

การพัฒนาแบบจำลองพีชชีของกระบวนการโดยใช้วิธีคลัสเตอร์ริง
และการออกแบบตัวควบคุมพีชชีลอจิก

นางสาว รุ่งจิตร์ กาญจนวัฒน์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-332-586-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**DEVELOPMENT OF FUZZY PROCESS MODELING BY CLUSTERING METHOD
AND DESIGN OF FUZZY LOGIC CONTROLLER**

Miss Rungjit Kanjanawat

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering**

Department of Chemical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 1998

ISBN 974-332-586-7

รุ่งจิตรี กาญจนวัฒน์ : การพัฒนาแบบจำลองฟัซซีของกระบวนการโดยใช้วิธีคลัสเตอร์ริง และการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีลอจิก (DEVELOPMENT OF FUZZY PROCESS MODELING BY CLUSTERING METHOD AND DESIGN OF FUZZY LOGIC CONTROLLER)

อ. ที่ปรึกษา : ดร.มนตรี วงศ์ศรี; 143 หน้า. ISBN 974-332-586-7

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีคลัสเตอร์ริงเพื่อทำการระบุหาแบบจำลองฟัซซีของกระบวนการ และ ออกแบบตัวควบคุมฟัซซีลอจิกโดยใช้แบบจำลองฟัซซี แบบจำลองฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno ถูกเลือกใช้ และระบุหาได้จากข้อมูลของกระบวนการ การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดลกระทำได้โดยใช้แบบ จำลองผกผันของกระบวนการ วิธีการนี้ประยุกต์ใช้กับการควบคุมระดับของเหลวในระบบถังทรงกลม ผล จากการชิมูเลทแสดงให้เห็นว่า อัลกอริธึมที่ใช้ในการระบุหาแบบจำลองฟัซซีให้ค่าสมรรถนะที่ดี การประเมิน สมรรถนะของตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดลกระทำโดยการเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุม แบบกำหนดเกณฑ์ต่างๆ กัน และตัวควบคุมฟัซซีลอจิกที่ออกแบบโดยนฤพนธ์ (2539) ซึ่งออกแบบโดยใช้กลยุทธ์การ ควบคุมแบบแบ่งย่านการทำงาน โครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดลสามารถออกแบบได้ง่ายจาก แบบจำลองฟัซซี ผลการทดสอบพบว่าตัวควบคุมฟัซซีแบบใช้โมเดลมีความสามารถในการติดตาม (เมื่อค่าเป้าหมาย มีการเปลี่ยนแปลง) และให้สมรรถนะที่ดีในการควบคุม

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา..... 2541

ลายมือชื่อนิสิต.....รุ่งจิตรี กาญจนวัฒน์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

3971466121 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: FUZZY MODEL / FUZZY LOGIC CONTROL/ FUZZY MODEL-BASED CONTROLLER / CLUSTERING

RUNGJIT KANJANAWAT : DEVELOPMENT OF FUZZY PROCESS MODELING BY CLUSTERING METHOD AND DESIGN OF FUZZY LOGIC CONTROLLER.


THESIS ADVISOR : DR.MONTREE WONGSRI. 143 pp. ISBN 974-332-586-7.

This research presents application of clustering method to identify a fuzzy model process and then design the fuzzy logic controller based on the fuzzy model. The fuzzy model of the Takagi-Sugeno type was chosen and identified from the process data. The fuzzy model-based controller could be designed by using an inverted fuzzy model of the process. The described method is applied to liquid level control in spherical tank system. Simulation results show that the identification algorithms exhibits good performance. The performance of fuzzy model-based controller is evaluated by comparing it to PI controller, gain scheduling controller and fuzzy logic controller of Narupont (1996) which is designed by using the multi-region control strategy. The structure of fuzzy model-based controller is easily obtained from fuzzy model. The results showed that the fuzzy model-based controller could perform successful tracking ability and good performance.

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา..... 2541

ลายมือชื่อนิสิต..... 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... -



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของอาจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยมาด้วยดี ตลอด ผู้วิจัยขอขอบพระคุณท่านอาจารย์มา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติสุภกร และ ดร. ธงไชย ศรีนพคุณ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้ความสนใจและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัยนี้

ขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่และน้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

ทำนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดาและญาติผู้ใหญ่ ขอบคุณพี่สาวและน้องชายที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	๗
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	4
1.6 เนื้อหาวิทยานิพนธ์	5
2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 แนวคิดของฟัชชีเซต.....	7
2.2 การพัฒนาและประยุกต์ใช้ฟัชชีลอจิกโดยทั่วไป	8

บทที่

2.3	ผลงานวิจัยเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองฟัซซี	9
2.4	ผลงานวิจัยเกี่ยวกับการสร้างตัวควบคุมฟัซซี	13
2.5	บทสรุป	16
3	แบบจำลองฟัซซีและตัวควบคุมฟัซซี	19
3.1	บทนำ	19
3.2	แบบจำลองฟัซซี	20
3.3	ชนิดของแบบจำลองฟัซซี	22
3.3.1	แบบจำลองฟัซซีเชิงภาษา	22
3.3.2	แบบจำลองความสัมพันธ์ฟัซซี	23
3.3.3	แบบจำลองฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno	25
3.4	วิธีการสร้างแบบจำลองฟัซซี	27
3.4.1	แบบจำลองฟัซซีจากความรู้และประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ	27
3.4.2	แบบจำลองฟัซซีจากข้อมูลเชิงตัวเลขของกระบวนการ	27
3.5	โครงสร้างของแบบจำลองฟัซซี	28
3.6	ฟัซซีคลัสเตอร์ริง	29
3.7	การระบุหาแบบจำลองฟัซซี	33
3.7.1	การระบุหาโครงสร้างแบบจำลอง	33
3.7.2	การระบุหาพารามิเตอร์ของแบบจำลอง	37
3.8	ตัวควบคุมฟัซซี	40

บทที่

3.9	วิธีการออกแบบตัวควบคุมฟuzzyลอจิก	40
3.10	ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกแบบผู้เชี่ยวชาญ	42
3.11	ตัวควบคุมฟuzzyแบบใช้โมเดล	45
3.12	บทสรุป	48
4	การระบุและการทดสอบแบบจำลองฟuzzyของกระบวนการที่ศึกษา	49
4.1	กระบวนการที่ศึกษา	49
4.2	ข้อมูลที่ใช้ในการระบุแบบจำลองฟuzzy	51
4.3	การกำหนดจำนวนกฎฟuzzyในแบบจำลองฟuzzy	51
4.4	การกำหนดฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปรในส่วนเงื่อนไขของกฎฟuzzy	52
4.5	การระบุพารามิเตอร์ในส่วนผลสรุปของกฎฟuzzy	52
4.6	การทดสอบแบบจำลองฟuzzy	52
4.7	ผลการระบุแบบจำลองฟuzzyในแต่ละกรณีศึกษา	53
4.7.1	กรณีศึกษาที่1	53
4.7.2	กรณีศึกษาที่2	62
4.7.3	กรณีศึกษาที่3	68
4.7.4	กรณีศึกษาที่ 4	73
4.8	บทสรุป.....	80

บทที่

5	การออกแบบและการทดสอบตัวควบคุมฟิชซี	81
5.1	การออกแบบตัวควบคุมฟิชซีแบบใช้โมเดลของระบบถึงทรงกลม	81
5.2	ผลการปรับจูนตัวควบคุมที่ใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะของการควบคุม.....	83
5.2.1	ตัวควบคุมฟิชซีลอจิกที่ออกแบบโดยนฤพนธ์	83
5.2.2	ตัวควบคุมพีไอ	86
5.2.3	ตัวควบคุมแบบกำหนดเกณฑ์ต่างๆ กัน	87
5.3	ผลการทดสอบตัวควบคุมฟิชซีแบบใช้โมเดล	87
5.3.1.	การทดสอบการตอบสนองของระบบต่อการเปลี่ยนค่าเป้าหมายแบบขั้น..	88
5.3.2.	การทดสอบการตอบสนองของระบบควบคุมต่อการเปลี่ยนแปลงของ ตัวรบกวน	89
5.3.3.	การทดสอบความทนทานต่อการเปลี่ยนย่านปฏิบัติการ	90
5.3.4	การทดสอบความทนทานของตัวควบคุมฟิชซีแบบใช้โมเดลเมื่อพารามิเตอร์ ของกระบวนการมีความผิดพลาด.....	92
6	วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย	106
6.1	วิเคราะห์และสรุปผล	106
6.2	ข้อเสนอแนะ	111
	รายการอ้างอิง	112
	ภาคผนวก	115
	ภาคผนวก ก	116

ภาคผนวก ข	138
ประวัติผู้วิจัย	143

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมาของการสร้างแบบจำลองฟิชชี	17
ตารางที่ 2.2 สรุปผลงานวิจัยของการสร้างตัวควบคุมฟิชชีลอจิก	18
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลสรุปของกฎฟิชชีสำหรับกรณีศึกษาที่ 1	59
ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลสรุปของกฎฟิชชีสำหรับกรณีศึกษาที่ 2	63
ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลสรุปของกฎฟิชชีสำหรับกรณีศึกษาที่ 3	70
ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนผลสรุปของกฎฟิชชีสำหรับกรณีศึกษาที่ 4	73
ตารางที่ 5.1 กฎฟิชชีในย่านการทำงานที่ 1 (<i>AV is PB</i>)	85
ตารางที่ 5.2 กฎฟิชชีในย่านการทำงานที่ 2 (<i>AV is ZE</i>)	85
ตารางที่ 5.3 กฎฟิชชีในย่านการทำงานที่ 3 (<i>AV is NB</i>)	86
ตารางที่ 5.4 ค่าพารามิเตอร์ปรับจูนของตัวควบคุมแบบกำหนดค่าเกณฑ์ต่างๆ กัน	87
ตารางที่ 5.5 ผลการควบคุมระดับความสูงน้ำต่อการเปลี่ยนค่าเป้าหมายแบบขั้นที่ระดับ ปฏิบัติการณ์ความสูง 50 %	89
ตารางที่ 5.6 ผลการควบคุมระดับความสูงของน้ำต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรรบกวน ที่ระดับปฏิบัติการณ์ความสูง 50 %	90
ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบความทนทานต่อการเปลี่ยนค่าเป้าหมายแบบขั้นเมื่อเปลี่ยน จุดปฏิบัติการณ์เป็นระดับความสูง 80%	91
ตารางที่ 5.8 ผลการทดสอบความทนทาน ต่อการเปลี่ยนค่าเป้าหมายแบบขั้นเมื่อเปลี่ยน จุดปฏิบัติการณ์เป็นระดับความสูง 30%	91

ตารางที่ 5.9 ผลการทดสอบความทนทานเมื่อพารามิเตอร์ของกระบวนการมีความผิดพลาด	
ไป +30 %	93
ตารางที่ 5.10 ผลการทดสอบความทนทานเมื่อพารามิเตอร์ของกระบวนการมีความผิดพลาด	
ไป -30 %	93
ตารางที่ 6.1 สรุปค่า RMS ของการทดสอบแบบจำลองพีซีซีในแต่ละกรณีศึกษา	108
ตารางที่ 6.2 เปรียบเทียบผลการควบคุมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย ตัวรบกวน และ	
ย่านปฏิบัติการ	110
ตารางที่ 6.3 เปรียบเทียบผลการควบคุมเมื่อพารามิเตอร์ของกระบวนการผิดพลาด	110

สารบัญญภาพ

	หน้า
รูปที่ 3.1 แผนภาพการทำงานของกาหนดจำนวนกฎฟิซซีที่เหมาะสม	36
รูปที่ 3.2 วิธีการกำหนดฟังก์ชันสมาชิกจากฟิซซีพาร์ทชันแมทริกซ์	37
รูปที่ 3.3. แผนภาพแสดงขั้นตอนการระบหาแบบจำลองฟิซซี	39
รูปที่ 3.4 โครงสร้างโดยทั่วไปของตัวควบคุมแบบฟิซซีลอจิก	43
รูปที่ 3.5 โครงสร้างของการควบคุมด้วยตัวควบคุมฟิซซีแบบใช้โมเดล.....	46
รูปที่ 4.1 ลักษณะของกระบวนการที่ศึกษา.....	50
รูปที่ 4.2 อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านวาล์วควบคุม (อินพุท) สำหรับใช้ในกรณีศึกษาที่ 1.....	54
รูปที่ 4.3 ระดับความสูงของน้ำภายในถัง (เอาต์พุท) สำหรับใช้ในกรณีศึกษาที่ 1	54
รูปที่ 4.4 พล็อตระหว่างความสูงของน้ำภายในถังกับฟิซซีพาร์ทชันแมทริกซ์ของกลุ่ม 1 ถึง กลุ่ม5 สำหรับกรณีศึกษาที่ 1	55
รูปที่ 4.4 (ต่อ) พล็อตระหว่างความสูงของน้ำภายในถังกับฟิซซีพาร์ทชันแมทริกซ์ของกลุ่ม 6 ถึงกลุ่ม 9 สำหรับกรณีศึกษาที่ 1	56
รูปที่ 4.5 ฟังก์ชันสมาชิกของระดับความสูงของน้ำภายในถังของกฎข้อที่ 1 ถึง 5 สำหรับ กรณีศึกษาที่ 1	57
รูปที่ 4.5 (ต่อ) ฟังก์ชันสมาชิกของระดับความสูงของน้ำภายในถังของกฎข้อที่ 6 ถึง 9 สำหรับกรณีศึกษาที่ 1	58
รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบแบบจำลองฟิซซีเมื่ออินพุทมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นสำหรับ กรณีศึกษาที่ 1	60

รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบแบบจำลองพีชชีเมื่ออินพุตมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นขึ้นลง สำหรับกรณีศึกษาที่ 1	61
รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบแบบจำลองพีชชีเมื่ออินพุตมีการเปลี่ยนแปลงแบบสุ่มสำหรับ กรณีศึกษาที่ 1	61
รูปที่ 4.9 อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านวาล์วควบคุม (อินพุต) สำหรับกรณีศึกษาที่ 2.....	62
รูปที่ 4.10 ระดับความสูงของน้ำภายในถัง (เอาต์พุต) สำหรับใช้ในกรณีศึกษาที่ 2	63
รูปที่ 4.11 ฟังก์ชันสมาชิกของระดับความสูงของน้ำภายในถังของกฎข้อที่ 1 ถึง 6 สำหรับ กรณีศึกษาที่ 2	64
รูปที่ 4.11 (ต่อ) ฟังก์ชันสมาชิกของระดับความสูงของน้ำภายในถังของกฎข้อที่ 7 ถึง 10 สำหรับกรณีศึกษาที่ 2	65
รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบแบบจำลองพีชชีเมื่ออินพุตมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นสำหรับ กรณีศึกษาที่ 2	67
รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบแบบจำลองพีชชีเมื่ออินพุตมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นขึ้นลง สำหรับกรณีศึกษาที่ 2	67
รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบแบบจำลองพีชชีเมื่ออินพุตมีการเปลี่ยนแปลงแบบสุ่มสำหรับ กรณีศึกษา 2	68
รูปที่ 4.15 ฟังก์ชันสมาชิกของระดับความสูงของน้ำภายในถังของกฎข้อที่ 1 ถึง 5 สำหรับ กรณีศึกษาที่ 3	69
รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบแบบจำลองพีชชีเมื่ออินพุตมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นสำหรับ กรณีศึกษาที่ 3	71

รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบแบบจำลองพีชชีเมื่ออินพุตมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นขึ้นลง สำหรับกรณีศึกษาที่ 3	72
รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบแบบจำลองพีชชีเมื่ออินพุตมีการเปลี่ยนแปลงอินพุตแบบสุ่ม สำหรับกรณีศึกษา 3	72
รูปที่ 4.19 ฟังก์ชันสมาชิกของระดับความสูงของน้ำภายในถังของกฎข้อที่ 1 ถึง 5 สำหรับกรณีศึกษาที่ 4	74
รูปที่ 4.19 (ต่อ) ฟังก์ชันสมาชิกของระดับความสูงของน้ำภายในถังของกฎข้อที่ 6 ถึง 10 สำหรับกรณีศึกษาที่ 4	75
รูปที่ 4.19 (ต่อ) ฟังก์ชันสมาชิกของระดับความสูงของน้ำภายในถังของกฎข้อที่ 11 ถึง 15 สำหรับกรณีศึกษาที่ 4	76
รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบแบบจำลองพีชชีเมื่ออินพุตมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นสำหรับ กรณีศึกษาที่ 4	78
รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบแบบจำลองพีชชีเมื่ออินพุตมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นขึ้นลง สำหรับกรณีศึกษาที่ 4	79
รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบแบบจำลองพีชชีเมื่ออินพุตมีการเปลี่ยนแปลงแบบสุ่มสำหรับ กรณีศึกษา 3	79
รูปที่ 5.1 ฟังก์ชันสมาชิกของตัวควบคุมพีชชีลอจิก	84
รูปที่ 5.2 ผลการควบคุมระดับของเหลวโดยใช้ตัวควบคุมพีชชีแบบใช้โมเดลต่อการเปลี่ยน ค่าเป้าหมายแบบขั้นที่ระดับปฏิบัติการความสูง 50%	94

รูปที่ 5.3 ผลการควบคุมระดับของเหลวโดยใช้ตัวควบคุมฟิซซีลोजิก (นฤพนธ์) ต่อการเปลี่ยน ค่าเป้าหมายแบบขั้นที่ระดับปฏิบัติการความสูง 50%	94
รูปที่ 5.4 ผลการควบคุมระดับของเหลวโดยใช้ตัวควบคุมแบบกำหนดเกณฑ์ต่างๆ กันต่อการ เปลี่ยนค่าเป้าหมายแบบขั้นที่ระดับปฏิบัติการความสูง 50%	95
รูปที่ 5.5 ผลการควบคุมระดับของเหลวโดยใช้ตัวควบคุมพีไอต่อการเปลี่ยนค่าเป้าหมาย แบบขั้นที่ระดับปฏิบัติการความสูง 50%.....	95
รูปที่ 5.6 ผลการควบคุมระดับของเหลวโดยตัวควบคุมฟิซซีแบบใช้โมเดลต่อการเปลี่ยนแปลง ของตัวแปรรบกวน.....	96
รูปที่ 5.7 ผลการควบคุมระดับของเหลวของตัวควบคุมฟิซซีลोजิก (นฤพนธ์) ต่อการ เปลี่ยนแปลงของตัวแปรรบกวน	96
รูปที่ 5.8 ผลการควบคุมระดับของเหลวโดยใช้ตัวควบคุมแบบกำหนดเกณฑ์ต่างๆ กัน ต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรรบกวน	97
รูปที่ 5.9 ผลการควบคุมระดับของเหลวโดยใช้ตัวควบคุมพีไอต่อการเปลี่ยนแปลงของ ตัวแปรรบกวน	97
รูปที่ 5.10 ผลการทดสอบความทนทานของตัวควบคุมฟิซซีแบบใช้โมเดลต่อการเปลี่ยน จุดปฏิบัติการเป็นระดับความสูง 80%	98
รูปที่ 5.11 ผลการทดสอบความทนทานของตัวควบคุมฟิซซีลोजิก(นฤพนธ์) ต่อการเปลี่ยน จุดปฏิบัติการเป็นระดับความสูง 80%	98
รูปที่ 5.12 ผลการทดสอบความทนทานของตัวควบคุมแบบกำหนดเกณฑ์ต่างๆ กัน ต่อการ เปลี่ยนจุดปฏิบัติการเป็นระดับความสูง 80%	99

รูปที่ 5.13 ผลการทดสอบความทนทานของตัวควบคุมฟีไธต่อการเปลี่ยนจุดปฏิบัติการ เป็นระดับความสูง 80%	99
รูปที่ 5.14 ผลการทดสอบความทนทานของตัวควบคุมฟิซซีแบบใช้โมเดลต่อการเปลี่ยน จุดปฏิบัติการเป็นระดับความสูง 30%	100
รูปที่ 5.15 ผลการทดสอบความทนทานของตัวควบคุมฟิซซีลอจิก (นฤพนธ์) ต่อการเปลี่ยน จุดปฏิบัติการเป็นระดับความสูง 30%	100
รูปที่ 5.16 ผลการทดสอบความทนทานของตัวควบคุมแบบกำหนดเกณฑ์ต่างๆ กัน ต่อการ เปลี่ยนจุดปฏิบัติการเป็นระดับความสูง 30%	101
รูปที่ 5.17 ผลการทดสอบความทนทานของตัวควบคุมฟีไธต่อการเปลี่ยนจุดปฏิบัติการ เป็นระดับความสูง 30%	101
รูปที่ 5.18 ผลการทดสอบตัวควบคุมแบบใช้โมเดล เมื่อพารามิเตอร์ของกระบวนการ ผิดพลาดไป +30%	102
รูปที่ 5.19 ผลการทดสอบตัวควบคุมฟิซซีลอจิก (นฤพนธ์) เมื่อพารามิเตอร์ของ กระบวนการผิดพลาดไป +30%	102
รูปที่ 5.20 ผลการทดสอบตัวควบคุมแบบกำหนดเกณฑ์ต่างๆ กัน เมื่อพารามิเตอร์ ของกระบวนการผิดพลาดไป +30%	103
รูปที่ 5.21 ผลการทดสอบตัวควบคุมฟีไธเมื่อพารามิเตอร์ของกระบวนการ ผิดพลาดไป+30%	103
รูปที่ 5.22 ผลการทดสอบตัวควบคุมแบบใช้โมเดล เมื่อพารามิเตอร์ของกระบวนการ ผิดพลาดไป -30%	104

รูปที่ 5.23 ผลการทดสอบตัวควบคุมพืชซีลोजิก (นฤพนธ์) เมื่อพารามิเตอร์ของ กระบวนการผลิตปลาไป -30%	104
รูปที่ 5.24 ผลการทดสอบตัวควบคุมแบบกำหนดเกณฑ์ต่างๆ กันเมื่อพารามิเตอร์ของ กระบวนการผลิตปลาไป -30%	105
รูปที่ 5.25 ผลการทดสอบตัวควบคุมพีไอเมื่อพารามิเตอร์ของกระบวนการ ผลิตปลาไป -30%	105
รูปที่ ก.1 ค่าความเป็นสมาชิกของพืชซีเซต	118
รูปที่ ก.2 การดำเนินการของพืชซีเซต	119
รูปที่ ก.3 รายละเอียดของฟังก์ชันสมาชิก	121
รูปที่ ก.4 ฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม	123
รูปที่ ก.5 ฟังก์ชัน S	123
รูปที่ ก.6 โครงสร้างของระบบพืชซีลोजิก	133
รูปที่ ก.7 การอนุมานพืชซีแบบ <i>Max-Min</i>	135
รูปที่ ก.8 การอนุมานพืชซีแบบ <i>Max-Prod</i>	135
รูปที่ ก.9 การดีพืชซีแบบค่าสูงสุด	136
รูปที่ ก.10 การดีพืชซีแบบจุดศูนย์กลาง	136
รูปที่ ก.11 การดีพืชซีแบบความสูง	137
รูปที่ ข.1 โครงสร้างเรขาคณิตของถังทรงกลม	139