	mass fraction
X_2	0.2112	mass fraction
X_3	0.4852	mass fraction
X_4	0.1428	mass fraction
X_5	0.0722	mass fraction
C_{e1}	0	kg/m^3
C_{e2}	0	kg/m^3
C_{e3}	0	kg/m^3
C_{e4}	0	kg/m^3
C_{f1}	1	kg/m^3
C_{f2}	2	kg/m^3
C_{f3}	47.6327	kg/m^3
C_{f4}	11.3535	kg/m^3
T	353	K

ตารางที่ 5.3 ค่าสภาวะในการปฏิบัติการ

สภาวะในการดำเนินการ	ค่าสภาวะ	หน่วย
มวลของไม้แห้งทั้งหมด	100	kg
ขนาดของชิ้นไม้	0.08 x 0.08 x 0.005	m
ความพรุนของชิ้นไม้	0.5	-
ความหนาแน่นของไม้	42.5	kg/m^3
ค่าแคปปาเริ่มต้น	172.5504	-
ค่าแคปปาที่ต้องการ	50	-
เวลาที่ใช้ในการปฏิบัติการ	2	h
เวลาในการสุ่มตัวอย่าง	0.05	h

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.4 ข้อจำกัดในการปฏิบัติการ

ข้อจำกัด	**ค่า**	**หน่วย**
Tr max	523	K
Tr min	353	K
Fr max	1	m^3/h
Fr min	0.5	m^3/h
dTr	10	K
dFr	0.1	m^3/h

ในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และพารามิเตอร์ของ Lee และ Datta (1994) ยกเว้นค่าพลังงานกระตุ้นอันดับหนึ่งและสองขององค์ประกอบในไม้ทั้ง 5 โดยปรับค่าจากงานวิจัยของ Lee และ Datta ซึ่งแสดงในตารางที่ 5.5 เนื่องจากเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดของ Lee และ Datta (1994) พบว่ากระบวนการไม่เกิดปฏิกิริยาและการเปลี่ยนแปลงใดๆ แสดงผลดังรูปที่ 5.3 เห็นได้ว่าค่าแคปปา สัดส่วนมวลขององค์ประกอบทั้ง 5 ของไม้ รวมถึงปริมาณสารละลายไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าใดๆ แสดงว่าไม่เกิดปฏิกิริยาใดๆขึ้น

การปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อใช้ในงานวิจัยมีหลักการดังนี้

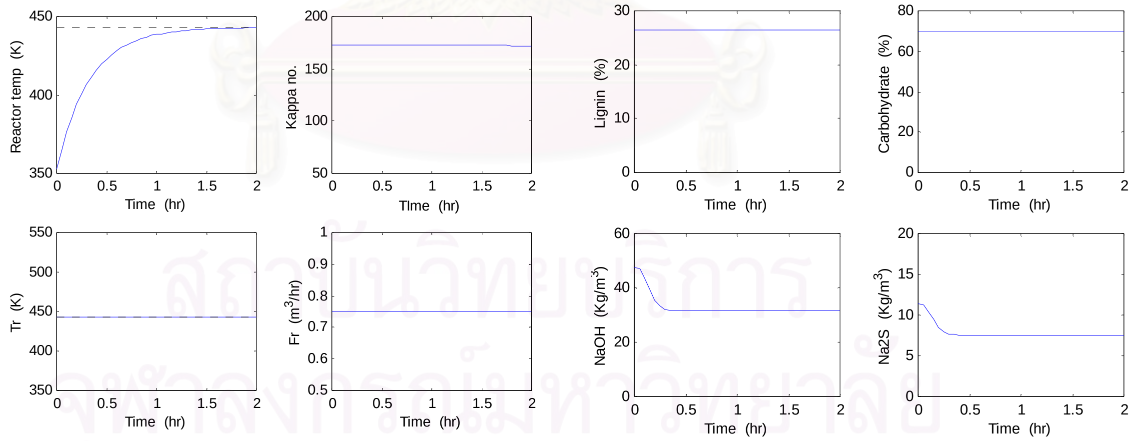
1. ปรับค่าของ Lee และ Datta ลงจนถึงค่าแรกที่เริ่มเกิดปฏิกิริยาและมีการเปลี่ยนแปลงของสาร
2. ปรับค่าต่อไปจนถึงค่าแรกที่ทำให้ไม่สามารถอ่านค่าแคปปาได้
3. เลือกใช้ค่ากลางระหว่างค่าที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 และ 2 เป็นค่าในการวิจัย

ตัวอย่างการปรับค่า E_{11} ทำโดยการลดค่าจริงของ Lee และ Datta ตามขั้นตอนที่ 1 จนได้ค่า E_{11} เท่ากับ 10.5 x 10^3 kcal/kmol ซึ่งเป็นค่าแรกที่เริ่มเกิดปฏิกิริยาและมีการเปลี่ยนแปลงของสาร แสดงดังรูปที่ 5.4 เห็นได้ว่าค่าแคปปา ลิกนิน และคาร์โบไฮเดรตเริ่มลดลง ความเข้มข้นของสารละลาย ก็ลดลงแสดงให้เห็นว่าเริ่มถูกใช้ไปในการทำปฏิกิริยา จากนั้นลดค่าต่อไปตามขั้นตอนที่ 2 ได้ค่า E_{11} เท่ากับ 2.4 x 10^3 kcal/kmol ซึ่งเป็นค่าแรกที่ทำให้กราฟค่าแคปปาขาด ซึ่งไม่สามารถอ่านค่าได้ แสดงดังรูปที่ 5.5 ดังนั้นทำการเลือกค่ากลางระหว่างค่าที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 และ 2 คือ 6.45 x 10^3 kcal/kmol

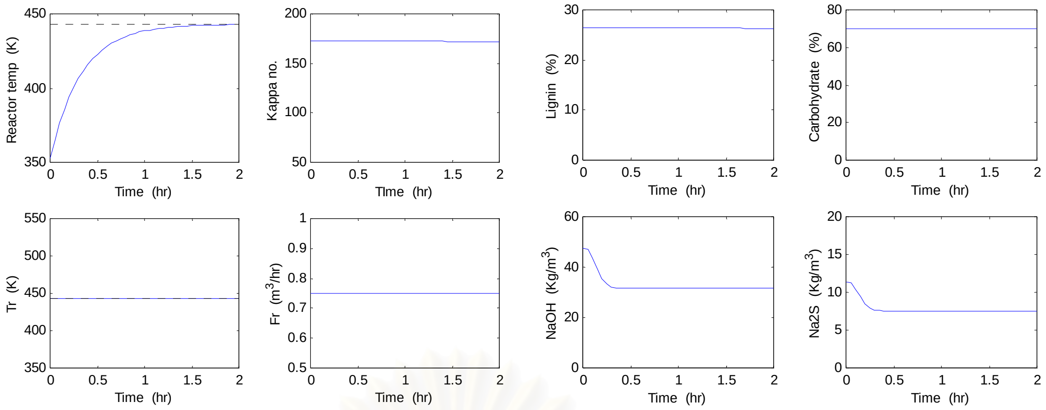
ตารางที่ 5.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยเทียบกับของ Lee และ Datta (1994)

พารามิเตอร์	ค่าจริงจาก Lee และ Datta	ค่าที่ใช้ในการวิจัย	หน่วย
E_{11}	639.28	6.45	*10^3
E_{12}	33.77	29.1	kcal/kmol
E_{13}	1.94e+3	17.55	
E_{14}	717.94	14.85	
E_{15}	3.95e+18	22.05	
E_{21}	7.5e+3	21.9	*10^3
E_{22}	9e+3	12.35	kcal/kmol
E_{23}	1e+4	19.85	
E_{24}	9e+3	17.45	
E_{25}	4e+4	18.25	

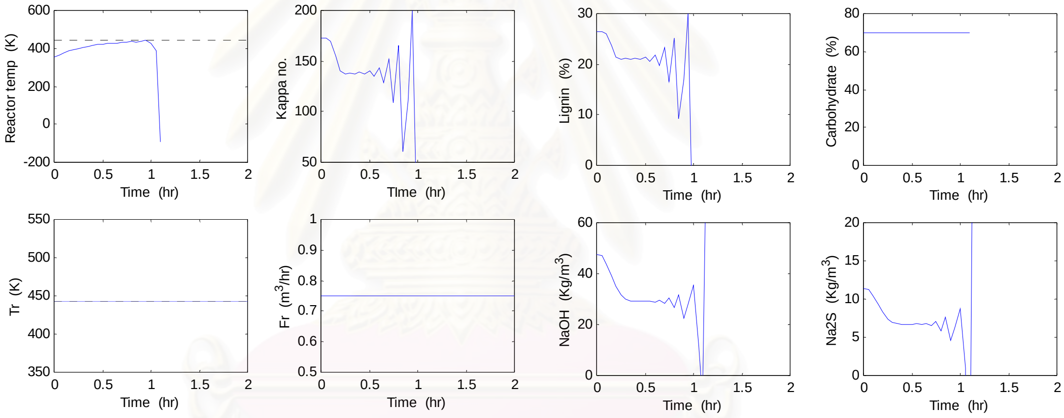
ผลการปรับค่าพารามิเตอร์



รูปที่ 5.3 ผลของกระบวนการเมื่อใช้พารามิเตอร์ทุกค่าของ Lee และ Datta (1994)



รูปที่ 5.4 ผลของกระบวนการเมื่อปรับค่าพลังงานกระตุ้นอันดับหนึ่งขององค์ประกอบที่ 1 ในไม้เป็น 10.5×10^3 kcal/kmol



รูปที่ 5.5 ผลของกระบวนการเมื่อปรับค่าพลังงานกระตุ้นอันดับหนึ่งขององค์ประกอบที่ 1 ในไม้เป็น 2.4×10^3 kcal/kmol

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

ผลการทดลอง วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย

ในบทนี้เป็นผลการระบุหาแบบจำลองและการทดสอบแบบจำลองฟัซซี เริ่มต้นจากการสร้างแบบจำลองฟัซซีของตัวย่อยเยื่อกระดาษ โดยใช้ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทของกระบวนการผ่านอัลกอริธึมคลัสเตอริงและวิธีลีสท์สแควร์ และเนื่องจากค่าแคปปาซึ่งเป็นตัวแปรควบคุมเป็นค่าที่ไม่สามารถวัดได้จึงต้องทำการประมาณค่าจากตัวแปรอื่นที่สามารถวัดได้ ในที่นี้ใช้ตัวประมาณค่าฟัซซีในการประมาณค่าดังกล่าว จากนั้นทำการผกผันแบบจำลองฟัซซีที่ได้เพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการ ซึ่งตัวควบคุมนี้เป็นลักษณะของการควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองภายใน นอกจากนี้ยังแสดงผลการทดสอบตัวควบคุมและตัวประมาณค่า รวมไปถึงการวิเคราะห์ สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 การเลียนแบบกระบวนการ

การสร้างโปรแกรมเลียนแบบสำหรับกระบวนการตัวย่อยเยื่อกระดาษเพื่อใช้แทนกระบวนการจริง โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 5 จะสร้างโดยวิธีการเชิงตัวเลขที่เรียกว่า อัลกอริธึมของออยเลอร์ ด้วย Step Size เท่ากับ 1

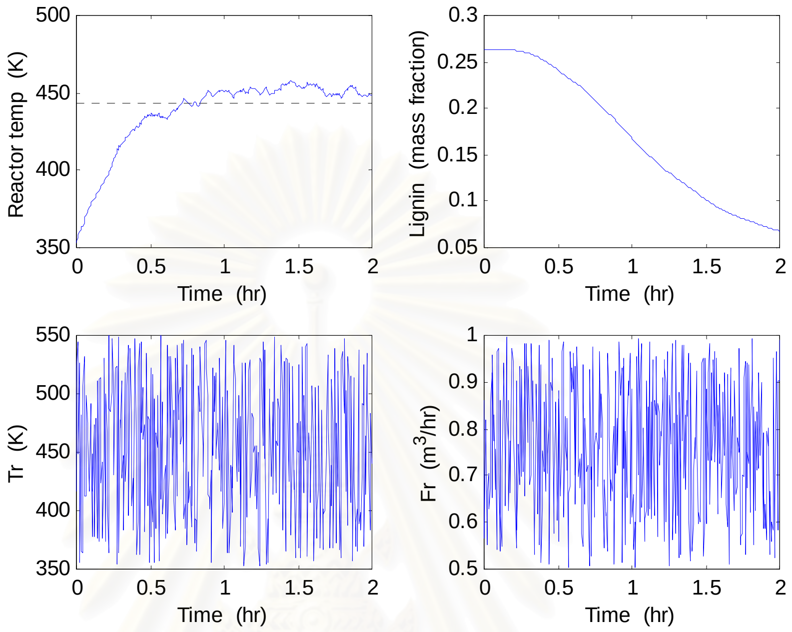
6.2 การสร้างแบบจำลองฟัซซี

ทำการระบุหาแบบจำลองฟัซซีโดยใช้ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุท ผ่านการคลัสเตอริงและวิธีลีสท์สแควร์ สำหรับกระบวนการนี้จำเป็นต้องสร้างแบบจำลองฟัซซี 2 ชุด ชุดหนึ่งเป็นแบบจำลองฟัซซีของกระบวนการ อีกชุดหนึ่งใช้เป็นตัวประมาณค่าแคปปาซึ่งเป็นตัวแปรที่ต้องการควบคุมและไม่สามารถวัดได้

6.2.1 แบบจำลองฟัซซีของกระบวนการ

ข้อมูลอินพุทที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองนี้ ได้แก่ $L(k-1)$ $T(k)$ $Tr(k)$ $Fr(k)$ คือค่าลิกนินที่เวลาย้อนหลังหนึ่งค่า ค่าอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ ค่าอุณหภูมิและอัตราการไหลของสายหมุนเวียนที่เวลาปัจจุบัน ตามลำดับ สำหรับข้อมูลเอาท์พุท ได้แก่ $L(k)$ ดังนั้นเวคเตอร์

ข้อมูลคือ $Z = [L(k-1) \;\; T(k) \;\; Tr(k) \;\; Fr(k) \;\; L(k)]$ โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิและอัตราการไหลของสายหมุนเวียนแบบสุ่ม (True Random) แสดงดังรูปที่ 6.1 แล้วทำการบันทึกค่าทุกๆ 0.005 ชั่วโมง หรือ 18 วินาที ในเวลา 2 ชั่วโมง รวมจำนวนตัวอย่างสุ่มทั้งหมด 400 ค่า

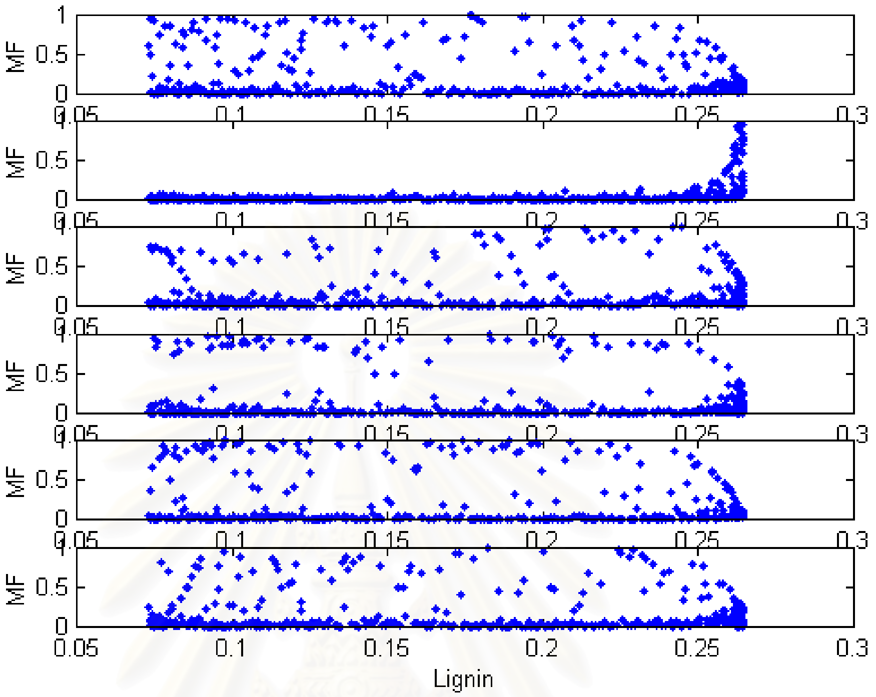


รูปที่ 6.1 ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองฟัซซีของกระบวนการ

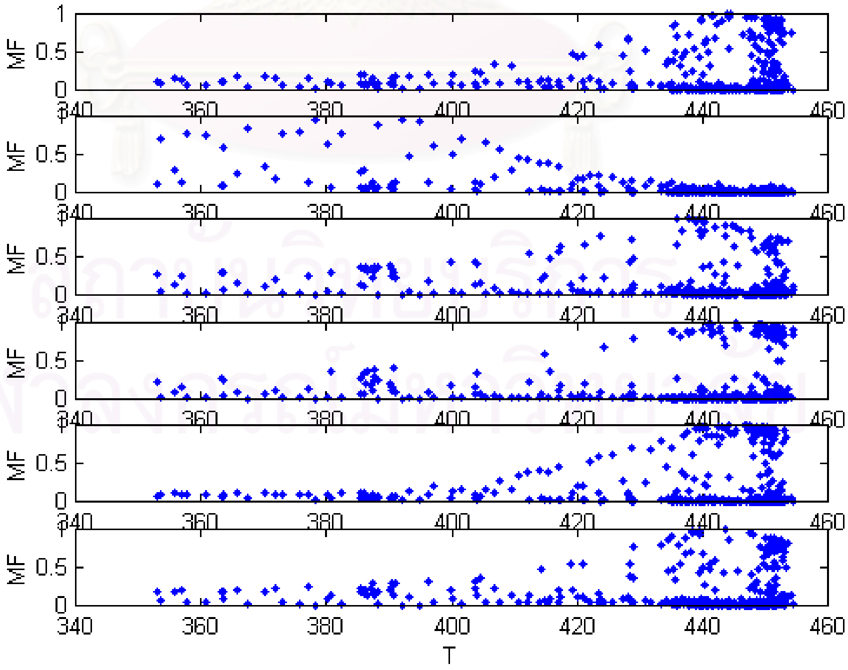
ผลจากการคลัสเตอริงและหาจำนวนกฎที่เหมาะสมพบว่า จำนวนกฎเท่ากับ 6 กฎทำให้ค่า $J(c)$ ต่ำที่สุด ได้ฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์ดังรูปที่ 6.2 – 6.5 จากนั้นเขียนกราฟระหว่างฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์ที่มีความหมายกับค่าตัวแปรนั้นๆ ในที่นี้คือ Tr และทำการประมาณกราฟโดยใช้ฟังก์ชันสามเหลี่ยมและคางหมู ในงานวิจัยนี้ประมาณกราฟโดยใช้ Fuzzy Toolbox ของโปรแกรมแมทแลบ จะได้ฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไขของกฎดังรูปที่ 6.6 สำหรับค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลได้จากการลีสท์สแควร์ดังตารางที่ 6.1 หลังจากได้แบบจำลองฟัซซีของกระบวนการแล้วทำการทดสอบแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลแบบเดียวกันอีกชุดหนึ่ง ดังรูปที่ 6.7 ซึ่งความสามารถในการทำนายค่าหรือค่าสมรรถนะของแบบจำลอง พิจารณาได้จากค่ารากของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean-Squared error, RMS) ดังสมการที่ (6.1)

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N}(y(k)-y_m(k))^2}{N}} \tag{6.1}$$

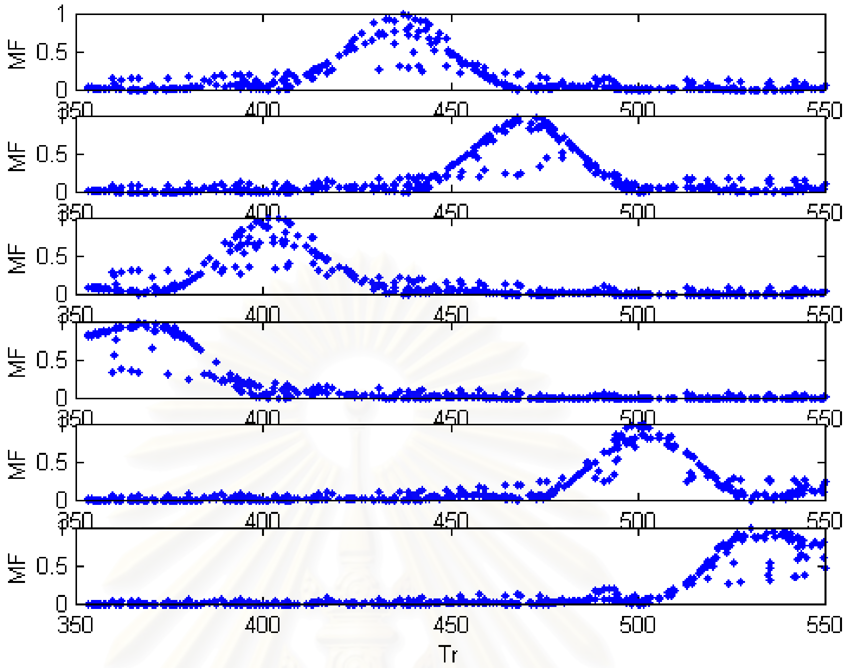
โดย $y(k)$ คือค่าเอาท์พุทของกระบวนการ $y_m(k)$ คือค่าเอาท์พุทจากแบบจำลองฟัซซี และ N คือจำนวนข้อมูลที่ใช้ทดสอบ



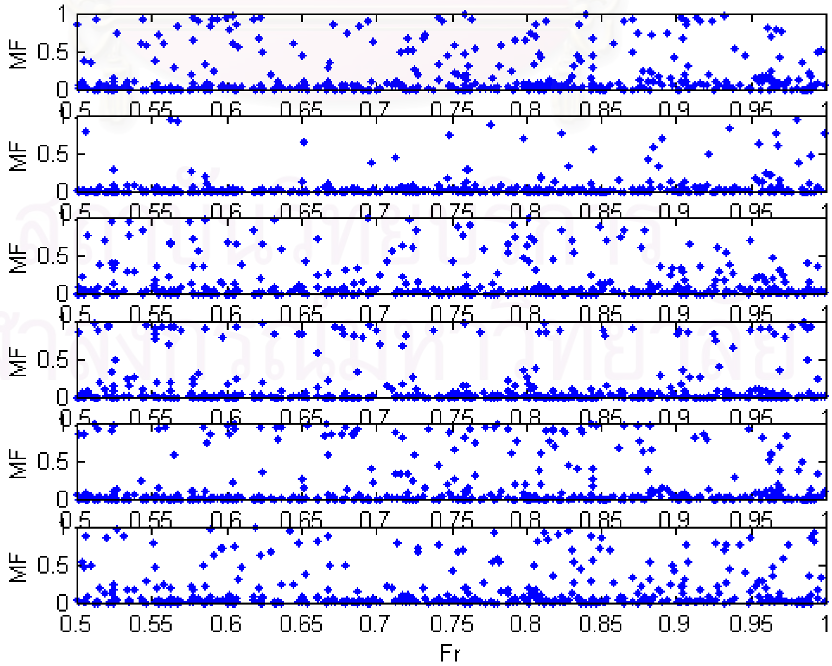
รูปที่ 6.2 กราฟระหว่างฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์กับค่าลิกนิน



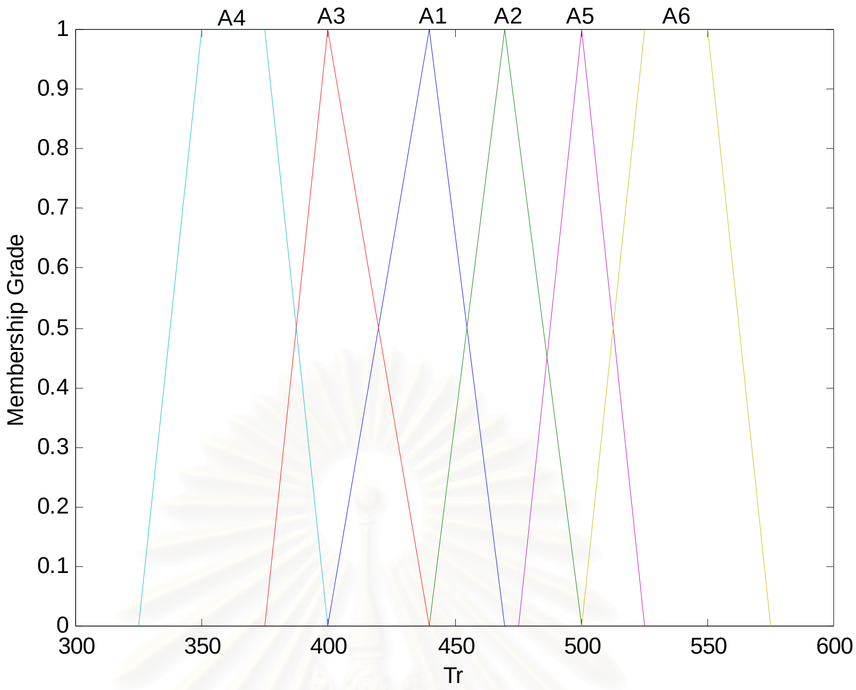
รูปที่ 6.3 กราฟระหว่างฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์กับค่าอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 6.4 กราฟระหว่างฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์กับค่าอุณหภูมิของสายหมุนเวียน



รูปที่ 6.5 กราฟระหว่างฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์กับค่าอัตราการไหลของสายหมุนเวียน



รูปที่ 6.6 ฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไขของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกระบวนการ

ตารางที่ 6.1 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกระบวนการ

กฎ	P_0	P_1	P_2	P_3	P_4
1	0.0045	0.9981	-0.000010	-0.0000011	-0.000006
2	0.0073	0.9964	-0.000017	0.0000003	-0.000034
3	0.0079	0.9967	-0.000016	-0.0000013	0.000153
4	0.0070	0.9967	-0.000012	-0.0000038	0.000024
5	0.0054	0.9973	-0.000013	0.0000060	-0.000145
6	0.0045	0.9968	-0.000014	0.0000030	0.000212

โครงสร้างของแบบจำลองฟัซซีสำหรับกระบวนการ แสดงได้ดังนี้

กฎที่ 1 : If $Tr(k)$ is $A1$ Then $L(k+1) = 0.0045 + 0.9981L(k) - 0.000010T(k) - 0.0000011Tr(k) - 0.000006\,Fr(k)$

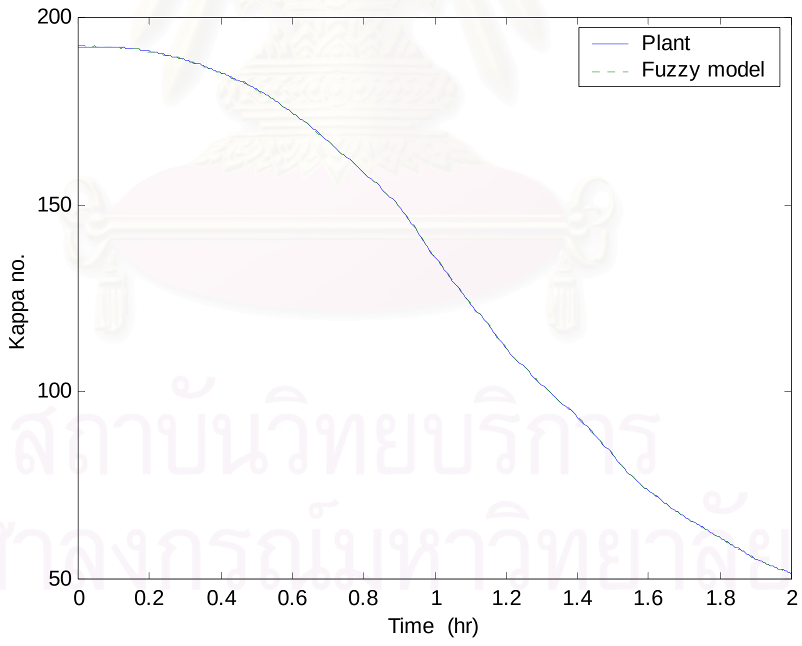
กฎที่ 2 : If $Tr(k)$ is $A2$ Then $L(k+1) = 0.0073 + 0.9964L(k) - 0.000017T(k) + 0.0000003Tr(k) - 0.000034\,Fr(k)$

กฎที่ 3 : If $Tr(k)$ is $A3$ Then $L(k+1) = 0.0079 + 0.9967L(k) - 0.000016T(k) - 0.0000013Tr(k) + 0.000153\,Fr(k)$

กฎที่ 4 : If $Tr(k)$ is $A4$ Then $L(k+1) = 0.0070 + 0.9967L(k) - 0.000012T(k) - 0.0000038Tr(k) + 0.000024\,Fr(k)$

กฎที่ 5 : If $Tr(k)$ is $A5$ Then $L(k+1) = 0.0054 + 0.9973L(k) - 0.000013T(k) + 0.0000060Tr(k) - 0.000006\,Fr(k)$

กฎที่ 6 : If $Tr(k)$ is $A6$ Then $L(k+1) = 0.0045 + 0.9968L(k) - 0.000014T(k) + 0.0000030Tr(k) + 0.000212\,Fr(k)$



RMS = 0.0773

รูปที่ 6.7 ผลการทดสอบแบบจำลองฟัซซีของกระบวนการ

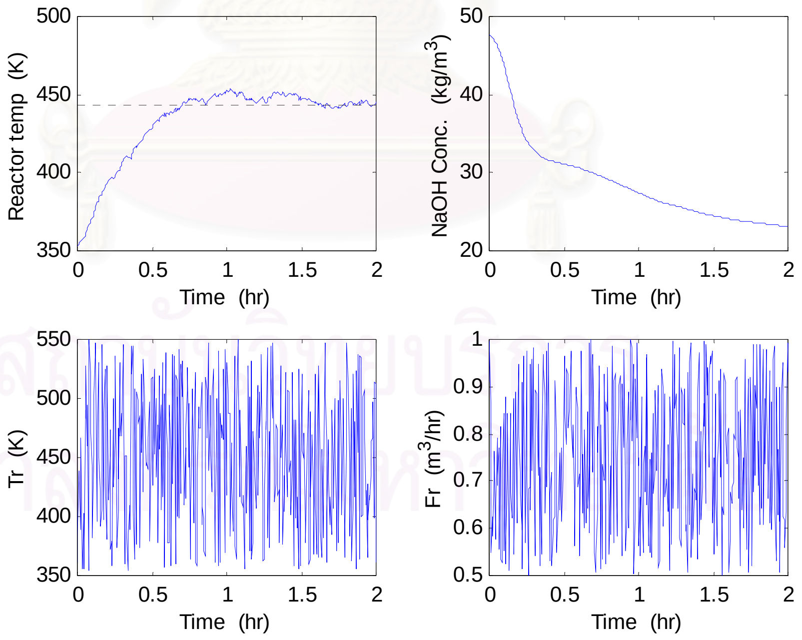
*** หมายเหตุ : Kappa no. = 653.6 x L ; L = Lignin

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

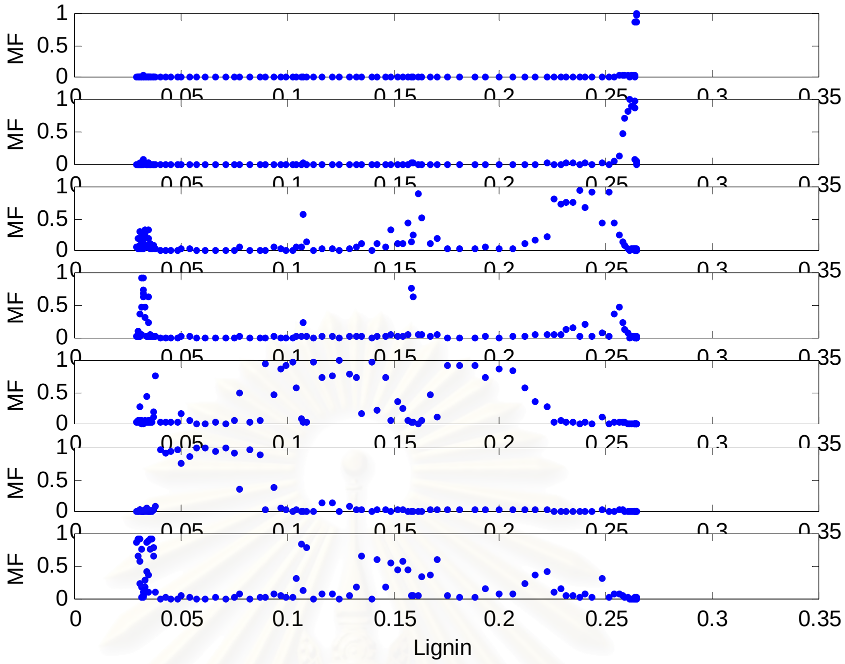
6.2.2 แบบจำลองฟัซซีของตัวประมาณค่า

ข้อมูลอินพุทที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองนี้ ได้แก่ $L(k-1)$ $T(k)$ $Cf3(k)$ คือค่าลิกนินที่เวลาย้อนหลังหนึ่งค่า ค่าอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ ค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เวลาปัจจุบัน ตามลำดับ สำหรับข้อมูลเอาท์พุท ได้แก่ $L(k)$ ดังนั้นเวคเตอร์ข้อมูลคือ $Z = [L(k-1) \;\; T(k) \;\; Cf3(k) \;\; L(k)]$ โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิและอัตราการไหลของสายหมุนเวียนแบบสุ่ม (True Random) ดังรูปที่ 6.8 แล้วทำการบันทึกค่าทุกๆ 0.005 ชั่วโมง หรือ 18 วินาที ในเวลา 2 ชั่วโมง รวมจำนวนตัวอย่างสุ่มทั้งหมด 400 ค่า

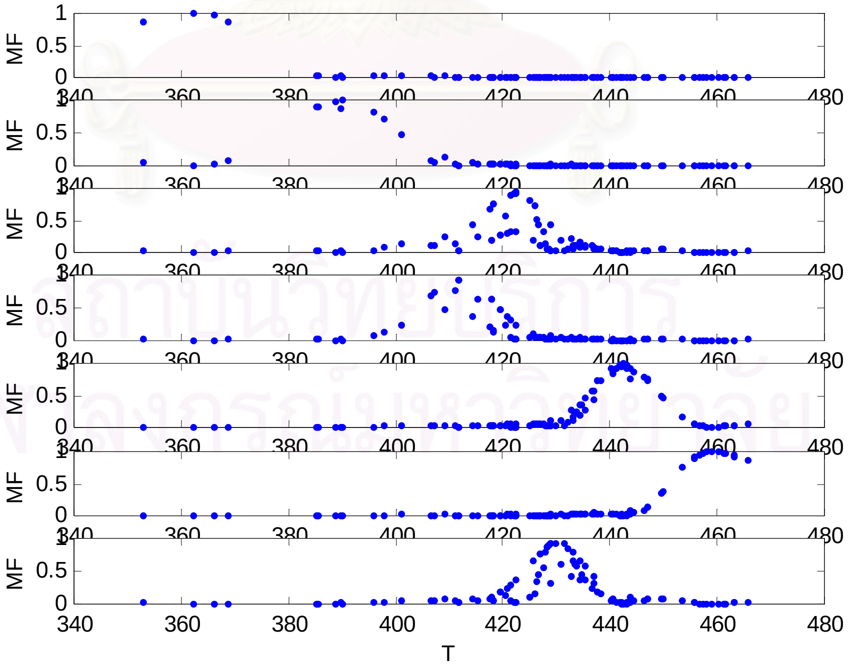
ผลจากการคลัสเตอริงและหาจำนวนกฎที่เหมาะสมพบว่า จำนวนกฎเท่ากับ 7 กฎทำให้ค่า $J(c)$ ต่ำที่สุด ได้ฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์ดังรูปที่ 6.9 – 6.11 จากนั้นเขียนกราฟระหว่างฟัซซีพาร์ทิชันเมตริกซ์ที่มีความหมายกับค่าตัวแปรนั้นๆ ในที่นี้คือ T ทำการประมาณฟังก์ชันสมาชิกและทดสอบแบบจำลองฟัซซีของตัวประมาณค่าเช่นเดียวกับหัวข้อ 6.2.1 จะได้ฟังก์ชันสมาชิกดังรูปที่ 6.12 และค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 6.2 สำหรับผลการทดสอบแบบจำลองฟัซซีของตัวประมาณค่าแสดงดังรูปที่ 6.13



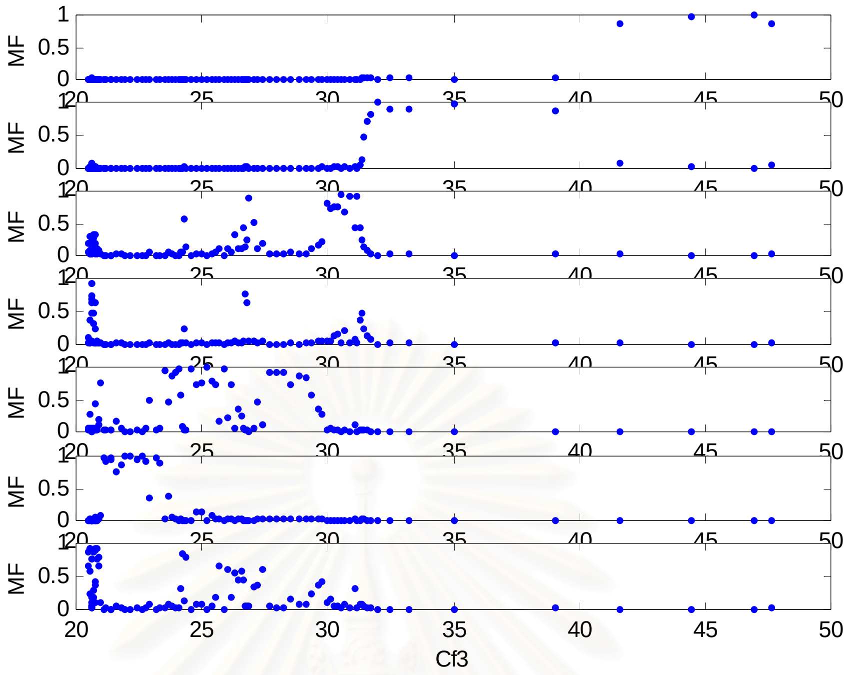
รูปที่ 6.8 ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองฟัซซีของตัวประมาณค่า



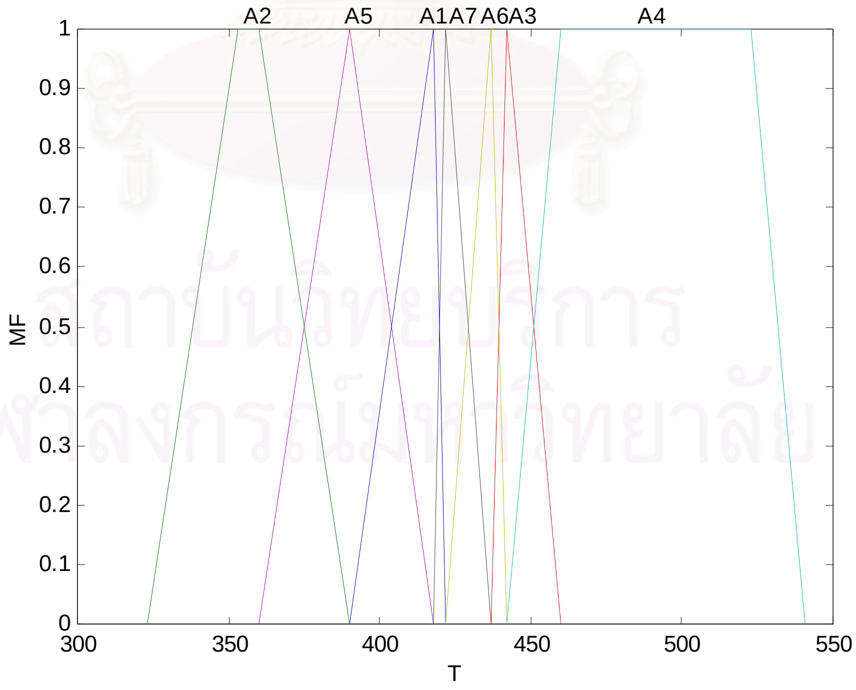
รูปที่ 6.9 กราฟระหว่างพาร์ทิชันเมตริกซ์กับค่าลิกนิน



รูปที่ 6.10 กราฟระหว่างพาร์ทิชันเมตริกซ์กับค่าอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 6.11 กราฟระหว่างพาร์ทิชันเมตริกซ์กับค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 6.12 ฟังก์ชันสมาชิกในส่วนเงื่อนไขของแบบจำลองฟัซซีสำหรับตัวประมาณค่า

ตารางที่ 6.2 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลของแบบจำลองฟัซซีสำหรับตัวประมาณค่า

กฎ	P_0	P_1	P_2	P_3
1	0.0136	0.9314	-0.0001	0.0010
2	-0.1316	1.4424	0.0000	0.0001
3	0.0452	0.8913	-0.0002	0.0014
4	0.0334	1.0710	-0.0000	-0.0016
5	0.0243	0.9517	-0.0000	0.0001
6	0.0476	0.9549	-0.0001	0.0007
7	0.1284	1.0101	-0.0002	-0.0019

โครงสร้างของแบบจำลองฟัซซีสำหรับตัวประมาณค่า แสดงได้ดังนี้

กฎที่ 1 : If $T(k)$ is $A1$ Then $L(k+1) = 0.0136 + 0.9314L(k) - 0.0001T(k) + 0.0010Cf3(k)$

กฎที่ 2 : If $T(k)$ is $A2$ Then $L(k+1) = -0.1316 + 1.4424L(k) + 0.00007T(k) + 0.0001Cf3(k)$

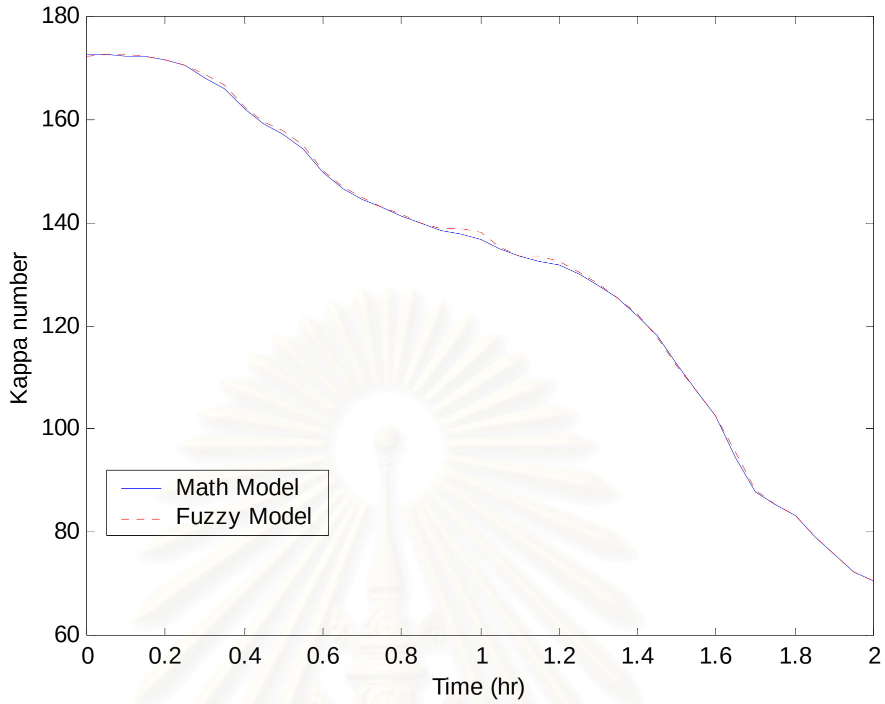
กฎที่ 3 : If $T(k)$ is $A3$ Then $L(k+1) = 0.0452 + 0.8913L(k) - 0.0002T(k) + 0.0014Cf3(k)$

กฎที่ 4 : If $T(k)$ is $A4$ Then $L(k+1) = 0.0334 + 1.0710L(k) - 0.0000T(k) - 0.0016Cf3(k)$

กฎที่ 5 : If $T(k)$ is $A5$ Then $L(k+1) = 0.0243 + 0.9517L(k) - 0.0000T(k) + 0.0001Cf3(k)$

กฎที่ 6 : If $T(k)$ is $A6$ Then $L(k+1) = 0.0476 + 0.9549L(k) - 0.0001T(k) + 0.0007Cf3(k)$

กฎที่ 7 : If $T(k)$ is $A7$ Then $L(k+1) = 0.1284 + 1.0101L(k) - 0.0002T(k) - 0.0019Cf3(k)$



RMS = 0.1700

รูปที่ 6.13 ผลการทดสอบแบบจำลองฟัซซีของตัวประมาณค่า

ในการระบุหาแบบจำลองฟัซซีสำหรับใช้ในการควบคุมกระบวนการนั้น ข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองฟัซซีต้องเป็นข้อมูลที่ครอบคลุมการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการในลักษณะต่างๆ อย่างครบถ้วนเพียงพอ ในงานวิจัยนี้ใช้ค่าเอาท์พุทในการสร้างแบบจำลองฟัซซีย้อนหลังไปเพียงค่าเดียว เนื่องจากใช้ค่าย้อนหลังเพียงค่าเดียวแบบจำลองฟัซซีก็สามารถทำนายค่าได้อย่างแม่นยำ ดูได้จากค่า RMS และต้องการโครงสร้างที่ง่ายที่สุดเพื่อประหยัดเวลาในการประมวลผล

6.3 การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลอง

งานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงวิธีการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลอง ซึ่งเป็นลักษณะของการควบคุมแบบใช้แบบจำลองภายในไว้ในบทที่ 4

การออกแบบตัวควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองภายในทำโดยการผกผันแบบจำลองฟัซซีของกระบวนการที่ได้จากหัวข้อ 6.2.1 ตามสมการที่ (4.13) จะได้

$$Tr(k+1) = \frac{Kr(k+1) - \sum_{i=1}^{K} w_i (p_1^i K(k) + p_2^i T(k) + p_4^i Fr(k) + p_0^i)}{\sum_{i=1}^{K} w_i b_i}$$

$$Fr(k+1) = \frac{Kr(k+1) - \sum_{i=1}^{K} w_i (p_1^i K(k) + p_2^i T(k) + p_3^i Tr(k) + p_0^i)}{\sum_{i=1}^{K} w_i b_i}$$

โดย Kr คือค่าแคปปาอ้างอิง คำนวณได้จากสมการที่ (6.2)***

$$Kr(k+1) = K_{est} - \frac{(K_{est} - K_d)}{(N_s - k)} \qquad (6.2)$$

โดย K_{est} คือค่าแคปปาที่ประมาณได้จากตัวประมาณค่าฟัซซี

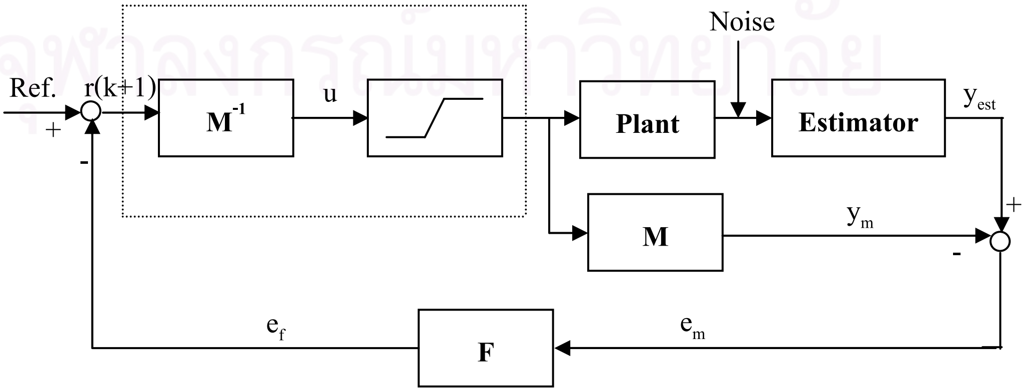
K_d คือค่าแคปปาที่ต้องการ ในที่นี้เท่ากับ 50

N_s คือจำนวนการสุ่มตัวอย่างทั้งหมด ในที่นี้เท่ากับ 40 (เวลาในการปฏิบัติการ 2 ชม. เวลาในการสุ่ม 0.05 ชม.)

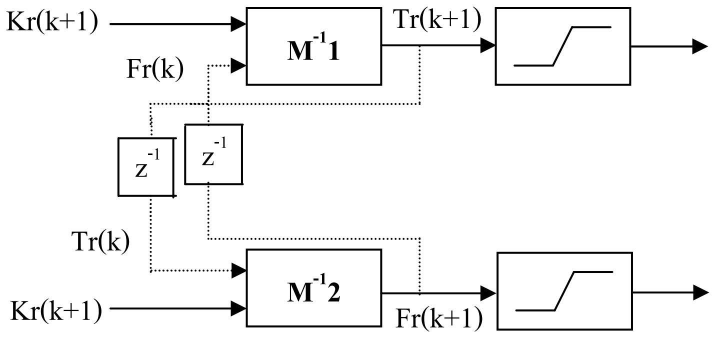
k คือเวลาในการสุ่มนั้นๆ มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง $N_s - 1$

*** Jay H. Lee and A.K. Datta (1994)

รูปที่ 6.14 และ 6.15 แสดงโครงสร้างการควบคุมแบบอาศัยแบบจำลองฟัซซีภายในของกระบวนการตัวย่อยเยื่อกระดาษที่ใช้ในงานวิจัยนี้

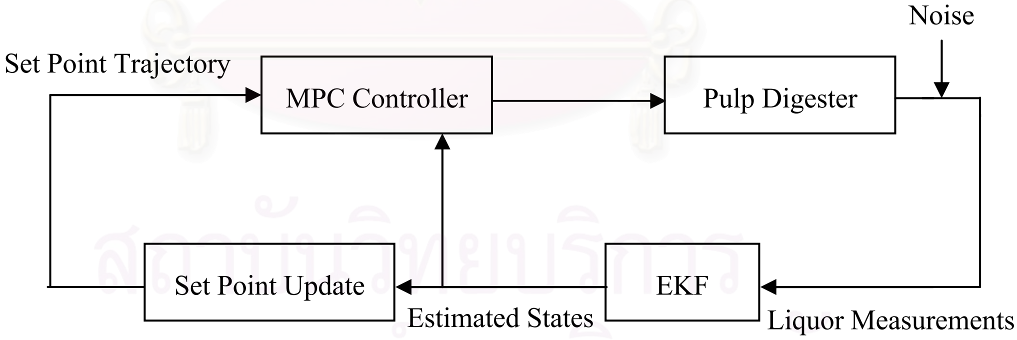


รูปที่ 6.14 โครงสร้างการควบคุมแบบ Fuzzy IMC



รูปที่ 6.15 ภาพขยายจากกรอบเส้นประในรูปที่ 6.15

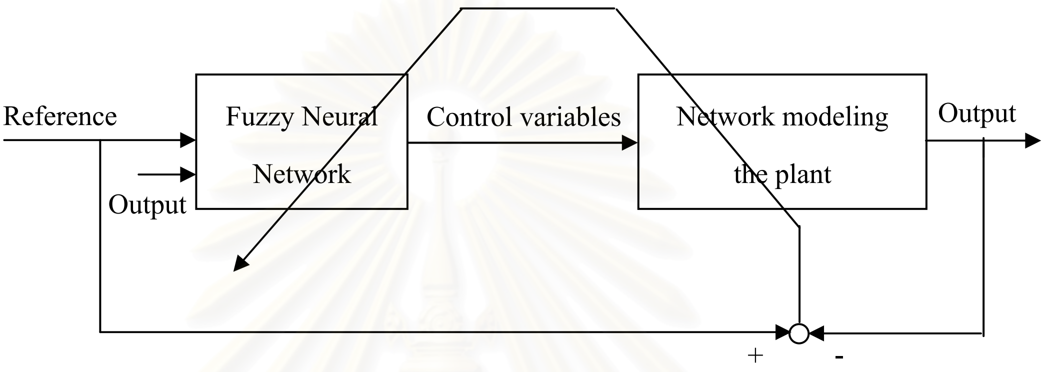
ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการควบคุมตัวย่อยเยื่อกระดาษด้วยตัวควบคุมแบบต่างๆ เช่น ในปี ค.ศ.1994 Jay H. Lee และ A. K. Datta ได้ประยุกต์ใช้ตัวควบคุมโมเดลพรีดิกทีพร่วมกับตัวประมาณค่าคาลมาน (Extended-Kalman-Filter-Based Nonlinear Model Predictive Control, MPC+EKF) พบว่าสามารถควบคุมค่าแคปปาให้ถึงค่าที่ต้องการได้ในเวลา 2 ชั่วโมงและตัวควบคุมมีความทนทานต่อความผิดพลาดของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แต่การประยุกต์ใช้คาลมานนั้นทำได้ลำบากเนื่องจากมีขั้นตอนการคำนวณที่ยุ่งยาก อีกทั้งต้องใช้เวลานานในการปรับจูนพารามิเตอร์หลายตัว แผนผังการควบคุมด้วย MPC นี้แสดงดังรูปที่ 6.16



รูปที่ 6.16 แผนผังการควบคุมด้วย MPC และตัวประมาณค่า EKF

และในปี ค.ศ. 2000 K. Belarbi, K. Bettou และ A. Mezzache ได้ทำการออกแบบการควบคุมตัวย่อยเยื่อกระดาษโดยการใช้ฟัซซีนิวรัลเน็ตเวิร์ค (Fuzzy Neural Network, FNN) ในการประมาณค่าแคปปาและการกำหนดกฎฟัซซีเพื่อใช้ในตัวควบคุม และวัดค่าตัวแปรที่ใช้ในการประมาณค่า 2 ตัว กฎฟัซซีที่ได้อยู่ในรูปของแบบจำลองฟัซซีเชิงภาษา (Fuzzy Linguistic

Controller, FLC) และรูปร่างของฟังก์ชันสมาชิกถูกกำหนดจากประสบการณ์ของผู้ออกแบบหรือผู้ควบคุมดังแสดงในตารางที่ 6.3 และกฎการควบคุมแสดงดังตารางที่ 6.4 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบนี้สามารถควบคุมค่าแคปปาให้ถึงค่าที่ต้องการได้ในเวลาที่กำหนด แต่ถ้าไม่มีผู้เชี่ยวชาญหรือประสบการณ์มาก่อนจะไม่สามารถทำตามวิธีการนี้ได้ แผนผังการควบคุมแบบนี้แสดงดังรูปที่ 6.17



รูปที่ 6.17 แผนผังการควบคุมด้วยตัวควบคุม FLC และตัวประมาณค่า FNN

ตารางที่ 6.3 จุดกึ่งกลางของฟังก์ชันสมาชิกแบบสามเหลี่ยม

ตัวแปร	**A1**	**A2**	**A3**
Tr	350	410	460
Fr	0.5	0.75	1
T	353	415	480
NaOH	16	25	34
K	40	110	180
Error	-10	0	+10
Error increment	-2	0	+2

จากตารางที่ 6.3 แต่ละตัวแปรถูกแบ่งเป็น 3 ฟัซซีเซต คือ Low (L) Medium (M) และ High (H) ซึ่งเป็นฟังก์ชันแบบสามเหลี่ยมโดยมีจุดกึ่งกลางหรือจุดยอดของสามเหลี่ยมเป็น A1 A2 และ A3 ตามลำดับ

ตารางที่ 6.4 กฎการควบคุมทั้ง 9 กฎสำหรับตัวควบคุม FLC

dEr	**Er**					
	L		**M**		**H**	
	Fr	Tr	Fr	Tr	Fr	Tr
L	H	H	H	M	M	L
M	H	H	M	L	L	L
H	H	H	L	M	M	H

อินพุทของตัวควบคุม FLC และตัวควบคุม MPC คือความแตกต่างระหว่างค่าอ้างอิงและค่าที่ประมาณได้ (Er) และการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างนี้ (dEr) สำหรับเอาท์พุทที่ออกจากตัวควบคุมคืออุณหภูมิ (Tr) และอัตราการไหล (Fr) ของสายหมุนเวียน

6.4 ผลการควบคุม

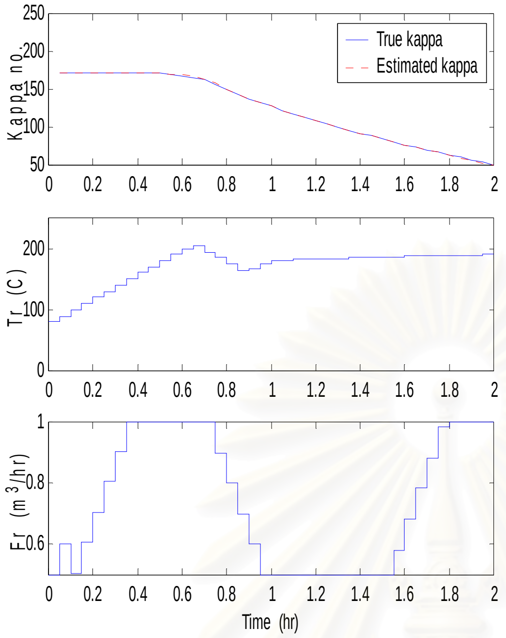
ในการทดลองนี้กำหนดให้ทำการควบคุมทุกๆ 0.05 ชั่วโมงหรือ 3 นาที ซึ่งต้องการควบคุมค่าแคปปาให้เข้าใกล้ 50 เท่าที่จะเป็นไปได้ที่เวลา 2 ชั่วโมง โดยการปรับอุณหภูมิและอัตราการไหลของสายหมุนเวียน ทำการทดสอบตัวควบคุมและตัวประมาณค่าใน 3 กรณีคือ กรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงสารป้อน กรณีที่มีสัญญาณรบกวน กรณีที่พารามิเตอร์ของแบบจำลองผิดพลาดและทำการเปรียบเทียบกับตัวควบคุม PI ซึ่งใช้ร่วมกับตัวประมาณค่าฟัซซีเช่นเดียวกัน

ค่าแฟกเตอร์การปรับจูนสำหรับตัวควบคุม PI ตัวแรก ทำการปรับ Tr ด้วยค่า Kc = 43 Ki = 1300 และตัวที่สองปรับ Fr ด้วยค่า Kc = 4 Ki = 25

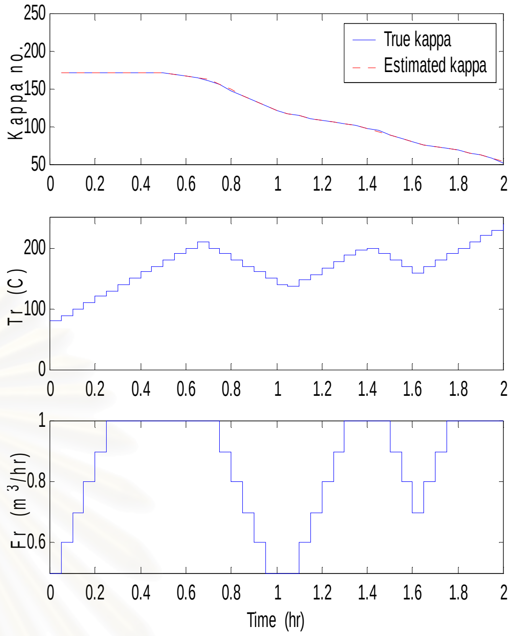
สำหรับผลการควบคุมด้วย MPC และ FLC จากงานวิจัยที่ผ่านมานำมารวมในงานวิจัยนี้เพื่อแสดงแนวโน้มและลักษณะกราฟ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

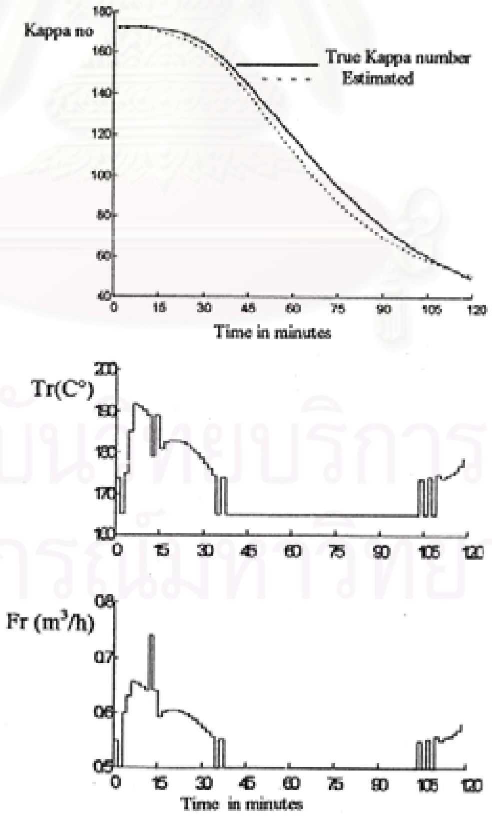
6.4.1 กรณีที่ใช้สารป้อนตัวอย่าง



FIMC



PI



FLC

รูปที่ 6.18 ผลการควบคุมในกรณีที่ใช้สารป้อนตัวอย่าง

จากรูปที่ 6.18 จะเห็นว่าตัวควบคุม FIMC และ PI สามารถควบคุมค่าแคปปาให้เข้าใกล้ค่า 50 ได้เช่นเดียวกัน โดยการปรับของอุณหภูมิในสายหมุนเวียนเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 80 °C จนอยู่ในช่วงประมาณ 160-180 °C ซึ่งเป็นช่วงที่ปฏิกิริยาเกิดได้ดี แต่ตัวควบคุม FIMC มีการปรับตัวของตัวแปรปรับ (Controller movement) น้อยกว่าตัวควบคุม PI

6.4.2 การทดสอบตัวควบคุมและตัวประมาณค่า

6.4.2.1 กรณีมีการเปลี่ยนแปลงสารป้อน

คุณสมบัติของสารต่างๆ ที่ป้อนเข้าสู่ตัวย่อยเยื่อกระดาษมีการเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละแบทช์และในอุตสาหกรรมจริงก็เป็นไปไม่ได้ที่จะทราบปริมาณที่แน่นอนของการเปลี่ยนแปลงนี้ ยกตัวอย่างเช่น ชนิดของไม้ที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการซึ่งไม้แต่ละชนิดจะมีองค์ประกอบต่างๆ ที่แตกต่างกัน จะส่งผลต่อการควบคุมและประมาณค่า สมรรถนะของตัวควบคุมตัดสินได้จากการสังเกตว่าค่าแคปปาค่าสุดท้ายเข้าใกล้ค่าที่ต้องการได้มากน้อยเท่าใดในเวลาที่กำหนด สำหรับตัวประมาณค่าที่มีประสิทธิภาพสูงต้องสามารถทำให้ค่าที่ประมาณได้ลู่เข้าสู่ค่าจริงได้อย่างรวดเร็ว การทดสอบนี้แบ่งเป็น 4 กรณีด้วยกันดังตารางที่ 6.5

กรณีที่ 1 ใช้ไม้เนื้ออ่อนกว่าไม้ตัวอย่างและความเข้มข้นของสารละลาย NaOH และ Na_2S เท่าตัวอย่าง

กรณีที่ 2 ใช้ไม้เนื้อแข็งกว่าไม้ตัวอย่างและความเข้มข้นของสารละลาย NaOH และ Na_2S เท่าตัวอย่าง

กรณีที่ 3 ใช้ไม้ตัวอย่างและความเข้มข้นของสารละลาย NaOH และ Na_2S ผิดพลาดไป –15%

กรณีที่ 4 ใช้ไม้ตัวอย่างและความเข้มข้นของสารละลาย NaOH และ Na_2S ผิดพลาดไป +15%

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

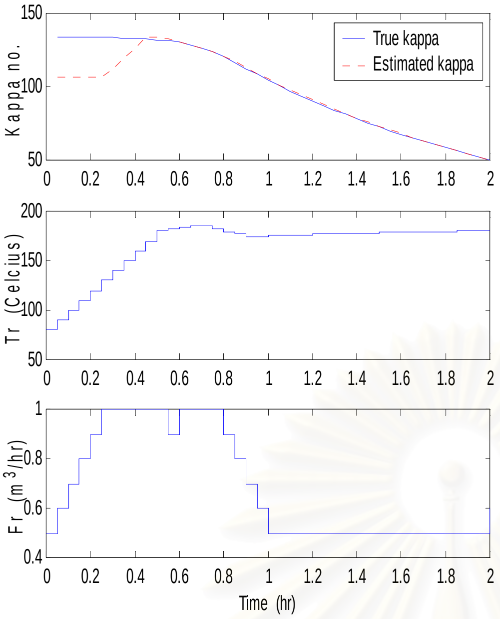
ตารางที่ 6.5 การเปลี่ยนแปลงสารป้อนในกรณีต่างๆ

ตัวแปร	**การเปลี่ยนแปลงสารป้อน**				
	ตัวอย่าง	**กรณีที่ 1**	**กรณีที่ 2**	**กรณีที่ 3**	**กรณีที่ 4**
X1 (mass fraction)	0.0528	0.0428	0.0628	0.0528	0.0528
X2 (mass fraction)	0.2112	0.1612	0.2312	0.2112	0.2112
X3 (mass fraction)	0.4852	0.4652	0.4852	0.4852	0.4852
X4 (mass fraction)	0.1428	0.1228	0.1428	0.1428	0.1428
X5 (mass fraction)	0.0722	0.0622	0.0722	0.0722	0.0722
Ce1 (kg/m^3)	0	0	0	0	0
Ce2 (kg/m^3)	0	0	0	0	0
Ce3 (kg/m^3)	0	0	0	0	0
Ce4 (kg/m^3)	0	0	0	0	0
Cf1 (kg/m^3)	1	1	1	1	1
Cf2 (kg/m^3)	2	2	2	2	2
Cf3 (kg/m^3)	47.6327	47.6327	47.6327	37.9378	51.3276
Cf4 (kg/m^3)	11.3535	11.3535	11.3535	9.6505	13.0565
T (°C)	80	80	80	80	80

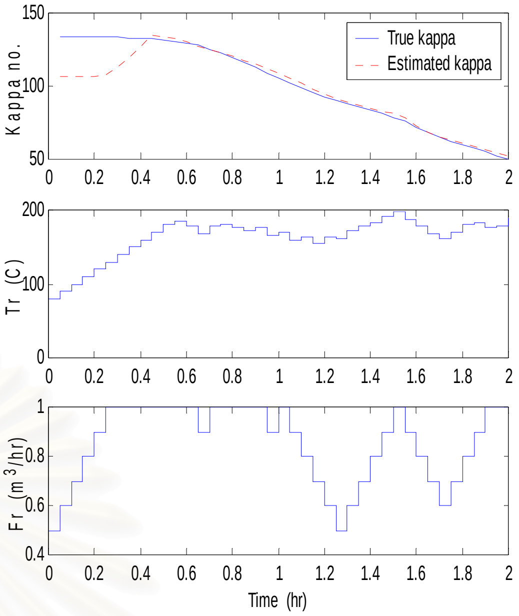
ผลการทดสอบกรณีที่ 1

จากรูปที่ 6.19 จะเห็นว่าตัวควบคุม FIMC และ PI สามารถควบคุมค่าแคปปาให้เข้าใกล้ค่า 50 ได้เช่นเดียวกัน โดยการปรับของอุณหภูมิในสายหมุนเวียนเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น 80 °C จนอยู่ในช่วงประมาณ 160-180 °C ซึ่งเป็นช่วงที่ปฏิกิริยาเกิดได้ดี แต่ตัวควบคุม FIMC มีการปรับตัวของตัวแปรปรับน้อยกว่าตัวควบคุม PI

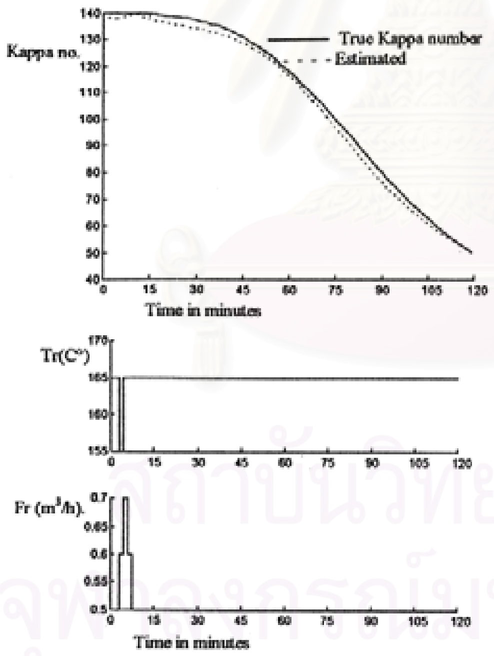
สำหรับการประมาณค่าสังเกตได้ว่ามีความคลาดเคลื่อนในช่วงแรก แต่อย่างไรก็ตามตัวประมาณค่าฟัซซีสามารถทำให้ค่าแคปปาที่ประมาณได้ลู่เข้าสู่ค่าจริงในเวลาประมาณ 30 นาทีเท่านั้น



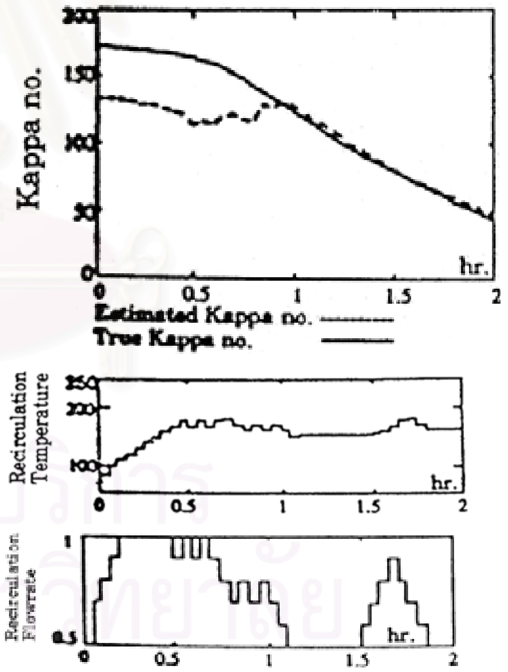
FIMC



PI



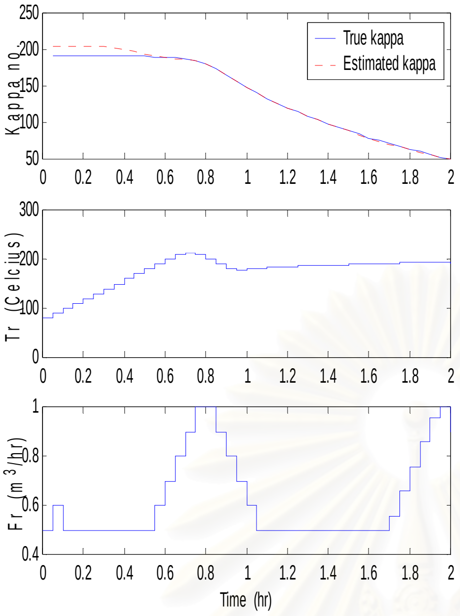
FLC



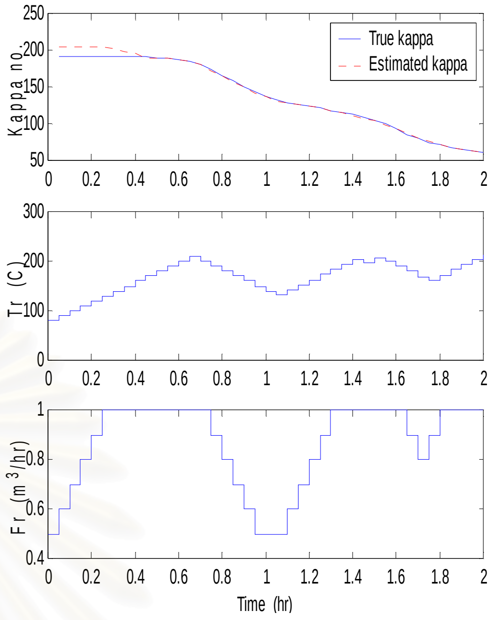
MPC

รูปที่ 6.19 ผลการควบคุมในกรณีที่ 1

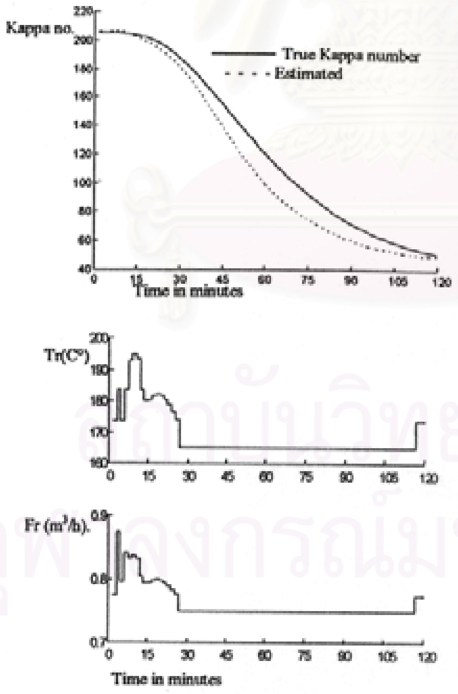
ผลการทดสอบกรณีที่ 2



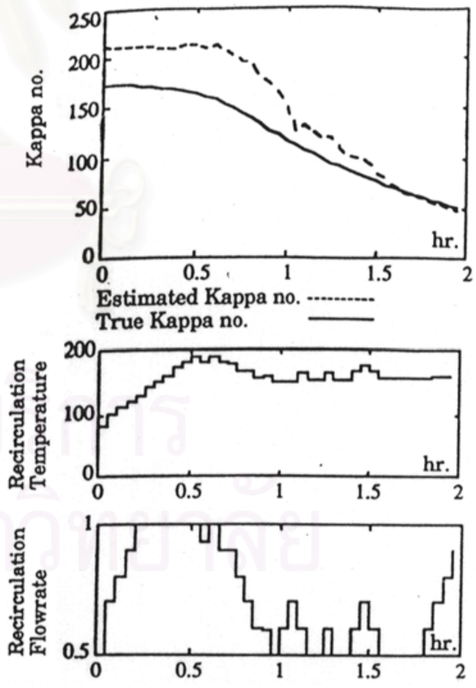
FIMC



PI



FLC



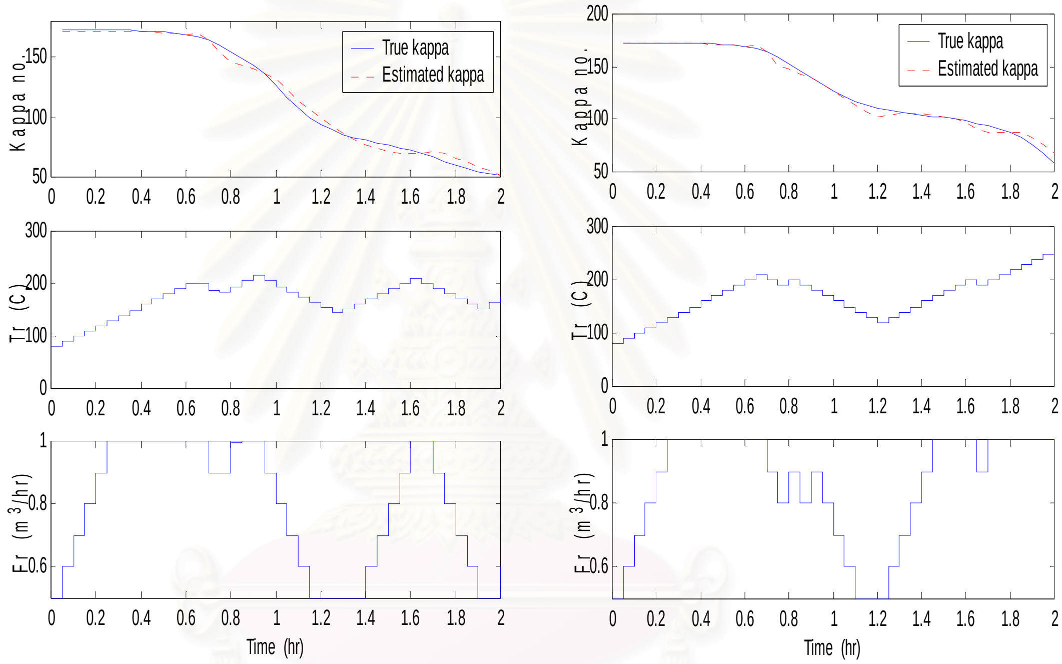
MPC

รูปที่ 6.20 ผลการควบคุมในกรณีที่ 2

จากรูปที่ 6.20 จะเห็นว่าตัวควบคุม FIMC สามารถควบคุมค่าแคปปาให้เข้าใกล้ค่า 50 ได้ แต่ตัวควบคุม PI ไม่สามารถควบคุมเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ สังเกตได้จากเกิดออฟเซตที่ค่าแคปปาสุดท้าย นอกจากนี้ตัวควบคุม PI มีการปรับตัวของตัวแปรปรับมากกว่าตัวควบคุม PI สังเกตได้จากเกิดการแกว่งของ Tr

สำหรับการประมาณค่าสังเกตได้ว่ามีความคลาดเคลื่อนในช่วงแรก แต่ตัวประมาณค่าฟัซซีสามารถทำให้ค่าแคปปาที่ประมาณได้ลู่เข้าสู่ค่าจริงในเวลาประมาณ 40 นาที

ผลการทดสอบกรณีที่ 3



FIMC　　　　PI

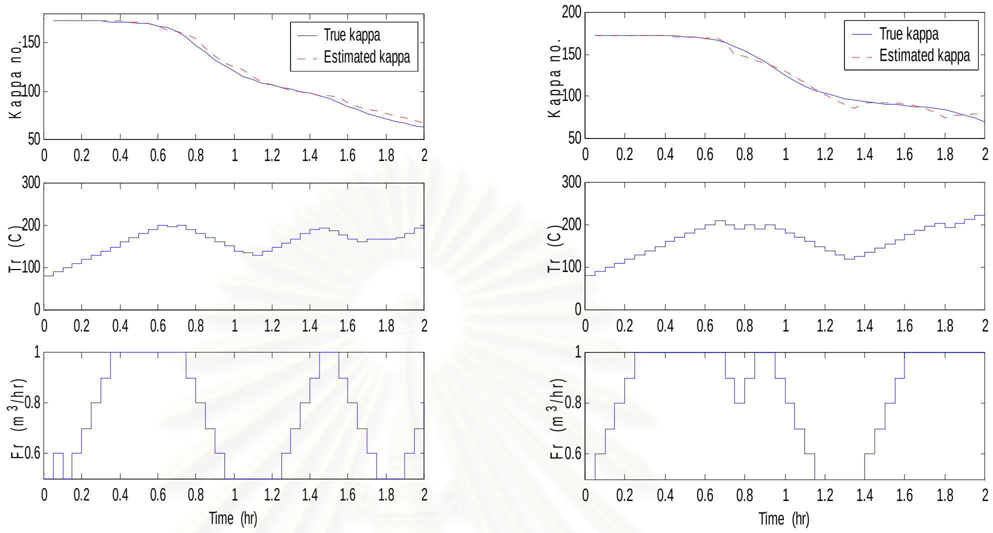
รูปที่ 6.21 ผลการควบคุมในกรณีที่ 3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 6.21 พบว่าทั้งตัวควบคุม FIMC และ PI ไม่สามารถควบคุมค่าแคปปาให้ถึงค่าที่ต้องการได้ สังเกตได้จากเกิดออฟเซตที่ค่าแคปปาค่าสุดท้าย เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของ NaOH ผิดพลาดไป ซึ่ง NaOH เป็นตัวแปรที่รวมอยู่ในแบบจำลองฟัซซีของตัวประมาณค่า ส่งผลให้การประมาณค่าคลาดเคลื่อน จึงทำให้ผลการควบคุมแย่ลง

ผลการทดสอบกรณีที่ 4

จากรูปที่ 6.22 ผลที่ได้สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับกรณีที่ 3

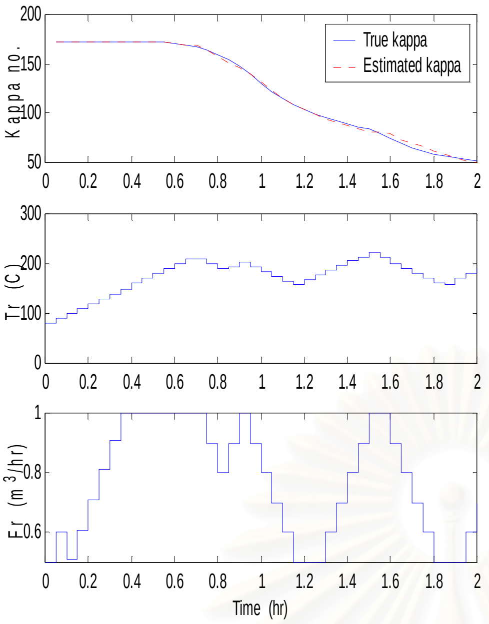


FIMC PI

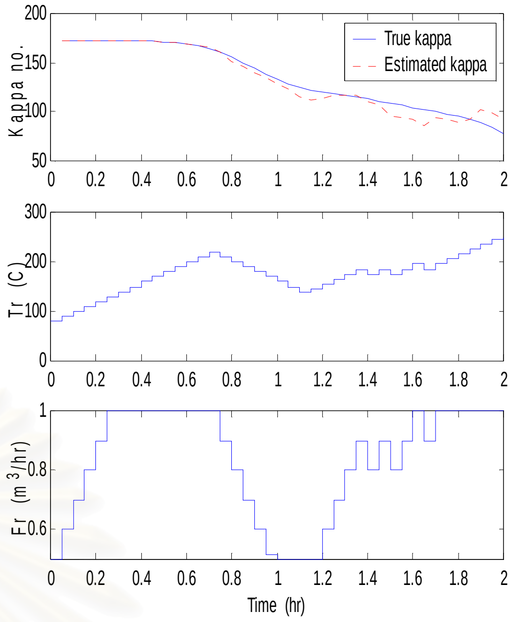
รูปที่ 6.22 ผลการควบคุมในกรณีที่ 4

6.4.2.2 กรณีมีสัญญาณรบกวนจากการวัด

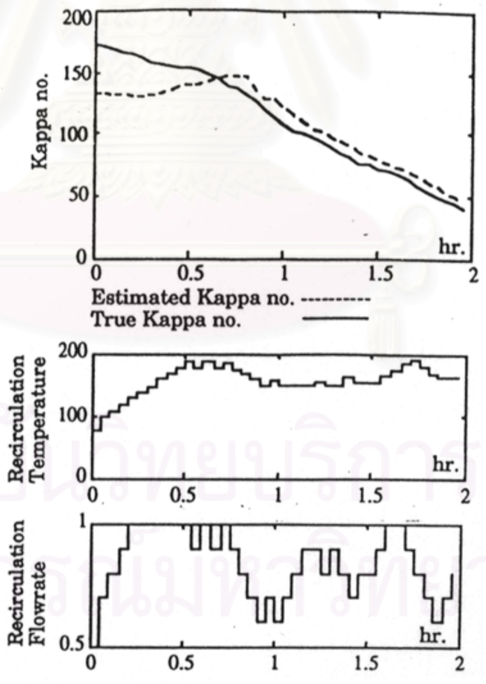
จากรูปที่ 6.23 แสดงให้เห็นว่าสัญญาณรบกวนไม่มีผลต่อการควบคุมด้วยตัวควบคุม FIMC เนื่องจากในโครงสร้างของตัวควบคุม FIMC มีตัวกรองสัญญาณรบกวนรวมอยู่ด้วย แต่ไม่มีในตัวควบคุม PI ดังนั้นตัวควบคุม PI จึงไม่สามารถจัดการกับสัญญาณรบกวนได้ ส่งผลให้ค่าแคปปาค่าสุดท้ายไม่ถึงค่าเป้าหมาย



FIMC



PI



MPC

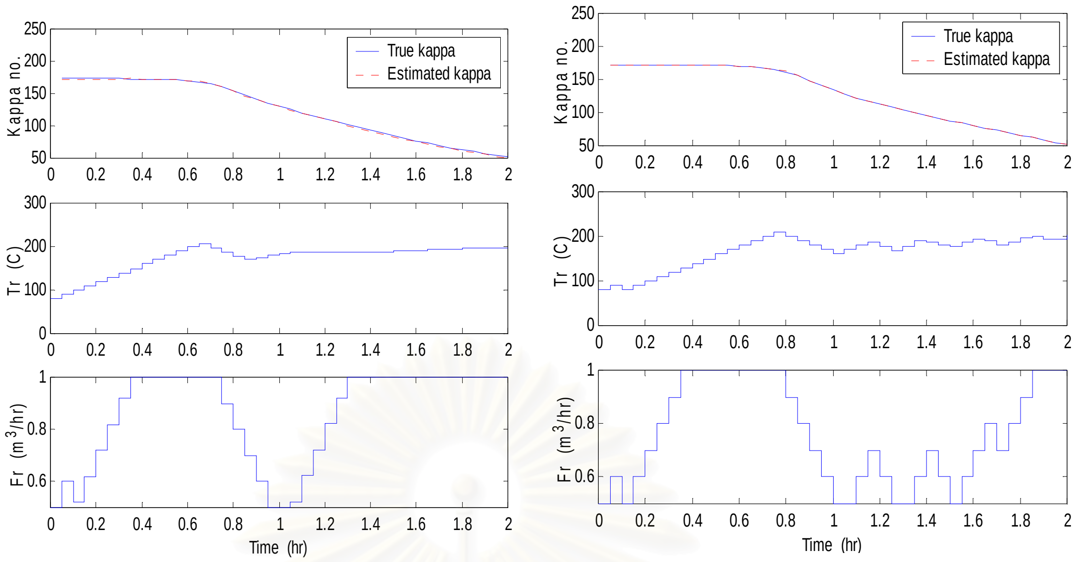
รูปที่ 6.23 ผลการควบคุมในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนจากการวัด

6.4.2.3 กรณีที่ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ผิดพลาด

การทดสอบนี้มีความจำเป็นอย่างยิ่งเนื่องจากค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แทนกระบวนการจริงนั้นอาจมีค่าไม่ตรงกับกระบวนการจริงในอุตสาหกรรม ซึ่งส่งผลต่อสมรรถนะของตัวควบคุม ดังนั้นจึงต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ไปจากค่าที่ใช้อยู่เดิมเพื่อทดสอบการทำงานของตัวควบคุม ตัวควบคุมอาจจะยังทำงานได้ดีทั้งๆ ที่มีค่าพารามิเตอร์บางตัวผิดพลาดไปมาก แต่อาจไม่สามารถควบคุมได้แม้ค่าพารามิเตอร์บางตัวมีความผิดพลาดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

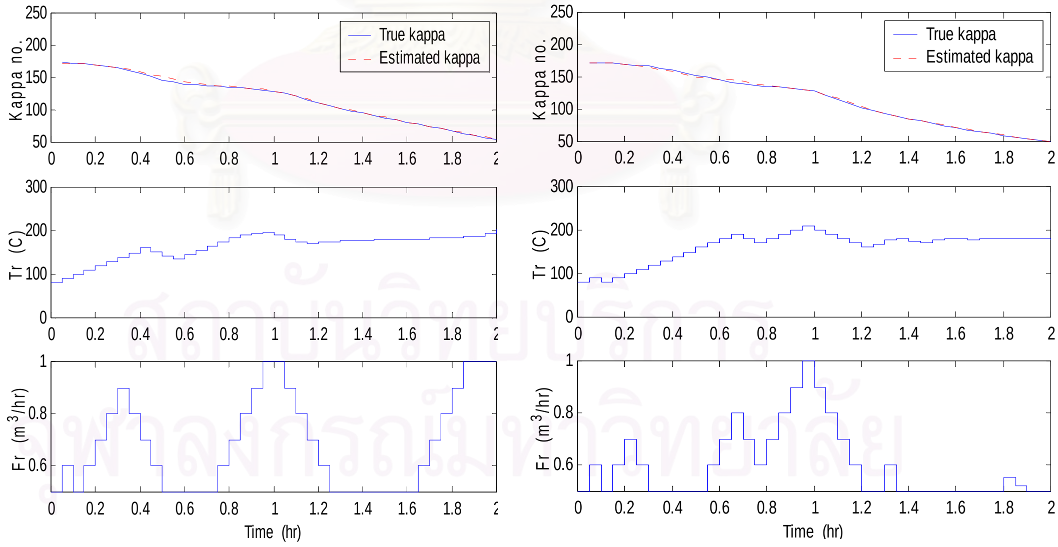
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวย่อยเยื่อกระดาษมีพารามิเตอร์ถึง 36 ตัว ประกอบด้วย ค่าพลังงานกระตุ้นที่ 1 (E_1) ค่าพลังงานกระตุ้นที่ 2 (E_2) ค่าแฟกเตอร์ความถี่ที่ 1 (A_1) ค่าแฟกเตอร์ความถี่ที่ 2 (A_2) ค่าสัมประสิทธิ์ Stoichiometric สำหรับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (S_{c_3}) ค่าสัมประสิทธิ์ Stoichiometric สำหรับโซเดียมซัลไฟด์ (S_{c_4}) ซึ่งแต่ละค่าเหล่านี้จำแนกสำหรับแต่ละองค์ประกอบในไม้ ดังนั้นค่าพารามิเตอร์เหล่านี้รวมเป็น 30 ตัว นอกจากนี้ยังมี ค่าคงที่อันดับปฏิกิริยาของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (a) ค่าคงที่อันดับปฏิกิริยาของโซเดียมซัลไฟด์ (b) ค่าความร้อนที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา (ΔH) ค่าคงที่การถ่ายโอนมวลสารตัวที่ 1 (M_1) ค่าคงที่การถ่ายโอนมวลสารตัวที่ 2 (M_2) และค่าความจุความร้อนจำเพาะ (C_p) จะเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์มีจำนวนมากดังนั้นในที่นี้จะเลือกทดสอบเฉพาะค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญซึ่งก็คือ ค่าพลังงานกระตุ้นที่ 1 (E_1) ค่าพลังงานกระตุ้นที่ 2 (E_2) ขององค์ประกอบในไม้ทั้ง 5 รวมค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ทดสอบทั้งหมด 10 ตัว โดยเปลี่ยนค่าให้ผิดพลาดไป $\pm 50\%$ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 6.24 – 6.43

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



FIMC PI

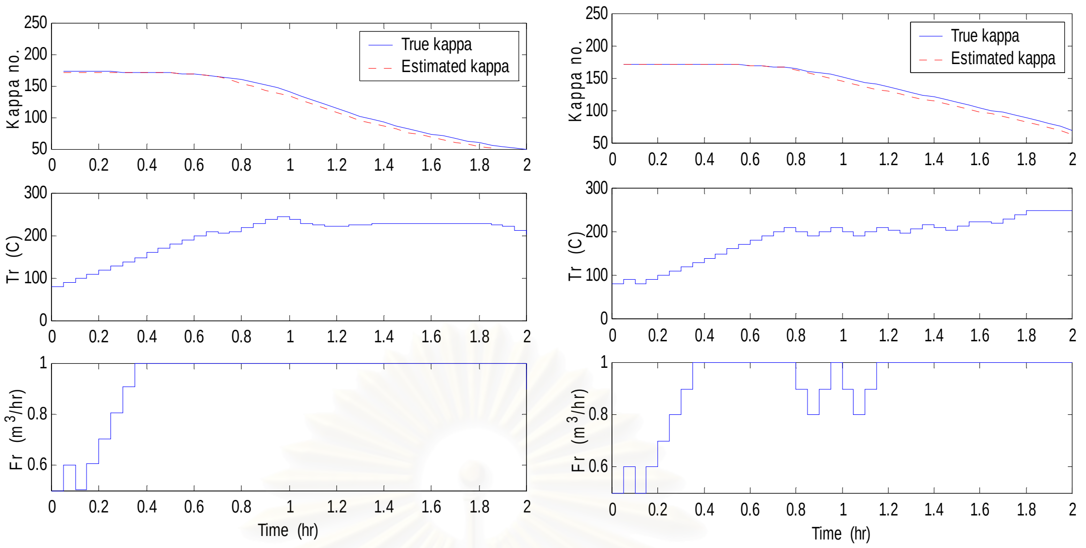
รูปที่ 6.24 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 1 ขององค์ประกอบที่ 1 (E_{11}) เปลี่ยนแปลงไป +50%



FIMC PI

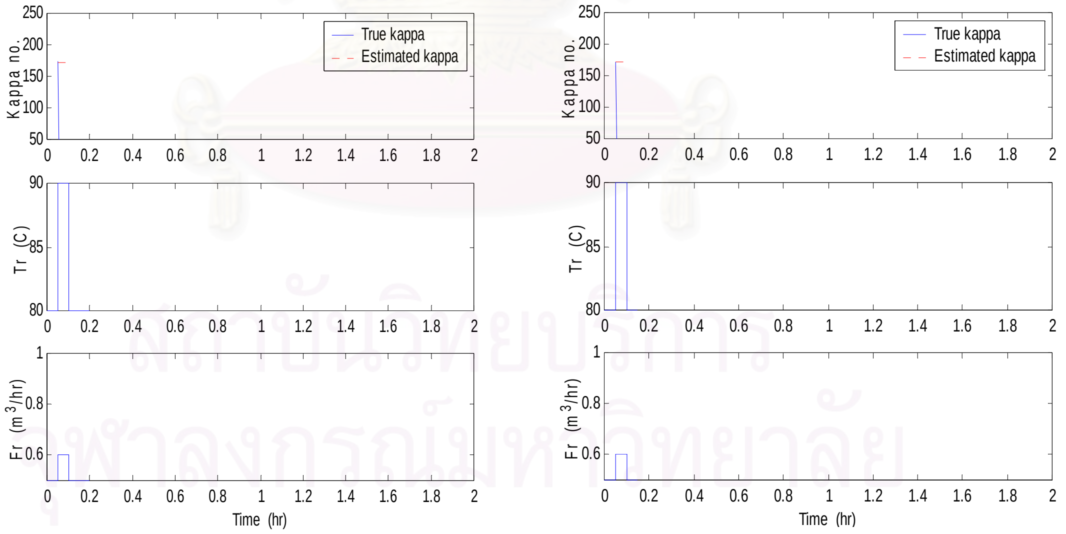
รูปที่ 6.25 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 1 ขององค์ประกอบที่ 1 (E_{11}) เปลี่ยนแปลงไป -50%

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



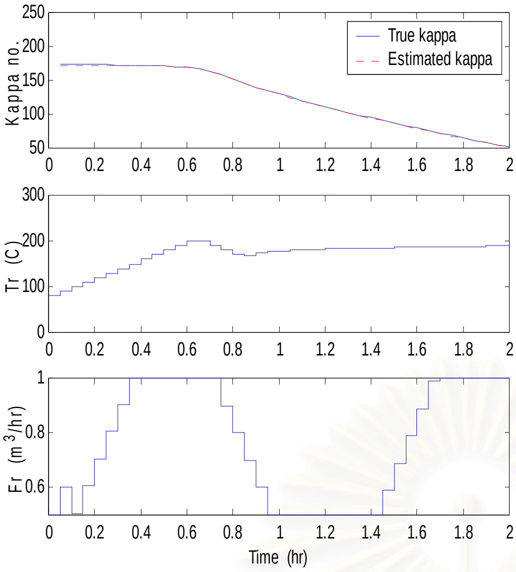
FIMC PI

รูปที่ 6.26 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 1 ขององค์ประกอบที่ 2 (E_{12}) เปลี่ยนแปลงไป +50%

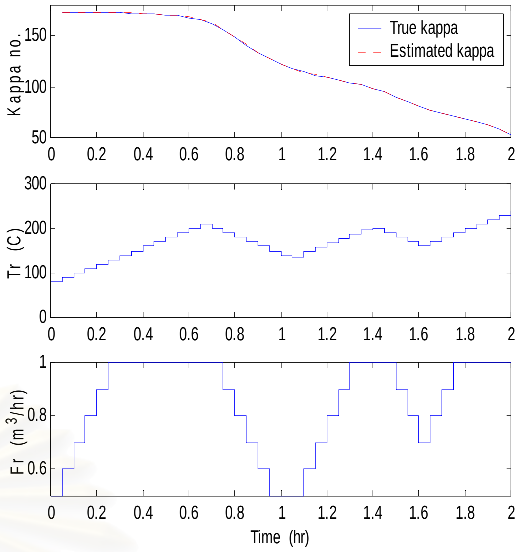


FIMC PI

รูปที่ 6.27 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 1 ขององค์ประกอบที่ 2 (E_{12}) เปลี่ยนแปลงไป -50%

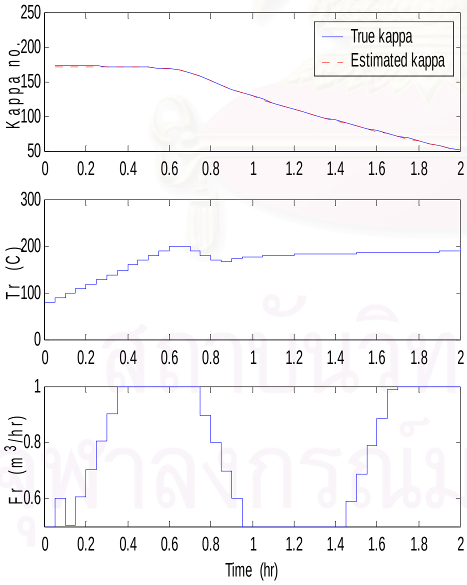


FIMC

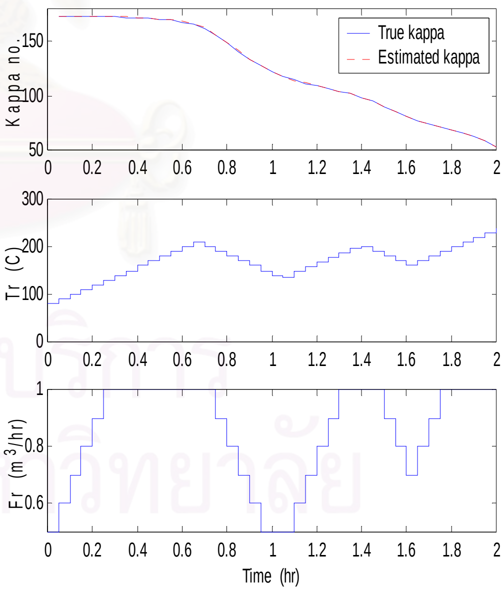


PI

รูปที่ 6.28 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 1 ขององค์ประกอบที่ 3 (E_{13}) เปลี่ยนแปลงไป +50%



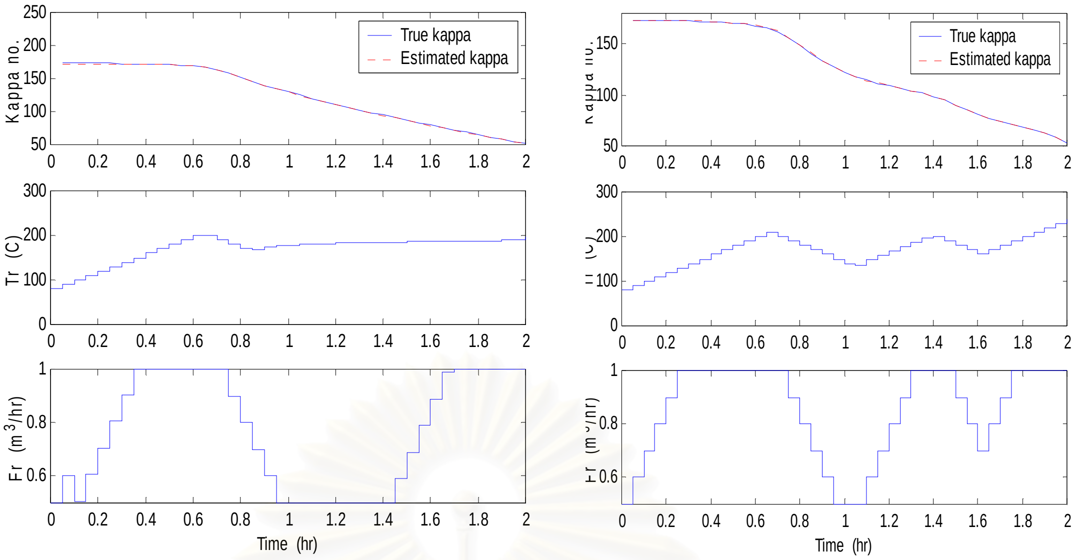
FIMC



PI

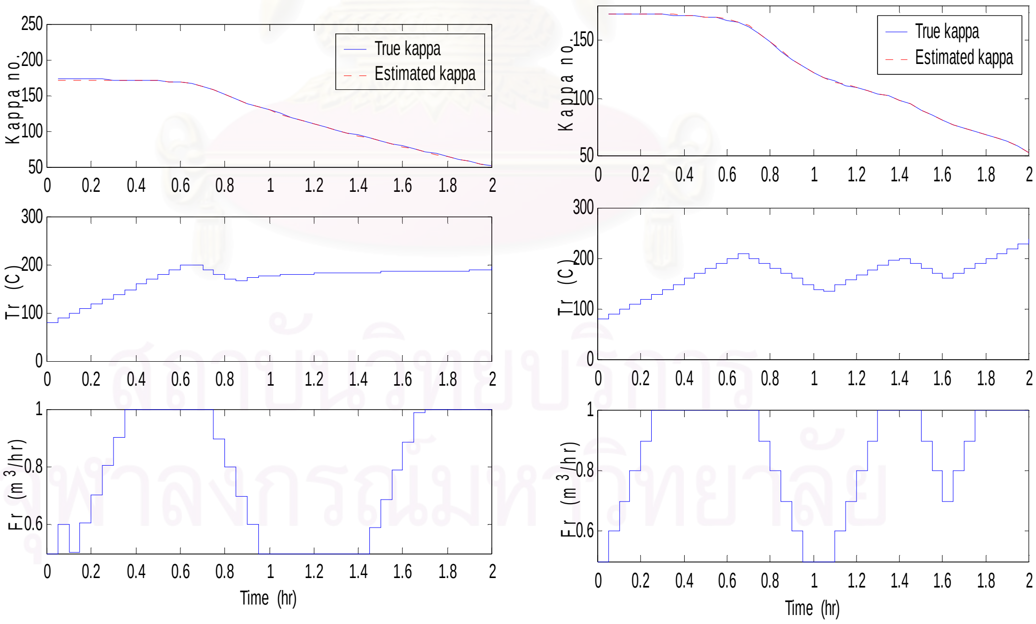
รูปที่ 6.29 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 1 ขององค์ประกอบที่ 3 (E_{13}) เปลี่ยนแปลงไป -50%

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



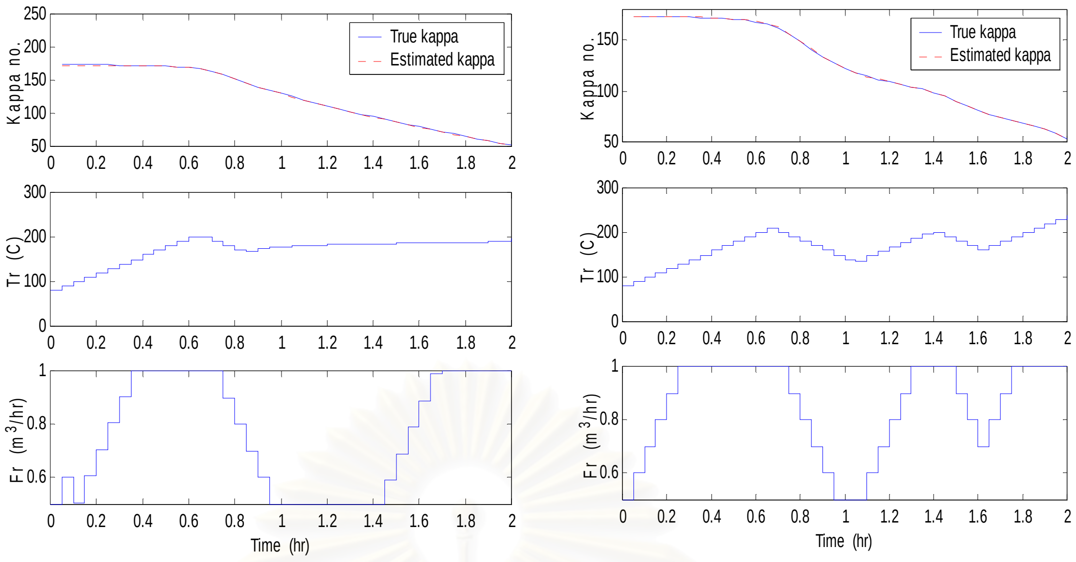
FIMC PI

รูปที่ 6.30 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 1 ขององค์ประกอบที่ 4 (E_{14}) เปลี่ยนแปลงไป +50%



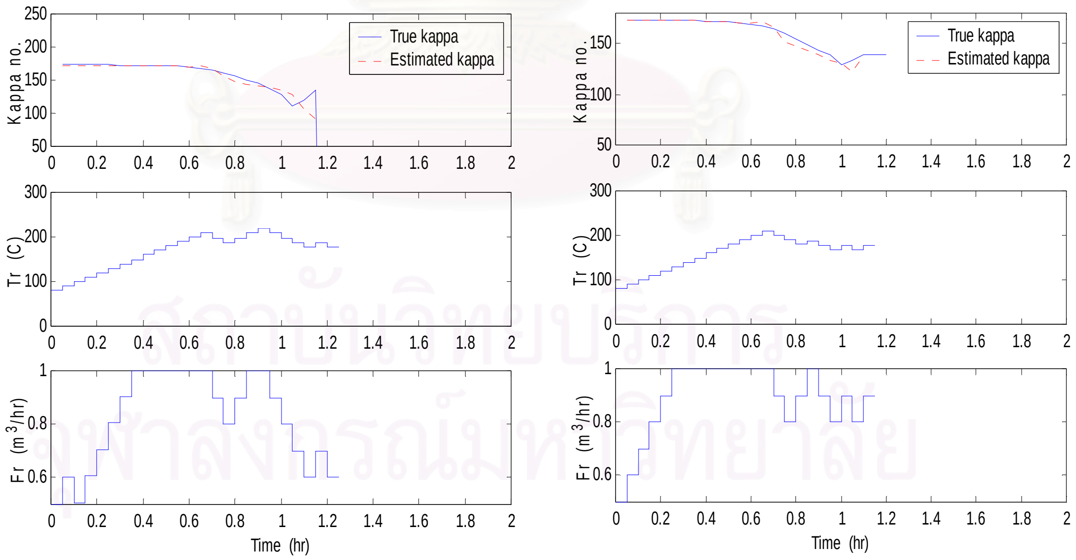
FIMC PI

รูปที่ 6.31 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 1 ขององค์ประกอบที่ 4 (E_{14}) เปลี่ยนแปลงไป -50%



FIMC PI

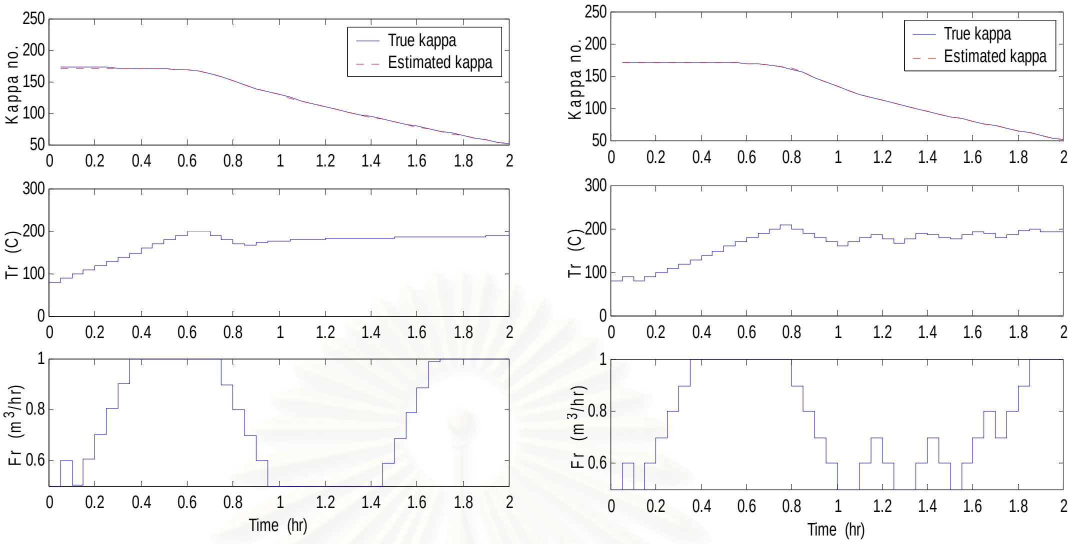
รูปที่ 6.32 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 1 ขององค์ประกอบที่ 5 (E_{15}) เปลี่ยนแปลงไป +50%



FIMC PI

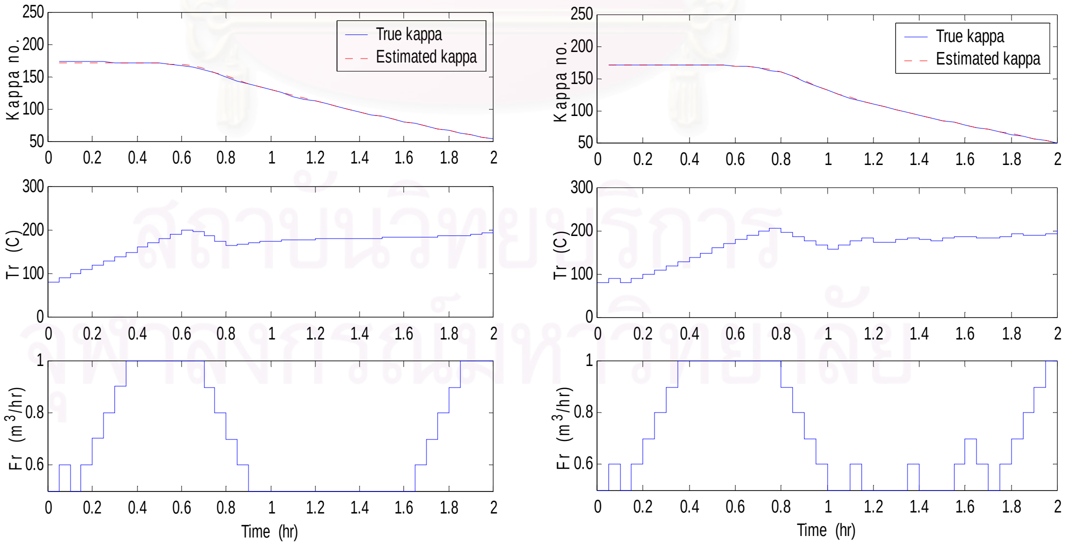
รูปที่ 6.33 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 1 ขององค์ประกอบที่ 5 (E_{15}) เปลี่ยนแปลงไป -50%

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



FIMC PI

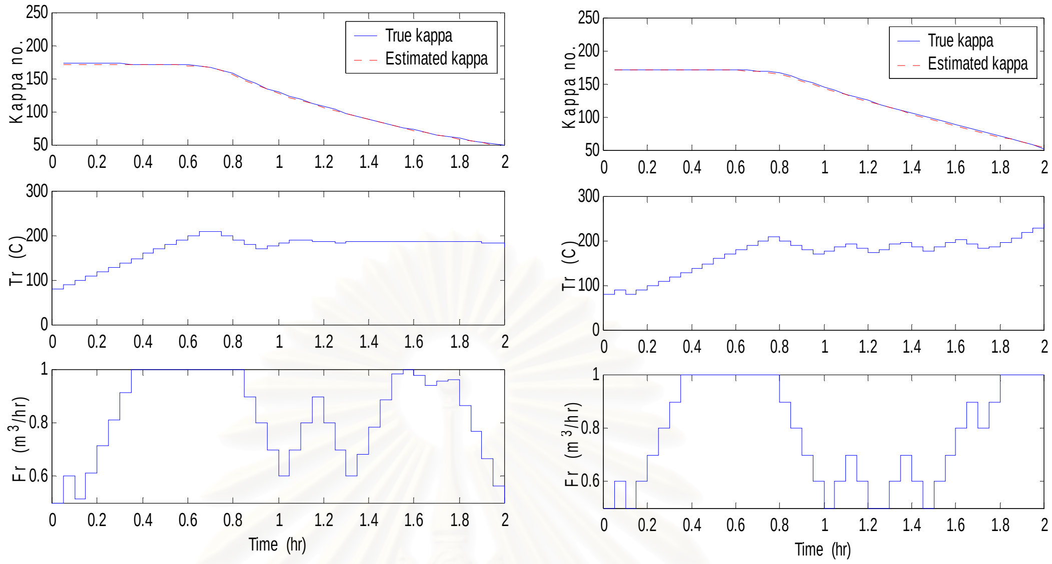
รูปที่ 6.34 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 2 ขององค์ประกอบที่ 1 (E_{21}) เปลี่ยนแปลงไป +50%



FIMC PI

รูปที่ 6.35 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 2 ขององค์ประกอบที่ 1 (E_{21}) เปลี่ยนแปลงไป -50%

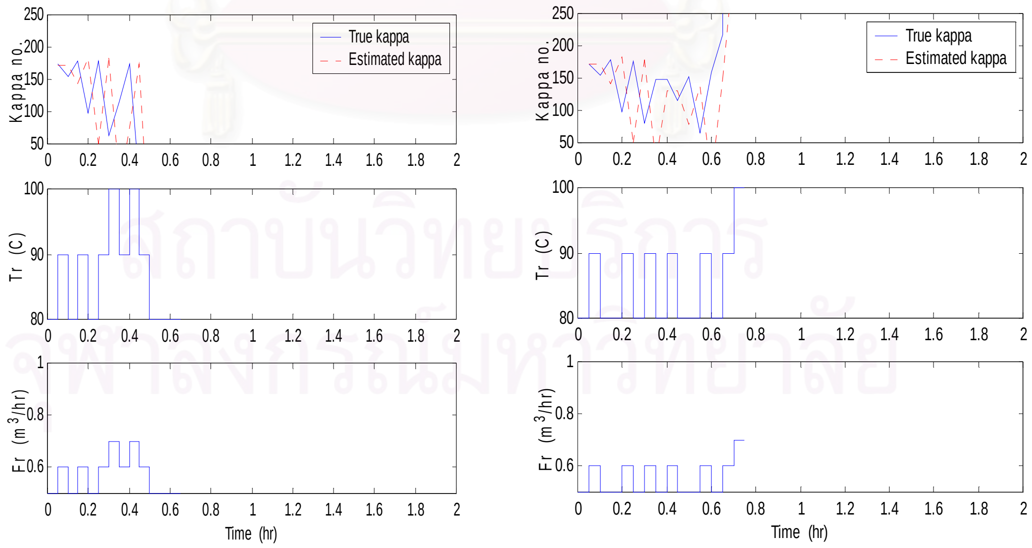
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



FIMC PI

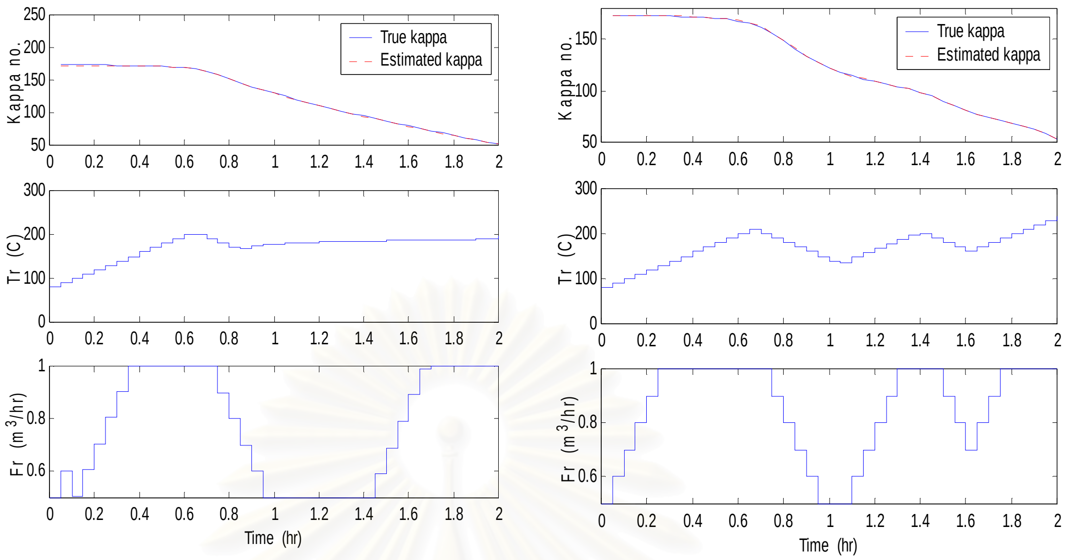
รูปที่ 6.36 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 2 ขององค์ประกอบที่ 2 (E_{22}) เปลี่ยนแปลงไป +50%

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



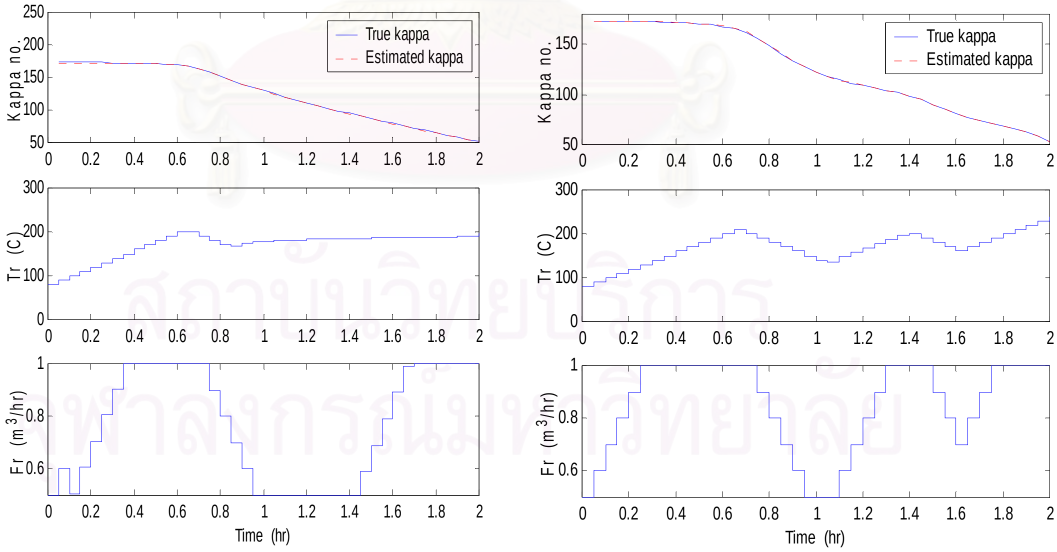
FIMC PI

รูปที่ 6.37 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 2 ขององค์ประกอบที่ 2 (E_{22}) เปลี่ยนแปลงไป -50%



FIMC PI

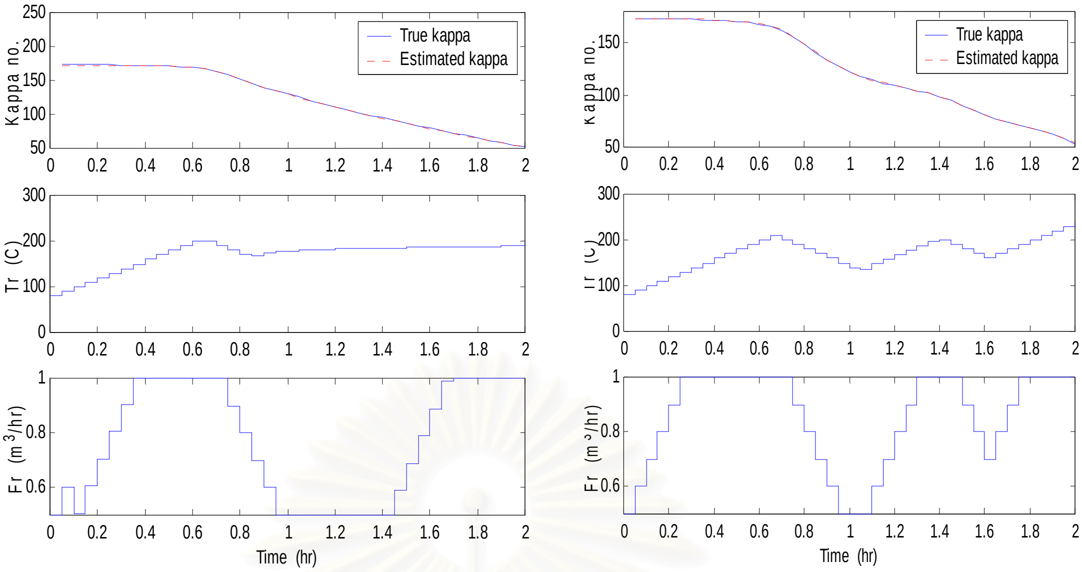
รูปที่ 6.38 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 2 ขององค์ประกอบที่ 3 (E_{23}) เปลี่ยนแปลงไป +50%



FIMC PI

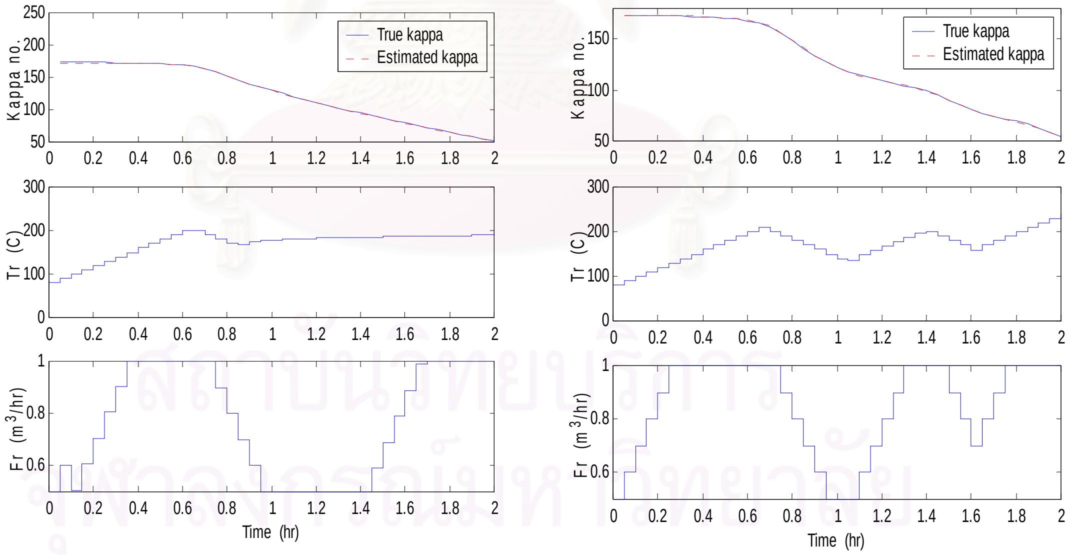
รูปที่ 6.39 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 2 ขององค์ประกอบที่ 3 (E_{23}) เปลี่ยนแปลงไป -50%

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



FIMC PI

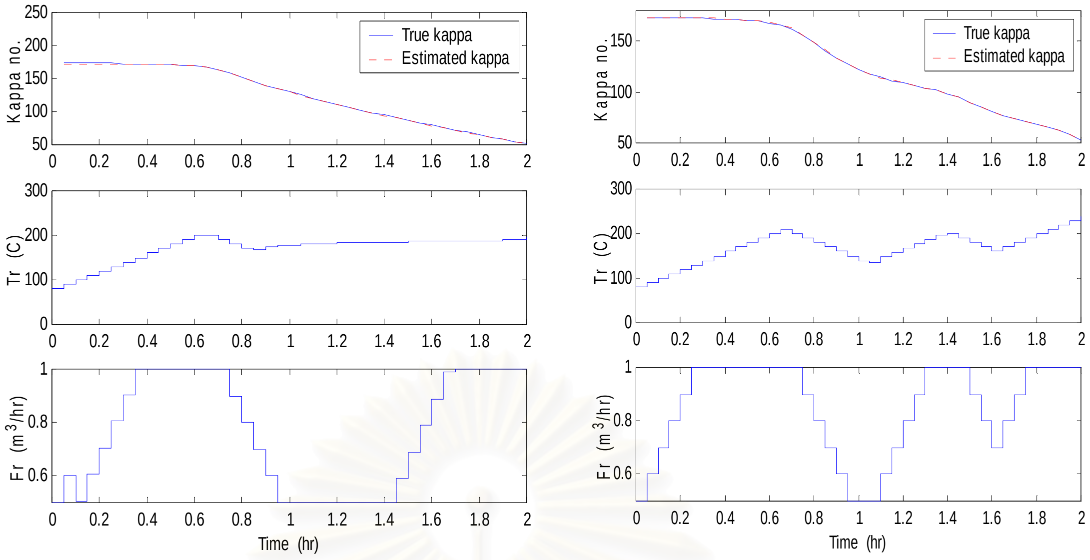
รูปที่ 6.40 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 2 ขององค์ประกอบที่ 4 (E_{24}) เปลี่ยนแปลงไป +50%



FIMC PI

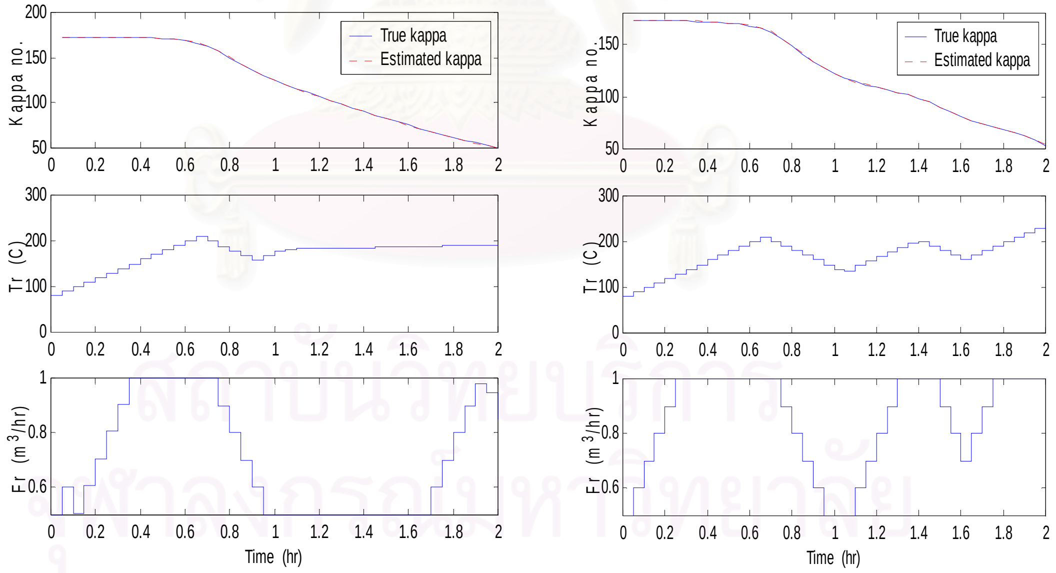
รูปที่ 6.41 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 2 ขององค์ประกอบที่ 4 (E_{24}) เปลี่ยนแปลงไป -50%

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



FIMC PI

รูปที่ 6.42 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 2 ขององค์ประกอบที่ 5 (E_{25}) เปลี่ยนแปลงไป +50%

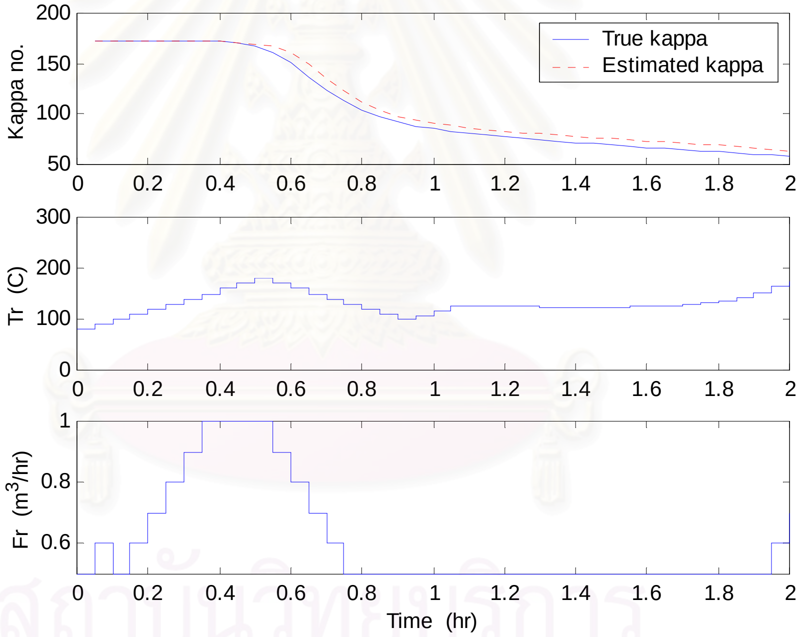


FIMC PI

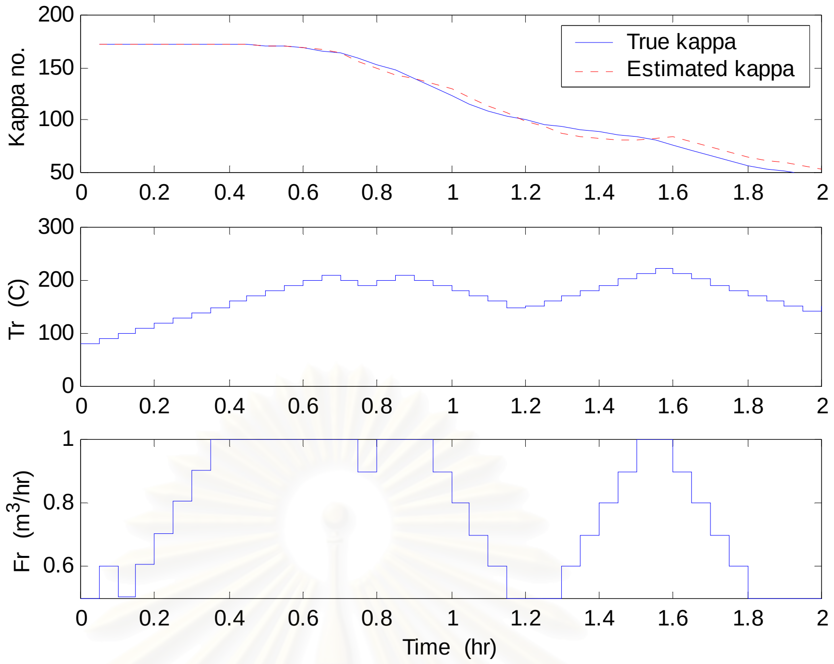
รูปที่ 6.43 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 2 ขององค์ประกอบที่ 5 (E_{25}) เปลี่ยนแปลงไป -50%

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

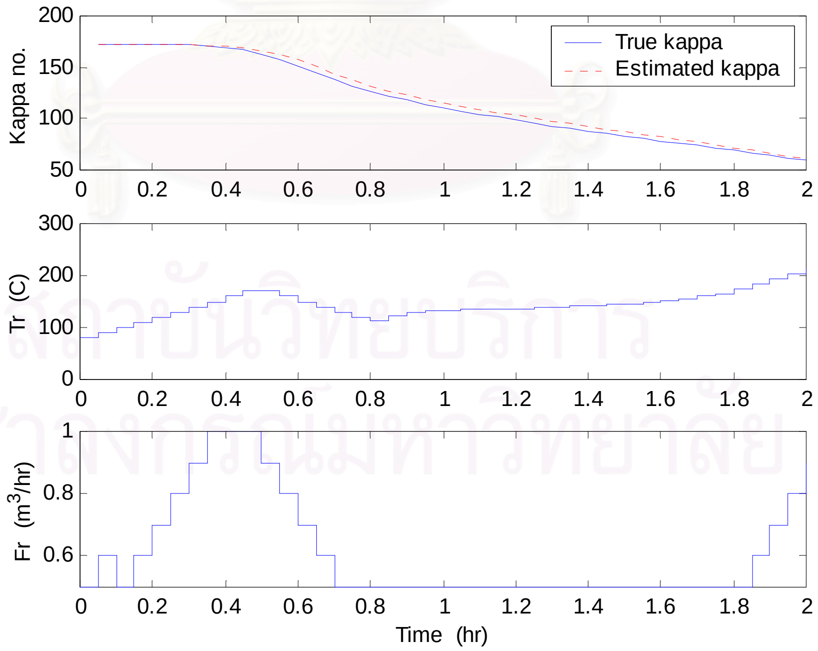
จากรูปที่ 6.24 – 6.43 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ไปมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ พบว่าเมื่อค่าพารามิเตอร์มีความผิดพลาดไปจากเดิมแล้วมีผลน้อยมากหรือไม่มีผลต่อการควบคุม กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ตัวควบคุมฟัซซีมีความทนทานต่อความผิดพลาดของแบบจำลองหรือมีสมรรถนะที่ดี ยกเว้นในกรณีที่ค่า E_{12}, E_{15} และ E_{22} ผิดพลาดไป –50% ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นทั้ง 3 ตัวนี้ลดลงส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาขององค์ประกอบนั้นเกิดเร็วขึ้นดังสมการที่ (5.5) – (5.7) ส่งผลให้มีการใช้สารละลาย NaOH หมดก่อนเวลาที่กำหนด ดังนั้นจึงทำการทดสอบหาความผิดพลาดที่มากที่สุดของพารามิเตอร์ 3 ตัวนี้ ที่ตัวควบคุม FIMC ยังสามารถควบคุมได้ พบว่าค่า E_{12} ผิดพลาดไป -10% E_{15} ผิดพลาดไป –40% และ E_{22} ผิดพลาดไป –15% เป็นค่าที่มากที่สุดที่สามารถควบคุมได้ แสดงผลดังรูปที่ 6.44 – 6.46



รูปที่ 6.44 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 1 ขององค์ประกอบที่ 2 (E_{12}) เปลี่ยนแปลงไป -10%



รูปที่ 6.45 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 1 ขององค์ประกอบที่ 5 (E_{15}) เปลี่ยนแปลงไป -40%



รูปที่ 6.46 ผลการควบคุมเมื่อค่าพลังงานกระตุ้นที่ 2 ขององค์ประกอบที่ 2 (E_{22}) เปลี่ยนแปลงไป -15%

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.5 วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย

6.5.1 การสร้างแบบจำลองฟัซซี

งานวิจัยนี้ประกอบด้วยแบบจำลองฟัซซี 2 ชุด ชุดแรกเป็นแบบจำลองฟัซซีของกระบวนการ ชุดที่สองเป็นตัวประมาณค่าแคปปา ซึ่งแบบจำลองฟัซซีทั้งสองใช้ชุดข้อมูลในการสร้างแบบจำลองที่ต่างกัน ชุดข้อมูลในการสร้างแบบจำลองฟัซซีของกระบวนการ คือ $Z = [L(k-1)\ \ T(k)\ \ Tr(k)\ \ Fr(k)\ \ L(k)]$ หลังจากทำการระบุหาโครงสร้างและพารามิเตอร์ของแบบจำลองฟัซซีโดยวิธีการคลัสเตอริงและลีสท์สแควร์ตามลำดับ ได้จำนวนกฎที่เหมาะสมเท่ากับ 6 กฎ ทำการทดสอบแบบจำลองฟัซซีของกระบวนการที่ได้ ให้ค่า RMS เท่ากับ 0.0840 และเมื่อทำการเปลี่ยนชนิดไม้ พบว่าไม่ส่งผลต่อแบบจำลองฟัซซีที่ได้ สำหรับชุดข้อมูลในการสร้างแบบจำลองฟัซซีของตัวประมาณค่า คือ $Z = [L(k-1)\ \ T(k)\ \ Cf3(k)\ \ L(k)]$ หลังจากทำการระบุหาโครงสร้างและพารามิเตอร์ ได้จำนวนกฎที่เหมาะสมทั้งหมด 7 กฎ ทำการทดสอบแบบจำลองฟัซซีของตัวประมาณค่าที่ได้ ให้ค่า RMS เท่ากับ 0.1700 สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองฟัซซีที่ได้สามารถทำนายค่าได้ดีและความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยที่เกิดขึ้นนี้จะถูกกำจัดไปในโครงสร้างของ IMC

6.5.2 การควบคุมด้วยตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลอง

ตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลองในงานวิจัยนี้ ถูกออกแบบในลักษณะของการควบคุมแบบใช้แบบจำลองภายใน ซึ่งแบบจำลองที่อยู่ภายในเป็นแบบจำลองฟัซซีของกระบวนการและตัวควบคุมฟัซซีได้จากการผกผันแบบจำลองฟัซซีของกระบวนการนี้ โดยอินพุทที่เข้าตัวควบคุมฟัซซี คือความแตกต่างระหว่างค่าแคปปาอ้างอิงกับค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง ส่วนเอาท์พุทที่ออกจากตัวควบคุมฟัซซี คือ อุณหภูมิและอัตราการไหลของสายหมุนเวียน ในกรณีที่ใช้สารป้อนตัวอย่าง พบว่าตัวควบคุม FIMC และตัวประมาณค่าฟัซซีสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพคือ สามารถควบคุมค่าแคปปาให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ในเวลาที่กำหนดและประมาณค่าได้อย่างแม่นยำ และเมื่อเปรียบเทียบกับการควบคุม PI ซึ่งใช้ร่วมกับตัวประมาณค่าฟัซซีเช่นเดียวกัน สรุปได้ว่าตัวควบคุม FIMC ให้ผลการควบคุมที่ดีกว่า

6.5.3 การทดสอบตัวควบคุมและตัวประมาณค่าฟัซซี

ผลการทดสอบในกรณีต่างๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6.6 และ 6.7

ตารางที่ 6.6 ผลการควบคุมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสารป้อน

กรณี	ความคลาดเคลื่อนของค่าแคปปาจากค่าเป้าหมาย		ความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่า (IAE)	
	FIMC	**PI**	**FIMC**	**PI**
ตัวอย่าง	0.0091	2.9783	0.3730	0.3465
1	0.1052	0.5374	11.4294	12.0179
2	0.8928	1.2620	5.9340	5.4932
3	2.4060	8.6016	6.9833	5.1290
4	10.0383	20.3635	5.0007	5.1465
Noise	0.8704	27.8713	5.5949	9.0794

จากตารางที่ 6.6 จะเห็นว่าตัวควบคุม FIMC สามารถควบคุมค่าแคปปาให้เข้าใกล้ค่าเป้าหมายได้ถึงแม้จะมีการเปลี่ยนชนิดไม้ (กรณีที่ 1 และ 2) สำหรับการประมาณค่าในกรณีนี้มีความคลาดเคลื่อนในช่วงแรกจึงทำให้ค่า IAE มาก แต่ก็สามารถลู่เข้าสู่ค่าจริงได้ และผลการควบคุมเกิดออฟเซตเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเปลี่ยนไป (กรณีที่ 3 และ 4) เนื่องจากเกิดความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองฟัซซีที่ใช้เป็นตัวประมาณค่า ตัวควบคุม FIMC ยังให้ผลการควบคุมที่ดีในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนจากการวัด นอกจากนี้ยังให้สมรรถนะในการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุม PI สังเกตได้จากค่า Error ที่น้อยกว่า

จากตารางที่ 6.7 จะเห็นว่าตัวควบคุม FIMC ยังสามารถควบคุมค่าแคปปาได้ดีเมื่อมีค่าพารามิเตอร์ผิดพลาด ยกเว้นกรณี E_{12}, E_{15} และ E_{22} ผิดพลาดไป –50% ถึงอย่างไรก็ตาม ตัวควบคุม FIMC ยังสามารถควบคุมค่าแคปปาให้ถึงค่าเป้าหมายได้เมื่อค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ตัวนี้ผิดพลาดไป –10%, -40% และ –15% ตามลำดับ จึงถือได้ว่าตัวควบคุม FIMC มีความทนทานต่อความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของกระบวนการ

ตารางที่ 6.7 ผลการควบคุมเมื่อค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองผิดพลาด

กรณี	ความคลาดเคลื่อนของค่าแคปปาจากค่าเป้าหมาย		ความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่า (IAE)	
	FIMC	PI	FIMC	PI
E11 +50%	1.2113	1.2270	1.5718	1.3527
E11 -50%	2.9944	-0.7689	2.0906	2.1423
E12 +50%	-0.5563	14.3511	8.2876	8.3945
E12 -50%	-	-	-	-
E13 +50%	-0.0096	2.9642	0.3948	0.3463
E13 -50%	0.0092	2.9765	0.3730	0.3458
E14 +50%	0.0097	2.9568	0.3947	0.3462
E14 -50%	0.0097	3.1658	0.3733	0.3569
E15 +50%	-0.0099	2.9558	0.3948	0.3461
E15 -50%	-	-	-	-
E21 +50%	-0.0093	2.9785	0.3949	0.3465
E21 -50%	1.3082	1.4806	0.7098	0.7940
E22 +50%	-0.7539	5.6523	1.8906	1.7936
E22 -50%	-	-	-	-
E23 +50%	-0.0095	2.9693	0.3948	0.3463
E23 -50%	0.0097	2.9568	0.3730	0.3465
E24 +50%	1.2701	3.0729	0.3735	0.3479
E24 -50%	1.2763	3.5873	0.3760	0.3569
E25 +50%	1.2738	2.9680	0.3730	0.3463
E25 -50%	-0.0089	3.0002	0.3950	0.3468

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลองภายในมีสมรรถนะในการควบคุมที่ดี สามารถควบคุมค่าแคปปาให้เข้าใกล้ค่าที่ต้องการ ได้ในเวลาที่กำหนด สามารถจัดการกับสัญญาณรบกวนจากการวัดได้ และยังมีความทนทานต่อความผิดพลาดของพารามิเตอร์ในระดับหนึ่ง นอกจากนี้ตัวควบคุม FIMC ยังมีสมรรถนะในการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุม PI เนื่องจากตัวควบคุม FIMC มีการปรับของตัวแปรปรับน้อยกว่า อีกทั้งตัวควบคุม PI ยังต้องใช้เวลามากในการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ในการควบคุม

นอกจากจะสามารถประยุกต์ใช้แบบจำลองฟัซซีในการควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพแล้ว ยังสามารถใช้แบบจำลองฟัซซีในการประมาณค่าได้อย่างแม่นยำ

6.5 ข้อเสนอแนะ

6.6.1 การระบุหาแบบจำลองฟัซซี ควรมีการประยุกต์ใช้เทคนิคการปรับค่าฟังก์ชันสมาชิกและค่าพารามิเตอร์ของกฎ เพื่อความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น

6.6.2 ข้อมูลอินพุท-เอาท์พุทของกระบวนการที่นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองฟัซซีมีความสำคัญอย่างมาก ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการระบุหาและการทำนายค่าของแบบจำลองฟัซซี ดังนั้นจึงควรเลือกข้อมูลที่ครอบคลุมการเปลี่ยนแปลงบริเวณที่ต้องการระบุหาแบบจำลอง

6.6.3 แบบจำลองฟัซซีเหมาะสำหรับการนำมาใช้ในการจำลองกระบวนการที่มีความซับซ้อนนอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการประมาณค่าตัวแปรที่ไม่สามารถวัดค่าได้

6.6.4 เมื่อค่าพารามิเตอร์บางตัวของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ผิดพลาดส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นจึงควรมีการประมาณค่าพารามิเตอร์เพื่อความถูกต้องแม่นยำและเพื่อสมรรถนะในการควบคุมที่ดีขึ้น

6.6.5 ควรมีการทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของสารละลาย NaOH และ Na_2S ที่เหมาะสมต่อไม้ชนิดต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

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

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

ไพศาล กิตติศุภกร. **การควบคุมกระบวนการอัตโนมัติขั้นสูง.** เอกสารประกอบการสอน ปรับปรุงครั้งที่ 3. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ธันวาคม 2542

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

สุวลัย กลั่นความดี. **โปรแกรมพัฒนาสำหรับตัวควบคุมแบบตรรกศาสตร์ฟัซซี.** รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 1 ทุนโครงการสิ่งประดิษฐ์ประเภทโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.

ภาษาอังกฤษ

Babuska, R., Roubos, J.A.,Verburuggen, B. Identification of MIMO Systems by Input-output TS Fuzzy Models. **IEEE.** (1998) : 657-662.

Babuska, R. Fuzzy Modeling: A Control Engineering Perspective. **IEEE.** (1995) :1897-1902.

Babuska R., Verbruggen, H.B. An Overview of Fuzzy Modeling for Control. **Control Eng. Practice.** 4, 11(1996) : 1593-1606.

Belarbi K., Bettou K., Mezaache A. Fuzzy Neural Networks for estimation and Fuzzy Controller Design: Simulation Study for a Pulp Batch Digester. **Journal of Process Control.** 10(2000) : 35-41.

Christensen T., Smith C.C., Albright L.F., Williams T.J., Modelling of Batch Kraft Pulping and of Kamyr Digesters. **Pulp & Paper Canada** 85, 8 (1984).

Cipriano, A., Saez,D., Rmos, M. Fuzzy Control on A Laboratory Environment. **IEEE.** (1995) : 500-505.

Emami, M.R., Turksen, I.B.,Goldenberg, A.A., An Improved Fuzzy Modeling Algorithm, Part II: System Identification. **IEEE.** (1996): 294-298.

Fogler,S.H. **Elements of Chemical Reaction Engineering**. Second Edition, Prentice Hall International, (1992).

Janos. A., Lajos, N., Ferene, S. Takagi-Sugeno Fuzzy Control of Batch Polymerization Reactors. **IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems** (1997) : 251-255.

Kim, E., Park, M., Ji, S., Park, M. A New approach to Fuzzy Modeling. **IEEE Trans. on Fuzzy Systems** 5, 3 (1997).

Kroszynski, U. and Zhou, J. Fuzzy Clustering: Principles, Methods and Examples. **IKS.** (1998) :1-13.

Kumar,A., Lee, J.H., Vanchinathan, S., Krishnagopalan, G.A. Model-Based Monitoring and Control of Batch Pulp Digester. **Proceedings of the American Control Conference** (1994) : 500-504.

Lee, J. H., Datta, A.K. Nonlinear Inferential Control of Pulp Digesters. **AIChE Journal** 40,1(1994).

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

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

Paulonis, M.A.Adaptive Inferential Control of Kraft Batch Digesters as Based on Pulping Liquor Analysis. **Tappi Journal** (1991) :169-175.

Postlethwaite ,B. A Model-Based Fuzzy Controller. **Trans. IChemE** 72 1994.

Roffel B., Chin P. A., Fuzzy Control of a Polymerization Reactor. **Hydrocarbon Processing** (1991) :47-49.

Shabani, F., Prasad, N. R., Smolleck, H. A. State Estimation with Aid of Fuzzy Logic. **IEEE,** (1995).

Sousa, J.M., Babuska R. and Verbruggen International Model Control with a Fuzzy Model: Application to an Air-Conditioning System. **FUZ-IEEE.** (1997).

Tahani, V. and Sheikholeslam, F. Stability Analysis and Design of Fuzzy Control Systems. **IEEE.** (1998) : 456-461.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Takagi, T. and Sugeno, M. Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control. **IEEE Trans. on Syst. Man. and Cybern**. SMC-15, 1(1995) : 116-132.

Taur, J.S., Tao, C.W. and Tsai, C.C. Temperature Control of a Plastic Extrusion Barrel Using PID International. **IEEE/IAS Conference on Industrial Automation and Control: Emerging Technologies** (1995).

Vanchinathan, S. and Krishnagopalan, G.A. Dynamic Modeling of Kraft Pulping of Southern Pine Based on On-line Liqour Analysis. **Tappi. Journal** 80, 3 (1997).

Yea, B., Osaki, T., Sugahara, K., Konishi, R., The Application of Fuzzy-Neural Network Algorithm on the Estimation of Inflammable Gas Concentration. **SICE.** (1997) : 941-946 .

Zhao J., Wertz V., and Gorez R. A Fuzzy Clustering Method for the Identification of Fuzzy Models for Dynamic Systems. **IEEE International Symposium on Intelligent Control.** (1994).

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

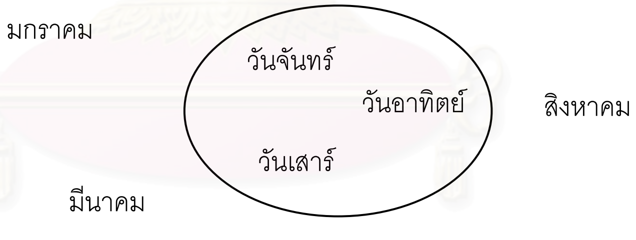
ภาคผนวก ก.

ทฤษฎีตรรกศาสตร์ฟัซซี

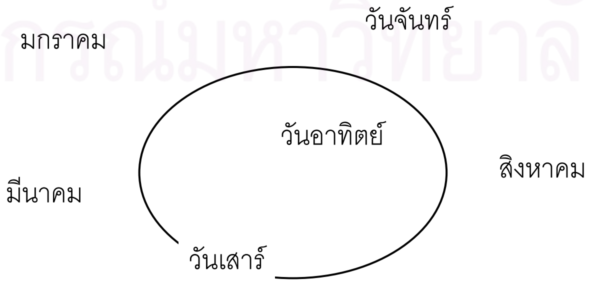
โดยหลักของตรรกศาสตร์ฟัซซีแล้ว ก็คือการแปลงสัญญาณจากขอบเขตสัญญาณขาเข้าไปยังขอบเขตสัญญาณขาออกโดยมีกลไกในการทำ คือการใช้ประโยคเงื่อนไข (If-then) ซึ่งจะเรียกว่ากฎ และในแต่ละกฎจะประมวลโดยไม่ขึ้นแก่กัน ดังนั้นลำดับของกฎจึงไม่มีความสำคัญ

ก.1 เซตฟัซซี (Fuzzy set)

ตรรกศาสตร์ฟัซซี (ฟัซซีเกิดขึ้นจากหลักการของเซตฟัซซี ซึ่งเป็นเซตที่มีขอบเขตที่ไม่ชัดเจนของสมาชิกบางตัวไม่สามารถบอกได้ว่าอยู่ในเซตหรือไม่ แต่จะอยู่ในเซตเพียงบางส่วน หรือที่เรียกว่ามีค่าความเป็นสมาชิก (Degree of membership) เพียงบางส่วน เพื่อให้เกิดความเข้าใจยิ่งขึ้นจะยกตัวอย่างเซตฟัซซี เช่น เซตของวันในแต่ละสัปดาห์ดังรูปที่ ก.1 เซตนี้เป็นเซตที่มีขอบเขตที่ชัดเจน (Crisp set) กล่าวคือ จะไม่มีสมาชิกตัวใดที่เป็นวันในสัปดาห์และไม่เป็นวันในสัปดาห์พร้อมกัน



รูปที่ ก.1 แสดงเซตที่มีขอบเขตชัดเจนของวันในแต่ละสัปดาห์



รูปที่ ก.2 แสดงเซตฟัซซีของวันวันหยุดในแต่ละสัปดาห์

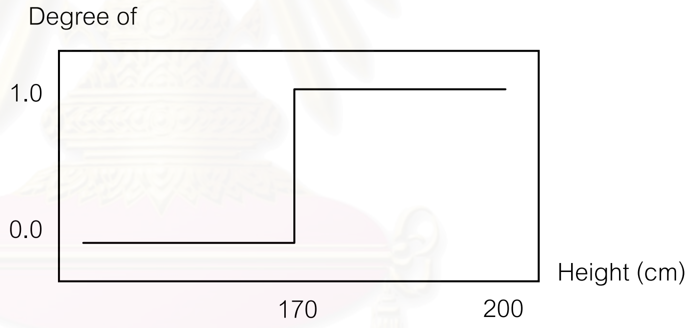
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากสมาชิกกลุ่มเดิมถ้าจะกล่าวถึงเซตของวันหยุดในแต่ละสัปดาห์แล้วดังรูปที่ 2 จะเห็นว่า วันอาทิตย์เป็นวันหยุดในสัปดาห์ แต่วันเสาร์ " รู้สึก " ว่าเป็นส่วนหนึ่งของวันหยุดในสัปดาห์ แต่บางทีก็ไม่ใช่เสมอไป ดังนั้นจากรูปที่ ก.2 วันเสาร์จึงอยู่คร่อมระหว่างกลุ่มวันหยุดในสัปดาห์และไม่ใช่วันหยุดในสัปดาห์

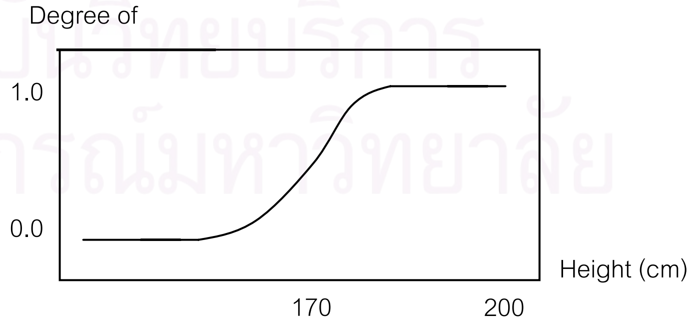
ก.2 ฟังก์ชันสมาชิก (Membership function)

ฟังก์ชันสมาชิกเป็นกราฟที่กำหนดการแปลงสัญญาณขาเข้าในแต่ละจุดของขอบเขตสัญญาณขาเข้า (Input space) ไปยังค่าความเป็นสมาชิกที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

พิจารณาความสูงของคน โดยกำหนดให้คนที่มีความสูงจาก 170 ซม. จนถึง 200 ซม. ใช้คำว่า " สูง " แทนสมาชิกที่อยู่ในกลุ่มนี้ ถ้ากำหนดให้คนสูงเป็นเซตที่มีขอบเขตที่ชัดเจนสามารถเขียนฟังก์ชันสมาชิกได้ดังรูปที่ ก.3 (ก) แต่ถ้ากำหนดให้คนสูงเป็นเซตฟัซซีสามารถเขียนฟังก์ชันสมาชิกได้ดังรูปที่ ก.3 (ข)



(ก)



(ข)

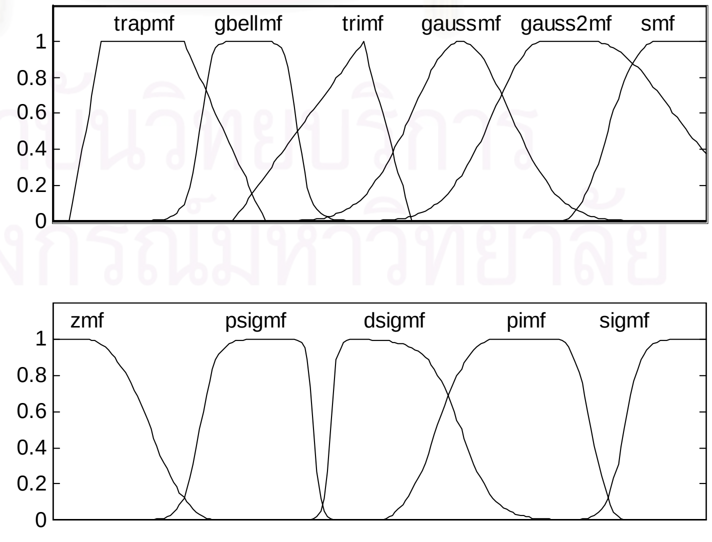
รูปที่ ก.3 แสดงฟังก์ชันสมาชิกของเซตความสูงของคน
(ก) เซตที่มีการกำหนดขอบเขตที่ชัดเจน
(ข) เซตฟัซซี

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

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

ฟังก์ชันสมาชิกมีอยู่ด้วยกัน 11 แบบดังรูปที่ ก.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*



รูปที่ ก.4 แสดงลักษณะฟังก์ชันสมาชิก

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

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

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 $(a< b\le c< d)$ ดังสมการ

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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

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

ฟังก์ชัน Bell ใช้พารามิเตอร์ 3 ตัว ในการกำหนดรูปร่างความเป็นสมาชิกดังสมการ

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

นอกจากนี้ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบอื่นๆ ยังถูกออกแบบตามความเหมาะสมและความต้องการใช้งานในระบบต่างๆ

ก.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

ก.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 ได้กว่าถึงวิธีการที่จะใช้กับตัวดำเนินการ " 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 เนื่องจากมีการวิธีการหาขาเอาท์พุทของแบบจำลองแบบ Takagi-Sugeno โดยเฉพาะ

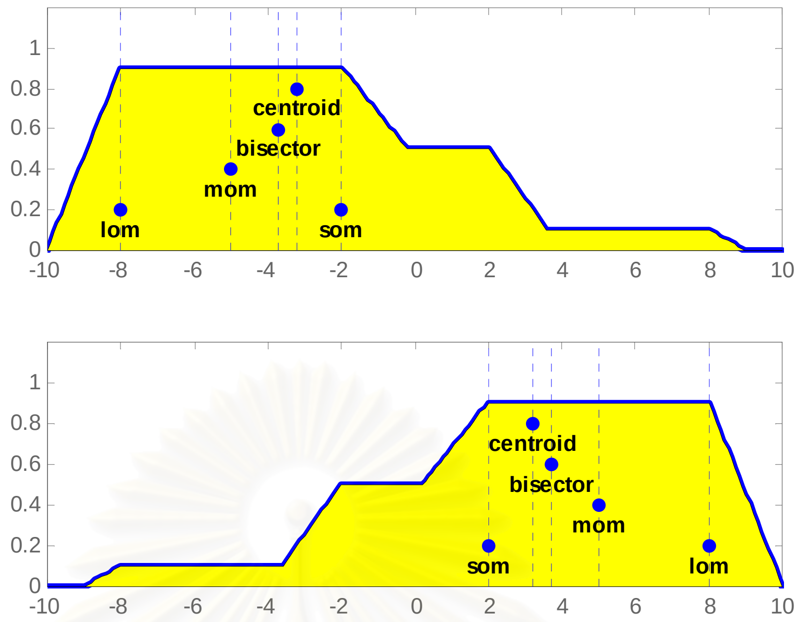
ขั้นตอนที่ 4 การรวมส่วนผลของกฎ (Aggregate all Outputs)

จากผลการตีความหมายของกฎจะได้เซตฟัซซีของแต่ละกฎ นำมารวมกันให้เป็นเซตฟัซซีเพียงเซตเดียว เพื่อใช้ในการดีฟัซซิฟายซึ่งเป็นขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนที่ 5 ดีฟัซซิฟิเคชัน (Defuzzification)

จากขั้นตอนที่ 4 หลังจากรวมเซตฟัซซีที่ได้จากแต่ละกฎแล้วจะได้เซตฟัซซีเพียงเซตเดียว เซตฟัซซีที่ได้นี้จะนำมาใช้ในการดีฟัซซิฟาย ซึ่งจะให้ค่าที่ชัดเจนแน่นอนออกมาค่าหนึ่ง

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



รูปที่ ก.5 แสดงวิธีการดีฟัซซิฟายด์

การดีฟัซซิฟายด์แบบจุดศูนย์ถ่วง (Centroid)

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

การดีฟัซซิฟายด์แบบไบเซ็คเตอร์ (Bisector) หมายถึงการแบ่งพื้นที่ใต้กราฟออกเป็น 2 ส่วนเท่าๆ กัน

การดีฟัซซิฟายด์แบบค่ากลางของค่าสูงสุด (Mom) หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ได้จากพื้นที่ใต้กราฟของบริเวณที่มีค่าความเป็นสมาชิกสูงสุด

การดีฟัซซิฟายด์แบบค่าน้อยที่สุดของความเป็นสมาชิกสูงสุด (Som) หมายถึงค่าที่น้อยที่สุดที่ยังคงมีค่าความเป็นสมาชิกสูงสุด

การดีฟัซซิฟายด์แบบค่ามากที่สุดของความเป็นสมาชิกสูงสุด (Lom) หมายถึงค่าที่มากที่สุดที่ยังคงมีค่าความเป็นสมาชิกสูงสุด

ภาคผนวก ข.

ตัวอย่างโปรแกรมที่สำคัญ

ข.1 ตัวอย่างโปรแกรมการเลียนแบบกระบวนการตัวย่อยเยื่อกระดาษ

```
clear
clc

%Parameter
ss = 1e3;
E1=[ 6.45*ss,29.10*ss,17.55*ss,14.85*ss,22.05*ss ];
E2=[ 21.9*ss,12.35*ss,19.85*ss,17.45*ss,18.25*ss ];
A1=[ 19.41,4.16e12,445.12,108,7.05e5 ];
A2=[ 7e3,2.75e4,8.3e3,6e3,1.75e4 ];
S3=[ 0.166,0.166,0.395,0.395,0.395 ];
S4=[ 0.0546,0.0546,0,0,0 ];
Xu=[ 0,0,0.071,0.025,0 ];

R=1.9872;        CT=3;          Cp=0.36;       Frmin=0.5;     Cpl=1;
dt=0.005;        a=0.5;         b=0.5;         Frmax=1;
dH=102.8;        Mw=100;        A=105.75;      Trmin=353;
Ve=0.1175;       Vf=0.2325;     n=CT/dt;       Trmax=523;
M1=-0.07;        M2=2e-4;       Tsp=443;       Ksp=50;

%Initial Value
T(1)=353;
Ce1(1)=0;        Cf1(1)=1;             X1(1)=0.0528;   T(1)=353;
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
Ce2(1)=0;        Cf2(1)=2;          X2(1)=0.2112;
Ce3(1)=0;        Cf3(1)=47.6327;    X3(1)=0.4852;
Ce4(1)=0;        Cf4(1)=11.3535;    X4(1)=0.1428;
Ce5(1)=0;        Cf5(1)=1000;       X5(1)=0.0722;

%Uniform Random Inputs
Trs=(Trmax-Trmin)* rand(1,n+1)+Trmin;
Frs=(Frmax-Frmin)* rand(1,n+1)+Frmin;

%========== MAIN LOOP ==========%
for t=1:1:n+1

Cf=[ Cf1(t),Cf2(t),Cf3(t),Cf4(t),Cf5(t) ];
Ce=[ Ce1(t),Ce2(t),Ce3(t),Ce4(t),Ce5(t) ];
X=[ X1(t),X2(t),X3(t),X4(t),X5(t) ];

lignin(t)=(X1(t)+X2(t))*100;
carb(t)=(X3(t)+X4(t)+X5(t))*100;

k1=A1.*exp(-E1/(R*T(t)));
k2=A2.*exp(-E2/(R*T(t)));
Ri=(-1)*(k1*Ce3(t)+k2*(Ce3(t)^a)*(Ce4(t)^b)).*(X-Xu);
RH=(-dH)*(-Ri);

SumRH=sum(RH);
SumT=sum(Cf*Cpl*(Trs(t)-T(t)));
Kt=(Mw*sum(Cp*X))+(Ve*sum(Cpl*Ce))+(Vf*sum(Cpl*Cf));
```

```
%Reactor temp Balance
T(t+1)=T(t)+(dt/Kt)*(Mw*SumRH+Frs(t)*SumT);

%Concentration in wood
X1(t+1)=X1(t)+dt*Ri(1);
X2(t+1)=X2(t)+dt*Ri(2);
X3(t+1)=X3(t)+dt*Ri(3);
X4(t+1)=X4(t)+dt*Ri(4);
X5(t+1)=X5(t)+dt*Ri(5);

%Mass transfer coefficient
Mi=M1+M2*T(t);

%Concentration in free liquor
Cf1(t+1)=Cf1(t)+(dt/Vf)*(Mi*A*(Ce1(t)-Cf1(t)));
Cf2(t+1)=Cf2(t)+(dt/Vf)*(Mi*A*(Ce2(t)-Cf2(t)));
Cf3(t+1)=Cf3(t)+(dt/Vf)*(Mi*A*(Ce3(t)-Cf3(t)));
Cf4(t+1)=Cf4(t)+(dt/Vf)*(Mi*A*(Ce4(t)-Cf4(t)));
Cf5(t+1)=Cf5(t);

%Total rate of generation in entrapped liquor
G1=-sum(Ri(1:2));
G2=-sum(Ri(3:5));
G3=sum(S3.*Ri);
G4=sum(S4.*Ri);

%Concentration in entrapped liquor
Ce1(t+1)=Ce1(t)+(dt/Ve)*(Mw*G1-Mi*A*(Ce1(t)-Cf1(t)));
Ce2(t+1)=Ce2(t)+(dt/Ve)*(Mw*G2-Mi*A*(Ce2(t)-Cf2(t)));
```

```
Ce3(t+1)=Ce3(t)+(dt/Ve)*(Mw*G3-Mi*A*(Ce3(t)-Cf3(t)));
Ce4(t+1)=Ce4(t)+(dt/Ve)*(Mw*G4-Mi*A*(Ce4(t)-Cf4(t)));
Ce5(t+1)=Ce5(t);

%Kappa No
Ks(t)=653.6*(X1(t) + X2(t));

end; %MAIN LOOP

%Sampling
samptime=0.005;
fixtime=2;
sampnum=fixtime/samptime;
i=0;
j=1;
while j<=n+1
i=i+1;
Tr(i,:)=Trs(j);
Fr(i,:)=Frs(j);
K(i,:)=Ks(j);
temp(i,:)=T(j);
lig=X1+X2;
lign(i,:)=lig(j);
j=j+(samptime/dt);
end;
Tr=Tr(1:sampnum+1);
Fr=Fr(1:sampnum+1);
Kk=K(1:sampnum+1);
Kk1=K(2:sampnum+2);
```

```
Tk=temp(1:sampnum+1);
Tk1=temp(2:sampnum+2);
Xk=lign(1:sampnum+1);
Xk1=lign(2:sampnum+2);

data=[ Xk Tk Tr Fr Xk1 ];

%========== Result ==========%
cutplot=fixtime/dt;
for t=1:1:cutplot+1
        tn(t) = dt*(t-1);
end;
figure
subplot(221)
plot(tn,T(1:cutplot+1),tn(1:cutplot+1),Tsp*ones(cutplot+1,1),'k:')
ylabel('Reactor temp  (K)')
xlabel('Time  (hr)')
subplot(222)
plot(tn,Ks(1:cutplot+1));
xlabel('hr')
ylabel('Kappa no.');
subplot(223)
plot(tn,Trs(1:cutplot+1))
ylabel('Tr  (K)')
xlabel('Time  (hr)')
subplot(224)
plot(tn,Frs(1:cutplot+1))
ylabel('Fr  (m^3/hr)')
xlabel('Time  (hr)')
```

ข.2 ตัวอย่างโปรแกรมการระบุหาแบบจำลองฟัซซีโดยการคลัสเตอริงและวิธีการลีสท์สแควร์

```
clear
clc

load datan1
[a,b] = size(data);
tol = 0.01;
m = 2;% coz we want linear fcn
c = 1;

%%%%%%%%%% optimum rule no. %%%%%%%%%%

minGain=1e5;
minG=1e4;
while minG < minGain
minGain=minG;
c=c+1;
U = zeros(c,a);
a1 = ones(a,1);
b1 = ones(b,1);
c1 = ones(c,1);
v1 = ones(c,1);
unit = ones(1,a);
remain = unit;
for i = 1:c-1,
        Uo(i,:)= remain.*rand(1,a);
remain = remain - Uo(i,:);
end;
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
Uo(c,:)= remain;
obj_fcn=max(max(abs(Uo-U)));

    %%%%%%%%%% clustering %%%%%%%%%%%

    while obj_fcn > tol,

        %%%%% compute center %%%%%
        U = Uo; Um = U.^m;      SumU = sum(Um');
        V = Um*data./(b1*SumU)';

        %%%%% compute distance %%%%%
        for i = 1:c,
            l = data-(a1*V(i,:));
            var_in(i,:)= sum((l.^2)');% variance in a cluster
            d(i,:) = sqrt(var_in(i,:));
        end;

        %%%%% compute membership %%%%%
        for i = 1:c,
            Sumd(i,:) = sum(((c1*d(i,:))./d).^(2/(m-1)));
        end;
        Uo = (c1*a1')./Sumd;

        obj_fcn = max(max(abs(Uo-U)));% clustering

    end;% loop
```

```
        %%%%% update %%%%%
        Um = Uo.^m;
        datamean=mean(data,1);
        for i = 1:c,
                I =a1*V(i,:)-a1*datamean;
                var_out(i,:)=sum((I.^2)');% variance between clusters
        end;
        dn=var_in-var_out;
minG = sum(sum(Um.*dn)')
end;% optimum rule no.

fprintf('Obj_fcn = %2.4f\n',obj_fcn)
fprintf('Min_gain = %2.0f\n',minGain)
fprintf('opt_rule no. = %2.0f\n',c)

%%%%%%%% consequent %%%%%%%%

for i=1:c
        B(i,:)=U(i,:)./sum(U);
end;
k=size(data,1);
for i=1:b
        x=[ones(k,1) data(:,1) data(:,2) data(:,3) data(:,4)];
        X(:,c*i-(c-1):c*i)=B'.*(x(:,i)*ones(1,c));
end;

P=(inv(X'*X))*(X'*data(:,5));
```

```
%%%%%%%%%% parameter %%%%%%%%%%

for j = 1:b
        h=c*(j-1);
        Pj(:,j)=P(1+h:c+h);
end;

cons=Pj*x';

%%%%%%% real output %%%%%%%

for i = 1:c
        v(i,:)=B(i,:).*cons(i,:);
end;
y=sum(v);

PI = (sum(((data(:,5)-y').^2)/a));

%===== GRAPH =====%

fprintf('PI = %5.4f\n',PI);
%fprintf(',Rule no. = %2.0f\n',c);
figure
for i = 1:c,
                q = (c*100)+10+i;
                subplot(q)
                plot(data(:,1),Uo(i,:),'.');
                ylabel('MF');
end;    xlabel('Lignin');
```

```
figure
for i = 1:c,
q = (c*100)+10+i;
subplot(q)
plot(data(:,2),Uo(i,:),'.');
ylabel('MF');
end;      xlabel('T');

figure
for i = 1:c,
q = (c*100)+10+i;
subplot(q)
plot(data(:,3),Uo(i,:),'.');
ylabel('MF');
end;      xlabel('Tr');

figure
for i = 1:c,
          q = (c*100)+10+i;
subplot(q)
plot(data(:,4),Uo(i,:),'.');
ylabel('MF');
end;      xlabel('Fr');
samptime=0.005;
fixtime=2;
sampnum=fixtime/samptime;
for t=1:1:sampnum
          ti(t) = samptime*(t-1);
end;
```

```
figure
plot(ti,data(:,5)*653.6,ti,y*653.6,'r:');
xlabel('Time (hr)')
ylabel('Kappa no.')
legend('Plant','Fuzzy Model',0);
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข.3 ตัวอย่างโปรแกรมการควบคุมตัวย่อยเยื่อกระดาษด้วยตัวควบคุมฟัซซีแบบอาศัยแบบจำลองภายใน

```
clear
clc

%%%%% Model parameters for process %%%%%
ss = 1e3;
E1=[ 6.45*ss,29.10*ss,17.55*ss,14.85*ss,22.05*ss ];
E2=[ 21.9*ss,12.35*ss,19.85*ss,17.45*ss,18.25*ss ];
A1=[ 19.41,4.16e12,445.12,108,7.05e5 ];
A2=[ 7e3,2.75e4,8.3e3,6e3,1.75e4 ];
S3=[ 0.166,0.166,0.395,0.395,0.395 ];
S4=[ 0.0546,0.0546,0,0,0 ];
Xu=[ 0,0,0.071,0.025,0 ];

R=1.9872;       CT=2;        Cp=0.36;     Frmin=0.5;    Cpl=1;
dt=0.05;        a=0.5;       b=0.5;       Frmax=1;
dH=102.8;       Mw=100;      A=105.75;    Trmin=353;
Ve=0.1175;      Vf=0.2325;   n=CT/dt;     Trmax=523;
M1=-0.07;       M2=2e-4;     Tsp=443;     Ksp=50;

%%%%% Initial value for process %%%%%
Ce1(1)=0;       Cf1(1)=1;          X1(1)=0.0528;   T(1) =353;
Ce2(1)=0;       Cf2(1)=2;          X2(1)=0.2112;
Ce3(1)=0;       Cf3(1)=47.6327;    X3(1)=0.4852;
Ce4(1)=0;       Cf4(1)=11.3535;    X4(1)=0.1428;
Ce5(1)=0;       Cf5(1)=1000;       X5(1)=0.0722;
```

```
%%%%% Input %%%%%
Trs(1)=353;
Frs(1)=0.5;

%Noise test
w=randn(1,n+1);

%Initial values for controller
e_filter(1)=0;
e_model(1)=0;

%Filter factor
Ge=0.45;

%==============Process===============%
for t=2:n+1

Cf=[ Cf1(t-1),Cf2(t-1),Cf3(t-1),Cf4(t-1),Cf5(t-1) ];
Ce=[ Ce1(t-1),Ce2(t-1),Ce3(t-1),Ce4(t-1),Ce5(t-1) ];
X=[ X1(t-1),X2(t-1),X3(t-1),X4(t-1),X5(t-1) ];

k1=A1.*exp(-E1/(R*T(t-1)));
k2=A2.*exp(-E2/(R*T(t-1)));
Ri=(-1)*(k1*Ce3(t-1)+k2*(Ce3(t-1)^a)*(Ce4(t-1)^b)).*(X-Xu);
RH=(-dH)*(-Ri);

SumRH=sum(RH);
SumT=sum(Cf*Cpl*(Trs(t-1)-T(t-1)));
Kt=(Mw*sum(Cp*X))+(Ve*sum(Cpl*Ce))+(Vf*sum(Cpl*Cf));
```

```
%Reactor temp Balance
T(t)=T(t-1)+(dt/Kt)*(Mw*SumRH+Frs(t-1)*SumT);%+w(t);

%Concentration in wood
X1(t)=X1(t-1)+dt*Ri(1);
X2(t)=X2(t-1)+dt*Ri(2);
X3(t)=X3(t-1)+dt*Ri(3);
X4(t)=X4(t-1)+dt*Ri(4);
X5(t)=X5(t-1)+dt*Ri(5);

%Mass transfer coefficient
Mi=M1+M2*T(t-1);

%Concentration in free liquor
Cf1(t)=Cf1(t-1)+(dt/Vf)*(Mi*A*(Ce1(t-1)-Cf1(t-1)));
Cf2(t)=Cf2(t-1)+(dt/Vf)*(Mi*A*(Ce2(t-1)-Cf2(t-1)));
Cf3(t)=Cf3(t-1)+(dt/Vf)*(Mi*A*(Ce3(t-1)-Cf3(t-1)));%+w(t);
Cf4(t)=Cf4(t-1)+(dt/Vf)*(Mi*A*(Ce4(t-1)-Cf4(t-1)));
Cf5(t)=Cf5(t-1);

%Total rate of generation in entrapped liquor
G1=-sum(Ri(1:2));
G2=-sum(Ri(3:5));
G3=sum(S3.*Ri);
G4=sum(S4.*Ri);

%Concentration in entrapped liquor
Ce1(t)=Ce1(t-1)+(dt/Ve)*(Mw*G1-Mi*A*(Ce1(t-1)-Cf1(t-1)));
Ce2(t)=Ce2(t-1)+(dt/Ve)*(Mw*G2-Mi*A*(Ce2(t-1)-Cf2(t-1)));
```

```
Ce3(t)=Ce3(t-1)+(dt/Ve)*(Mw*G3-Mi*A*(Ce3(t-1)-Cf3(t-1)));
Ce4(t)=Ce4(t-1)+(dt/Ve)*(Mw*G4-Mi*A*(Ce4(t-1)-Cf4(t-1)));
Ce5(t)=Ce5(t-1);

%Kappa No
Ks(1)=653.6*(X1(1) + X2(1));
Ks(t)=653.6*(X1(t) + X2(t));
lign(t-1)=X1(t-1)+X2(t-1);

%==================Estimator==================%
load Plign
[c,d] = size(Pj);
Pl=Pj;

%ANTECEDENT T
y1 =trimf(T(t-1),[390 418 422]);
y2 =trapmf(T(t-1),[323 353 360 390]);
y3 =trimf(T(t-1),[437 442 460]);
y4 =trapmf(T(t-1),[442 460 523 541]);
y5 =trimf(T(t-1),[360 390 418]);
y6 =trimf(T(t-1),[422 437 442]);
y7 =trimf(T(t-1),[418 422 437]);

U=[y1';y2';y3';y4';y5';y6';y7'];

%CONSEQUENT
x=[ones(1,1) lign(t-1) T(t-1) Cf3(t-1)];
cons=Pl*x';
```

```
%REAL OUTPUT
for i=1:c
  BB(i,:)=U(i,:)./sum(U);
end;

for i = 1:c
  v(i,:)=BB(i,:).*cons(i,:);
end;
lign_est(t)=sum(v);
K_est(t)=653.6*lign_est(t);

%Kappa reference
if t<=n+1
        Kr(t)=K_est(t-1)-((K_est(t-1)-Ksp)/(n+1-(t-1)));
else break;
end;



%============Fuzzy Model for K============%
        load Pn1
        [c,d] = size(Pj);
        %ANTECEDENT Tr
        y1 =trimf(Trs(t-1),[400 440 470]);
        y2 =trimf(Trs(t-1),[440 470 500]);
        y3 =trimf(Trs(t-1),[375 400 440]);
        y4 =trapmf(Trs(t-1),[325 350 375 400]);
        y5 =trimf(Trs(t-1),[475 500 525]);
        y6 =trapmf(Trs(t-1),[500 525 550 575]);
```

```
U=[y1';y2';y3';y4';y5';y6'];

%CONSEQUENT
x=[ones(1,1) lign_est(t-1) T(t-1) Trs(t-1) Frs(t-1)];
cons=Pj*x';

%REAL OUTPUT
for i=1:c
  B(i,:)=U(i,:)./sum(U);
end;

for i = 1:c
v(i,:)=B(i,:).*cons(i,:);
end;
lignf(t)=sum(v);
Kf(t)=653.6*lignf(t);

%=========== Fuzzy IMC =============%

%Filter
e_model(t)=K_est(t)-Kf(t);
e_filter(t)=(e_filter(t-1)*(Ge))+(e_model(t)*(1-Ge));
e_sp(t)=Kr(t)-e_filter(t);

%Controller
cal1=sum(B.*(Pj(:,2)*Kf(t-1)+Pj(:,3)*T(t-1)+Pj(:,5)*Frs(t-1)+Pj(:,1)));
cal2=sum(B.*Pj(:,4));
Trs1(t)=(e_sp(t)-cal1)/cal2;
Trs(t)=Trs1(t);
```

```
cal3=sum(B.*(Pj(:,2)*Kf(t-1)+Pj(:,3)*T(t-1)+Pj(:,4)*Trs(t-1)+Pj(:,1)));
cal4=sum(B.*Pj(:,5));
Frs1(t)=(e_sp(t)-cal3)/cal4;
Frs(t)=Frs1(t);

%Constraint change of Tr
delTr=Trs(t)-Trs(t-1);
if          delTr>10
            Trs(t)=Trs(t-1)+10;
elseif      delTr<-10
            Trs(t)=Trs(t-1)-10;
end;
%Constraint Tr
if          Trs(t)>Trmax
            Trs(t)=Trmax;
elseif      Trs(t)<Trmin
            Trs(t)=Trmin;
end;

%Constraint change of Fr
delFr=Frs(t)-Frs(t-1);
if          delFr>0.1
            Frs(t)=Frs(t-1)+0.1;
elseif      delFr<-0.1
            Frs(t)=Frs(t-1)-0.1;
end;
%Constraint Fr
if          Frs(t)>Frmax
            Frs(t)=Frmax;
```

```
        elseif          Frs(t)<Frmin
                        Frs(t)=Frmin;
        end;

%================Result=================%
%Estimator Efficiency
IAE = 0;
ISE = 0;
for k=2:n+1
        error    = Ks(k)- K_est(k);
        IAE      = IAE + abs(error)*dt;
        ISE      = ISE + (error^2)*dt;
end;
disp('Estimator Efficiency')
fprintf('IAE = %5.4f\n',IAE);
fprintf('ISE = %5.4f\n',ISE);

%Controller Performance
IAE = 0;
ISE = 0;
for k=3:n+1
        error = Ks(k)-Kr(k);
        IAE      = IAE + abs(error)*dt;
        ISE      = ISE + (error^2)*dt;
end;
disp('Controller performance')
fprintf('IAE = %5.4f\n',IAE);
fprintf('ISE = %5.4f\n',ISE);
```

```
%Plot
for t=1:1:n+1
        ti(t) = dt*(t-1);
end;

figure
subplot(311)
plot(ti(2:n+1),Ks(2:n+1),ti(2:n+1),K_est(2:n+1),'r:');
ylabel('Kappa no.');
%axis([0,CT,49,180])
legend('True kappa','Estimated kappa')
%subplot(412)
%plot(ti,T,ti,433,ti,453)
%ylabel('Reactor temp  (K)')
%figure
subplot(312)
stairs(ti,Trs-273)
ylabel('Tr  (C)')
%axis([0,CT,350,550])
%figure
subplot(313)
stairs(ti,Frs)
ylabel('Fr  (m^3/hr)')
xlabel('Time  (hr)')
axis([0,CT,0.5,1.0])
```

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววิศณีย์ ตั้งยืนยง เกิดเมื่อวันที่ 28 กันยายน พ.ศ. 2519 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2541

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย