

ตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตนเอง
SELF-ORGANIZING FUZZY LOGIC INTELLIGENT CONTROLLERS



นางสาวธิดาพร พิทักษ์พรพันธุ์
MISS THIDAPORN PITAKPORNPAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย

เลขหมู่.....สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เลขที่..... 26189
วัน, เดือน, ปี..... 10 ต.ค. 2539 / พ.ศ. 2539

ISBN 974-621-569-8

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SELF-ORGANIZING FUZZY LOGIC INTELLIGENT CONTROLLERS-



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
1996**

ISBN 974-621-569-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ตัวควบคุมพีซีแบบปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตนเอง
นักศึกษา	นางสาวธิดาพร พิทักษ์พรพันธุ์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. จงกล งามวิวิทย์
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมระบบควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.	2539

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ เป็นการออกแบบและสร้างตัวควบคุมพีซีแบบปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตนเอง เพื่อใช้ควบคุมกระบวนการจริง ในการออกแบบตัวควบคุมจะใช้หลักการของตัวควบคุมแบบ hybrid-nested โดยแบ่งระดับการควบคุมออกเป็นระดับหยาบและระดับละเอียด เพื่อเพิ่มความแม่นยำของเอาต์พุตตอบสนองอ้างอิง ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับควบคุมระดับหยาบ ใช้ตัวควบคุมพีซีแบบ PD ซึ่งสามารถควบคุมเอาต์พุตของระบบให้ลู่เข้าสู่ค่าอ้างอิงได้เร็ว โดยไม่ส่งผลให้เกิดโอเวอร์ชูตสูงเกินไป และมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน สามารถคำนวณได้เร็วและใช้หน่วยความจำน้อย และในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับควบคุมระดับละเอียด ซึ่งต้องแก้ปัญหาเรื่องค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัวของระบบ ใช้โครงสร้างของตัวควบคุมซึ่งประกอบด้วยตัวควบคุมพีซีแบบ PD ต่อขนานกับตัวควบคุมแบบ P ที่มีค่าเกินเท่ากับส่วนกลับของค่าเกินที่สภาวะคงตัวของกระบวนการ ทำให้หน่วยความจำและเวลาที่ใช้ประมวลผลลดลง ในส่วนของการปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุม จะใช้วิธีการปรับแต่งกฎการควบคุมจากสมรรถนะระยะสั้นของระบบ ซึ่งอยู่ในรูปค่าผิดพลาดและการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาดในแต่ละช่วงเวลาของการสุ่มสัญญาณ และใช้วิธีปรับแต่งค่าเกินของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุมจากสมรรถนะระยะยาวของระบบ ซึ่งอยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์โอเวอร์ชูต เวลาไรซ์ไทม์ เวลาเซตตลิ่งไทม์ ค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัว และเปอร์เซ็นต์การแกว่งของเอาต์พุตตอบสนองอ้างอิง ตัวควบคุมจะปรับแต่งกฎการควบคุมในขณะที่ทำการควบคุม เพื่อลดผลกระทบอันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการ หรือจากการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อม นอกจากนี้ ยังปรับปรุงโครงสร้างของตัวควบคุมให้เหมาะสมสำหรับนำไปสร้างด้วยซอฟต์แวร์บนเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ เพื่อนำไปใช้ควบคุมกระบวนการในเวลาจริง และได้พัฒนาโปรแกรมการควบคุมให้ทำงานเป็นตัวควบคุมแบบหลายช่องควบคุม ทำให้สามารถใช้เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์เครื่องเดียวควบคุมกระบวนการได้หลายกระบวนการในเวลาเดียวกัน และสามารถประยุกต์ใช้ในการควบคุมกระบวนการที่มีหลาย

อินพุตหลายเอาต์พุต โดยการแยกการควบคุมออกเป็นระบบย่อยที่มีหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุต
หลายๆ ระบบ จากการทดลองได้ผลการควบคุมเป็นที่น่าพอใจ ตัวควบคุมที่สร้างขึ้นสามารถ
ควบคุมกระบวนการในห้องทดลองได้ดี และมีความคงทนในการควบคุมกระบวนการที่มีการ
เปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ มีระดับสัญญาณรบกวนสูง หรือมีการเปลี่ยนแปลงของโหลด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Self-Organizing Fuzzy Logic Intelligent Controllers
Student	Miss Thidaporn Pitakpornpan
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Jongkol Ngamwiwit
Level of Study	Master of Engineering in Electrical Engineering
Department	Control Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Year	1996

ABSTRACT

This thesis presents the design and implementation of a self-organizing fuzzy logic intelligent controller for process control application. The controller is designed with the concept of hybrid-nested controllers by dividing the controller into two sub-controllers, coarse and fine controllers, to reduce the oscillation of the output around the set point. The structure of the fuzzy PD controller is used in designing the coarse controller, because of its fast rise time and minimal peak overshoot step response. Moreover, its simple structure makes it easy to implement and uses less memory and computing time. The most significant condition to be realized in designing the fine controller is the controller must have an ability to correct the steady-state error of the system. Consequently, the structure of the fuzzy PD controller paralleled with the proportional gain, which equals the inverse proportion of the steady-state gain of the process, is selected to support the former condition. In the design of the self-organizing level of the controller, the short-term system performances in terms of error and change of error in each sampling period are used as the parameters to adjust the fuzzy control rules. The long-term system performances in terms of the peak overshoot, rise time, settling time, steady-state error and percent oscillation are used to tune the scaling factors of each input-output variables. Thus the designed controller can reduce the effects of the process's parameters and the environmental changes by on-line adaptation of the fuzzy rules. In order to utilize one microcomputer to control multiple processes simultaneously, the program is also improved to work as a multi-channel controller. The controller is applied to control a MIMO process by dividing the control system into SISO sub-systems operating in-

parallel. The experimental results show that the controller can robustly control the laboratory process with good performance despite changes in the process parameters or set point, high noise level and load disturbance.



กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี เพราะได้รับความเมตตาจาก รองศาสตราจารย์ ดร.จกมล งามวิวิทย์ ที่ได้ให้ความกรุณาแนะนำแก่ผู้วิจัยตลอดมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.โยธิน เปรมปราณีรัชต์ ที่ให้การต้อนรับอย่างเต็มใจ และให้คำแนะนำที่ดียิ่งในเบื้องต้น รวมถึงการให้ความสนใจถึงความคิดเห็นอย่างสม่ำเสมอ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ สุเชียร เกียรติสุนทร ที่เป็นแรงบันดาลใจให้ทำงานอย่างมีระบบและเพิ่มสมรรถนะในการบริหารเวลา จนกลายเป็นความคุ้นเคยที่ดี

ขอขอบพระคุณ อาจารย์พรสุข เทศเจริญ ที่ให้การดูแลเอาใจใส่และคำปรึกษาอย่างดียิ่ง ทั้งในส่วนของการวิชาการและความสะดวกเรียบร้อยในการดำเนินงาน

ขอขอบพระคุณ ดร.นนทวัฒน์ จุลเดชะ ที่ให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ และชี้แนะให้เข้าใจถึงระบบการทำงานให้ดียิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ วิพันธ์ ปรีชาพานิช และคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมทุกท่าน ที่ให้การดูแลและให้คำปรึกษาที่จำเป็นอย่างต่อเนื่อง

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือทั้งหมด ตลอดจนจนถึงสถานที่ รวมทั้งการอำนวยความสะดวกจนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสิ้น

ขอขอบคุณเพื่อนสนิทมิตรสหายทุกท่าน ซึ่งเป็นกำลังใจที่ดีและเป็นเรี่ยวแรงย่อยที่สำคัญ ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

และที่ลืมเสียมิได้คือ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่เคารพรักยิ่ง ตลอดจนถึงญาติผู้ใหญ่ และพี่ ๆ น้อง ๆ ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ตลอดการทำวิทยานิพนธ์นี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ โครงการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนา สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่มอบทุนเพื่อสนับสนุนการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษาภายในประเทศ และขอขอบพระคุณ บริษัท สยามโตโยต้าอุตสาหกรรม จำกัด ที่มอบทุนอุดหนุนการวิจัยจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงด้วยดี

ธิดาพร พิทักษ์พรพันธุ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	XI
สารบัญภาพ.....	XII
คำย่อและสัญลักษณ์.....	XIX
บทที่	
1 บทนำ.....	1
แนวคิดในการนำเสนอวิทยานิพนธ์.....	1
วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	6
ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	6
2 ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับพีชซี.....	10
พีชซีเซต.....	10
ทฤษฎีเซตแบบเดิม.....	10
ทฤษฎีพีชซีเซต.....	12
พีชซีลอจิก.....	16
ตัวแปรลิงกวิสติก.....	16
ทฤษฎีตรรกศาสตร์แบบเดิม.....	20
ทฤษฎีพีชซีลอจิก.....	21
การหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผลโดยใช้ทฤษฎีพีชซีลอจิก.....	25
ความสัมพันธ์พีชซี.....	27
การคอมโพสิชันแบบพีชซี.....	30
การอินเฟอเรนซ์แบบพีชซี.....	32
การพีชซีพีเคชัน.....	34
การดีพีชซีพีเคชัน.....	35
ตัวควบคุมพีชซี.....	38
หน่วยพีชซีพีเคชัน.....	38

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ฐานกฎการควบคุมพีชชี.....	39
หน่วยอินเฟอเรนซ์.....	39
หน่วยดีพีชชีพีเคชัน.....	40
ตัวควบคุมพีชชีแบบปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตนเอง.....	40
หน่วยวัดสมรรถนะ.....	41
หน่วยปรับแต่งกฎการควบคุม.....	41
การวิเคราะห์ระบบควบคุมพีชชี.....	41
การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงสถิตย์ของระบบควบคุมพีชชี.....	42
1. ความสมบูรณ์ของฐานกฎการควบคุม.....	42
2. การเกิดกิริยาระหว่างกันของกฎการควบคุม.....	42
3. ความสอดคล้องกันของกฎการควบคุม.....	43
4. ความคงทนในการควบคุม.....	43
การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมพีชชี.....	44
1. หลักเกณฑ์เสถียรภาพตามนัยของ Lyapunov.....	45
2. วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของ Lyapunov.....	47
3. การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมพีชชีแบบสถิตย์ จากหลักเกณฑ์เสถียรภาพตามนัยของ Lyapunov.....	50
4. การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมพีชชีแบบปรับตัวโดยตรง จากหลักเกณฑ์เสถียรภาพตามนัยของ Lyapunov.....	51
3 การออกแบบตัวควบคุมพีชชี.....	56
การออกแบบโครงสร้างระดับพื้นฐานของตัวควบคุม SOFLIC.....	57
การออกแบบตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมระดับหยาบ.....	58
1. การกำหนดจำนวนตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุม.....	58
2. การนอมอลไลซ์ตัวแปรอินพุตให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ที่กำหนด.....	58
3. การคืนนอมอลไลซ์ตัวแปรเอาต์พุตให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ที่กำหนด.....	59
4. การกำหนดค่าเกนของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต.....	60
5. การเลือกวิธีและระดับการควอนไตซ์.....	61
6. การเลือกวิธีการพีชชีพีเคชัน.....	61

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
7. การกำหนดจำนวนพีซีเซตของตัวแปรอินพุต.....	62
8. การกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุต.....	63
9. การกำหนดจำนวนพีซีเซตของตัวแปรเอาต์พุตบนเอกภพสัมพัทธ์.....	64
10. การกำหนดจำนวนฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุต.....	64
11. การกำหนดรูปแบบของกฎการควบคุม.....	65
12. การเลือกวิธีการอินเฟอเรนซ์.....	65
13. การเลือกวิธีการดีฟิซซิฟิเคชัน.....	66
การออกแบบตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมระดับละเอียด.....	67
1. การออกแบบโครงสร้างของตัวควบคุมพีซีแบบ PD สำหรับการควบคุมระดับละเอียด.....	68
1.1. การกำหนดจำนวนตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุม.....	68
1.2. การนอมอลไลซ์ตัวแปรอินพุตให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ที่กำหนด.....	68
1.3. การนอมอลไลซ์ตัวแปรเอาต์พุตให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ที่กำหนด...	69
1.4. การกำหนดค่าเกนของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต.....	69
1.5. การเลือกวิธีและระดับการควอนไทซ์.....	69
1.6. การเลือกวิธีการดีฟิซซิฟิเคชัน.....	69
1.7. การกำหนดจำนวนพีซีเซตและฟังก์ชันการเป็นสมาชิก ของตัวแปรอินพุต.....	69
1.8. การกำหนดจำนวนพีซีเซตและฟังก์ชันการเป็นสมาชิก ของตัวแปรเอาต์พุต.....	70
1.9. การกำหนดรูปแบบของกฎการควบคุม.....	70
1.10. การเลือกวิธีการอินเฟอเรนซ์.....	70
1.11. การเลือกวิธีการดีฟิซซิฟิเคชัน.....	70
2. การออกแบบโครงสร้างในส่วนของตัวควบคุมแบบ P ที่ใช้ในการควบคุมระดับละเอียด.....	70
การออกแบบโครงสร้างระดับปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุม SOFLIC.....	71
การออกแบบโครงสร้างส่วนปรับแต่งกฎการควบคุม.....	72
การออกแบบโครงสร้างส่วนปรับแต่งค่าเกนของตัวควบคุม.....	73

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
1. การรับรองเสถียรภาพของระบบควบคุม.....	73
2. การแก้ไขสมรรถนะที่สภาวะทรานเซียนท์.....	73
3. การแก้ไขค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัว.....	75
4. การแก้ไขการแกว่งของเอาต์พุตที่สภาวะคงตัว.....	76
5. การแก้ไขเวลาเซตติงใหม่.....	76
การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงสถิติของตัวควบคุมที่น่าเสนอ.....	76
ความสมบูรณ์ของฐานกฎการควบคุม.....	76
การเกิดกิริยาระหว่างกันของกฎการควบคุม.....	76
ความสอดคล้องกันของกฎการควบคุม.....	77
ความคงทนในการควบคุม.....	77
การพิสูจน์เสถียรภาพของระบบควบคุมที่น่าเสนอ.....	77
4 แผนภาพแสดงการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	80
โปรแกรมหลัก.....	80
การกำหนดค่า Configuration ของตัวควบคุม.....	81
การควบคุมกระบวนการในเวลาจริง.....	84
การรับค่าจาก A/D และการส่งค่าไป D/A.....	88
การจำลองการทำงานของระบบควบคุมทั้งหมดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	89
การแสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมด้วยกราฟบนจอมอนิเตอร์.....	92
การทำงานของตัวควบคุม SOFLIC.....	94
การทำงานของตัวควบคุม PID.....	96
การจำลองการทำงานของกระบวนการ.....	97
5 การทดลอง.....	99
การจำลองระบบควบคุมทั้งหมดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	99
การควบคุมกระบวนการอันดับหนึ่ง.....	100
การควบคุมกระบวนการอันดับสอง.....	104
การควบคุมกระบวนการในเวลาจริง.....	109
การควบคุมความดันของอากาศในถังกระบวนการ.....	110
การควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการ กรณีดั้งเดิม.....	122

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
การควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการ กรณีสองถัง.....	134
การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมในการควบคุมกระบวนการหลายอินพุตหลายเอาต์พุต....	144
สรุปผลการทดลอง.....	151
6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	154
บรรณานุกรม.....	157
ภาคผนวก.....	159
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณค่าสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมที่นำเสนอ.....	160
ภาคผนวก ข ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์.....	169
บทความวิจัยในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 16	
เรื่อง ผลการเปลี่ยนแปลงค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวควบคุมแบบฟัซซี่.....	170
บทความวิจัยในวารสารทางวิชาการ “ วิศวกรรมลาดกระบัง ”	
เรื่อง ตัวควบคุมฟัซซี่แบบสร้างและปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตนเอง.....	178
บทความวิจัยในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 18	
เรื่อง ตัวควบคุมฟัซซี่แบบสร้างและปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตนเอง	
แบบ Hybrid-nested.....	186
ประวัติผู้เขียน.....	195

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 แสดงค่าความจริงของประพจน์ ในการปฏิบัติการทางตรรกศาสตร์บูลีน.....	21
2 แสดงตารางความจริงสำหรับตัวปฏิบัติการของพีชชีลอจิก ตามนิยามของ Zadeh.....	23
3 แสดงตารางความจริงสำหรับตัวปฏิบัติการพีชชีลอจิก ตามนิยามของ Baldwin.....	24
4 แสดงผลของการหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผล โดยใช้ GMP ด้วยหลักการของ Fukami.....	27
5 แสดงผลของการหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผล โดยใช้ GMT ด้วยหลักการของ Fukami.....	27
6 แสดงกฎการวัดสมรรถนะที่สภาวะทรานเซียนท์.....	75
7 แสดงค่าสมรรถนะของระบบควบคุม ในการควบคุมกระบวนการอันดับหนึ่งที่มีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ กัน.....	104
8 แสดงค่าสมรรถนะของระบบควบคุม ในการควบคุมกระบวนการอันดับสองที่มีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ กัน.....	109
9 แสดงค่าสมรรถนะของระบบควบคุม PID กับระบบควบคุมพีชชี ในการควบคุมความดันของอากาศในถังกระบวนการ เมื่อกำหนดค่าสัญญาณอ้างอิงต่าง ๆ กัน.....	121
10 แสดงค่าสมรรถนะของระบบควบคุม PID กับระบบควบคุมพีชชี ในการควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการ กรณีถังเดียว เมื่อกำหนดค่าสัญญาณอ้างอิงต่าง ๆ กัน.....	133
11 แสดงค่าสมรรถนะของระบบควบคุม PID กับระบบควบคุมพีชชี ในการควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการ กรณีสองถัง เมื่อกำหนดค่าสัญญาณอ้างอิงต่าง ๆ กัน.....	143
12 แสดงค่าสมรรถนะของระบบควบคุมกระบวนการถึงผสมถ่ายเทความร้อน.....	151
13 แสดงตัวอย่างฐานกฎการควบคุมของตัวควบคุมพีชชี ที่ใช้ในการควบคุมระดับหยابที่เวลา nT	164
14 แสดงตัวอย่างฐานกฎการควบคุมของตัวควบคุมพีชชีที่ได้จาก การปรับแต่งกฎการควบคุมระดับหยابที่เวลา nT	168

สารบัญภาพ

	หน้า
1. แสดงค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรลิงกวิสติก “Probability”.....	17
2. แสดงค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของเทอม “true” และ “false” ตามนิยามของ Zadeh.....	18
3. แสดงค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรลิงกวิสติก “Truth” ตามนิยามของ Baldwin.....	19
4. แสดงการคอมโพสิชันของความสัมพันธ์ฟัซซี.....	30
5. แสดงการหาข้อสรุปจากหลักฐาน โดยใช้เงื่อนไขความสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผล.....	32
6. แสดงโครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมฟัซซี.....	38
7. แสดงโครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตนเอง.....	40
8. แสดงระบบควบคุมฟัซซี ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการที่ไม่เป็นเชิงเส้น กับตัวควบคุมฟัซซีแบบสถิตย์.....	50
9. แสดงระบบควบคุมฟัซซีแบบปรับตัวโดยตรง.....	51
10. แสดงโครงสร้างของตัวควบคุม SOFLIC.....	56
11. แสดงโครงสร้างของตัวควบคุมแบบ hybrid-nested.....	57
12. แสดงโครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซีแบบ PD.....	58
13. แสดงฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซตของตัวแปรอินพุต e และ Δe	64
14. แสดงการใช้ตัวควบคุมฟัซซีแบบ PD ต่อขนานกับตัวควบคุมแบบ P แทนตัวควบคุมฟัซซีแบบ PID.....	68
15. แสดงโครงสร้างระดับพื้นฐานของตัวควบคุม SOFLIC.....	71
16. แสดงฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปร O_s และ T_r	74
17. แสดงการทำงานของโปรแกรมหลัก.....	80
18. แสดงการกำหนดค่า Configuration ของตัวควบคุม.....	82
19. แสดงการแก้ไขค่า Configuration ของช่องควบคุม.....	83
20. แสดงการส่งคำสั่งเริ่มต้นทำการควบคุม.....	85
21. แสดงการทำงานของโปรแกรม Interrupt Service Subroutine.....	85
22. แสดงการรับค่าจาก A/D	88
23. แสดงการส่งค่าไป D/A	89
24. แสดงการจำลองการทำงานของระบบควบคุมทั้งหมดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	90

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
25 แสดงการแสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมด้วยกราฟบนจอมอนิเตอร์.....	92
26 แสดงการทำงานของตัวควบคุม SOFLIC.....	94
27 แสดงการทำงานของตัวควบคุม PID.....	96
28 แสดงการจำลองการทำงานของกระบวนการ.....	97
29 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม ในการควบคุมกระบวนการอันดับหนึ่งที่มี ค่าฟังก์ชันถ่ายโอน $G_p(s) = \frac{1}{150s+1}$ เมื่อกำหนดขนาดของสัญญาณอ้างอิง เท่ากับ 50% สัญญาณนอยส์แบบสุ่ม ขนาด 5% ของสัญญาณอ้างอิง และจำลองการรบกวนจากภายนอกเป็นสัญญาณพัลส์ ความกว้าง 20 วินาที ขนาด 100 % ของสัญญาณควบคุมสูงสุด เฟสตรงข้ามกับสัญญาณควบคุม ที่เวลา $t = 300$ วินาที.....	101
30 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม ในการควบคุมกระบวนการอันดับหนึ่งที่มี ค่าฟังก์ชันถ่ายโอน $G_p(s) = \frac{2}{150s+1}$ เมื่อกำหนดขนาดของสัญญาณอ้างอิง เท่ากับ 50% สัญญาณนอยส์แบบสุ่ม ขนาด 5% ของสัญญาณอ้างอิง และจำลองการรบกวนจากภายนอกเป็นสัญญาณพัลส์ ความกว้าง 20 วินาที ขนาด 100 % ของสัญญาณควบคุมสูงสุด เฟสตรงข้ามกับสัญญาณควบคุม ที่เวลา $t = 300$ วินาที.....	102
31 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม ในการควบคุมกระบวนการอันดับหนึ่งที่มี ค่าฟังก์ชันถ่ายโอน $G_p(s) = \frac{2}{500s+1}$ เมื่อกำหนดขนาดของสัญญาณอ้างอิง เท่ากับ 50% สัญญาณนอยส์แบบสุ่ม ขนาด 5% ของสัญญาณอ้างอิง และจำลองการรบกวนจากภายนอกเป็นสัญญาณพัลส์ ความกว้าง 20 วินาที ขนาด 100 % ของสัญญาณควบคุมสูงสุด เฟสตรงข้ามกับสัญญาณควบคุม ที่เวลา $t = 300$ วินาที.....	103
32 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม ในการควบคุมกระบวนการอันดับสองที่มี ค่าฟังก์ชันถ่ายโอน $G_p(s) = \frac{1}{2500s^2 + 100s + 1}$ เมื่อกำหนดขนาดของสัญญาณ อ้างอิงเท่ากับ 50% สัญญาณนอยส์แบบสุ่ม ขนาด 5% ของสัญญาณอ้างอิง และจำลองการรบกวนจากภายนอกเป็นสัญญาณพัลส์ ความกว้าง 20 วินาที	

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ขนาด 100 % ของสัญญาณควบคุมสูงสุด เฟสตรงข้ามกับสัญญาณควบคุม ที่เวลา $t = 300$ วินาที.....	105
33 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม ในการควบคุมกระบวนการอันดับสองที่มี ค่าฟังก์ชันถ่ายโอน $G_p(s) = \frac{2}{2500s^2 + 100s + 1}$ เมื่อกำหนดขนาดของสัญญาณ อ้างอิงเท่ากับ 50% สัญญาณนอยส์แบบสุ่ม ขนาด 5% ของสัญญาณอ้างอิง และจำลองการรบกวนจากภายนอกเป็นสัญญาณพัลส์ ความกว้าง 20 วินาที ขนาด 100 % ของสัญญาณควบคุมสูงสุด เฟสตรงข้ามกับสัญญาณควบคุม ที่เวลา $t = 300$ วินาที.....	106
34 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม ในการควบคุมกระบวนการอันดับสองที่มี ค่าฟังก์ชันถ่ายโอน $G_p(s) = \frac{2}{2500s^2 + 50s + 1}$ เมื่อกำหนดขนาดของสัญญาณ อ้างอิงเท่ากับ 50% สัญญาณนอยส์แบบสุ่ม ขนาด 5% ของสัญญาณอ้างอิง และจำลองการรบกวนจากภายนอกเป็นสัญญาณพัลส์ ความกว้าง 20 วินาที ขนาด 100 % ของสัญญาณควบคุมสูงสุด เฟสตรงข้ามกับสัญญาณควบคุม ที่เวลา $t = 300$ วินาที.....	107
35 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม ในการควบคุมกระบวนการอันดับสองที่มี ค่าฟังก์ชันถ่ายโอน $G_p(s) = \frac{2}{400s^2 + 20s + 1}$ เมื่อกำหนดขนาดของสัญญาณ อ้างอิงเท่ากับ 50% สัญญาณนอยส์แบบสุ่ม ขนาด 5% ของสัญญาณอ้างอิง และจำลองการรบกวนจากภายนอกเป็นสัญญาณพัลส์ ความกว้าง 20 วินาที ขนาด 100 % ของสัญญาณควบคุมสูงสุด เฟสตรงข้ามกับสัญญาณควบคุม ที่เวลา $t = 300$ วินาที.....	108
36 แสดงกระบวนการควบคุมความดันของอากาศในถังกระบวนการที่ใช้ในการทดลอง.....	110
37 แสดงโครงสร้างของกระบวนการควบคุมความดันของอากาศในถังกระบวนการ.....	111
38 แสดงการควบคุมความดันของอากาศในถังกระบวนการด้วยเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์.	112
39 แสดงผลตอบสนองระบบเปิดของกระบวนการควบคุมความดันของอากาศ ในถังกระบวนการ เมื่อเปิดวาล์วควบคุม CV 25, 30, 35, 40, 45 และ 50%.....	113
40 แสดงเส้นโค้งปฏิกิริยาของกระบวนการควบคุมความดันของอากาศในถังกระบวนการ เมื่อเปิดวาล์วควบคุม CV 42.17 % ความดันของอากาศในถังที่สภาวะคงตัว	

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
เท่ากับ 3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร.....	114
41 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมความดันของอากาศในถังกระบวนการ ด้วยตัวควบคุม PID เมื่อกำหนดค่าสัญญาณอ้างอิงเท่ากับ 2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีการรบกวน โดยเปิดวาล์ว V-1 เป็นเวลา 5 วินาที ที่เวลา $t = 400$ วินาที.....	115
42 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมความดันของอากาศในถังกระบวนการ ด้วยตัวควบคุม SOFLIC เมื่อกำหนดค่าสัญญาณอ้างอิงเท่ากับ 2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีการรบกวน โดยเปิดวาล์ว V-1 เป็นเวลา 5 วินาที ที่เวลา $t = 400$ วินาที.....	116
43 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมความดันของอากาศในถังกระบวนการ ด้วยตัวควบคุม PID เมื่อกำหนดค่าสัญญาณอ้างอิงเท่ากับ 3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีการรบกวน โดยเปิดวาล์ว V-1 เป็นเวลา 5 วินาที ที่เวลา $t = 400$ วินาที.....	117
44 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมความดันของอากาศในถังกระบวนการ ด้วยตัวควบคุม SOFLIC เมื่อกำหนดค่าสัญญาณอ้างอิงเท่ากับ 3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีการรบกวน โดยเปิดวาล์ว V-1 เป็นเวลา 5 วินาที ที่เวลา $t = 400$ วินาที.....	118
45 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมความดันของอากาศในถังกระบวนการ ด้วยตัวควบคุม PID เมื่อกำหนดค่าสัญญาณอ้างอิงเท่ากับ 4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีการรบกวน โดยเปิดวาล์ว V-1 เป็นเวลา 5 วินาที ที่เวลา $t = 400$ วินาที.....	119
46 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมความดันของอากาศในถังกระบวนการ ด้วยตัวควบคุม SOFLIC เมื่อกำหนดค่าสัญญาณอ้างอิงเท่ากับ 4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีการรบกวน โดยเปิดวาล์ว V-1 เป็นเวลา 5 วินาที ที่เวลา $t = 400$ วินาที.....	120
47 แสดงกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการที่ใช้ในการทดลอง.....	122
48 แสดงโครงสร้างของกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการ.....	123
49 แสดงการควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการด้วยเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์.....	124

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
50 แสดงผลตอบสนองของระบบเปิดของกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการ กรณีถึงเดียว เมื่อเปิดวาล์วควบคุม CV 25, 30, 35, 40, 45 และ 50%	125
51 แสดงเส้นโค้งปฏิกิริยาของกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการ กรณีถึงเดียว เมื่อเปิดวาล์วควบคุม CV 37.5 % ระดับน้ำในถังกระบวนการที่สภาวะคงตัวเท่ากับ 40 เซนติเมตร.....	126
52 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการ กรณีถึงเดียว ด้วยตัวควบคุม PID เมื่อกำหนดค่าสัญญาณอ้างอิงเท่ากับ 20 เซนติเมตร และมีการรบกวน โดยปิด PUMP เป็นเวลา 10 วินาที ที่เวลา $t = 250$ วินาที และเติมน้ำ 1 ชั้น ลงใน TANK-2 ที่เวลา $t = 400$ วินาที.....	127
53 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการ กรณีถึงเดียว ด้วยตัวควบคุม SOFLIC เมื่อกำหนดค่าสัญญาณอ้างอิงเท่ากับ 20 เซนติเมตร และมีการรบกวน โดยปิด PUMP เป็นเวลา 10 วินาที ที่เวลา $t = 250$ วินาที และเติมน้ำ 1 ชั้น ลงใน TANK-2 ที่เวลา $t = 400$ วินาที.....	128
54 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการกรณีถึงเดียว ด้วยตัวควบคุม PID เมื่อกำหนดค่าสัญญาณอ้างอิงเท่ากับ 40 เซนติเมตร และมีการรบกวน โดยปิด PUMP เป็นเวลา 10 วินาที ที่เวลา $t = 250$ วินาที และเติมน้ำ 1 ชั้น ลงใน TANK-2 ที่เวลา $t = 400$ วินาที.....	129
55 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการ กรณีถึงเดียว ด้วยตัวควบคุม SOFLIC เมื่อกำหนดค่าสัญญาณอ้างอิงเท่ากับ 40 เซนติเมตร และมีการรบกวน โดยปิด PUMP เป็นเวลา 10 วินาที ที่เวลา $t = 250$ วินาที และเติมน้ำ 1 ชั้น ลงใน TANK-2 ที่เวลา $t = 400$ วินาที.....	130
56 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการ กรณีถึงเดียว ด้วยตัวควบคุม PID เมื่อกำหนดค่าสัญญาณอ้างอิงเท่ากับ 60 เซนติเมตร และมีการรบกวน โดยปิด PUMP เป็นเวลา 10 วินาที ที่เวลา $t = 250$ วินาที และเติมน้ำ 1 ชั้น ลงใน TANK-2 ที่เวลา $t = 400$ วินาที.....	131
57 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการ กรณีถึงเดียว ด้วยตัวควบคุม SOFLIC เมื่อกำหนดค่าสัญญาณอ้างอิงเท่ากับ 60 เซนติเมตร และมีการรบกวน โดยปิด PUMP เป็นเวลา 10 วินาที ที่เวลา $t = 250$ วินาที	

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
และเติมน้ำ 1 ชั้น ลงใน TANK-2 ที่เวลา $t = 400$ วินาที.....	132
58 แสดงผลตอบสนองของระบบเปิดของกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการ กรณีสองถัง เมื่อเปิดวาล์วควบคุม CV 25, 30, 35, 40, 45 และ 50%.....	135
59 แสดงเส้นโค้งปฏิกิริยาของกระบวนการควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการ กรณีสองถัง เมื่อเปิดวาล์วควบคุม CV 38.5 % ระดับน้ำในถังกระบวนการที่สภาวะคงตัวเท่ากับ 40 เซนติเมตร.....	136
60 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการ กรณีสองถัง ด้วยตัวควบคุม PID เมื่อกำหนดค่าสัญญาณอ้างอิงเท่ากับ 20 เซนติเมตร และมีการรบกวน โดยปิด PUMP เป็นเวลา 10 วินาที ที่เวลา $t = 300$ วินาที.....	137
61 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการ กรณีสองถัง ด้วยตัวควบคุม SOFLIC เมื่อกำหนดค่าสัญญาณอ้างอิงเท่ากับ 20 เซนติเมตร และมีการรบกวน โดยปิด PUMP เป็นเวลา 10 วินาที ที่เวลา $t = 300$ วินาที.....	138
62 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการ กรณีสองถัง ด้วยตัวควบคุม PID เมื่อกำหนดค่าสัญญาณอ้างอิงเท่ากับ 40 เซนติเมตร และมีการรบกวน โดยปิด PUMP เป็นเวลา 10 วินาที ที่เวลา $t = 300$ วินาที.....	139
63 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการ กรณีสองถัง ด้วยตัวควบคุม SOFLIC เมื่อกำหนดค่าสัญญาณอ้างอิงเท่ากับ 40 เซนติเมตร และมีการรบกวน โดยปิด PUMP เป็นเวลา 10 วินาที ที่เวลา $t = 300$ วินาที.....	140
64 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการ กรณีสองถัง ด้วยตัวควบคุม PID เมื่อกำหนดค่าสัญญาณอ้างอิงเท่ากับ 60 เซนติเมตร และมีการรบกวน โดยปิด PUMP เป็นเวลา 10 วินาที ที่เวลา $t = 300$ วินาที.....	141
65 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมระดับน้ำในถังกระบวนการ กรณีสองถัง ด้วยตัวควบคุม SOFLIC เมื่อกำหนดค่าสัญญาณอ้างอิงเท่ากับ 60 เซนติเมตร และมีการรบกวน โดยปิด PUMP เป็นเวลา 10 วินาที ที่เวลา $t = 300$ วินาที.....	142
66 แสดงกระบวนการถึงผลสมถ่ายเทความร้อนที่ใช้ในการทดลอง.....	144
67 แสดงโครงสร้างของกระบวนการถึงผลสมถ่ายเทความร้อน.....	145
68 แสดงการควบคุมกระบวนการถึงผลสมถ่ายเทความร้อน ด้วยเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์..	147
69 แสดงแผนภาพแสดงการแบ่งรูปในการควบคุมกระบวนการถึงผลสมถ่ายเทความร้อน....	147

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
70 แสดงผลตอบสนองของการควบคุมระดับน้ำ โดยควบคุมการเปิดวาล์วทางเข้าของน้ำที่อุณหภูมิห้อง (CV-2) ด้วยตัวควบคุม SOFLIC เมื่อกำหนดค่าสัญญาณอ้างอิงเท่ากับ 10 เซนติเมตร.....	148
71 แสดงผลตอบสนองของรูปการควบคุมอุณหภูมิของน้ำภายในถังกระบวนการ โดยควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเครื่องทำความร้อน (CC) ด้วยตัวควบคุม SOFLIC เมื่อกำหนดค่าสัญญาณอ้างอิงเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส.....	149
72 แสดงผลตอบสนองของรูปการควบคุมอุณหภูมิของน้ำภายในถังกระบวนการ โดยควบคุมการเปิดวาล์วทางเข้าของน้ำเย็น (CV-1) ด้วยตัวควบคุม SOFLIC เมื่อกำหนดค่าสัญญาณอ้างอิงเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส.....	150
73 แสดงการอินเฟอเรนซ์ตัวแปรอินพุต E และ ΔE ซึ่งเป็นพีชซีซึ่งเกิดขึ้น โดยใช้ฐานกฎการควบคุมในตารางที่ 13.....	165
74 แสดงพีชซีเซตของตัวแปรเอาต์พุต U.....	165

คำย่อและสัญลักษณ์

SOFLIC	(self-organizing fuzzy logic intelligent controller) หมายถึง ตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตนเอง
GMP	(generalized modus ponens) หมายถึง สัจนิรันดร์ที่ใช้ในการหาข้อสรุปจากเหตุไปผล
GMT	(generalized modus tollens) หมายถึง สัจนิรันดร์ที่ใช้ในการหาข้อสรุปจากผลไปเหตุ
CRI	(compositional rule of inference) หมายถึง กฎการคอมโพสิชันของการอินเฟอเรนซ์
MOM	(mean of maxima) หมายถึง วิธีการดีฟัซซิฟิเคชัน โดยการใช้ค่าที่มีฟังก์ชันการเป็นสมาชิกสูงสุด
COA	(centre of area) หมายถึง วิธีการดีฟัซซิฟิเคชัน โดยการหาจุดศูนย์กลางของพื้นที่
COG	(center of gravity) หมายถึง วิธีการดีฟัซซิฟิเคชัน โดยการหาจุดศูนย์กลางถ่วงน้ำหนัก
FM	(fuzzy mean method) หมายถึง วิธีการดีฟัซซิฟิเคชัน โดยการใช้ค่าเฉลี่ยเป็นตัวแทนของฟัซซีเซตแต่ละเซตในการคำนวณ
WFM	(weighted fuzzy mean method) หมายถึง วิธีการดีฟัซซิฟิเคชันแบบ FM ที่มีการถ่วงน้ำหนัก
IDFZ	(indexed defuzzification method) หมายถึง วิธีการดีฟัซซิฟิเคชันที่มีการใช้ค่าดัชนีเป็นตัวกำหนดค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกต่ำสุดของสมาชิกที่จะนำมาใช้ในการคำนวณ
Os	(overshoot) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างค่าการแกว่งสูงสุดของเอาต์พุตกับค่าเอาต์พุตที่สภาวะคงตัว
Tr	(rise time) หมายถึง เวลาที่ผลตอบสนองของระบบใช้ในการเปลี่ยนแปลงจาก 10% ถึง 90% ของค่าเอาต์พุตที่สภาวะคงตัว
Ts	(settling time) หมายถึง เวลาที่ผลตอบสนองของระบบใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยพิจารณาจากขอบเขตที่ $\pm 5\%$ ของค่าเอาต์พุตที่สภาวะคงตัว
Ess	(steady-state error) หมายถึง ค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัวของระบบ
%Osc	(percent oscillation) หมายถึง เปอร์เซ็นต์การแกว่งของค่าเอาต์พุตรอบสัญญาณอ้างอิง
SPM	(short-term performance measure) หมายถึง ค่าสมรรถนะระยะสั้นของระบบควบคุม
TPM	(transient performance measure) หมายถึง ค่าสมรรถนะที่สภาวะทรานเซียนท์ของระบบควบคุม
PT	(pressure transmitter) หมายถึง ตัวตรวจวัดและแปลงความดันให้เป็นกระแสไฟฟ้า
FT	(flow transmitter) หมายถึง ตัวตรวจวัดและแปลงอัตราการไหลให้เป็นกระแสไฟฟ้า
LT	(level transmitter) หมายถึง ตัวตรวจวัดและแปลงระดับให้เป็นกระแสไฟฟ้า

คำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

TT	(temperature transmitter) หมายถึง ตัวตรวจวัดและแปลงอุณหภูมิให้เป็นกระแสไฟฟ้า
CV	(control valve) หมายถึง วาล์วที่สามารถควบคุมอัตราการเปิดของหน้าสัมผัสได้ด้วยกระแสไฟฟ้า
μ	หมายถึง ค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิก
\in	หมายถึง เป็นสมาชิกของ
\notin	หมายถึง ไม่เป็นสมาชิกของ
\subset	หมายถึง เป็นสับเซตของ
$\not\subset$	หมายถึง ไม่เป็นสับเซตของ
\supset	หมายถึง เป็นสับเซตแท้ของ
\rightarrow	หมายถึง ถ้า..... แล้ว.....
\leftrightarrow	หมายถึง ก็ต่อเมื่อ
\neg	หมายถึง ตัวปฏิบัติการ not
\wedge	หมายถึง ตัวปฏิบัติการ and
\vee	หมายถึง ตัวปฏิบัติการ or
$\times\vee$	หมายถึง ตัวปฏิบัติการ exclusive or
\cup	หมายถึง ตัวปฏิบัติการ union.
\cap	หมายถึง ตัวปฏิบัติการ intersection
max	หมายถึง ตัวปฏิบัติการในการหาค่าสูงสุด
min	หมายถึง ตัวปฏิบัติการในการหาค่าต่ำสุด
t	หมายถึง ตัวปฏิบัติการ triangular norms หรือ t-norms
s	หมายถึง ตัวปฏิบัติการ triangular co-norms หรือ s-norms
V	หมายถึง ค่าความจริงของประพจน์
o	หมายถึง ตัวปฏิบัติการ composition
\circ	หมายถึง ตัวปฏิบัติการผกผันของการ composition
REF	หมายถึง สัญญาณอ้างอิง
e	หมายถึง ค่าผิดพลาดของเอาต์พุต

คำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

Δe	หมายถึง	ค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด
$\Delta^2 e$	หมายถึง	ค่าการเปลี่ยนแปลงของการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด
Σe	หมายถึง	ค่าผลรวมของค่าผิดพลาด
u	หมายถึง	สัญญาณควบคุมซึ่งเป็นเอาต์พุตของตัวควบคุม
E	หมายถึง	ตัวแปรอินพุตแบบฟัซซี e ของตัวควบคุม
ΔE	หมายถึง	ตัวแปรอินพุตแบบฟัซซี Δe ของตัวควบคุม
U	หมายถึง	ตัวแปรเอาต์พุตแบบฟัซซี u ของตัวควบคุม
E^k	หมายถึง	ฟัซซีเซตของตัวแปร E ในส่วนเหตุของกฎการควบคุมที่ k
ΔE^k	หมายถึง	ฟัซซีเซตของตัวแปร ΔE ในส่วนเหตุของกฎการควบคุมที่ k
U^k	หมายถึง	ฟัซซีเซตของตัวแปร U ในส่วนผลของกฎการควบคุมที่ k
x	หมายถึง	ตัวแปรสถานะของระบบ ซึ่งใช้เป็นอินพุตของตัวควบคุมฟัซซี
x'	หมายถึง	อนุพันธ์อันดับหนึ่งของตัวแปรสถานะ x
x^k	หมายถึง	ฟัซซีเซตของตัวแปรสถานะ x ในส่วนเหตุของกฎการควบคุมที่ k
y	หมายถึง	ตัวแปรเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซี
Y^k	หมายถึง	ฟัซซีเซตของตัวแปรเอาต์พุต y ในส่วนผลของกฎการควบคุมที่ k
\bar{y}^k	หมายถึง	ค่าเฉลี่ยที่ใช้เป็นตัวแทนของฟัซซีเซต Y^k ในส่วนผลของกฎการควบคุมที่ k
y_d	หมายถึง	สัญญาณอ้างอิง
x_e	หมายถึง	สถานะสมดุลของระบบควบคุม
$V(x,t)$	หมายถึง	Lyapunov function
$\xi(x)$	หมายถึง	fuzzy basis function
θ	หมายถึง	จุดกึ่งกลางของฟัซซีเซตในส่วนผลของกฎการควบคุม ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการปรับแต่ง
θ'	หมายถึง	กฎที่ใช้ในการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซี
G_e	หมายถึง	ค่าเกนของตัวแปรอินพุต e
$G_{\Delta e}$	หมายถึง	ค่าเกนของตัวแปรอินพุต Δe
G_u	หมายถึง	ค่าเกนของตัวแปรเอาต์พุต u

คำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

- G_{ec} หมายถึง ค่าเกณฑ์ของตัวแปรอินพุต e ที่ใช้ในการควบคุมระดับหยาบ
- $G_{\Delta ec}$ หมายถึง ค่าเกณฑ์ของตัวแปรอินพุต Δe ที่ใช้ในการควบคุมระดับหยาบ
- G_{uc} หมายถึง ค่าเกณฑ์ของตัวแปรเอาต์พุต u ที่ใช้ในการควบคุมระดับหยาบ
- G_{ef} หมายถึง ค่าเกณฑ์ของตัวแปรอินพุต e ที่ใช้ในการควบคุมระดับละเอียด
- $G_{\Delta ef}$ หมายถึง ค่าเกณฑ์ของตัวแปรอินพุต Δe ที่ใช้ในการควบคุมระดับละเอียด
- G_{uf} หมายถึง ค่าเกณฑ์ของตัวแปรเอาต์พุต u ที่ใช้ในการควบคุมระดับละเอียด
- G_K หมายถึง ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมแบบ P ที่ต่อขนานกันตัวควบคุมพีซซี PD ในโครงสร้างของตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมระดับละเอียด

บทที่ 1

บทนำ

แนวคิดในการนำเสนอวิทยานิพนธ์

แนวความคิดในการนำเสนอวิทยานิพนธ์นี้ มีจุดเริ่มต้นจากความต้องการนำระบบควบคุมอัตโนมัติมาใช้แทนระบบควบคุมแบบเดิม ซึ่งอาศัยคำสั่งงานจากผู้ปฏิบัติการ ในการออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรมขนาดใหญ่และมีความซับซ้อน เช่น กระบวนการผลิตซีเมนต์ กระบวนการทำปฏิกิริยาทางเคมี และกระบวนการหลอมโลหะ มักจะพบปัญหาว่ากระบวนการเหล่านี้จะไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) และมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (time-varying) และถูกใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลง มีการรบกวนจากภายนอก (disturbance) และจากสัญญาณรบกวน (noises) ทำให้การออกแบบตัวควบคุมอัตโนมัติแบบดั้งเดิม ซึ่งออกแบบโดยใช้วิธีการประมาณโมเดลทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการทำได้ยาก และถ้าการประมาณค่าโมเดลทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการผิดพลาด จะทำให้ได้สมรรถนะของระบบควบคุมไม่ดี ตามปกติความรู้และประสบการณ์ในการควบคุมกระบวนการเหล่านี้ มักจะอยู่ในรูปภาษามนุษย์ ซึ่งง่ายต่อการทำความเข้าใจและปฏิบัติตาม แต่ยากสำหรับการนำไปออกแบบและสร้างเป็นตัวควบคุมอัตโนมัติโดยใช้วิธีการแบบดั้งเดิม ทั้งนี้เนื่องจากวิธีการในการควบคุมของผู้ปฏิบัติการจะเป็นกฎซึ่งอยู่ในรูปเงื่อนไข ถ้า แล้ว โดยตัวแปรที่ใช้ในกฎการควบคุม จะถูกนิยามในเชิงคุณภาพ และค่าของตัวแปรนี้มีความคลุมเครือ (vagueness) ในปี ค.ศ. 1965 Professor Lotfy Zadeh จึงนำเสนอฟัซซีเซต (fuzzy set) [1] และฟัซซีลอจิก (fuzzy logic) เพื่อใช้หาข้อสรุปตามหลักการเหตุผล (approximate reasoning) เมื่อตัวแปรของระบบถูกนิยามในเชิงคุณภาพและมีความคลุมเครือ [2] ในปี ค.ศ. 1974 Professor E.H. Mamdani ได้นำหลักการนี้มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี (fuzzy controller) [3,4] โดยแปลงความรู้ที่ได้จากประสบการณ์การควบคุมของผู้ปฏิบัติการที่อยู่ในรูปเงื่อนไข ถ้า แล้ว ให้เป็นกฎการควบคุมที่มีตัวแปรเป็นฟัซซีเซต (fuzzy rule) ตัวควบคุมฟัซซีนี้จะเป็นตัวกลางในการเชื่อมโยงระหว่างสัญญาณที่ใช้งานจริง เช่น สัญญาณในการตรวจวัดจากอุปกรณ์เซ็นเซอร์และสัญญาณในการควบคุมอุปกรณ์ซึ่งถูกวัดเป็นตัวแปรเชิงปริมาณกับกฎการควบคุมซึ่งถูกนิยามด้วยตัวแปรฟัซซี ดังนั้น การทำงานของตัวควบคุมฟัซซีจะประกอบด้วยโครงสร้างหลัก 3 ส่วน คือ

1. การแปลงสัญญาณจากอุปกรณ์เซ็นเซอร์ ซึ่งเป็นตัวแปรเชิงปริมาณให้เป็นตัวแปรฟัซซี

เรียกว่า การฟัซซีฟิเคชัน (fuzzification)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การประมวลผลเพื่อหาสัญญาณควบคุมจากกฎการควบคุม โดยใช้วิธีการหาข้อสรุปจากหลักการเหตุผล ตามอัลกอริทึมแบบฟัซซี เรียกว่า การฟัซซีอินเฟอเรนซ์ (fuzzy inference)

3. การหาขนาดของสัญญาณควบคุม โดยการแปลงตัวแปรฟัซซีให้เป็นตัวแปรเชิงปริมาณ เรียกว่า การดีฟัซซิฟิเคชัน (defuzzification)

ตัวควบคุมฟัซซีได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในเรื่องการควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรม เนื่องจากมีข้อดีที่เป็นจุดเด่นหลายประการ ดังนี้

- สามารถออกแบบตัวควบคุมได้ โดยไม่ต้องรู้โมเดลทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ เนื่องจากการออกแบบตัวควบคุม ใช้วิธีแปลงความรู้หรือประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ ให้เป็นกฎการควบคุมในรูปแบบเงื่อนไข
- สามารถควบคุมกระบวนการที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นนี้ จะถูกควบคุมได้ โดยการกำหนดความสัมพันธ์ของกฎการควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้น
- สามารถออกแบบตัวควบคุม สำหรับควบคุมกระบวนการที่มีหลายอินพุตหลายเอาต์พุตได้สะดวก เนื่องจากความซับซ้อนของความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละอินพุตและเอาต์พุต จะถูกแทนด้วยความสัมพันธ์ของกฎการควบคุม ซึ่งอยู่ในรูปแบบที่สามารถทำความเข้าใจและทำการปรับเปลี่ยนได้ง่าย

ปัญหาสำคัญที่พบในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี โดยใช้วิธีการออกแบบกฎการควบคุม จากความรู้หรือประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ คือในกรณีที่ไม่มีฐานความรู้หรือประสบการณ์ในการควบคุม หรือเมื่อเกิดความไม่สมบูรณ์ในการถ่ายทอดประสบการณ์จากผู้เชี่ยวชาญ การออกแบบกฎการควบคุมจะทำได้ยาก ดังนั้น ในปี ค.ศ. 1977 Professor Mamdani จึงนำเสนอแนวความคิดในการสร้างตัวควบคุมแบบปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตนเอง (self-organizing controller) [5] เพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการที่ไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ และไม่มีความรู้หรือประสบการณ์ในการควบคุม โดยเน้นที่ความสามารถในการปรับแต่งกฎการควบคุมด้วยตนเองแบบอัตโนมัติ ด้วยการเรียนรู้จากสมรรถนะของระบบควบคุม ในรูปของค่าผิดพลาด และการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาดที่แต่ละช่วงเวลาในการสุ่มสัญญาณ แล้วทำการปรับแต่งกฎการควบคุม โดยใช้กฎการปรับแต่งที่ได้กำหนดไว้ล่วงหน้าในรูปของตารางการปรับแต่งกฎการควบคุม และได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงค่าเกน (scaling factor) ของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตที่มีต่อสมรรถนะของระบบควบคุม และประสิทธิภาพการเรียนรู้ของตัวควบคุมนี้ จากการทดลอง [5] พบว่า ตัวควบคุมสามารถเรียนรู้ และปรับแต่งกฎการควบคุมได้ด้วยตนเอง โดยไม่ต้องมีกฎการควบคุมเริ่มต้น และในการกำหนดค่าเกนของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตสามารถกำหนดเป็นช่วงกว้างๆ ไม่ต้องใช้ค่าที่แม่นยำ โดยตัวควบคุมยังสามารถควบคุมระบบให้มีสมรรถนะที่ดีได้ แต่ถ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือกใช้ค่าเกนของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตที่เหมาะสมจะทำให้การปรับแต่งกฎการควบคุมลู่เข้าเร็วกว่าและให้สมรรถนะของระบบควบคุมที่ดีกว่า จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น โนวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตนเอง (self-organizing fuzzy logic intelligent controller : SOFLIC) ซึ่งในการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซี สามารถทำได้ 3 วิธี คือ การปรับแต่งกฎการควบคุม การปรับค่าเกนของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต และการปรับแต่งค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุม จากผลงานวิจัยเรื่อง “ผลการเปลี่ยนแปลงค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวควบคุมแบบฟัซซี” [6] แสดงให้เห็นว่าการกำหนดค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตให้เหมาะสม ขึ้นอยู่กับความซับซ้อนและความคลุมเครือของความสัมพันธ์ระหว่างค่าอินพุตกับเอาต์พุตของกระบวนการตามปกติการออกแบบตัวควบคุมสำหรับควบคุมกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน มักจะนิยามค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรแบบเชิงเส้น (รูปสามเหลี่ยม) ซึ่งทำให้การคำนวณง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปร จะมีผลน้อยกว่าการปรับแต่งกฎการควบคุม

โนวิทยานิพนธ์นี้ จึงใช้วิธีการปรับแต่งกฎการควบคุมจากค่าสมรรถนะระยะสั้นของระบบ (short-term system performance) ในรูปของค่าผิดพลาด (error : e) และการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด (change of error : Δe) ในแต่ละคาบเวลาของการสุ่มสัญญาณ และใช้วิธีปรับแต่งค่าเกนของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตจากค่าสมรรถนะระยะยาวของระบบ (long-term system performance) ในรูปของค่าโอเวอร์ชูต (overshoot : O_s) เวลาไรซ์ไทม์ (rise time : T_r) เวลาเซตตลิ่งไทม์ (settling time : T_s) ค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัว (steady-state error : E_{ss}) และเปอร์เซ็นต์การแกว่งของเอาต์พุตรอบสัญญาณอ้างอิง (percent oscillation : $\%Osc$) [11]

ในการควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรม มักประสบปัญหาจากการที่ค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลง หรือมีการรบกวนจากภายนอก โนวิทยานิพนธ์นี้ จึงได้นำเสนอตัวควบคุมที่สามารถปรับตัวในขณะที่ทำการควบคุม (on-line adaptation) เพื่อลดผลกระทบอันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการ หรือการรบกวนจากภายนอก ซึ่งจะทำให้ระบบควบคุมมีความคงทน (robustness) ต่อการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว

นอกจากปัญหาดังกล่าวข้างต้นแล้ว ปัญหาสำคัญอย่างหนึ่งที่พบในการใช้งานตัวควบคุมฟัซซี คือการแกว่ง (oscillation) ของเอาต์พุตด้วยค่าที่จำกัดรอบสัญญาณอ้างอิง ซึ่งจะเกิดขึ้นเนื่องจากการประมาณค่าในขั้นตอนของการควอนไทซ์ (quantize) ระดับของการแกว่งนี้ถูกควบคุมได้โดยการปรับระดับการควอนไทซ์ แต่การเพิ่มความละเอียด (resolution) ของการควอนไทซ์ทำให้ต้องใช้หน่วยความจำและเวลาในการคำนวณมากขึ้น จากการทดลองใช้วิธีการควอนไทซ์แบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในวงจำกัดเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลอกการิทึม เพื่อลดการแกว่งของเอาต์พุตรอบสัญญาณอ้างอิง โดยไม่เพิ่มระดับการควอนไทซ์ [7] พบว่าสมรรถนะของระบบควบคุมดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วิธีการควอนไทซ์แบบเชิงเส้น โดยใช้ระดับการควอนไทซ์เท่ากัน คือมีการแกว่งของเอาต์พุตรอบสัญญาณอ้างอิงน้อย แต่เมื่อทำการทดลองโดยลดค่าความถี่ในการสุ่มสัญญาณลง ปรากฏว่าผลตอบสนองของระบบจะมีการแกว่งรอบสัญญาณอ้างอิงมากขึ้น มีผู้นำเสนอวิธีแก้ปัญหานี้ โดยใช้โครงสร้างของตัวควบคุมแบบ hybrid หรือ nest (hybrid or nested controller) [8,11] ซึ่งตัวควบคุมชนิดนี้จะทำการเปลี่ยนไปใช้ตัวควบคุมที่ละเอียดมากขึ้น เมื่อค่าเอาต์พุตของระบบลู่เข้าสู่ขอบเขตของค่าอ้างอิงที่กำหนดไว้ล่วงหน้า

การออกแบบตัวควบคุมพีซีซี เพื่อใช้สำหรับควบคุมกระบวนการในเวลาจริง มีสิ่งสำคัญที่จะต้องคำนึงถึงอีกประการหนึ่ง คือในการสร้างตัวควบคุมด้วยซอฟต์แวร์บนไมโครคอนโทรลเลอร์ หรือเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ มักจะประสบปัญหาเรื่องขีดจำกัดของหน่วยความจำของฮาร์ดแวร์ที่ใช้และเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่งเวลาที่ใช้ในการคำนวณนี้ จะต้องน้อยกว่าคาบเวลาในการสุ่มสัญญาณ ได้มีการลดเวลาที่ใช้ในการคำนวณ [8] โดยคำนวณค่าสัญญาณควบคุมสำหรับแต่ละค่าในการควอนไทซ์ของอินพุต แล้วนำค่าที่ได้มาสร้างเป็นตารางการควบคุมไว้ล่วงหน้า เพื่อนำมาใช้ในการควบคุม โดยไม่จำเป็นต้องทำการคำนวณในระหว่างทำการควบคุม แต่วิธีการนี้ไม่สามารถใช้กับตัวควบคุมพีซีซีแบบปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตนเองได้ เนื่องจากตัวควบคุมจะเรียนรู้และปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมตลอดเวลาในขณะที่ทำการควบคุม ทำให้ค่าของสัญญาณควบคุมสำหรับแต่ละค่าการควอนไทซ์ของอินพุต เปลี่ยนแปลงตามค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ดังนั้น การสร้างตัวควบคุมพีซีซีแบบปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตนเอง สำหรับควบคุมกระบวนการในเวลาจริง จึงถูกจำกัดให้ใช้ความถี่ในการสุ่มสัญญาณไม่มากนัก และในการออกแบบตัวควบคุมควรเลือกโครงสร้างของตัวควบคุมที่ไม่ซับซ้อน เพื่อลดหน่วยความจำและเวลาที่ใช้ในการคำนวณ

ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ใช้โครงสร้างของตัวควบคุมแบบ hybrid-nested ตามนิยามจาก [11] โดยแบ่งตัวควบคุมออกเป็น 2 ระดับ คือ ระดับหยาบและระดับละเอียด การออกแบบตัวควบคุมสำหรับการควบคุมระดับหยาบมีจุดประสงค์ของการควบคุมคือต้องการให้เอาต์พุตของระบบลู่เข้าสู่ค่าอ้างอิงเร็วที่สุด และไม่ส่งผลให้เกิดค่าโอเวอร์ชูตสูงเกินไป จึงเลือกโครงสร้างของตัวควบคุมพีซีซีแบบ PD [11] ซึ่งสามารถควบคุมเอาต์พุตของระบบให้ลู่เข้าสู่ค่าอ้างอิงได้เร็ว ไม่ส่งผลให้เกิดโอเวอร์ชูตที่สูงเกินไป และมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนคือมีสองอินพุตและหนึ่งเอาต์พุต ทำให้สามารถคำนวณได้เร็วและใช้หน่วยความจำน้อย ส่วนในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับการควบคุมระดับละเอียดมีจุดประสงค์ของการควบคุม คือต้องการให้เอาต์พุตของระบบลู่เข้าสู่ค่าอ้างอิง และไม่เกิดค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัว จึงต้องใช้โครงสร้างของตัวควบคุมพีซีซีแบบ PID เพื่อแก้ปัญหาค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัวของระบบ แต่เนื่องจากโครงสร้างของตัวควบคุมพีซีซีแบบ PID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นแจ้งขอประจักษ์ตามการกระทำ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นตัวควบคุมที่มีสามอินพุต ทำให้ฐานกฎการควบคุมเป็น 3 มิติ (dimension) จึงมีจำนวนกฎการควบคุมมาก ทำให้ต้องใช้หน่วยความจำและเวลาในการคำนวณมาก จึงไม่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในทางปฏิบัติ ในปี ค.ศ. 1990 Kwok et al จึงนำเสนอวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยการแยกตัวควบคุมพีชซีแบบ PID เป็นตัวควบคุมพีชซีแบบ PD ต่อชานกับตัวควบคุมแบบ P, I หรือ PI [9-11] ในวิทยานิพนธ์นี้ เลือกใช้โครงสร้างซึ่งประกอบด้วยตัวควบคุมพีชซีแบบ PD ต่อชานกับตัวควบคุมแบบ P ที่มีค่าเกนเท่ากับส่วนกลับของค่าเกนที่สภาวะคงตัวของกระบวนการแทนการใช้ตัวควบคุมพีชซีแบบ PID

นอกจากคุณสมบัติที่สำคัญของตัวควบคุมดังกล่าวข้างต้นแล้ว ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมการควบคุมให้สามารถใช้งานเป็นตัวควบคุมแบบหลายช่องควบคุม (multi-channel controller) โดยใช้เทคนิคการแบ่งเวลาในการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์ (time sharing) ทำให้สามารถใช้เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์เครื่องเดียวควบคุมกระบวนการได้หลายกระบวนการในเวลาเดียวกัน ซึ่งจะทำให้การใช้งานเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์เป็นไปอย่างคุ้มค่า นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้งานตัวควบคุมนี้ในการควบคุมกระบวนการที่มีหลายอินพุตหลายเอาต์พุตได้ โดยการแบ่งรูปการควบคุมออกเป็นระบบย่อยที่มีหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุตหลาย ๆ ระบบ

จากวิธีการทั้งหมดที่ได้กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปโครงสร้างของตัวควบคุมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ได้ดังนี้ ตัวควบคุมที่นำเสนอนี้ เป็นตัวควบคุมพีชซีแบบปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตนเอง ซึ่งสามารถปรับตัวขณะทำการควบคุม มีโครงสร้างแบบ hybrid-nested ประกอบด้วยโครงสร้าง 2 ระดับ คือระดับหยาบและระดับละเอียด โดยที่โครงสร้างของตัวควบคุมระดับหยาบเป็นตัวควบคุมพีชซีแบบ PD และโครงสร้างของตัวควบคุมระดับละเอียดประกอบด้วยตัวควบคุมพีชซีแบบ PD ต่อชานกับตัวควบคุมแบบ P ที่มีค่าเกนเท่ากับส่วนกลับของค่าเกนที่สภาวะคงตัวของกระบวนการ นอกจากนี้ยังสามารถใช้งานตัวควบคุมนี้เป็นตัวควบคุมแบบหลายช่องควบคุมได้จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้ตัวควบคุมที่นำเสนอมีข้อดีดังนี้

- สามารถออกแบบโดยใช้ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการน้อย
- สามารถควบคุมกระบวนการที่ไม่ทราบค่าพารามิเตอร์
- สามารถปรับตัวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการหรือสภาวะแวดล้อม
- สามารถลดผลกระทบที่เกิดจากการรบกวนจากภายนอก และจากสัญญาณนอยส์
- เหมาะสมสำหรับนำไปใช้งานในการควบคุมกระบวนการในเวลาจริง
- สามารถใช้งานในการควบคุมกระบวนการอินพุตเดี่ยวเอาต์พุตเดี่ยว ได้หลายกระบวนการในเวลาเดียวกัน

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาการออกแบบและสร้างตัวควบคุมพีซี ซึ่งสามารถปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยตนเอง โดยไม่ต้องรู้โมเดลทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ และไม่ต้องใช้ฐานความรู้หรือประสบการณ์จากผู้เชี่ยวชาญ และมีความสามารถปรับตัวในขณะที่ทำการควบคุม เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการหรือสถานะแวดล้อม หรือเมื่อมีสัญญาณนอยส์หรือการรบกวนจากภายนอก

2. เพื่อพัฒนาโครงสร้างของตัวควบคุมพีซีที่ออกแบบให้เหมาะสม สำหรับนำไปสร้างด้วยซอฟต์แวร์บนเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้ควบคุมกระบวนการในเวลาจริง

3. เพื่อพัฒนาความสามารถของตัวควบคุม ให้สามารถควบคุมกระบวนการได้หลายๆ กระบวนการในเวลาเดียวกัน โดยใช้เทคนิคการแบ่งเวลาในการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์

4. เพื่อพัฒนาตัวควบคุม ให้สามารถควบคุมกระบวนการที่มีหลายอินพุตหลายเอาต์พุต โดยใช้วิธีแบ่งรูปการควบคุมออกเป็นระบบย่อยที่มีหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุตหลายๆ ระบบ

ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบและสร้างตัวควบคุมพีซีแบบปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตนเองที่สามารถปรับตัวขณะทำการควบคุม โดยมุ่งเน้นที่การพัฒนาโครงสร้างของตัวควบคุมให้เหมาะสมสำหรับนำไปสร้างด้วยซอฟต์แวร์บนเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้สำหรับควบคุมกระบวนการในเวลาจริง โดยสามารถควบคุมกระบวนการได้หลายกระบวนการในเวลาเดียวกัน และนำตัวควบคุมนี้มาประยุกต์ใช้งานในการควบคุมกระบวนการที่มีหลายอินพุตหลายเอาต์พุต โดยการแบ่งรูปการควบคุมออกเป็นระบบย่อยที่มีหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุตหลายๆ ระบบ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วยเนื้อหาทั้งหมด 6 บท ดังนี้

ในบทที่ 1 กล่าวถึงแนวคิดในการนำเสนอวิทยานิพนธ์นี้ ปัญหาต่างๆ ที่พบ และวิธีการที่นำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหา การกำหนดคุณสมบัติ และแนวทางการออกแบบตัวควบคุม ข้อดีของตัวควบคุมที่นำเสนอ วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ และขอบเขตของวิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในบทที่ 2 กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เป็นพื้นฐาน ซึ่งนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

- ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์พีชชี เช่น พีชชีเซต พีชชีลอจิก การหาข้อสรุปจากหลักการเหตุผลโดยใช้ทฤษฎีพีชชีลอจิก ความสัมพันธ์พีชชี การพีชชีพีเคชัน การอินเฟอเรนซ์ และการตีพีชชีพีเคชัน
- หลักการและโครงสร้างของตัวควบคุมพีชชี
- หลักการและโครงสร้างของตัวควบคุมพีชชีแบบปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตนเอง
- การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงสถิตย์ของระบบควบคุมพีชชี
- การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมพีชชี

ในบทที่ 3 จะกล่าวถึงขั้นตอนและวิธีการออกแบบตัวควบคุมที่น่าเสนอ ซึ่งเป็นตัวควบคุมพีชชีแบบปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตนเอง ประกอบด้วยโครงสร้าง 2 ระดับ คือโครงสร้างระดับพื้นฐานและโครงสร้างระดับการปรับแต่งพารามิเตอร์ ในการออกแบบโครงสร้างระดับพื้นฐานจะอธิบายถึงหลักการของตัวควบคุมแบบ hybrid-nested และนำหลักการนี้มาประยุกต์ใช้โดยแบ่งระดับการควบคุมออกเป็นระดับหยาบและระดับละเอียด การออกแบบตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมระดับหยาบจะอธิบายถึงวิธีออกแบบโครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมพีชชีแบบ PD เช่น การกำหนดจำนวนตัวแปรอินพุตและตัวแปรเอาต์พุตของตัวควบคุม การนอมอลไลซ์ตัวแปรอินพุตและการดีนอมอลไลซ์ตัวแปรเอาต์พุต การกำหนดค่าเกนของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต การเลือกวิธีและระดับการควอนไทซ์ การกำหนดจำนวนพีชชีเซตและฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตและตัวแปรเอาต์พุต การกำหนดรูปแบบของกฎการควบคุม การเลือกวิธีพีชชีพีเคชัน การเลือกวิธีอินเฟอเรนซ์ และการเลือกวิธีตีพีชชีพีเคชัน เป็นต้น การออกแบบตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมระดับละเอียด จะกล่าวถึงการนำเอาตัวควบคุมพีชชีแบบ PD ต่อขนานกับตัวควบคุมแบบ P ที่มีค่าเกนเท่ากับส่วนกลับของค่าเกนที่สภาวะคงตัวของกระบวนการมาใช้แทนตัวควบคุมพีชชีแบบ PID เพื่อลดหน่วยความจำและเวลาที่ใช้ในการคำนวณ และในการออกแบบโครงสร้างระดับการปรับแต่งพารามิเตอร์ จะอธิบายถึงการปรับแต่งกฎการควบคุมโดยใช้สมรรถนะระยะสั้น และการปรับแต่งค่าเกนของตัวควบคุมโดยใช้สมรรถนะระยะยาวของระบบควบคุม ในส่วนสุดท้ายของบทนี้ จะกล่าวถึงการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงสถิตย์ของตัวควบคุม และการพิสูจน์เสถียรภาพของระบบควบคุมที่น่าเสนอ

ในบทที่ 4 เป็นการแสดงแผนภาพการทำงานทั้งหมดของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการ โดยแบ่งเป็นแต่ละส่วน ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การทำงานของโปรแกรมหลัก
- การกำหนดค่า Configuration ของตัวควบคุม และการแก้ไขค่า Configuration ของช่องควบคุม
- การควบคุมกระบวนการในเวลาจริง
- การรับค่าจาก A/D และส่งค่าไป D/A
- การจำลองการทำงานของระบบควบคุมทั้งหมดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- การแสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมด้วยกราฟบนจอมอนิเตอร์
- การทำงานของตัวควบคุม SOFLIC
- การทำงานของตัวควบคุม PID
- การจำลองการทำงานของกระบวนการ

ในบทที่ 5 จะกล่าวถึงการทดลองและผลการทดลอง เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมที่นำเสนอ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน คือ

การทดลองที่ 1 การจำลองระบบควบคุมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (simulation) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการทำงานของตัวควบคุม ก่อนนำตัวควบคุมไปควบคุมกระบวนการจริง โดยทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมในการควบคุมกระบวนการอันดับหนึ่งและอันดับสองที่มีค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการต่าง ๆ กัน และทดสอบประสิทธิภาพในการปรับตัวของตัวควบคุมเมื่อมีการจำลองสัญญาณนอยส์และการรบกวนจากภายนอก

การทดลองที่ 2 การใช้ตัวควบคุมที่สร้างขึ้น ทำการควบคุมกระบวนการในห้องปฏิบัติการ 3 กระบวนการ คือกระบวนการควบคุมความดันของอากาศภายในถังกระบวนการ กระบวนการควบคุมระดับน้ำภายในถังกระบวนการกรณีถึงเตี้ยและกรณีสองถัง โดยทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมในการควบคุมกระบวนการเมื่อกำหนดค่าสัญญาณอ้างอิงต่าง ๆ กัน และทดสอบประสิทธิภาพในการปรับตัวเมื่อมีการรบกวนจากภายนอก และเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมพีซีซีที่ออกแบบกับการควบคุมกระบวนการด้วยตัวควบคุม PID

การทดลองที่ 3 การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมที่สร้างขึ้น ทำการควบคุมกระบวนการที่มีหลายอินพุตหลายเอาต์พุต โดยการแบ่งรูปการควบคุมออกเป็นระบบย่อยที่มีหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุตหลาย ๆ ระบบ การทดลองนี้ จะใช้กระบวนการถึงผสมถ่ายเทความร้อน โดยแบ่งการควบคุมเป็น 3 รูป คือการควบคุมระดับน้ำโดยควบคุมการเปิดวาล์วทางเข้าของน้ำที่อุณหภูมิห้อง การควบคุมอุณหภูมิโดยควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเครื่องทำความร้อน และการควบคุมอุณหภูมิโดยควบคุมการเปิดวาล์วทางเข้าของน้ำเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และในส่วนสุดท้ายของบทจะเป็นการสรุปผลการทดลองในแต่ละการทดลอง

ในบทที่ 6 จะเป็นการสรุปผลการวิจัย ปัญหาที่พบในการวิจัย และข้อเสนอแนะในการพัฒนาการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตนเอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับฟัซซี

ในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี จะต้องอาศัยความรู้ทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับฟัซซี เพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการทำความเข้าใจโครงสร้างและหลักการทํางานของตัวควบคุมฟัซซี และเพื่อใช้ในการกำหนดโครงสร้างและวิธีการออกแบบให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน ดังนั้น เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับฟัซซี [11-15] ตัวควบคุมฟัซซี [11-14] ตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตนเอง [11-13] การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงสถิตยของตัวควบคุมฟัซซี [11-13] และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมฟัซซี [13,16,17] ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ฟัซซีเซต (Fuzzy Set)

ทฤษฎีเซตแบบเดิม (Crisp Set Theory)

นิยาม 1 คลิซป์เซต (Crisp Set)

คลิซป์เซต คือ กลุ่มของสมาชิกที่มีคุณสมบัติตามข้อกำหนด ซึ่งอาจจะมีจำนวนจำกัดหรือไม่จำกัดก็ได้

นิยาม 2 เอกภพสัมพัทธ์ (Universe of Discourse : U)

เอกภพสัมพัทธ์ คือ เซตที่มีสมาชิกเป็นสมาชิกทั้งหมดของขอบเขตที่ทำการพิจารณา

กำหนดให้ u เป็นสมาชิกใดๆ ของ U เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $u \in U$

นิยาม 3 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิก (Membership Function : μ)

ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของเซต เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ μ ถูกนิยามดังนี้

$\mu_A(u)$ มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ u เป็นสมาชิกของเซต A

$\mu_A(u)$ มีค่าเท่ากับ 0 เมื่อ u ไม่เป็นสมาชิกของเซต A

จะได้ว่า
$$\mu_A(u) : U \in \{0,1\}$$

$$\mu_A(u) = \begin{cases} 1 & ; u \in A \\ 0 & ; u \notin A \end{cases} \quad (2.1)$$

นิยาม 4 การเท่ากันของเซต

เซต A จะเท่ากับเซต B ก็ต่อเมื่อ สมาชิกทุกตัวของเซต A เป็นสมาชิกของเซต B และสมาชิกทุกตัวของเซต B เป็นสมาชิกของเซต A เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $A = B$

$$(A = B) \leftrightarrow ((\forall a \in B) \wedge (\forall b \in A); a \in A, b \in B) \quad (2.2)$$

นิยาม 5 การเป็นสับเซต (Subset)

เซต A จะเป็นสับเซตของเซต B ก็ต่อเมื่อ สมาชิกทุกตัวของเซต A เป็นสมาชิกของเซต B เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $A \subseteq B$

$$(A \subseteq B) \leftrightarrow (\forall a \in B; a \in A) \quad (2.3)$$

เซต A จะเป็นสับเซตแท้ของเซต B ก็ต่อเมื่อ สมาชิกทุกตัวของเซต A เป็นสมาชิกของเซต B และ เซต A ไม่เท่ากับเซต B เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $A \subset B$

$$(A \subset B) \leftrightarrow ((\forall a \in B) \wedge (A \neq B); a \in A) \quad (2.4)$$

นิยาม 6 ปฏิบัติการพื้นฐานของเซต

คอมพลีเมนต์ คือ ตัวปฏิบัติการในการสร้างเซตใหม่จากเซตเดิม โดยที่สมาชิกของเซตใหม่คือสมาชิกของเอกภพสัมพัทธ์ U ที่ไม่เป็นสมาชิกของเซตเดิม เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$A' = \{x \mid (x \in U) \wedge (x \notin A)\} \quad (2.5)$$

ยูเนียน คือ ตัวปฏิบัติการในการสร้างเซตใหม่จากเซตเดิม 2 เซต โดยที่สมาชิกของเซตใหม่ได้จากการรวมสมาชิกทั้งหมดที่เป็นสมาชิกของเซตใดเซตหนึ่ง หรือทั้ง 2 เซต เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$A \cup B = \{x \mid (x \in A) \vee (x \in B)\} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินเตอร์เซกชัน คือ ตัวปฏิบัติการในการสร้างเซตใหม่จากเซตเดิม 2 เซต โดยที่สมาชิกของเซตใหม่ได้มาจากการรวมสมาชิกทั้งหมดที่เป็นสมาชิกของเซตเดิมทั้ง 2 เซต เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$A \cap B = \{ x \mid (x \in A) \wedge (x \in B) \} \quad (2.7)$$

ทฤษฎีฟัซซีเซต (Fuzzy Set Theory)

นิยาม 7 ฟัซซีเซต (Fuzzy Set)

ฟัซซีเซต คือ เซตของคู่อันดับ u และฟังก์ชันการเป็นสมาชิก $\mu_A(u)$ โดยที่ u เป็นสมาชิกใด ๆ ของ เอกภพสัมพัทธ์ U เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$A = \{ (u, \mu_A(u)) \mid u \in U \} \quad (2.8)$$

นิยาม 8 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต (Membership Function of Fuzzy Set : $\mu_A(u)$)

ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A ถูกนิยามให้มีค่าอยู่ภายในช่วง 0 ถึง 1 เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $\mu_A(u)$

โดยที่ ค่า $\mu_A(u)$ เป็นค่าที่ระบุถึงระดับความเป็นสมาชิกของ u ในฟัซซีเซต A

ถ้า $\mu_A(u)$ มีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่า u ไม่มีความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A

ถ้า $\mu_A(u)$ มีค่าน้อย แสดงว่า u มีความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A น้อย

ถ้า $\mu_A(u)$ มีค่ามาก แสดงว่า u มีความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A มาก

ถ้า $\mu_A(u)$ มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่า u มีความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A อย่างสมบูรณ์

$$\text{จะได้ว่า} \quad \mu_A(u) : U \rightarrow [0,1] \quad (2.9)$$

นิยาม 9 การเท่ากับของฟัซซีเซต

ฟัซซีเซต A จะเท่ากับฟัซซีเซต B ก็ต่อเมื่อ สมาชิก u ทุกตัวในเอกภพสัมพัทธ์ U มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A เท่ากับค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต B เขียน

แทนด้วยสัญลักษณ์ $A = B$
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(A = B) \leftrightarrow (\mu_A(u) = \mu_B(u) ; \forall u \in U) \quad (2.10)$$

นิยาม 10 การเป็นสับเซตของฟัซซีเซต

ฟัซซีเซต A จะเป็นสับเซตของฟัซซีเซต B ก็ต่อเมื่อ สมาชิก u ทุกตัวในเอกภพสัมพัทธ์ U มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A น้อยกว่าหรือเท่ากับ ค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต B เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $A \subset B$

$$(A \subset B) \leftrightarrow (\mu_A(u) \leq \mu_B(u) ; \forall u \in U) \quad (2.11)$$

นิยาม 11 ซัพพอร์ตของฟัซซีเซต (Support : S(A))

ซัพพอร์ตของฟัซซีเซต คือ เซตของสมาชิก u ในเอกภพสัมพัทธ์ U ที่มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซตมากกว่า 0 เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$S(A) = \{u \in U \mid \mu_A(u) > 0\} \quad (2.12)$$

นิยาม 12 ฟัซซีซิงเกิลตัน (Fuzzy Singleton)

ฟัซซีซิงเกิลตัน คือ ฟัซซีเซตที่มีซัพพอร์ตของเซตมีสมาชิกเพียงตัวเดียว และมีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกเท่ากับ 1

นิยาม 13 เซต α -Level ของฟัซซีเซต (A_α)

เซต α -Level ของฟัซซีเซต A คือ เซตของสมาชิก u ในเอกภพสัมพัทธ์ U ที่มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A มากกว่าหรือเท่ากับ α เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$A_\alpha = \{u \in U \mid \mu_A(u) \geq \alpha\} \quad (2.13)$$

นิยาม 14 ความสูงของฟัซซีเซต (Height of Fuzzy Set)

ความสูงของฟัซซีเซต A คือ ค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกสูงสุดของฟัซซีเซต A เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $\text{hgt}(A)$

$$\text{hgt}(A) = \max_{u \in U} \mu_A(u) \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยาม 15 คุณสมบัติการนอมอลไลซ์ของฟัซซีเซต (Normalization)

ฟัซซีเซต A จะมีคุณสมบัติการนอมอลไลซ์ก็ต่อเมื่อ ฟังค์ชันการเป็นสมาชิกของ A มีความสูงเท่ากับ 1

$$A \text{ is normalized.} \leftrightarrow \text{hgt}(A) = 1 \quad (2.15)$$

นิยาม 16 คุณสมบัติการคอนเวกซ์ของฟัซซีเซต (Convexity)

ฟัซซีเซต A จะมีคุณสมบัติการคอนเวกซ์ ก็ต่อเมื่อ ฟังค์ชันการเป็นสมาชิกของ A สอดคล้องตามเงื่อนไขต่อไปนี้

$$A \text{ is convex.} \leftrightarrow \mu_A(\lambda u_1 + (1-\lambda)u_2) \geq \min \{ \mu_A(u_1), \mu_A(u_2) \}; u_1, u_2 \in U, \lambda \in [0,1] \quad (2.16)$$

นิยาม 17 ฟัซซีนัมเบอร์ (Fuzzy Number)

ฟัซซีนัมเบอร์ คือ ฟัซซีเซตที่มีคุณสมบัติการนอมอลไลซ์และการคอนเวกซ์

นิยาม 18 คาร์ดินาลิตีของฟัซซีเซต (Cardinality)

สเกลาร์คาร์ดินาลิตี (Scalar Cardinality) ของฟัซซีเซต A บนเอกภพสัมพัทธ์ U คือ ผลบวกของค่าฟังค์ชันการเป็นสมาชิกของ u ทุกตัวในฟัซซีเซต A เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$|A| = \sum_{u \in U} \mu_A(u) \quad (2.17)$$

คาร์ดินาลิตีสัมพัทธ์ (Relative Cardinality) ของฟัซซีเซต A บนเอกภพสัมพัทธ์ U คือ อัตราส่วนระหว่างค่าสเกลาร์คาร์ดินาลิตีของฟัซซีเซต A กับ ค่าสเกลาร์คาร์ดินาลิตีของเอกภพสัมพัทธ์ U เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$\|A\| = \frac{|A|}{|U|} \quad (2.18)$$

นิยาม 19 ปฏิบัติการพื้นฐานของฟัซซีเซต

คอมพลีเมนต์ของฟัซซีเซต A เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ A' ถูกนิยามในรูปฟังค์ชันการเป็นสมาชิกดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ $\mu_{A'}(u) = 1 - \mu_A(u)$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.19) ใดๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยูเนียนของฟัซซีเซต A เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $A \cup B$ ถูกนิยามในรูปฟังก์ชันการเป็นสมาชิกดังนี้

$$\mu_{A \cup B}(u) = s(\mu_A(u), \mu_B(u)) \geq \max \{ \mu_A(u), \mu_B(u) \} \quad (2.20)$$

โดยที่ s คือ ตัวปฏิบัติการ Triangular co-norms ตามนิยาม 21

อินเตอร์เซกชันของฟัซซีเซต A เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $A \cap B$ ถูกนิยามในรูปฟังก์ชันการเป็นสมาชิกดังนี้

$$\mu_{A \cap B}(u) = t(\mu_A(u), \mu_B(u)) \leq \min \{ \mu_A(u), \mu_B(u) \} \quad (2.21)$$

โดยที่ t คือ ตัวปฏิบัติการ Triangular norms ตามนิยาม 20

นิยาม 20 ตัวปฏิบัติการ Triangular norms หรือ t-norms

t-norms คือ ฟังก์ชัน $[0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$ ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

1. $t(\mu_A(u), 0) = 0$, $t(\mu_A(u), 1) = t(1, \mu_A(u)) = \mu_A(u)$ (boundary condition)
2. $t(\mu_A(u), \mu_B(u)) = t(\mu_B(u), \mu_A(u))$ (commutativity)
3. $t(\mu_A(u), t(\mu_B(u), \mu_C(u))) = t(t(\mu_A(u), \mu_B(u)), \mu_C(u))$ (associativity)
4. ถ้า $\mu_A(u) \leq \mu_C(u)$ และ $\mu_B(u) \leq \mu_D(u)$
แล้ว $t(\mu_A(u), \mu_B(u)) \leq t(\mu_C(u), \mu_D(u))$ (monotonicity)

ตัวอย่างปฏิบัติการ t-norms

minimum : $t(\mu_A(u), \mu_B(u)) = \min \{ \mu_A(u), \mu_B(u) \}$ (2.22)

algebraic product : $t(\mu_A(u), \mu_B(u)) = \mu_A(u) \cdot \mu_B(u)$ (2.23)

นิยาม 21 ตัวปฏิบัติการ Triangular co-norms หรือ s-norms

s-norms คือ ฟังก์ชัน $[0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$ ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในงานวิชาการเท่านั้น มิฉะนั้นผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. $s(\mu_A(u), 1) = 1$, $s(\mu_A(u), 0) = s(0, \mu_A(u)) = \mu_A(u)$ (boundary condition)
2. $s(\mu_A(u), \mu_B(u)) = s(\mu_B(u), \mu_A(u))$ (commutativity)
3. $s(\mu_A(u), s(\mu_B(u), \mu_C(u))) = s(s(\mu_A(u), \mu_B(u)), \mu_C(u))$ (associativity)
4. ถ้า $\mu_A(u) \leq \mu_C(u)$ และ $\mu_B(u) \leq \mu_D(u)$
แล้ว $s(\mu_A(u), \mu_B(u)) \leq s(\mu_C(u), \mu_D(u))$ (monotonicity)

ตัวอย่างปฏิบัติการ s-norms

$$\text{maximum} : s(\mu_A(u), \mu_B(u)) = \max \{ \mu_A(u), \mu_B(u) \} \quad (2.24)$$

$$\text{algebraic sum} : s(\mu_A(u), \mu_B(u)) = \mu_A(u) + \mu_B(u) - \mu_A(u) \cdot \mu_B(u) \quad (2.25)$$

ฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic)

ตัวแปรลึงกวิสติก (Linguistic Variable)

นิยาม 22 ตัวแปรลึงกวิสติก

ตัวแปรลึงกวิสติก ถูกนิยามด้วยฟังก์ชัน 5 เทอม คือ $(x, T(x), U, G, M)$

โดยที่ x คือ ชื่อของตัวแปร (label)

$T(x)$ คือ เซตของค่าลึงกวิสติกของ x

U คือ เอกภพสัมพัทธ์ โดยที่ $u \in U$

X คือ ชื่อของค่าลึงกวิสติกของ x ที่ถูกสร้างตามกฎ G เรียกว่า เทอม (term)

G คือ Syntactic rule ในการกำหนดชื่อของเทอม X

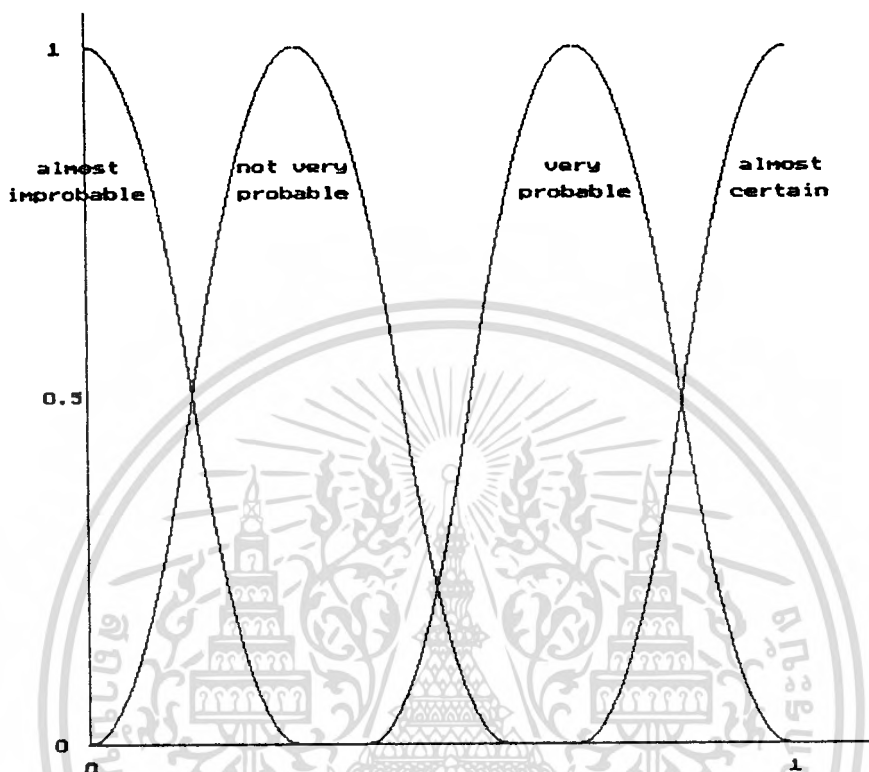
M คือ Semantic rule ในการนิยามคุณสมบัติของเทอม X

$M(X)$ คือ ฟัซซีสับเซตของเอกภพสัมพัทธ์ U

ตัวแปรลึงกวิสติกที่สำคัญในฟัซซีลอจิก ได้แก่ ตัวแปร “Probability” และ “Truth” ซึ่ง

ตัวอย่างการนิยามค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของเทอมของตัวแปรลึงกวิสติก “Probability” แสดง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนการคำ
ในภาพที่ 1
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 1



แสดงค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรลิงกวิสติก “Probability”

ในการนิยามตัวแปรลิงกวิสติก “Truth” ได้มีผู้นำเสนอไว้ต่างๆ กันดังนี้ ในปี ค.ศ. 1973 Zadeh ได้นิยาม เซตของเทอมของตัวแปรลิงกวิสติก “Truth” ดังสมการที่ (2.26)

$$T(\text{Truth}) = \{ \text{true, not true, very true, not very true, ..., false, not false, very false, ..., not very true and not very false, ...} \} \quad (2.26)$$

โดยได้นิยามเทอมปฐม (primary term) ของตัวแปรลิงกวิสติก “Truth” คือ “true” และ “false” และกำหนดค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของแต่ละเทอมตามสมการที่ (2.27)-(2.28) ซึ่งสามารถแสดงได้ในภาพที่ 2 และได้นิยามเทอมอื่นๆ จากการขยายเทอมปฐม โดยการเติม modifier หรือ hedge ที่เหมาะสมในเทอม “true” และ “false”

$$\mu_{\text{true}}(v) = \begin{cases} 0 & ; 0 \leq v \leq a \\ 2 \left(\frac{v-a}{1-a} \right)^2 & ; a \leq v \leq \frac{a+1}{2} \\ 1 - 2 \left(\frac{v-1}{1-a} \right)^2 & ; \frac{a+1}{2} \leq v \leq 1 \end{cases} \quad (2.27)$$

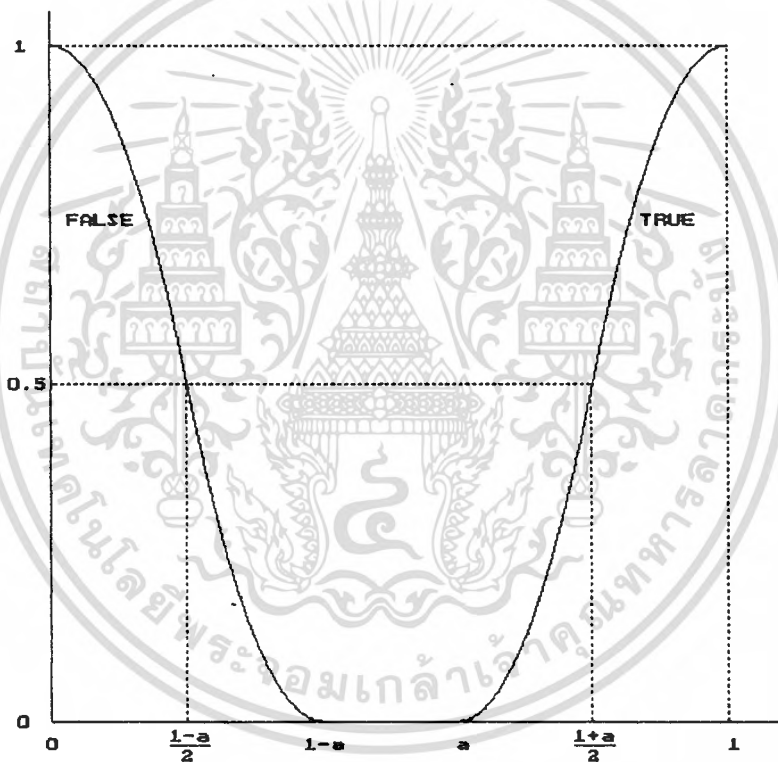
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อประโยชน์ทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mu_{\text{false}}(v) = \mu_{\text{true}}(1-v) \quad ; \quad 0 \leq v \leq 1 \quad (2.28)$$

เมื่อ $v = (1+a)/2$ คือ จุดตัดข้าม (crossover)

$a \in [0,1]$ คือ ค่าพารามิเตอร์ที่บอกถึงค่าต่ำสุดของ v ในการตัดสินใจความต้องการของประพจน์

ภาพที่ 2



แสดงค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของเทอม “true” และ “false” ตามนิยามของ Zadeh

ต่อมาในปี ค.ศ. 1979 Baldwin ได้นิยามเซตของเทอมของตัวแปรลิงกวิสติก “Truth” ตามสมการที่ (2.29)

$$T(\text{Truth}) = \{ \text{true, very true, fairly true, false, very false, fairly false} \} \quad (2.29)$$

โดยกำหนดให้ค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของแต่ละเทอมเป็นไปตามสมการที่ (2.30)–(2.33) ซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

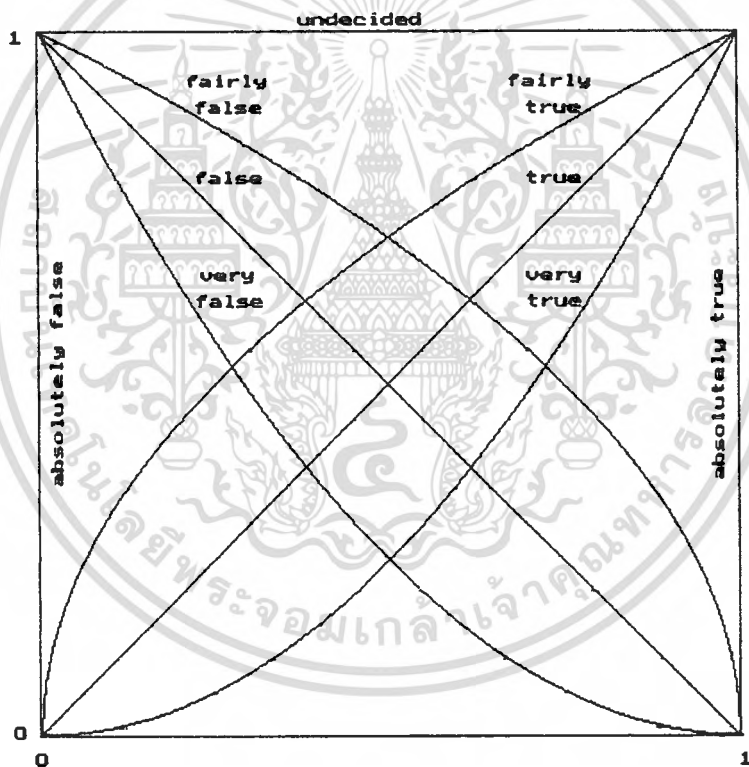
$$\mu_{\text{very true}}(v) = (\mu_{\text{true}}(v))^2 ; v \in [0,1] \tag{2.30}$$

$$\mu_{\text{fairly true}}(v) = (\mu_{\text{true}}(v))^{1/2} ; v \in [0,1] \tag{2.31}$$

$$\mu_{\text{very false}}(v) = (\mu_{\text{false}}(v))^2 ; v \in [0,1] \tag{2.32}$$

$$\mu_{\text{fairly false}}(v) = (\mu_{\text{false}}(v))^{1/2} ; v \in [0,1] \tag{2.33}$$

ภาพที่ 3



แสดงค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรลึงกวิสติก “Truth” ตามนิยามของ Baldwin

นิยาม 23 ตัวปฏิบัติการ Linguistic Hedge หรือ Modifier

Linguistic Hedge หรือ Modifier คือ ตัวปฏิบัติการในการแปลงหรือขยายขอบเขตของความหมายของฟัซซีเซต ซึ่งในที่นี้คือเทอมของตัวแปรลึงกวิสติก

กำหนดให้ A เป็นฟัซซีเซตในเอกภพสัมพัทธ์ U โดยที่ $u \in U$
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยามตัวปฏิบัติการ modifier : m บนพีชคณิต A เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $m(A)$ ดังนี้

$$\text{concentration} : \mu_{\text{con}(A)}(u) = (\mu_A(u))^2 \quad (2.34)$$

$$\text{dilation} : \mu_{\text{dil}(A)}(u) = (\mu_A(u))^{\frac{1}{2}} \quad (2.35)$$

$$\text{intensification} : \mu_{\text{int}(A)}(u) = \begin{cases} 2(\mu_A(u))^2 & ; \mu_A(u) \in [0,0.5] \\ 1-2(1-\mu_A(u))^2 & ; \mu_A(u) \in (0.5,1] \end{cases} \quad (2.36)$$

$$\text{จะได้ว่า} \quad \text{very } A = \text{con}(A) \quad (2.37)$$

$$\text{more or less } A = \text{dil}(A) \quad (2.38)$$

$$\text{plus } A = A^{1.25} \quad (2.39)$$

$$\text{slightly } A = \text{int}[\text{plus } A \text{ and not } (\text{very } A)] \quad (2.40)$$

นิยาม 24 ตัวแปรลึงกวิสติกบูลีน (Boolean Linguistic Variable)

ตัวแปรลึงกวิสติกบูลีน คือ ตัวแปรลึงกวิสติกที่มีเทอมเป็นค่าบูลีน ซึ่งมีเทอมปรุม 2 ตัว โดยที่เทอมทั้งหมด จะอยู่ในรูป X_p และ $m(X_p)$

เมื่อ X_p คือ เทอมปรุม

$m(X_p)$ คือ เทอมที่ได้จากการทำปฏิบัติการ modifier บนเทอมปรุม X_p

ทฤษฎีตรรกศาสตร์แบบเดิม

ทฤษฎีตรรกศาสตร์ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานของการหาข้อสรุปโดยใช้เหตุผล ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ค่าความจริง (truth value) การปฏิบัติการ (vocabulary) และวิธีการหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผล (reasoning procedure) ในตรรกศาสตร์บูลีนได้นิยามส่วนประกอบแต่ละส่วนดังนี้

นิยาม 25 ค่าความจริงของประพจน์ในตรรกศาสตร์บูลีน

ประพจน์ในตรรกศาสตร์บูลีน จะมีค่าความจริงเท่ากับ 0 เมื่อประพจน์เป็นเท็จ และจะมีค่าความจริงเท่ากับ 1 เมื่อประพจน์เป็นจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอน ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยาม 26 ปฏิบัติการทางตรรกศาสตร์บูลีน

ปฏิบัติการทางตรรกศาสตร์บูลีน ถูกนิยามด้วยค่าความจริงของประพจน์ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1

แสดงค่าความจริงของประพจน์ในการปฏิบัติการทางตรรกศาสตร์บูลีน

A	B	\wedge	\vee	$x\vee$	\rightarrow	\leftrightarrow
1	1	1	1	0	1	1
1	0	0	1	1	0	0
0	1	0	1	1	1	0
0	0	0	0	0	1	1

นิยาม 27 การหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผล

การหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผลโดยใช้ทฤษฎีตรรกศาสตร์แบบเดิม จะใช้สัจนิรันดร์ (tautology) สำหรับเป็นพื้นฐานในการหาข้อสรุป ตัวอย่างสัจนิรันดร์ที่ใช้เป็นพื้นฐานในการหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผล แสดงดังนี้

- modus ponens : $(A \wedge (A \rightarrow B)) \rightarrow B$
- modus tollens : $((A \rightarrow B) \wedge (\neg B)) \rightarrow (\neg A)$
- syllogism : $((A \rightarrow B) \wedge (B \rightarrow C)) \rightarrow (A \rightarrow C)$
- contraposition : $(A \rightarrow B) \rightarrow ((\neg B) \rightarrow (\neg A))$

ทฤษฎีฟัชซีลอจิก

ฟัชซีลอจิกเป็นทฤษฎีทางตรรกศาสตร์ที่ขยายมาจากทฤษฎีตรรกศาสตร์หลายค่า (multivalued logic) โดยนิยามค่าความจริงของประพจน์เป็นตัวแปรลิงกวิสติก ได้มีการนิยามการปฏิบัติการทางตรรกศาสตร์สำหรับฟัชซีลอจิกไว้ต่างๆ กัน ในวิทยานิพนธ์นี้ จะอ้างอิงจากนิยามดั้งเดิมของ Zadeh ดังต่อไปนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยาม 28 ค่าความจริงของประพจน์ในทฤษฎีฟัซซีลอจิก

กำหนดให้ $v(A)$ เป็นฟัซซีเซตในเอกภพสัมพัทธ์ $V = [0,1]$ ซึ่งแทนค่าความจริงของประพจน์ A

$$\text{จะได้ว่า } v(A) = \{(v_i, \mu_i) \mid i = 1, 2, \dots, n ; v_i \in [0,1]\} \quad (2.41)$$

$$v(\text{not } A) = 1 - v(A) = \{(1 - v_i, \mu_i) \mid i = 1, 2, \dots, n ; v_i \in [0,1]\} \quad (2.42)$$

นิยาม 29 การปฏิบัติการทางตรรกศาสตร์ในทฤษฎีฟัซซีลอจิก

$$\text{กำหนดให้ } v(A) = \{(v, \mu_A(v)) \mid \mu_A(v) \in [0,1] ; v \in [0,1]\}$$

$$v(B) = \{(v, \mu_B(v)) \mid \mu_B(v) \in [0,1] ; v \in [0,1]\}$$

$$\text{จะได้ว่า } v(A) \wedge v(B) = v(A \text{ and } B) = \{(v, \min\{\mu_A(v), \mu_B(v)\})\} \quad (2.43)$$

$$v(A) \vee v(B) = v(A \text{ or } B) = \{(v, \max\{\mu_A(v), \mu_B(v)\})\} \quad (2.44)$$

$$\neg v(A) = \text{not } (v(A)) = \{(v, 1 - \mu_A(v))\} \quad (2.45)$$

$$\begin{aligned} v(A) \rightarrow v(B) &= v(A \rightarrow B) = \neg v(A) \vee v(B) \\ &= \{(v, \max\{(1 - \mu_A(v)), \mu_B(v)\})\} \end{aligned} \quad (2.46)$$

$$\text{ในกรณีนี้ } v(A) = \{(v_i, \alpha_i) \mid i = 1, 2, \dots, n ; v_i \in [0,1] ; \alpha_i \in [0,1]\}$$

$$v(B) = \{(\omega_i, \beta_i) \mid i = 1, 2, \dots, n ; \omega_i \in [0,1] ; \beta_i \in [0,1]\}$$

$$\text{จะได้ว่า } v(A) \wedge v(B) = v(A \text{ and } B) = \left\{ \left(\min\{v_i, \omega_i\}, \max_{\min\{v_i, \omega_i\}} \min\{\alpha_i, \beta_i\} \right) \right\} \quad (2.47)$$

$$v(A) \vee v(B) = v(A \text{ or } B) = \left\{ \left(\max\{v_i, \omega_i\}, \max_{\max\{v_i, \omega_i\}} \min\{\alpha_i, \beta_i\} \right) \right\} \quad (2.48)$$

$$v(A) \rightarrow v(B) = v(A \rightarrow B) = \neg v(A) \vee v(B)$$

$$= \left\{ \left(\max\{v_i, \omega_i\}, \max_{\max\{v_i, \omega_i\}} \min\{1 - \alpha_i, \beta_i\} \right) \right\} \quad (2.49)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในทางวิชาการภายใต้เงื่อนไขและข้อกำหนดการนำ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Zadeh ได้เสนอตารางความจริง สำหรับพิจารณาค่าความจริงในการปฏิบัติการของฟัซซีลอจิก โดยการขยายจากตรรกศาสตร์บูลีน มาเป็นตรรกะ 3 ค่า คือ true (T), false (F) และ unknown (T+F) ได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2

แสดงตารางความจริงสำหรับตัวปฏิบัติการฟัซซีลอจิก ตามนิยามของ Zadeh

A	B	\wedge	\vee	$\neg A$
T	T	T	T	F
T	F	F	T	F
T	T+F	T+F	T	F
F	T	F	T	T
F	F	F	F	T
F	T+F	F	T+F	T
T+F	T	T+F	T	T+F
T+F	F	F	T+F	T+F
T+F	T+F	T+F	T+F	T+F

Baldwin ได้เสนอการสร้างตารางความจริงสำหรับฟัซซีลอจิก โดยทำถ่านิยามเทอมและฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรลิงกวิสติก "Truth" ซึ่งแสดงในภาพที่ 3 ดังนี้

$$\text{true} = \{ (v, \mu_{\text{true}}(v) = v) \mid v \in [0,1] \}$$

$$\text{false} = \{ (v, \mu_{\text{false}}(v) = 1 - \mu_{\text{true}}(v)) \mid v \in [0,1] \}$$

$$\text{very true} = \{ (v, (\mu_{\text{true}}(v))^2) \mid v \in [0,1] \}$$

$$\text{very false} = \{ (v, (1 - \mu_{\text{true}}(v))^2) \mid v \in [0,1] \}$$

$$\text{fairly true} = \{ (v, (\mu_{\text{true}}(v))^{\frac{1}{2}}) \mid v \in [0,1] \}$$

$$\text{fairly false} = \{ (v, (1 - \mu_{\text{true}}(v))^{\frac{1}{2}}) \mid v \in [0,1] \}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{undecided} = \{(v, 1) \mid v \in [0,1]\}$$

$$\text{absolutely true} = \{(v, \mu_{at}(v)) \mid v \in [0,1]\}; \mu_{at}(v) = \begin{cases} 1 & ; v=1 \\ 0 & ; v \neq 1 \end{cases}$$

$$\text{absolutely false} = \{(v, \mu_{af}(v)) \mid v \in [0,1]\}; \mu_{af}(v) = \begin{cases} 1 & ; v=0 \\ 0 & ; v \neq 0 \end{cases}$$

$$\text{ดังนั้น } (\text{very})^k \text{ true} \rightarrow \text{absolutely true} \text{ เมื่อ } k \rightarrow \infty$$

$$(\text{very})^k \text{ false} \rightarrow \text{absolutely false} \text{ เมื่อ } k \rightarrow \infty$$

$$(\text{fairly})^k \text{ true} \rightarrow \text{undecided} \text{ เมื่อ } k \rightarrow \infty$$

$$(\text{fairly})^k \text{ false} \rightarrow \text{undecided} \text{ เมื่อ } k \rightarrow \infty$$

นอกจากนี้ Baldwin ได้นิยามตัวปฏิบัติการ “and” และ “or” ด้วย minimum และ maximum ตามลำดับ และสร้างตารางความจริงของการปฏิบัติการฟัซซีลอจิก ได้ผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3

แสดงตารางความจริงสำหรับตัวปฏิบัติการฟัซซีลอจิก ตามนิยามของ Baldwin

v(P)	v(Q)	v(P and Q)	v(P or Q)
false	false	false	false
true	false	false	true
true	true	true	true
undecided	false	false	undecided
undecided	true	undecided	true
undecided	undecided	undecided	undecided
true	very true	true	very true
true	fairly true	fairly true	true

การหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผลโดยใช้ทฤษฎีฟัซซีลอจิก

การหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผล โดยใช้ทฤษฎีฟัซซีลอจิก จะเป็นการขยายนิยามของ สัจนิรันดร์ที่ใช้ในตรรกศาสตร์แบบเดิม เพื่อใช้หาข้อสรุปตามหลักการเหตุผลของประพจน์ที่เป็น ฟัซซีเซต โดยทำการขยายนิยามของ Modus Ponens และ Modus Tollens สำหรับฟัซซีลอจิก เรียกว่า Generalized Modus Ponens : GMP และ Generalized Modus Tollens : GMT ดังแสดง ในนิยาม 30 และนิยาม 31 ตามลำดับ

นิยาม 30 Generalized Modus Ponens : GMP

Generalized Modus Ponens คือ การหาข้อสรุปจากเหตุไปหาผล (forward data-driven)

GMP :	Premise	u is A' .
	Implication	If u is A then v is B .
	Conclusion	v is B' .

โดยที่ GMP Implication ถูกนิยามดังสมการ

$$A \rightarrow B = \max \{c \in [0,1], t(A,c) \leq B\} \quad (2.50)$$

นิยาม 31 Generalized Modus Tollens : GMT

Generalized Modus Tollens คือ การหาข้อสรุปจากผลไปหาเหตุ (backward goal-driven)

GMT :	Premise	v is B' .
	Implication	If u is A then v is B .
	Conclusion	u is A' .

โดยที่ GMT Implication ถูกนิยามดังสมการ

$$A \rightarrow B = \min \{c \in [0,1], s(B,c) \leq A\} \quad (2.51)$$

นิยาม 32 ฟัซซีอิมพลีเคชัน (Fuzzy Implication)

ฟัซซีอิมพลีเคชัน คือ เงื่อนไขความสัมพันธ์แบบฟัซซีระหว่างส่วนเหตุ (antecedent) และ ส่วนผล (consequence) ที่ใช้ในการหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผล อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนิยามของ GMP Implication ตามนิยาม 30 และนิยามของ GMT Implication ตามนิยาม 31 จะเห็นว่าฟัซซีอิมพลีเคชันจะขึ้นอยู่กับวิธีการเลือกใช้ตัวปฏิบัติการ t-norms และ s-norms ซึ่งมีผู้นำเสนอวิธีการทำฟัซซีอิมพลีเคชันแบบต่าง ๆ กัน ตามตัวปฏิบัติการ t-norms และ s-norms ที่เลือกใช้ ดังแสดงในตัวอย่างต่อไปนี้

Mamdani's Implication

$$R_m = A \times B = \left\{ \left((u, v), \min \{ \mu_A(u), \mu_B(v) \} \right) \right\} \quad (2.52)$$

Larsen's Implication

$$R_L = A \times B = \left\{ \left((u, v), \{ \mu_A(u) \cdot \mu_B(v) \} \right) \right\} \quad (2.53)$$

Zadeh's Arithmetic Rule of Fuzzy Implication

$$R_{Z_a} = (\text{not } A \times V) \oplus (U \times B) = \left\{ \left((u, v), \min \left\{ 1, (1 - \mu_A(u) + \mu_B(v)) \right\} \right) \right\} \quad (2.54)$$

Boolean Fuzzy Implication

$$R_B = (\text{not } A \times V) \cup (U \times B) = \left\{ \left((u, v), \max \left\{ (1 - \mu_A(u)), \mu_B(v) \right\} \right) \right\} \quad (2.55)$$

Zadeh's Max-Min Rule of Fuzzy Implication

$$R_{Z_m} = (A \times B) \cup (\text{not } A \times V) = \left\{ \left((u, v), \max \left\{ \min \{ \mu_A(u), \mu_B(v) \}, (1 - \mu_A(u)) \right\} \right) \right\} \quad (2.56)$$

Standard Sequence Fuzzy Implication

$$R_S = A \times V \rightarrow U \times B = \left\{ \left((u, v), \mu_{R_S}(u, v) \right) \mid \mu_{R_S}(u, v) = \begin{cases} 1 & ; \mu_A(u) \leq \mu_B(v) \\ 0 & ; \mu_A(u) > \mu_B(v) \end{cases} \right\} \quad (2.57)$$

ในปี ค.ศ. 1980 Fukami et al ได้พิสูจน์ถึงหลักการเลือกฟังก์ชันสำหรับการอิมพลีเคชันของ GMP และ GMT และทำการหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผล ได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 4 และตารางที่ 5 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4
แสดงผลของการหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผล
โดยใช้ GMP ด้วยหลักการของ Fukami

Criteria	Premise (u is A')	Conclusion (v is B')
1	u is A	v is B
2a	u is (very A)	v is (very B)
2b	u is (very A)	v is B
3a	u is (more or less A)	v is (more or less B)
3b	u is (more or less A)	v is B
4a	u is (not A)	v is unknown
4b	u is (not A)	v is (not B)

ตารางที่ 5
แสดงผลของการหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผล
โดยใช้ GMT ด้วยหลักการของ Fukami

Criteria	Premise (v is B')	Conclusion (u is A')
1	v is (not B)	u is (not A)
2	v is (not very B)	u is (not very A)
3	v is (not more or less B)	u is (not more or less A)
4a	v is B	u is unknown
4b	v is B	u is A

ความสัมพันธ์ฟัซซี (Fuzzy Relation)

นิยาม 33 ผลคูณคาร์ทีเซียน (Cartesian Product)

กำหนดให้ A_1, \dots, A_n เป็นฟัซซีเซตในเอกภพสัมพัทธ์ U_1, \dots, U_n

เอกสารนี้เป็น โดยที่ที่สงวนไว้สำหรับอ้างอิงเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
โดยที่ $u_1, \dots, u_n \in U_1, \dots, U_n$ ตามลำดับ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลคูณคาร์ทีเซียนของ A_1, \dots, A_n คือ ฟัชซีเซตในเอกภพสัมพัทธ์ $U_1 \times \dots \times U_n$ ที่มีฟังก์ชันการเป็นสมาชิกดังนี้

$$\mu_{A_1 \times \dots \times A_n}(u_1, \dots, u_n) = \begin{cases} \min \{ \mu_{A_1}(u_1), \dots, \mu_{A_n}(u_n) \} & \text{min - intersection} \\ \mu_{A_1}(u_1) \cdot \dots \cdot \mu_{A_n}(u_n) & \text{algebraic product} \end{cases} \quad (2.58)$$

นิยาม 34 ความสัมพันธ์ฟัชซี

กำหนดให้ R เป็นความสัมพันธ์ฟัชซีจากฟัชซีเซต A ไปยังฟัชซีเซต B

โดยที่ A เป็นฟัชซีเซตในเอกภพสัมพัทธ์ U ; $u \in U$

และ B เป็นฟัชซีเซตในเอกภพสัมพัทธ์ V ; $v \in V$

$$\text{จะได้ว่า } R_{U \times V} = A \times B = \{ (u, v), \mu_R(u, v) \mid (u, v) \in U \times V \} \quad (2.59)$$

$$\mu_R(u, v) = \mu_{A \times B}(u, v) = \begin{cases} \min \{ \mu_A(u), \mu_B(v) \} & \text{min - intersection} \\ \mu_A(u) \cdot \mu_B(v) & \text{algebraic product} \end{cases} \quad (2.60)$$

ความสัมพันธ์ฟัชซีขนาด n มิติของฟัชซีเซต A_1, \dots, A_n (เมื่อ A_1, \dots, A_n เป็นฟัชซีเซตในเอกภพสัมพัทธ์ U_1, \dots, U_n ตามลำดับ) คือ ฟัชซีสับเซตในเอกภพสัมพัทธ์ $U_1 \times \dots \times U_n$ ที่ถูกกำหนดดังนี้

$$R_{U_1 \times \dots \times U_n} = \{ (u_1, \dots, u_n), \mu_R(u_1, \dots, u_n) \mid (u_1, \dots, u_n) \in U_1 \times \dots \times U_n \} \quad (2.61)$$

$$\text{โดยที่ } \mu_R(u_1, \dots, u_n) \leq \mu_{A_i}(u_i); i=1, \dots, n; \forall (u_1, \dots, u_n) \in U_1 \times \dots \times U_n \quad (2.62)$$

นิยาม 35 การปฏิบัติการของความสัมพันธ์ฟัชซี

กำหนดให้ R_1 และ R_2 เป็นความสัมพันธ์ฟัชซีบนระนาบเดียวกัน คือ $U_1 \times \dots \times U_n$

ยูเนียน นิยามโดยใช้ตัวปฏิบัติการ maximum ได้ดังนี้

$$\mu_{R_1 \cup R_2}(u_1, \dots, u_n) = \max \{ \mu_{R_1}(u_1, \dots, u_n), \mu_{R_2}(u_1, \dots, u_n) \} \quad (2.63)$$

โดยที่ $(u_1, \dots, u_n) \in U_1 \times \dots \times U_n$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินเตอร์เซคชัน นิยามโดยใช้ตัวปฏิบัติการ minimum ได้ดังนี้

$$\mu_{R_1 \cap R_2}(u_1, \dots, u_n) = \min \{ \mu_{R_1}(u_1, \dots, u_n), \mu_{R_2}(u_1, \dots, u_n) \} \quad (2.64)$$

โดยที่ $(u_1, \dots, u_n) \in U_1 \times \dots \times U_n$

นิยาม 36 คุณสมบัติของความสัมพันธ์ฟัซซี

กำหนดให้ $R = \{ ((u, v), \mu_R(u, v)) \mid (u, v) \in U \times V \}$ เป็นความสัมพันธ์ฟัซซี

Reflexivity R จะมีคุณสมบัติเป็น reflexivity ก็ต่อเมื่อ $\mu_R(u, u) = 1$; $\forall u \in U$

Irreflexivity R จะมีคุณสมบัติเป็น irreflexivity ก็ต่อเมื่อ $\mu_R(u, u) = 0$; $\forall u \in U$

Symmetry R จะมีคุณสมบัติเป็น symmetry ก็ต่อเมื่อ $R(u, v) = R(v, u)$

Antisymmetry R จะมีคุณสมบัติเป็น antisymmetry ก็ต่อเมื่อ

ถ้า $u \neq v$ แล้ว $\mu_R(u, v) \neq \mu_R(v, u)$ หรือ $\mu_R(u, v) = \mu_R(v, u) = 0$; $\forall u, \forall v \in U$

Perfectly Antisymmetry R จะมีคุณสมบัติเป็น antisymmetry อย่างสมบูรณ์ ก็ต่อเมื่อ

ถ้า $u \neq v$ และ $\mu_R(u, v) > 0$ แล้ว $\mu_R(v, u) = 0$; $\forall u, \forall v \in U$

Transitivity R จะมีคุณสมบัติเป็น transitivity ก็ต่อเมื่อ

$$R \circ R \subseteq R \quad \text{หรือ} \quad \max_{v \in V} \{ \min [\mu_R(u, v), \mu_R(v, w)] \} \leq \mu_R(u, w)$$

นิยาม 37 โปรเจกชันของความสัมพันธ์ฟัซซี (Fuzzy Relation Projection)

กำหนดให้ $R = \{ ((u, v), \mu_R(u, v)) \mid (u, v) \in U \times V \}$ เป็นความสัมพันธ์ฟัซซี

โปรเจกชันของความสัมพันธ์ฟัซซี R ถูกนิยามดังนี้

$$\text{first projection:} \quad R^{(1)} = \left\{ (u, \max_v \mu_R(u, v)) \mid (u, v) \in U \times V \right\} \quad (2.65)$$

$$\text{second projection:} \quad R^{(2)} = \left\{ (v, \max_u \mu_R(u, v)) \mid (u, v) \in U \times V \right\} \quad (2.66)$$

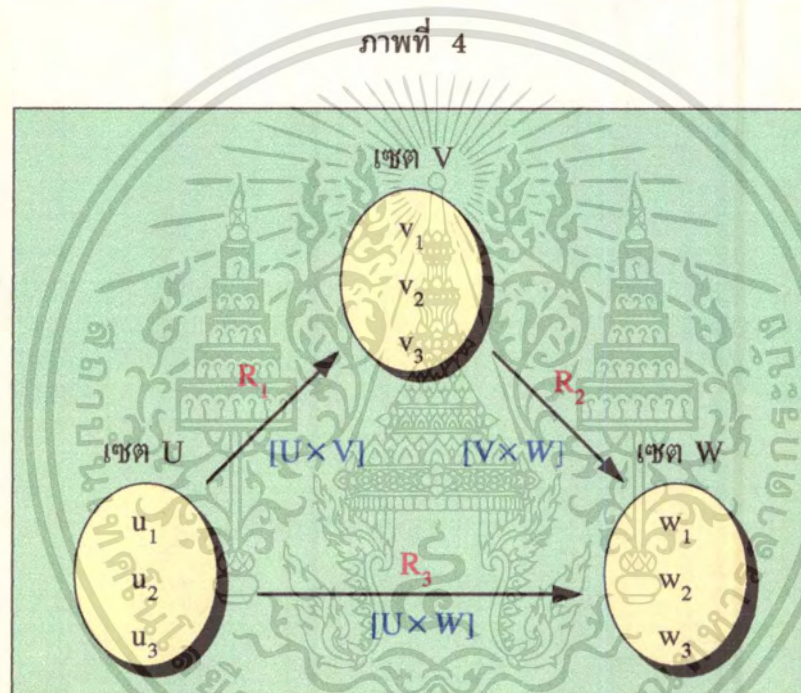
total projection: $R^{(T)} = \left\{ ((u, v), \max_u \max_v \mu_R(u, v)) \mid (u, v) \in U \times V \right\}$ (2.67)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคอมโพสิชันแบบฟัซซี (Fuzzy Composition)

กำหนดให้ $R_1(u, v)$ เป็นความสัมพันธ์จากเอกภพสัมพัทธ์ U ไป V โดยที่ $(u, v) \in U \times V$
และ $R_2(v, w)$ เป็นความสัมพันธ์จากเอกภพสัมพัทธ์ V ไป W โดยที่ $(v, w) \in V \times W$

การคอมโพสิชัน คือ ปฏิบัติการในการหาความสัมพันธ์ $R_3(u, w)$ จากความสัมพันธ์ที่ถ่ายทอดต่อเนื่องกันเป็นลูกโซ่ $R_1(u, v)$ และ $R_2(v, w)$ ดังแสดงในภาพที่ 4



แสดงการคอมโพสิชันของความสัมพันธ์ฟัซซี

กำหนดให้ $R_1(u, v)$ เป็นความสัมพันธ์ฟัซซี บนระนาบ $U \times V$ โดยที่ $(u, v) \in U \times V$
 $R_2(v, w)$ เป็นความสัมพันธ์ฟัซซี บนระนาบ $V \times W$ โดยที่ $(v, w) \in V \times W$

การคอมโพสิชันของความสัมพันธ์ฟัซซี ถูกนิยามดังนี้

นิยาม 38 Max-Min Composition

$$R_3 = R_1 \circ R_2 = \left\{ (u, w), \max_{v \in V} \{ \min [\mu_{R_1}(u, v), \mu_{R_2}(v, w)] \} \right\} \mid u \in U, v \in V, w \in W \quad (2.68)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยาม 39 Max-Product Composition

$$R_3 = R_1 * R_2 = \left\{ (u, w), \max_{v \in V} \{ \mu_{R_1}(u, v) \cdot \mu_{R_2}(v, w) \} \mid u \in U, v \in V, w \in W \right\} \quad (2.69)$$

นิยาม 40 Max-Average Composition

$$R_3 = R_1 \text{ av } R_2 = \left\{ (u, w), \max_{v \in V} \left\{ \frac{\mu_{R_1}(u, v) + \mu_{R_2}(v, w)}{2} \right\} \mid u \in U, v \in V, w \in W \right\} \quad (2.70)$$

นิยาม 41 Min-Max Composition

$$R_3 = R_1 \circ R_2 = \left\{ (u, w), \min_{v \in V} \left\{ \max \left[\mu_{R_1}(u, v), \mu_{R_2}(v, w) \right] \right\} \mid u \in U, v \in V, w \in W \right\} \quad (2.71)$$

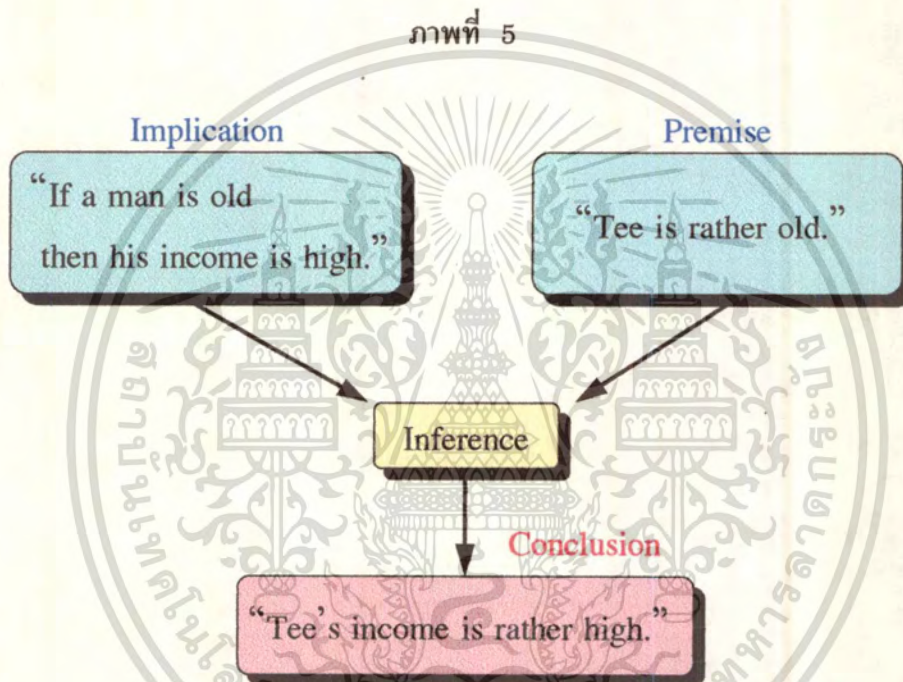
วิธีการ max-min composition เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด มีคุณสมบัติที่สำคัญดังนี้

1. $(R_1 \cup R_2) \circ R_3 = (R_1 \circ R_3) \cup (R_2 \circ R_3)$ distributed w.r.t. union
2. $(R_1 \cap R_2) \circ R_3 \subset (R_1 \circ R_3) \cap (R_2 \circ R_3)$ non-distributed w.r.t. intersection
3. $(R_1 \circ R_2) \circ R_3 = R_1 \circ (R_2 \circ R_3)$ association property
4. ถ้า $R_1 \subset R_2$
แล้ว $(R_1 \circ R_3) \subset (R_2 \circ R_3)$ inclusion property
5. ถ้า R_1, R_2 มีคุณสมบัติเป็น reflexivity
แล้ว $R_1 \circ R_2$ จะมีคุณสมบัติเป็น reflexivity
6. ถ้า R_1, R_2 มีคุณสมบัติเป็น symmetry และ $R_1 \circ R_2 = R_2 \circ R_1$
แล้ว $R_1 \circ R_2$ จะมีคุณสมบัติเป็น symmetry
7. ถ้า R_1, R_2 มีคุณสมบัติเป็น transitivity และ $R_1 \circ R_2 = R_2 \circ R_1$
แล้ว $R_1 \circ R_2$ จะมีคุณสมบัติเป็น transitivity
8. ถ้า R มีคุณสมบัติเป็น symmetry และ transitivity
แล้ว $\mu_R(u, v) \leq \mu_R(u, u) ; \forall u, \forall v \in U$
9. ถ้า R มีคุณสมบัติเป็น reflexivity
แล้ว $R \subset R \circ R$
10. ถ้า R มีคุณสมบัติเป็น reflexivity และ transitivity
แล้ว $R \circ R = R$

การอินเฟอเรนซ์แบบฟัซซี (Fuzzy Inference)

นิยาม 42 การอินเฟอเรนซ์

การอินเฟอเรนซ์ คือกระบวนการในการหาข้อสรุป (conclusion) จากหลักฐาน (premise) โดยใช้เงื่อนไขความสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผล (implication) ดังแสดงในตัวอย่างดังภาพที่ 5



แสดงการหาข้อสรุปจากหลักฐาน โดยใช้เงื่อนไขความสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผล

นิยาม 43 กฎการคอมโพสิชันของการอินเฟอเรนซ์ (Compositional Rule of Inference : CRI)

กำหนดให้	Premise	u is A' .
	Implication	If u is A then v is B .
	Conclusion	v is B' .

เมื่อ A, A' เป็นฟัซซีเซตในเอกภพสัมพัทธ์ U โดยที่ $u \in U$
 B, B' เป็นฟัซซีเซตในเอกภพสัมพัทธ์ V โดยที่ $v \in V$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการแปลงอิมพลีเคชันเป็นความสัมพันธ์ฟัซซี R ใน $U \times V$ ดังนั้น จะหา B' ได้ดังนี้

$$B' = \begin{cases} A' \circ R & \text{max - min composition} \\ A' * R & \text{max - product composition} \\ A' \text{ av } R & \text{max - average composition} \\ A' \bullet R & \text{min - max composition} \end{cases} \quad (2.72)$$

วิธีการคอมโพสิชันที่นิยมใช้มากที่สุดในการอินเฟอเรนซ์ คือ CRI ของ Zadeh ซึ่งจะใช้ตัวปฏิบัติการ max และ min ในการปฏิบัติการ s-norm และ t-norm ตามลำดับ สามารถหา B' ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$B' = A' \circ R = \left\{ \left(v, \max_{A' \in U} \{ \min [\mu_{A'}(u), \mu_R(u,v)] \} \right) \mid u \in U, v \in V \right\} \quad (2.73)$$

จากวิธีการอินเฟอเรนซ์ดังกล่าวข้างต้น ทำให้สามารถหา B' จาก $A' \circ R$ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ฟัซซีที่สำคัญสำหรับการควบคุม แต่นอกจากนี้ ยังพบปัญหาที่สำคัญอื่น ๆ คือ

- ปัญหาในการสร้างโมเดล โดยการหาความสัมพันธ์ฟัซซี R จาก ฟัซซีเซต A และ B
- ปัญหาการออกแบบตัวควบคุม โดยการหาฟัซซีเซต A จากความสัมพันธ์ฟัซซี R และ ฟัซซีเซต B

ซึ่งจะเห็นได้ว่า การแก้ปัญหาทั้งสองนี้ จะต้องใช้ตัวปฏิบัติการผกผัน (inverse) ของการคอมโพสิชัน จึงมีการนิยามตัวปฏิบัติการ \oslash -composition สำหรับการคอมโพสิชันผกผันดังนี้

นิยาม 44 ตัวปฏิบัติการ \oslash -Composition

\oslash -composition คือ ตัวปฏิบัติการผกผันของการคอมโพสิชัน เป็นฟังก์ชันจาก $[0,1] \times [0,1]$ ไปยัง $[0,1]$ ซึ่งถูกนิยามดังนี้

$$\oslash = \max [c \in [0,1] \mid t(x,c) \leq y ; x,y \in [0,1]] \quad (2.74)$$

\oslash -composition ของความสัมพันธ์ฟัซซี R บนระนาบ $U \times V$ กับฟัซซีเซต B ซึ่งถูกเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $R \oslash B'$ และถูกนิยามในรูปฟังก์ชันการเป็นสมาชิกดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ $\mu_{(R \oslash B')}(u) = \min_{v \in B} [\mu_R(u,v) \oslash \mu_{B'}(v)]$ ที่ให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.75) การคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยาม 45 คุณสมบัติของตัวปฏิบัติการ \circ -composition

1. $x \circ \max(y, z) \geq \max(x \circ y, x \circ z) ; z \in [0,1]$
2. $t(x, (x \circ y)) \leq y$
3. $x \circ t(x, y) \geq y$
4. $A' \circ (A' \circ B') \subseteq B' ; \forall A', \forall B'$
5. $R \subseteq A' \circ (A' \circ R) ; \forall A', \forall B'$
6. $(R \circ B') \circ R \subseteq B' ; \forall A', \forall B'$
7. $A' \subseteq R \circ (A' \circ R) ; \forall A', \forall R \in (U \times V)$
8. $R = A' \circ B'$ คือคำตอบของการคอมโพสิชันผกผัน $A' = B' \circ R$
9. $A' = R \circ B'$ คือคำตอบของการหาฟัซซีเซตผกผัน $A' \circ R = B'$

การฟัซซีฟิเคชัน (Fuzzification)

นิยาม 46 การฟัซซีฟิเคชัน

การฟัซซีฟิเคชัน คือ กระบวนการหาค่าฟัซซีเซตบนเอกภพสัมพัทธ์ U ของอินพุต เพื่อเป็นตัวแทนของอินพุตซึ่งมีค่าเป็นตัวเลข สำหรับใช้เป็นอินพุตของระบบฟัซซี

การฟัซซีฟิเคชัน สามารถทำได้ 3 วิธีดังนี้

1. การฟัซซีฟิเคชัน โดยใช้ฟัซซีซิงเกิลตัน จะได้ว่า fuzzification $(u_0) = A$

โดยที่ A เป็นฟัซซีซิงเกิลตันซึ่งมี $S(A) = \{u_0\}$

$$\text{หรือ} \quad \mu_A(u) = \begin{cases} 1 & ; u = u_0 \\ 0 & ; u \neq u_0 \end{cases} \quad (2.76)$$

2. การฟัซซีฟิเคชัน โดยใช้ฟัซซีนิมเบอร์ จะได้ว่า fuzzification $(u_0) = A$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นโดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อใช้ในการเรียนการสอนวิชาฟัซซีเซตและระบบฟัซซี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\mu_A(u) = 1$ เมื่อ $u = u_0$
 และ $\mu_A(u)$ ลดลง เมื่อ u อยู่ห่างออกไปจาก u_0

ตัวอย่างของการฟัซซีฟิเคชัน โดยใช้ฟัซซีนัมเบอร์ เช่น

$$\mu_A(u) = \exp\left[-\frac{(u-u_0)^T(u-u_0)}{\sigma^2}\right] \quad (2.77)$$

โดยที่ σ เป็นพารามิเตอร์ในการกำหนดรูปร่างของ $\mu_A(u)$

3. การฟัซซีฟิเคชัน โดยใช้ไฮบริดนัมเบอร์ (hybrid number)

จะได้ว่า fuzzification (u_0) = A

โดยที่ A เป็น ไฮบริดนัมเบอร์ (ไฮบริดนัมเบอร์ คือ ฟัซซีนัมเบอร์ที่สมาชิก
 ในเอกภพสัมพัทธ์เป็น random number)

$\mu_A(u) = 1$ เมื่อ $u = u_0$
 และ $\mu_A(u)$ ลดลง เมื่อ u อยู่ห่างออกไปจาก u_0

การดีฟัซซีฟิเคชัน (Defuzzification)

นิยาม 47 การดีฟัซซีฟิเคชัน

การดีฟัซซีฟิเคชัน คือ กระบวนการหาค่าเอาต์พุตเพียงค่าเดียว (ซิงเกิลตัน) ที่เหมาะสมที่สุด เพื่อเป็นตัวแทนของฟัซซีเอาต์พุตที่มีค่าความเป็นไปได้กระจายอยู่บนเอกภพสัมพัทธ์ V ของเอาต์พุต

กำหนดให้ R คือ ความสัมพันธ์ฟัซซีจากเอกภพสัมพัทธ์ U ไป V ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต u และเอาต์พุต v
 u_0 คือ อินพุตที่วัดได้ เป็นฟัซซีซิงเกิลตัน

ในการคอมโพสิชันระหว่างฟัซซีซิงเกิลตัน u_0 กับความสัมพันธ์ฟัซซี R จะได้ผลลัพธ์เป็นฟัซซีเซต B ซึ่งเป็นสับเซตของเอกภพสัมพัทธ์ V และเมื่อทำดีฟัซซีฟิเคชัน จะหาฟัซซีซิงเกิลตัน v_0 ซึ่งเป็นตัวแทนของฟัซซีเอาต์พุต B เพื่อใช้เป็นเอาต์พุตที่แท้จริงของระบบได้ ซึ่งประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างวิธีการตีฟัชซิฟเคชัน ที่นิยมใช้มีดังนี้

1. Max Procedure เป็นวิธีการตีฟัชซิฟเคชัน โดยเลือกค่าเอาต์พุตที่มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกมากที่สุด เพื่อใช้เป็นตัวแทนของฟัชซิเอาต์พุต สามารถแสดงด้วยสมการดังนี้

$$v_0 = \max_{v \in V} \mu_B(v) \quad (2.78)$$

2. Mean of Maxima (MOM) เป็นวิธีที่ขยายมาจากวิธี max procedure เพื่อใช้ในกรณีที่ค่าเอาต์พุตมีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกสูงสุดเท่ากันหลายค่า ให้ทำการหาค่าเฉลี่ยของค่าเอาต์พุตที่มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกสูงสุดเท่ากัน โดยใช้สมการดังนี้

$$v_0 = \text{MOM}(B) = \sum_{j=1}^J \frac{v_j}{J} \quad (2.79)$$

เมื่อ v_j คือ ค่าเอาต์พุตแต่ละค่าที่มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกสูงสุดเท่ากัน
 J คือ จำนวนเอาต์พุตที่มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกสูงสุดเท่ากัน

3. Centre of Area (COA) / Centre of Gravity (COG)

วิธี COA เป็นวิธีหาจุดศูนย์กลางของพื้นที่ใต้กราฟของฟังก์ชันการเป็นสมาชิก เพื่อใช้เป็นตัวแทนของฟัชซิเอาต์พุต ซึ่งทำได้โดยการแบ่งพื้นที่ใต้กราฟของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกออกเป็น 2 ส่วนเท่า ๆ กัน และค่า v_0 จะหาได้จากค่าของ v ที่ตำแหน่งของเส้นแบ่งครึ่ง สามารถแสดงด้วยสมการดังนี้

$$\int_{-\infty}^{\text{COA}(B)} \mu_B(v) dv = \int_{\text{COA}(B)}^{\infty} \mu_B(v) dv \quad (2.80)$$

ในทางปฏิบัติ การคำนวณโดยใช้สมการที่ (2.80) ทำได้ยาก จึงประมาณการคำนวณของวิธี COA โดยใช้วิธี COG ซึ่งเป็นการหาจุดศูนย์กลางการถ่วงน้ำหนักแทนการหาจุดศูนย์กลางของพื้นที่ใต้กราฟ สมการของวิธีการตีฟัชซิฟเคชัน โดยใช้วิธี COG สามารถแสดงดังนี้

$$v_0 = \text{COG}(B) = \frac{\int v \mu_B(v) dv}{\int \mu_B(v) dv} \quad (2.81)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่เอกภพสัมพัทธ์ V มีสมาชิกเป็นค่าที่ไม่ต่อเนื่อง (discrete) สามารถหาค่า v_0 ได้จากสมการดังนี้

$$v_0 = \text{COG}(B) = \frac{\sum_{i=1}^{N_q} v_i \mu_B(v_i)}{\sum_{i=1}^{N_q} \mu_B(v_i)} \quad (2.82)$$

เมื่อ N_q คือ ระดับการควอนไทซ์

v_i คือ ค่าเอาต์พุตของแต่ละค่าในการควอนไทซ์

4. Fuzzy Mean Method (FM) เป็นวิธีที่ปรับปรุงมาจากวิธี COG เพื่อลดเวลาในการคำนวณ โดยการลดระดับการควอนไทซ์ลงให้เท่ากับจำนวนเทอมของตัวแปรเอาต์พุตในเอกภพสัมพัทธ์ V และใช้ค่าเฉลี่ยของแต่ละเทอมเป็นตัวแทนของค่าเอาต์พุตของแต่ละค่าการควอนไทซ์ สมการของการดีฟัซซิฟิเคชัน โดยใช้วิธี FM สามารถแสดงได้ดังนี้

$$v_0 = \text{FM}(B) = \frac{\sum_{k=1}^{N_v} \gamma_k v_k}{\sum_{k=1}^{N_v} \gamma_k} \quad (2.83)$$

เมื่อ N_v คือ จำนวนฟัซซีเซตของตัวแปรเอาต์พุตในเอกภพสัมพัทธ์ V

γ_k คือ ค่าเฉลี่ยที่ใช้เป็นตัวแทนของฟัซซีเซตของตัวแปรเอาต์พุตแต่ละเทอม บนเอกภพสัมพัทธ์ V

v_k คือ ค่าระดับการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซตของตัวแปรเอาต์พุตแต่ละเทอม บนเอกภพสัมพัทธ์ V

5. Weighted Fuzzy Mean Method (WFM) เป็นวิธีที่ขยายมาจากวิธี FM โดยเพิ่มการคูณสัมประสิทธิ์ถ่วงน้ำหนักของตัวแปรเอาต์พุตในแต่ละเทอม สมการของการดีฟัซซิฟิเคชัน โดยใช้วิธี WFM สามารถแสดงได้ดังนี้

$$v_0 = \text{WFM}(B) = \frac{\sum_{k=1}^{N_v} \omega_k \gamma_k v_k}{\sum_{k=1}^{N_v} \omega_k \gamma_k} \quad (2.84)$$

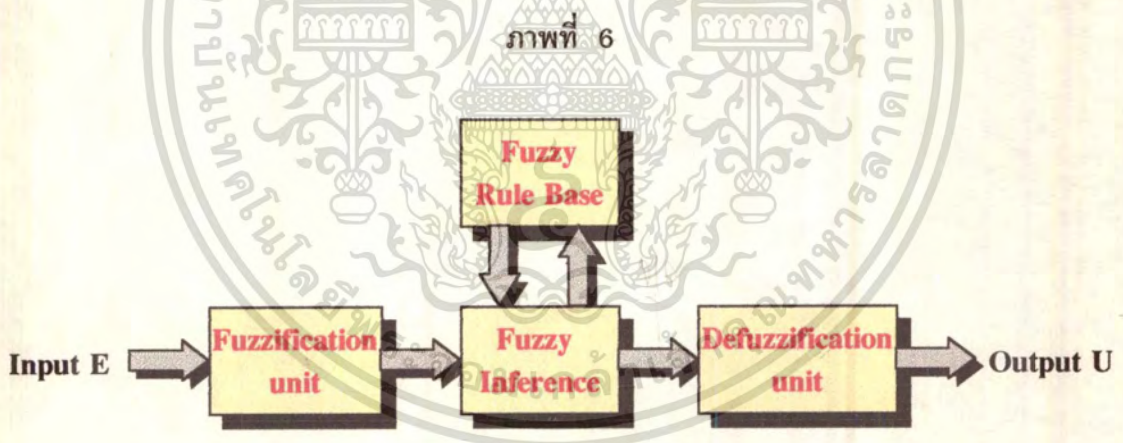
เมื่อ ω_k คือ สัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของแต่ละเทอมของตัวแปรเอาต์พุต ภายในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์ที่มหาวิทยาลัยสุโขทัยเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เอกภพสัมพัทธ์ V
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. Indexed Defuzzification Method (IDFZ) เป็นวิธีการที่ขยายมาจากการตัดฟัซซีฟิเคชันแบบเดิม โดยตัดเอาต์พุตบางส่วนที่มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกน้อยกว่าค่าเทรชโฮลด์ (threshold) ที่กำหนด โดยจะคำนวณเฉพาะค่าเอาต์พุตที่มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกมากกว่าค่าเทรชโฮลด์ ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{IDFZ}(B, \alpha_i) = \text{DFZ}(\alpha\text{-cut}(B, \alpha_i)) \quad (2.85)$$

ตัวควบคุมฟัซซี

โครงสร้างหลักของตัวควบคุมฟัซซี ประกอบด้วย 4 หน่วย คือ หน่วยฟัซซีฟิเคชัน หน่วยอินเฟอเรนซ์ หน่วยดีฟัซซีฟิเคชัน และฐานกฎการควบคุมฟัซซี (fuzzy rule base) ดังแสดงในภาพที่ 6 การทำงานของแต่ละหน่วยสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้



แสดงโครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมฟัซซี

หน่วยฟัซซีฟิเคชัน

หน่วยฟัซซีฟิเคชันทำหน้าที่นอมอลไลซ์ตัวแปรสถานะของระบบ $x = [x_1, \dots, x_m]^T$ ที่จะใช้เป็นอินพุตของตัวควบคุมให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ที่กำหนด และทำการแปลงตัวแปรอินพุต x ให้เป็นตัวแปรฟัซซี x' โดยใช้ฟัซซีซิงเกิลตัน ฟัซซีนัมเบอร์ หรือไฮบริดนัมเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฐานกฎการควบคุมฟัซซี

ฐานกฎการควบคุมฟัซซี เป็นหน่วยที่รวบรวมกฎการควบคุมแบบฟัซซีซึ่งอยู่ในรูปแบบ IF.... THEN....

กำหนดให้ กฎการควบคุมอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\text{IF } x_1 \text{ is } X_1^k \text{ and } \dots \text{ and } x_m \text{ is } X_m^k \text{ THEN } y \text{ is } Y^k$$

หรือ $\text{IF } x \text{ is } X^k \text{ THEN } y \text{ is } Y^k ; k = 1, 2, \dots, M \quad (2.86)$

โดยที่ x คือ ตัวแปรสถานะของกระบวนการ ซึ่งใช้เป็นอินพุตของตัวควบคุมฟัซซี

$$x = [x_1, \dots, x_m]^T$$

X^k คือ ฟัซซีเซตของตัวแปรอินพุต ในส่วนเหตุของกฎการควบคุม

$$X^k = X_1^k \times \dots \times X_m^k$$

m คือ จำนวนตัวแปรอินพุตของตัวควบคุม

y คือ ตัวแปรเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซี

Y^k คือ ฟัซซีเซตของตัวแปรเอาต์พุตในส่วนผลของกฎการควบคุมที่ k

M คือ จำนวนกฎการควบคุมทั้งหมดในฐานกฎการควบคุม

หน่วยอินเฟอเรนซ์

หน่วยอินเฟอเรนซ์ ทำหน้าที่หาค่าเอาต์พุตของระบบฟัซซีจากค่าตัวแปรอินพุตแบบฟัซซี X' โดยใช้วิธี GMP Implication หาค่าระดับการเป็นสมาชิก (fire strength) ของแต่ละกฎจากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุตแบบฟัซซี X' กับฟัซซีเซตในส่วนเหตุของแต่ละกฎ X^k แล้วจึงคำนวณหาค่าเอาต์พุตแบบฟัซซีจาก ระดับการเป็นสมาชิกกับฟัซซีเซตในส่วนผลของแต่ละกฎ Y^k ตัวอย่างการอินเฟอเรนซ์ โดยใช้ CRI ของ Zadeh แสดงด้วยสมการดังนี้

$$\mu_{Y^k}(y) = \bigvee_{x \in U} [\mu_{X^k \rightarrow Y^k}(x, y) \wedge \mu_{X'}(x)] \quad (2.87)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เสนอญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยดีฟัซซิฟิเคชัน

หน่วยดีฟัซซิฟิเคชัน ทำหน้าที่แปลงตัวแปรฟัซซีเอาต์พุตให้เป็นค่าเชิงเกิลตัน และทำการคืนอมอลโลซีให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ที่ต้องการ เพื่อใช้เป็นค่าเอาต์พุตของตัวควบคุม โดยใช้วิธีการที่ได้กล่าวถึงในเรื่องการดีฟัซซิฟิเคชัน

ตัวอย่างของการดีฟัซซิฟิเคชัน โดยใช้วิธี FM แสดงดังสมการ

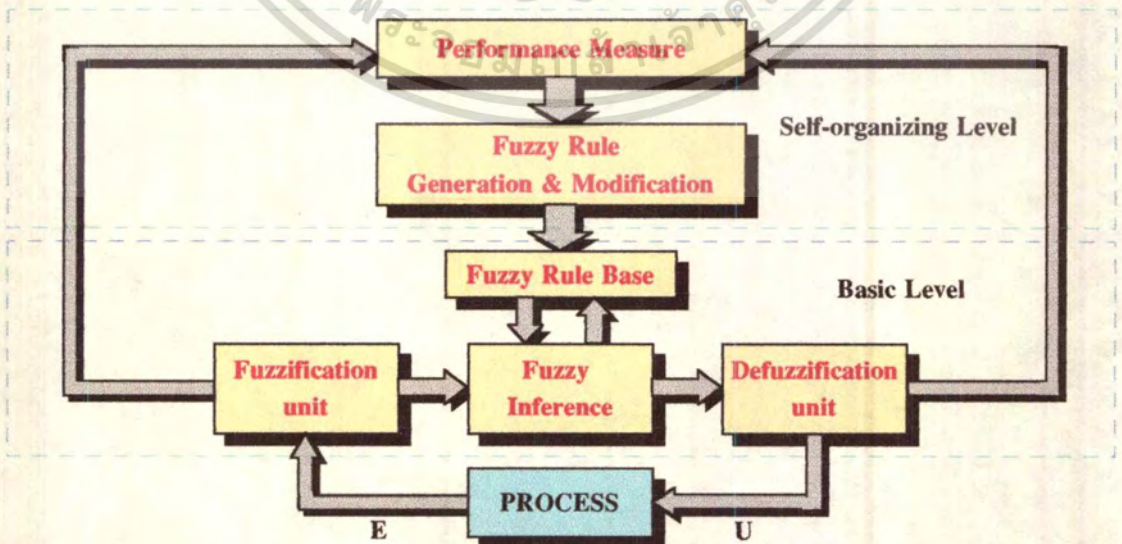
$$y = \frac{\sum_{k=1}^M \bar{y}^k \mu_{Y^k}(\bar{y}^k)}{\sum_{k=1}^M \mu_{Y^k}(\bar{y}^k)} \tag{2.88}$$

เมื่อ \bar{y}^k คือ ค่าเฉลี่ยที่ใช้เป็นตัวแทนของฟัซซีเซตของเอาต์พุต Y^k ในส่วนผลของกฎที่ k
 $\mu_{Y^k}(\bar{y}^k)$ คือ ค่าระดับการเป็นสมาชิกของ \bar{y}^k ในฟัซซีเอาต์พุต Y^k

ตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตนเอง

โครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตนเอง ดังแสดงในภาพที่ 7 แบ่งออกเป็น 2 ระดับ คือระดับพื้นฐาน (basic level) และระดับการปรับแต่งพารามิเตอร์ (self-organizing level)

ภาพที่ 7



โครงสร้างระดับพื้นฐานของตัวควบคุมพีซีแบบปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตนเองนั้น จะเหมือนกับโครงสร้างของตัวควบคุมพีซีปกติ แต่ฐานกฎการควบคุมจะสามารถเปลี่ยนแปลงได้ โดยการทำงานของหน่วยปรับแต่งกฎการควบคุม

โครงสร้างระดับการปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุม จะประกอบด้วย 2 หน่วย คือ หน่วยวัดสมรรถนะ (performance measure) และหน่วยปรับแต่งกฎการควบคุม (rule generation and modification) การทำงานของแต่ละหน่วย สามารถอธิบายได้ดังนี้

หน่วยวัดสมรรถนะ

หน่วยวัดสมรรถนะทำหน้าที่วัดสมรรถนะของระบบจากตัวแปรสถานะของกระบวนการ ซึ่งแสดงถึงค่าที่เอาต์พุตของระบบเบี่ยงเบนไปจากเอาต์พุตที่ต้องการ และคำนวณค่า performance modification : PM จากตัวแปรสถานะของกระบวนการ โดยใช้ความสัมพันธ์จากตารางดัชนีสมรรถนะ (performance index table) หรือสมการดัชนีสมรรถนะ (performance index equation)

หน่วยปรับแต่งกฎการควบคุม

หน่วยปรับแต่งกฎการควบคุมทำหน้าที่ปรับแต่งกฎการควบคุม ทำการหากฎการควบคุมที่มีระดับการเป็นสมาชิกสูงสุด โดยใช้ค่าระดับการเป็นสมาชิกของแต่ละกฎที่ได้จากการทำงานของหน่วยอินเฟอเรนซ์ และใช้ค่า PM ที่ได้จากหน่วยวัดสมรรถนะทำการแก้ไขส่วนผลของกฎนั้น แต่ถ้าไม่มีกฎการควบคุมที่สถานะนั้น ให้สร้างกฎใหม่ขึ้นในฐานกฎการควบคุม

การวิเคราะห์ระบบควบคุมพีซี

การวิเคราะห์ระบบควบคุมพีซี จะวิเคราะห์จากคุณสมบัติเชิงสถิตย์ (static property) และคุณสมบัติเชิงพลวัต (dynamic property) ของตัวควบคุม โดยที่คุณสมบัติเชิงสถิตย์จะถูกวิเคราะห์ในรูปของความสมบูรณ์ (completeness) ของฐานกฎการควบคุม การเกิดกิริยาระหว่างกัน (interaction) ของกฎการควบคุม ความสอดคล้อง (consistency) ของกฎการควบคุม และความคงทน (robustness) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ และการรบกวนจากภายนอก ส่วนคุณสมบัติเชิงพลวัตจะวิเคราะห์จากเสถียรภาพ (stability) ของระบบควบคุม

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงสถิติของระบบควบคุมพีซี

1. ความสมบูรณ์ของฐานกฎการควบคุม คือ ความสามารถของตัวควบคุมในการที่มีกฎการควบคุมรองรับในการสร้างสัญญาณควบคุม สำหรับทุก ๆ สถานะของอินพุต

กำหนดให้ ฐานกฎการควบคุมมีรูปแบบดังแสดงในสมการที่ (2.86)

ฐานกฎการควบคุมจะมีความสมบูรณ์ ก็ต่อเมื่อ “สำหรับทุก ๆ สถานะของอินพุต x จะต้องมีการควบคุมอย่างน้อย 1 กฎที่มีค่าระดับการเป็นสมาชิกมากกว่า 0 เพื่อใช้ในการคำนวณหาสัญญาณควบคุม” สามารถแสดงด้วยเงื่อนไขดังนี้

$$\forall_{x \in X} \left(\bigcup_{k=1}^M X^k(x) \right) > \varepsilon ; \varepsilon \in (0,1] \quad (2.89)$$

2. การเกิดกิริยาระหว่างกันของกฎการควบคุม คือ การที่ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมมีการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าเอาต์พุตที่เกิดจากกฎการควบคุมแต่ละกฎ ซึ่งเป็นผลกระทบจากการทำงานของกฎอื่น สามารถแสดงด้วยเงื่อนไขดังนี้

$$\bigcup_{k=1}^M \exists_{y \in Y} (X^k \circ R)(y) \neq Y^k(y) \quad (2.90)$$

โดยที่ R คือ ความสัมพันธ์พีซีที่ใช้แทนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุต และตัวแปรเอาต์พุตของตัวควบคุมพีซีในฐานกฎการควบคุม

ปัจจัยที่ทำให้เกิดกิริยาระหว่างกันของกฎการควบคุม คือ

- โครงสร้างของกฎการควบคุม
- การนิยามพีซีเซตและฟังก์ชันการเป็นสมาชิก
- การเลือกวิธีการอินเฟอร์เรนซ์และการตีพีซีฟิเคชัน

ในหลักการของการควบคุมแบบพีซีจะต้องออกแบบตัวควบคุมให้มีการเกิดกิริยาระหว่างกันของกฎการควบคุมเสมอ ทั้งนี้เนื่องจากว่า ถ้าค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมเกิดจากกฎเดียวแล้วค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมจะไม่ขึ้นกับค่าระดับการเป็นสมาชิกของกฎการควบคุม โดยค่าเอาต์พุตจะเท่ากับจุดศูนย์กลางของพีซีเซตในส่วนผลของกฎการควบคุมนั้นเสมอ ดังนั้นในการออกแบบตัวควบคุมจะต้องมีการซ้อนทับกันของพีซีเซต เพื่อให้สัญญาณควบคุมในแต่ละกรณีเกิดจากการควบคุมอย่างน้อย 2 กฎเสมอ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ความสอดคล้องกันของกฎการควบคุม จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อไม่มีการขัดแย้งกันระหว่างกฎการควบคุมที่จะทำให้เกิดเอาต์พุตของตัวควบคุมผิดพลาด กล่าวคือ ค่าอินพุตที่เหมือนกันหรือใกล้เคียงกัน จะต้องนำมาซึ่งค่าเอาต์พุตหรือสัญญาณควบคุมที่เหมือนกันหรือใกล้เคียงกัน ความขัดแย้งหรือความไม่สอดคล้องกันของกฎการควบคุม มักจะเกิดจากความผิดพลาดในการออกแบบกฎการควบคุม ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ดังนี้

กำหนดให้ ฐานกฎการควบคุมมีรูปแบบดังแสดงในสมการที่ (2.86)

ดัชนีแสดงความไม่สอดคล้องกัน (index of inconsistency) ระหว่างกฎที่ i และ j หาได้ดังนี้

$$c_{ij} = \left| \bigcup_{x \in X} (X^i \cap X^j) - \bigcup_{u \in U} (Y^i \cap Y^j) \right| \quad (2.91)$$

ถ้า $X^i = X^j$ และ $\bigcup_{u \in U} (Y^i \cap Y^j) = 0$

แล้ว c_{ij} จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1 กล่าวคือกฎทั้งสองมีความขัดแย้งกันโดยสิ้นเชิง

ถ้า $X^i = X^j$ และ $\bigcup_{u \in U} (Y^i \cap Y^j) = 1$

แล้ว c_{ij} จะมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0 กล่าวคือกฎทั้งสองมีความสอดคล้องกันอย่างสมบูรณ์

ดัชนีของความไม่สอดคล้องของกฎที่ i ในฐานกฎการควบคุม หาได้ดังนี้

$$c_i = \sum_{j=1}^M c_{ij} \quad (2.92)$$

โดยที่ M คือจำนวนกฎการควบคุมทั้งหมดในฐานกฎการควบคุม

ในการออกแบบกฎการควบคุมของตัวควบคุมพีซี จะต้องกำจัดกฎที่มีความไม่สอดคล้องออกจากฐานกฎการควบคุม และในการสร้างกฎการควบคุมใหม่ จะต้องหลีกเลี่ยงการเกิดความไม่สอดคล้องกันของกฎ

4. ความคงทนในการควบคุม หมายถึง ความสามารถของตัวควบคุมในการลดผลกระทบที่เกิดจากการรบกวนจากภายนอก จากสัญญาณนอยส์ หรือจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการ ปัจจัยในการออกแบบตัวควบคุมพีซีที่มีผลต่อความคงทนของระบบควบคุม ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำหนดความละเอียดในการควอนไทซ์ การกำหนดเอกภพสัมพัทธ์ของอินพุต การกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัชซีเซต และการกำหนดจำนวนกฎการควบคุม

ในการออกแบบตัวควบคุมฟัชซี ความละเอียดในการควอนไทซ์และจำนวนกฎการควบคุม มักจะถูกกำหนดตามเป้าหมายของการออกแบบตั้งแต่เริ่มแรก จึงไม่สามารถใช้ในการปรับปรุงความคงทนของระบบควบคุมได้ ดังนั้น ในการปรับปรุงความคงทนของระบบควบคุม จึงขึ้นอยู่กับ การกำหนดเอกภพสัมพัทธ์ของอินพุต และการกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัชซีเซต โดยมีการพิสูจน์ได้ว่าการกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัชซีเซตเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู จะทำให้ระบบควบคุมมีความคงทนต่อการรบกวนจากภายนอก และมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน [13]

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมฟัชซี

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมแบบดั้งเดิม มักจะวิเคราะห์โดยใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ของระบบ แต่ในการออกแบบควบคุมฟัชซีนั้นไม่จำเป็นต้องใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ของระบบ ทำให้การประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบดั้งเดิม กับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมฟัชซีทำได้ยาก แต่เนื่องจากเสถียรภาพเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งของระบบควบคุม จึงมีการวิจัยเพื่อหาวิธีในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมฟัชซีกันอย่างจริงจัง และถึงแม้ว่าจะยังไม่ได้คำตอบที่ชัดเจนในการแก้ปัญหาทั้งหมด แต่ก็ได้มีการนำเสนอและพัฒนาวิธีการต่างๆ อย่างต่อเนื่อง วิธีในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมฟัชซี ถูกแบ่งตามคุณลักษณะของระบบควบคุมที่ทำการพิจารณา ดังนี้

- ระบบควบคุมที่ประกอบด้วยตัวควบคุมฟัชซีแบบไม่เป็นเชิงเส้นกับกระบวนการที่เป็นเชิงเส้น โดยที่รู้โมเดลทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ สามารถวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุม โดยใช้วิธีการต่างๆ กัน เช่น วิธี describing function technique วิธี L_2 -stability / circle criterion และวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้โดเมนความถี่ เป็นต้น
- ระบบควบคุมที่ประกอบด้วยตัวควบคุมฟัชซีแบบไม่เป็นเชิงเส้น กับกระบวนการที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยที่รู้โมเดลทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ สามารถทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุม โดยการใช่วิธี invariance principle/ α -stability และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ว่าห้ามมิให้นำไปใช้ในการตีพิมพ์หรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสำนักพิมพ์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ธรรมชาติของระบบฟัชซีมากกว่า เนื่องจากมีการกำจัดขอบเขตความแน่นอนของการที่ระบบเสถียรและไม่เสถียรออกไป ซึ่งในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมทั้งสองวิธีนี้ จะใช้หลักการของ crisp function และถ้าปฏิบัติตามข้อกำหนดของ crisp function แล้ว จะรับรองเสถียรภาพแบบอะซิมโทติกของระบบควบคุมฟัชซีได้

- ระบบควบคุมที่ประกอบด้วยตัวควบคุมฟัชซีแบบไม่เป็นเชิงเส้น กับกระบวนการที่ไม่รู้โมเดลทางคณิตศาสตร์ ได้มีการนำเสนอวิธีการต่างๆ ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมดังนี้ วิธี phase plane trajectory ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์ระบบที่มีอันดับต่ำๆ และวิธี energetic stability criterion ซึ่งใช้วิเคราะห์ระบบฟัชซีที่อธิบายด้วยสมการความสัมพันธ์ฟัชซี

ในวิทยานิพนธ์นี้ จะกล่าวถึงเฉพาะการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมฟัชซี โดยใช้ Lyapunov stability criterion ดังต่อไปนี้

1. หลักเกณฑ์เสถียรภาพตามนัยของ Lyapunov (Lyapunov Stability Criterion)

กำหนดให้ระบบที่ทำการพิจารณา สามารถเขียนในรูปสมการดังนี้

$$\mathbf{x}' = \mathbf{f}(\mathbf{x}, t) \quad (2.93)$$

โดยที่ \mathbf{x} คือ เวกเตอร์สถานะ ขนาด n มิติ

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$$

$\mathbf{f}(\mathbf{x}, t)$ คือ เวกเตอร์ขนาด n มิติ โดยแต่ละองค์ประกอบ $f_1(\mathbf{x}, t), f_2(\mathbf{x}, t), \dots, f_n(\mathbf{x}, t)$ เป็นฟังก์ชันของ x_1, x_2, \dots, x_n และ t

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, t) = [f_1(\mathbf{x}, t), f_2(\mathbf{x}, t), \dots, f_n(\mathbf{x}, t)]^T$$

สมมติให้ผลลัพธ์ของสมการที่ (2.93) เมื่อกำหนดสถานะเริ่มต้น มีเพียงคำตอบเดียว เขียนแทนด้วย $\phi(t; \mathbf{x}_0, t_0)$ โดยที่ $\mathbf{x} = \mathbf{x}_0$ ที่เวลา $t = t_0$ ดังนั้นจะได้ว่า $\phi(t_0; \mathbf{x}_0, t_0) = \mathbf{x}_0$

นิยาม 48 สถานะสมดุลของระบบ (Equilibrium State: \mathbf{x}_e)

สถานะสมดุลของระบบ คือ สถานะของระบบที่สอดคล้องตามเงื่อนไขดังนี้

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}_e, t) = \mathbf{0} \quad ; \quad \text{สำหรับ ทุก ๆ ค่าของ } t$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากสถานะสมดุลแต่ละสถานะ สามารถเลื่อนมาที่จุดกำเนิดได้ โดยการย้ายแกนมาที่ $f(0,t) = 0$ ดังนั้น ในการพิจารณาเสถียรภาพของระบบที่สถานะสมดุล จะกระทำที่จุดกำเนิดเสมอ

นิยาม 49 เสถียรภาพของระบบตามนัยของ Lyapunov

กำหนดให้ อาณาเขตภายในทรงกลมรัศมี k รอบสถานะสมดุล x_e เขียนแทนด้วยอสมการ

$$\|x - x_e\| \leq k \quad (2.94)$$

โดยที่ $\|x - x_e\|$ คือ ระยะทางระหว่าง x และ x_e ซึ่งถูกนิยามดังนี้

$$\|x - x_e\| = \left[(x_1 - x_{1e})^2 + (x_2 - x_{2e})^2 + \dots + (x_n - x_{ne})^2 \right]^{1/2} \quad (2.95)$$

กำหนดให้ $S(\delta)$ เป็นอาณาเขตภายในทรงกลมรัศมี δ รอบสถานะสมดุล x_e เขียนแทนด้วยอสมการ

$$\|x_0 - x_e\| \leq \delta \quad (2.96)$$

และ $S(\varepsilon)$ เป็นอาณาเขตภายในทรงกลมรัศมี ε รอบสถานะสมดุล x_e เขียนแทนด้วยอสมการ

$$\|\phi(t; x_0, t_0) - x_e\| \leq \varepsilon ; t \geq t_0 \quad (2.97)$$

สถานะสมดุลของระบบตามสมการที่ (2.93) จะมีเสถียรภาพตามนัยของ Lyapunov ก็ต่อเมื่อ ถ้ากำหนดแต่ละอาณาเขตของ $S(\varepsilon)$ แล้ว จะสามารถหาอาณาเขต $S(\delta)$ โดยที่ถ้าเส้นทางโคจรของสถานะเริ่มต้นอยู่ภายในอาณาเขต $S(\delta)$ แล้ว จะไม่มีการออกจากอาณาเขต $S(\varepsilon)$ เมื่อเวลา t เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามปกติค่าของ δ จะขึ้นอยู่กับค่าของ ε และ t_0 แต่ถ้าค่าของ δ ไม่ขึ้นกับเวลา t_0 แล้วสถานะสมดุลนี้ จะถูกเรียกว่าเสถียรแบบยูนิฟอร์ม (uniformly stable)

นิยาม 50 เสถียรภาพแบบอะซิมโทติก (Asymptotic Stability)

สถานะสมดุล x_e ของระบบตามสมการที่ (2.93) มีเสถียรภาพแบบอะซิมโทติก ก็ต่อเมื่อสถานะนั้นๆ มีเสถียรภาพตามนัยของ Lyapunov และทุกๆ คำตอบของสมการที่ (2.93) โคจรเข้าสู่ x_e โดยไม่มีการออกจากอาณาเขต $S(\varepsilon)$ เมื่อเวลา t เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยาม 51 Asymptotic Stability in the Large

Asymptotic Stability in the Large คือ การที่สถานะสมดุลของระบบมีเสถียรภาพแบบอะซิมโทติก สำหรับทุก ๆ สถานะเริ่มต้นใน space

จะเห็นได้ว่า ในการเกิดเสถียรภาพแบบ asymptotic stability in the large จะมีสถานะสมดุลเพียงสถานะเดียวจากสถานะทั้งหมดของระบบ (สังเกตว่าสถานะสมดุลของระบบไม่จำเป็นต้องมีสถานะเดียว)

นิยาม 52 การไม่เสถียร (Unstable)

สถานะสมดุล x_e ของระบบ ตามสมการที่ (2.93) จะไม่เสถียร ก็ต่อเมื่อ ถ้ากำหนดอาณาเขตของ $S(\varepsilon)$; $\varepsilon > 0$ แล้ว ไม่ว่าจะกำหนดอาณาเขต $S(\delta)$; $\delta > 0$ ให้มีขนาดเล็กเท่าใดก็ตาม จะมีสถานะเริ่มต้น x_e ภายในอาณาเขต $S(\delta)$ บางสถานะที่ทำให้เส้นทางการโคจรของสถานะของระบบหลุดออกจากอาณาเขต $S(\varepsilon)$

2. วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของ Lyapunov จะคล้ายคลึงกับการพิจารณาเสถียรภาพของระบบสั่นสะเทือนในวิชากลศาสตร์ คือเมื่อระบบทางกลศาสตร์ถูกทำให้สั่นสะเทือน โดยการให้พลังงานเข้าสู่ระบบ ระบบจะค่อย ๆ คายพลังงานออก มีผลทำให้การสั่นสะเทือนลดลง จนกระทั่งพลังงานที่ให้กับระบบในตอนแรกเท่ากับศูนย์ ระบบจะหยุดสั่น ซึ่งจะกล่าวได้ว่าระบบข้างต้นนี้มีเสถียรภาพ แต่ในระบบอื่น ๆ โดยทั่วไปการหาสมการพลังงานของระบบจะทำได้ยาก ดังนั้น Lyapunov จึงทำการนิยามฟังก์ชันขึ้นมา เพื่อใช้แทนสมการพลังงานของระบบ เรียกว่า Lyapunov function : $V(x,t)$ และทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ

นิยาม 53 Positive Definiteness ของสกาลาร์ฟังก์ชัน

สกาลาร์ฟังก์ชัน $V(x)$ จะเป็น positive definite ภายในขอบเขต Ω (ซึ่งรวมจุดกำเนิดใน state space ด้วย) ก็ต่อเมื่อ $V(x) > 0$ สำหรับ ทุก ๆ สถานะของ x ใน Ω ที่ไม่เท่ากับศูนย์ และ $V(0) = 0$

ในกรณีที่ฟังก์ชันมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา $V(x,t)$ จะเป็น positive definite ภายในขอบเขต Ω (ซึ่งรวมจุดกำเนิดใน state space ด้วย) ก็ต่อเมื่อ สามารถหาสกาลาร์ฟังก์ชัน $V(x)$ ที่เป็น positive definite

โดยที่ $V(x,t) > V(x)$ สำหรับ ทุก ๆ $t > t_0$
 $V(0,t) = 0$ สำหรับ ทุก ๆ $t > t_0$

นิยาม 54 Negative Definiteness ของสกาลาร์ฟังก์ชัน

สกาลาร์ฟังก์ชัน $V(x)$ จะเป็น negative definite ก็ต่อเมื่อ $-V(x)$ เป็น positive definite

นิยาม 55 Positive Semidefiniteness ของสกาลาร์ฟังก์ชัน

สกาลาร์ฟังก์ชัน $V(x)$ จะเป็น positive semidefinite ภายในขอบเขต Ω ก็ต่อเมื่อ $V(x) \geq 0$ สำหรับ ทุก ๆ สถานะของ x ใน Ω ที่ไม่เท่ากับศูนย์ และ $V(0) = 0$

นิยาม 56 Negative Semidefiniteness ของสกาลาร์ฟังก์ชัน

สกาลาร์ฟังก์ชัน $V(x)$ จะเป็น negative semidefinite ก็ต่อเมื่อ $-V(x)$ เป็น positive semidefinite

นิยาม 57 Indefiniteness ของสกาลาร์ฟังก์ชัน

สกาลาร์ฟังก์ชัน $V(x)$ จะเป็น indefinite ก็ต่อเมื่อ ไม่ว่าจะกำหนดขอบเขต Ω ให้มีขนาดเล็กเท่าไรก็ตาม $V(x)$ จะมีทั้งค่าบวกและลบเสมอ

นิยาม 58 ทฤษฎีเสถียรภาพหลักของ Lyapunov

กำหนดให้ $V(x)$ เป็น สกาลาร์ฟังก์ชัน
 โดยที่ x เป็นเวกเตอร์ขนาด n มิติ

ถ้า $V(x)$ เป็น positive definite แล้ว จะได้ว่าสถานะ x ที่สอดคล้องกับสมการ $V(x) = C$ (เมื่อ C เป็นค่าคงที่ที่เป็นบวก) จะอยู่บนพื้นผิวปิดใน state space ขนาด n มิติ โดยจะอยู่รอบ ๆ จุดกำเนิด และพื้นผิวปิดซึ่งเกิดจาก $V(x) = C_1$ จะอยู่ภายในพื้นผิวปิดซึ่งเกิดจาก $V(x) = C_2$ ก็ต่อเมื่อ $C_1 < C_2$

ถ้า $V(x) \rightarrow \infty$ ในขณะที่ $\|x\| \rightarrow \infty$ แล้ว พื้นผิวปิดนั้นก็แผ่ขยายไปทั้ง state-space

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ถ้าสามารถหาฟังก์ชัน $V(x)$ ที่เป็น positive definite และมีอนุพันธ์อันดับหนึ่งเป็นลบตลอดเส้นทางการโคจรของสถานะ x แล้ว จะกล่าวได้ว่า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น $V(x)$ จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ จนเป็นศูนย์ในที่สุด และ x ก็จะลดลงเป็นศูนย์ด้วย ซึ่งหมายถึงว่าระบบนั้นจะมีเสถียรภาพแบบอะซิมโทติก ที่จุดกำเนิดใน state space

ทฤษฎีเสถียรภาพหลักของ Lyapunov ได้กำหนดเงื่อนไขที่เพียงพอ สำหรับการพิสูจน์เสถียรภาพแบบอะซิมโทติก ไว้ดังนี้

ทฤษฎี 1 เสถียรภาพของสถานะสมดุล ณ จุดกำเนิด

สมมติให้ระบบที่ทำการพิจารณา สามารถเขียนแทนได้ด้วยสมการดังนี้

$$\dot{x} = f(x, t)$$

โดยที่

$$f(0, t) = 0 \text{ สำหรับทุก ๆ ค่าของ } t$$

ถ้าสามารถหาสเกลาร์ฟังก์ชัน $V(x, t)$ เป็นฟังก์ชันต่อเนื่อง และมีอนุพันธ์ย่อยอันดับหนึ่ง เป็นไปตามเงื่อนไขต่อไปนี้

- $V(x, t)$ เป็น positive definite
- $V'(x, t)$ เป็น negative definite

แล้ว สถานะสมดุลของระบบ ณ จุดกำเนิด จะเป็น uniformly asymptotically stable

และ ถ้า $V(x, t) \rightarrow \infty$ ในขณะที่ $\|x\| \rightarrow \infty$ แล้วสถานะสมดุลของระบบ ณ จุดกำเนิด จะเป็น uniformly asymptotically stable in the large

ทฤษฎี 2 การไม่เสถียรของสถานะสมดุล ณ จุดกำเนิด

สมมติให้ระบบที่ทำการพิจารณา สามารถเขียนแทนได้ด้วยสมการดังนี้

$$\dot{x} = f(x, t)$$

โดยที่

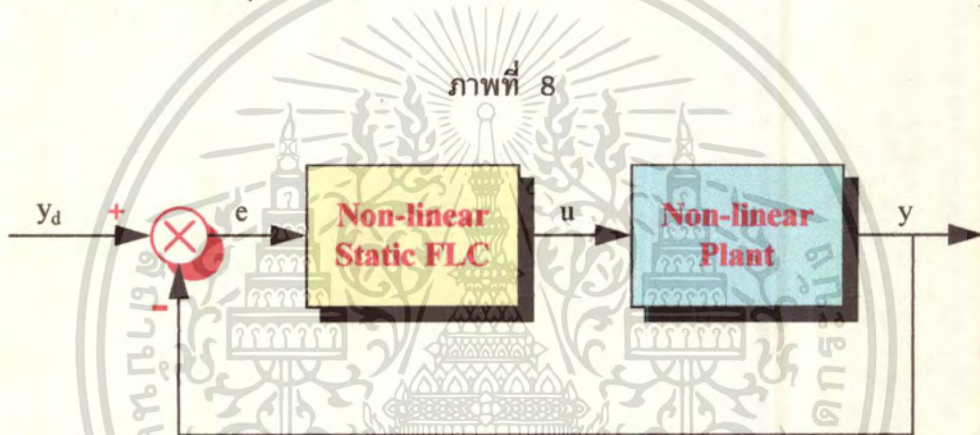
$$f(0, t) = 0 \text{ สำหรับทุก ๆ ค่าของ } t$$

ถ้าสามารถหาสเกลาร์ฟังก์ชัน $W(x, t)$ เป็นฟังก์ชันต่อเนื่อง และมีอนุพันธ์ย่อยอันดับหนึ่ง เป็นไปตามเงื่อนไขต่อไปนี้

- $W(x, t)$ เป็น positive definite ในบางอาณาเขตรอบจุดกำเนิด
- $W'(x, t)$ เป็น positive definite ในอาณาเขตนั้น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
แล้ว จะได้ว่า สถานะสมดุลของระบบ ณ จุดกำเนิด จะไม่เสถียร
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเทคนิคแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมฟuzzyแบบสถิตย์ จากหลักเกณฑ์เสถียรภาพตามนัยของ Lyapunov [13] จะพิจารณาจากระบบควบคุมฟuzzy ดังภาพที่ 8 ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการที่ไม่เป็นเชิงเส้นกับตัวควบคุมฟuzzyแบบสถิตย์ โดยจะต้องรู้โมเดลทางคณิตศาสตร์และสามารถหา Lyapunov function ที่เหมาะสมได้ ตามปกติเสถียรภาพของระบบควบคุมฟuzzy จะถูกรับรองด้วยความเห็นจากผู้เชี่ยวชาญในการสร้างฐานกฎการควบคุม เพราะถึงแม้ผู้เชี่ยวชาญจะไม่เข้าใจ Lyapunov function แต่ผู้เชี่ยวชาญจะคำนึงถึงเสถียรภาพตลอดเวลาในการออกแบบตัวควบคุม ดังนั้นบ่อยครั้งจะพบว่าเสถียรภาพของระบบจะซ่อนตัวอยู่ในกฎการควบคุม และเมื่อสามารถกำหนด Lyapunov function จากความรู้ทางภาษาของผู้เชี่ยวชาญ ก็จะสามารถพิสูจน์เสถียรภาพของระบบควบคุมฟuzzyได้



แสดงระบบควบคุมฟuzzy ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการที่ไม่เป็นเชิงเส้นกับตัวควบคุมฟuzzyแบบสถิตย์

กำหนดให้ กระบวนการที่ต้องการควบคุมในภาพที่ 8 หาโมเดลทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$y = h(x)$$

$$x' = f(x, u)$$

โดยที่ x คือ ตัวแปรสถานะของกระบวนการ

u คือ สัญญาณควบคุมที่ใช้เป็นอินพุตของกระบวนการ ซึ่งถูกสร้างจากตัวควบคุมฟuzzy สามารถเขียนแทนด้วยสมการ $u = g(x)$

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมฟuzzyแบบสถิตย์ ในภาพที่ 8 มีขั้นตอนดังนี้

● กำหนด Lyapunov function : $V(x, t)$ โดยใช้ฐานความรู้เกี่ยวกับระบบจากผู้เชี่ยวชาญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

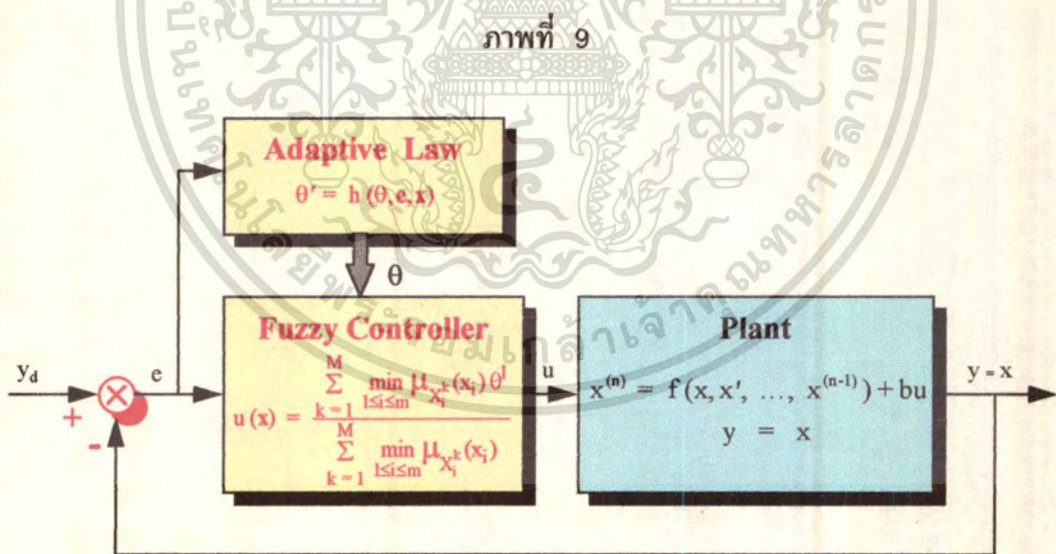
- คำนวณหาสัญญาณควบคุมที่ยอมรับได้ x_c จากทฤษฎีเสถียรภาพของ Lyapunov โดยการแก้สมการ

$$\frac{dV(x,t)}{dt} = \frac{dV}{dx} x' = \frac{dV}{dx} f(x,t) \leq 0 \tag{2.98}$$

- คำนวณสัญญาณควบคุมจริง x_f ที่ถูกสร้างจากตัวควบคุมพีชชี

ถ้าพิสูจน์ได้ว่า $x_f \subseteq x_c$ แล้ว จะได้ว่าระบบควบคุมพีชชีนี้มีเสถียรภาพตามทฤษฎีของ Lyapunov แต่ถ้า $x_f \not\subseteq x_c$ แล้ว จะได้ว่าระบบควบคุมพีชชีนี้ไม่เสถียร ให้ปรับปรุงการออกแบบตัวควบคุมพีชชีใหม่ เพื่อกำจัดปัจจัยที่ทำให้ระบบไม่เสถียร

4. การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมพีชชีแบบปรับตัวโดยตรง จากหลักเกณฑ์เสถียรภาพตามนัยของ Lyapunov [17] จะพิจารณาจากระบบควบคุมพีชชีแบบปรับตัวโดยตรง ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 9



แสดงระบบควบคุมพีชชีแบบปรับตัวโดยตรง

กำหนดให้ กระบวนการที่ต้องการควบคุมในภาพที่ 9 มีโมเดลทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$x^{(n)} = f(x, x', \dots, x^{(n-1)}) + bu \tag{2.99}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 $y = x$ (2.100)
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดยที่
- x คือ ตัวแปรสถานะของกระบวนการ
 - u คือ สัญญาณควบคุมที่ใช้เป็นตัวแปรอินพุตของกระบวนการ
 - y คือ ตัวแปรเอาต์พุตของระบบควบคุม
 - b คือ ค่าคงที่ที่เป็นบวก

กำหนดให้ โครงสร้างแต่ละหน่วยของตัวควบคุมฟuzzyทำงานดังนี้

- หน่วยฟuzzyฟิเคชัน ทำการฟuzzyฟิเคชัน โดยใช้ฟuzzyซิงเกิลตัน
- ฐานกฎการควบคุม มีรูปแบบดังแสดงในสมการที่ (2.86)
- หน่วยอินเฟอเรนซ์ ทำการอินเฟอเรนซ์ โดยใช้ CRI ของ Zadeh
- หน่วยดีฟuzzyฟิเคชัน ทำการดีฟuzzyฟิเคชัน โดยใช้วิธี COG

ทำการฟuzzyฟิเคชัน โดยใช้ฟuzzyซิงเกิลตัน จะได้ว่า

$$\mu_{X'}(x') = \begin{cases} 1 & ; x' = x \\ 0 & ; x' \neq x \end{cases} \quad (2.101)$$

ทำการอินเฟอเรนซ์ โดยใช้ CRI ของ Zadeh ตามสมการต่อไปนี้

$$\mu_{Y^k}(y) = \bigvee_{x \in U} [\mu_{X^k \rightarrow Y^k}(x, y) \wedge \mu_{X'}(x)] \quad (2.102)$$

ทำการดีฟuzzyฟิเคชัน โดยใช้วิธี COG ตามสมการต่อไปนี้

$$u = \frac{\sum_{k=1}^M \bar{y}^k \mu_{Y^k}(\bar{y}^k)}{\sum_{k=1}^M \mu_{Y^k}(\bar{y}^k)} \quad (2.103)$$

โดยที่ \bar{y}^k คือ จุดที่ $\mu_{Y^k}(y)$ มีค่าสูงสุด ในที่นี้กำหนดให้ $\mu_{Y^k}(\bar{y}^k) = 1$

ดังนั้น สัญญาณควบคุม u ที่ถูกสร้างจากตัวควบคุมฟuzzy สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u(x) = \frac{\sum_{k=1}^M \left(\min_{1 \leq i \leq m} \mu_{x_i^k}(x_i) \right) \bar{y}^k}{\sum_{k=1}^M \min_{1 \leq i \leq m} \mu_{x_i^k}(x_i)} \quad (2.104)$$

กำหนดให้ $\xi_k(x) = \frac{\min_{1 \leq i \leq m} \mu_{x_i^k}(x_i)}{\sum_{k=1}^M \min_{1 \leq i \leq m} \mu_{x_i^k}(x_i)}$ เรียกว่า fuzzy basis function

$\theta^k = \bar{y}^k$ คือ จุดกึ่งกลางของฟัซซีเซต Y^k
(เป็นค่าพารามิเตอร์ที่จะทำการปรับแต่ง)

$$\theta = [\theta^1, \dots, \theta^M]^T \quad \text{และ} \quad \xi(x) = [\xi_1(x), \dots, \xi_M(x)]^T$$

จะได้ว่า $u(x) = \sum_{k=1}^M \xi_k(x) \theta^k = \theta^T \xi(x)$ (2.105)

โดยที่ $\theta' = \frac{d\theta}{dt} = h(\theta, e, x)$ คือ กฎที่ใช้ในการปรับแต่งตัวควบคุม

ในกรณีที่รู้ค่า $f(x)$ และ b จะหาสัญญาณควบคุม u^* ที่ทำให้ค่าผิดพลาดของระบบลู่เข้าหาศูนย์ได้จากสมการต่อไปนี้

$$u^* = \frac{1}{b} [-f(x) + y_d + k^T e] \quad (2.106)$$

เมื่อ $e = [e, e', \dots, e^{(n-1)}]^T$ คือ เวกเตอร์ของค่าผิดพลาดของระบบ และ $k = [k_n, \dots, k_1]^T$ เป็นค่าที่ทำให้รากของสมการคุณลักษณะ $s^n + k_1 s^{n-1} + \dots + k_n = 0$ อยู่บนฝั่งซ้ายของระนาบ s

แทนค่า $b u^*$ จากสมการที่ (2.106) ลงในสมการสถานะของกระบวนการ ในสมการที่ (2.99) จะได้ว่า

$$e^{(n)} = -k^T e + b [u^* - u(x, \theta)] \quad (2.107)$$

หรือเขียนได้ใหม่ว่า

$$\dot{e}^{(n)} = \Lambda_e e + b_e [u^* - u(x, \theta)] \quad (2.108)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$\Lambda_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ -k_n & -k_{n-1} & \dots & -k_2 & -k_1 \end{bmatrix} ; \quad b_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ b \end{bmatrix}$$

ถ้ากำหนดให้ θ^* คือ ค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดสำหรับตัวควบคุม ซึ่งจะได้ว่า $u^* = u(x, \theta^*)$ ดังนั้น สมการค่าผิดพลาดในสมการที่ (2.108) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$e' = \Lambda_c e + b_c [u(x, \theta^*) - u(x, \theta)] = \Lambda_c e + b_c \phi^T \xi(x) \quad (2.109)$$

โดยที่ $\phi = \theta^* - \theta$ และ $\phi' = -\theta'$

กำหนดให้ Lyapunov function ของระบบควบคุมพีซีแบบปรับตัวโดยตรง แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$V = \frac{1}{2} e^T P e + \frac{b}{2\gamma} \phi^T \phi \quad (2.110)$$

เมื่อ P เป็นเมทริกซ์สมมาตรมิติ $n \times n$ ซึ่งสอดคล้องกับสมการของ Lyapunov

$$\Lambda_c^T P + P \Lambda_c = -Q \quad (2.111)$$

โดยที่ Q เป็นเมทริกซ์สมมาตรมิติ $n \times n$ และ γ คือค่าพารามิเตอร์ในการปรับตัว

จากสมการของค่าผิดพลาดในสมการที่ (2.109) และ Lyapunov function ในสมการที่ (2.110) จะได้ว่า

$$V' = -\frac{1}{2} e^T Q e + e^T P b_c \phi^T \xi(x) + \frac{b}{\gamma} \phi^T \phi' \quad (2.112)$$

กำหนดให้ p_n เป็น คอลัมน์สุดท้ายของเมทริกซ์ P จะได้ว่า

$$e^T P b_c = e^T p_n b \quad (2.113)$$

เมื่อแทนสมการที่ (2.113) ลงในสมการที่ (2.112) จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับนำไปใช้ (2.114) ในการคำนวณค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเลือกกฎการปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีชชี ให้อยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\theta' = \gamma e^T p_n \xi(x) \quad (2.115)$$

จะได้ v' ในสมการที่ (2.114) เป็นดังนี้

$$v' = -\frac{1}{2} e^T Q e \quad (2.116)$$

การพิสูจน์เสถียรภาพของระบบควบคุมพีชชีแบบปรับตัวโดยตรงนี้ สามารถทำได้โดยการคำนวณหาเมทริกซ์ Q ที่ซ่อนอยู่ในกฎการปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุม และทำการพิสูจน์เสถียรภาพตามนัยของ Lyapunov โดยใช้เงื่อนไขดังนี้

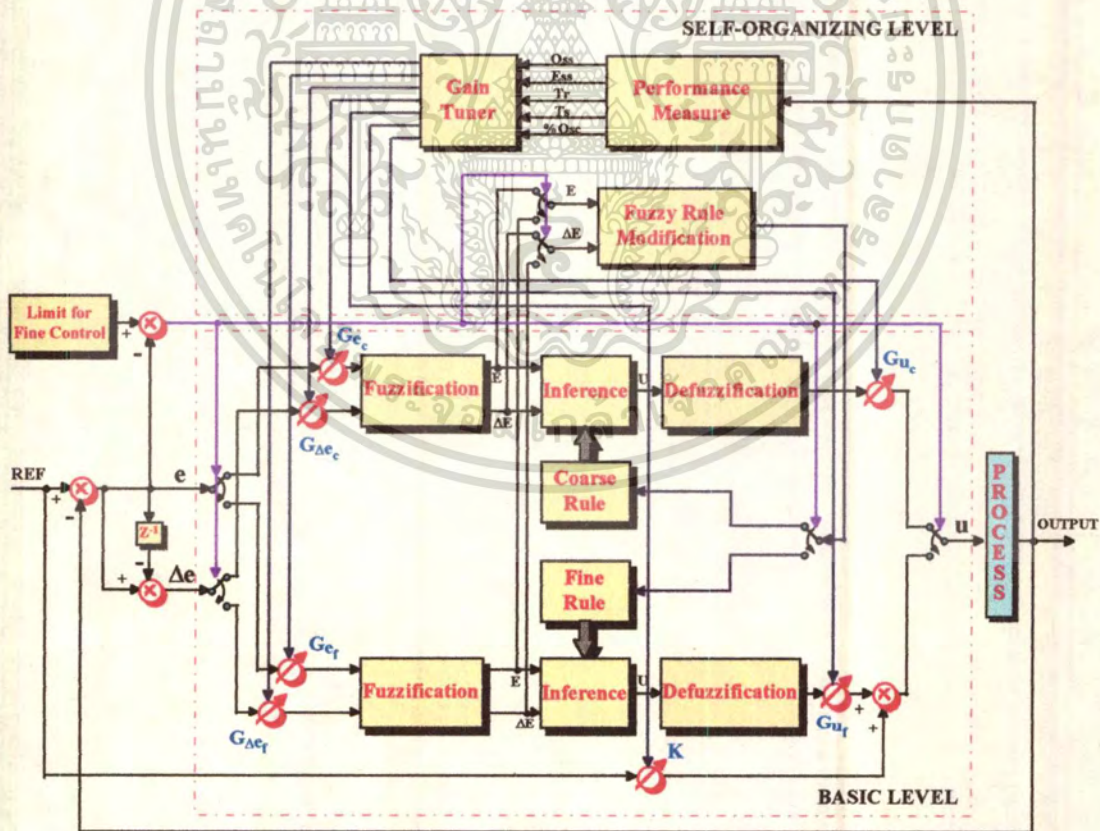
- ถ้าเมทริกซ์ Q เป็น positive definite จะได้ว่า v' เป็น negative definite ดังนั้น ระบบควบคุมจะมีเสถียรภาพแบบอะซิมโทติก
- ถ้าเมทริกซ์ Q ไม่เป็น positive semidefinite จะได้ว่า v' เป็น positive definite ดังนั้น ระบบควบคุมจะไม่เสถียร

บทที่ 3

การออกแบบตัวควบคุมฟัซซี

ตัวควบคุมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตนเอง ในที่นี้จะเรียกตัวควบคุมนี้ว่า ตัวควบคุม SOFLIC ซึ่งมีโครงสร้างหลักแบ่งออกเป็น 2 ระดับ คือระดับพื้นฐาน (basic level) และระดับการปรับแต่งพารามิเตอร์ (self-organizing level) ดังแสดงในภาพที่ 10 รายละเอียดขั้นตอนและวิธีการออกแบบโครงสร้างของตัวควบคุมแต่ละระดับ จะได้กล่าวถึงดังต่อไปนี้

ภาพที่ 10



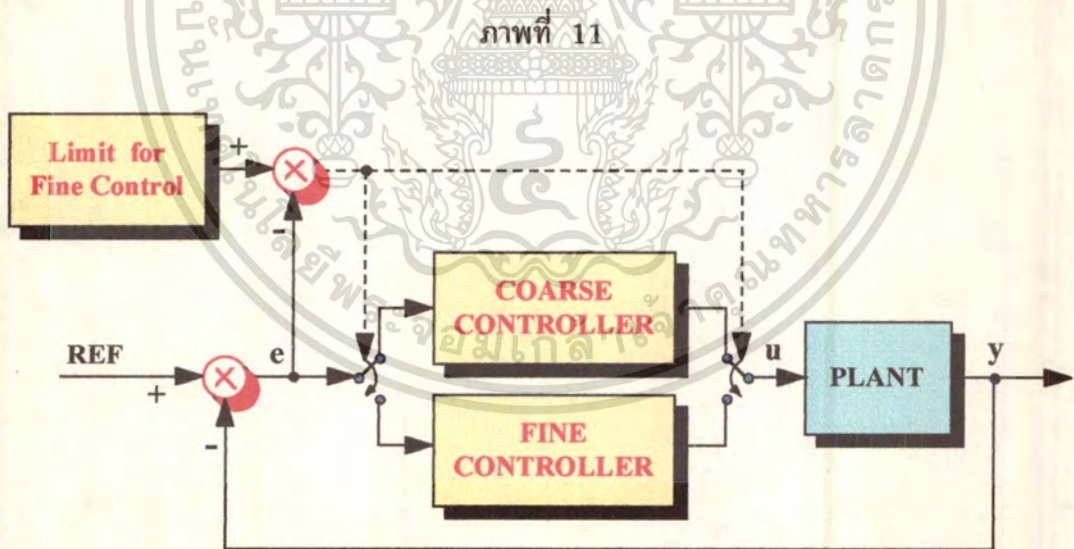
แสดงโครงสร้างของตัวควบคุม SOFLIC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบโครงสร้างระดับพื้นฐานของตัวควบคุม SOFLIC

ในการใช้งานระบบควบคุมพีซี ปัญหาสำคัญอย่างหนึ่งที่มักจะพบ คือการแกว่งของเอาต์พุตของระบบด้วยค่าที่จำกัดรอบสัญญาณอ้างอิงซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการประมาณค่าในขั้นตอนของการคอนโทรล ดังนั้นขนาดของการแกว่งนี้ จะถูกควบคุมได้โดยปรับระดับการคอนโทรล แต่การเพิ่มความละเอียดในการคอนโทรล จะมีผลทำให้ต้องใช้หน่วยความจำและเวลาในการคำนวณของไมโครคอมพิวเตอร์มากขึ้น วิธีการหนึ่งซึ่งสามารถแก้ปัญหานี้ได้ดี คือการใช้โครงสร้างของตัวควบคุมแบบ hybrid หรือ nest (hybrid or nested controller) [8,11]

โครงสร้างของตัวควบคุมแบบ hybrid หรือ nest อาจจะประกอบด้วยตัวควบคุมหลายๆ ชนิด หรือตัวควบคุมชนิดเดียวกัน แต่มีการเปลี่ยนสเกลของเอกภพสัมพัทธ์เป็นระดับชั้นทำงานร่วมกัน โดยตัวควบคุมแบบนี้ จะเปลี่ยนไปใช้ตัวควบคุมในระดับที่ละเอียดกว่า เมื่อสถานะของกระบวนการได้เข้าสู่หาช่วงที่กำหนดไว้ล่วงหน้า โครงสร้างของตัวควบคุมแบบ hybrid-nested แสดงในภาพที่ 11



แสดงโครงสร้างของตัวควบคุมแบบ hybrid-nested

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้โครงสร้างของตัวควบคุมแบบ hybrid-nested โดยแบ่งการควบคุมเป็น 2 ระดับ คือระดับหยาบและระดับละเอียด [8,11] และกำหนดขอบเขตในการเปลี่ยนไปใช้ตัวควบคุมในระดับละเอียด เมื่อค่าผิดพลาดของเอาต์พุตของระบบน้อยกว่า 10 % ของสัญญาณอ้างอิง เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมระดับหยาบ

ในการควบคุมระดับหยาบมีจุดประสงค์หลัก คือต้องการให้ค่าเอาต์พุตของระบบลู่เข้าสู่ค่าอ้างอิงเร็วที่สุด และไม่ส่งผลให้เกิดโอเวอร์ชูตที่สูงเกินไป จึงเลือกใช้โครงสร้างของตัวควบคุมพีซีแบบ PD ซึ่งสามารถควบคุมเอาต์พุตของกระบวนการให้เป็นไปตามจุดประสงค์ และมีโครงสร้างของตัวควบคุมไม่ซับซ้อนคือมีสองอินพุตและหนึ่งเอาต์พุต ทำให้สามารถคำนวณได้เร็วและใช้หน่วยความจำน้อย โครงสร้างของตัวควบคุมพีซีแบบ PD แสดงดังภาพที่ 12



การออกแบบโครงสร้างของตัวควบคุมพีซีแบบ PD ที่ใช้สำหรับการควบคุมระดับหยาบ ประกอบด้วยขั้นตอนการออกแบบดังนี้

1. การกำหนดจำนวนตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุม กำหนดตามโครงสร้างของตัวควบคุมพีซีแบบ PD ซึ่งประกอบด้วยสองอินพุตและหนึ่งเอาต์พุต โดยที่ตัวแปรอินพุตของตัวควบคุม คือตัวแปร สถานะที่อยู่ในรูปค่าผิดพลาด e (error) และค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด Δe (change of error) ของระบบควบคุม และตัวแปรเอาต์พุตของตัวควบคุมคือสัญญาณควบคุม u (control output)

2. การนอมอลไลซ์ตัวแปรอินพุตของตัวควบคุมให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ที่กำหนด จะต้องรู้ช่วงหรือเอกภพสัมพัทธ์ที่แท้จริงของตัวแปรอินพุต ซึ่งได้จากระดับสัญญาณป้อนกลับที่ได้จากการตรวจวัดสถานะของกระบวนการ

จากคุณลักษณะของกระบวนการที่ใช้ในการทดลอง สัญญาณป้อนกลับที่ได้จากการตรวจวัดค่าเอาต์พุตของกระบวนการจากอุปกรณ์เซ็นเซอร์เป็นสัญญาณกระแสไฟฟ้า 4-20 มิลลิแอมป์ เมื่อแปลงกระแสไฟฟ้าให้เป็นศักดาไฟฟ้า โดยใช้ความต้านทาน 250 โอห์ม และแปลงสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล โดยใช้ตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (Analog to Digital Converter : A/D) ขนาด 12 บิต จะได้ค่าดิจิทัลอยู่ภายในช่วง 2457-4095 จากการคำนวณเพื่อหาค่าของตัวแปรสถานะ e และ Δe ของระบบดังสมการ

$$e(nT) = REF - y(nT) \quad (3.1)$$

$$\Delta e(nT) = e(nT) - e(nT-T) \quad (3.2)$$

เมื่อ REF คือ สัญญาณอ้างอิง
 $y(nT)$ คือ สัญญาณป้อนกลับ ที่ได้จากการตรวจสอบสถานะของกระบวนการ ที่เวลา nT
 $e(nT)$ คือ ค่าผิดพลาดของระบบ ที่เวลา nT
 $e(nT-T)$ คือ ค่าผิดพลาดของระบบ ที่เวลา $nT-T$
 $\Delta e(nT)$ คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาดของระบบ ที่เวลา nT

จะได้ว่า ค่าของตัวแปรอินพุต e และ Δe จะอยู่ในช่วง ± 1638 ดังนั้น การนอมอลไลซ์ตัวแปรอินพุตให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ $X = [-1,1]$ จึงทำได้ดังสมการที่ (3.3)

$$x_{norm} = \frac{x}{1638} \quad (3.3)$$

เมื่อ x คือ ตัวแปรอินพุตของตัวควบคุม (e และ Δe)
 x_{norm} คือ ค่าที่ได้จากการนอมอลไลซ์ตัวแปรอินพุตให้อยู่ในช่วง $[0,1]$

3. การนอมอลไลซ์ตัวแปรเอาต์พุตให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ที่กำหนด จะต้องรู้ช่วงหรือเอกภพสัมพัทธ์ที่แท้จริงของตัวแปรเอาต์พุต ซึ่งสามารถหาได้จากระดับสัญญาณควบคุมที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการ

จากคุณลักษณะของกระบวนการที่ใช้ในการทดลอง สัญญาณควบคุมที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการเป็นสัญญาณกระแสไฟฟ้า 4-20 มิลลิแอมป์ เนื่องจากในการทดลองนี้ใช้ตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก (Digital to Analog Converter : D/A) ขนาด 12 บิต สำหรับสร้างค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณควบคุม ดังนั้น ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมจึงเป็นสัญญาณดิจิทัลค่า 0–4095 ในการออกแบบได้กำหนดเอกภพสัมพัทธ์ของตัวแปรเอาต์พุตของตัวควบคุม U ให้อยู่ในช่วง $[-0,100]$ จึงต้องทำการดีนอมอลไลซ์ตัวแปรเอาต์พุตให้อยู่ในช่วง $[0,4095]$ โดยใช้สมการที่ (3.4) แล้วจึงส่งออกไปเป็นสัญญาณควบคุมที่แท้จริง

$$u_{\text{denorm}} = \frac{u \times 4095}{100} \quad (3.4)$$

เมื่อ u คือ ตัวแปรเอาต์พุตของตัวควบคุม

u_{denorm} คือ ค่าที่ได้จากการดีนอมอลไลซ์ตัวแปรเอาต์พุตให้อยู่ในช่วง $[0,4095]$

4. การกำหนดค่าเกณฑ์ของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต

ค่าเกณฑ์ของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต คือสัมประสิทธิ์ในการถ่วงน้ำหนัก เพื่อกำหนดความสำคัญของตัวแปรสถานะแต่ละตัวของกระบวนการ โดยจะเป็นตัวกำหนดขอบเขตสูงสุดของตัวแปรสถานะแต่ละตัว

หลักเกณฑ์ทั่วไปในการกำหนดค่าเกณฑ์ของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต มีดังนี้

$$G_e = \alpha q / e_{\text{max}} \quad (3.5)$$

$$G_{\Delta e} = \beta q / \Delta e_{\text{max}} \quad (3.6)$$

$$G_u = \delta P_{i \text{ max}} / C_{o \text{ max}} \quad (3.7)$$

โดยที่ q คือ ระดับการควอนไทซ์

α, β, δ คือ ค่าพารามิเตอร์ในการปรับแต่งค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม

e_{max} คือ ค่า e สูงสุดที่ยอมรับได้ ในการควบคุม

Δe_{max} คือ ค่า Δe สูงสุดที่ยอมรับได้ ในการควบคุม

$P_{i \text{ max}}$ คือ ค่าอินพุตสูงสุดของกระบวนการ

$C_{o \text{ max}}$ คือ ค่าเอาต์พุตสูงสุดของตัวควบคุม

ในวิทยานิพนธ์นี้ ต้องการออกแบบให้ตัวควบคุมสามารถปรับแต่งค่าเกณฑ์ของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตด้วยตนเอง โดยการเรียนรู้จากสมรรถนะของระบบ จึงได้กำหนดค่าเริ่มต้นของค่าเกณฑ์แต่ละตัว ตามสมการที่ (3.5)–(3.7) โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 q &= 300 \\
 e_{\max} &= 0.1 \\
 \Delta e_{\max} &= 0.1 \\
 P_{i \max} &= 4095 \\
 C_{o \max} &= 4095 \\
 \alpha, \beta, \delta &= 1
 \end{aligned}$$

สำหรับการกำหนดวิธีการปรับแต่งค่าเกณฑ์ของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตนั้น จะอยู่ในส่วนของ การออกแบบโครงสร้างระดับการปรับแต่งพารามิเตอร์ ซึ่งจะอธิบายในส่วนต่อไป

5. การเลือกวิธีและระดับการควอนไทซ์

การกำหนดระดับการควอนไทซ์ จะขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ออกแบบ และข้อจำกัดทางฮาร์ดแวร์ของอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการสร้างตัวควบคุม กรณีที่ต้องการให้มีความถูกต้องในการควบคุมสูง จะต้องใช้ระดับการควอนไทซ์สูง แต่ขณะเดียวกันก็จะต้องใช้เวลาและหน่วยความจำในการคำนวณมาก ดังนั้น ในการออกแบบจึงต้องเลือกระดับที่เหมาะสม ระหว่างความถูกต้องในการควบคุมและข้อจำกัดทางฮาร์ดแวร์

จากการทดลองใช้วิธีการควอนไทซ์แบบลอการิทึม เพื่อลดการแกว่งของเอาต์พุตรอบสัญญาณอ้างอิง โดยไม่ต้องเพิ่มระดับการควอนไทซ์ [7] พบว่าสมรรถนะของระบบควบคุมดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วิธีการควอนไทซ์แบบเชิงเส้นโดยใช้ระดับการควอนไทซ์เท่ากัน แต่เมื่อทำการทดลองต่อไปโดยลดค่าความถี่ในการสุ่มสัญญาณลง ปรากฏว่าผลตอบสนองของระบบจะมีการแกว่งรอบสัญญาณอ้างอิงมากขึ้น นอกจากนี้การควอนไทซ์แบบลอการิทึม จะใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าการควอนไทซ์แบบเชิงเส้น ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ใช้หลักการของตัวควบคุมแบบ hybrid-nested แก้ปัญหาเรื่องการแกว่งของเอาต์พุตที่สภาวะคงตัว จึงไม่ต้องใช้ความละเอียดในการควอนไทซ์มาก ในที่นี้จึงใช้วิธีการควอนไทซ์แบบเชิงเส้น เพื่อความสะดวกในการคำนวณ และได้กำหนดระดับการควอนไทซ์เท่ากับ 300

6. การเลือกวิธีการฟัชซิฟิเคชัน

จะขึ้นอยู่กับลักษณะของสัญญาณอินพุตของตัวควบคุม ในที่นี้คือสัญญาณป้อนกลับจากกระบวนการซึ่งได้จากอุปกรณ์เซ็นเซอร์ หลักเกณฑ์ในการเลือกวิธีการฟัชซิฟิเคชันมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ในกรณีที่สัญญาณที่วัดได้เป็นสัญญาณซิงเกิลตันและมีระดับของสัญญาณรบกวนต่ำ ควรเลือกวิธีการพีชซีพีเคชัน โดยใช้พีชซีซิงเกิลตัน เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่าย และได้ผลดีที่สุด
- ในกรณีที่สัญญาณที่วัดได้มีระดับของสัญญาณนอยส์สูง ควรเลือกวิธีการพีชซีพีเคชัน โดยใช้พีชซีเอ็มเบอร์ ซึ่งจะได้ผลดีกว่า เนื่องจากการพีชซีพีเคชัน โดยใช้พีชซีเอ็มเบอร์ มีความคงทนต่อสัญญาณนอยส์มากกว่าการใช้พีชซีซิงเกิลตัน แต่ในการพีชซีพีเคชัน โดยใช้วิธีนี้จะใช้เวลาในการคำนวณมากกว่า
- ในกรณีที่สัญญาณที่วัดได้เป็นสัญญาณในรูปการกระจายทางสถิติ ควรเลือกวิธีการพีชซีพีเคชันโดยใช้ไฮบริดเอ็มเบอร์ ซึ่งเป็นพีชซีเอ็มเบอร์ที่มีสมาชิกอยู่ในรูปของการกระจายทางสถิติ

ในระบบควบคุมที่ใช้ในการทดลองนี้ สัญญาณที่วัดได้เป็นสัญญาณซิงเกิลตัน และมีระดับของสัญญาณรบกวนไม่สูงมากนัก จึงเลือกใช้วิธีการพีชซีพีเคชัน โดยใช้พีชซีซิงเกิลตัน ดังแสดงในสมการที่ (3.8)

$$\mu_A(u) = \begin{cases} 1 & ; u = u_0 \\ 0 & ; u \neq u_0 \end{cases} \quad (3.8)$$

7. การกำหนดจำนวนพีชซีเซตของตัวแปรอินพุต จะเป็นการกำหนดความซับซ้อนของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุตและตัวแปรเอาต์พุต ซึ่งเป็นการกำหนด control hypersurface โดยจำนวนพีชซีเซตของตัวแปรอินพุตแต่ละตัว จะมีผลต่อขนาดของฐานกฎการควบคุม ดังสมการต่อไปนี้

$$M = N_e \times N_{\Delta e} \quad (3.9)$$

โดยที่ M คือ ขนาดของฐานกฎการควบคุม
 N_e คือ จำนวนเทอมของตัวแปรอินพุต e
 $N_{\Delta e}$ คือ จำนวนเทอมของตัวแปรอินพุต Δe

ในการกำหนดจำนวนพีชซีเซตของตัวแปร ควรกำหนดให้เป็นจำนวนคี่ เพื่อให้มีพีชซีเซตหนึ่งเซตที่อยู่ตรงกลางของเอกภพสัมพัทธ์ โดยปกติจะใช้ 5 หรือ 7 เซต

ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ออกแบบตัวควบคุมให้มีจำนวนพีชซีเซตของตัวแปรอินพุต e และ Δe เท่ากับ 7 เซต เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. การกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุต

การกำหนดรูปร่างของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุต จะเป็นการกำหนดความสัมพันธ์ในการแมปปีงค่าของอินพุตในเอกภพสัมพัทธ์กับฟuzzyเซตของตัวแปรอินพุต ถ้าต้องการให้ความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น ควรจะกำหนดรูปร่างของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกเป็นแบบเชิงเส้น เช่น รูปสามเหลี่ยมหรือรูปสี่เหลี่ยมคางหมู แต่ถ้าต้องการให้ความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้น ควรกำหนดรูปร่างของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกแบบไม่เป็นเชิงเส้น เช่น รูปประฆังคว่ำ

การกำหนดการกระจายของฟuzzyเซตบนเอกภพสัมพัทธ์ สามารถกำหนดได้ทั้งแบบที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ออกแบบ โดยบริเวณที่มีความหนาแน่นของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกสูง จะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุตและตัวแปรเอาต์พุตที่มีความซับซ้อนมากกว่าบริเวณที่มีความหนาแน่นของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกต่ำ

การซ้อนทับกัน (overlap) ของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของตัวควบคุมฟuzzy เนื่องจากในการอินเฟอเรนซ์แบบฟuzzy ต้องการให้เกิดกิริยาระหว่างกันของกฎการควบคุมมากกว่า 1 กฎ การกำหนดเปอร์เซ็นต์การซ้อนทับกันจะขึ้นอยู่กับความคลุมเครือหรือความซับซ้อนของระบบ และการออกแบบให้ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตมีการซ้อนทับกันมากกว่า 2 เซต จะทำให้ control hypersurface มีความเรียบมากขึ้น แต่ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของกฎการควบคุมใดๆ จะมีผลกระทบต่อควบคุมของกฎที่อยู่ติดกันมาก ทำให้เกิดการรบกวนกันของกฎการควบคุม [6] ดังนั้น ในการออกแบบฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุต จึงไม่ควรให้มีการซ้อนทับกันของฟuzzyเซตมากกว่า 2 เซต

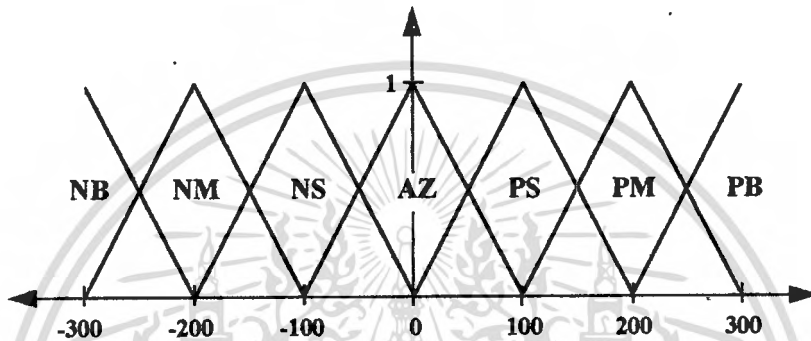
การกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุต [13] มีแนวทางที่สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

- ในกรณีที่ต้องการให้ใช้เวลาในการคำนวณน้อย ควรกำหนดรูปร่างของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกเป็นรูปสามเหลี่ยม หรือสี่เหลี่ยมคางหมู
- การกำหนดการกระจายของฟuzzyเซตบนเอกภพสัมพัทธ์ ควรกำหนดให้สมมาตรกัน
- การกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุต ควรกำหนดให้มีการซ้อนทับกันของฟuzzyเซตที่อยู่ติดกัน เพื่อให้มีการเกิดกิริยาระหว่างกันของกฎการควบคุม และเพื่อยืนยันว่าจะมีกฎการควบคุมอย่างน้อยหนึ่งกฎ รองรับสำหรับใช้สร้างสัญญาณควบคุมในทุกสถานะของอินพุต ซึ่งจะแสดงถึงความสมบูรณ์ของฐานกฎการควบคุม โดยปกติจะออกแบบให้มีเปอร์เซ็นต์การซ้อนทับกันของฟuzzyเซต ประมาณ 15–25 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ออกแบบตัวควบคุม โดยกำหนดให้รูปร่างของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟuzzyเซตของตัวแปรอินพุต e และ Δe เป็นรูปสามเหลี่ยม โดยมีการกระจายของฟuzzyเซตแบบเชิงเส้น และมีการซ้อนทับกันของฟuzzyเซต 25 % ดังแสดงในภาพที่ 13

ภาพที่ 13



แสดงฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟuzzyเซตของตัวแปรอินพุต e และ Δe

โดยที่ NB = Negative Big , PB = Positive Big
 NM = Negative Medium , PM = Positive Medium
 NS = Negative Small , PS = Positive Small
 AZ = Almost Zero

9. การกำหนดจำนวนฟuzzyเซตของตัวแปรเอาต์พุตบนเอกภพสัมพัทธ์ เป็นการกำหนดความละเอียดของผลการควบคุม แต่จะไม่เป็นการกำหนดความละเอียดของสัญญาณควบคุม เนื่องจากความละเอียดของสัญญาณควบคุมจะขึ้นอยู่กับวิธีการดีฟuzzyฟิเคชัน

10. การกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุต จะมีแนวทางคล้ายกันกับในการกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุต แต่จากการทดลอง พบว่าผลการควบคุมจะขึ้นอยู่กับกฎการควบคุมมากกว่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุต ในที่นี้ จึงกำหนดให้ฟuzzyเซตของตัวแปรเอาต์พุตเป็นฟuzzyซิงเกิลตัน เพื่อความสะดวกในการคำนวณ และกำหนดให้จำนวนฟuzzyเซตเท่ากับ 201 เซต โดยให้จุดกึ่งกลางของฟuzzyเซตแต่ละเซต อยู่ที่ค่าจำนวนเต็มในช่วง -100 ถึง 100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. การกำหนดรูปแบบของกฎการควบคุม

รูปแบบทั่วไปของกฎการควบคุมจะอยู่ในรูปเงื่อนไข IF THEN โดยในส่วนเหตุเป็นการกำหนดเงื่อนไขของค่าตัวแปรอินพุตในรูปฟัซซีเซต และในส่วนผลแสดงถึงผลลัพธ์ คือค่าของตัวแปรเอาต์พุตในรูปฟัซซีเซต เมื่อตัวแปรอินพุตเป็นไปตามเงื่อนไขในส่วนเหตุ รูปแบบของกฎการควบคุมที่ใช้กันทั่วไปเป็นกฎที่ถูกนิยามโดย Professor Mamdani มีรูปแบบดังนี้

$$\text{IF } (E \text{ is } E^k) \text{ AND } (\Delta E \text{ is } \Delta E^k) \text{ THEN } U \text{ is } U^k ; k = 1, \dots, M \quad (3.10)$$

โดยที่ $E, \Delta E$ คือ ตัวแปรฟัซซีอินพุตที่ได้จากการทำฟัซซีฟิเคชันตัวแปรสถานะ e และ Δe

U คือ ตัวแปรฟัซซีเอาต์พุต

$E^k, \Delta E^k, U^k$ คือ ฟัซซีเซตของตัวแปร $E, \Delta E, U$ ตามลำดับ

M คือ จำนวนกฎการควบคุมทั้งหมด ในที่นี้ $M = 7 \times 7 = 49$ กฎ

ในการคำนวณ กฎการควบคุมจะถูกแทนด้วยความสัมพันธ์ฟัซซีซึ่งเป็นผลคูณคาร์ทีเซียนระหว่างฟัซซีเซตของตัวแปรอินพุตในส่วนเหตุของกฎ กับฟัซซีเซตของตัวแปรเอาต์พุตในส่วนผลของกฎ รูปแบบของความสัมพันธ์ R ซึ่งแทนกฎการควบคุมฟัซซี แสดงได้ดังสมการที่ (3.11) และสมการที่ (3.12)

$$R = \prod_{k=1}^M (E^k \times \Delta E^k) \times U^k \quad (3.11)$$

$$\text{โดยที่ } \mu_R(E, \Delta E, U) = \bigvee_{1 \leq k \leq M} \left(\left(\mu_{E^k}(E^k) \wedge \mu_{\Delta E^k}(\Delta E^k) \right) \wedge \mu_{U^k}(U^k) \right) \quad (3.12)$$

สำหรับการกำหนดวิธีการปรับแต่งกฎการควบคุมนั้น จะอยู่ในส่วนการออกแบบโครงสร้างระดับการปรับแต่งพารามิเตอร์ ซึ่งจะอธิบายในส่วนต่อไป

12. การเลือกวิธีการอินเฟอเรนซ์ จะขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้ตัวปฏิบัติการ t-norm และ s-norm ในการทำ CRI วิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือวิธี CRI ของ Zadeh เนื่องจากสะดวกและใช้เวลาในการคำนวณน้อย โดยจะใช้ตัวปฏิบัติการ max และ min ในการปฏิบัติการ s-norm และ t-norm ตามลำดับ ซึ่งสามารถหาค่าเอาต์พุตแบบฟัซซี U' ได้จากสมการที่ (3.13)

$$U' = X' \circ R = \left\{ \left(u, \max_{X' \in X} \left\{ \min \left[\mu_{X'}(x), \mu_R(x, u) \right] \right\} \right) \mid x \in X, u \in U \right\} \quad (3.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการอินเฟอเรนซ์แบบฟัชซี โดยใช้ตัวปฏิบัติการที่ไม่เป็นเชิงเส้น จะมีผลทำให้ control hypersurface ไม่เป็นเชิงเส้นด้วย ดังนั้น ถ้าต้องการให้ control hypersurface เป็นเชิงเส้น ควรจะเลือกใช้ตัวปฏิบัติการที่เป็นเชิงเส้น เช่น sum-product แต่ทั้งนี้จะต้องสัมพันธ์กับกรกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต การเลือกวิธีการฟัชซีฟิเคชัน และวิธีการดีฟัชซีฟิเคชัน เนื่องจากหลักการของการควบคุมแบบฟัชซีเป็นการควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้น ในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้วิธี CRI ของ Zadeh

13. การเลือกวิธีการดีฟัชซีฟิเคชัน จะเป็นการกำหนดความละเอียดของสัญญาณเอาต์พุต โดยจะต้องสัมพันธ์กับการกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตและตัวแปรเอาต์พุต การเลือกวิธีการดีฟัชซีฟิเคชัน จะขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ออกแบบ ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดี-ข้อเสียดังต่อไปนี้

- วิธี Max-Procedure เป็นวิธีการที่สามารถทำได้ง่ายและรวดเร็วที่สุด แต่จะให้สัญญาณควบคุมที่หยาบมาก จึงไม่เหมาะสมสำหรับการทำงาน
- วิธี MOM เป็นวิธีการที่สามารถทำได้ง่ายและรวดเร็ว ซึ่งการดีฟัชซีฟิเคชันด้วยวิธีนี้จะได้ผลเช่นเดียวกับการกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตเป็นฟัชซีซิงเกิลตัน เนื่องจากค่าของตัวแปรอินพุตที่ตำแหน่งอื่นที่มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกต่ำกว่าค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกสูงสุด จะไม่มีผลต่อค่าของเอาต์พุต วิธีนี้จะให้สัญญาณควบคุมหยาบและผลการควบคุมไม่ดีเท่าที่ควร แต่จะถูกเลือกใช้ในกรณีที่ต้องการใช้เวลาในการคำนวณน้อย และไม่ต้องการความถูกต้องมากนัก
- วิธี COG เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากเป็นการหาจุดศูนย์กลางสำหรับเป็นตัวแทนของเอาต์พุตที่แท้จริง โดยพิจารณาผลจากอินพุตทุกตัว ทำให้ได้ค่าที่ถูกต้องกว่าวิธีอื่น แต่จะใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าวิธีอื่น ๆ
- วิธี FM เป็นวิธีที่ตัดแปลงมาจากวิธี COG โดยใช้ระดับการควอนไทซ์ที่น้อยกว่า เพื่อลดเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ในการดีฟัชซีฟิเคชันด้วยวิธีนี้ จะได้ผลเช่นเดียวกับการกำหนดค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุตเป็นฟัชซีซิงเกิลตัน แต่มีข้อจำกัดคือ ควรใช้กับกรณีที่ออกแบบตัวควบคุม โดยกำหนดค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุตแบบสมมาตรเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากการดีฟัชซีฟิเคชันด้วยวิธีนี้จะใช้ค่าที่จุดกึ่งกลางของฟัชซีเซตของตัวแปรเอาต์พุตเพื่อเป็นตัวแทนของแต่ละเซต

ในวิทยานิพนธ์นี้ กำหนดให้ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุตเป็นฟัชซีซิงเกิลตัน จึงเลือกใช้วิธี FM ซึ่งจะได้ผลเช่นเดียวกับการใช้วิธี COG เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมระดับละเอียด

การควบคุมระดับละเอียดมีจุดประสงค์หลักของการควบคุม คือต้องการให้เอาต์พุตของระบบเข้าสู่ค่าอ้างอิง และไม่เกิดค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้โครงสร้างของตัวควบคุมพีซีแบบ PID เพื่อแก้ปัญหาเรื่องค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัวของระบบ แต่เนื่องจากโครงสร้างของตัวควบคุมพีซีแบบ PID เป็นระบบที่มีสามอินพุต ทำให้ฐานกฎการควบคุมมี 3 มิติ จึงมีจำนวนกฎการควบคุมมาก ซึ่งขนาดของฐานกฎการควบคุมจะเท่ากับ N^3 (เมื่อ N คือจำนวนพีซีเซตของแต่ละตัวแปรอินพุต) ทำให้ต้องใช้เวลาและหน่วยความจำในการคำนวณมาก จึงไม่เหมาะสมในการนำไปใช้ในทางปฏิบัติ

จากโครงสร้างของตัวควบคุมพีซีแบบ PID ซึ่งมีตัวแปรอินพุตคือ e , Δe , Σe ซึ่งในการคำนวณเทอม Σe จะต้องใช้หน่วยความจำมาก จึงทำการแปลงความสัมพันธ์ของระบบให้อยู่ในรูปของ e , Δe , $\Delta^2 e$ กับ Δu โดยการหาอนุพันธ์ของความสัมพันธ์ระหว่าง e , Δe , Σe กับ u [11] ดังนั้น การทำงานของตัวควบคุมพีซีแบบ PID จึงเป็นการแมปฟังก์ชันตัวแปร e , Δe , $\Delta^2 e$ กับ u แบบไม่เป็นเชิงเส้นบนระนาบ $E \times \Delta E \times \Delta^2 E \rightarrow U$ สามารถเขียนแทนได้ด้วยฟังก์ชันแบบไม่เป็นเชิงเส้นดังนี้

$$u = f(e, \Delta e, \Delta^2 e) \quad (3.14)$$

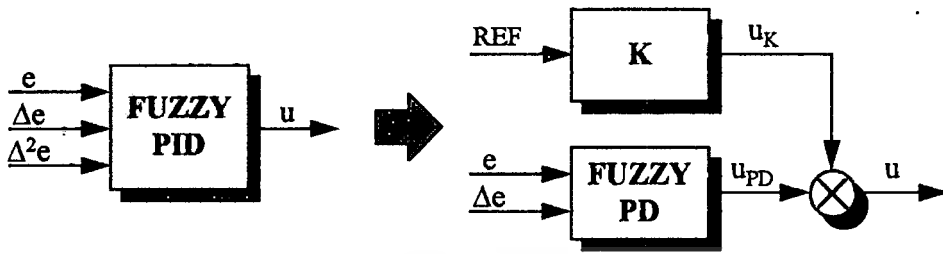
จากสมการที่ (3.14) สามารถเขียนแยกเป็นฟังก์ชันที่สัมพันธ์กับตัวแปรแต่ละตัวได้ดังนี้

$$u = f_1(e, \Delta e, \Delta^2 e) e + f_2(e, \Delta e, \Delta^2 e) \Delta e + f_3(e, \Delta e, \Delta^2 e) \Delta^2 e \quad (3.15)$$

ในปี ค.ศ. 1990 Kwok et al จึงนำเสนอวิธีการแยกตัวควบคุมพีซีแบบ PID ออกเป็นตัวควบคุมพีซีแบบ PD ต่อขนานกับตัวควบคุมแบบ P, I หรือ PI [9-11]

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเอาวิธีการของ Kwok et al มาประยุกต์ใช้งาน โดยเลือกโครงสร้างของตัวควบคุมซึ่งประกอบด้วยตัวควบคุมพีซีแบบ PD ต่อขนานกับตัวควบคุมแบบ P ที่มีค่าเกนเท่ากับส่วนกลับของค่าเกนที่สภาวะคงตัวของกระบวนการสำหรับใช้ในการควบคุมระดับละเอียด โครงสร้างของตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมระดับละเอียดแสดงได้ดังในภาพที่ 14 เหตุผลในการเลือกใช้ตัวควบคุมแบบ P ในการแก้ไขค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัวเนื่องจากตัวควบคุมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้จะต้องสามารถเรียนรู้ เพื่อปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยตนเอง ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ P นี้มีเพียงตัวเดียว และสามารถปรับแต่งได้ง่าย โดยการเรียนรู้จากค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัวของระบบ

ภาพที่ 14



แสดงการใช้ตัวควบคุมพีซีแบบ PD ต่อขนานกับตัวควบคุมแบบ P
แทนการใช้ตัวควบคุมพีซีแบบ PID

1. การออกแบบโครงสร้างของตัวควบคุมพีซีแบบ PD สำหรับการควบคุมระดับละเอียด

ในการออกแบบโครงสร้างของตัวควบคุมพีซีแบบ PD สำหรับการควบคุมระดับละเอียด จะใช้หลักการเดียวกับการออกแบบตัวควบคุมระดับหยาบ แต่เนื่องจากการควบคุมระดับละเอียด ต้องการความถูกต้องมากกว่า จึงต้องกำหนดค่าเกนของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต โดยใช้ค่าของ e_{\max} และ Δe_{\max} ที่ละเอียดมากขึ้น และจากการกำหนดขอบเขตของการควบคุมระดับละเอียด ไว้ที่ 10% ของสัญญาณอ้างอิง ทำให้ค่าสัญญาณอินพุตมีค่าน้อยกว่า 10% ของสัญญาณอ้างอิง ดังนั้นการนอมอลไลซ์ตัวแปรอินพุตให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ที่กำหนด จึงใช้สมการที่แตกต่างกับ สมการในการควบคุมระดับหยาบ ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมพีซีแบบ PD สำหรับการควบคุมระดับละเอียด สามารถสรุปได้ดังนี้

1.1 การกำหนดจำนวนตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุม จะเหมือนกับ ในการควบคุมระดับหยาบ คือมีตัวแปรอินพุตของตัวควบคุมสองตัว คือตัวแปรสถานะในรูปของ ค่าผิดพลาด e และค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด Δe ของระบบ และมีตัวแปรเอาต์พุตของ ตัวควบคุมหนึ่งตัว คือสัญญาณควบคุม u

1.2 การนอมอลไลซ์ตัวแปรอินพุตให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ที่กำหนด จะต้องรู้ช่วง หรือเอกภพสัมพัทธ์ที่แท้จริงของตัวแปรอินพุต และจากการตั้งขอบเขตของการควบคุมระดับ ละเอียดไว้ที่ 10% ของสัญญาณอ้างอิง ทำให้ค่าของสัญญาณอินพุตมีค่าน้อยกว่า 10% ของ สัญญาณอ้างอิง ดังนั้นเอกภพสัมพัทธ์ที่แท้จริงของตัวแปรอินพุตจะเท่ากับ 10% ของในกรณี ตัวควบคุมระดับหยาบ คือค่าของตัวแปรอินพุต e และ Δe จะอยู่ในช่วง ± 164 ดังนั้น ในการ นอมอลไลซ์ตัวแปรอินพุตให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ $X = [-1, 1]$ จึงทำได้โดยใช้สมการที่ (3.16)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ $x_{\text{norm}} = \frac{x}{164}$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (3.16) ใดๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ x คือ ตัวแปรอินพุตของตัวควบคุม (e และ Δe)
 x_{norm} คือ ค่าที่ได้จากการนอมอลไลซ์ตัวแปรอินพุตให้อยู่ในช่วง $[0,1]$

1.3 การคืนนอมอลไลซ์ตัวแปรเอาต์พุตให้อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ที่กำหนด จะทำเหมือนกับการควบคุมระดับหยاب คือทำการคืนนอมอลไลซ์ตัวแปรเอาต์พุต โดยใช้สมการที่ (3.4)

1.4 การกำหนดค่าเกนของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต เนื่องจากการควบคุมระดับละเอียด ต้องการความถูกต้องมากกว่าระดับหยاب จึงกำหนดค่าเริ่มต้นของค่าเกนของตัวควบคุมพีซี PD ที่ใช้สำหรับการควบคุมระดับละเอียด ตามสมการที่ (3.5)-(3.7) โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

$$\begin{aligned} q &= 300 \\ e_{max} &= 0.01 \\ e_{max} &= 0.01 \\ P_{i\ max} &= 4095 \\ C_{o\ max} &= 4095 \\ \alpha, \beta, \delta &= 1 \end{aligned}$$

สำหรับการกำหนดวิธีการปรับแต่งค่าเกนของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต จะอยู่ในส่วนการออกแบบโครงสร้างระดับการปรับแต่งพารามิเตอร์ ซึ่งจะอธิบายในส่วนต่อไป

1.5 การเลือกวิธีและระดับการควอนไทซ์ เลือกวิธีการควอนไทซ์เป็นแบบเชิงเส้น และกำหนดระดับการควอนไทซ์สูงสุดเท่ากับ 300 เพื่อจะได้ใช้อัลกอริทึมในการคำนวณแบบเดียวกับการควบคุมระดับหยاب

1.6 การเลือกวิธีการพีซีพีเคชัน เลือกวิธีการพีซีพีเคชัน โดยใช้พีซีซิงเกิลตัน เหมือนกันกับที่ใช้การควบคุมระดับหยاب เพื่อจะได้ใช้อัลกอริทึมในการคำนวณแบบเดียวกันกับการควบคุมระดับหยاب

1.7 การกำหนดจำนวนพีซีเซต และฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุต กำหนดเช่นเดียวกันกับการออกแบบตัวควบคุมระดับหยاب คือกำหนดให้จำนวนพีซีเซตของไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวแปรอินพุต e และ Δe เท่ากับ 7 เซต และกำหนดให้รูปร่างของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกเป็นรูปสามเหลี่ยม โดยมีการกระจายของฟัซซีเซตแบบเชิงเส้น และมีการซ้อนทับกันของฟัซซีเซตดังแสดงในภาพที่ 13 เพื่อให้สามารถใช้อัลกอริทึมในการคำนวณแบบเดียวกันได้

1.8 การกำหนดจำนวนฟัซซีเซต และฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุต กำหนดให้เป็นฟัซซีซิงเกิลตัน และมีจำนวนฟัซซีเซตของตัวแปรเอาต์พุตเท่ากับ 201 เซต โดยให้จุดกึ่งกลางของแต่ละเซตอยู่ที่ค่าจำนวนเต็ม -100 ถึง 100 เหมือนกับการควบคุมระดับหยاب

1.9 การกำหนดรูปแบบของกฎการควบคุม จะกำหนดเหมือนกับในตัวควบคุมระดับหยاب โดยที่ฐานกฎการควบคุมจะแยกกันเป็นคนละชุดกับในการควบคุมระดับหยاب

สำหรับการกำหนดวิธีการปรับแต่งกฎการควบคุมนั้น จะอยู่ในส่วนการออกแบบโครงสร้างระดับการปรับแต่งพารามิเตอร์ ซึ่งจะอธิบายในส่วนต่อไป

1.10 การกำหนดวิธีการอินเฟอเรนซ์ เลือกใช้วิธี CRI ของ Zadeh เหมือนกันกับการควบคุมระดับหยاب

1.11 การกำหนดวิธีการดีฟัซซีฟิเคชัน เลือกใช้วิธี FM เช่นเดียวกันกับการควบคุมระดับหยاب

2. การออกแบบตัวควบคุมแบบ P ที่ใช้ในการควบคุมระดับละเอียด

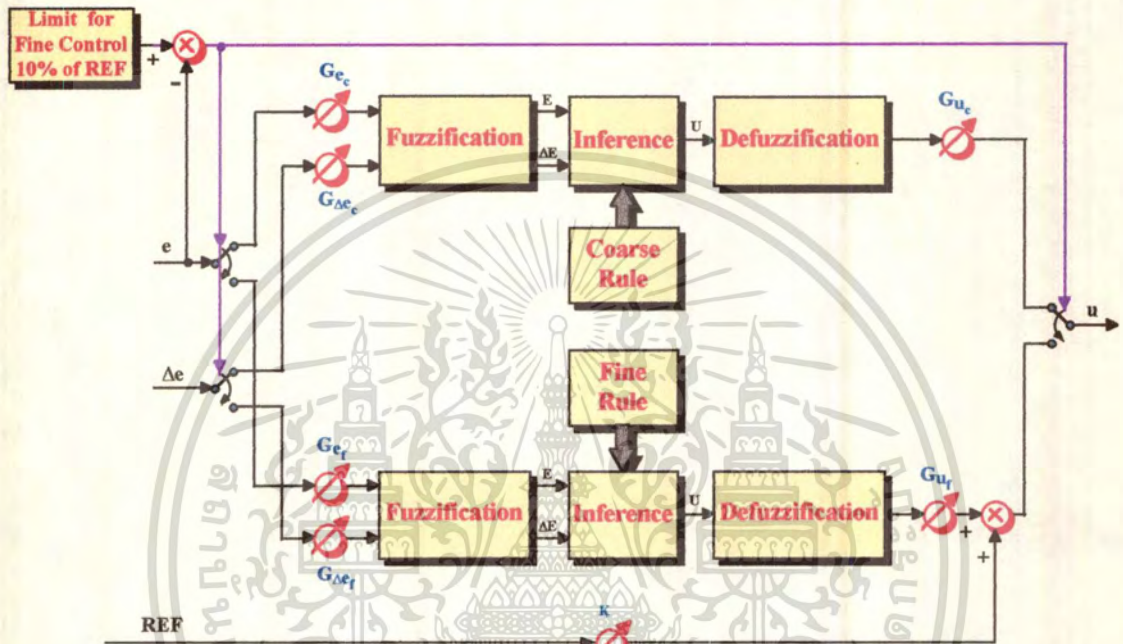
ตามหลักการของ Kwok et al [9-11] ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ P จะเท่ากับส่วนกลับของค่าเกณฑ์สถานะคงตัวของกระบวนการ แต่เนื่องจากต้องการให้ตัวควบคุมนี้สามารถออกแบบได้ โดยไม่ต้องใช้ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ จึงออกแบบโครงสร้างส่วนนี้ให้สามารถเรียนรู้และปรับแต่งได้ด้วยตนเอง โดยการทำงานของโครงสร้างระดับการปรับแต่งพารามิเตอร์ ซึ่งจะอธิบายในส่วนต่อไป

การกำหนดค่าเกณฑ์เริ่มต้นของตัวควบคุมแบบ P ในกรณีที่ทราบค่าเกณฑ์สถานะคงตัวของกระบวนการ ให้กำหนดค่าเกณฑ์เริ่มต้นเท่ากับส่วนกลับของค่าเกณฑ์สถานะคงตัวของกระบวนการ และกรณีที่ไมทราบค่าเกณฑ์สถานะคงตัวของกระบวนการ ให้กำหนดค่าเกณฑ์เริ่มต้นเท่ากับอัตราส่วนระหว่างค่าอินพุตสูงสุดกับค่าเอาต์พุตสูงสุดของกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวิธีการออกแบบทั้งหมดที่ได้ที่กล่าวถึงข้างต้น สามารถสรุปโครงสร้างระดับพื้นฐานของตัวควบคุม SOFLIC ได้ดังภาพที่ 15

ภาพที่ 15



แสดงโครงสร้างระดับพื้นฐานของตัวควบคุม SOFLIC

การออกแบบโครงสร้างระดับปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุม SOFLIC

การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซี สามารถทำได้ 3 วิธี คือวิธีการปรับแต่งค่าเกนของตัวควบคุม วิธีการปรับแต่งกฎการควบคุม และวิธีการปรับแต่งฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุม

จากการทดลองพบว่า ในการแก้ไขสมรรถนะระยะสั้นของระบบควบคุม โดยการปรับแต่งฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต จะมีผลน้อยกว่าการปรับแต่งกฎการควบคุม และในการปรับแต่งค่าเกนของตัวควบคุม จะมีผลต่อสมรรถนะระยะยาวของระบบควบคุม

ในวิทยานิพนธ์นี้ ใช้วิธีปรับแต่งกฎการควบคุมเพื่อแก้ไขสมรรถนะระยะสั้น และใช้วิธีปรับแต่งค่าเกนของตัวควบคุมเพื่อแก้ไขสมรรถนะระยะยาวของระบบ ภาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างระดับปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุม SOFLIC แบ่งได้เป็นส่วน 2 ส่วน คือ โครงสร้างส่วนปรับแต่งกฎการควบคุม และโครงสร้างส่วนปรับแต่งค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม

การออกแบบโครงสร้างส่วนปรับแต่งกฎการควบคุม

ในการปรับแต่งกฎการควบคุมมีจุดประสงค์เพื่อแก้ไขสมรรถนะระยะสั้นของระบบ ซึ่งมีแนวทางในการปรับแต่ง คือการบังคับให้ตัวแปรสถานะ e และ Δe ของระบบเข้าสู่ศูนย์อย่างรวดเร็วที่สุด ในการวัดสมรรถนะระยะสั้น เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการปรับแต่งกฎการควบคุม จะวัดจากตัวแปรสถานะ e และ Δe โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$SPM(nT) = \frac{(G_e \times e(nT)) + (G_{\Delta e} \times \Delta e(nT))}{1638} \times 100 \quad (3.17)$$

ถ้า $(SPM(nT) > 100)$ แล้ว $SPM(nT) = 100$

ถ้า $(SPM(nT) < -100)$ แล้ว $SPM(nT) = -100$

โดยที่ SPM คือ ค่าสมรรถนะระยะสั้นของระบบควบคุม

การปรับแต่งกฎการควบคุม จะใช้ค่าของ SPM ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (3.17) มาทำการปรับแต่งส่วนผลของกฎที่ใช้ในการควบคุมที่เวลา $nT - mT$ โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$R((n+1)T) = \{ R(nT) \cup (-R'(nT - mT)) \} \cup R''(nT - mT) \quad (3.18)$$

โดยที่ nT คือ เวลาที่สถานะปัจจุบัน

mT คือ เวลาในการชดเชยช่วงเวลาไร้ผลตอบสนองของกระบวนการ

$R((n+1)T)$ คือ กฎที่ทำการปรับแต่งแล้ว

$R'(nT - mT)$ คือ กฎที่ใช้ในการควบคุมที่เวลา $nT - mT$

$R''(nT - mT)$ คือ กฎที่ได้จากการปรับปรุงส่วนผลของ $R'(nT - mT)$

กำหนดให้กฎ $R'(nT - mT)$ ที่ใช้ในการควบคุมที่เวลา $nT - mT$ มีรูปแบบดังนี้

$$R'(nT - mT) : IF (E \text{ is } E^k) \text{ AND } (\Delta E \text{ is } \Delta E^k) \text{ THEN } U \text{ is } U^k \quad (3.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เขียนได้เห็นว่าเว็บไซต์แห่งนี้เป็นการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วจะสามารถหากฎ $R''(nT-mT)$ ที่ปรับปรุงมาจากกฎ $R'(nT-mT)$ โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$R''(nT-mT) : \text{IF } (E \text{ is } E^k) \text{ AND } (\Delta E \text{ is } \Delta E^k) \text{ THEN } U \text{ is } NU^k \quad (3.20)$$

$$\text{โดยที่ } NU^k = U^k + (\text{SPM}(nT) \times \mu_{U^k}(u)) \quad (3.21)$$

จากสมการการปรับแต่งกฎการควบคุม (3.18) จะมีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งคือ mT ซึ่งเป็นค่าเวลาในการชดเชยช่วงเวลาที่ไร้ผลตอบสนองของกระบวนการ ซึ่งในการกำหนดค่า mT จะกำหนดตามเวลาไร้ผลตอบสนอง (dead time) ของกระบวนการ จากความรู้ทางระบบควบคุมทราบว่าเวลาไร้ผลตอบสนองของกระบวนการ จะมีผลต่อสมรรถนะของระบบป้อนกลับคือทำให้ผลตอบสนองของระบบมีเวลาเซตตลิ่งโถมมากขึ้น ดังนั้น ในการปรับแต่งค่า mT จะพิจารณาจากค่าเวลาเซตตลิ่งโถมที่ได้จากการวัดสมรรถนะระยะยาวของระบบ โดยถ้าผลตอบสนองของระบบมีเวลาเซตตลิ่งโถมมาก ให้เพิ่มค่าของ mT

การออกแบบโครงสร้างส่วนปรับแต่งค่าเกินของตัวควบคุม

ในการปรับแต่งค่าเกินของตัวควบคุม ทำเพื่อรับรองเสถียรภาพแบบอะซิมโทติกของระบบควบคุมและแก้ไขสมรรถนะระยะยาวของระบบควบคุม โดยวัดสมรรถนะระยะยาวของระบบในรูปของเปอร์เซ็นต์โอเวอร์ชูต ค่าผิดพลาดที่สถานะคงตัว เวลาไรซ์ไทม์ เวลาเซตตลิ่งโถม และเปอร์เซ็นต์การแกว่งของเอาต์พุตรอบสัญญาณอ้างอิง แล้วจึงทำการปรับแต่งค่าเกินของตัวควบคุมดังต่อไปนี้

1. การรับรองเสถียรภาพของระบบควบคุม ทำได้โดยปรับค่าเกินของตัวแปรอินพุต Δe ของตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมระดับหยาบ ($G_{\Delta e_c}$) เมื่อตรวจพบว่าค่าเอาต์พุตของระบบออกนอกขอบเขตที่กำหนดไว้ จะสรุปได้ว่าระบบไม่มีเสถียรภาพแบบอะซิมโทติก ให้หยุดทำการควบคุมและเพิ่มค่าเกิน $G_{\Delta e_c}$ แล้วจึงเริ่มต้นทำการควบคุมใหม่ ในที่นี้ได้กำหนดขอบเขตของเอาต์พุตและวิธีการปรับแต่งค่าเกินดังนี้

$$\text{ถ้า } ((\text{output} > 2 * \text{REF}) \text{ หรือ } (\text{output} < 0)) \text{ แล้ว } G_{\Delta e_c}(n+1) = G_{\Delta e_c}(n) \times 2 \quad (3.22)$$

โดยที่ REF คือ ค่าสัญญาณอ้างอิง

$G_{\Delta e_c}(n)$ คือ ค่าเกิน $G_{\Delta e_c}$ ในการควบคุมครั้งที่ n

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การแก้ไขสมรรถนะที่สภาวะทรานเซียนท์ (transient state) ทำได้โดยการปรับค่าเกณฑ์ของตัวแปรอินพุต Δe ของตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมระดับหยาบ ($G_{\Delta e C}$) เพื่อแก้ไขค่า O_s และ Tr ให้อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ การวัดสมรรถนะที่สภาวะทรานเซียนท์ จะวัดค่าของ O_s และ Tr โดยใช้หลักการของพีชชี

การออกแบบตัววัดสมรรถนะที่สภาวะทรานเซียนท์ ประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

- กำหนดตัวแปรอินพุตของระบบ คือ ค่า O_s กับ Tr และกำหนดตัวแปรเอาต์พุตของระบบ คือ ค่าสมรรถนะที่สภาวะทรานเซียนท์ (Transient Performance Measure : TPM)

- ทำการนอมอลไลซ์และควอนไทซ์ ค่าของตัวแปรอินพุต O_s และ Tr ให้อยู่ในช่วง 0-4 โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$\text{Quantize}(O_s) = \text{ceil}((O_s - 5) / 2) \quad (3.23)$$

$$\text{ถ้า } \text{Quantize}(O_s) > 4 \text{ แล้ว } \text{Quantize}(O_s) = 4$$

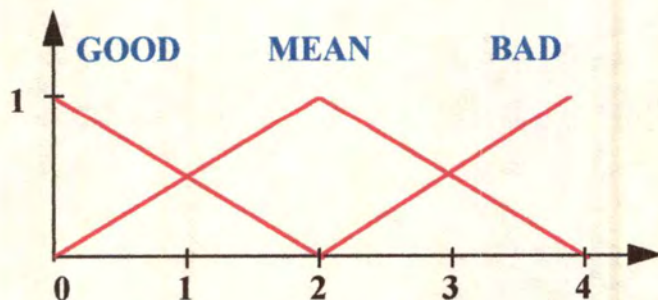
$$\text{Quantize}(Tr) = \text{ceil}((Tr / Tr_o) * 5) \quad (3.24)$$

$$\text{ถ้า } \text{Quantize}(Tr) > 4 \text{ แล้ว } \text{Quantize}(Tr) = 4$$

โดยที่ Tr_o คือ ค่าเวลาไรซ์ไทม์ของระบบเปิดของกระบวนการ

- กำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ O_s และ Tr ดังภาพที่ 16

ภาพที่ 16



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้แสดงฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปร O_s และ Tr ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กำหนดกฎสำหรับการวัดสมรรถนะที่สภาวะทรานเซียนท์ ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 6
แสดงกฎการวัดสมรรถนะที่สภาวะทรานเซียนท์

Os \ Tr	BAD	MEAN	GOOD
BAD	0	1	3
MEAN	-1	0	2
GOOD	-2	-1	0

หมายเหตุ ค่าภายในตารางคือจุดกึ่งกลางของพีชชีเซตของตัวแปรเอาต์พุต TPM

- กำหนดวิธีการพีชชีพีเคชัน โดยใช้พีชชีซิงเกิลตัน
- กำหนดวิธีการอินเฟอเรนซ์ โดยใช้ CRI ของ Zadeh
- กำหนดวิธีการดีพีชชีพีเคชัน โดยใช้วิธี COG

การแก้ไขสมรรถนะที่สภาวะทรานเซียนท์ จะปรับค่า $G_{\Delta ec}$ โดยใช้ค่าสมรรถนะที่สภาวะทรานเซียนท์ ที่ได้จากตัววัดสมรรถนะแบบพีชชี โดยใช้สมการที่ (3.25)

$$G_{\Delta ec}(n+1) = G_{\Delta ec}(n) \times 2^{(TPM/3)} \quad (3.25)$$

โดยที่ $G_{\Delta ec}(n)$ คือ ค่าเกณฑ์ $G_{\Delta ec}$ ในการควบคุมครั้งที่ n

$G_{\Delta ec}(n+1)$ คือ ค่าเกณฑ์ $G_{\Delta ec}$ ที่ได้จากการปรับแต่ง

3. การแก้ไขค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัว จะใช้วิธีการปรับแต่งค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมแบบ P ที่ต่อขนานกับตัวควบคุมพีชชีแบบ PD ในโครงสร้างของตัวควบคุมที่ใช้สำหรับการควบคุมระดับละเอียด (G_K) กฎที่ใช้ในการปรับแต่งค่าเกณฑ์ G_K สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\text{If } ((Ess/REF) > 1\%) \quad \text{Then } G_K(n+1) = G_K(n) \times (1 + (Ess/REF)) \quad (3.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $G_K(n)$ คือ ค่าเกณฑ์ G_K ในการควบคุมครั้งที่ n

$G_K(n+1)$ คือ ค่าเกณฑ์ G_K ที่ได้จากการปรับแต่ง

4. การแก้ไขการแกว่งของเอาต์พุตที่สภาวะคงตัว ใช้วิธีปรับค่าเกณฑ์ของตัวแปรเอาต์พุต u ของตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมระดับละเอียด (G_{u_f}) โดยใช้กฎในการปรับแต่งค่าเกณฑ์ G_{u_f} ดังนี้

$$\text{If } (\%Osc > 2\%) \quad \text{Then } G_{u_f}(n+1) = G_{u_f}(n) \times (1 - \%Osc/100) \quad (3.27)$$

โดยที่ $G_{u_f}(n)$ คือ ค่าเกณฑ์ G_{u_f} ในการควบคุมครั้งที่ n

$G_{u_f}(n+1)$ คือ ค่าเกณฑ์ G_{u_f} ที่ได้จากการปรับแต่ง

5. การแก้ไขเวลาเซตดลิ่งใหม่ จะปรับค่าเกณฑ์ของตัวแปรอินพุต Δe ของตัวควบคุมที่ใช้สำหรับการควบคุมระดับละเอียด ($G_{\Delta e_f}$) โดยใช้กฎในการปรับแต่งค่าเกณฑ์ $G_{\Delta e_f}$ ดังนี้

$$\text{If } (Ts > 2 \times Tr) \quad \text{Then } G_{\Delta e_f}(n+1) = G_{\Delta e_f}(n) \times (1 + 0.2 Ts/Tr) \quad (3.28)$$

โดยที่ $G_{\Delta e_f}(n)$ คือ ค่าเกณฑ์ $G_{\Delta e_f}$ ในการควบคุมครั้งที่ n

$G_{\Delta e_f}(n+1)$ คือ ค่าเกณฑ์ $G_{\Delta e_f}$ ที่ได้จากการปรับแต่ง

การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงสถิตยของตัวควบคุมที่นำเสนอ

ความสมบูรณ์ของฐานกฎการควบคุม

เนื่องจากตัวควบคุมที่นำเสนอ เป็นตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตนเอง ซึ่งสามารถปรับแต่งกฎการควบคุม เพื่อรองรับการสร้างสัญญาณควบคุมในทุกสถานะของตัวแปรอินพุตของตัวควบคุม ดังนั้นตัวควบคุมนี้ จึงมีความสมบูรณ์ของฐานกฎการควบคุม

การเกิดกิริยาระหว่างกันของกฎการควบคุม

เนื่องจากในการออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีที่นำเสนอ ได้กำหนดให้มีการซ้อนทับกันของฟัซซีเซตที่อยู่ติดกัน 2 เซต จึงทำให้มีการเกิดกิริยาระหว่างกันของกฎการควบคุมเสมอ แม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสอดคล้องกันของกฎการควบคุม

เนื่องจากตัวควบคุมที่นำเสนอนี้เป็นตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตนเอง ซึ่งสามารถปรับแต่งกฎการควบคุมได้ ดังนั้น ในกรณีที่มิกฎการควบคุมที่ไม่สอดคล้องกันในฐานกฎการควบคุม ตัวควบคุมจะสามารถเรียนรู้และปรับแต่งกฎการควบคุมให้สอดคล้องกัน

ความคงทนในการควบคุม

ตัวควบคุมที่เสนอนี้เป็นตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตนเอง ซึ่งสามารถทำการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม เพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากการรบกวนจากภายนอก จากสัญญาณนอยส์ หรือจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการ ดังนั้น ตัวควบคุมจึงมีความคงทนในการควบคุม

การพิสูจน์เสถียรภาพของระบบควบคุมที่นำเสนอ

การพิสูจน์เสถียรภาพของระบบควบคุมที่เสนอนี้ จะคำนวณหาเมตริกซ์ Q ที่ซ่อนอยู่ในกฎการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม และใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมฟัซซีแบบปรับตัวโดยตรง จากหลักเกณฑ์เสถียรภาพตามนัยของ Lyapunov ดังต่อไปนี้

ในการออกแบบตัวควบคุมที่นำเสนอได้กำหนดวิธีการฟัซซีพีเคชันโดยใช้ฟัซซีซิงเกิลตันวิธีการอินเฟอเรนซ์ โดยใช้CRI ของ Zadeh และวิธีการดีฟัซซีพีเคชัน โดยใช้วิธี COG ดังนั้น สัญญาณควบคุม u จะสามารถหาได้จากสมการที่ (2.105)

$$u(x) = \sum_{k=1}^M \xi_k(x) \theta^k = \theta^T \xi(x)$$

$$\text{โดยที่ } \xi_k(x) = \frac{\min_{1 \leq i \leq m} \mu_{X_i^k}(x_i)}{\sum_{k=1}^M \min_{1 \leq i \leq m} \mu_{X_i^k}(x_i)} \quad \text{เรียกว่า fuzzy basis function}$$

$\theta^k = \bar{y}^k$ คือ จุดกึ่งกลางของฟัซซีเซต Y^k ในส่วนผลของกฎการควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ $\theta = [\theta^1, \dots, \theta^M]^T$ และ $\xi(x) = [\xi_1(x), \dots, \xi_M(x)]^T$ นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และในการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ได้ออกแบบให้ปรับแต่งกฎการควบคุม โดยใช้สมการที่ (3.17)-(3.21) ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\theta' = e^T G \xi(x) \quad (3.29)$$

โดยที่ $G = [G_e, G_{\Delta e}]^T$ และ $e = [e, \Delta e]^T$

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ (3.29) กับกฎการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมในสมการที่ (2.115) จะได้ว่า

$$G = \gamma p_n \text{ หรือเขียนใหม่ได้ว่า } P = \frac{1}{\gamma} \begin{bmatrix} c & G_e \\ G_e & G_{\Delta e} \end{bmatrix} \text{ โดยที่ } c > \frac{G_e^2}{G_{\Delta e}}$$

ถ้ากำหนดให้ $\Lambda_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_2 & -k_1 \end{bmatrix}$ โดยที่รากของสมการคุณลักษณะ $s^2 + k_1 s + k_2 = 0$ อยู่บนฝั่งซ้ายของระนาบ s แล้วจะสามารถคำนวณหาเมตริกซ์ Q จากสมการของ Lyapunov

$$\Lambda_c^T P + P \Lambda_c = -Q$$

หรือ

$$\frac{1}{\gamma} \begin{bmatrix} 0 & -k_2 \\ 1 & -k_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c & G_e \\ G_e & G_{\Delta e} \end{bmatrix} + \frac{1}{\gamma} \begin{bmatrix} c & G_e \\ G_e & G_{\Delta e} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_2 & -k_1 \end{bmatrix} = -Q \quad (3.30)$$

จะได้ว่า

$$Q = \begin{bmatrix} \frac{2k_2 G_e}{\gamma} & \frac{k_1 G_e + k_2 G_{\Delta e} - c}{\gamma} \\ \frac{k_1 G_e + k_2 G_{\Delta e} - c}{\gamma} & 2(k_1 G_{\Delta e} - G_e) \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

เนื่องจากระบบควบคุมจะมีเสถียรภาพแบบอะซิมโทติก เมื่อเมตริกซ์ Q เป็น positive definite ดังนั้น ระบบควบคุมพีซีทีที่น่าเสนอจะมีเสถียรภาพแบบอะซิมโทติก ก็ต่อเมื่อ ค่าเกณฑ์ $G_{\Delta e}$ ของตัวควบคุมสอดคล้องตามเงื่อนไขต่อไปนี้

$$G_{\Delta e} > \frac{G_e}{2k_1} + \frac{(k_1 G_e + k_2 G_{\Delta e} - c)^2}{4k_1 k_2 G_e}$$

ซึ่งจะทำให้เมตริกซ์ Q ในสมการที่ (3.31) เป็น positive definite

ในการออกแบบตัวควบคุมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ ค่าเกน G_e และ $G_{\Delta e}$ จะถูกปรับแต่งจากโครงสร้างในส่วนของปรับแต่งค่าเกนของตัวควบคุม ในกรณีที่ตัวควบคุมตรวจพบว่า ระบบควบคุมไม่มีเสถียรภาพแบบอะซิมโทติก ตัวควบคุมจะหยุดทำการควบคุมและเพิ่มค่าเกน $G_{\Delta e}$ แล้วจึงทำการควบคุมใหม่ จนกว่าระบบควบคุมจะเสถียร ดังนั้น หลังจากที่ตัวควบคุมได้เรียนรู้เพื่อหาค่าเกนของตัวควบคุมที่เหมาะสมแล้ว ระบบควบคุมจะมีเสถียรภาพแบบอะซิมโทติก



บทที่ 4

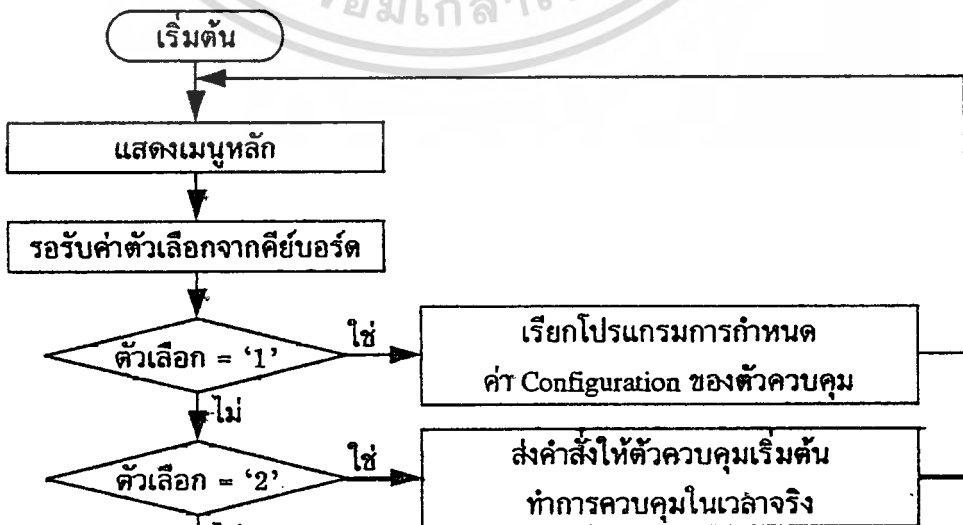
แผนภาพแสดงการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

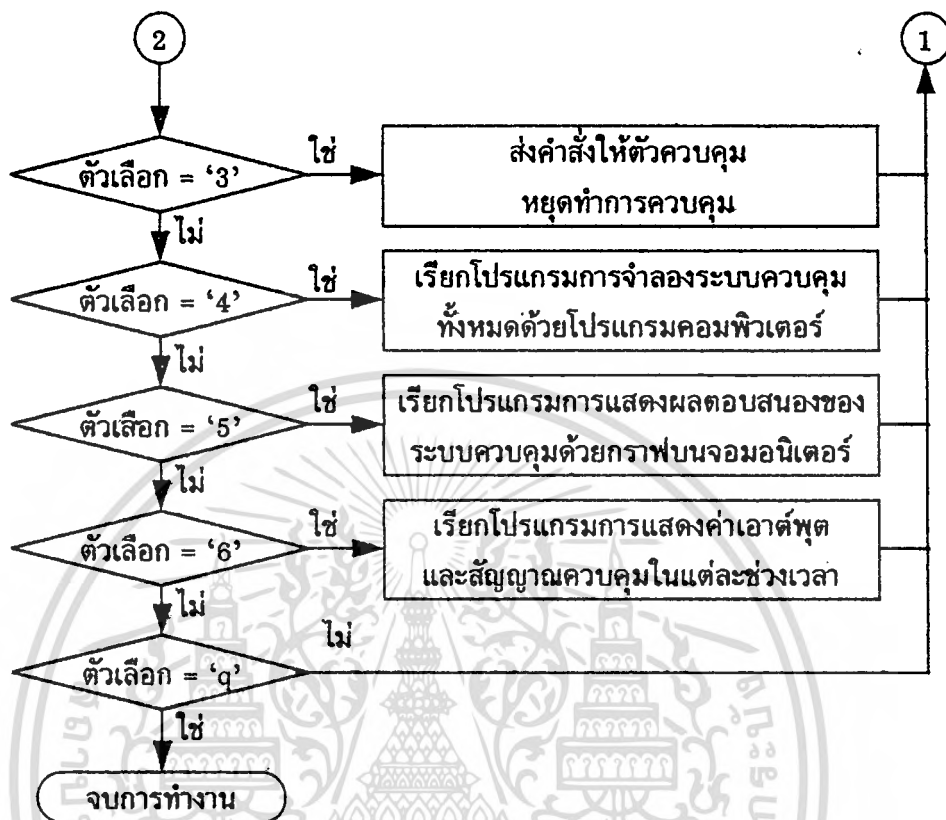
โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทั้งหมดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ถูกพัฒนาโดยใช้โปรแกรมภาษาซี บนเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ เพื่อทำหน้าที่หลัก 2 ประการ คือการจำลองระบบควบคุมทั้งหมด ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และการควบคุมกระบวนการในเวลาจริง ในการออกแบบโครงสร้างของโปรแกรมนี้อาจใช้หลักการโปรแกรมแบบโมดูล (modular programming) โดยแบ่งโปรแกรมออกเป็นฟังก์ชันย่อย ๆ สำหรับการทำงานในแต่ละหน้าที่ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

โปรแกรมหลัก

โปรแกรมหลัก เป็นส่วนของการแสดงเมนูและรอรับคำสั่งการเลือกเมนู และเรียกใช้โปรแกรมย่อยอื่น ๆ เพื่อทำงานตามการเลือกคำสั่งของผู้ใช้ การทำงานของโปรแกรมหลักสามารถแสดงด้วยแผนภาพดังนี้

ภาพที่ 17



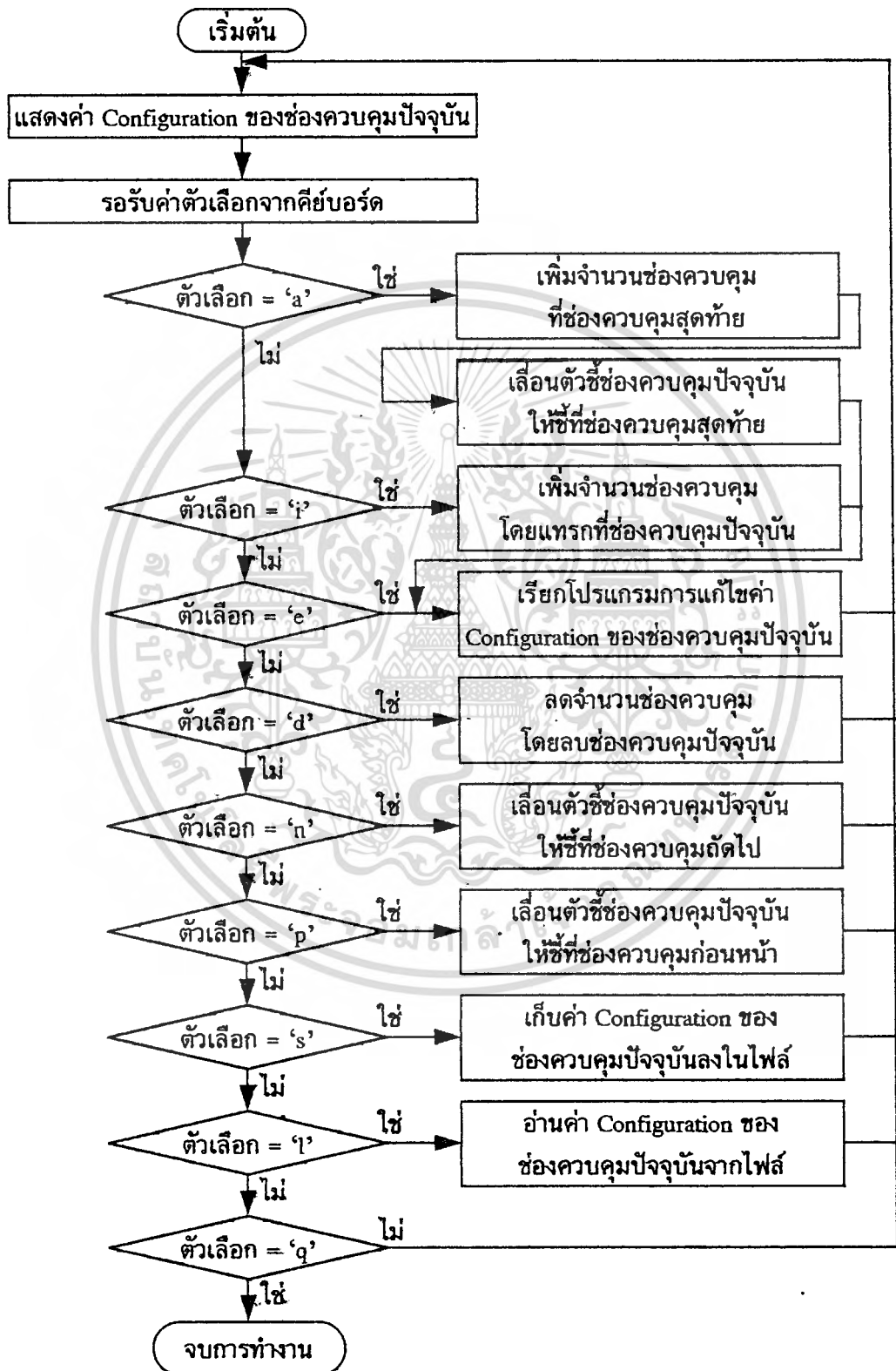


แสดงการทำงานของโปรแกรมหลัก

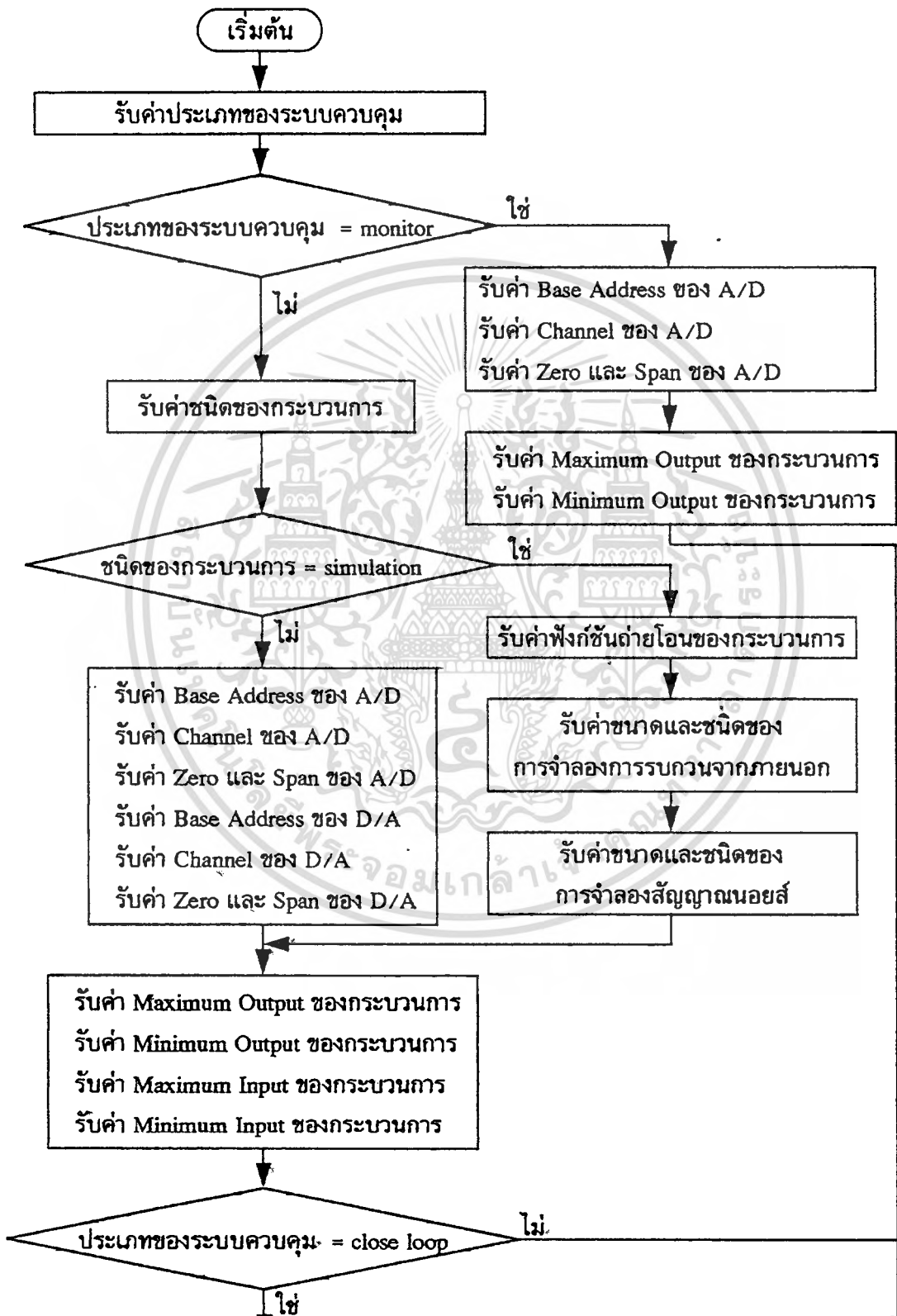
การกำหนดค่า Configuration ของตัวควบคุม

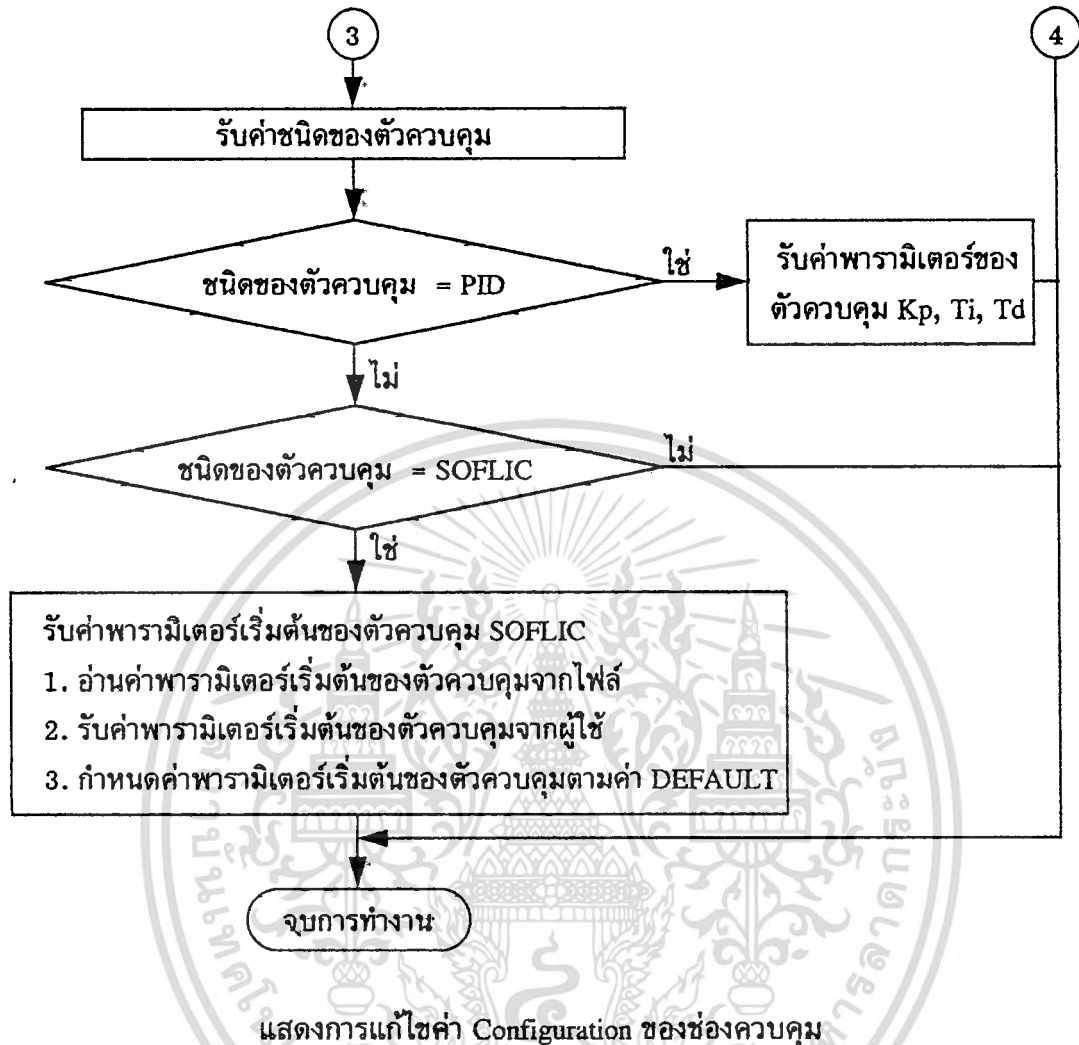
โปรแกรมการกำหนดค่า Configuration ของตัวควบคุมเป็นโปรแกรมในการติดต่อกับผู้ใช้ เพื่อให้ผู้ใช้กำหนดค่า Configuration ของตัวควบคุมที่ต้องการ ในการกำหนดค่า Configuration ของตัวควบคุม จะต้องกำหนดจำนวนช่องควบคุม โดยใช้คำสั่งการเพิ่มและลดจำนวนช่องควบคุม และทำการแก้ไขค่า Configuration ของแต่ละช่องควบคุม โดยกำหนดประเภทของระบบควบคุม ชนิดและรายละเอียดเกี่ยวกับกระบวนการที่ต้องการควบคุม ชนิดและค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุม และรายละเอียดเกี่ยวกับการเชื่อมต่อกับ A/D และ D/A สำหรับควบคุมกระบวนการในเวลาจริง แผนภาพแสดงการกำหนดค่า Configuration ของตัวควบคุม แสดงดังภาพที่ 18 และแผนภาพแสดงการแก้ไขค่า Configuration ของแต่ละช่องควบคุม แสดงดังภาพที่ 19

ภาพที่ 18



ภาพที่ 19



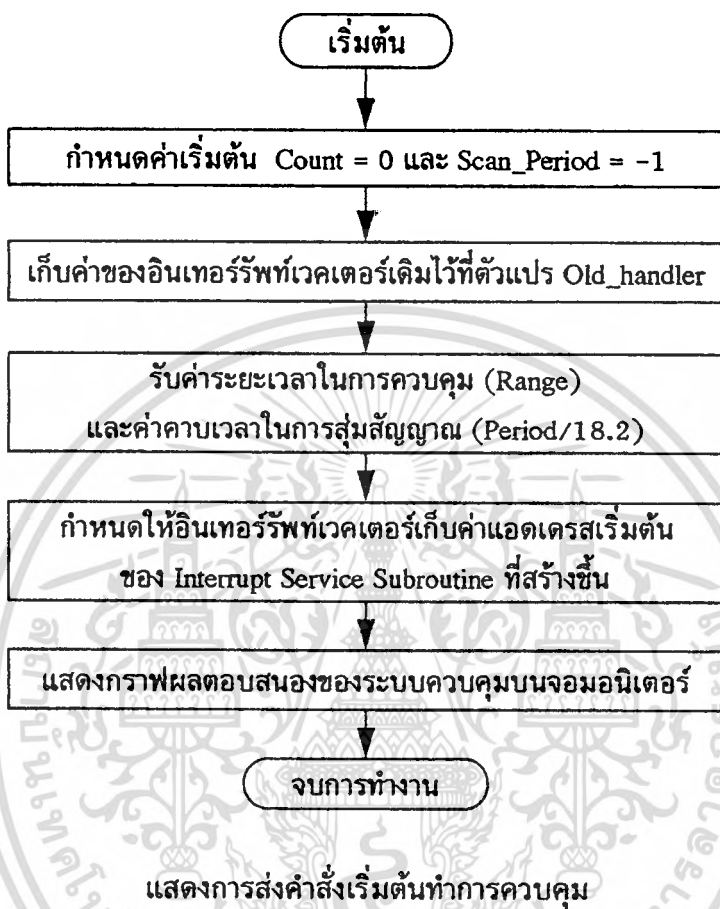


การควบคุมกระบวนการในเวลาจริง

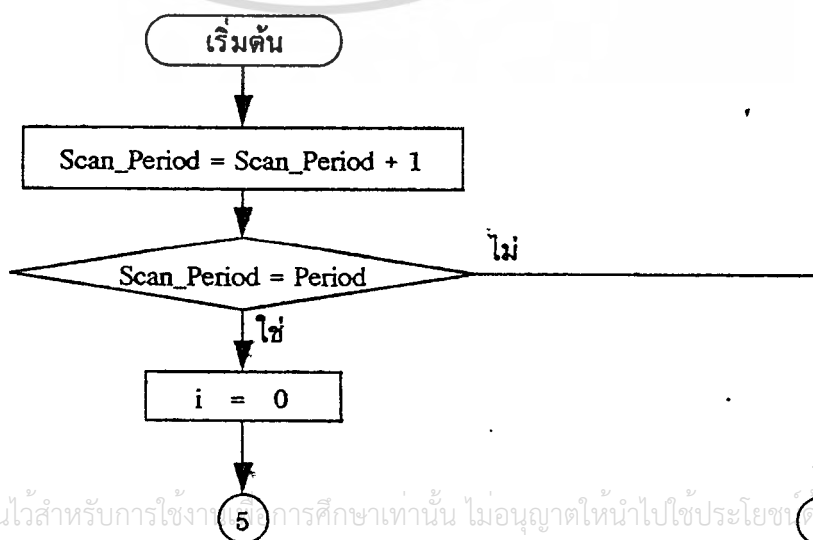
ในการควบคุมกระบวนการในเวลาจริง จะใช้ฟังก์ชันการอินเทอร์รัพท์จากสัญญาณนาฬิกาของตอสในการกำหนดความถี่ในการสุ่มสัญญาณ ซึ่งฟังก์ชันการอินเทอร์รัพท์นี้จะสร้างสัญญาณอินเทอร์รัพท์ด้วยความถี่ 18.2 เฮิรซ์ ดังนั้น การกำหนดคาบเวลาในการสุ่มสัญญาณจะต้องกำหนดเป็นจำนวนเท่าของ 1/18.2 วินาที ในการควบคุมกระบวนการในเวลาจริง จะเก็บโปรแกรมการควบคุมทั้งหมดไว้ใน Interrupt Service Subroutine โดยเมื่อมีคำสั่งให้เริ่มต้นทำการควบคุม จะทำการกำหนดให้อินเทอร์รัพท์เวคเตอร์เก็บค่าแอดเดรสเริ่มต้นของ Interrupt Service Subroutine และเมื่อมีสัญญาณอินเทอร์รัพท์ โปรแกรมจะทำการควบคุม โดยทำตามคำสั่งใน Interrupt Service Subroutine แผนภาพแสดงการส่งคำสั่งเริ่มต้นทำการควบคุม และการทำงานของโปรแกรม Interrupt Service Subroutine แสดงดังภาพที่ 20 และภาพที่ 21 ตามลำดับ

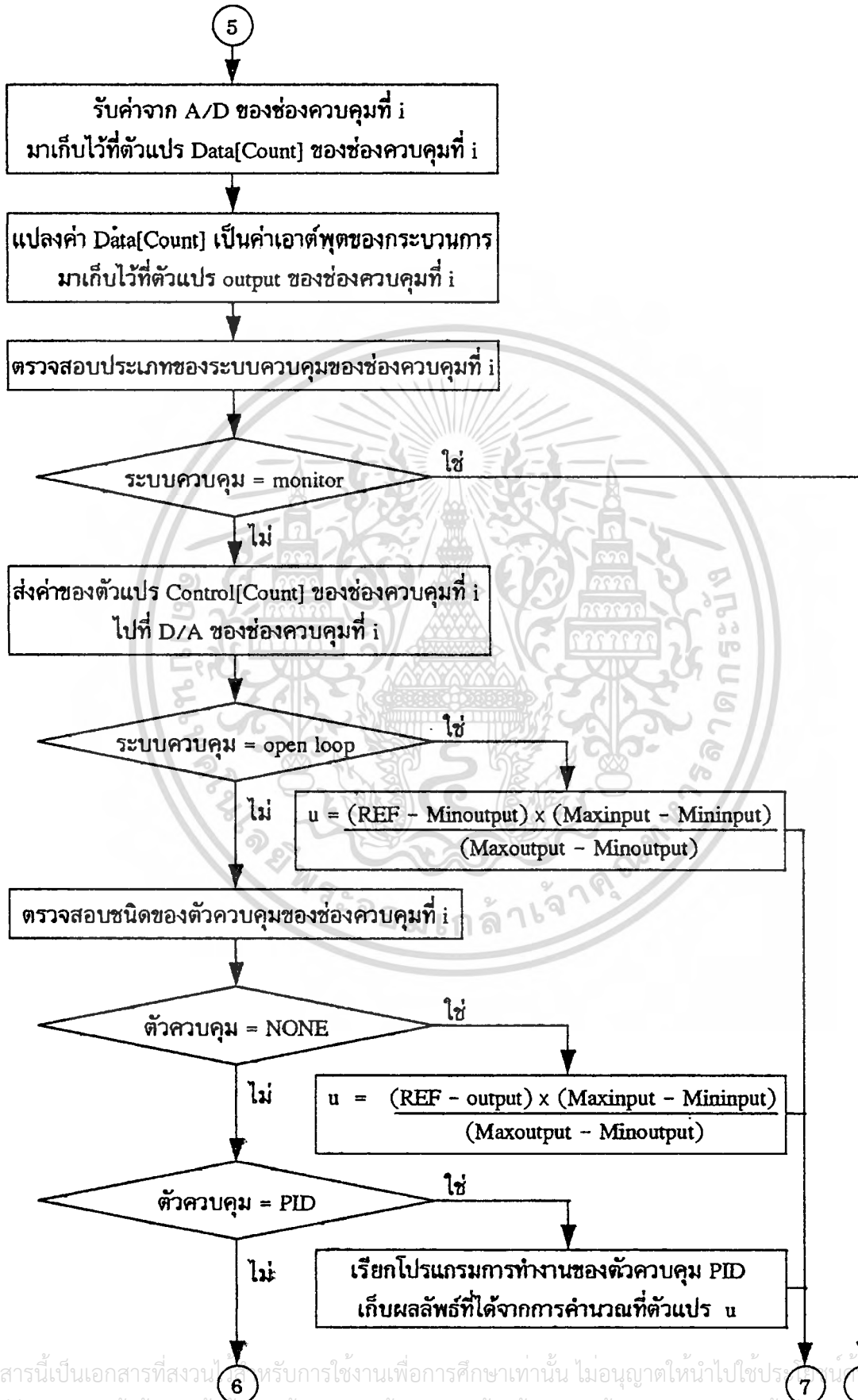
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

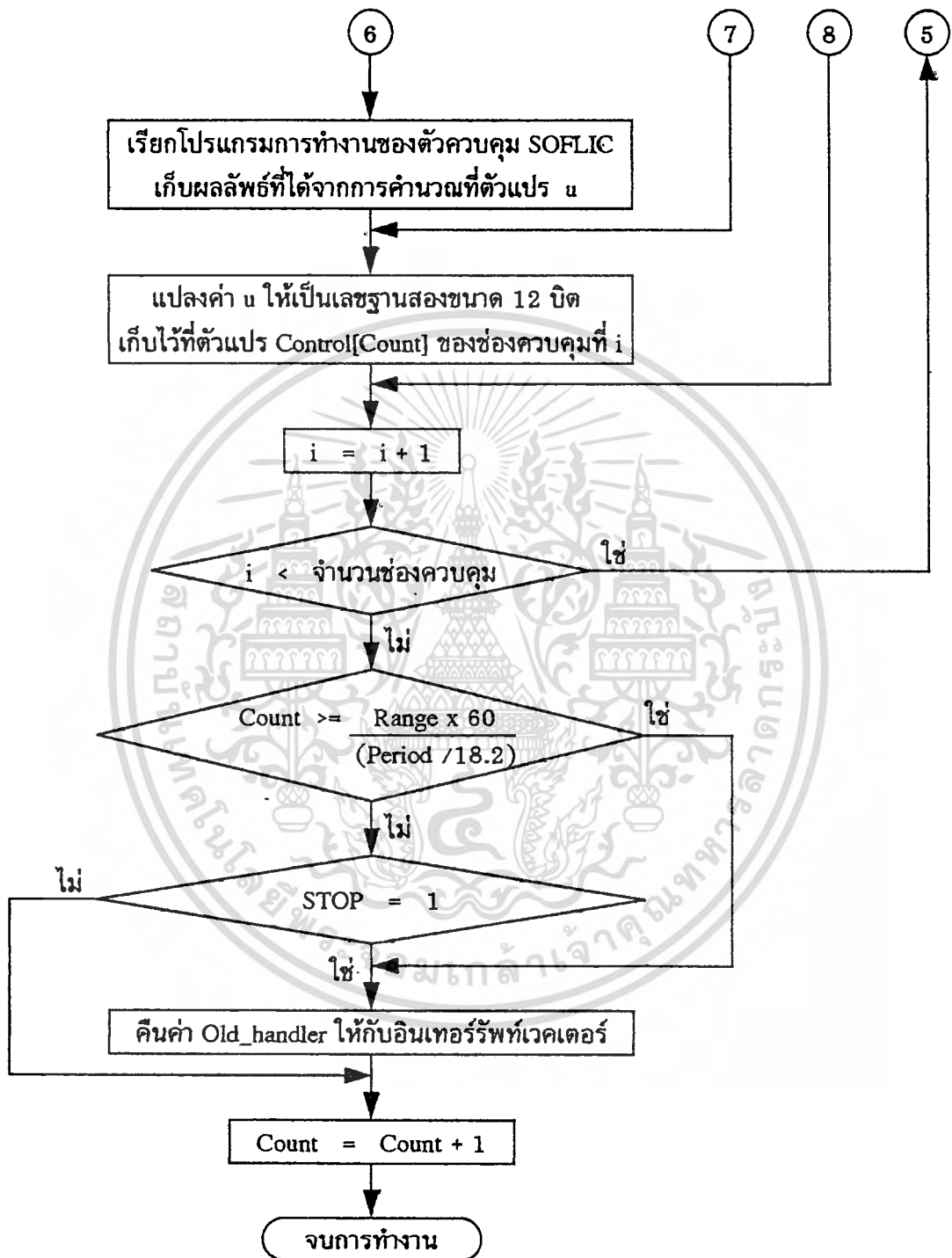
ภาพที่ 20



ภาพที่ 21





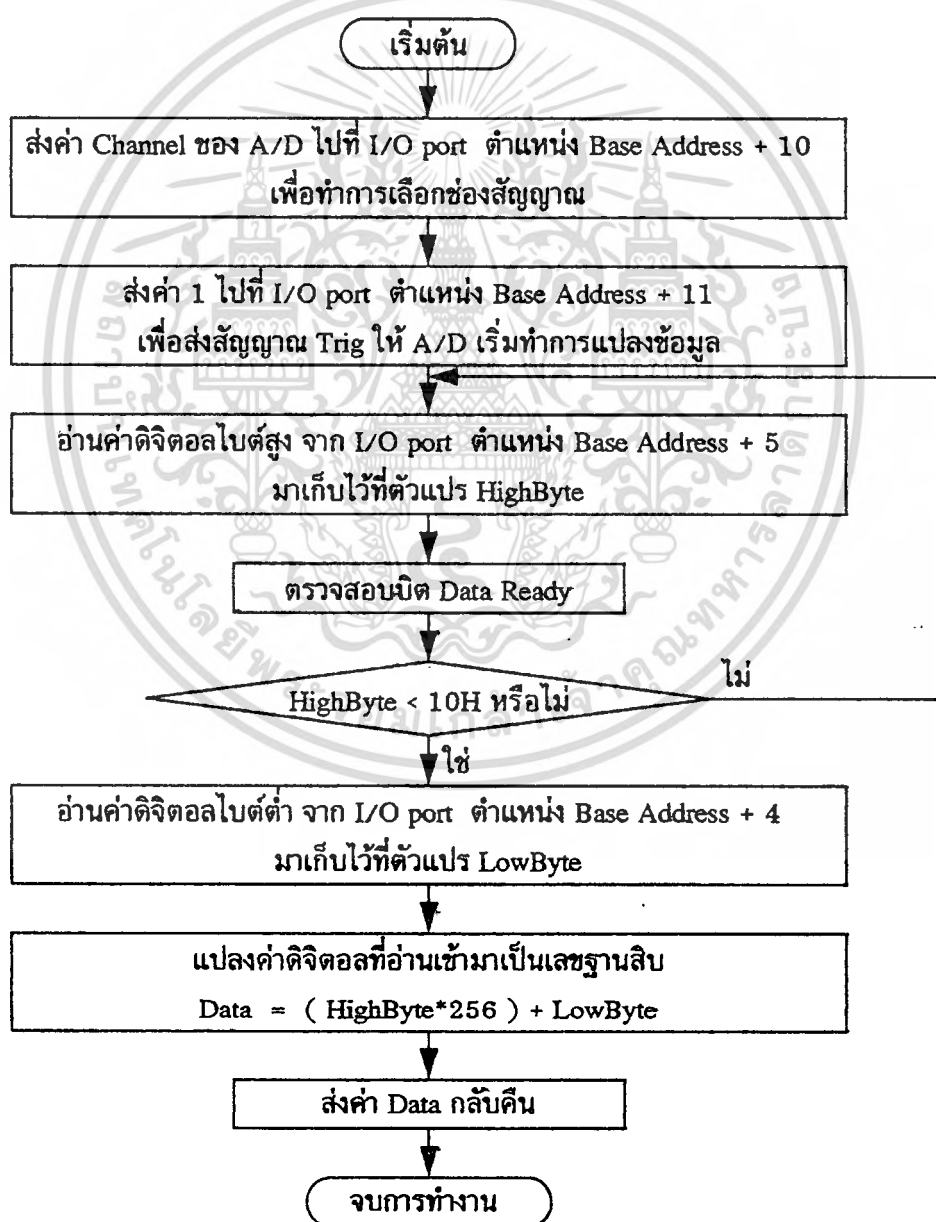


แสดงการทำงานของโปรแกรม Interrupt Service Subroutine

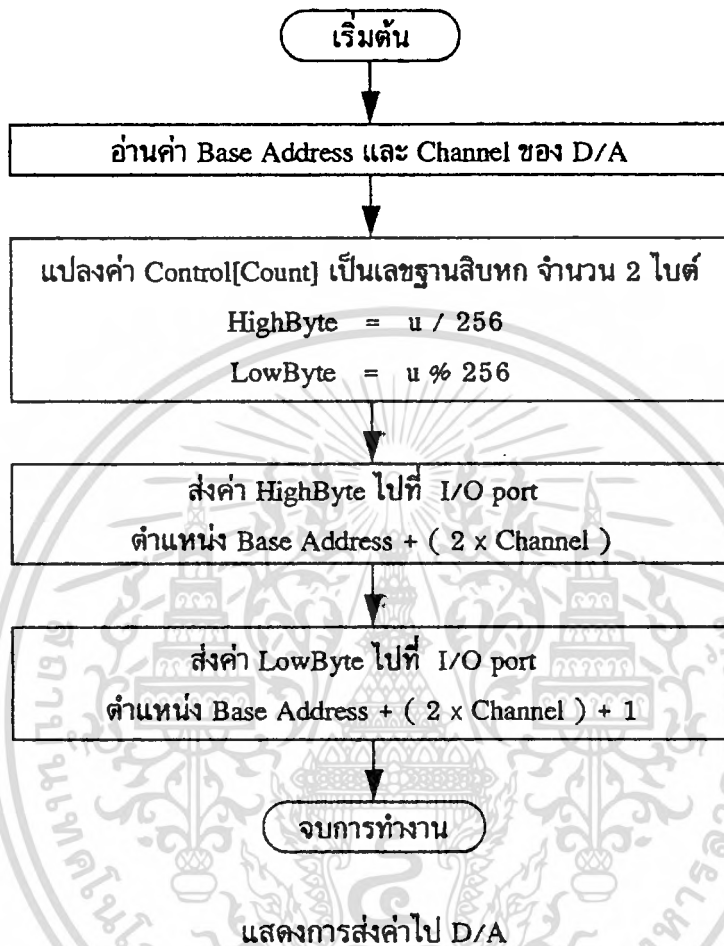
การรับค่าจาก A/D และส่งค่าไป D/A

การเชื่อมต่อระหว่างสัญญาณอนาล็อกและสัญญาณดิจิทัล ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้การ์ด PCL-812 และการ์ด PCL-726 ของบริษัท Advantech จำกัด ทำหน้าที่เป็น A/D และ D/A ตามลำดับ ในการเขียนโปรแกรมควบคุมการรับค่าจาก A/D และส่งค่าไป D/A สามารถแสดงด้วยแผนภาพดังในภาพที่ 22 และภาพที่ 23 ตามลำดับ

ภาพที่ 22



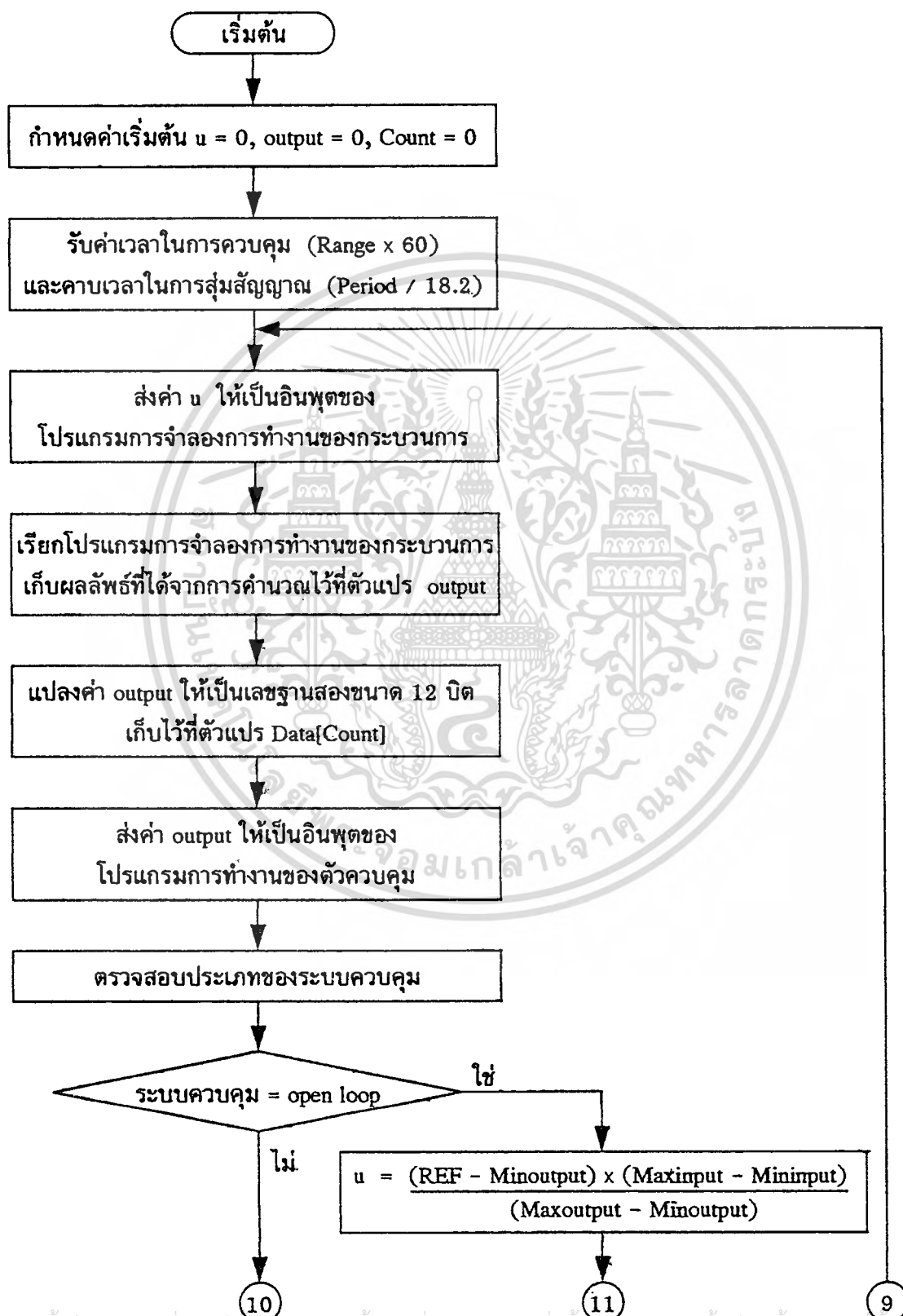
ภาพที่ 23

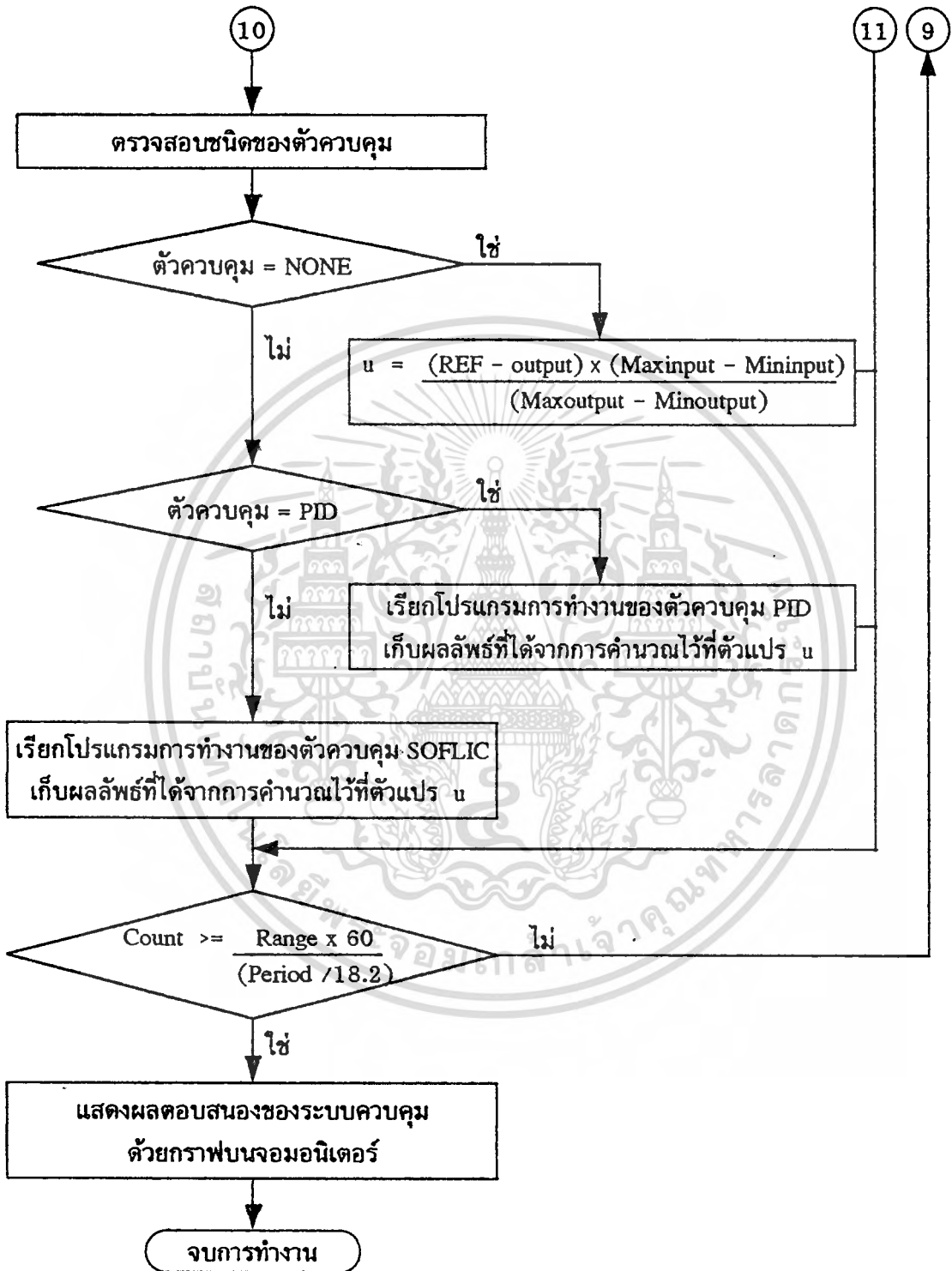


การจำลองการทำงานของระบบควบคุมทั้งหมดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การจำลองการทำงานของระบบควบคุมทั้งหมดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จะเป็นการจำลองการควบคุมกระบวนการ ซึ่งผู้ใช้สามารถกำหนดได้ โดยเลือกชนิดของกระบวนการที่ต้องการควบคุมเป็น 'simulation' และกำหนดค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการที่ต้องการจำลองการควบคุม ซึ่งการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้จะอยู่ในส่วนของการแก้ไขค่า Configuration ของช่องควบคุม การจำลองการทำงานของระบบควบคุมทั้งหมดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สามารถแสดงด้วยแผนภาพ ดังภาพที่ 24

ภาพที่ 24

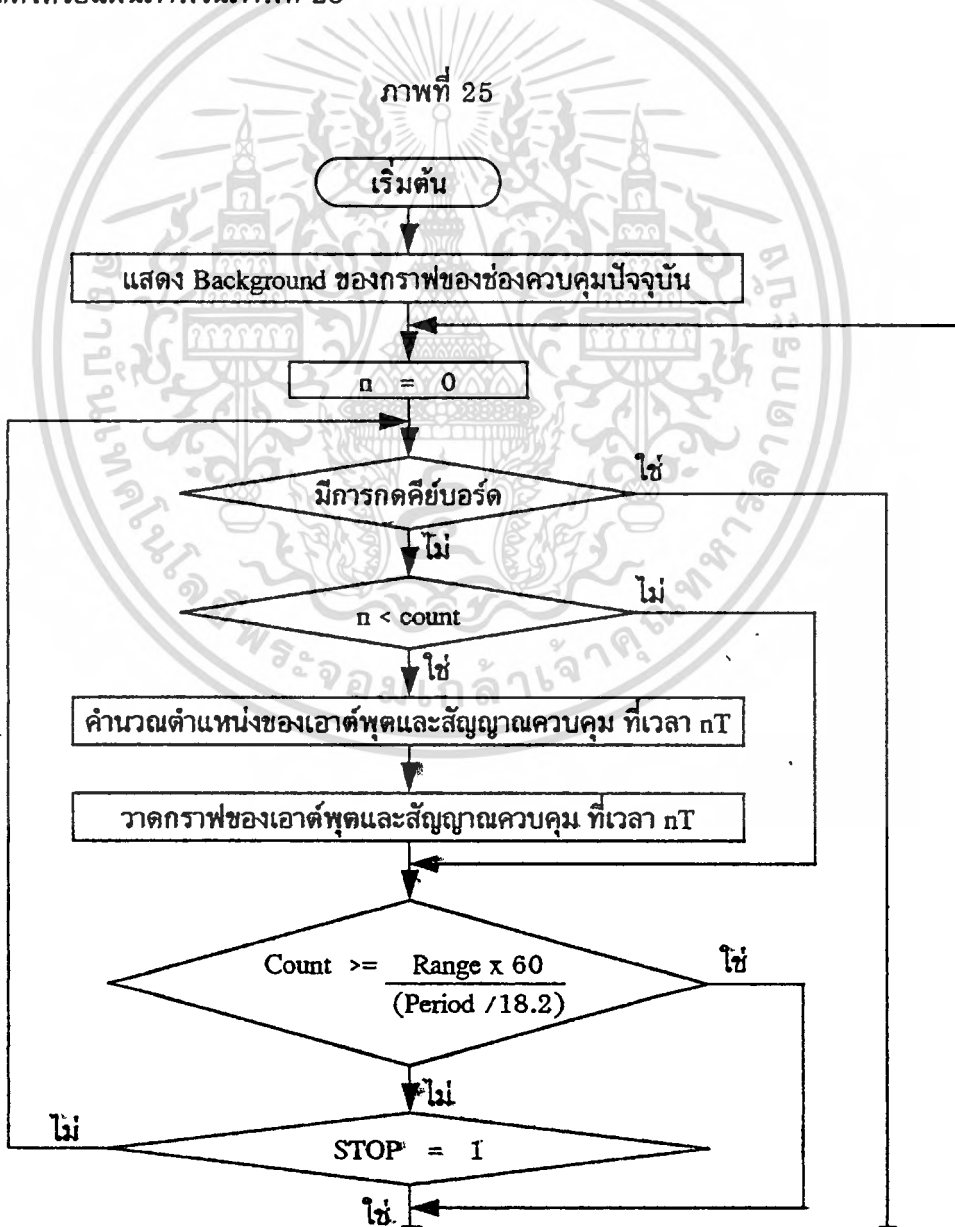


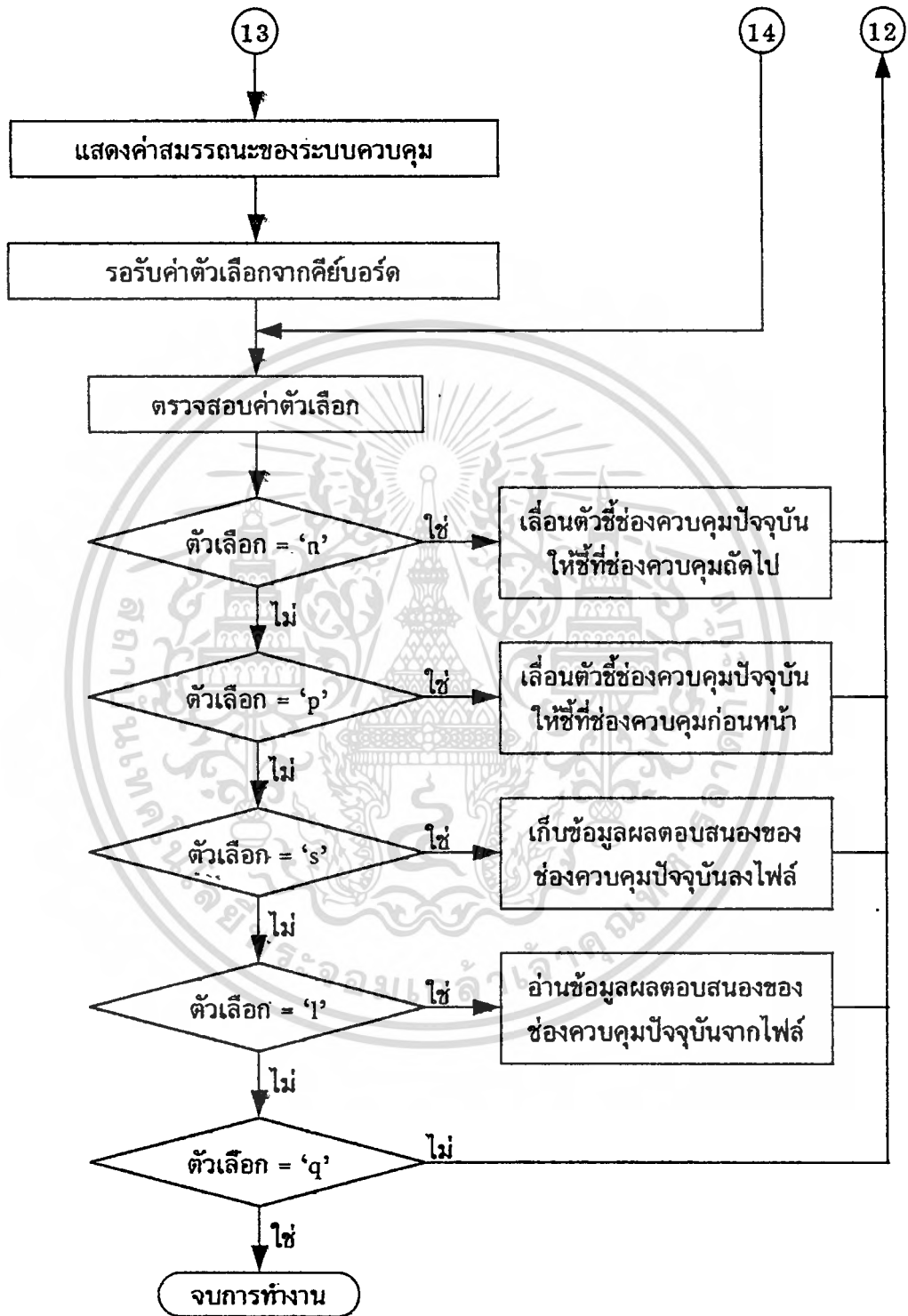


แสดงการจำลองการทำงานของระบบควบคุมทั้งหมดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การแสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมด้วยกราฟบนจอมอนิเตอร์

การแสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมด้วยกราฟบนจอมอนิเตอร์ จะเป็นการนำข้อมูล ผลตอบสนองของระบบควบคุมและสัญญาณควบคุม ซึ่งเก็บไว้ที่ตัวแปรอะเรย์ Data และตัวแปร อะเรย์ Control มาวาดกราฟบนจอมอนิเตอร์ การแสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมจะแสดง กราฟของแต่ละช่องควบคุม ซึ่งผู้ใช้สามารถเลือกได้ว่าจะดูกราฟของช่องควบคุมใด และสามารถ เก็บกราฟผลตอบสนองของระบบควบคุมลงในไฟล์ หรืออ่านค่าผลตอบสนองของระบบควบคุม จากไฟล์เพื่อนำมาวาดกราฟ การแสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมด้วยกราฟบนจอมอนิเตอร์ สามารถแสดงด้วยแผนภาพในภาพที่ 25





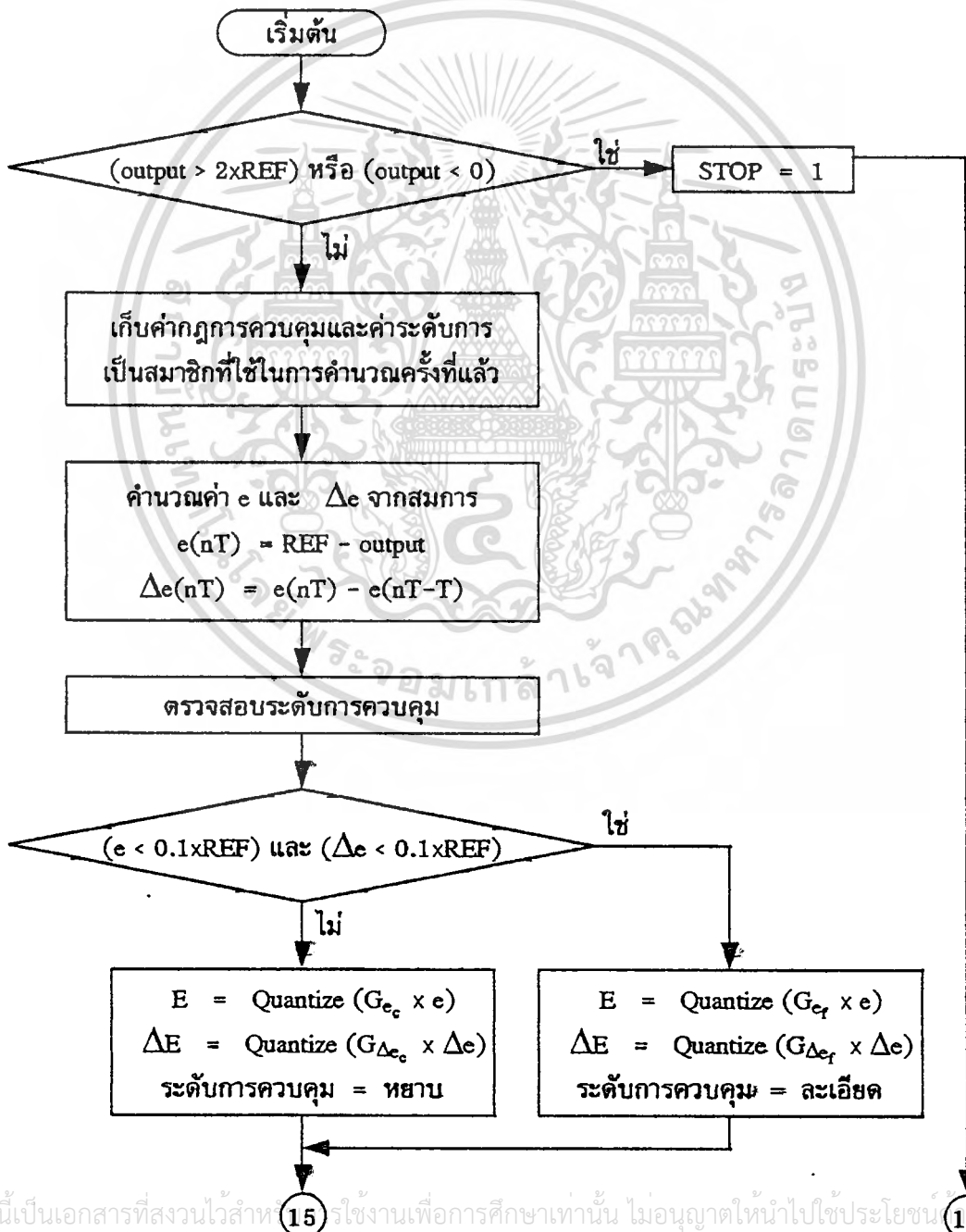
แสดงการแสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมด้วยกราฟบนจอมอนิเตอร์

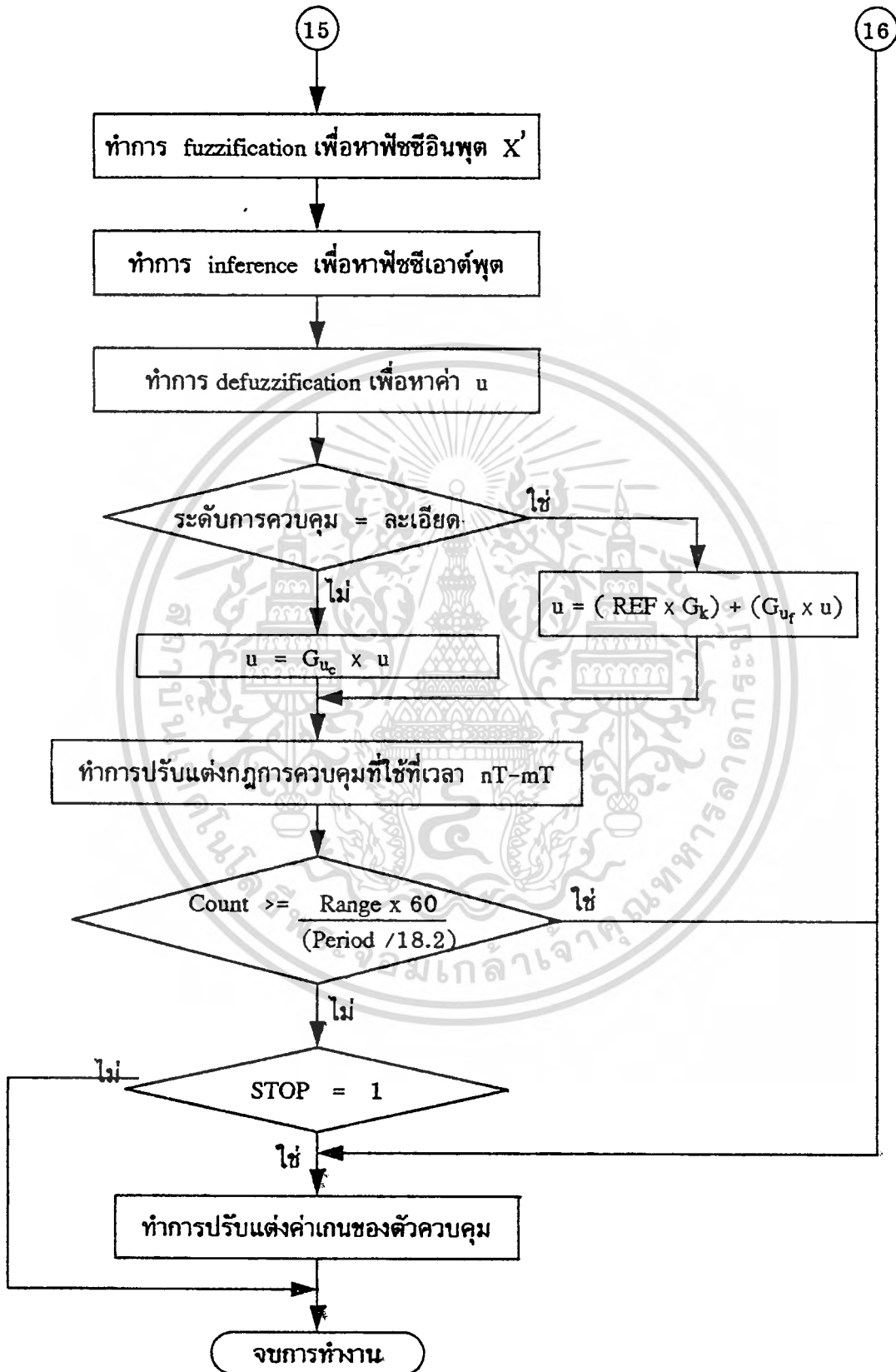
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของตัวควบคุม SOFLIC

การทำงานของตัวควบคุม SOFLIC จะประกอบด้วยการคำนวณหาค่าสัญญาณควบคุม u และการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โดยใช้วิธีการตามที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3 การทำงานของตัวควบคุม SOFLIC สามารถแสดงได้ด้วยแผนภาพในภาพที่ 26

ภาพที่ 26





การทำงานของตัวควบคุม PID

ในการคำนวณค่าสัญญาณควบคุม u ของตัวควบคุม PID จะใช้การคำนวณในโดเมนเวลาไม่ต่อเนื่อง (discrete-time domain) โดยแปลงค่าฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม PID ซึ่งอยู่ในโดเมน s ให้เป็นโดเมน z แล้วจึงทำการแปลง z ผกผัน ให้กลับไปอยู่ในโดเมนเวลาไม่ต่อเนื่อง การทำงานของตัวควบคุม PID ในโดเมนเวลาไม่ต่อเนื่อง สามารถแสดงด้วยแผนภาพดังภาพที่ 27

ภาพที่ 27

