

เสถียรภาพของพีชชีในระบบอันดับที่หนึ่ง
FUZZY STABILITY IN FIRST ORDER



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 45857
วัน, เดือน, ปี 19 ก.พ. 2546

b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FUZZY STABILITY IN FIRST ORDER



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
DEPARTMENT OF INSTRUMENTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญา

หัวข้อปริญญานิพนธ์ สถิติรูปภาพของฟัซซี่ในระบบอันดับที่หนึ่ง
FUZZY STABILITY IN FIRST ORDER

นักศึกษาผู้จัดทำ นายนิวัฒน์ คำมูลกร รหัสประจำตัว 42015391
 นายสันติ อนุพุก รหัสประจำตัว 42015409
 นายสุวัจชัย บุตรดีมี รหัสประจำตัว 42015416

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม
ปีการศึกษา 2544

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์		ลายมือชื่อ	
ผศ. สาทิต	อินทจักร์		

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ วันพุธ ที่ 27 มีนาคม 2545
สถานที่สอบ ณ. ห้องสอบปริญญานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม

ภาควิชารับรองแล้ว



(ผศ. ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญาานิพนธ์

เสถียรภาพของฟัซซี่ในระบบอันดับที่หนึ่ง

FUZZY STABILITY IN FIRST ORDER

นักศึกษาผู้จัดทำ

นายนิวัฒน์ คำมูลคร

นายสันติ อนุพุท

นายสุวัจชัย บุตรคีมี

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. สาธิต อินทจักร์

ปีการศึกษา

2544

บทคัดย่อ

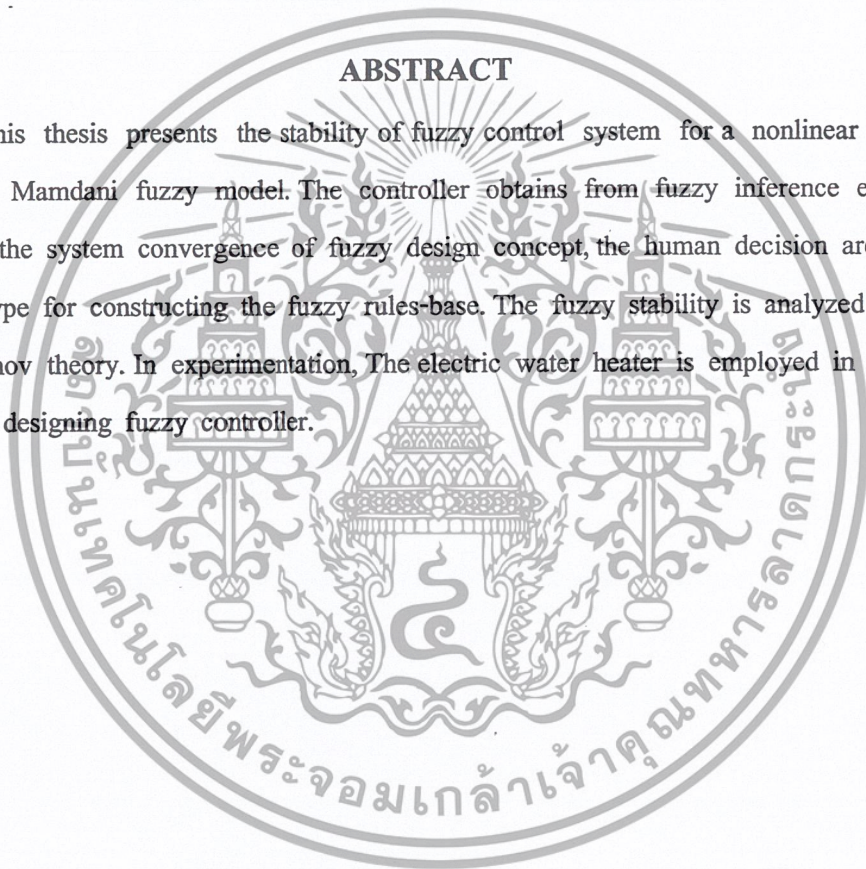
ในปริญาานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอการหาเสถียรภาพของระบบที่ควบคุมด้วยฟัซซี่ การควบคุมที่จะนำมาวิเคราะห์ในที่นี้จะใช้ระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น และได้จำลองบนระบบฟัซซี่แบบ Mamdani ซึ่งเป็นแบบจำลองพื้นฐานของตัวควบคุมฟัซซี่ ในการออกแบบการควบคุมด้วยระบบฟัซซี่จะมีแนวคิดเหมือนกับการตัดสินใจของมนุษย์เพื่อรักษาคุณภาพ ต่อจากนั้นก็วิเคราะห์เสถียรภาพและปัญหาต่างๆ โดยใช้ทฤษฎีลียาปูนอฟ (Lyapunov Theory) เพื่อหาเสถียรภาพของระบบควบคุม ซึ่งจะจำลองการควบคุมบนเครื่องทำน้ำอุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Fuzzy Stability in First Order	
Authors	Mr. Niwat	Coumoonkhorn
	Mr. Santi	Anupuk
	Mr. Suwatchai	Bootdeemee
Thesis Advisor	Asst.Prof. Sathit	Intajag
Year	2001	

ABSTRACT

This thesis presents the stability of fuzzy control system for a nonlinear plant by using the Mamdani fuzzy model. The controller obtains from fuzzy inference engine. To constrain the system convergence of fuzzy design concept, the human decision are used to be prototype for constructing the fuzzy rules-base. The fuzzy stability is analyzed by using the Lypunov theory. In experimentation, The electric water heater is employed in our case-study for designing fuzzy controller.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เพราะได้รับความเมตตาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์
สาริต อินทจักร ที่ได้ให้คำแนะนำแก่ผู้วิจัยตลอดมา

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมทุกท่าน ที่ได้คำแนะนำอันเป็น
ประโยชน์ต่อการทำปริญญาบัตรฉบับนี้

และที่ลืมเสียมิได้ขอกราบขอบพระคุณคุณแม่อันเป็นที่รักยิ่ง ที่สนับสนุนและเป็น
แรงบันดาลใจในการทำปริญญาบัตรฉบับนี้

ประโยชน์อันพึงมีจากปริญญาบัตรฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VII

บทที่ 1 บทนำ ความเป็นมาและเหตุจูงใจของการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์.....	1
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์.....	1
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	1
บทที่ 2 ฟัซซีเซต.....	3
2.1 ฟัซซีเซต.....	3
2.2 ทฤษฎีเซตแบบเดิม (Crisp Set Theory).....	4
2.3 ทฤษฎีฟัซซีเซต (Fuzzy Set Theory).....	6
2.4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก.....	8
2.5 ตัวดำเนินการฟัซซีเซต.....	11
2.6 ฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic).....	12
2.7 ประพจน์แบบฟัซซี (Fuzzy Proposition).....	14
2.8 การหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผลโดยใช้ทฤษฎีฟัซซีลอจิก.....	16
2.9 ความสัมพันธ์ฟัซซี (Fuzzy Relation).....	17
2.10 การคอมโพสิชันแบบฟัซซี (Fuzzy Composition).....	18
2.11 การอินเฟอร์เรนซ์แบบฟัซซี (Fuzzy Inference).....	19
2.12 การฟัซซิฟิเคชัน (Fuzzification).....	21
2.13 การดีฟัซซิฟิเคชัน (Defuzzification).....	22
2.14 พารามิเตอร์ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก.....	24
2.15 หลักเกณฑ์ในการกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิก.....	26
2.16 ส่วนขยายของฟัซซีเซต.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.17 แบบจำลองฟัซซี่.....	27
2.18 ความคลุมเครือ	39
2.19 ตัวควบคุมฟัซซี่แบบปรับกฎด้วยตัวเอง(Self-organizing fuzzy logic controller)..	41
บทที่ 3 เสถียรภาพของฟัซซี่ในระบบอันดับที่หนึ่ง	43
3.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมฟัซซี่.....	43
3.2 เสถียรภาพของฟัซซี่ในระบบอันดับที่หนึ่ง	44
3.3 เสถียรภาพเลียฟานอฟ (Lypuanov Stability).....	45
3.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพ แบบจำลองฟัซซี่ Takagi and Sugeno.....	46
3.5 แบบจำลองฟัซซี่ของ Mamdani.....	47
3.6 เสถียรภาพเลียฟานอฟที่เวลาไม่ต่อเนื่อง	51
3.7 ตัวอย่างการวิเคราะห์เสถียรภาพ.....	53
บทที่ 4 การออกแบบตัวควบคุม	56
4.1 การออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่.....	56
4.2 ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่.....	58
4.2.1 Input and Output.....	59
4.2.2 Fuzzify.....	59
4.2.3 Fuzzy Rules.....	61
4.2.4 Defuzzify	62
4.3 ลักษณะทั่วไปของไมโครโปรเซสเซอร์.....	67
4.3.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและนำมาใช้.....	67
4.3.2 การจัดขาของไมโครคอนโทรลเลอร์.....	69
4.3.3 การใช้งานเป็นพอร์ตอินพุต.....	71
4.3.4 การใช้งานเป็นพอร์ตเอาต์พุต	71
4.4 ส่วนประกอบที่ใช้ในการควบคุม	73
4.4.1 วงจรตรวจวัดอุณหภูมิ.....	73
4.4.2 วงจรควบคุมการ ON/OFF ของไตรแอก	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 ผลการทดลอง	76
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	81
5.1 บทสรุป	81
5.2 แนวทางพัฒนา	81
บรรณานุกรม	82
ภาคผนวก	83
ภาคผนวก ก	84
ภาคผนวก ข	94



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงการคอมโพสิชันของความสัมพันธ์ฟัซซี่.....	18
2.2 แสดงการหาข้อสรุปจากหลักฐาน โดยใช้เงื่อนไขความสัมพันธ์ระหว่างเหตุผล.....	19
2.3 ค่าสูงสุดของฟังก์ชันสามเหลี่ยม.....	25
2.4 ความกว้างของฟังก์ชันสามเหลี่ยม.....	25
2.5 จุดตัดของฟังก์ชันสามเหลี่ยม.....	26
2.6 บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลองฟัซซี่ลอจิก.....	27
2.7 แผนผังการควบคุม STREAM TURBINE.....	29
2.8 แสดงเทอมเซตของตัวแปร (ก) อุณหภูมิ (ข) ความดัน (ค) การเปิดเปิดวาล์ว.....	30
2.9 แสดงเมตริกซ์ FAM ของระบบควบคุม STEAM TURBINE.....	32
2.10 แสดงการคำนวณค่าความเป็นสมาชิกของเทอมเซต COOL และ NORMAL.....	33
2.11 แสดงการคำนวณค่าความเป็นสมาชิกของเทอมเซต LOW และ OK.....	34
2.12 แสดงกฎที่เป็นจริงของ FAM.....	35
2.13 แสดงขั้นตอนการประมาณค่า I(t) โดยคำนวณจากค่าความจริงที่มีค่าต่ำสุด.....	36
2.14 แสดงการ Defuzzification โดยใช้ค่าสูงสุดของค่าอัตราความเป็นสมาชิก.....	37
2.15 แสดงการ Defuzzification โดยวิธี COA.....	38
2.16 โครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซี่แบบปรับกฎด้วยตัวเอง.....	41
3.1 แสดงทางเดินสถานะของระบบที่เสถียรภาพ.....	45
3.2 แสดงทางเดินสถานะของระบบที่ไม่เสถียรภาพ.....	45
3.3 บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลองฟัซซี่ลอจิก.....	47
3.4 แสดงเทอมเซตของฟัซซี่กฎที่ 1 และ 2.....	54
4.1 วงจรภายในของเครื่องทำน้ำอุ่น.....	56
4.2 แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Heater.....	57
4.3 แสดง Block Diagram ของระบบที่ควบคุมด้วยฟัซซี่.....	58
4.4 แสดงแบบจำลองตัวควบคุมฟัซซี่ควบคุมเครื่องทำน้ำอุ่น.....	58
4.5 แสดงกราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ Input Error Temperature.....	59
4.6 แสดงกราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ Input Change Error Temperature.....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 แสดงกราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ Output (เปอร์เซ็นต์การ ON ของ ไตรแอก).....	60
4.8 แสดงเมตริกซ์ FAM ของระบบควบคุม.....	61
4.9 แสดงความเป็นสมาชิกของ Error Temperature ที่ 1 °c	64
4.10 แสดงความเป็นสมาชิกของ Change Error Temperature ที่ 0 °c	64
4.11 แสดงการหาค่าเอาต์พุต	65
4.12 แสดงการควบคุมการทำงานของระบบควบคุม	66
4.13 แสดง Flowchart ควบคุมการทำงานของ Heater	66
4.14 โครงสร้างพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 แบบแฟลชในอนุกรม AT89Sxx...	68
4.15 การจัดขามาตรฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ในอนุกรม AT89C5X.....	69
4.16 ไอซี เบอร์ DS1820.....	73
4.17 แสดงวงจรควบคุมการทำงานของ ไตรแอก	74
4.18 แสดง Block Diagram ภายในของ MOC 3043.....	75
4.19 แสดงวงจรส่วนควบคุมการทำงานของ Heater.....	75
4.20 แสดงผลตอบสนองเอาต์พุตที่ 34 °c	76
4.21 แสดงผลตอบสนองเอาต์พุตที่ 35 °c	77
4.22 แสดงผลตอบสนองเอาต์พุตที่ 36 °c	77
4.23 แสดงผลตอบสนองเอาต์พุตที่ 37 °c	78
4.24 แสดงผลตอบสนองเอาต์พุตที่ 38 °c	78
4.25 แสดงผลตอบสนองเอาต์พุตที่ 39 °c	79
4.26 แสดงผลตอบสนองเอาต์พุตที่ 40 °c	79
4.27 แสดงผลตอบสนองเอาต์พุตที่ 41 °c	80
4.28 แสดงผลตอบสนองเอาต์พุตที่ 35 – 40 - 36 °c	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและเหตุจูงใจของการวิจัย

เนื่องจากการควบคุมระบบที่มีความซับซ้อนในการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ เราสามารถออกแบบด้วยการควบคุมแบบฟัซซี่ ที่ไม่จำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ยุ่งยากมากนักก็สามารถควบคุมระบบที่มีความซับซ้อนทางคณิตศาสตร์ได้ นอกจากนี้ยังจะทำให้สามารถออกแบบตัวควบคุมได้ง่ายขึ้น และทำให้ลดภาระในการวิเคราะห์ระบบทำให้ระบบเข้าใจง่ายขึ้นซึ่งจะส่งผลทำให้การดูแลระบบง่ายขึ้นด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุม
2. เพื่อนำการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุม ไปเป็นพื้นฐานในการออกแบบกฎในระบบฟัซซี่ (Fuzzy System)

1.3 ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์

1. วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบการควบคุม
2. นำผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพมาออกแบบกฎฟัซซี่ (Fuzzy rules)
3. หาเสถียรภาพของระบบควบคุมด้วยฟัซซี่

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

ในการศึกษาเสถียรภาพของระบบควบคุมด้วยฟัซซี่นั้น จะเริ่มต้นโดยการหาโมเดลทางคณิตศาสตร์ของระบบที่จะทำการควบคุม จากนั้นนำโมเดลทางคณิตศาสตร์มาวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ต้องการจะควบคุมแล้วนำผลที่ได้ไปออกแบบกฎของฟัซซี่ เพื่อนำไปใช้ในการควบคุมระบบและหาเสถียรภาพของการควบคุมด้วยฟัซซี่

การหาเสถียรภาพของระบบตัวควบคุมฟัซซี่ ทำได้โดยหาเมตริกซ์ P โดย P เป็นขอบเขตของค่าเอาต์พุตที่จะนำไปออกแบบระบบตัวควบคุมฟัซซี่และพิสูจน์เสถียรภาพของระบบ ซึ่งในส่วนของปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ เราได้นำการออกแบบกฎของฟัซซี่ให้มีเสถียรภาพมาประยุกต์โดยการทดลองกับเครื่องทำน้ำอุ่นที่ใช้งานอยู่ทั่วไปตามบ้านเรือนเพื่อเป็นกรณีศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาเสถียรภาพและแนวทางการออกแบบกฎ เพื่อให้เข้าใกล้จุด Set Point ของระบบที่เราต้องการควบคุม จากนั้นทำการออกแบบกฎของตัวควบคุมพีซี แล้วนำไปควบคุมการจุดชนวนของไตรแอก ซึ่งไตรแอกจะไปควบคุมขดลวดความร้อนของระบบเครื่องทำน้ำอุ่น หลังจากนั้นก็จะทำการหาเสถียรภาพของระบบ โดยใช้ทฤษฎีลียาปูนอฟ (Lyapunov Theory) ในการสร้างกฎพีซี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ฟัซซีเซต

2.1 ฟัซซีเซต

ฟัซซีเซตเป็นเซตที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของสมาชิกภายในกลุ่มแต่ละตัวกับค่าจำกัดความของเซตนั้น ๆ โดยความสัมพันธ์นี้จะถูกแสดงในลักษณะของระดับความเป็นสมาชิกที่มีอยู่ในช่วง $[0,1]$ แทนที่จะแสดงว่าสมาชิกตัวใดเป็นสมาชิกหรือไม่เป็นสมาชิกของเซตนั้นอย่างเซตธรรมดา ซึ่งมีค่าเป็น $\{0, 1\}$ ถ้าเรากำหนดให้ U เป็นเซตเอกภพสัมพัทธ์ และฟัซซีเซต A มีสมาชิกของเซตเป็น $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ โดยที่ $x_i (i=1,2,3,\dots, n)$ เป็นค่าฟัซซีเซต ดังนั้นฟัซซีเซต A สามารถแสดงในรูปแบบของความสัมพันธ์ในฟัซซีเซตได้โดย $\mu_A(x_i)$ ความสัมพันธ์เช่นนี้ในทางทฤษฎีของฟัซซีเซตจะเรียกว่า ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function) และสามารถเขียนเป็นสัญลักษณ์ทางคณิตศาสตร์ได้โดย

$$\mu_A(x_i) : U \rightarrow [0, 1] \quad \dots(2.1)$$

โดยแทนที่ $\mu_A(x_i)$ ก็คือฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเซต A

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเซตใดก็จะสอดคล้องกับค่าจำกัดความของเซตนั้น และค่าจำกัดความเหล่านี้ก็คือตัวแปรต่างๆ ของฟัซซีเซตที่อยู่ภายใต้ขอบเขตของเซตเอกภพสัมพัทธ์ของระบบที่เราสนใจ

ตัวแปรฟัซซี (Fuzzy Variable) หรือบางครั้งอาจจะเรียกว่าตัวแปร Linguistic ซึ่งก็คือฟัซซีเซตใดๆ ของระบบที่เราสนใจ ตัวอย่างเช่น ถ้าเราพิจารณา “อุณหภูมิ” เป็นตัวแปรฟัซซีและถ้าค่าของตัวแปรของเซตนี้คือ (ต่ำ, ปานกลาง, สูง) ซึ่งจะเรียกเซตของค่าตัวแปรฟัซซีนี้ว่าเทอมเซต (Term Set) ซึ่งเป็นเซตย่อย และนอกจากนี้ตัวแปรฟัซซีแต่ละตัวอาจจะมีส่วนขยายของ (Hedges หรือ Qualifiers) เพื่อปรับค่าตัวแปรให้มีค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) ให้น้อยลงเช่น จากค่าของตัวแปรอุณหภูมิ “ต่ำ \rightarrow ต่ำมาก”, “สูง \rightarrow ค่อนข้างสูง” เป็นต้น คำว่า “มาก” หรือคำว่า “ค่อนข้างมาก” ในที่นี้เป็นส่วนขยายของตัวแปรฟัซซี ซึ่งในทางปฏิบัติสามารถจะแทนด้วยฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับฟัซซี

ในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี จะต้องอาศัยความรู้ทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับฟัซซี เพื่อใช้เป็นฐานในการทำความเข้าใจ โครงสร้างและหลักการการทำงานของตัวควบคุมฟัซซี และเพื่อใช้ในการกำหนดโครงสร้างและวิธีการออกแบบให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน ซึ่งมีรายละเอียดเกี่ยวกับทฤษฎีทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับฟัซซีดังต่อไปนี้

ฟัซซีเซต (Fuzzy Set)

2.2 ทฤษฎีเซตแบบเดิม (Crisp Set Theory)

นิยาม 1 คลิซเซต (Crisp Set)

คลิซเซต คือ กลุ่มของสมาชิกที่มีคุณสมบัติตามข้อกำหนด ซึ่งอาจจะมีจำนวนจำกัดหรือไม่จำกัดก็ได้

นิยาม 2 เอกภพสัมพัทธ์ (Universe of Discourse : U)

เอกภพสัมพัทธ์ คือ เซตที่มีสมาชิกทั้งหมดของขอบเขตที่ทำการพิจารณากำหนดให้ x_i เป็นสมาชิกใดๆ ของ U เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $x_i \in U$

นิยาม 3 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิก (Membership Function : μ)

ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของเซต เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ μ ถูกนิยามดังนี้ $\mu_A(x_i)$ มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ x_i เป็นสมาชิกของเซต A $\mu_A(x_i)$ มีค่าเท่ากับ 0 เมื่อ x_i ไม่เป็นสมาชิกของเซต A จะได้ว่า

$$\mu_A(x_i) : U \in \{0, 1\}$$

$$\mu_A(x_i) = \begin{cases} 1 : x_i \in A \\ 0 : x_i \notin A \end{cases} \quad \dots(2.2)$$

นิยาม 4 การเท่ากันของเซต

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

$$(A=B) \Leftrightarrow ((\forall a \in B) \wedge (\forall b \in A) ; a \in A, b \in B) \quad \dots(2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยาม 5 การเป็นสับเซต (Subset)

เซต A จะเป็นสับเซตของเซต B ก็ต่อเมื่อสมาชิกทุกตัวของเซต A เป็นสมาชิกของเซต B เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $A \subseteq B$

$$(A \subseteq B) \Leftrightarrow (\forall a \in B ; a \in A)$$

เซต A จะเป็นสับเซตแท้ ของเซต B ก็ต่อเมื่อ สมาชิกทุกตัวของเซต A เป็นสมาชิกของเซต B และเซต A ไม่เท่ากับเซต B เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $A \subset B$

$$(A \subset B) \Leftrightarrow \{(\forall a \in B) \wedge (A \neq B); a \in A\} \quad \dots(2.4)$$

นิยาม 6 ปฏิบัติการพื้นฐานของเซต

คอมพลีเมนต์ คือ ตัวปฏิบัติการในการสร้างเซตใหม่จากเซตเดิม โดยที่สมาชิกของเซตใหม่คือสมาชิกของเอกภพสัมพัทธ์ U ที่ไม่เป็นสมาชิกของเซตเดิม เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

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

ยูเนียน คือ ตัวปฏิบัติการในการสร้างเซตใหม่จากเซตเดิม 2 เซต โดยที่สมาชิกของเซตใหม่คือสมาชิกของเอกภพสัมพัทธ์ U ที่ไม่เป็นสมาชิกของเซตเดิม เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ ดังนี้

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

อินเตอร์เซกชัน คือ ตัวปฏิบัติการในการสร้างเซตใหม่จากเซตเดิม 2 เซต โดยที่สมาชิกของเซตใหม่ได้มาจากการรวมสมาชิกทั้งหมดที่เป็นสมาชิกของเซตเดิมทั้ง 2 เซต เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ทฤษฎีฟัซซีเซต (Fuzzy Set Theory)

นิยาม 7 ฟัซซีเซต (Fuzzy Set)

ฟัซซีเซต คือ เซตของคู่อันดับ x_i และฟังก์ชันการเป็นสมาชิก $\mu_A(x_i)$ โดยที่ x_i เป็นสมาชิกใดๆ ของเอกภพสัมพัทธ์ U เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

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

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

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

โดยที่ค่า $\mu_A(x_i)$ เป็นค่าที่ระบุถึงระดับความเป็นสมาชิกของ x_i ในฟัซซีเซต A

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

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

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

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

จะได้ว่า $\mu_A(x_i) : U \rightarrow [0, 1]$

นิยาม 9 การเท่ากันของฟัซซีเซต

ฟัซซีเซต A จะเท่ากับฟัซซีเซต B ก็ต่อเมื่อ สมาชิก x_i ทุกตัวในเอกภพสัมพัทธ์ U มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A เท่ากับค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต B ซึ่งเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $A = B$ ดังนี้

$$(A = B) \Leftrightarrow (\mu_A(x_i) = \mu_B(x_i) ; \forall x_i \in U) \quad \dots(2.9)$$

นิยาม 10 การเป็นสับเซตของฟัซซีเซต

ฟัซซีเซต A จะเป็นสับเซตของฟัซซีเซต B ก็ต่อเมื่อสมาชิก x_i ทุกตัวในเอกภพสัมพัทธ์ U มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A น้อยกว่าหรือเท่ากับ ค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต B เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $A \subset B$

$$(A \subset B) \Leftrightarrow (\mu_A(x_i) \leq \mu_B(x_i) ; \forall x_i \in U) \quad \dots(2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยาม 11 ซัพพอร์ตของฟัซซีเซต (Support : $S(A)$)

ซัพพอร์ตของฟัซซีเซต คือ เซตของสมาชิก x_i ในเอกภพสัมพัทธ์ U ที่มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซตมากกว่า 0 เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$S(A) = \{ x_i \in U \mid \mu_A(x_i) > 0 \} \quad \dots(2.11)$$

นิยาม 12 ฟัซซีซิงเกิลตัน (Fuzzy Singleton)

ฟัซซีซิงเกิลตัน คือ ฟัซซีเซตที่มีซัพพอร์ตเซตมีสมาชิกเพียงตัวเดียว และมีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกเท่ากับ 1

นิยาม 13 เซต α -Level ของฟัซซีเซต (A_α)

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

$$A_\alpha = \{ x_i \in U \mid \mu_A(x_i) \geq \alpha \} \quad \dots(2.12)$$

นิยาม 14 ความสูงของฟัซซีเซต (Height of fuzzy Set)

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

$$\text{hgt}(A) = \max_{x_i \in U} \mu_A(x_i) \quad \dots(2.13)$$

นิยาม 15 คุณสมบัติการนอมอลไลซ์ของฟัซซีเซต (Normalization)

ฟัซซีเซต A จะมีคุณสมบัติการนอมอลไลซ์ก็ต่อเมื่อ ฟัซซีเซต A มีความสูงเท่ากับ 1

$$A \text{ is normalized} \Leftrightarrow \text{hgt}(A) = 1 \quad \dots(2.14)$$

นิยาม 16 คุณสมบัติการคอนเวกซ์ของฟัซซีเซต (Convexity)

ฟัซซีเซต A จะมีคุณสมบัติการคอนเวกซ์ ก็ต่อเมื่อการเป็นสมาชิกของ A สอดคล้องตามเงื่อนไขต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A \text{ is convex} \Leftrightarrow \mu_A(\lambda x_{i1} + (1-\lambda)x_{i2}) \geq \min\{\mu_A(x_{i1}), \mu_A(x_{i2})\}; x_{i1}, x_{i2} \in U, \lambda \in [0,1] \quad \dots(2.15)$$

นิยาม 17 ฟัซซีนัมเบอร์ (Fuzzy number)

ฟัซซีนัมเบอร์ คือ ฟัซซีที่มีคุณสมบัติการนอมอลไลซ์และการคอนเวกซ์

นิยาม 18 คาร์ดินาลิตีของฟัซซีเซต (Cardinality)

สเกลาร์คาร์ดินาลิตี (Scalar Cardinality) ของฟัซซีเซต A บนเอกภพสัทพัทธ์ U คือ ผลบวกของค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ x_i ทุกตัวในฟัซซีเซต A เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$|A| = \sum_{x_i \in U} \omega_A(x_i) \quad \dots(2.16)$$

คาร์ดินาลิตีสัมพัทธ์ (Relative Cardinality) ของฟัซซีเซต A บนเอกภพสัทพัทธ์ U คือ อัตราส่วนระหว่างค่าสเกลาร์คาร์ดินาลิตีของฟัซซีเซต A กับค่าสเกลาร์คาร์ดินาลิตีของเอกภพสัทพัทธ์ U เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$|A| = \frac{|A|}{|U|} \quad \dots(2.17)$$

2.4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

เมื่อพิจารณาถึงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบต่าง ๆ ที่จะใช้ในการประมาณค่าระดับความเป็นสมาชิกของแต่ละเทอมเซต โดยมีทั้งแบบที่ประมาณค่าเป็นเชิงเส้น เช่น รูปสามเหลี่ยม หรือรูปสี่เหลี่ยมคางหมู และแบบที่ประมาณค่าโดยฟังก์ชันต่อเนื่อง เช่น S, S⁻¹, รูปประฆังคว่ำ เป็นต้น ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 สมการเชิงเส้น

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสมการเชิงเส้นที่ใช้ในการแปลงค่าความสัมพันธ์ของโดเมนไปยังเรนจ์สำหรับข้อมูลที่มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น ดังสมการที่ 2.18

$$\mu_A(x_i) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}(x_i - a) & ; \text{ถ้า } a \leq x_i \leq b \\ 1 & ; \text{ถ้า } x_i > b \\ 0 & ; \text{ในกรณีอื่นๆ} \end{cases} \quad \dots(2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 รูปสามเหลี่ยม

การกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกโดยใช้รูปสามเหลี่ยม นิยมใช้กันมากในระบบควบคุมที่ใช้พีชคณิต เทอมเซตที่กำหนดโดยฟังก์ชันนี้จะต้องมีค่าที่เหมาะสมที่สุดอยู่เพียงค่าเดียวที่ทำให้ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับหนึ่ง ส่วนค่าอื่นๆ จะมีค่าความเป็นสมาชิกลดลงเรื่อยๆ เมื่อยังห่างจากค่านี้มากขึ้นถ้า กำหนดให้ $a \leq b \leq c$ เมื่อ a, b และ c เป็นเลขจำนวนจริงใด ๆ ดังนั้นสมการของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของรูปสามเหลี่ยมสามารถกำหนดได้ดังนี้

$$\mu_A(x_i) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}(x_i - a) & ; \text{ถ้า } a \leq x_i \leq b \text{ และ } a \neq b \\ \frac{1}{c-b}(c - x_i) & ; \text{ถ้า } b < x_i \leq c \text{ และ } b \neq c \\ 0 & ; \text{สำหรับกรณีอื่นๆ} \end{cases} \quad \dots(2.19)$$

2.4.3 รูปสี่เหลี่ยมคางหมู

สำหรับฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่กำหนดด้วยสมการรูปสี่เหลี่ยมคางหมู นิยมใช้ในระบบควบคุมที่ใช้พีชคณิตเช่นกัน แต่จะพบน้อยกว่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่กำหนดด้วยสมการของรูปสามเหลี่ยม ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่กำหนดด้วยสมการรูปสี่เหลี่ยมคางหมูจะต้องมีช่วงของค่าที่เหมาะสมมากที่สุดอยู่กลุ่มหนึ่งที่ทำให้ค่าความเป็นสมาชิกของเทอมเซตนั้นๆ มีค่าเท่ากับหนึ่ง นอกจากนั้นจะมีค่าความเป็นสมาชิกน้อยลงเรื่อยๆ เมื่อยังห่างจากข้อมูลกลุ่มนี้ ถ้ากำหนดให้ $a \leq b \leq c \leq d$ เมื่อ a, b, c และ d เป็นเลขจำนวนจริงใดๆ ดังนั้นสมการของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของรูปสี่เหลี่ยมคางหมูสามารถกำหนดได้ดังนี้

$$\mu_A(x_i) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}(x_i - a) & ; \text{ถ้า } a \leq x_i \leq b \text{ และ } a \neq b \\ 1 & ; \text{ถ้า } b < x_i \leq c \\ \frac{1}{d-c}(d - x_i) & ; \text{ถ้า } c < x_i \leq d \text{ และ } c \neq d \\ 0 & ; \text{สำหรับกรณีอื่นๆ} \end{cases} \quad \dots(2.20)$$

2.4.4 เส้นโค้งรูปตัว S

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่กำหนดด้วยเส้นโค้งรูปตัว S เป็นการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างโดเมนไปยังเรนจ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น ตัวแปรที่เหมาะสมที่จะใช้ฟังก์ชันนี้คือพวกอายุการใช้งานของอุปกรณ์ต่างๆ ตัวแปรส่วนใหญ่ที่ใช้ในการประมวลผลภาพ เป็นต้น ซึ่งตัวแปรพวกนี้มักจะมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นที่เป็นรูปตัว S หรือ S^{-1} ถ้ากำหนดให้ $a \leq b \leq c$ เมื่อ a, b

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ c เป็นเลขจำนวนจริงใด ๆ ดังนั้นสมการของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเส้นโค้งรูปตัว S สามารถกำหนดได้ดังสมการที่ 2.21 และ S^{-1} สามารถคำนวณได้โดยการหาค่าคอมพลิเมนต์ของสมการที่ 2.21 เมื่อ $S^{-1} = 1 - \mu_A(x_i)$ โดยที่ $\mu_A(x_i)$ หาได้จากสมการที่ 2.21

$$\mu_A(x_i) = \begin{cases} 0 & ; x_i \leq a \\ 2\left(\frac{x_i - a}{c - a}\right)^2 & ; \text{ถ้า } a < x_i \leq b \\ 1 - 2\left(\frac{x_i - a}{c - a}\right)^2 & ; \text{ถ้า } b < x_i \leq c \\ 1 & ; \text{ถ้า } x_i > c \end{cases} \quad \dots(2.21)$$

2.4.5 รูประฆังคว่ำ

เทอมเซตที่ใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบรูประฆังคว่ำ จะมีคุณสมบัติของข้อมูลคล้ายกับสมการรูปสามเหลี่ยม แต่ข้อมูลของโดเมนที่เปลี่ยนไปยังเรนจ์จะมีความสัมพันธ์ในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น สมการของรูประฆังคว่ำมีด้วยกันหลายสมการแต่ที่ใช้กันมากคือ ฟังก์ชัน π , ฟังก์ชัน Gaussian และฟังก์ชัน Beta ซึ่งสามารถกำหนดได้ดังนี้

• ฟังก์ชัน π สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.21

$$S(x_i; a, b, c) = \begin{cases} 0 & ; x_i \leq a \\ 2\left(\frac{x_i - a}{c - a}\right)^2 & ; \text{ถ้า } a < x_i \leq b \\ 1 - 2\left(\frac{x_i - a}{c - a}\right)^2 & ; \text{ถ้า } b < x_i \leq c \\ 1 & ; \text{ถ้า } x_i > c \end{cases} \quad \dots(2.22)$$

โดยที่ $b = \frac{c - a}{2}$

ดังนั้นฟังก์ชัน π สามารถกำหนดได้โดย

$$\mu_A(x_i) = \begin{cases} S\left(x_i; c - b, c - \frac{b}{2}, c\right) & ; \text{ในกรณีที่ } x_i \leq c \\ 1 - S\left(x_i; c, c + \frac{b}{2}, c + b\right) & ; \text{ในกรณีที่ } x_i > c \end{cases} \quad \dots(2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ฟังก์ชัน Gaussian

$$\mu_A(x_i) = e^{K(\bar{x}-x_i)^2} \quad \dots(2.24)$$

โดยที่ $K = \frac{1}{2\sigma^2}$ ซึ่งเป็นโดเมนของฟังก์ชันเซต A ที่มีค่าเฉลี่ยเป็น \bar{X} และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ

- ฟังก์ชัน Beta

ฟังก์ชัน Beta จะมีคุณสมบัติคล้ายกับสมการของรูปสี่เหลี่ยมคางหมู คือจะมีช่วงของข้อมูลที่เหมาะสมกับเทอมเซตนั้น ๆ อยู่กลุ่มหนึ่งที่ทำให้ค่าความเป็นสมาชิกของเทอมเซตมีค่าเข้าใกล้ 1 ซึ่งข้อมูลกลุ่มนี้จะมีความกว้างของช่วงเท่ากับค่า β ซึ่งถ้าค่า $p \rightarrow \infty$ จะทำให้ข้อมูลในช่วง β มีค่าเข้าใกล้ 1 มากยิ่งขึ้นโดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ \bar{X} ดังแสดงในสมการ 2.25

$$\mu_A(x_i) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x_i - \bar{X}}{\beta}\right)^p} \quad \dots(2.25)$$

2.5 ตัวดำเนินการฟังก์ชันเซต

ตัวดำเนินการฟังก์ชันเซตส่วนใหญ่แล้วจะมีตัวดำเนินการเช่นเดียวกันกับเซตธรรมดา คือมีตัวดำเนินการอินเตอร์เซกชัน ยูเนียน คอมพลิเมนต์ เป็นต้น ซึ่งตัวดำเนินการเหล่านี้จะใช้ในการอนุมานค่าฟังก์ชันเซตเพื่อประโยชน์ในการตัดสินใจ โดยการประมาณค่าของตัวแปรในที่นี้จะนำเสนอตัวดำเนินการของฟังก์ชันเซตบางส่วนเฉพาะที่ใช้ในแบบจำลองการตัดสินใจของระบบควบคุมโดยใช้ฟังก์ชันเซตเท่านั้น

กำหนดให้ U เป็นเซตเอกภพสัมพัทธ์ และ A, B เป็นเทอมเซตใดๆ ที่อยู่ในเซตเอกภพสัมพัทธ์ U และตัวดำเนินการพื้นฐานต่างๆ สามารถกำหนดได้ดังนี้

2.5.1 เซตย่อย

A เป็นเซตย่อยของ B ($A \subseteq B$) ก็ต่อเมื่อ

$$\mu_A(x_i) \leq \mu_B(x_i); \forall x_i \in U \quad \dots(2.26)$$

2.5.2 คอมพลิเมนต์

A เป็นคอมพลิเมนต์ของ B ($A = B^c$) ก็ต่อเมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mu_A(x_i) = \mu_{B^c} = 1 - \mu_{B^c}; \forall x_i \in U \quad \dots(2.27)$$

2.5.3 อินเตอร์เซกชันของ A และ B ($A \cap B$) กำหนดได้โดย

$$\mu_{A \cap B}(x_i) = \text{Min}(\mu_A(x_i), \mu_B(x_i)); \forall x_i \in U \quad \dots(2.28)$$

2.5.4 ยูเนียนของ A กับ B ($A \cup B$) กำหนดได้โดย

$$\mu_{A \cup B}(x_i) = \text{Max}(\mu_A(x_i), \mu_B(x_i)); \forall x_i \in U \quad \dots(2.29)$$

2.5.5 A ยกกำลังด้วยค่า α (A^α) กำหนดได้โดย

$$\mu_{A^\alpha}(x_i) = (\mu_A(x_i))^\alpha; \forall x_i \in U \quad \dots(2.30)$$

2.5.6 Concentration ของเซต A กำหนดได้โดย

$$\text{CON}(A) \Rightarrow \mu_{\text{CON}(A)}(x_i) = (\mu_A(x_i))^2; \forall x_i \in U \quad \dots(2.31)$$

2.5.7 Dilation ของเซต A กำหนดได้โดย

$$\text{DIL}(A) \Rightarrow \mu_{\text{DIL}(A)}(x_i) = (\mu_A(x_i))^{0.5}; \forall x_i \in U \quad \dots(2.32)$$

2.5.8 Contrast Intensification ของเซต A กำหนดได้โดย

$$\text{INT}(A) \Rightarrow \mu_{\text{INT}(A)}(x_i) = \begin{cases} 2(\mu_A(x_i))^2 & ; \text{ถ้า } 0 \leq \mu_A(x_i) \leq 0.5 \\ 1 - 2(1 - \mu_A(x_i))^2 & ; \text{ถ้า } 0.5 < \mu_A(x_i) \leq 1 \end{cases} \quad \dots(2.33)$$

2.6 ฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic)

นิยาม 19 ตัวแปรลิงกวิสติก (Linguistic Variable)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

- x คือ ชื่อของตัวแปร (Label)
- T(t) คือ เซตของค่าลึงกวีสติคของ x
- U คือ เอกภพสัมพัทธ์ โดยที่ $x_i \in u$
- X คือ ชื่อของค่าลึงกวีสติคของ x ที่ถูกสร้างตามกฎ G เรียกว่า เทอม (term)
- G คือ Syntatic rule ในการกำหนดชื่อของเทอม X
- M คือ Semantic rule ในการนิยามคุณสมบัติของเทอม X
- M(x) คือ ฟังก์ชันเซตของเอกภพสัมพัทธ์ U

ตัวแปรลึงกวีสติคที่สำคัญในพีชคณิตลอจิก ได้แก่ ตัวแปร “Probability” และ “Truth” ซึ่งในการนิยามตัวแปรลึงกวีสติค “Truth” ได้มีผู้นำเสนอไว้ต่างๆ กันดังนี้ ในปี ค.ศ. 1973 Zadeh ได้นิยามเซตของเทอมของตัวแปรลึงกวีสติค “Truth” ดังสมการที่ 2.34

$$T(\text{Truth}) = \{ \text{true, not true, very true, not very true, \dots, false, not false, very false, \dots, not very true and not very false, \dots} \} \dots(2.34)$$

นิยาม 20 ส่วนขยายของตัวแปรลึงกวีสติค (Linguistic Hedge) หรือ Modifier

ส่วนขยายของตัวแปรลึงกวีสติค (Linguistic Hedge) หรือ Modifier คือ ตัวปฏิบัติการในการแปลงหรือขยายหรือลดขอบเขตค่าความเป็นสมาชิกของพีชคณิตเซต ซึ่งในที่นี้ก็คือเทอมของตัวแปรลึงกวีสติคนั้นเอง ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น

Concentration เป็นส่วนขยายที่ลดระดับค่าความเป็นสมาชิกของสมาชิกทั้งหมดที่มีความเป็นสมาชิกภายในเซตเพียงบางส่วนเท่านั้น ดังแสดงในสมการที่ 2.35

กำหนดให้ A เป็นพีชคณิตเซต เซตในเอกภพสัมพัทธ์ U โดยที่ $x_i \in u$

$$\text{CON}(A) = \mu_{\text{con}(A)}(x_i) = [\mu_A(x_i)]^2 \dots(2.35)$$

ตัวอย่างเช่น

$$\text{“Very” } A = [\mu_A(x_i)]^2$$

$$\text{“Very,Very” } A = [\mu_A(x_i)]^4$$

$$\text{“Plus” } A = [\mu_A(x_i)]^{1.25}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Dilation เป็นส่วนขยายที่เพิ่มระดับความเป็นสมาชิกของสมาชิกทั้งหมด ที่มีความเป็นสมาชิกภาพในเซตเพียงบางส่วนเท่านั้น ดังแสดงในสมการที่ 2.36

กำหนดให้ A เป็นฟัซซีเซต เซตในเอกภพสัมพัทธ์ U โดยที่ $x_i \in U$

$$DIL(A) = \mu_{dil(A)}(x_i) = [\mu_A(x_i)]^{0.5} \quad \dots(2.36)$$

ตัวอย่างเช่น

$$\text{“Slightly” } A = [\mu_A(x_i)]^{0.5}$$

$$\text{“Minus” } A = [\mu_A(x_i)]^{0.75}$$

Intensification เป็นส่วนขยายที่เพิ่มระดับความเป็นสมาชิกของสมาชิกทั้งหมดที่มีระดับความเป็นสมาชิกเดิมมากกว่า 0.5 และลดระดับความเป็นสมาชิกของสมาชิกทั้งหมดที่มีระดับความเป็นสมาชิกเดิมน้อยกว่า 0.5 ดังแสดงในสมการที่ 2.37

$$\text{“intensify” } A = \begin{cases} 2[\mu_A(x_i)]^2 & ; \mu_A(x_i) \in [0, 0.5] \\ 1 - 2[1 - \mu_A(x_i)]^2 & ; \mu_A(x_i) \in [0.5, 1] \end{cases} \quad \dots(2.37)$$

2.7 ประพจน์แบบฟัซซี (Fuzzy Proposition)

ประพจน์ คือ ข้อความแสดงถึงความจริงทางคุณสมบัติหรือค่าประมาณของวัตถุ หรือตัวแปรใดตัวแปรหนึ่ง

นิยาม 21 ประพจน์ฟัซซีเดี่ยว (Atomic Fuzzy Proposition)

ประพจน์แบบฟัซซีเดี่ยว คือข้อความที่แสดงถึงคุณสมบัติทางฟัซซีของตัวแปรลึงกวีสติก ซึ่งมีรูปแบบดังแสดงในสมการที่ 2.38

$$X \text{ is } A \quad \dots(2.38)$$

โดยที่

X = ตัวแปรลึงกวีสติก เช่นความเร็ว อุณหภูมิ เป็นต้น

is = คุณสมบัติของการเป็น

A = ค่าลึงกวีสติกหรือฟัซซีเซต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยาม 22 ประพจน์ฟัซซีผสม (Compound Fuzzy Proposition)

ประพจน์ฟัซซีผสม คือ ประพจน์ฟัซซีเดี่ยวตั้งแต่ 2 ประพจน์ขึ้นไปซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยตัวเชื่อมต่างๆ เช่น “AND”, “OR” และ “NOT” เป็นต้น

ดังนั้นประพจน์ฟัซซีผสมเทียบได้กับความสัมพันธ์ฟัซซี โดยมีตัวปฏิบัติการดังนี้ ประพจน์ที่เชื่อมด้วย “AND” ใช้ตัวปฏิบัติการฟัซซีอินเตอร์เซกชัน ดังแสดงในสมการที่ 2.39

$$\begin{aligned} X \text{ is } A \text{ AND } Y \text{ is } B \\ \mu_{A \cap B}(x, y) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)] \end{aligned} \quad \dots(2.39)$$

ประพจน์ที่เชื่อมด้วย “OR” ใช้ตัวปฏิบัติการฟัซซียูเนียน

$$\begin{aligned} X \text{ is } A \text{ OR } Y \text{ is } B \\ \mu_{A \cup B}(x, y) = \max[\mu_A(x), \mu_B(y)] \end{aligned} \quad \dots(2.40)$$

ประพจน์ที่เชื่อมด้วย “NOT” ใช้ตัวปฏิบัติการคอมพลีเมนต์ของฟัซซีเซต

$$\begin{aligned} X \text{ is NOT } A \\ \mu_{\bar{A}}(x_i) = 1 - \mu_A(x_i) \end{aligned} \quad \dots(2.41)$$

นิยาม 23 กฎของฟัซซี (Fuzzy Rules)

กฎของฟัซซี (Fuzzy Rules) จะประกอบด้วยประพจน์ของฟัซซี ซึ่งเป็นข้อความแบบมีเงื่อนไข โดยกฎของฟัซซีจะอยู่ในรูปแบบของ IF – THEN ดังนี้

$$\text{IF (fuzzy proposition) THEN (fuzzy proposition)} \quad \dots(2.42)$$

เช่น

$$\text{IF } X \text{ is } A \text{ THEN } Y \text{ is } B$$

โดยที่

$X \text{ is } A$ เป็นส่วนเงื่อนไขของกฎ (rule antecedent)

$Y \text{ is } B$ เป็นส่วนข้อสรุปหรือผลลัพธ์ของกฎ (rule Consequent)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 การหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผลโดยใช้ทฤษฎีฟัซซี่ลอจิก

การหาข้อสรุปตามหลักการเหตุผล โดยใช้ทฤษฎีฟัซซี่ลอจิก ซึ่งจะเป็นการขยายนิยามของ สัจนิรันดร์ที่ใช้ในตรรกศาสตร์แบบเดิม เพื่อใช้หาข้อสรุปตามหลักการเหตุผลของประพจน์ที่เป็น ฟัซซี่เซต โดยทำการขยายนิยามของ Modus Ponens และ Modus Tollens สำหรับฟัซซี่ลอจิก เรียกว่า Generalized Modus Ponens : GMP และ Generalized Modus Tollens : GMT ดังแสดงในนิยาม 24 และนิยาม 25 ตามลำดับ

นิยาม 24 Generalized Modus Ponens : GMP

Generalized Modus Ponens เป็นการหาข้อสรุปจากเหตุไปหาผล (Forward data - driven)

GMP : Premise	X is A'
Implication	IF X is A THEN Y is B
Conclusion	Y is B'

โดยที่ GMP Implication ถูกนิยามดังสมการ

$$A \rightarrow B = \max\{c \in [0,1], t(A,c) \leq B\} \quad \dots(2.43)$$

นิยาม 25 Generalized Modus Tollens : GMT

Generalized Modus Tollens คือ การหาข้อสรุปจากผลไปหาเหตุ (Backward goal - driven)

GMT : Premise	Y is B'
Implication	IF X is A THEN Y is B
Conclusion	X is A'

โดยที่ GMT Implication ถูกนิยามดังสมการ

$$A \rightarrow B = \min\{c \in [0,1], t(B,c) \leq A\} \quad \dots(2.44)$$

นิยาม 26 ฟัซซี่ อิมพลิเคชัน (Fuzzy Implication)

การอิมพลิเคชัน คือการตีความหมายกฎของฟัซซี่ ซึ่งมีหลายวิธี แต่ที่ได้รับความนิยม คือวิธีการอิมพลิเคชันที่ใช้โดย Prof.Mamdani

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้

$$\text{IF } (FP_1) \text{ THEN } (FP_2)$$

เป็นกฎของฟัซซี่ โดย FP_1 เป็นความสัมพันธ์ฟัซซี่ใน $X = x_1 \times x_2 \times \dots \times x_n$ และ FP_2 เป็นความสัมพันธ์ฟัซซี่ใน $Y = y_1 \times y_2 \times \dots \times y_n$ ซึ่ง X และ Y เป็นตัวแปรเชิงวิสตติค X และ Y ตามลำดับ

Mamdani Implication ถูกตีความเป็นความสัมพันธ์ฟัซซี่ Q ใน $X \times Y$ ด้วยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกดังแสดงในสมการ

$$\mu_Q(x, y) = \min\{\mu_{FP_1}(x), \mu_{FP_2}(y)\} \quad \dots(2.45)$$

หรือ

$$\mu_Q(x, y) = \{\mu_{FP_1}(x) \times \mu_{FP_2}(y)\} \quad \dots(2.46)$$

2.9 ความสัมพันธ์ฟัซซี่ (Fuzzy Relation)

นิยาม 27 ผลคูณคาร์ทีเซียน (Cartesian Product)

กำหนดให้ A_1, \dots, A_n เป็นฟัซซี่เซตในเอกภพสัมพัทธ์ U_1, \dots, U_n โดยที่ $x_1, \dots, x_n \in U_1, \dots, U_n$ ตามลำดับ ผลคูณคาร์ทีเซียนของ A_1, \dots, A_n คือ ฟัซซี่เซตในเอกภพสัมพัทธ์ $U_1 \times \dots \times U_n$ ที่มีฟังก์ชันการเป็นสมาชิกดังนี้

$$\mu_{A_1 \times \dots \times A_n}(x_1, \dots, x_n) = \begin{cases} \min\{\mu_{A_1}(x_1), \dots, \mu_{A_n}(x_n)\} & \text{min-inter section} \\ \mu_{A_1}(x_1) \times \dots \times \mu_{A_n}(x_n) & \text{algebraic product} \end{cases} \quad \dots(2.47)$$

นิยาม 28 ความสัมพันธ์ฟัซซี่

กำหนดให้ R เป็นความสัมพันธ์ฟัซซี่เซต A ไปยังฟัซซี่เซต B

โดยที่ A เป็นฟัซซี่เซตในเอกภพสัมพัทธ์ U ; $x \in U$

B เป็นฟัซซี่เซตในเอกภพสัมพัทธ์ V ; $y \in V$

จะได้ว่า

$$R_{U,V} = A \times B = \{(u, v), \mu_R(u, v) \mid (u, v) \in U \times V\} \quad \dots(2.48)$$

$$\mu_R(u, v) = \mu_{A \cdot B}(u, v) = \begin{cases} \min\{\mu_A(u), \mu_B(v)\} & \text{min-inter section} \\ \mu_A(u) \times \mu_B(v) & \text{algebraic product} \end{cases} \quad \dots(2.49)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

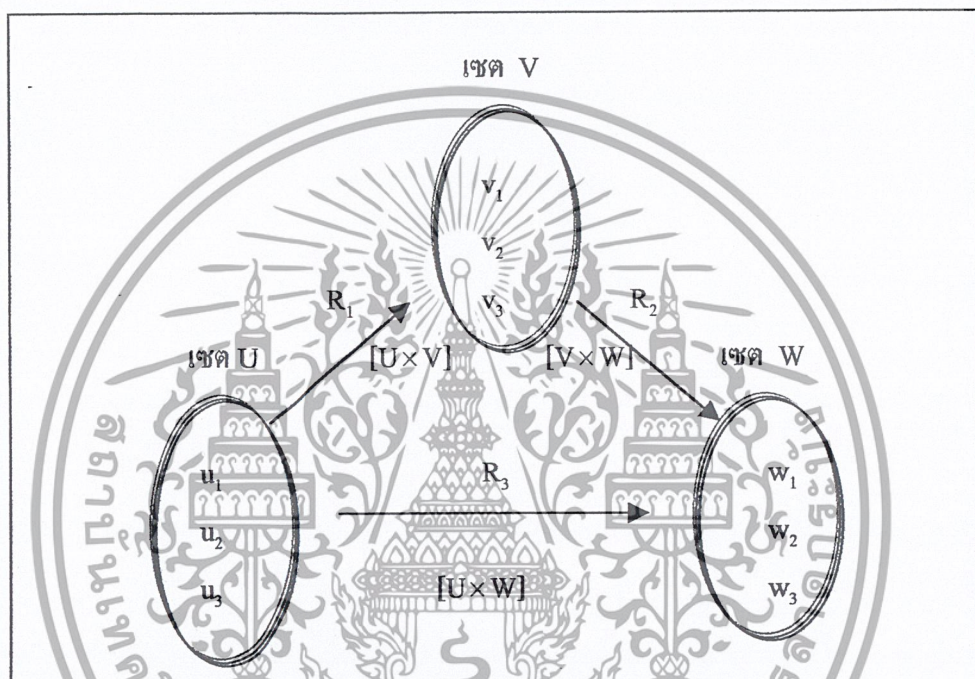
2.10 การคอมโพสิชันแบบฟัซซี่ (Fuzzy Composition)

นิยาม 29 การคอมโพสิชันแบบฟัซซี่ (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 คือปฏิบัติการในการหาความสัมพันธ์ $R_3(u,w)$ จากความสัมพันธ์ที่ถ่ายทอดต่อเนื่องกันเป็นลูกโซ่ $R_1(u,v)$ และ $R_2(v,w)$ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงการคอมโพสิชันของความสัมพันธ์ฟัซซี่

กำหนดให้ $R_1(u,v)$ เป็นความสัมพันธ์ฟัซซี่ บนระนาบ $U \times V$ โดยที่ $(u,v) \in U \times V$

$R_2(v,w)$ เป็นความสัมพันธ์ฟัซซี่ บนระนาบ $V \times W$ โดยที่ $(v,w) \in V \times W$

การคอมโพสิชันของความสัมพันธ์ฟัซซี่ ถูกนิยามดังนี้

นิยาม 30 Max-Min Composition

$$R_3 = R_1 \circ R_2 = \left\{ (u,w), \max_{v \in V} \{ \min[\mu_{R_1}(u,v), \mu_{R_2}(v,w)] \} \mid u \in U, v \in V, w \in W \right\} \quad \dots(2.50)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยาม 31 Max – Product Composition

$$R_3 = R_1 * R_2 = \left\{ (u, w), \max_{v \in V} \{ \mu_{R_1}(u, v), \mu_{R_2}(v, w) \} \mid u \in U, v \in V, w \in W \right\} \quad \dots(2.51)$$

นิยาม 32 Max – Average Composition

$$R_3 = R_1 \text{ av } R_2 = \left\{ (u, w), \max_{v \in V} \left\{ \frac{\mu_{R_1}(u, v) + \mu_{R_2}(v, w)}{2} \right\} \mid u \in U, v \in V, w \in W \right\} \quad \dots(2.52)$$

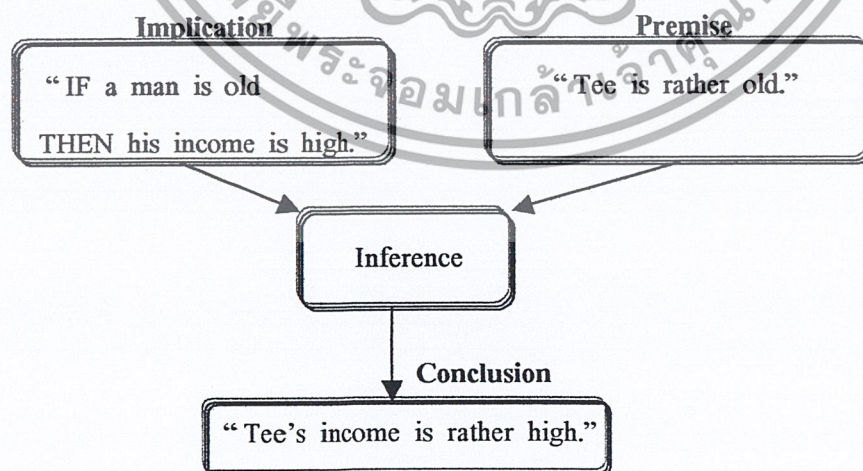
นิยาม 33 Min – Max Composition

$$R_3 = R_1 \bullet R_2 = \left\{ (u, w), \min_{v \in V} \{ \max \{ \mu_{R_1}(u, v), \mu_{R_2}(v, w) \} \} \mid u \in U, v \in V, w \in W \right\} \quad \dots(2.53)$$

2.11 การอนุมานค่าแบบฟัซซี (Fuzzy Inference)

นิยาม 34 การอินเฟอร์เรนซ์แบบฟัซซี (Fuzzy Inference)

การอินเฟอร์เรนซ์ คือกระบวนการในการหาข้อสรุป (Conclusion) จากหลักฐาน (Premise) โดยใช้เงื่อนไขความสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผล (Implication) ดังแสดงในตัวอย่าง ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงการหาข้อสรุปจากหลักฐาน โดยใช้เงื่อนไขความสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยาม 35 กฎการคอมโพสิชันของการอินเฟอเรนซ์ (Composition Rule of Inference : CRI)

กำหนดให้	Premise	$u \text{ is } A'$
	Implication	IF $u \text{ is } A$ THEN $v \text{ is } B$
	Conclusion	$v \text{ is } B'$

เมื่อ A, A' เป็นฟัซซีเซตในเอกภพสัมพัทธ์ U โดยที่ $u \in U$

B, B' เป็นฟัซซีเซตในเอกภพสัมพัทธ์ V โดยที่ $v \in V$

ทำการแปลงอิมพลีเคชันเป็นความสัมพันธ์ฟัซซี R ใน $U \times V$ ดังนั้นจะหา B' ได้ดังนี้

$$B' = \begin{cases} A' \circ R & \text{max-min composition} \\ A' * R & \text{max-product composition} \\ A' \text{ av } R & \text{max-average composition} \\ A' \circ R & \text{min-max composition} \end{cases} \quad \dots(2.54)$$

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

$$B' = A' \circ R = \left\{ \left(v, \max_{A' \in U} \{ \min[\mu_{A'}(u), \mu_R(u,v)] \} \right) \mid u \in U, v \in V \right\} \quad \dots(2.55)$$

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

- ปัญหาในการสร้างโมเดล โดยการหาความสัมพันธ์ฟัซซี R จากฟัซซีเซต A และ B
- ปัญหาในการออกแบบตัวควบคุม โดยการหาฟัซซีเซต A จากความสัมพันธ์ฟัซซี R และฟัซซีเซต B

ซึ่งจะเห็นว่าการแก้ปัญหาทั้งสองนี้ จะต้องใช้ตัวปฏิบัติการผกผัน (inverse) ของการคอมโพสิชัน จึงมีการนิยามตัวปฏิบัติการ \oslash -Composition สำหรับการคอมโพสิชันผกผัน ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยาม 36 ตัวปฏิบัติการ \circ - Composition

\circ - Composition คือ ตัวปฏิบัติการผกผันของการคอมโพสิชัน เป็นฟังก์ชันจาก $[0,1] \times [0,1]$ ไปยัง $[0,1]$ ซึ่งถูกนิยามดังนี้

$$\circ = \max\{c \in [0,1] \mid t(x,c) \leq y ; x,y \in [0,1]\} \quad \dots(2.56)$$

\circ - Composition ของความสัมพันธ์ฟัซซี R บนระนาบ $U \times V$ กับฟัซซีเซต B ซึ่งถูกเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $R \circ B'$ และถูกนิยามในรูปฟังก์ชันการเป็นสมาชิกดังนี้

$$\mu_{(R \circ B')}(u) = \min_{v \in B'} [\mu_R(u,v) \circ \mu_{B'}(v)] \quad \dots(2.57)$$

2.12 การฟัซซีฟิเคชัน (Fuzzification)

นิยาม 37 การฟัซซีฟิเคชัน (Fuzzification)

การฟัซซีฟิเคชัน คือกระบวนการหาค่าฟัซซีเซตบนเอกภพสัมพัทธ์ U ของอินพุต เพื่อเป็นตัวแทนของอินพุตซึ่งมีค่าเป็นตัวเลข สำหรับใช้เป็นอินพุตของระบบฟัซซี

การฟัซซีฟิเคชัน สามารถทำได้ 3 วิธีดังนี้

1. การฟัซซีฟิเคชัน โดยใช้ฟัซซีซิงเกิลตัน จะได้ว่า Fuzzification (u_0) = A

โดยที่ A เป็นฟัซซีซิงเกิลตันซึ่งมี $S(A) = (u_0)$

หรือ

$$\mu_{A(x_i)} = \begin{cases} 1 & ; x_i = u_0 \\ 0 & ; x_i \neq u_0 \end{cases} \quad \dots(2.58)$$

2. การฟัซซีฟิเคชัน โดยใช้ฟัซซีนัมเบอร์ จะได้ว่า Fuzzification (u_0) = A

โดยที่ A เป็นฟัซซีนัมเบอร์

$$\mu_A(x_i) = 1 \quad \text{เมื่อ } x_i = u_0$$

และ $\mu_A(x_i)$ ลดลง เมื่อ x_i อยู่ห่างออกไปจาก u_0

ตัวอย่างของการฟัซซีฟิเคชัน โดยใช้ฟัซซีนัมเบอร์ เช่น

$$\mu_A(x_i) = \exp \left[- \frac{(x_i - u_0)^T (x_i - u_0)}{\sigma^2} \right] \quad \dots(2.59)$$

โดยที่ σ เป็นพารามิเตอร์ในการกำหนดรูปร่างของ $\mu_A(x_i)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การฟัซซีฟิเคชัน โดยใช้ไฮบริด 넘เบอร์ (Hybrid number)

จะได้ว่า Fuzzification (u_0) = A

โดยที่ A เป็นไฮบริด 넘เบอร์ (ไฮบริด 넘เบอร์ คือฟัซซี 넘เบอร์ที่สมาชิกในเอกภพสัมพัทธ์เป็น random number)

$$\mu_A(x_i) = 1 \quad \text{เมื่อ } x_i = u_0$$

และ $\mu_A(x_i)$ ลดลง เมื่อ x_i อยู่ห่างออกไปจาก u_0

2.13 การดีฟัซซีฟิเคชัน (Defuzzification)

นิยาม 38 การดีฟัซซีฟิเคชัน (Defuzzification)

การดีฟัซซีฟิเคชัน คือกระบวนการหาค่าเอาต์พุตเพียงค่าเดียว (ซิงเกิลตัน) ที่เหมาะสมที่สุด เพื่อเป็นตัวแทนของฟัซซีเอาต์พุตที่มีค่าความเป็นไปได้กระจายอยู่บนเอกภพสัมพัทธ์ V ของค่าเอาต์พุต

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 และเมื่อทำการดีฟัซซีฟิเคชันแล้ว ก็จะหาฟัซซีซิงเกิลตัน v_0 ซึ่งเป็นตัวแทนของฟัซซีเอาต์พุต B เพื่อใช้เป็นเอาต์พุตที่แท้จริงของระบบได้

ตัวอย่างวิธีการดีฟัซซีฟิเคชัน ที่นิยมใช้มีดังนี้

1. Max Procedure เป็นวิธีการดีฟัซซีฟิเคชัน โดยเลือกค่าเอาต์พุตที่มีค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมากที่สุด เพื่อใช้เป็นตัวแทนของฟัซซีเอาต์พุต สามารถแสดงด้วยสมการที่ 2.60 ดังนี้

$$v_0 = \max_{x_i \in U} \mu_A(x_i) \quad \dots(2.60)$$

2. Mean of Maxima (MOM) เป็นวิธีที่ขยยามาจากวิธี Max Procedure เพื่อใช้ในกรณีที่มีค่าเอาต์พุตมีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกสูงสุดเท่ากันหลายค่า ให้ทำการหาค่าเฉลี่ยของค่าเอาต์พุตที่มีค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสูงสุดเท่ากัน โดยสามารถหาได้จากสมการที่ 2.61 ดังนี้

$$v_0 = \text{MOM}(A) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \dots(2.61)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ x_i คือ ค่าเอาต์พุตแต่ละค่าที่มีค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสูงสุดเท่ากัน

n คือ จำนวนเอาต์พุตที่มีค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสูงสุดเท่ากัน

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

วิธี COA เป็นวิธีการหาจุดศูนย์กลางของพื้นที่ใต้กราฟของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก เพื่อให้เป็นตัวแทนของฟuzzyเซตเอาต์พุต ซึ่งทำได้โดยการแบ่งพื้นที่ใต้กราฟของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ออกเป็น 2 ส่วนเท่า ๆ กัน และค่าของ v_0 นั้นจะหาได้จากค่าของ v ที่ตำแหน่งของเส้นแบ่งครึ่งซึ่ง สามารถแสดงด้วยสมการดังนี้

$$\int_{-\infty}^{\text{COA}(A)} \mu_A(x_i) dx_i = \int_{\text{COA}(A)}^{\infty} \mu_A(x_i) dx_i \quad \dots(2.62)$$

ในทางปฏิบัติ การคำนวณโดยใช้สมการที่ 2.62 นั้นทำได้ยาก จึงประมาณการคำนวณของ วิธี COA โดยใช้วิธี COG ซึ่งเป็นการหาจุดศูนย์กลางการถ่วงน้ำหนักแทนการหาจุดศูนย์กลาง ของพื้นที่ใต้กราฟ สมการของการนิตีฟuzzyเซตชัน โดยใช้วิธี COG สามารถแสดงได้ดังนี้

$$v_0 = \text{COG}(A) = \frac{\int x_i \mu_A(x_i) dx_i}{\int \mu_A(x_i) dx_i} \quad \dots(2.63)$$

ในกรณีที่เอกภพสัมพัทธ์ U มีสมาชิกเป็นค่าที่ไม่ต่อเนื่อง (discrete) สามารถหาค่า v_0 ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$v_0 = \text{COG}(A) = \frac{\sum_{i=1}^{Nq} x_i \mu_A(x_i)}{\sum_{i=1}^{Nq} \mu_A(x_i)} \quad \dots(2.64)$$

เมื่อ Nq คือ ระดับการควอนไทซ์

x_i คือ ค่าเอาต์พุตของแต่ละค่าในการควอนไทซ์

4. Fuzzy Mean Method (FM) เป็นวิธีที่ปรับปรุงมาจากวิธี COG เพื่อลดเวลาในการ คำนวณ โดยการลดระดับการควอนไทซ์ลงให้เท่ากับจำนวนเทอมของตัวแปรเอาต์พุตในเอกภพ สัมพัทธ์ V และใช้ค่าเฉลี่ยของแต่ละเทอมเป็นตัวแทนของค่าเอาต์พุตของแต่ละค่าการควอนไทซ์ สมการของการนิตีฟuzzyเซตชัน โดยวิธี FM สามารถแสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_o = FM(A) = \frac{\sum_{k=1}^{N_u} \gamma_k x_k}{\sum_{k=1}^{N_u} \gamma_k} \quad \dots(2.65)$$

เมื่อ N_u คือ จำนวนฟัซซีเซตของตัวแปรเอาต์พุตในเอกภพสัมพัทธ์ U

γ_k คือ ค่าเฉลี่ยที่ใช้เป็นตัวแทนของฟัซซีเซตของตัวแปรเอาต์พุตแต่ละเทอมที่เกิดขึ้นบนเอกภพสัมพัทธ์ V

x_k คือ ค่าระดับความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซตของตัวแปรเอาต์พุตแต่ละเทอมที่เกิดขึ้นบนเอกภพสัมพัทธ์ V

5. Weighted Fuzzy Mean Method (WFM) เป็นวิธีที่ขยายมาจากวิธี FM โดยเพิ่มการคูณสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของตัวแปรเอาต์พุตในแต่ละเทอม สมการของการดีฟัซซิฟิเคชันโดยวิธี WFM สามารถแสดงได้ดังนี้

$$v_o = WFM(A) = \frac{\sum_{k=1}^{N_u} \omega_k \gamma_k x_k}{\sum_{k=1}^{N_u} \omega_k \gamma_k} \quad \dots(2.66)$$

เมื่อ ω_k คือ สัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของแต่ละเทอมของตัวแปรเอาต์พุตที่เกิดขึ้นภายในเอกภพสัมพัทธ์ U

6. Indexed Defuzzification Method (IDFZ) เป็นวิธีการที่ขยายมาจากการดีฟัซซิฟิเคชันแบบเดิม โดยการตัดเอาเอาต์พุตบางส่วนที่มีค่าฟังก์ชันความเป็นสมานน้อยกว่าค่าเทรชโฮลด์ (threshold) ที่กำหนด โดยจะคำนวณเฉพาะค่าเอาต์พุตที่มีค่าฟังก์ชันความเป็นสมานมากกว่าค่าเทรชโฮลด์ซึ่งสามารถแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$IDFZ(B, \alpha_j) = DFZ(\alpha - \text{cut}(B, \alpha_j)) \quad \dots(2.67)$$

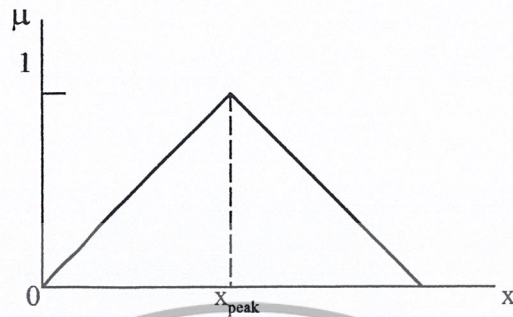
2.14 พารามิเตอร์ของฟังก์ชันความเป็นสมาน

เรื่องที่ศึกษาที่ใช้ฟังก์ชันสามเหลี่ยมเป็นฟังก์ชันความเป็นสมานดังนั้นจะกล่าวเพียงพารามิเตอร์ของฟังก์ชันสามเหลี่ยมเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14.1 ค่าสูงสุด (Peak Value)

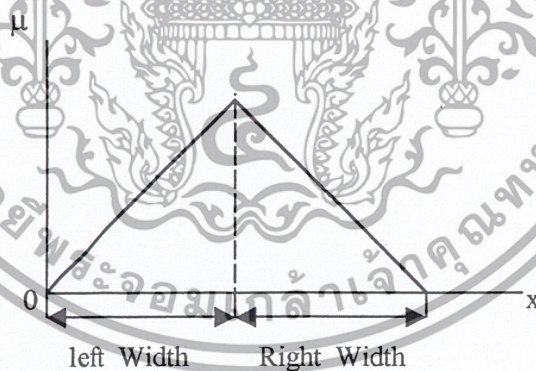
ค่าสูงสุด หมายถึง ค่าสูงสุดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในแต่ละเทอม โดยจะมีค่าเท่ากับ 1 ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ค่าสูงสุดของฟังก์ชันสามเหลี่ยม

2.14.2 ความกว้างทางซ้ายและขวา (Left and right Width)

ความกว้างทางซ้ายและขวา หมายถึง ช่วงความกว้างระหว่างจุดสูงสุดและจุดศูนย์ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกหรือเรียกว่าซัพพอร์ตของเซตถ้าความกว้างทั้งสองเท่ากัน เราเรียกฟังก์ชันนี้ว่าเป็นฟังก์ชันสมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 2.4

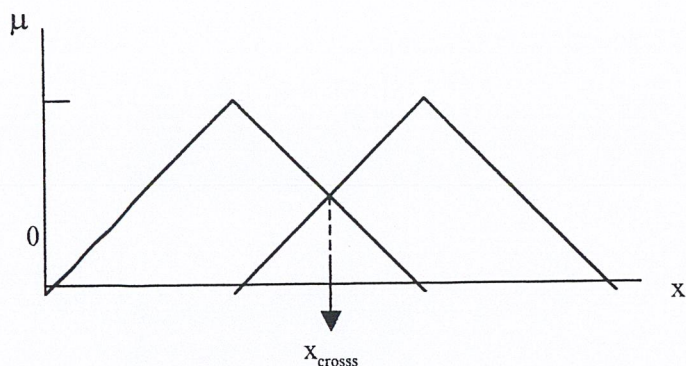


รูปที่ 2.4 ความกว้างของฟังก์ชันสามเหลี่ยม

2.14.3 จุดตัด (Crosspoints)

จุดตัด จุดตัดระหว่างฟังก์ชันความเป็นสมาชิก μ_{A_1} และ μ_{A_2} ในเอกภพสัมพัทธ์ x คือค่า x_{cross} ที่ซึ่ง $\mu_{A_1}(x_{\text{cross}}) = \mu_{A_2}(x_{\text{cross}}) > 0$ และระดับของจุดตัดคือ ค่าความเป็นสมาชิกของ x_{cross} และจำนวนจุดตัดระหว่างฟังก์ชันความเป็นสมาชิก 2 ฟังก์ชันเรียกว่า อัตราส่วนของจุดตัด (Cross – point Ratio) ดังแสดงในรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 จุดตัดของฟังก์ชันสามเหลี่ยม

2.15 หลักเกณฑ์ในการกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

2.15.1 การกระจายข้อมูล หรือคุณลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของกระบวนการที่ควบคุมว่าเป็นเชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งถ้าเป็นเชิงเส้นนั้นควรใช้ฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม ถ้าไม่เป็นเชิงเส้นควรใช้ฟังก์ชันรูปตัว S หรือฟังก์ชันรูปประฆังคว่ำ

2.15.2 คุณสมบัติในการคำนวณ เช่นความเร็วในการคำนวณและขนาดของหน่วยความจำ

2.15.3 ความต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องของข้อมูล โดยทั่วไปจำนวนฟังก์ชันที่ใช้กำหนดระดับค่าของลิงกวิสติกไม่ควรต่ำกว่า 5 ถึง 7 ระดับ ถ้าต่ำกว่าจะเกิดความไม่ต่อเนื่องและเกิดความผิดพลาดในผลลัพธ์ ถ้ามีจำนวนมากเกินไปจะเสียเวลาในการคำนวณให้มากขึ้น

2.15.4 การกำหนดฟังก์ชัน แต่ละฟังก์ชันควรให้มีการทับกันระหว่างฟังก์ชัน (Overlap) ของเซตที่อยู่ติดกันเพื่อให้แน่ใจว่าการควบคุมจะต้องมีกฎควบคุมอย่างน้อย 1-2 กฎ ในการรองรับตัวแปรอินพุต เฟอร์เซนต์การทับกันอยู่ประมาณ 15-50%

2.15.5 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ควรมีอัตราส่วนของจุดตัดเป็นหนึ่ง ระดับความเป็นสมาชิกของจุดตัดควรเท่ากับ 0.5 และฟังก์ชันควรมีลักษณะสมมาตร ซึ่งจะทำให้ระบบมีสมรรถนะที่ดี นั่นคือเวลาในการเข้าถึงเร็วและเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินต่ำ

2.16 ส่วนขยายของฟัซซีเซต

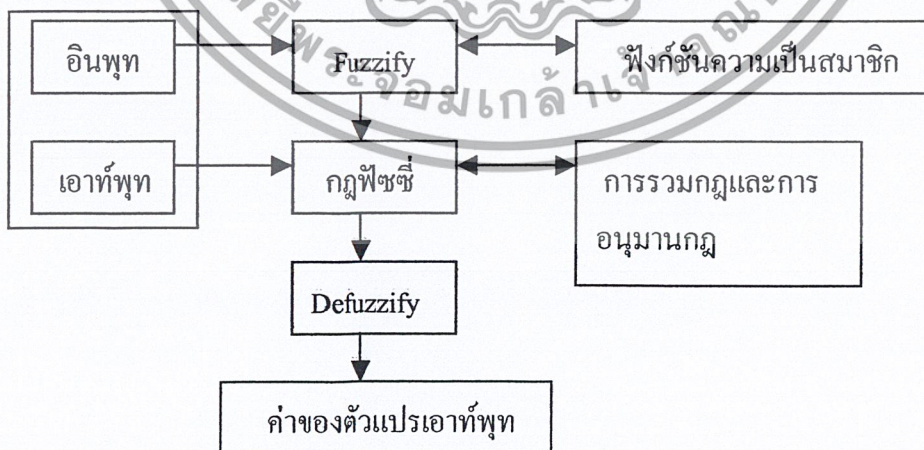
ส่วนขยาย (Hedge) ของฟัซซีเซตจะมีคุณสมบัติคล้ายกับคำคุณศัพท์ในประโยคที่เราใช้พูดคุยติดต่อกัน ซึ่งจะขยายให้มีใจความของประโยคให้ได้ความหมายที่ชัดเจนยิ่งขึ้นหรือทำให้ความหมายเปลี่ยนไป สำหรับส่วนขยาย (Hedge) ของฟัซซีเซตนั้นจะขยายขอบเขตของตัวแปรฟัซซีเซต เพื่อให้การประมาณค่าของตัวแปรมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น เมื่อขยายขอบเขตไปด้วยส่วนขยาย (Hedge) จะส่งผลให้รูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเซตนั้นๆ เปลี่ยนไป และในบางกรณีอาจจะทำให้ได้เซตใหม่ขึ้นมา Hedge แต่ละตัวจะเป็นตัวดำเนินการของฟัซซีเซต เช่น Hedge คำว่า “มาก” Zadeh ได้ให้ความหมายของคำนี้ไว้โดยการยกกำลัง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความเป็นสมาชิกทุกตัวในเทอมเซตด้วยสอง ซึ่งก็คือตัวดำเนินการ Concentration ของฟัซซี่เซต ส่วน Hedge ของคำว่า “ค่อนข้าง ” Zadeh ได้ให้ความหมายของคำนี้ไว้โดยการถอกรากที่สองของค่าความเป็นสมาชิกทุกตัวในเทอมเซตหรือก็คือตัวดำเนินการ Dilation ของฟัซซี่เซตนั่นเอง

สาเหตุที่ Zadeh แทนความหมายของ Hedge ของคำว่า “มาก ” และ “ค่อนข้าง ” ด้วยตัวดำเนินการยกกำลังคือยกกำลังด้วย 2 และ 0.5 ตามลำดับ ก็เพื่อทำการแปลงค่าความเป็นสมาชิกให้เหมาะสมกับเทอมเซตนั้น ๆ ยิ่งขึ้น อย่างเช่น Hedge คำว่า “มาก ” เมื่อนำไปขยายเทอมเซตใด แสดงว่าค่อนข้างจะแน่ใจว่าข้อมูลของเทอมเซตนั้นต้องการความถูกต้องสูง และเพื่อให้เกิดความแน่ใจว่าค่าระดับความเป็นสมาชิกของเทอมเซตนี้มีความถูกต้องสูงจริงๆ จึงทำการลดค่าระดับความเป็นสมาชิกลงมาโดยตัวดำเนินการ Concentration ส่วน Hedge คำว่า “ค่อนข้าง ” แสดงถึงความไม่แน่ใจในผลตอบสนองของเทอมเซตนั้น ๆ จึงทำการเพิ่มค่าระดับความเป็นสมาชิกให้มากขึ้น โดยการยกกำลังด้วย 0.5 ความจริงความหมายของ Hedge เป็นการแปลความหมายตามอำเภอใจ ดังนั้นคำว่า “มาก ” อาจจะไม่จำเป็นต้องยกกำลังสองก็ได้ เช่นอาจจะยกกำลังด้วย 1.3 หรือ 1.8 เป็นต้น สำหรับเทอมเซตตัวอื่น ๆ ที่มักพบบ่อยคือตัวดำเนินการคอมพลิเมนต์หรือ Hedge คำว่า “ไม่ ” ส่วน Hedge ที่ใช้ในการเปรียบเทียบเช่น “มากกว่า ” หรือ “สูงกว่า ”, “น้อยกว่า ” หรือ “ต่ำกว่า ” เป็นต้น

2.17 แบบจำลองฟัซซี่

แบบจำลองฟัซซี่ (Fuzzy Model) เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการอนุมานค่าของตัวแปร ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลองฟัซซี่ลอจิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากบล็อกไดอะแกรมของแบบจำลองฟัซซี่ลอจิก สามารถแยกอธิบายเป็นขั้นตอน ได้ดังนี้

2.17.1 อินพุตและเอาต์พุตของแบบจำลองฟัซซี่ลอจิกก็คือตัวแปรของฟัซซี่เซต ซึ่งตัวแปรแต่ละตัวอาจจะมีเทอมเซตได้หลายเทอม อินพุตซึ่งเป็นตัวแปรของระบบ (State Variable) นั้น อาจจะมีที่ตัวก็ได้ซึ่งจะขึ้นอยู่กับระบบ สำหรับตัวแปรของเอาต์พุตหรือที่เรียกว่า Action Variable ซึ่งเป็นตัวแปรที่ถูกประมาณค่าโดยแบบจำลองของฟัซซี่ลอจิกเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบกฎฟัซซี่เพื่อใช้ในการควบคุมระบบต่อไป ปัญหาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้ก็คือ การกำหนดจำนวนเทอมเซตของแต่ละตัวแปรว่าควรจะมีสักกี่เทอม จึงจะทำให้การอนุมานค่าของตัวแปรเอาต์พุตนั้นมีความใกล้เคียงกับค่าของตัวแปรที่แท้จริงมากที่สุด ซึ่งจุดนี้ผู้ออกแบบแบบจำลองฟัซซี่จะต้องมีความรู้เกี่ยวกับระบบที่กำลังออกแบบอยู่พอสมควร

2.17.2 Fuzzify เป็นขั้นตอนการแปลงค่าของตัวแปรของอินพุตไปเป็นค่าระดับความเป็นสมาชิกของแต่ละเทอม โดยใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ได้เสนอไปแล้ว การเลือกใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเราต้องเลือกให้เหมาะสมกับคุณสมบัติของตัวแปร เช่น ถ้าตัวแปรมีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้นจะต้องเลือกฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่เป็นเชิงเส้นด้วย ซึ่งอาจจะเป็นสมการรูปตามเหลี่ยม และรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ส่วนตัวแปรที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นก็ต้องใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยเช่น ฟังก์ชันรูปตัว S, π , Beta และ Guassian

2.17.3 กฎฟัซซี่ (Fuzzy Rules) จะประกอบด้วยประพจน์ของฟัซซี่ โดยกฎฟัซซี่จะอยู่ในรูปของ IF-THEN เช่น

IF X is small THEN Y is positive

โดยที่ X และ Y เป็นตัวแปรฟัซซี่ ส่วน small และ positive เป็นเทอมเซตที่สอดคล้องกับตัวแปร X, Y และประพจน์ของฟัซซี่เซตคือ X is small และ Y is positive ประพจน์ที่ตามหลัง IF จะเป็นส่วนของเงื่อนไขที่เรียกว่า Antecedent ซึ่งก็คือส่วนของอินพุตของแบบจำลองฟัซซี่ลอจิกนั่นเอง และประพจน์ที่ตามหลัง THEN จะเรียกว่า Consequent หรือส่วนของเอาต์พุตของแบบจำลองฟัซซี่ลอจิกนั่นเอง Antecedent อาจประกอบด้วยหลายประพจน์ ซึ่งจำนวนของประพจน์จะขึ้นอยู่กับจำนวนตัวแปรของอินพุตและจำนวนของเทอมเซตของตัวแปรแต่ละตัว เช่น ถ้าอินพุตมีสองตัวแปรในส่วนของ Antecedent จะมีสองประพจน์เชื่อมต่อกันในกฎหนึ่งกฎ และในการเชื่อมต่อกันของประพจน์จะต้องมีตัวเชื่อม ซึ่งในแบบจำลองฟัซซี่ลอจิกจะมีตัวเชื่อมอยู่สองตัวด้วยกันคือ ยูเนียน และ อินเตอร์เซกชัน เช่น ในกรณีที่เชื่อมด้วยยูเนียน

IF X is Small OR T is cool THEN Y is positive

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และกรณีที่เกี่ยวข้องด้วยอินเตอร์เฟซกชัน

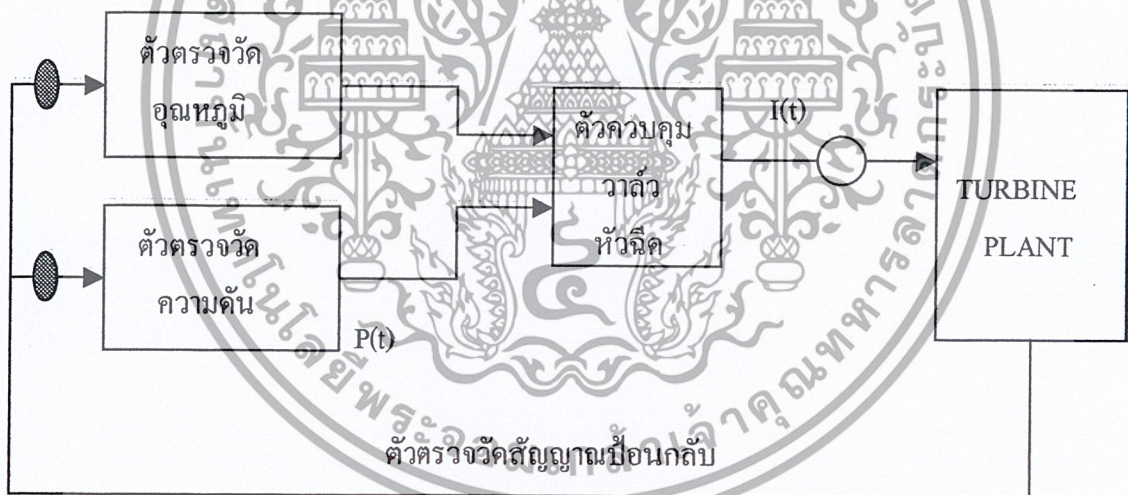
IF X is Small AND T is cool THEN Y is positive

นอกจากนี้ในกฎฟัซซี่ที่ทอมเซตอาจจะมี Headge มาขยายเช่น very และ large

IF X is very small THEN Y is large positive

สำหรับจำนวนกฎในแบบจำลองฟัซซี่ลอจิกของระบบหนึ่งๆ นั้น จะขึ้นอยู่กับจำนวนของตัวแปรอินพุตและจำนวนเทอมของแต่ละตัวแปร เช่น ถ้าอินพุตมีสองตัวแปรและตัวแปรแต่ละตัวมี 5 เทอมเซต ซึ่งจำนวนกฎทั้งหมดจะเท่ากับ 25 กฎ เป็นต้น

ตัวอย่างแบบจำลองฟัซซี่ลอจิกที่ใช้กับระบบของ Steam Turbine ซึ่งมีแผนผังการควบคุม ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แผนผังการควบคุม STREAM TURBINE

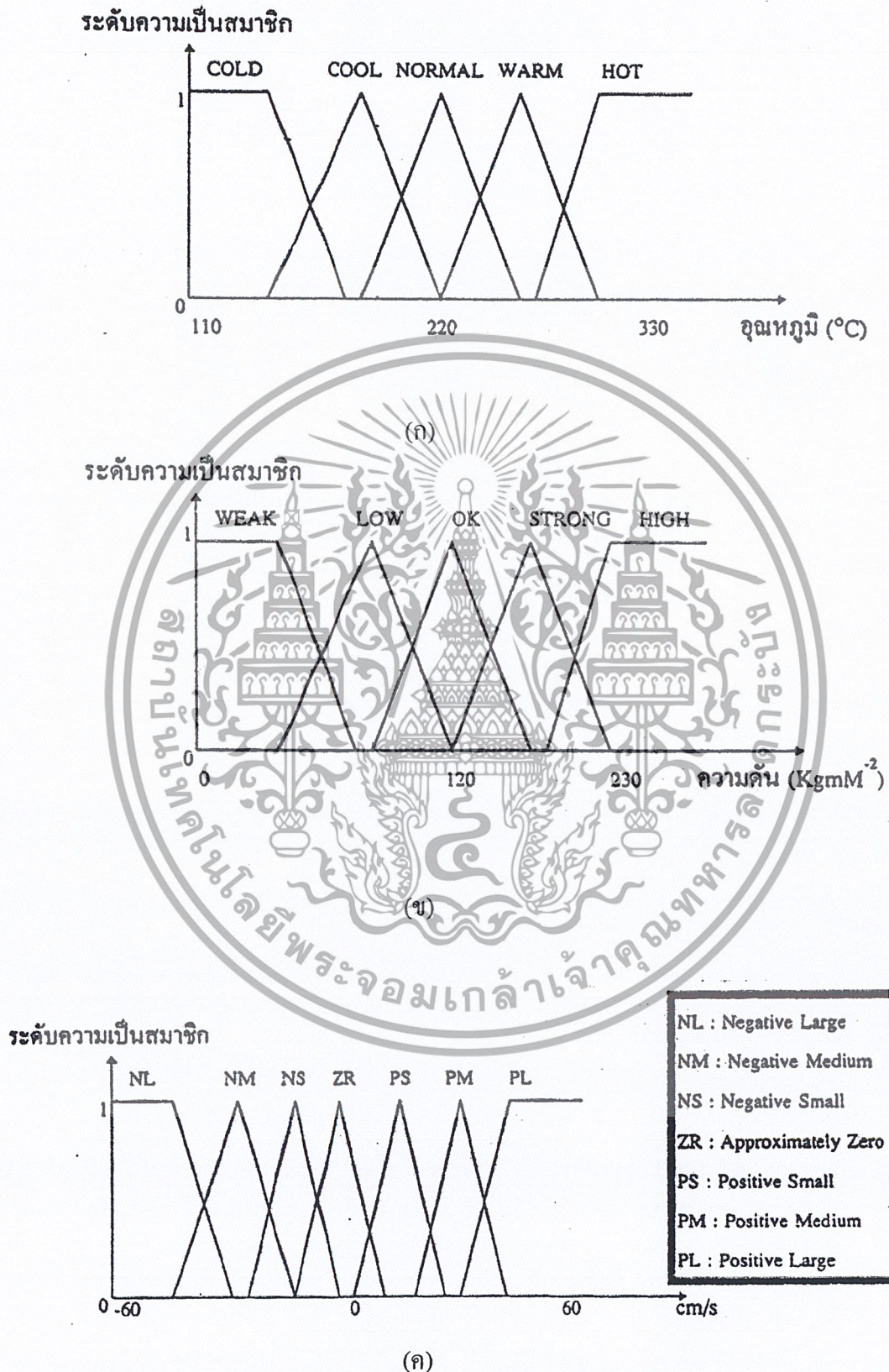
จากแผนผังของกระบวนการควบคุมของ Steam Turbine ดังรูปที่ 2.7 อินพุตของแบบจำลองฟัซซี่ลอจิกมีตัวแปรสองตัวคือ อุณหภูมิ และความดัน ส่วนเอาต์พุตมีตัวแปรหนึ่งตัวคือการเปิดปิดวาล์ว ตัวแปรของอินพุตแต่ละตัวจะมีเทอมเซตอย่างละ 5 เทอมคือ ถ้ากำหนดให้ $T(t)$ เป็นตัวแปรของอุณหภูมิที่วัดได้ในเวลา t ใดๆ ซึ่งมีค่าของตัวแปรนี้อยู่ 5 ค่าด้วยกันคือ

$T(t) = \{\text{Cold, cool, normal, warm, hot}\}$ และสำหรับตัวแปรของความดันที่วัดได้ในช่วงของเวลา

t ใดๆ ซึ่งมีค่าของตัวแปรนี้อยู่ 5 ค่าเช่นกันคือ $P(t) = \{\text{weak, low, ok, strong, high}\}$ และตัวแปร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเอาต์พุต $I(t)$ มี 7 เทอมเซตคือ $I(t) = \{NL, NM, NS, ZR, PS, PM, PL\}$ ในรูปที่ 2.8 นั้นจะแสดงเทอมเซตของตัวแปรทั้ง 3 ตัวของระบบการควบคุม Steam Turbine



รูปที่ 2.8 แสดงเทอมเซตของตัวแปร (ก) อุณหภูมิ (ข) ความดัน (ค) การปิดเปิดวาล์ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้อินพุต T(t) มีสมาชิกตัวแปร 5 ตัวคือ

$$T(t) = \{ \text{Cold, Cool, Normal, Warm, Hot} \}$$

อินพุต P(t) มีสมาชิกตัวแปร 5 ตัวคือ

$$P(t) = \{ \text{Cold, Cool, Normal, Warm, Hot} \}$$

และมีตัวแปรเอาต์พุต 7 ตัวแปรคือ

NL = Negative Large

PM = Positive Medium

PL = Positive Large

PS = Positive Small

NM = Negative Medium

NS = Negative Small

เมื่อออกแบบเทอมเซตของตัวแปรแต่ละตัวได้แล้ว ก็จะนำเทอมเซตของตัวแปรมาเขียนเป็นกฎฟัซซี่ (Fuzzy rules) ซึ่งจะได้ $5 * 5 = 25$ กฎ ดังนี้

IF T(t) is Cold AND P(t) is Weak	THEN I(t) is Positive Large
IF T(t) is Cool AND P(t) is Weak	THEN I(t) is Positive Large
IF T(t) is Normal AND P(t) is Weak	THEN I(t) is Positive Medium
IF T(t) is Warm AND P(t) is Weak	THEN I(t) is Positive Medium
IF T(t) is Hot AND P(t) is Weak	THEN I(t) is Positive Small
IF T(t) is Cold AND P(t) is Low	THEN I(t) is Positive Medium
IF T(t) is Cool AND P(t) is Low	THEN I(t) is Positive Medium
IF T(t) is Normal AND P(t) is Low	THEN I(t) is Positive Small
IF T(t) is Warm AND P(t) is Low	THEN I(t) is Positive Small
IF T(t) is Hot AND P(t) is Low	THEN I(t) is Positive Small
IF T(t) is Cold AND P(t) is OK	THEN I(t) is Positive Small
IF T(t) is Cool AND P(t) is OK	THEN I(t) is Approximately Zero
IF T(t) is Normal AND P(t) is OK	THEN I(t) is Approximately Zero
IF T(t) is Warm AND P(t) is OK	THEN I(t) is Negative Small
IF T(t) is Hot AND P(t) is OK	THEN I(t) is Negative Medium
IF T(t) is Cold AND P(t) is Strong	THEN I(t) is Negative Small
IF T(t) is Cool AND P(t) is Strong	THEN I(t) is Negative Medium
IF T(t) is Normal AND P(t) is Strong	THEN I(t) is Negative Small
IF T(t) is Warm AND P(t) is Strong	THEN I(t) is Negative Medium
IF T(t) is Hot AND P(t) is Strong	THEN I(t) is Negative Large

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IF T(t) is Cold AND P(t) is High	THEN I(t) is Negative Medium
IF T(t) is Cool AND P(t) is High	THEN I(t) is Negative Medium
IF T(t) is Normal AND P(t) is High	THEN I(t) is Negative Medium
IF T(t) is Warm AND P(t) is High	THEN I(t) is Negative Large
IF T(t) is Hot AND P(t) is High	THEN I(t) is Negative Large

จากกฎทั้ง 25 กฎของระบบนี้ สามารถนำมาเขียนเป็นเมตริกซ์ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ร่วมกันของตัวแปรได้ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งเมตริกซ์จะถูกเรียกว่า Fuzzy Associative Memory (FAM) โดย FAM จะมีมิติเท่ากับจำนวนตัวแปรของอินพุต ซึ่งในตัวอย่างนี้จะมีสองตัวแปรดังนั้น FAM จะมีเมตริกซ์เป็นสองมิติ ขนาด $M \times N$ เมื่อ M แทนจำนวนเทอมเซตของตัวแปรอุณหภูมิ และ N เป็นจำนวนเทอมเซตของตัวแปรความดัน และสมาชิกของเมตริกซ์นี้คือค่าของตัวแปรเอาต์พุตทั้งหมด 7 เทอม ส่วนในกรณีอื่นๆ เช่นถ้าตัวแปรของอินพุตมี 3 ตัวดังนั้น FAM ก็จะมี 3 มิติ และขนาดของตาราง 3 มิติจะเป็น $M \times N \times P$ เมื่อ M, N และ P เป็นจำนวนเทอมเซตของแต่ละตัวแปรเป็นต้นเมื่อนำมาเขียนเป็นเมตริกซ์ FAM ของระบบ จะได้ดังนี้

อุณหภูมิ \ ความดัน	COLD	COOL	NORMAL	WARM	HOT
WEAK	PL	PL	PM	PM	PS
LOW	PM	PM	PS	PS	PS
OK	PS	ZR	ZR	NS	NS
STRONG	NS	NM	NS	NM	NL
HIGH	NM	NM	NM	NL	NL

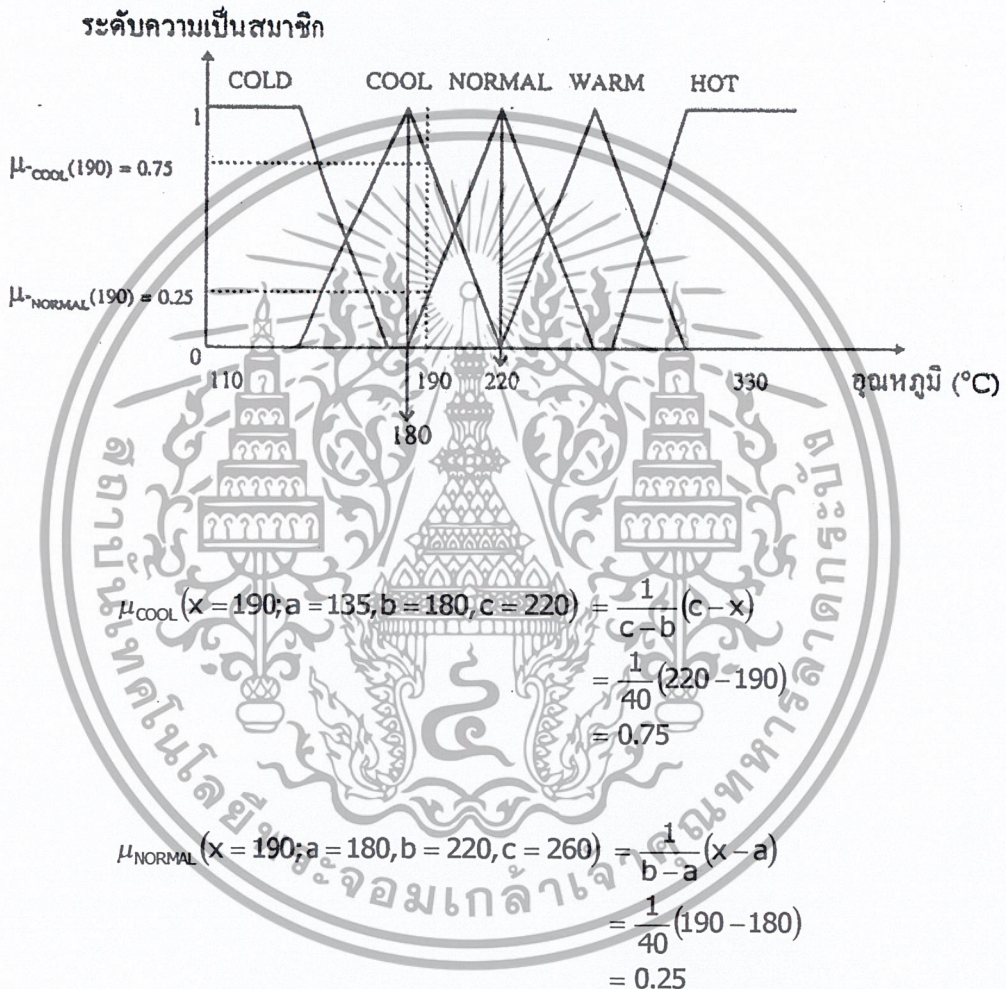
รูปที่ 2.9 แสดงเมตริกซ์ FAM ของระบบควบคุม STEAM TURBINE

2.17.4 Defuzzify

Defuzzification เป็นกระบวนการประมาณค่าของตัวแปรเอาต์พุต โดยการอนุมานจากค่าความจริงในส่วนของ Antecedent ของแบบจำลองฟัซซี่ลอจิกโดยค่าที่ได้จะเป็นเลขจำนวนจริงที่อยู่ในโดเมนของตัวแปรเอาต์พุต และค่านี้จะเป็นค่าคาดหวัง (Expected Value) ของตัวแปรฟัซซี่เซตที่จะนำไปใช้ในการควบคุมระบบต่อไป สำหรับการหาค่าคาดหวังของฟัซซี่เซตโดยการ Defuzzification นั้นมีอยู่หลายวิธีด้วยกันคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

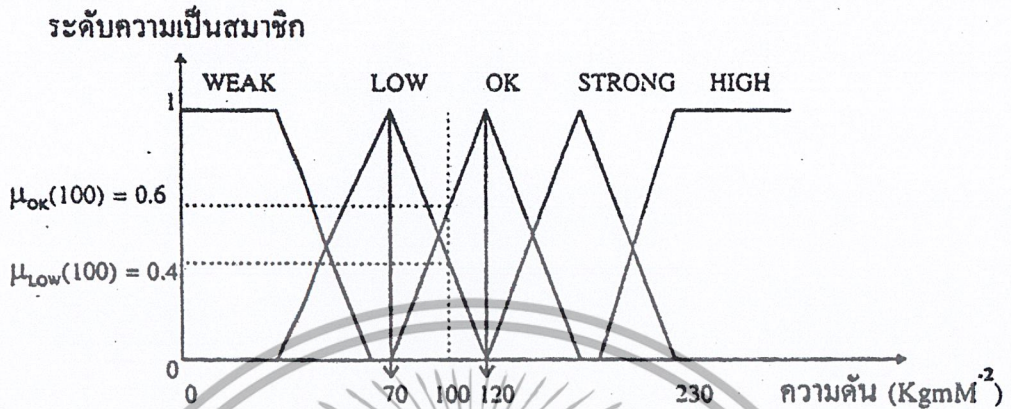
1. กำหนดจากค่าความจริงที่มีค่าต่ำสุด (คิดเฉพาะเทอมเซตที่เป็นสมาชิกเท่านั้น , $\mu_A(x_i) > 0$) เมื่อ A เป็นเทอมเซตใด ๆ ของ Antecedent จากตัวอย่างแบบจำลองฟuzzyลอจิกที่ใช้กับระบบ Steam Turbine ในขั้นตอนของกฎฟuzzyที่สามารถประมาณค่า I ที่เวลา t ใดๆ ได้ ดังนี้ สมมุติอุณหภูมิที่วัดได้ที่เวลา t เท่ากับ 190 °C และความดันที่เวลาเดียวกับที่วัดอุณหภูมิเท่ากับ 100 Kgmm⁻² จากกฎฟuzzyเทอมเซต COOL และ NORMAL ที่ถูกนำมาพิจารณา ดังนั้น เราสามารถประมาณค่าระดับการเปิดปิดวาล์วได้ดังนี้ ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงการคำนวณค่าความเป็นสมาชิกของเทอมเซต COOL และ NORMAL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่อุณหภูมิ 190 °C ไม่ได้เป็นสมาชิกของเทอมเซต COLD,WARM,HOT สำหรับความดันที่ 100 KgmM⁻² นั้นจากกฎของฟัซซี่ซึ่งจะมีเทอมเซต LOW และ OK ที่ถูกนำมาพิจารณาดังรูปที่ 2.11



$$\mu_{LOW}(x=100; a=20, b=70, c=120) = \frac{1}{c-b}(c-x)$$

$$= \frac{1}{50}(120-100)$$

$$= 0.4$$

$$\mu_{NORMAL}(x=100; a=70, b=120, c=170) = \frac{1}{b-a}(x-a)$$

$$= \frac{1}{50}(100-70)$$

$$= 0.6$$

รูปที่ 2.11 แสดงการคำนวณค่าความเป็นสมาชิกของเทอมเซต LOW และ OK

ที่ความดัน 100 KgmM⁻² ไม่เป็นสมาชิกของเทอมเซต WEAK,STRONG และ HIGH ดังนั้นที่ T(t) = 190 °C และ P(t) = 100 KgmM⁻² จะส่งผลให้เทอมเซต PM,ZR และ PS เป็นเทอมที่ใช้ประมาณค่า I(t) พิจารณาจากเมตริกซ์ FAM ในรูปที่ 2.9 กฎฟัซซี่ที่เป็นจริงนั้นจะมีอยู่ 4 กฎด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 2.12 (กฎที่เป็นจริงจะถูกล้อมกรอบด้วยสีดำเข้ม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T(t) ทางออก Ti(t) ทางเข้า	Cold	Cool	Normal	Warm	Hot
Cold	PL	PL	PM	PM	PS
Cool	PM	PM	PS	PS	PS
Normal	PS	ZR	ZR	NS	NS
Warm	NS	NM	NS	NM	NL
Hot	NM	NM	NM	NL	NL

รูปที่ 2.12 แสดงกฎที่เป็นจริงของ FAM เมื่อ $T(t) = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $P(t) = 100\text{ Kgmm}^2$

เราสามารถประมาณค่าตัวแปรเอาต์พุต $I(t)$ ด้วยค่าความจริงที่มีค่าต่ำสุดได้ดังรูปที่ 2.13

2. กำหนดจากค่าความจริงที่มีค่าสูงสุดของ Antecedent จากขั้นตอนการประมาณค่าตัวแปรเอาต์พุตในรูปที่ 2.13 จะมีความแตกต่างจากการ Defuzzification โดยใช้ค่าความจริงที่มีค่าต่ำสุดในการคำนวณค่า $\mu_{\text{INFERENCE}}$ เท่านั้นซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

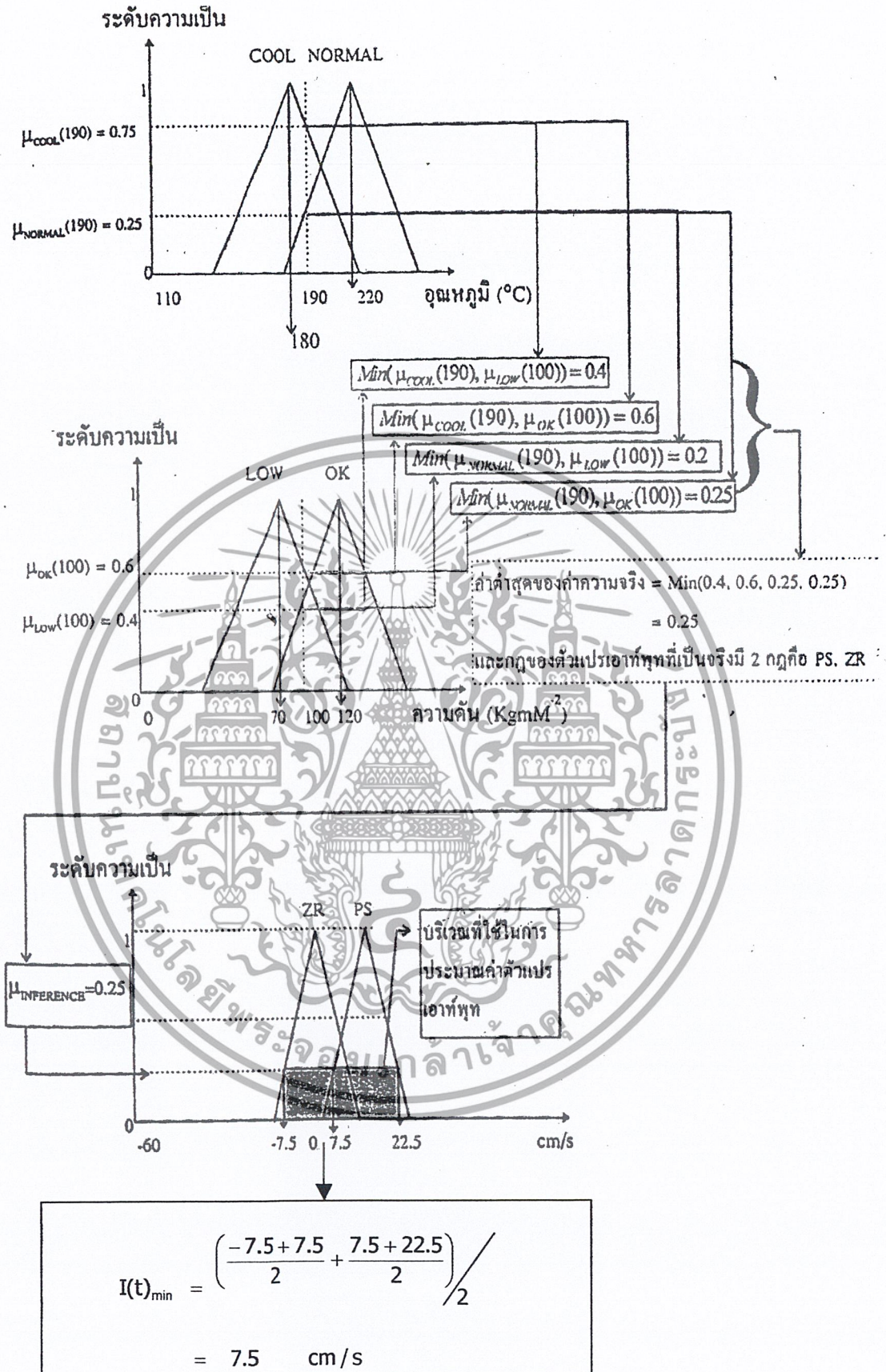
$$\begin{aligned}\mu_{\text{INFERENCE}} &= \text{Max}(0.4, 0.6, 0.25, 0.75) \\ &= 0.6\end{aligned}$$

กฎที่ใช้ในการประมาณค่า $I(t)$ ในกรณีการ Defuzzification โดยวิธีนี้คือ

IF $T(t)$ is Cool AND $P(t)$ is OK THEN $I(t)$ is approximately zero

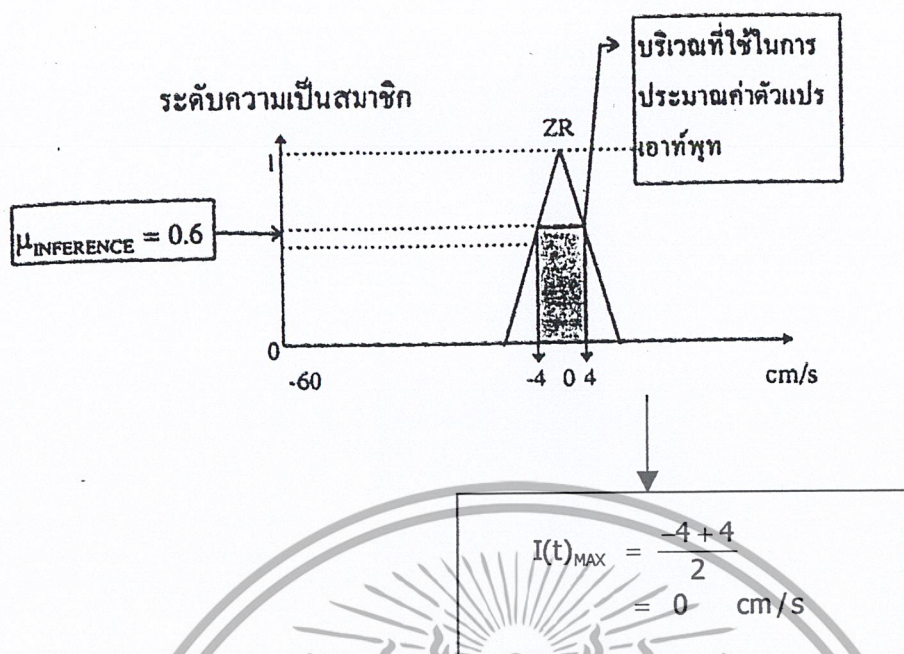
เนื่องจากกฎข้อนี้ให้ค่าความจริงที่มีค่าสูงสุด $\mu_{\text{INFERENCE}} = 0.6$ ดังนั้นสามารถคำนวณค่าประมาณของ $I(t)$ ได้ดังรูปที่ 2.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 แสดงขั้นตอนการประมาณค่า I(t) โดยคำนวณจากค่าความจริงที่มีค่าต่ำสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 แสดงการ Defuzzification โดยใช้ค่าสูงสุดของค่าอัตราความเป็นสมาชิก

3. คำนวณจากค่าเฉลี่ยของกฎที่มีค่าความจริงสูงสุดหรือที่เรียกว่าวิธี Mean of maxima : MOM วิธีนี้คล้ายกับวิธีที่ใช้ค่าระดับความเป็นสมาชิกที่มีค่าสูงสุด เพียงแต่เพิ่มค่าระดับความเป็นสมาชิกของกฎเดียวกันเป็นตัวหารซึ่งจากตัวอย่างของการควบคุมระบบ Steam Turbine สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$I(t)_{MOM} = \frac{-4+4}{0.6+0.6} = 0 \text{ cm/s}$$

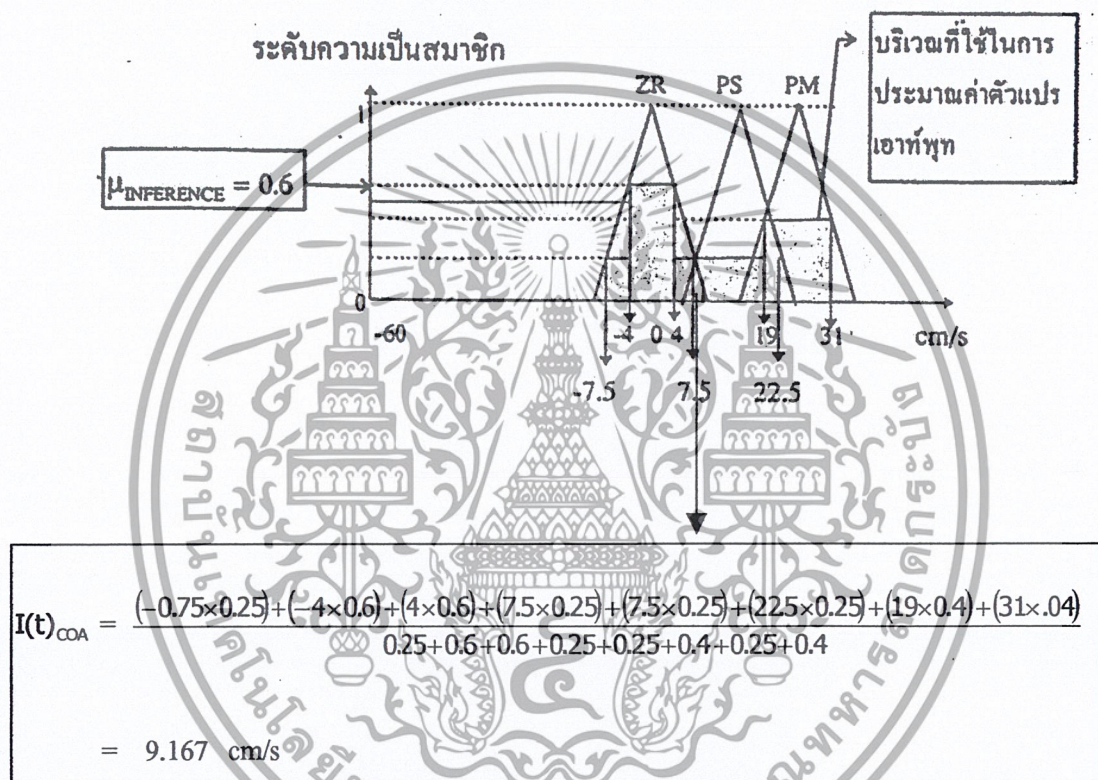
4. การหาค่าจุดศูนย์กลาง (Centroid หรือ Center of Area : COA) เป็นการประมาณค่าของตัวแปรเอาต์พุต โดยการหาค่าจุดศูนย์กลางของพื้นที่ของกฎที่เป็นจริง ซึ่งลักษณะการคำนวณจะมีความแตกต่างจากสองวิธีแรก คือแทนที่จะประมาณค่าตัวแปรของเอาต์พุตโดยใช้ค่าความจริงของกฎที่มีค่าความเป็นสมาชิกสูงสุดหรือต่ำสุด ก็จะใช้ค่าความจริงของกฎทุกข้อที่มีค่าระดับความเป็นสมาชิกมากกว่าศูนย์ ซึ่งในกรณีนี้กฎทุกข้อที่ถูกล้อมกรอบด้วยเส้นที่ไปตามตาราง FAM ในรูปที่ 2.10 ในตัวอย่างของระบบ Steam Turbine จะถูกนำมาประมาณค่าตัวแปร $I(t)$ ทุกกฎซึ่งสามารถดำเนินการได้ดังนี้

จากขั้นตอนการประมาณค่าตัวแปรเอาต์พุตในรูปที่ 2.13 กฎที่ใช้ในการประมาณค่า $I(t)$ ในกรณีการ Defuzzification โดยวิธีนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IF T(t) is Cool AND P(t) is Low	THEN I(t) is Positive Medium
IF T(t) is Cool AND P(t) OK	THEN I(t) is approximately Zero
IF T(t) is Normal AND P(t) is Low	THEN I(t) is Positive Small
IF T(t) is Normal AND P(t) is OK	THEN I(t) is Approximately Zero

ซึ่งมีค่า $\mu_{\text{INFERENCE}}$ จะมีอยู่ 4 ค่าด้วยกันคือ $\mu_{\text{INFERENCE}} = \{0.4, 0.6, 0.25, 0.75\}$ ดังนั้นสามารถคำนวณค่าประมาณของ I(t) ได้ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงการ Defuzzification โดยวิธี COA

จากวิธีการ Defuzzification ที่ได้กล่าวมาแล้วทั้ง 4 วิธี วิธี COA เป็นวิธีที่นิยมใช้ในกระบวนการควบคุมมากกว่าวิธีอื่นๆ เนื่องจากวิธีนี้ใช้ข้อมูลข่าวสารของค่าความจริงของทุกกฎที่เป็นจริง ($\mu_A(x_i) > 0$) ทำให้ค่าที่ได้มีความน่าเชื่อถือและเหมาะสมมากกว่าวิธีอื่นๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว นอกจากนี้ยังมีวิธีอื่นๆ อีกที่ค่าตัวแปรบางตัวสามารถปรับค่าได้ เช่น วิธี Basic Defuzzification Distribution : BADD และวิธี Semi Linear Defuzzification : SLIDE เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.18 ความคลุมเครือ

ความคลุมเครือหรือที่เรียกว่า Fuzziness เป็นระดับหรือประมาณที่ไม่สามารถกำหนดขอบเขตให้กับตัวแปรฟัซซี่ได้อย่างแน่นอน (บางครั้งอาจจะเรียกว่า Vagueuess) ซึ่งค่าของตัวแปรเหล่านี้จะมีความคลุมเครืออยู่แล้วโดยธรรมชาติ เนื่องจากว่าเราไม่สามารถกำหนดขอบเขตให้กับตัวแปรบางตัวได้อย่างแน่นอน เช่น เมื่อเราวัดอุณหภูมิ (ไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิของระบบใด) เราไม่สามารถกำหนดขอบเขตได้อย่างแน่นอนว่าอุณหภูมิเท่าไรจึงจะเรียกว่าร้อน และอุณหภูมิที่องศาจึงจะเหมาะสมกับระบบนั้นๆ ในทางปฏิบัติได้ทำการประมาณตัวแปรของข้อมูลโดยการแบ่งข้อมูลออกเป็นเซตย่อยหรือเทอมเซต เพื่อหาค่าถ่วงน้ำหนัก (ระดับความเป็นสมาชิก) ว่าเทอมใดมีโอกาสถูกต้องสูงสุด แต่อย่างไรก็ตามเทอมเซตต่างๆ ที่สร้างขึ้นก็เป็นการคาดคะเนจากประสบการณ์หรือการทดลองหรืออาจจะอาศัยข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญ ดังนั้นจึงมีการวัดความคลุมเครือของฟัซซี่โดยใช้ค่าดัชนีความคลุมเครือ (Index of Fuzziness : H) ซึ่งค่าของดัชนีนี้จะบอกได้ว่าเทอมเซตใดเป็นเทอมเซตที่ถูกออกแบบได้อย่างเหมาะสม คือถ้าเทอมเซตใดสามารถออกแบบได้ครอบคลุมข้อมูลทั้งหมดได้อย่างเหมาะสมแล้ว ค่าความเป็นสมาชิกจะเข้าใกล้ศูนย์ (ในกรณีที่ไม่ได้เป็นสมาชิก) และเข้าใกล้หนึ่ง (ในกรณีที่เป็นสมาชิก) ซึ่งถ้าเป็นดังนี้ค่าดัชนีความคลุมเครือก็จะมีค่าต่ำมาก ($H \rightarrow 0$) ในทางตรงกันข้ามถ้าเทอมเซตใดไม่สามารถระบุได้อย่างแน่ชัดว่าเป็นสมาชิกหรือไม่ ($\mu_A(x) \rightarrow 0.5$) ค่าดัชนีความคลุมเครือของเทอมเซตนั้นจะมีความมาก ($H \rightarrow \infty$) Ebanks ได้แนะนำไว้ว่าคุณสมบัติที่ดีของตัววัดดัชนีความคลุมเครือควรมีคุณสมบัติดังนี้

เมื่อ A, B เป็นเทอมเซตใดๆ ใน U

1. Sharpness ในกรณีที่ออกแบบเทอมเซต A ได้อย่างเหมาะสม

$$H(A) = 0 \Leftrightarrow \mu_A(x) = 0 \text{ OR } 1 \quad ; \forall x \in U \quad \dots(2.68)$$

2. Maximality เมื่อกำหนดเทอมเซต A ไม่เหมาะสมกับข้อมูลชุดนั้นๆ จะทำให้

$$H(A) \rightarrow \infty \Leftrightarrow \mu_A(x) = 0.5 \quad ; \forall x \in U \quad \dots(2.69)$$

3. Resolution ถ้ามีเทอมเซต A' เป็นเทอมเซตที่มีคุณสมบัติ Sharpness ของเทอมเซต A จะได้ว่า

$$H(A) \geq H(A') \quad \dots(2.70)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Symmetry

$$\begin{aligned}
 & H(A) = H(1-A) \\
 \text{โดยที่} & \quad \mu_{1-A}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad ; \forall x \in U \quad \dots(2.71)
 \end{aligned}$$

5. Valuation

$$H(A \cup B) + H(A \cap B) = H(A) + H(B) \quad \dots(2.72)$$

ในปี ค.ศ. 1968 Zadeh ได้เสนอตัววัดความคลุมเครือไว้ดังนี้

$$H_{ZE}(A, P) = - \sum_{i=1}^n \mu_i p_i \log p_i \quad \dots(2.73)$$

โดยที่ $\mu_i \in A$ ซึ่งเป็นเทอมเซต และ $p_i \in P$ เป็นเซตของความน่าจะเป็นที่ใช้ข้อมูลชุดเดียวกับเทอมเซต A เนื่องจากวิธีการวัดความคลุมเครือของ Zadeh ไม่เป็นไปตามคุณสมบัติที่ Ebanks ได้ตั้งไว้ทั้ง 5 ข้อ วิธีวัดความคลุมเครือที่มีคุณสมบัติของ Ebanks ครบทั้ง 5 ข้อถูกเสนอครั้งแรกโดย De Luca และ Termini ซึ่งมีสมการดังนี้

$$H_{DET}(A) = -K \sum_{i=1}^n \mu_i \log \mu_i + (1 - \mu_i) \log(1 - \mu_i) \quad \dots(2.74)$$

ซึ่ง K เป็นค่าคงที่ที่ใช้ในการ Normalization

สำหรับตัวดำเนินการวัดความคลุมเครือวิธีอื่น ๆ ที่มีคุณสมบัติครบทั้ง 5 ข้อ คือวิธีของ Ebanks , Pal และ Pal , Bhandari และ Pal , และวิธีของ Pal และ Bezdeh และวิธีอื่น ๆ ที่มีคุณสมบัติบางข้อขาดไปเช่น วิธีของ Yager และ Kaufmann เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

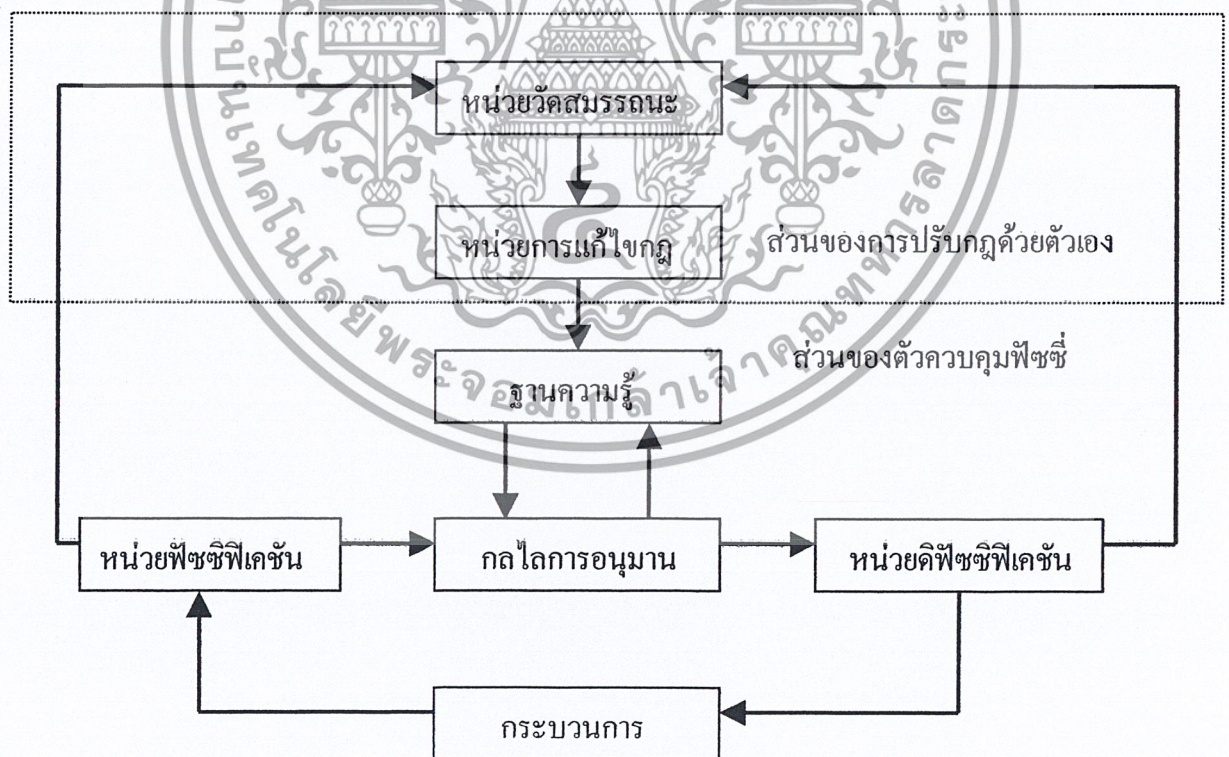
2.19 ตัวควบคุมฟuzzyแบบปรับกฎด้วยตัวเอง (Self-organizing fuzzy logic

Controller)

เมื่อกล่าวถึงโครงสร้างและแนวทางการออกแบบส่วนต่างๆ ของตัวควบคุมฟuzzy จะเห็นว่าข้อมูลส่วนใหญ่จะนำมาจากฐานความรู้ ดังนั้นปัญหาของตัวควบคุมฟuzzy คือ จำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกหรือกฎในฐานความรู้ อาจจะน้อยเกินไปหรือหาจุดที่เหมาะสมไม่ได้ จึงต้องทำการปรับแต่งจนสามารถใช้งานได้ อีกประการหนึ่งเมื่อพารามิเตอร์ของระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆ จะต้องทำการปรับแก้ไขใหม่ ดังนั้นตัวควบคุมฟuzzy จึงได้มีการพัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถเรียนรู้และปรับค่าด้วยตัวเองซึ่งจะแบ่งออกได้เป็นหลายชนิด

- Self Tuning ใช้การปรับสเกลแฟคเตอร์
- Self Organizing ใช้การปรับแต่งกฎในฐานความรู้
- Adaptive ใช้ทั้งการปรับสเกลแฟคเตอร์และการปรับแต่งกฎในฐานความรู้

โครงสร้างของตัวควบคุมฟuzzyแบบปรับกฎด้วยตัวเอง ดังแสดงในรูปที่ 2.16 แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของตัวควบคุมแบบฟuzzy และส่วนของการปรับกฎ



รูปที่ 2.16 โครงสร้างของตัวควบคุมฟuzzyแบบปรับกฎด้วยตัวเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างระดับพื้นฐานของตัวควบคุมพีชชีแบบปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยตนเองนั้น จะเหมือนกับโครงสร้างของตัวควบคุมพีชชีปกติ แต่ฐานกฎการควบคุมจะสามารถเปลี่ยนแปลงได้ โดยการทำงานของหน่วยปรับแต่งกฎการควบคุม

โครงสร้างระดับการปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุม จะประกอบด้วย 2 หน่วย คือ หน่วยวัดสมรรถนะ (Performance measure) และหน่วยปรับแต่งกฎการควบคุม (rule generation and modification) ซึ่งการทำงานของแต่ละหน่วยนั้นสามารถที่จะอธิบายได้ดังนี้ พิจารณาจากโครงสร้างดังรูปที่ 2.16 จะเพิ่มส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ

- หน่วยวัดสมรรถนะ ในส่วนประกอบส่วนนี้ จะวัดค่าเอาต์พุตว่าอยู่ในระดับที่เหมาะสมหรือไม่ และนำผลความแตกต่างระหว่างสมรรถนะที่วัดได้จริงเปรียบเทียบกับสมรรถนะที่กำหนดไว้ นำค่าความแตกต่างไปปรับกฎเพื่อให้ได้สมรรถนะตามที่ต้องการ

- หน่วยการแก้ไขกฎ ในส่วนนี้จะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการปรับแต่งกฎการควบคุม โดยทำการหากฎการควบคุมที่มีระดับการเป็นสมาชิกสูงสุด โดยใช้ค่าระดับการเป็นสมาชิกของแต่ละกฎที่ได้จากการทำงานของหน่วยอินเฟอเรนซ์ และใช้ค่า PM ที่ได้จากหน่วยวัดสมรรถนะทำการแก้ไขส่วนผลของกฎนั้น แต่ถ้าไม่มีกฎการควบคุมที่สถานะนั้นให้สร้างกฎใหม่ขึ้นในฐานกฎการควบคุมนั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

เสถียรภาพของพีชชีในระบบอันดับที่หนึ่ง

3.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมพีชชี

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมแบบเดิมนั้น มักจะวิเคราะห์โดยใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุม แต่ในการออกแบบควบคุมพีชชีนั้นไม่จำเป็นต้องใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุม ทำให้การประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเดิมกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมพีชชีทำได้ยาก แต่เนื่องจากเสถียรภาพเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งของระบบควบคุม ดังนั้นจึงได้มีการวิจัยเพื่อหาวิธีในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมพีชชีกันอย่างจริงจัง และถึงแม้ว่าจะยังไม่ได้คำตอบที่ชัดเจนในการแก้ปัญหาทั้งหมด แต่ก็ได้มีการนำเสนอและพัฒนาวิธีการต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง วิธีในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมพีชชี ถูกแบ่งตามคุณลักษณะของระบบควบคุมที่ทำการพิจารณาดังนี้

3.1.1 ระบบควบคุมที่ประกอบด้วยตัวควบคุมพีชชีแบบไม่เป็นเชิงเส้นกับกระบวนการที่เป็นเชิงเส้น โดยที่รู้โมเดลทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ สามารถวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุม โดยใช้วิธีการต่าง ๆ กัน เช่นวิธี describing function technique วิธี L_2 -stability / circle criterion และวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้โคเมนความถี่ เป็นต้น

3.1.2 ระบบควบคุมที่ประกอบด้วยตัวควบคุมพีชชีแบบไม่เป็นเชิงเส้น กับกระบวนการที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยที่รู้โมเดลทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ สามารถทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุม โดยการใช้วิธี invariance principle / α -stability และวิธี expert Lyapunov function ซึ่งแนวคิดของวิธี α -stability นั้นจะสอดคล้องกับธรรมชาติของระบบพีชชีมากกว่า เนื่องจากมีการกำจัดขอบเขตความแน่นอนของการที่ระบบเสถียรภาพและไม่เสถียรภาพออกไป ซึ่งในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมทั้งสองวิธีนี้ จะใช้หลักการของ Crisp function และถ้าปฏิบัติตามข้อกำหนดของ Crisp function แล้วจะสามารถรับรองเสถียรภาพแบบอะซิมโทติกของระบบควบคุมพีชชีได้

3.1.3 ระบบควบคุมที่ประกอบด้วยตัวควบคุมพีชชีแบบไม่เป็นเชิงเส้น กับกระบวนการที่ไม่รู้โมเดลทางคณิตศาสตร์ ได้มีการนำเสนอวิธีการต่าง ๆ ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมโดยวิธีการดังนี้คือ วิธี Phase plane trajectory ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์ระบบที่มีอันดับต่ำ ๆ และวิธี energetic stability criterion ซึ่งใช้วิเคราะห์ระบบพีชชีที่อธิบายด้วยสมการความสัมพัทธ์พีชชี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เสถียรภาพของพีชชีในระบบอันดับที่หนึ่ง

เสถียรภาพเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากประการหนึ่ง ไม่เฉพาะแต่ในการออกแบบระบบควบคุมเท่านั้น แต่ยังรวมถึงระบบพลวัตทั้งหมดด้วย ไม่ว่าจะเนื่องมาจากการทำงานของระบบจะเป็นอย่างไร ต้องตรวจสอบดูเสมอว่าระบบยังเสถียรอยู่หรือไม่เมื่อเกิดมีการรบกวนหรือสภาวะเริ่มต้นแปรเปลี่ยนไป

พิจารณาระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรค่าตามเวลา

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad \dots(3.1)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad \dots(3.2)$$

เมื่อ $x_{(n \times 1)}$ เป็นสเตตเวกเตอร์, $u_{(p \times 1)}$ เป็นอินพุตเวกเตอร์, $y_{(q \times 1)}$ เป็นเอาต์พุตเวกเตอร์ และ $A_{(n \times n)}$, $B_{(n \times p)}$, $C_{(q \times n)}$ และ $D_{(q \times p)}$ เป็นแมตริกซ์ค่าคงที่เลขจริงตามลำดับ ส่วนช่วงเวลา t คือ $[0, \infty]$

นิยาม สำหรับอินพุตเวกเตอร์ค่าคงที่ใดๆ $u(t) = u_c$ หากมีจุดใน State Space $x(t) = x_c$ เมื่อ x_c เป็นค่าคงที่ เมื่อทำให้ $\dot{x}(t) = 0$ ที่จุดนี้ทุกค่าของ t จะเรียกจุดนี้ว่าจุดสมดุล (equilibrium point) ของระบบที่สมนัยกับค่าอินพุต u_c นั้น

ใช้นิยามนี้กับสมการ (3.1) จะได้

$$Ax_c + Bu_c = 0 \quad \dots(3.3)$$

$$x_c = -A^{-1}Bu_c \quad ; \quad A \text{ Non-singular แมตริกซ์} \quad \dots(3.4)$$

หากไม่มีอินพุตคือ $u_c = 0$ จะได้ $x_c = 0$ หรือโดยทั่วไปเราย้ายจุด Origin ของ State Space ของระบบในสมการที่ (3.1) มาไว้ที่จุดสมดุลในสมการที่ (3.4) โดยนิยามตัวแปรใหม่ว่า

$$\hat{x}(t) = x(t) - x_c \quad \dots(3.5)$$

เมื่อแทนในสมการที่ (2.1) จะได้

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) \quad \dots(3.6)$$

จุดสมดุลใหม่คือ $\hat{x} = 0$ ซึ่งก็คือจุด $x = x_c$ ในระบบเดิม ดังนั้นโดยทั่วไปเราถือว่าจุด Origin เป็นจุดสมดุล

หากเป็นระบบเชิงเส้นที่แปรค่ากับเวลา สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(t)x(t) + B(t)u(t) \\ y(t) &= C(t)x(t) + D(t)u(t) \end{aligned} \quad \dots(3.7)$$

$A^{-1}(t)B(t)$ จะแปรค่ากับเวลา ดังนั้นคำตอบเดียวของสมการที่ (3.4) จะคงที่ตลอดเวลา คือ $x_c = 0 = u_c$ นั่นคือ อินพุตเป็นศูนย์และจุดสมดุลอยู่ยังที่จุด Origin

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับระบบที่ไม่ใช่เชิงเส้น

$$\dot{x}(t) = f(x, u, t) \quad \dots(3.8)$$

จุดสมมูลจะต้องสอดคล้องกับเรื่องในต่อไปนี้

$$f(x_c, u_c, t) = 0 \text{ ทุกค่า } t \quad \dots(3.9)$$

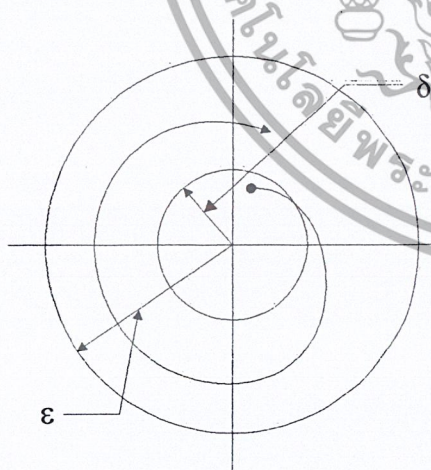
ผลเฉลยขึ้นอยู่กับลักษณะของฟังก์ชัน $f(\cdot)$ ไม่อาจสรุปทั่วไปได้ การวิเคราะห์เสถียรภาพ ณ จุดสมมูลใดจะกระทำโดยย้าย Origin มาไว้ที่จุดสมมูลนั้น

3.3 เสถียรภาพลียาปูนอฟ (Lypuanov Stability)

ทฤษฎีเสถียรภาพลียาปูนอฟพิจารณาระบบอินพุตเป็นศูนย์ซึ่งกำหนดด้วยสมการสเตตดังนี้

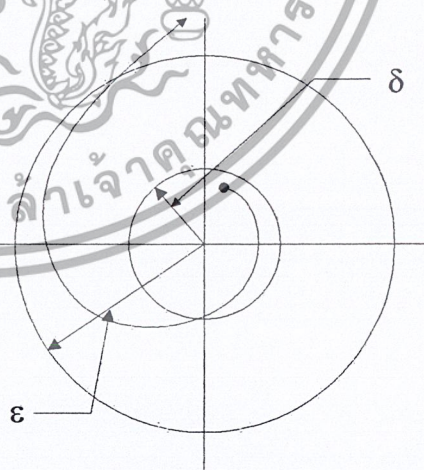
$$\dot{x} = f(x) \quad \dots(3.10)$$

จากสมการที่ (3.10) ถ้า $f(x) = Fx$ เมื่อพิจารณา $x=0$ เป็นจุดศูนย์กลางของระบบที่ $f(0) = 0$ ซึ่งเป็นค่าสเตตเริ่มต้น $x(t_0)$ อยู่รอบๆ จุดกำเนิด แต่เมื่อเวลาผ่านไป $x(t)$ ก็จะมีค่าคงอยู่ใกล้จุดกำเนิดตลอดเวลา t ซึ่งเราจะเรียกระบบที่มีคุณสมบัติเช่นนี้ว่าเสถียรภาพเชิงอะซิมโทติก (asymptotically stable) แต่ถ้า $x(t)$ ลู่เข้าสู่จุดกำเนิดเมื่อใด $t \rightarrow \infty$ เราจะเรียกระบบที่มีคุณสมบัติเช่นนี้ว่าเสถียรภาพเชิงอะซิมโทติกในขอบเขตที่กว้าง (asymptotically stable in-the-large) ซึ่งระบบจะเสถียรภาพเชิงอะซิมโทติกได้ ไม่ว่าสเตตเริ่มต้นนั้นจะอยู่ใกล้จุดกำเนิด (origin) หรือไกลจากจุดกำเนิดมากเท่าใด ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และ 3.2 ซึ่งแสดงทางเดินสถานะของระบบที่เสถียรภาพและไม่เสถียรภาพตามลำดับ



Stable Trajectory

รูปที่ 3.1



Unstable Trajectory

รูปที่ 3.2

ซึ่งค่า ϵ แสดงถึงขอบเขตที่กำหนดให้ใดๆ เราจะต้องออกแบบระบบให้มีขอบเขต δ โดย

ที่สเตตเดิมของระบบที่อยู่ใน δ จะไม่เคลื่อนออกนอกขอบเขต ϵ ดังรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพ แบบจำลองฟัซซี่ Takagi and Sugeno

การพิจารณาระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non Linear) โดยใช้แบบจำลอง Takagi and Sugeno นั้น เป็นการนำเอาระบบฟัซซี่ (Fuzzy System) มาประมวลผลในแต่ละสเตทของระบบพลวัต แล้วจัดให้อยู่ในรูปสเตทสเปซเวลาไม่ต่อเนื่อง ซึ่งลักษณะสำคัญของแบบจำลอง Takagi and Sugeno คือการแสดงสเตทในระบบพลวัตในรูปของ กฎฟัซซี่ (Fuzzy rule) แทนในแต่ละสเตท แบบจำลองฟัซซี่ Takagi and Sugeno จะอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกฎฟัซซี่กับค่าเชิงเส้นของอินพุตและเอาต์พุตของระบบควบคุม สามารถเขียนเป็นกฎฟัซซี่ได้ดังนี้

$$L^i : \text{IF } x_1(k) \text{ is } M_{i_1} \dots \text{and } x_n(k) \text{ is } M_{i_n} \\ \text{THEN } x(k+1) = A_i x(k) + B_i u(k)$$

โดยค่า

$$x(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k)]^T \\ u(k) = [u_1(k), u_2(k), \dots, u_r(k)]^T$$

ค่า L^i หมายถึงกฎฟัซซี่ที่ i โดยค่า $i = 1, 2, \dots, r$ และ r เป็นจำนวนกฎฟัซซี่ทั้งหมด
ที่ได้ควบคุม

M_{i_n} คือค่าความเป็นสมาชิกกฎที่ i เทอมเซตที่ n

$x(k+1) = A_i x(k) + B_i u(k)$ คือค่าเอาต์พุตของกฎฟัซซี่อันดับ i

และค่าเอาต์พุตสุดท้ายของระบบฟัซซี่ คือ

$$x(k+1) = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(k) \{A_i x(k) + B_i u(k)\}}{\sum_{i=1}^r w_i(k)} \quad \dots(3.11)$$

ค่า

$$w_i(k) = \prod_{j=1}^n M_{ij}(x_j(k))$$

ค่า $w_i(k)$ คือค่าถ่วงน้ำหนักของกฎที่ i

ค่า $M_{ij}(x_j(k))$ คือค่าความเป็นสมาชิกกฎที่ i เทอมเซตที่ j

โดยค่า $j = 1, 2, \dots, n$ แสดงถึงเทอมเซตของค่าอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_i = \begin{bmatrix} a_1^i & a_2^i & \dots & a_{n-1}^i & a_n^i \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad B_i = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

เมื่อ A_i คือ เมตริกซ์แสดงสแตกกฎที่ i และ B_i คือ เมตริกซ์อินพุตกฎที่ i เมื่อเราเปิดลูป (Open loop) ในสมการที่ (3.11) จะได้ค่าเอาต์พุตของกฎฟัซซี่ดังนี้

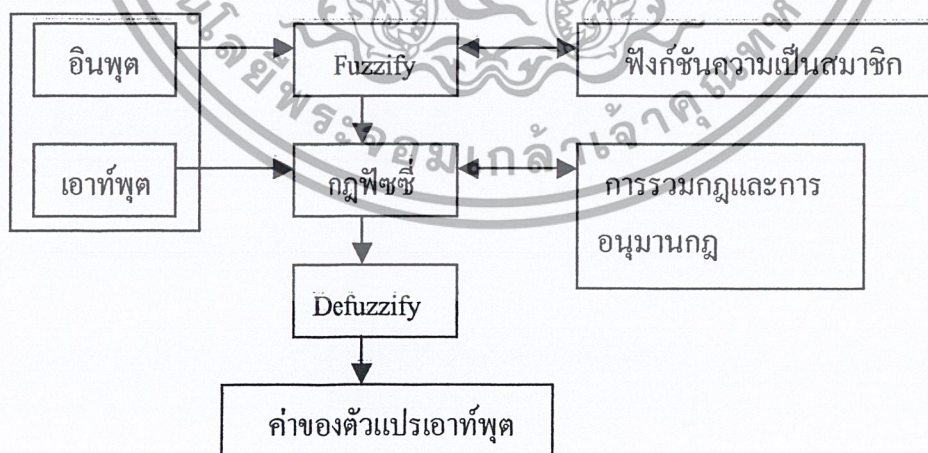
$$x(k+1) = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(k) A_i x(k)}{\sum_{i=1}^r w_i(k)} \quad \dots(3.12)$$

โดยที่ค่า

$$\sum_{i=1}^r w_i(k) > 1, \\ w_i(k) \geq 1 \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, r$$

3.5 แบบจำลองฟัซซี่ของ Mamdani

แบบจำลองฟัซซี่ (Fuzzy Model) เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการอนุมานค่าของตัวแปร ซึ่ง มีขั้นตอนการทำงานดังบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลองฟัซซี่ลอจิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากบล็อกไดอะแกรมของแบบจำลองฟัซซี่ลอจิก สามารถแยกอธิบายเป็นขั้นตอน ได้ดังนี้

อินพุตและเอาต์พุต ตัวแปรของฟัซซี่เซต ซึ่งตัวแปรแต่ละตัวอาจจะมีเทอมเซตได้หลายเทอม อินพุตซึ่งเป็นตัวแปรของระบบ (State Variable) อาจจะมีที่ตัวก็ได้ซึ่งจะขึ้นอยู่กับระบบสำหรับตัวแปรของเอาต์พุตหรือที่เรียกว่า Action Variable ซึ่งเป็นตัวแปรที่ถูกประมาณค่าโดยแบบจำลองของฟัซซี่ลอจิกเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบกฎฟัซซี่เพื่อใช้ในการควบคุมระบบต่อไป ปัญหาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้ก็คือ การกำหนดจำนวนเทอมเซตของแต่ละตัวแปรว่าควรจะมีสักกี่เทอม จึงจะทำให้การอนุมานค่าของตัวแปรเอาต์พุตมีความใกล้เคียงค่าของตัวแปรที่แท้จริงมากที่สุด ซึ่งจุดนี้ผู้ออกแบบแบบจำลองฟัซซี่จะต้องมีความรู้เกี่ยวกับระบบที่กำลังออกแบบอยู่พอสมควร

Fuzzify เป็นขั้นตอนการแปลงค่าของตัวแปรของอินพุตไปเป็นค่าระดับความเป็นสมาชิกของแต่ละเทอม โดยใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ได้เสนอไปแล้ว การเลือกใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก เราต้องเลือกให้เหมาะสมกับคุณสมบัติของตัวแปร เช่นถ้าตัวแปรมีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้นจะต้องเลือกฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่เป็นเชิงเส้นด้วย ซึ่งอาจจะเป็นสมการรูปสามเหลี่ยม และรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ส่วนตัวแปรที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นก็ต้องใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยเช่น ฟังก์ชันรูปตัว S, π , Beta และ Guassian

กฎฟัซซี่ (Fuzzy Rules) จะประกอบด้วยประพจน์ของฟัซซี่ โดยกฎฟัซซี่จะอยู่ในรูปของ IF – THEN เช่น

IF X is small THEN Y is positive

ที่ X และ Y เป็นตัวแปรฟัซซี่ ส่วน small และ positive เป็นเทอมเซตที่สอดคล้องกับตัวแปร X, Y และประพจน์ของฟัซซี่เซตคือ X is small และ Y is positive ประพจน์ที่ตามหลัง IF จะเป็นส่วนของเงื่อนไขที่เรียกว่า Antecedent ซึ่งก็คือส่วนของอินพุตของแบบจำลองฟัซซี่ลอจิกนั่นเอง และประพจน์ที่ตามหลัง THEN จะเรียกว่า Consequent หรือส่วนของเอาต์พุตของแบบจำลองฟัซซี่ลอจิก Antecedent อาจประกอบด้วยหลายประพจน์ ซึ่งจำนวนของประพจน์จะขึ้นอยู่กับจำนวนตัวแปรของอินพุตและจำนวนของเทอมเซตของตัวแปรแต่ละตัว เช่น ถ้าอินพุตมีสองตัวแปรในส่วนของ Antecedent จะมีสองประพจน์เชื่อมต่อกันในกฎหนึ่งกฎ และในการเชื่อมต่อกันของประพจน์จะต้องมีตัวเชื่อมซึ่งในแบบจำลองฟัซซี่ลอจิกจะมีตัวเชื่อมอยู่สองตัวด้วยกันคือ ยูเนียน และ อินเตอร์เซกชัน เช่น ในกรณีที่เชื่อมด้วยยูเนียน

IF X is Small OR T is cool THEN Y is positive

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และกรณีที่เกี่ยวข้องด้วยอินเตอร์เซกชัน

IF X is Small AND T is cool THEN Y is positive

นอกจากนี้ในกฎฟัซซี่ที่เชื่อมเซตอาจจะมี Hedge มาขยายเช่น very และ large

IF X is very small THEN Y is large positive

สำหรับจำนวนกฎในระบบจำลองฟัซซี่ลอจิกของระบบหนึ่งๆ จะขึ้นอยู่กับจำนวนของตัวแปรอินพุต และจำนวนเทอมของแต่ละตัวแปร เช่น ถ้าอินพุตมีสองตัวแปรและตัวแปรแต่ละตัวมี 5 เทอมเซต ซึ่งจำนวนกฎทั้งหมดจะเท่ากับ 25 กฎ

การอนุมานค่า (Defuzzification)

การดีฟัซซิฟิเคชัน คือกระบวนการหาค่าเอาต์พุตเพียงค่าเดียว (ซึ่งเกิดต้น) ที่เหมาะสมที่สุด เพื่อเป็นตัวแทนของฟัซซี่เอาต์พุตที่มีค่าความเป็นไปได้กระจายอยู่บนเอกภพสัมพัทธ์ V ของเอาต์พุต

ตัวอย่างวิธีการดีฟัซซิฟิเคชัน ที่นิยมใช้มีดังนี้

1. Max Procedure เป็นวิธีการดีฟัซซิฟิเคชัน โดยเลือกค่าเอาต์พุตที่มีค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมากที่สุด เพื่อใช้เป็นตัวแทนของฟัซซี่เอาต์พุต สามารถแสดงด้วยสมการดังนี้

$$v_o = \max_{x_i \in U} \mu_A(x_i) \quad \dots(3.13)$$

2. Mean of Maxima (MOM) เป็นวิธีที่ขยายมาจากวิธี Max Procedure เพื่อใช้ในกรณีที่มีค่าเอาต์พุตที่มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกสูงสุดเท่ากันหลายค่า ให้ทำการหาค่าเฉลี่ยของค่าเอาต์พุตที่มีค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสูงสุดเท่ากัน โดยจะได้สมการดังนี้

$$v_o = \text{MOM}(A) = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad \dots(3.14)$$

เมื่อ x_i คือ ค่าเอาต์พุตแต่ละค่าที่มีค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสูงสุดเท่ากัน

n คือ จำนวนเอาต์พุตที่มีค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสูงสุดเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

วิธี COA เป็นวิธีการหาจุดศูนย์กลางของพื้นที่ใต้กราฟของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก เพื่อให้เป็นตัวแทนของฟัซซีเซตฟูด ซึ่งทำได้โดยการแบ่งพื้นที่ใต้กราฟของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ออกเป็น 2 ส่วนเท่าๆ กัน และค่า v_o จะหาได้จากค่าของ v ที่ตำแหน่งของเส้นแบ่งครึ่ง สามารถแสดงด้วยสมการดังนี้

$$\int_{-\infty}^{COA(A)} \mu_A(x_i) dx_i = \int_{COA(A)}^{\infty} \mu_A(x_i) dx_i \quad \dots(3.15)$$

ในทางปฏิบัติ การคำนวณโดยใช้สมการที่ 3.15 ทำได้ยาก จึงประมาณการคำนวณของวิธี COA โดยใช้วิธี COG ซึ่งเป็นการหาจุดศูนย์กลางการถ่วงน้ำหนักแทนการหาจุดศูนย์กลางของพื้นที่ใต้กราฟ สมการของการนิฟัซซีฟิเคชัน โดยใช้วิธี COG สามารถแสดงได้ดังนี้

$$v_o = COG(A) = \frac{\int_U x_i \mu_A(x_i) dx_i}{\int_U \mu_A(x_i) dx_i} \quad \dots(3.16)$$

ในกรณีที่เอกภพสัมพัทธ์ U มีสมาชิกเป็นค่าที่ไม่ต่อเนื่อง (discrete) สามารถหาค่า v_o ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$v_o = COG(A) = \frac{\sum_{i=1}^{Nq} x_i \mu_A(x_i)}{\sum_{i=1}^{Nq} \mu_A(x_i)} \quad \dots(3.17)$$

เมื่อ Nq คือ ระดับการควอนไทซ์
 x_i คือ ค่าเอาต์พุตของแต่ละค่าในการควอนไทซ์

4. Fuzzy Mean Method (FM) เป็นวิธีที่ปรับปรุงมาจากวิธี COG เพื่อลดเวลาในการคำนวณ โดยการลดระดับการควอนไทซ์ลงให้เท่ากับจำนวนเทอมของตัวแปรเอาต์พุตในเอกภพสัมพัทธ์ V และใช้ค่าเฉลี่ยของแต่ละเทอมเป็นตัวแทนของค่าเอาต์พุตของแต่ละค่าการควอนไทซ์ สมการของการนิฟัซซีฟิเคชัน โดยวิธี FM สามารถแสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_o = FM(A) = \frac{\sum_{k=1}^{N_u} \gamma_k x_k}{\sum_{k=1}^{N_u} \gamma_k} \quad \dots(3.18)$$

- เมื่อ N_u คือ จำนวนฟัซซี่เซตของตัวแปรเอาต์พุตในเอกภพสัมพัทธ์ U
 γ_k คือ ค่าเฉลี่ยที่ใช้เป็นตัวแทนของฟัซซี่เซตของตัวแปรเอาต์พุตแต่ละเทอมที่เกิดขึ้นบนเอกภพสัมพัทธ์ V
 x_k คือ ค่าระดับความเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซตของตัวแปรเอาต์พุตแต่ละเทอมที่เกิดขึ้นบนเอกภพสัมพัทธ์ V

5. Weighted Fuzzy Mean Method (WFM) เป็นวิธีที่ขยายมาจากวิธี FM โดยเพิ่มการคูณสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของตัวแปรเอาต์พุตในแต่ละเทอม สมการของการดีฟัซซิฟิเคชันโดยวิธี WFM สามารถแสดงได้ดังนี้

$$v_o = WFM(A) = \frac{\sum_{k=1}^{N_u} \omega_k \gamma_k x_k}{\sum_{k=1}^{N_u} \omega_k \gamma_k} \quad \dots(3.19)$$

- เมื่อ ω_k คือ สัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของแต่ละเทอมของตัวแปรเอาต์พุตภายในเอกภพสัมพัทธ์ U

6. Indexed Defuzzification Method (IDFZ) เป็นวิธีการที่ขยายมาจากการดีฟัซซิฟิเคชันแบบเดิม โดยการตัดเอาเอาต์พุตบางส่วนที่มีค่าฟังก์ชันความเป็นสมานน้อยกว่าค่าเทรชโฮลด์ (threshold) ที่กำหนด โดยจะคำนวณเฉพาะค่าเอาต์พุตที่มีค่าฟังก์ชันความเป็นสมานมากกว่าค่าเทรชโฮลด์ซึ่งสามารถแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$IDFZ(B, \alpha_j) = DFZ(\alpha - \text{cut}(B, \alpha_j)) \quad \dots(3.20)$$

3.6 เสถียรภาพลืออาพูนอฟที่เวลาไม่ต่อเนื่อง

เงื่อนไขเสถียรภาพโดยใช้วิธีลืออาพูนอฟเมื่อระบบเวลาไม่ต่อเนื่องคือ

$$x(k+1) = fx(k) ; \text{ เมื่อ } f(0) = 0 \quad \dots(3.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับระบบในสมการที่ (3.21) มีเงื่อนไขพอเพียงสำหรับเสถียรภาพดังนี้

สมมติฟังก์ชันสเกลาร์ $V(x(k))$ ทุกค่า x ในบริเวณ $\|x\| \leq \varepsilon$ ค่า $\|x\|$ เป็น Euclidean norm สำหรับค่าจำนวนจริงที่ $\varepsilon > 0$ สอดคล้องกับคุณสมบัติข้างล่าง

1. $V(x) > 0 ; x \neq 0$
2. $V(0) = 0$
3. $V(x)$ เข้าใกล้อนันต์ที่ ดังนั้น $\|x\| \rightarrow \infty$

เมื่อพิจารณาจุดดุลยภาพของสแตที่ $x = 0$ หากสอดคล้องกับเงื่อนไขของเสถียรภาพเชิงอะซิมโทติกในขอบเขตที่กว้าง เมื่อทุกค่า x พร้อมด้วย $V(x) \rightarrow \infty$ ดังนั้น $\|x\| \rightarrow \infty$

ในการพิจารณาเงื่อนไขของเสถียรภาพลึอานอฟกับแบบจำลอง Takagi and Sugeno สามารถกล่าวได้ดังนี้

ถ้าเราเปิดลูป (Open Loop) ในสมการที่ (3.11) ก็จะได้สมการที่ (3.12) ซึ่งจุดดุลยภาพของระบบ (Equilibrium point) ของระบบในสมการที่ (3.12) คือเสถียรภาพเชิงอะซิมโทติกในขอบเขตกว้างถ้าพิสูจน์ได้ว่าเมตริกซ์ P เป็น Positive definite ดังนั้นจะได้ว่า

$$A_i^T P A_i - P < 0 \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, r \quad \dots(3.22)$$

หากกำหนด symmetric positive definite matrix P ใดๆ ให้จะมี symmetric positive definite matrix Q สอดคล้องกับสมการเมตริกซ์

$$A_i^T P A_i - P = -Q \quad \dots(3.23)$$

ซึ่ง Q คือ identity matrix จากสมการข้างบนเราสามารถหาค่า P ได้

จากสมการถดถอยของลึอานอฟ ทฤษฎีเสถียรภาพของระบบเชิงเส้นกับเวลาที่ไม่ต่อเนื่องเราสามารถตรวจสอบเสถียรภาพของระบบพีชซึ่งได้จากสมการที่ (3.23) ว่าเป็นจริงตามทฤษฎีนั้นหรือไม่

สำหรับฟังก์ชัน $V(x)$ ที่กำหนดนั้นไม่มีวิธีทั่วไปสำหรับทดสอบว่า $V(x)$ เป็น Positive definite หรือไม่ นอกจาก $V(x)$ จะอยู่ในรูปสมการ Quadratic function ของ x คือ $V(x) = x^T P x$ ถ้าเมตริกซ์ $P > 0$ ดังนั้นสมการ Quadratic $V = x^T P x$ จะใช้พิสูจน์เสถียรภาพของระบบในสมการที่ (3.2) หรือเรียกว่าเสถียรภาพแบบ Quadratic และเรียกฟังก์ชัน V ว่าเป็น Quadratic Lyapunov function

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถหาค่า $V(x)$ ว่าเป็น Positive definite มีเงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับรูป Quadratic เลขจริง $x^T P x$ จะเป็น Positive definite คือ Determinant ของ เมทริกซ์ย่อยของ P ที่มีเส้นทแยงมุมหลักเป็นส่วนหนึ่งของเส้นทแยงมุมหลักของ P (เรียกว่า principal minor) ทุก ๆ ค่าเป็นบวก

3.7 ตัวอย่างการวิเคราะห์เสถียรภาพ

เพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าระบบควบคุมพีชชี สามารถพัฒนาให้เป็นระบบที่มีเสถียรภาพได้ เราจึงได้ทำการพิจารณาปัญหาความสมดุลการแกว่งของอินเวอร์สแพนดูลัมที่ติดตั้งบนล้อเลื่อน และมีการเคลื่อนที่ในแนวนอน ซึ่งมีสมการการเคลื่อนที่ของแพนดูลัมดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{g \sin(x_1) - a m x_2^2 \sin(2x_1)/2 - a \cos(x_1) u}{4l/3 - a m \cos^2(x_1)} \end{aligned} \quad \dots(3.24)$$

x_1 แสดงถึงมุมของแพนดูลัมในแนวตั้งตรง

x_2 แสดงถึงมุมของอัตราความเร็ว

u เป็นแรงควบคุมการเคลื่อนที่ของล้อเลื่อนหรือแรงอินพุตให้กับระบบ

g คือ แรงโน้มถ่วงของโลก (9.81 m/s^2)

m คือ น้ำหนักของแพนดูลัม (0.15 kg)

M คือ น้ำหนักของล้อเลื่อน (1.0 kg)

$2l$ คือ ความยาวของแพนดูลัม

โดยที่
$$a = \frac{1}{m + M}$$

ดังนั้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการคุณลักษณะได้ดังนี้

$$\frac{C(S)}{R(S)} = \frac{-0.3947S^2}{s^4 + 0S^3 - 4.4537S^2 + 0S + 0} \quad \dots(3.25)$$

จากนั้นเราจะใช้ระบบตัวควบคุมพีชชีควบคุมความสมดุลของการแกว่งของอินเวอร์สแพนดูลัมโดยจะกำหนด x_1 มีค่าในช่วง $-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}$ เขียนเป็นกฎได้ดังนี้

$$L^1 : \text{IF } x_1 \text{ is approach to } 0 \text{ THEN } \dot{x} = A_1 x + B_1 u$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

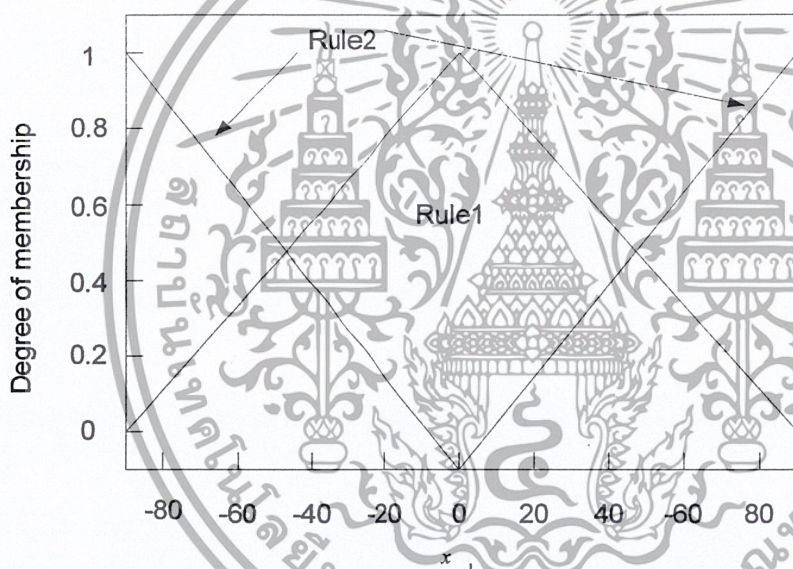
$$L^2 : \text{IF } x_2 \text{ is approach to } \pm \frac{\pi}{2} (|x| < \frac{\pi}{2}) \text{ THEN } \dot{x} = A_2 x + B_2 x \quad \dots(3.26)$$

โดยที่

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{g}{4l/3 - aml} & 0 \end{bmatrix} \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{a}{4l/3 - aml} \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{g}{\pi(4l/3 - aml \beta^2)} & 0 \end{bmatrix} \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{a \beta}{4l/3 - aml \beta^2} \end{bmatrix}$$

กำหนดให้ $\beta = \cos(88^\circ)$



รูปที่ 3.4 แสดงเพอสมเซตของฟัซซี่กฎที่ 1 และ 2

ซึ่งจะสามารถออกแบบเมตริกซ์ควบคุมได้ดังนี้

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 8.146 & 0 \end{bmatrix} \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.7223 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 4.679 & 0 \end{bmatrix} \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.0227 \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดค่าไอเก้นป้อนกลับ $[-2, -2]$ ซึ่งเป็นค่าเท่ากับโพลของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะได้ค่าของ F_i ดังนี้

$$F_1 = [-16.8157 \quad -5.5379]$$

$$F_2 = [-382.3348 \quad -176.2115]$$

$$G = A_1 - B_1 F_1 = A_2 - B_2 F_2$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -4 & -4 \end{bmatrix}$$

$$G_{12} = \frac{(A_1 - B_1 F_2) + (B_2 - B_2 F_1)}{2} \quad \dots(3.27)$$

เมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 3.27 จะได้ค่า G_{12} ดังนี้

$$G_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -382.3348 & -176.2115 \end{bmatrix}$$

และจะได้ค่าของ P ที่ได้จากการออกแบบเชิงระบบควบคุม ดังนี้

$$P = \begin{bmatrix} 3.625 & 0.6250 \\ 0.625 & 0.2812 \end{bmatrix}$$

จากเงื่อนไขที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าเมตริกซ์ P เป็น Positive Definite ดังนั้นจะพิจารณาเสถียรภาพตามทฤษฎีของลิวาปูนอฟได้ดังนี้

$$G_{ij} P G_{ij} - P < 0$$

$$-2.59 \times 10^5 < 0$$

จะเห็นว่าเป็นจริงตามทฤษฎีแสดงว่าระบบมีเสถียรภาพเชิงอะซิมโทติกในขอบเขตที่กว้าง เพราะเป็นไปตามเงื่อนไขของทฤษฎีลิวาปูนอฟที่ $G_{ij} P G_{ij} - P < 0$

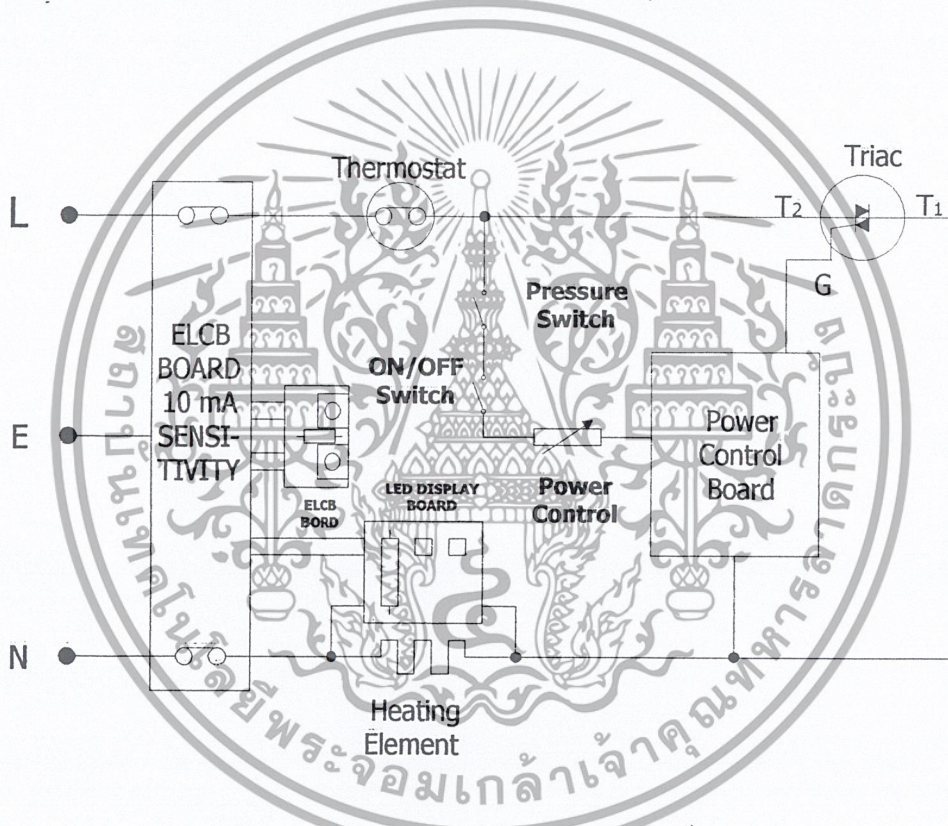
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การออกแบบตัวควบคุม

4.1 การออกแบบตัวควบคุมพีชชี

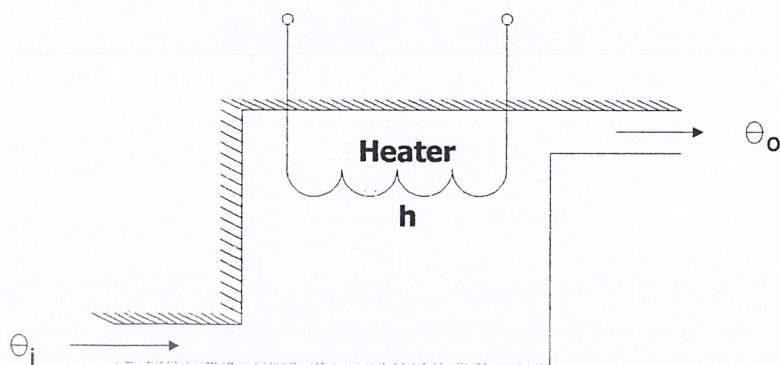
ในหัวข้อนี้จะแสดงการออกแบบตัวควบคุมพีชชีมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งจะใช้เครื่องทำน้ำอุ่นมาเป็น Plant จำลองในการควบคุมอุณหภูมิ เราจะใช้ ค่า Error Temperature และ ค่า Change Error Temperature เป็นตัวแปรอินพุต และค่าเปอร์เซ็นต์การ ON (Time Proportion Control) ของไทรแอกเป็นเอาต์พุต ซึ่งได้มีการออกแบบตัวควบคุมพีชชีดังนี้



รูปที่ 4.1 แสดงวงจรภายในของเครื่องทำน้ำอุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการสร้าง Math-Model ของระบบและทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุม



รูปที่ 4.2 แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ heater

กำหนดให้

- R = Thermal Resistance ; $^{\circ}\text{C} \cdot \text{sec} / \text{Kcal}$
 C = Thermal Capacitance ; $\text{Kcal} / ^{\circ}\text{C}$
 G = Steady-state water flow rate ; kg / sec ; (0.111 kg / sec)
 m = mass of water in tank ; kg ; (0.222 kg)
 c = Specific heat of water ; $\text{Kcal} / (\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; (11.92 $\text{Kcal} / (\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$)

ในระบบนี้พารามิเตอร์ต่างๆ คือ

$$R = \frac{1}{Gc} = \frac{1}{(0.111)(11.92)} = 0.756 \text{ } ^{\circ}\text{C} \cdot \text{sec} / \text{Kcal}$$

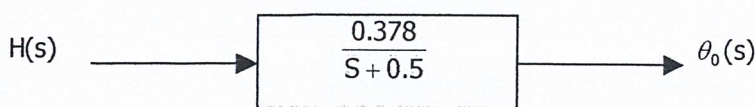
$$C = mc = (0.222)(11.92) = 2.65 \text{ } \text{Kcal} / ^{\circ}\text{C}$$

สมการของระบบ คือ

$$RC \frac{d\theta_o}{dt} + \theta_o = R \cdot h \quad \dots(4.1)$$

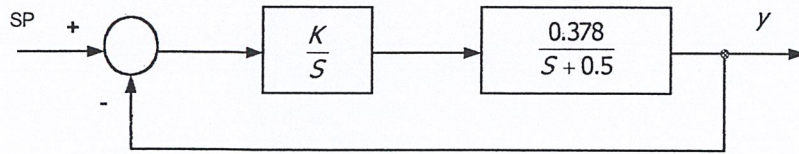
หา Transfer function ได้ดังนี้

$$\frac{\theta_o(s)}{H(s)} = \frac{R}{RCS + 1} = \frac{1/C}{S + 1/RC} = \frac{0.378}{S + 0.5}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเราจะสามารถนำตัวควบคุมฟัซซีมาควบคุมแทนชุดควบคุมเดิมของเครื่องทำน้ำอุ่นได้ ซึ่งสามารถแสดงได้ตาม Block diagram ดังแสดงในรูปที่ 4.3
 ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบเครื่องทำน้ำอุ่น โดยการเพิ่มตัวควบคุมแบบ I



รูปที่ 4.3 แสดง Block Diagram ของระบบที่ควบคุมด้วยฟัซซี

จากทฤษฎีเสถียรภาพของลิวาปูนอฟจะได้

$$A^T P + P A = -Q \tag{4.2}$$

โดยที่ Q คือ Identity Matrix

จากรูปที่ 4.3 เมื่อกำหนดให้ค่า $K=1$ จะได้

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.378 & -0.5 \end{bmatrix}$$

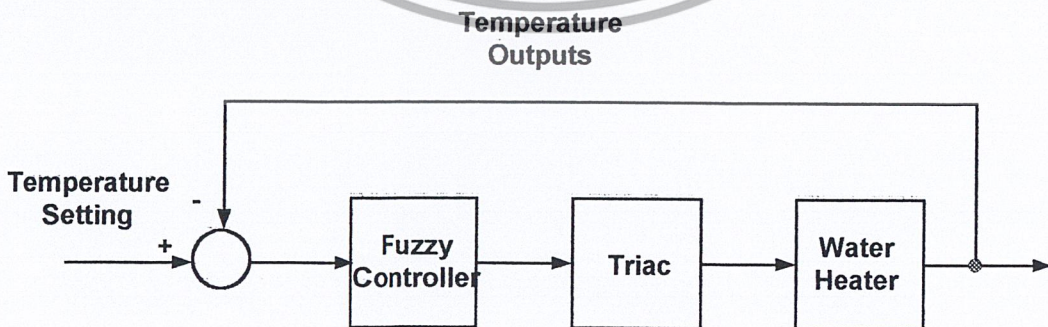
และ

$$P = \begin{bmatrix} 2.039 & 1.323 \\ 1.323 & 3.646 \end{bmatrix}$$

ค่าของ P เป็น Positive definite แสดงว่าระบบมีเสถียรภาพตามทฤษฎีของลิวาปูนอฟ

4.2 ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี

ในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีจะทำความเข้าใจขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 4.4 แสดงแบบจำลองตัวควบคุมฟัซซีควบคุมเครื่องทำน้ำอุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 Input and Output เราจะนำ Input Temperature ที่ได้ มาหา ค่า Degree of Membership โดยเราจะแปลง Input ของ Fuzzy ได้ 2 ค่า ดังสมการดังนี้

$$\text{Error Temperature} = \text{Set Temperature} - T(t) \quad \dots(4.3)$$

$$\text{Change Error Temperature} = T(t) - T(t-1) \quad \dots(4.4)$$

โดยที่

Set Temperature คือ อุณหภูมิที่ตั้งไว้ ณ เครื่องทำน้ำอุ่น

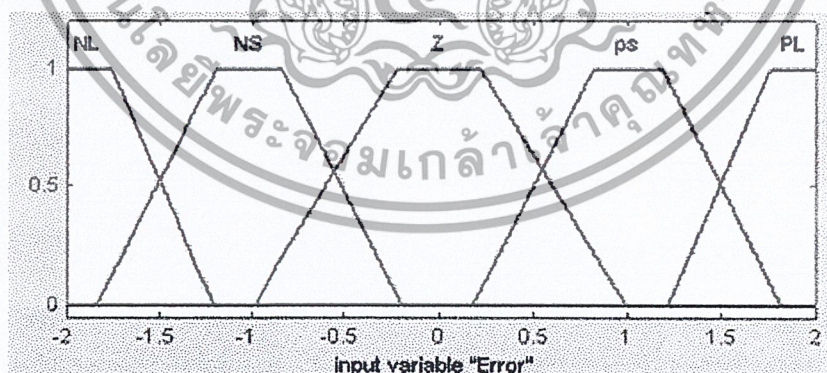
$T(t)$ คือ อุณหภูมิที่วัดได้ในปัจจุบัน

$T(t-1)$ คือ อุณหภูมิที่วัดได้ก่อนหน้านั้น

สำหรับตัวแปรเอาต์พุตนั้นเราจะกำหนดให้ไตรแอกทำงานที่ 50%-100% สาเหตุที่เรา กำหนดให้เป็น 50 – 100% นั้น เป็นเพราะว่าเราได้ทำการชดเชยอุณหภูมิของขดลวดความร้อนไป ในตัว

4.2.2 Fuzzify เป็นการแปลงค่า Error Temperature และค่า Change Error Temperature ที่ได้ทำการนอมอลไลซ์เซชันให้อยู่ในช่วงเอกภพสัมพัทธ์ที่กำหนดไว้แล้ว ให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันเซตโดยค่าระดับความเป็นสมาชิกของ Error Temperature และ Change Error Temperature เขียนแทนด้วย μ_e และ $\mu_{\Delta e}$ ตามลำดับ ซึ่งในการออกแบบตัวควบคุมฟังก์ชันที่ใช้ควบคุมอุณหภูมินี้ จะใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสี่เหลี่ยมคางหมู แปลงค่าตัวแปรอินพุตให้เป็นค่าระดับความเป็นสมาชิกของฟังก์ชัน ดังรูปที่ 4.5

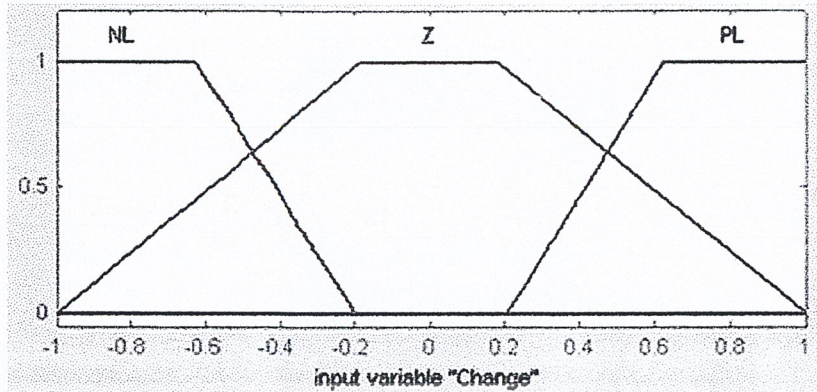
ระดับความเป็นสมาชิก



รูปที่ 4.5 แสดงกราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ Input Error Temperature

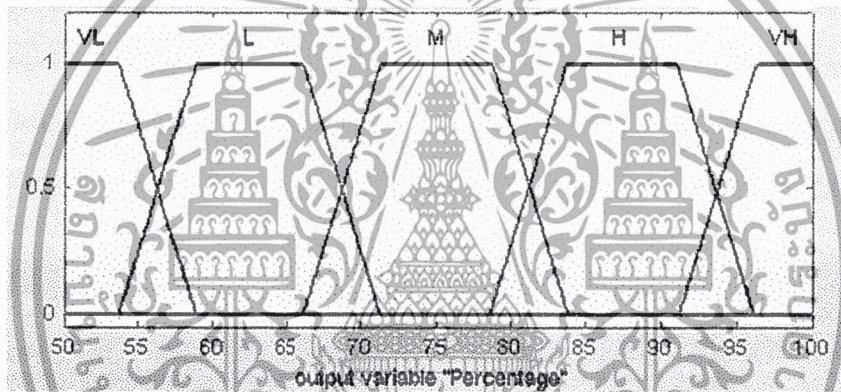
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับความเป็นสมาชิก



รูปที่ 4.6 แสดงกราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ Input Change Error Temperature

ระดับความเป็นสมาชิก



รูปที่ 4.7 แสดงกราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ Output (เปอร์เซ็นต์การ ON ของไตรแอก)

กำหนดให้

NL = Negative Large

VL = Very Low

NS = Negative Small

L = Low

Z = Zero

M = Medium

PS = Positive Small

H = High

PL = Positive Large

VH = Very High

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 Fuzzy Rules ในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่จะมีกฎอยู่ 15 กฎ ในการเชื่อมต่อของประพจน์จะใช้ตัวเชื่อม อินเตอร์เซกชัน (AND) ซึ่งจะมีกฎต่างๆ ดังนี้

1. IF Error is NL AND Change_Error is NL THEN Percentage is H
2. IF Error is NL AND Change_Error is Z THEN Percentage is VL
3. IF Error is NL AND Change_Error is PL THEN Percentage is VL
4. IF Error is Ns AND Change_Error is NL THEN Percentage is L
5. IF Error is Ns AND Change_Error is Z THEN Percentage is L
6. IF Error is Ns AND Change_Error is PL THEN Percentage is VL
7. IF Error is Z AND Change_Error is NL THEN Percentage is M
8. IF Error is Z AND Change_Error is Z THEN Percentage is M
9. IF Error is Z AND Change_Error is PL THEN Percentage is L
10. IF Error is PS AND Change_Error is NL THEN Percentage is H
11. IF Error is PS AND Change_Error is Z THEN Percentage is H
12. IF Error is PS AND Change_Error is PL THEN Percentage is H
13. IF Error is PL AND Change_Error is NL THEN Percentage is VH
14. IF Error is PL AND Change_Error is Z THEN Percentage is VH
15. IF Error is PL AND Change_Error is PL THEN Percentage is VH

สามารถนำมาเขียนเป็นเมตริกซ์ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ร่วมกันของตัวแปร ได้ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งเมตริกซ์นี้จะถูกเรียกว่า Fuzzy Associative Memory (FAM)

Error \ Change	NL	Z	PL
NL	H	VL	VL
NS	L	L	VL
Z	M	M	L
PS	H	H	H
PL	VH	VH	VH

รูปที่ 4.8 แสดงเมตริกซ์ FAM ของระบบควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 Defuzzify เป็นกระบวนการประมาณค่าของตัวแปรเอาต์พุต โดยการอนุมานความจริงในส่วนของ Antecedent ของแบบจำลองฟัซซี่ โดยค่าที่ได้จะเป็นเลขจำนวนจริงที่อยู่ในโดเมนของตัวแปรเอาต์พุตและค่านี้จะเป็ค่าคาดหวังของตัวแปรฟัซซี่ ที่ใช้ในการควบคุม ในการ Defuzzify นั้นเราจะใช้วิธี Center of Area (COA) เป็นการประมาณค่าของตัวแปรเอาต์พุตโดยการหาค่าจุดศูนย์กลางของพื้นที่ของกฎที่เป็นจริง ในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่นี้เราจะใช้การ Look Up Table ซึ่งค่าต่างๆที่ทำการอนุมานค่านั้นแสดงได้ดังตาราง ดังนี้

$$y_o = \frac{\sum_{j=1}^n y_j * \mu(y_j)}{\sum_{j=1}^n \mu(y_j)} \quad \dots(4.7)$$

โดยที่ y_j เป็นค่าศูนย์กลางพื้นที่ Output
 $\mu(y_j)$ เป็นค่าความเป็นสมาชิก $\mu(y_j)$

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การ ON ของไตรแอก

Error \ Change	-1	-0.5	0	0.5	1
-2	87.4	76.6	53.2	53.2	53.2
-1.5	75	71.6	59.8	59.8	54
-1	62.6	62.5	62.5	59.5	53.4
-0.5	69.5	69.5	69.5	66.5	53.4
0	75	75	75	68.4	62.6
0.5	80.5	80.5	80.5	74.1	73.7
1	87.4	87.4	87.4	87.4	87.4
1.5	90.1	90.1	90.1	90.1	90.1
2	96.8	96.8	96.8	96.8	96.8

ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของกฎแต่ละกฎ ซึ่งเราจะได้เมตริกซ์ที่แสดงสเททกฎต่างๆ ดังนี้

$$A_1 = \begin{bmatrix} -0.937 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_9 = \begin{bmatrix} 0 & 0.626 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -0.266 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{10} = \begin{bmatrix} 1.874 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0.234 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{11} = \begin{bmatrix} 0.874 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} -1.626 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{12} = \begin{bmatrix} -0.162 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} 0.625 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{13} = \begin{bmatrix} 0.984 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} 0.466 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{14} = \begin{bmatrix} 0.484 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_7 = \begin{bmatrix} 0 & -0.75 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{15} = \begin{bmatrix} -0.016 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_8 = \begin{bmatrix} 6.5 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

จากเงื่อนไขที่กล่าวในสมการที่ (3.14) โดยที่ P ได้จากหาเสถียรภาพของระบบดังที่กล่าว
ไปแล้วในข้างต้น ดังนั้นจะพิจารณาเสถียรภาพตามทฤษฎีของดีอาฟูนอฟได้ว่า

$$A_i P A_i - P < 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, 15 \quad \dots(4.8)$$

เมื่อแทนค่า $A_{1,2,\dots,15}$ ลงในสมการที่ 4.8 แล้วก็จะพบว่า เป็นจริงตามเงื่อนไขดังที่ได้
กล่าวมาแล้ว ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบมีเสถียรภาพเชิงอะซิมโทติก

จากขั้นตอนต่างๆ ที่กล่าวมาแล้ว จะทำการหาค่าเอาต์พุต (เปอร์เซ็นต์การ ON ของ
ไตรแอก) มา 1 ค่า ได้ดังนี้

$$\text{ให้ Set Point Temperature} = 36 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{Current Temperature } T(t) = 35 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{และ อุณหภูมิที่วัดได้ก่อนหน้า } T(t-1) = 35 \text{ } ^\circ\text{C}$$

ดังนั้นนำค่าต่างๆ ที่ได้เหล่านี้เข้าสู่ขั้นตอน Fuzzification Method แปลงเป็น Fuzzy Input จะได้ค่า

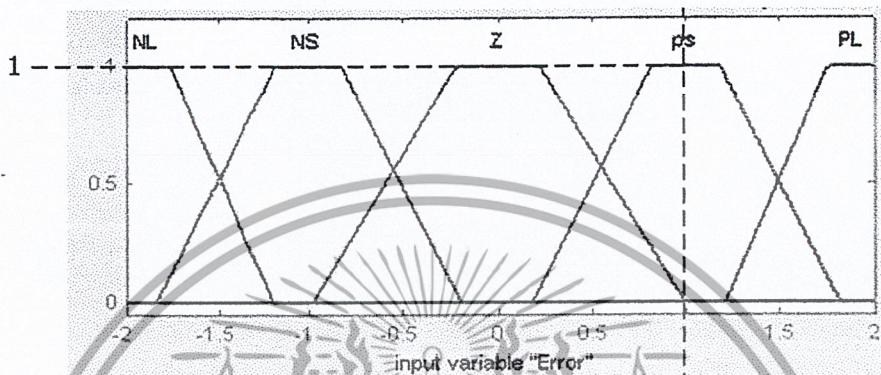
$$\text{Error Temperature} = 36 - 35 = 1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{Change Error Temperature} = 35 - 35 = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

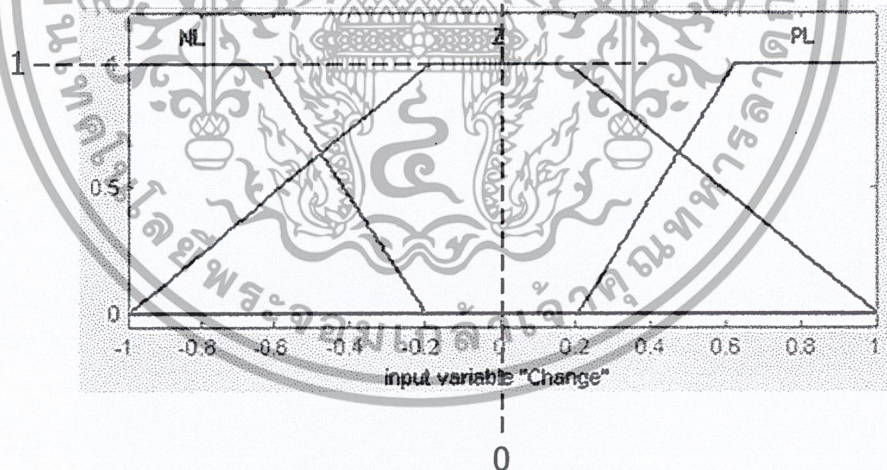
นำค่า Error Temperature ไปหาค่าความเป็นสมาชิกจากรูปที่ 4.9 พบว่าตัดกราฟที่ตำแหน่งของ Positive และได้ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 และในทำนองเดียวกัน นำค่า Change Error Temperature ไปหาค่าความเป็นสมาชิกจากรูปที่ 4.10 พบว่าตัดกับกราฟที่ตำแหน่ง Zero มีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1

ระดับความเป็นสมาชิก



รูปที่ 4.9 แสดงความเป็นสมาชิกของ Error Temperature ที่ 1 °C

ระดับความเป็นสมาชิก



รูปที่ 4.10 แสดงความเป็นสมาชิกของ Change Error Temperature ที่ 0 °C

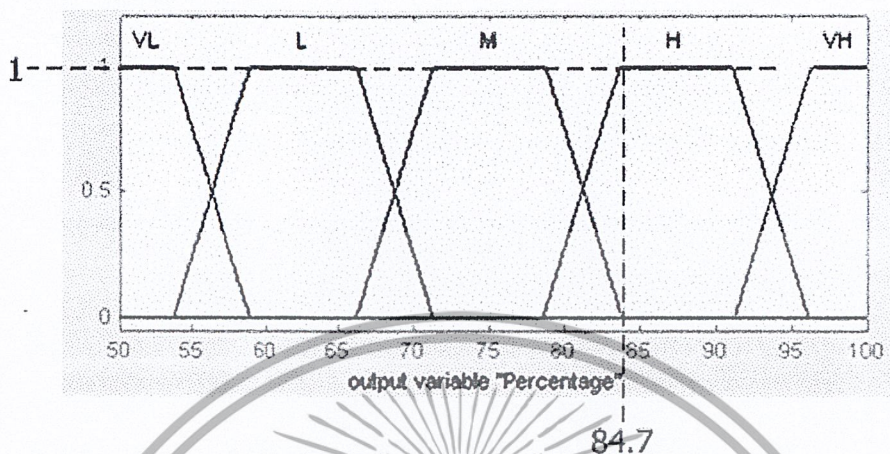
จากนั้นนำค่าความเป็นสมาชิกที่ได้ไปเข้าสู่ขั้นตอน Rules Evaluation โดยนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกฎที่ได้เขียนไว้แล้วในข้างต้นจะเห็นได้ว่า จะเข้ากฎที่ 8

IF Error is PS AND Change_Error is Z THEN Percentage_Control is H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้เทคนิค Smallest ในแต่ละกฎจะได้ค่า Inference จากกฎ คือ $\mu_{\text{Inference}} = \{1\}$ จะให้ค่าเอาต์พุต ดังรูปที่ 4.11

ระดับความเป็นสมาชิก



รูปที่ 4.11 แสดงการหาค่าเอาต์พุต

จากสมการที่ (4.7) ดังนั้นจะได้ค่าเอาต์พุตดังนี้

$$y_o = \frac{1 * 84.7}{1} = 84.7 \%$$

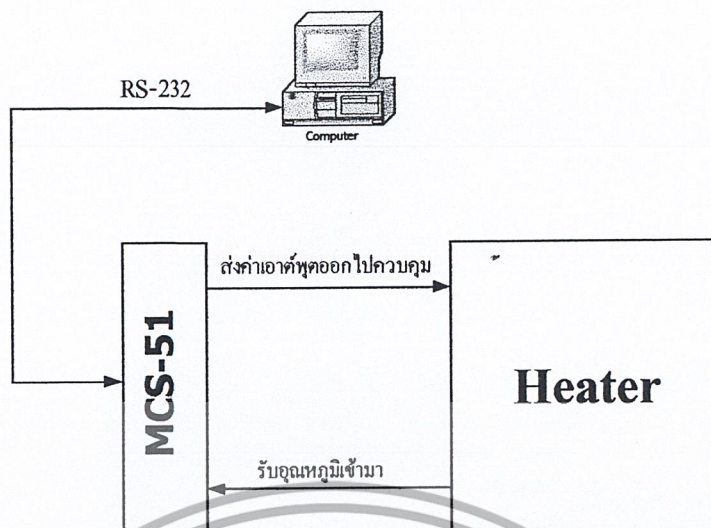
ซึ่งจะได้ค่าดังแสดง ในตารางที่ 4.1 และในการหาค่าเอาต์พุตที่ค่าอุณหภูมิอื่น ๆ นั้นก็สมารถที่จะทำได้เช่นเดียวกัน

จากค่าเอาต์พุตในตาราง 4.1 จะเป็นเปอร์เซ็นต์การ ON ของไตรแอก ซึ่งจะเห็นได้ว่าการควบคุมนั้นเราจะควบคุมอยู่ในย่าน Error Temperature ± 2 องศาเท่านั้น ถ้า Error Temperature มากกว่า +2 องศา เราจะให้ไตรแอกนั้น ON ตลอดเวลา และถ้า Error Temperature น้อยกว่า -2 องศาเราก็จะให้ไตรแอกนั้น OFF ตลอดเวลา

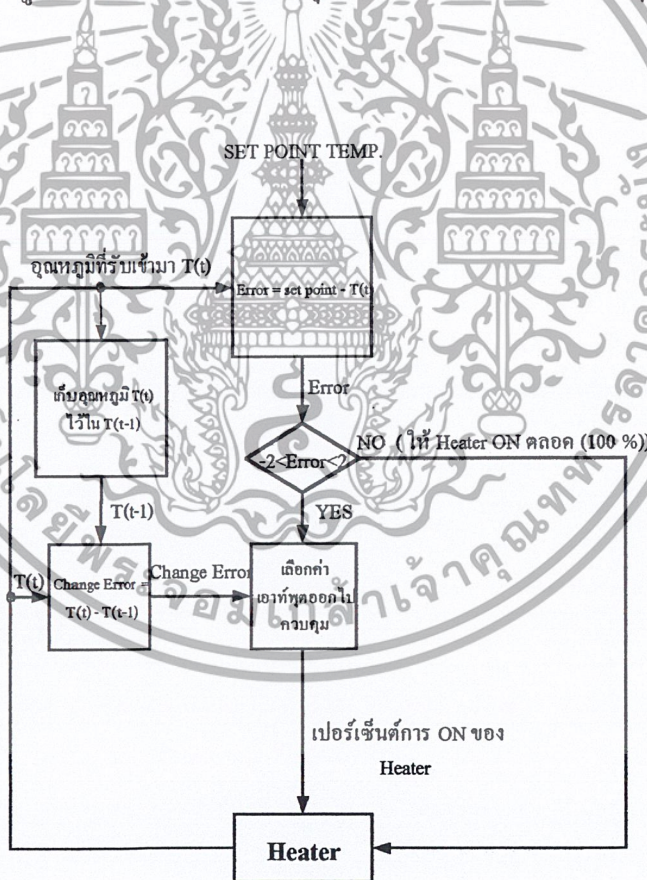
ในการนำเอาค่าเอาต์พุตไปใช้ในการควบคุมนั้นเราจะกำหนดเวลาให้ไตรแอก ทำงานเป็นช่วงๆ เช่น 0.5 วินาที , 1 วินาที สำหรับในตัวควบคุมนี้เราเลือกเวลาทำงานที่ทุกๆ 1 วินาที เราได้ทำการทดลองที่เวลาหลาย ๆ ค่าแล้ว ค่านี้สัมพันธ์กับการควบคุมมากที่สุด ซึ่งจะมีการส่งเอาต์พุตออกไปควบคุมทุกๆ 1 วินาที เราจะนำค่าเอาต์พุต (เปอร์เซ็นต์การ ON) ไปคูณกับค่าเวลา 1 วินาที จะได้เวลาการ ON ของไตรแอก ใน 1 วินาที ที่มีสัญญาณออกไปควบคุม

สำหรับการควบคุมนั้นเราจะใช้ VISUAL BASIC เขียนโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุม ซึ่งเราจะใช้ร่วมกับ Microcontroller MCS-51 ซึ่งจะสามารถควบคุมได้สองแบบ คือควบคุมได้ทั้งจากที่คอมพิวเตอร์ และจากที่ตัว Microcontroller MCS-51 เอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงการควบคุมการทำงานของระบบควบคุม



รูปที่ 4.13 แสดง Flowchart ควบคุมการทำงานของ Heater

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ลักษณะทั่วไปของไมโครโปรเซสเซอร์

4.3.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและนำมาใช้

ไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล MCS-51 อนุกรม AT89xx (AT89S8252)

- เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ซีพียูขนาด 8 บิต
- ภายในมีหน่วยความจำโปรแกรมเป็นแบบแฟลชสามารถลบและเขียนใหม่ได้พันครั้ง
- หน่วยความจำข้อมูลพื้นฐานเป็นหน่วยความจำแบบแรม ซึ่งบางเบอร์นั้นก็จะมีหน่วยความจำแบบอีพรอมเพิ่มเติม
- ขาพอร์ตเป็นแบบสองทิศทาง สามารถใช้งานเป็นได้ทั้งอินพุตและเอาต์พุต
- มีวงจรสื่อสารอนุกรมแบบฟูลดูเพล็กซ์
- ไทเมอร์ / เลาน์เตอร์ขนาด 16 บิตอย่างน้อย 2 ตัว
- สามารถรองรับแหล่งกำเนิดอินเทอร์รัปต์ได้ 6 ประเภท
- สามารถขยายหน่วยความจำภายนอกเพิ่มเติมได้สูงสุด 64 กิโลไบต์
- มีวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาอยู่ในชิป
- มีวงจรสื่อสารอนุกรมแบบ SPI สำหรับในอนุกรม AT89Sxx
- มีวอตช์ดีด็อกไทมเมอร์ในตัว สำหรับในอนุกรม AT89Sxx

จากรูปที่ 4.14 เป็นโครงสร้างพื้นฐานของอนุกรม AT89Sxx จะเห็นได้ว่ามีส่วนประกอบที่เพิ่มเติมแตกต่างจาก AT89Cxx อยู่หลายส่วน อาทิวงจรเชื่อมต่ออนุกรมแบบ SPI ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์อนุกรมนี้ใช้ในการเขียนข้อมูลลงในหน่วยความจำโปรแกรมโดยไม่ต้องถอดชิปออกไปจากระบบหรือเรียกว่า การโปรแกรมวงจร ไทเมอร์/เลาน์เตอร์ ขนาด 16 บิตที่เพิ่มเติมเข้ามาอีกหนึ่งตัวเป็นไทเมอร์ 2 และวงจรวอตช์ดีด็อกที่ใช้ในการตรวจสอบการทำงานที่เกิดความผิดพลาดของซีพียู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2 การจัดขาของไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ทุกเบอร์จะมีสถาปัตยกรรมและขาที่ใช้งานพื้นฐานที่เหมือนกันดังแสดงในรูปที่ 4.15 โดยมีรายละเอียดดังนี้

(T2) P1.0	□ 1	40	□ VCC
(T2 EX) P1.1	□ 2	39	□ P0.0 (AD0)
P1.2	□ 3	38	□ P0.1 (AD1)
P1.3	□ 4	37	□ P0.2 (AD2)
(\overline{SS}) P1.4	□ 5	36	□ P0.3 (AD3)
(MOSI) P1.5	□ 6	35	□ P0.4 (AD4)
(MISO) P1.6	□ 7	34	□ P0.5 (AD5)
(SCK) P1.7	□ 8	33	□ P0.6 (AD6)
RST	□ 9	32	□ P0.7 (AD7)
(RXD) P3.0	□ 10	31	□ \overline{EA}/VPP
(TXD) P3.1	□ 11	30	□ ALE/PROG
($\overline{INT0}$) P3.2	□ 12	29	□ PSEN
($\overline{INT1}$) P3.3	□ 13	28	□ P2.7 (A15)
(T0) P3.4	□ 14	27	□ P2.6 (A14)
(T1) P3.5	□ 15	26	□ P2.5 (A13)
(WR) P3.6	□ 16	25	□ P2.4 (A12)
(RD) P3.7	□ 17	24	□ P2.3 (A11)
XTAL2	□ 18	23	□ P2.2 (A10)
XTAL1	□ 19	22	□ P2.1 (A9)
GND	□ 20	21	□ P2.0 (A8)

รูปที่ 4.15 การจัดขามาตรฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ในอนุกรม AT89C5X

ขา Vcc ใช้สำหรับต่อไฟเลี้ยง +5V

ขา GND เป็นขากราวด์ สำหรับต่อกราวด์ลงระบบ

ขาพอร์ต 0 (P0.0-P0.7) มี 8 ขา แต่ละขาสามารถกำหนดให้เป็นได้ทั้งอินพุตและเอาต์พุต สำหรับใช้งานทั่วไป ถ้าหากต้องการกำหนดให้ขาพอร์ต 0 ขาใดขาหนึ่งเป็นอินพุตสามารถทำได้ โดยการเขียนข้อมูล “1” ไปยังแต่ละบิตของพอร์ตที่ต้องการติดต่อด้วย ส่งผลให้ขาพอร์ตมีสถานะปล่อยลอย (Float) จึงมีอินพุตอิมพีแดนซ์สูงสามารถใช้งานเป็นขาอินพุตได้ นอกจากนี้ยังมีขาใช้งานในการติดต่อกับขาแอดแควเรสไบต์ต่ำของหน่วยความจำภายนอก(A0-A7)และขาข้อมูล (D0-D7) โดยใช้กระบวนการมัลติเพล็กซ์เข้าช่วยเพื่อสลับการทำงานเป็นได้ทั้งขาติดต่อกับแอดแควเรสและขาข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขาพอร์ต 1 (P1.0-P1.7) มี 8 ขา แต่ละขาสามารถกำหนดให้เป็นได้ทั้งอินพุตและเอาต์พุต สำหรับใช้งานทั่วไป ถ้าหากต้องการกำหนดให้ขาพอร์ต 1 ขาใดขาหนึ่งเป็นอินพุตสามารถทำได้ โดยการเขียนข้อมูล “ 1 ” ไปยังแต่ละบิตของพอร์ตที่ต้องการติดต่อด้วย นอกจากนี้ในอนุกรม AT89SXX จะใช้ขา P1.0 เป็นขาอินพุตสำหรับนับค่าไทเมอร์ 2 และขา P1.1 เป็นขาอินพุต ทริกเกอร์ของไทเมอร์ 2 ขณะที่ขา P1.4-P1.7 เป็นขาสำหรับเชื่อมต่อแบบ SPI เพื่อทำการโปรแกรม ข้อมูลในระบบ

ขาพอร์ต 2 (P2.0-P2.7) มี 8 ขา แต่ละขาสามารถกำหนดให้เป็นได้ทั้งอินพุตและเอาต์พุต สำหรับใช้งานทั่วไป ถ้าหากต้องการกำหนดให้ขาพอร์ต 0 ขาใดขาหนึ่งเป็นอินพุตสามารถทำได้ โดยการเขียนข้อมูล “ 1 ” ไปยังแต่ละบิตของพอร์ตที่ต้องการติดต่อด้วย ส่งผลให้ขาพอร์ตมีสถานะปล่อยลอย (Float) จึงมีอินพุตอิมพีแดนซ์สูงสามารถใช้งานเป็นขาอินพุตได้ นอกจากนี้ ยังมีขาใช้งานในการติดต่อกับขาแอดเดรสไบต์สูงของหน่วยความจำภายนอก (A8-A15)

ขาพอร์ต3 (P3.0-P3.7) มี 8 ขา แต่ละขาสามารถกำหนดให้เป็นได้ทั้งอินพุตและเอาต์พุต สำหรับใช้งานทั่วไป ถ้าหากต้องการกำหนดให้ขาพอร์ต 0 ขาใดขาหนึ่งเป็นอินพุตสามารถทำได้ โดยการเขียนข้อมูล “ 1 ” ไปยังแต่ละบิตของพอร์ตที่ต้องการติดต่อด้วย ส่งผลให้ขาพอร์ตมีสถานะปล่อยลอย (Float) จึงมีอินพุตอิมพีแดนซ์สูงสามารถใช้งานเป็นขาอินพุตได้ นอกจากนี้ ขาพอร์ต 3 ยังเป็นขาที่มีหน้าที่การใช้งานพิเศษ ดังมีรายละเอียดขั้นต้นดังนี้

P3.0 ใช้เป็นขาอินพุตสำหรับรับข้อมูลจากการสื่อสารแบบอนุกรม หรือขา RxD

P3.1 ใช้เป็นขาอินพุตสำหรับส่งข้อมูลจากการสื่อสารแบบอนุกรม หรือขา TxD

P3.2 ใช้เป็นขาอินพุตรับสัญญาณอินเทอร์รัปต์จากภายนอกช่อง 0 หรือขา INTO

P3.3 ใช้เป็นขาอินพุตรับสัญญาณอินเทอร์รัปต์จากภายนอกช่อง 1 หรือขา INT1

P3.4 ใช้เป็นขาอินพุตสำหรับรับสัญญาณไทเมอร์จากภายนอกช่อง 0 หรือขา T0

P3.5 ใช้เป็นขาอินพุตสำหรับรับสัญญาณอินเทอร์รัปต์จากภายนอกช่อง 1 หรือขา T1

P3.6 ใช้เป็นขาสัญญาณ WR ในกรณีที่เชื่อมต่อกับหน่วยความจำภายนอก

P3.7 ใช้เป็นขาสัญญาณ RD ในกรณีที่เชื่อมต่อกับหน่วยความจำภายนอก

ขารีเซต (Reset) ใช้ในการรีเซตการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยในการป้อนสัญญาณเพื่อรีเซตสถานะที่ขานี้ต้องอยู่ในระดับรีเซตอย่างน้อย 2 แมกซ์ซีไนเซคิล โดยที่วงจรถ้าเนคต์สัญญาณนาฬิกายังคงทำงานต่อเนื่องไปอย่างปกติ

ขา ALE/Prog (Address Latch Enable / Program pulse Input) เป็นขาที่ใช้ในการควบคุมการแลตช์ของขาพอร์ต 0 เมื่อมีการใช้งานหน่วยความจำภายนอก นอกจากนี้ขานี้ยังใช้เป็นขาสำหรับพัลส์ของการโปรแกรมสำหรับโปรแกรมข้อมูลลงในไมโครคอนโทรลเลอร์ ในรุ่นที่มีหน่วยความจำแบบอีพรอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขา PSEN (Program Store Enable) ขานี้ใช้ในการส่งสัญญาณเพื่อร้องขอติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ต้องการอ่านข้อมูลจากหน่วยความจำโปรแกรมภายนอกตัวไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณออกมาที่ ขานี้ 2 ครั้ง ในแต่ละแมชชีนไซเคิล แต่ถ้าหากติดต่อกับหน่วยความจำข้อมูลภายนอก ขานี้จะไม่มีส่งสัญญาณใด ๆ ออกมา

ขา EA/Vpp (External Access enable/Programming voltage input) ใช้สำหรับเลือกการติดต่อกับหน่วยความจำภายนอกหรือภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ ถ้าหากขานี้เป็น “0” เป็นการเลือกไมโครคอนโทรลเลอร์ติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก แต่หากขานี้เป็น “1” เป็นการเลือกให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ติดต่อกับหน่วยความจำภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ นอกจากนี้ที่ขานี้ยังเป็นขาอินพุตสำหรับรับแรงดันไฟสูงสำหรับการโปรแกรมหน่วยความจำภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 แบบแฟลชต้องการแรงดันสำหรับการโปรแกรม +12 V

ขา XTAL1 และ XTAL2 เป็นขาสำหรับต่อคริสตัลเพื่อสร้างสัญญาณนาฬิกาในการกำหนดจังหวะการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

4.3.3 การใช้งานเป็นพอร์ตอินพุต

เนื่องจากพอร์ตทั้งหมดของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 แบบแฟลชสามารถเป็นได้ทั้งอินพุตและเอาต์พุต ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งต้องทำความเข้าใจถึงการกำหนดลักษณะทำงานให้แก่พอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์แบบแฟลช

ในการกำหนดให้เป็นพอร์ตอินพุต ต้องเริ่มต้น ต้องเริ่มต้นด้วยการเขียนข้อมูล “1” มาที่แต่ละบิตของพอร์ตที่ต้องการใช้งานเป็นอินพุต เพื่อหยุดการทำงานของเฟตที่ใช้ในการขับสัญญาณเอาต์พุตของบิตนั้น ๆ ทำให้ขาสัญญาณของพอร์ตเชื่อมต่อกับวงจรพูลอัปภายในโดยตรง ส่งผลให้ขาพอร์ตนั้นมีลอจิกเป็น “1” สามารถรับสัญญาณลอจิก “0” จากอุปกรณ์ภายนอกได้ง่าย สัญญาณข้อมูลจากอุปกรณ์ภายนอกจะถูกส่งเข้ามาแล้วเก็บไว้ในวงจรบัฟเฟอร์ภายในพอร์ต แล้วรอให้ซีพียูมาอ่านค่าเข้าไป เมื่อเป็นเช่นนี้ อุปกรณ์ภายนอกที่เชื่อมต่อกับพอร์ตอินพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 แบบแฟลชควรกำหนดให้ทำงานในสถานะลอจิก “0” จะดีและสะดวก ที่สุด (ซึ่งในปัจจุบันอุปกรณ์อินพุตที่เชื่อมต่อเข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์เกือบทั้งหมดทำงานที่ลอจิก “0” แล้ว)

4.3.4 การใช้งานเป็นพอร์ตเอาต์พุต

โดยปกติแล้ว ขาพอร์ตจะกำหนดให้มีลักษณะเป็นเอาต์พุตอยู่แล้ว ดังนั้นจึงสามารถส่งข้อมูลออกไปได้อย่างง่าย กล่าวคือ เมื่อต้องการส่งข้อมูล “0” ออกไปทางเอาต์พุตก็ให้เขียนข้อมูล

“0” ไปยังวงจรแลตช์ซึ่งจะส่งต่อไปขับเฟตทำให้เฟตทำงานที่ขาพอร์ตที่กำหนดให้ทำงานก็จะทำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เกิดลอจิก “0” ในทางตรงกันข้ามหากต้องการส่งข้อมูล “1” ออกไป ก็ให้เขียนข้อมูล “1” ไปยัง วงจรแลตซ์ วงจรจับจะหยุดทำงาน ทำให้ที่ขาพอร์ตเชื่อมต่อกับวงจรอับภายในเกิดเป็นลอจิก “1” ที่ขาพอร์ตนั้น ซึ่งจะคล้ายกับการกำหนดให้เป็นขาอินพุตมาก เพียงแต่แตกต่างกันที่กระบวนการ ในการเคลื่อนย้ายข้อมูล โดยถ้าเป็นอินพุตจะมีสัญญาณมาอ่านข้อมูลที่บัฟเฟอร์ แต่ถ้าเป็น เอาต์พุตจะไม่มี การอ่านข้อมูลที่บัฟเฟอร์แต่อย่างใด เว้นแต่กรณีที่ต้องการตรวจสอบข้อมูลที่ ส่งออกมาทางเอาต์พุต

ตารางที่ 4.2 แสดงหน้าที่พิเศษของพอร์ต 1 ในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51

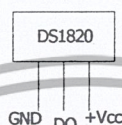
ขา	เบอร์ของไมโครคอนโทรลเลอร์	หน้าที่พิเศษ
P1.0	AT89C52/AT89Sxx	ขา T2 เป็นขาอินพุตนับค่าไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 2 และเป็นขา
P1.1	AT89C52/AT89Sxx	ควบคุมทิศทางสัญญาณ
P1.4	AT89Sxx	ขา SS (Slave Select) เป็นขาเลือกการติดต่อในกรณีที่ไม่โครคอนโทรลเลอร์เป็นอุปกรณ์สเลฟ ในระบบการติดต่อแบบ SPI
P1.5	AT89Sxx	ขา MOSI (Master data output, Slave data input) ใช้ในการติดต่อกับพอร์ต SPI
P1.6	AT89Sxx	ขา MISO (Master data output, Slave data input) ใช้ในการติดต่อกับพอร์ต SPI
P1.7	AT89Sxx	ขา SCK (Master clock output) เป็นขาสัญญาณนาฬิกาของการติดต่อกับพอร์ต SPI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ส่วนประกอบที่ใช้ในการควบคุม

ส่วนประกอบอื่นๆที่ใช้ในการควบคุมจะประกอบไปด้วยดังนี้

4.4.1 วงจรตรวจวัดอุณหภูมิ ในการตรวจวัดอุณหภูมิเราจะใช้ ไอซีตรวจวัดอุณหภูมิ DS1820 เป็นไอซีตรวจวัดอุณหภูมิที่ใช้ในการติดต่อแบบระบบบัส 1 สาย มีขาต่อใช้งานเพียง 3 ขา คือ DQ ซึ่งเป็นขาเชื่อมต่อเข้ากับระบบบัส, +Vcc ขาต่อไฟเลี้ยงภายนอกและขากราวนด์ GND ดังแสดงในรูปที่ 4.16

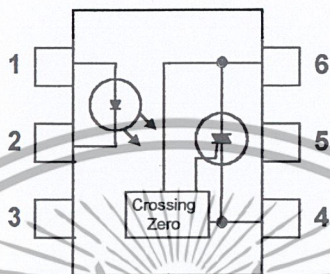


รูปที่ 4.16 ไอซีเบอร์ DS1820

ไอซีเบอร์ DS1820 จะให้ข้อมูลผลลัพธ์เป็นตัวเลข DIGITAL สามารถทำให้ข้อมูลละเอียดได้ถึง 16 บิต เมื่อนำมาแปลงข้อมูลเลขฐานสิบจึงสามารถแสดงความละเอียดของอุณหภูมิได้ถึง 0.5 องศาเซลเซียส และ 0.9 องศาฟาเรนไฮต์ โดยมีย่านวัดอุณหภูมิ -55 ถึง 125 องศาเซลเซียสหรือ -67 ถึง 257 องศาฟาเรนไฮต์

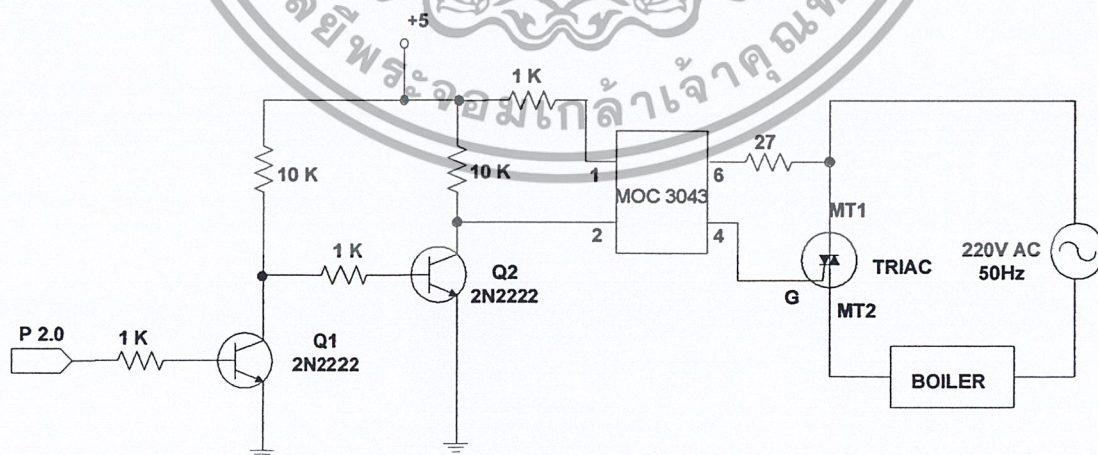
วงจรดังรูปที่ 4.17 เป็นวงจร ที่มีทั้งวงจรตรวจวัดอุณหภูมิ และวงจรเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ ซึ่งอุณหภูมิจะถูกวัดจากไอซีเบอร์ DS 1820 แล้วทำการส่งผ่านค่าอุณหภูมิมายังคอมพิวเตอร์โดยผ่านตัวของไอซีเบอร์ MAX 232 แล้วคอมพิวเตอร์จะนำค่าอุณหภูมิที่วัดได้ไปทำการคำนวณเพื่อเข้าสู่กระบวนการอนุมานค่าเอาต์พุตของพีชชี หลังจากนั้นก็จะส่งสัญญาณออกมาควบคุมการ ON/OFF ของไตรแอกเพื่อควบคุมการทำงานของ Heater ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว

4.4.2 วงจรควบคุมการ ON/OFF ของไทรแอก เราจะใช้ Microcontroller ทำงานร่วมกับ Optoisolate Triac MOC 3043 ต่อเข้ากับ Port 2.0 การใช้ Optoisolate นี้ มีจุดประสงค์เพื่อที่แยกกราวด์ โดยสามารถที่จะป้องกันความเสียหายและสัญญาณรบกวนอันเกิดจากเครื่องทำน้ำอุ่น ซึ่งจะทำให้การควบคุมผิดพลาดได้ Optoisolate MOC 3043 ภายในไอซีนี้จะมีวงจร Zero Crossing ซึ่งทำหน้าที่ตรวจจับช่วง Crossing Zero ของไฟฟ้ากระแสสลับที่เป็นแหล่งจ่ายของเครื่องทำน้ำอุ่น ดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 แสดง Block Diagram ภายในของ MOC 3043

สัญญาณที่ได้จาก Zero Crossing Circuit นี้จะนำไปเป็นสัญญาณ Trig ให้แก่ Triac ภายใน MOC 3043 สัญญาณทริกที่ได้นี้ ได้มาจากการทำงานร่วมกับสัญญาณซึ่งมาจากการทำงานร่วมกับสัญญาณซึ่งออกมาจากพอร์ต 2.0 ของ Microcontroller MCS-51 โดยที่ถ้าเราต้องการ Triac ทำงานเราจะส่งระดับแรงดัน 0 Volt ออกไป และถ้าต้องการให้ Heater หยุดการทำงานเราจะส่งระดับของแรงดัน 5 Volt ออกไปแทน ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 แสดงวงจรส่วนควบคุมการทำงานของ Heater

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

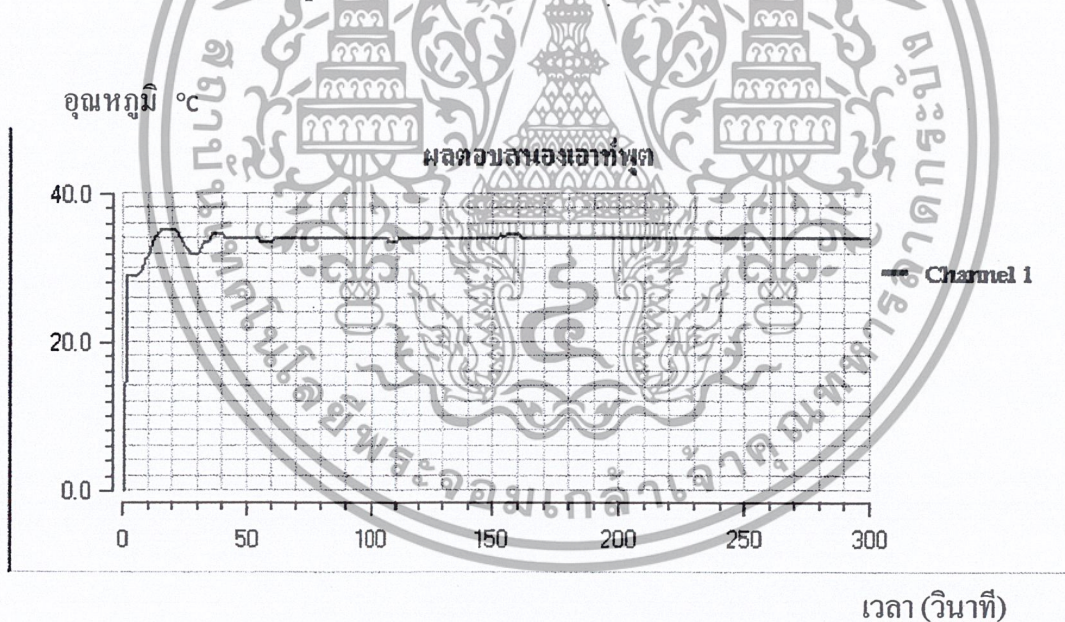
ลักษณะการควบคุมการ ON/OFF ของ Heater จะใช้เทคนิค Mark and Space คือ เป็นการควบคุม โดยเป็นสัดส่วนของเวลา (Time-Proportional control) ซึ่งจะให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าโดยอาศัยวิธี Phase Angle Firing คือ Mark and Space จะสามารถลด Noise ซึ่งเกิดจากการ Trig ของวิธี Phase Angle Firing ที่ Peak ของ Line Voltage ได้อย่างมาก ซึ่งจะทำให้การทำงานของระบบไม่ถูกรบกวน และข้อสำคัญคือช่วยยืดอายุการทำงานของ Heater และตัว Triac เองได้อีกด้วย

4.5 ผลการทดลอง

ในการทดลองนั้นเราจะตั้งค่าอุณหภูมิ Set Point ไว้ที่ 38 °c แล้วทำการเปิดเครื่องให้เครื่องทำงาน หลังจากนั้นทำการปรับความเร็วของน้ำให้อุณหภูมิที่วัดเข้ามามีอุณหภูมิเท่ากับค่า Set Point (38 °c) แล้วเริ่มทำการทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยที่ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านเครื่องทำน้ำอุ่นนั้นไม่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจากการทดลองเราจะได้ผลการทดลอง ดังนี้

จากการทดลอง (ช่วงค่า Error ที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ ± 0.5 องศาเซลเซียส)

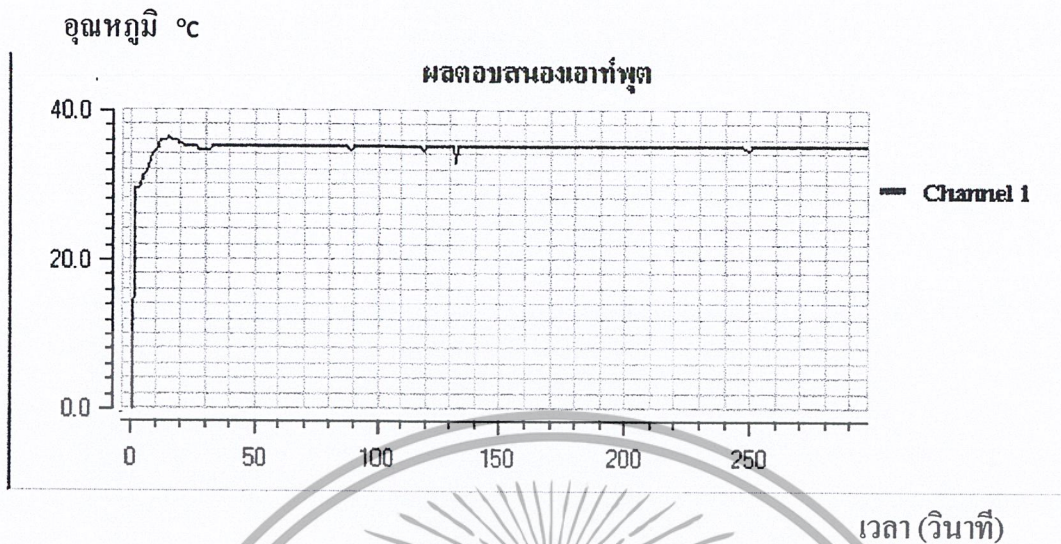
- Set Point Temperature 34 °c



รูปที่ 4.20 แสดงผลตอบสนองของเอาต์พุตที่ 34 °c

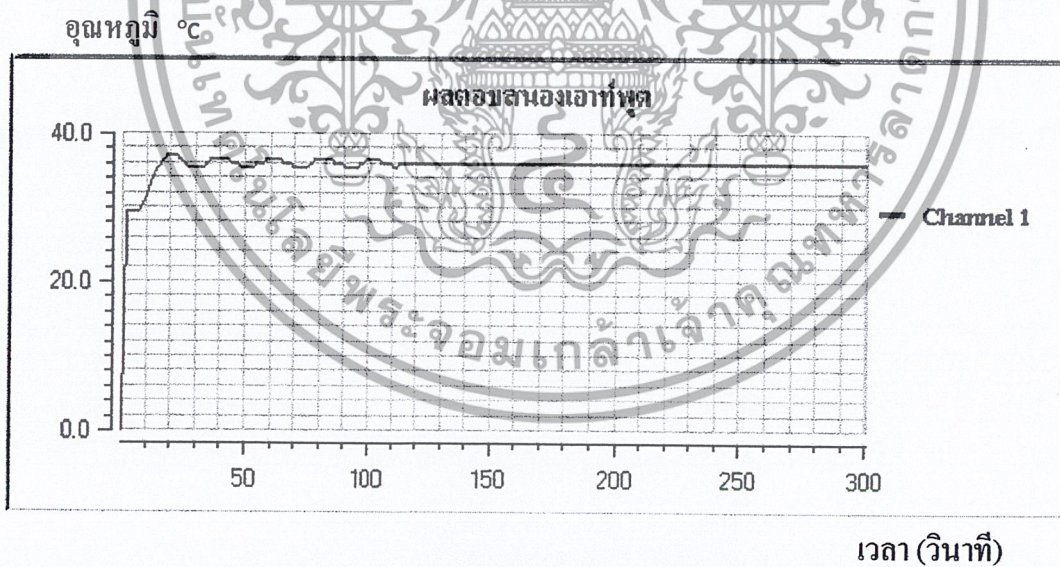
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Set Point Temperature 35 °C



รูปที่ 4.21 แสดงผลตอบสนองของเอาต์พุตที่ 35 °C

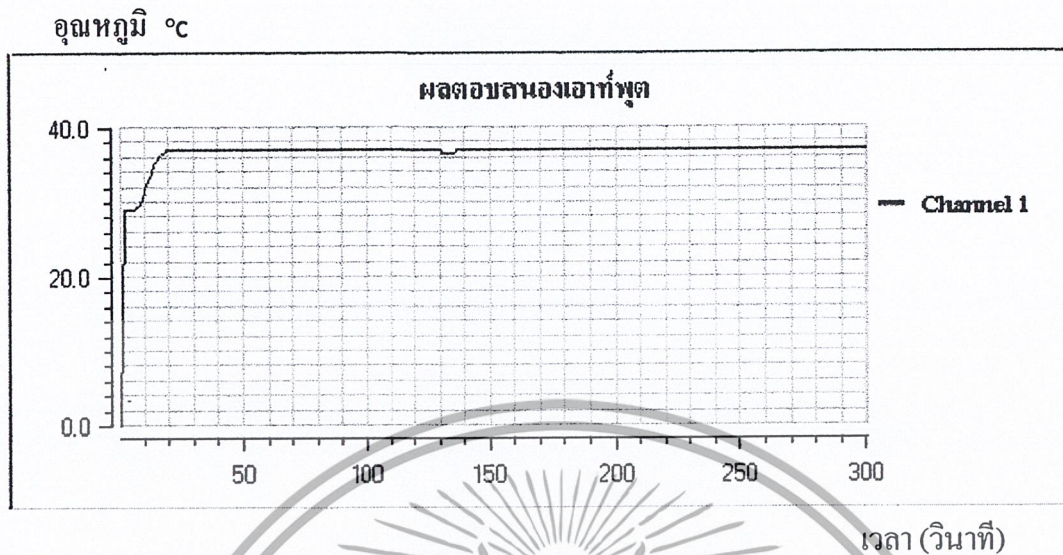
- Set Point Temperature 36 °C



รูปที่ 4.22 แสดงผลตอบสนองของเอาต์พุตที่ 36 °C

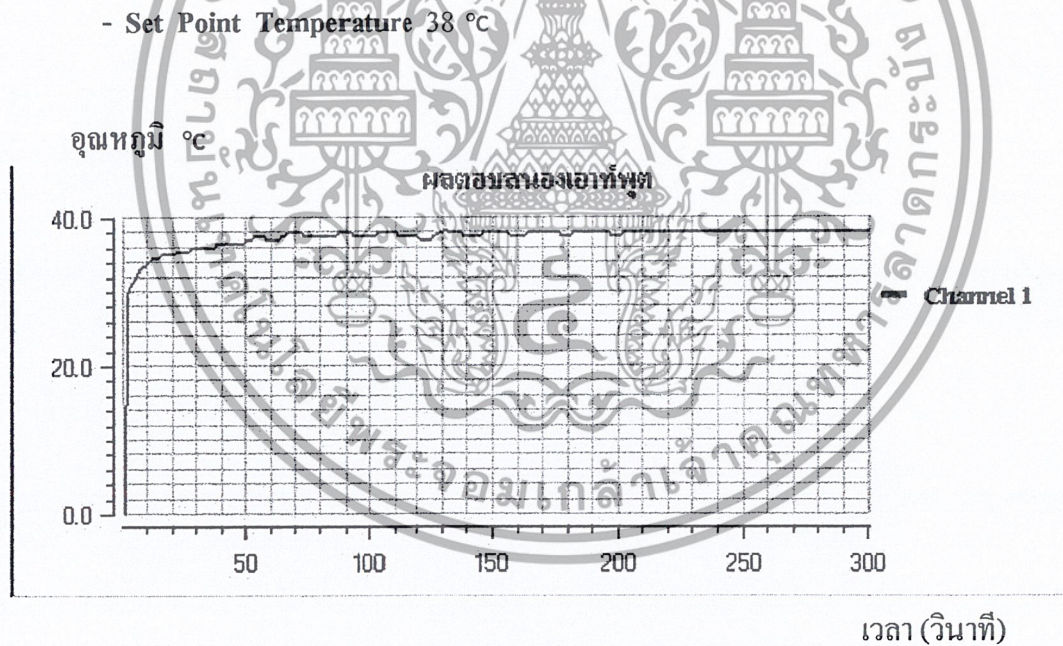
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Set Point Temperature 37 °C



รูปที่ 4.23 แสดงผลตอบสนองเอาต์พุตที่ 37 °C

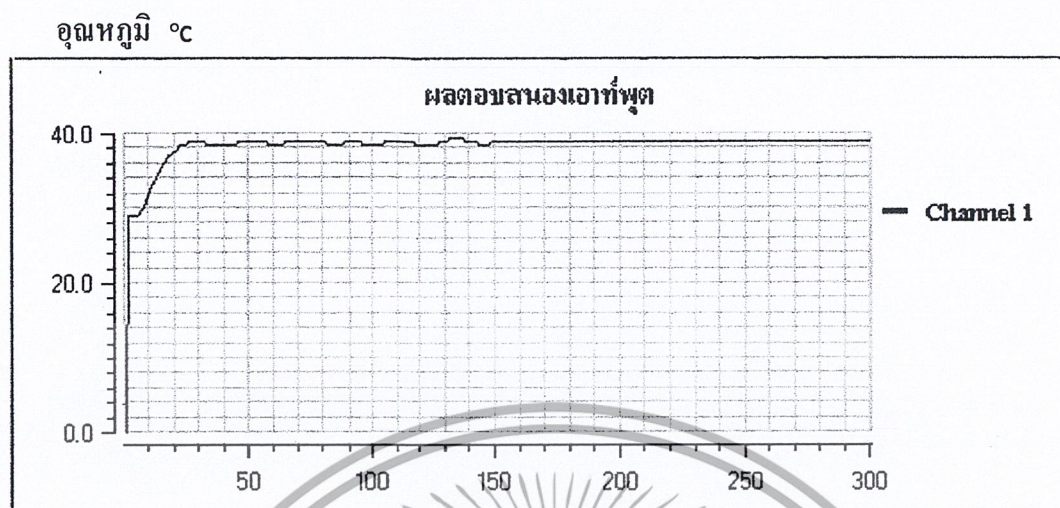
- Set Point Temperature 38 °C



รูปที่ 4.24 แสดงผลตอบสนองเอาต์พุตที่ 38 °C

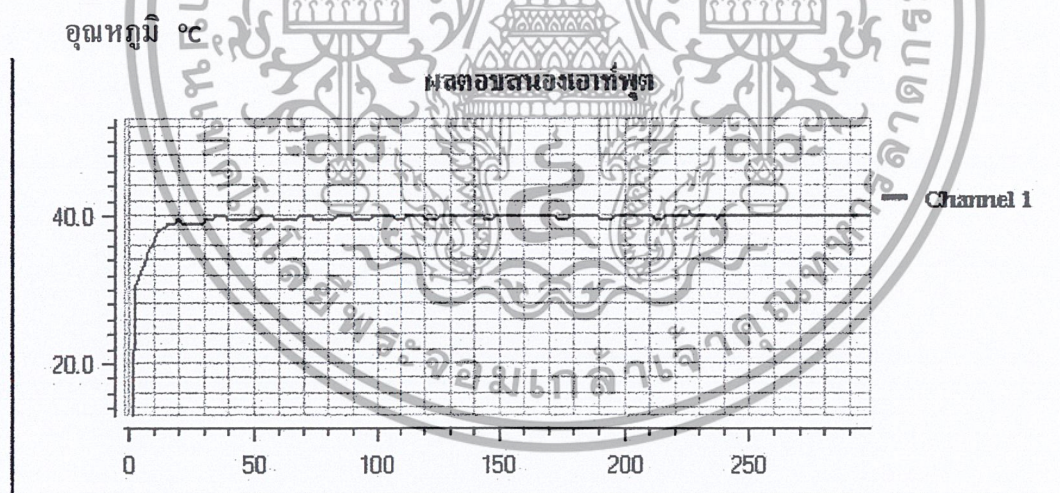
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Set Point Temperature 39 °C



รูปที่ 4.25 แสดงผลตอบสนองเอาต์พุตที่ 39 °C

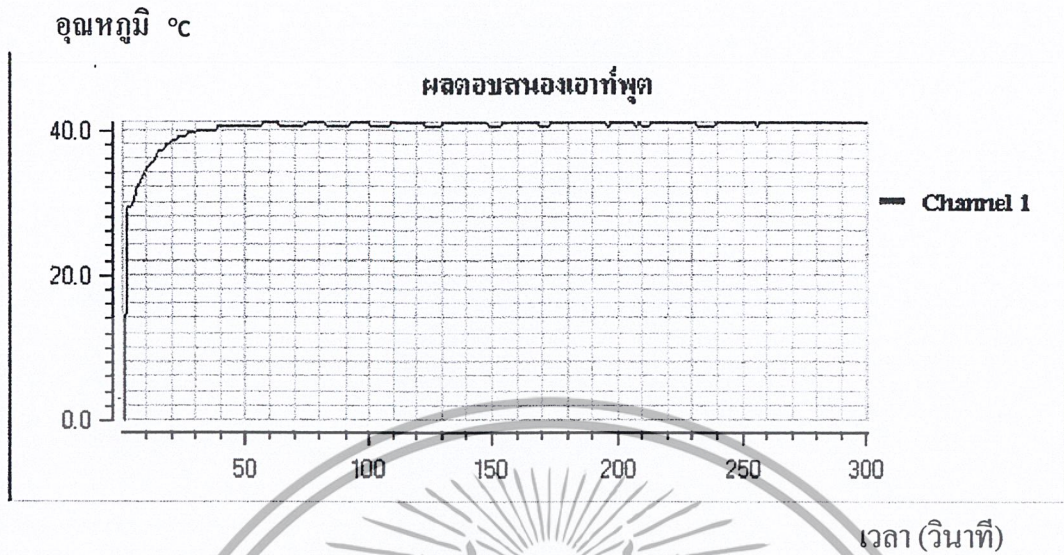
- Set Point Temperature 40 °C



รูปที่ 4.26 แสดงผลตอบสนองเอาต์พุตที่ 40 °C

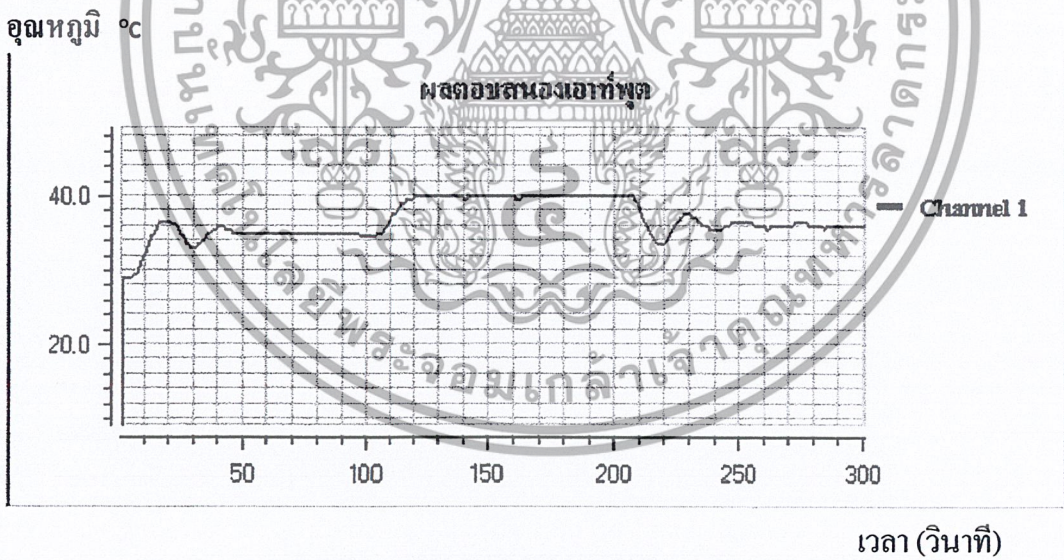
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Set Point Temperature 41 °C



รูปที่ 4.27 แสดงผลตอบสนองเอาต์พุตที่ 41 °C

- Set Point Temperature 35 - 40 - 36 °C



รูปที่ 4.28 แสดงผลตอบสนองเอาต์พุตที่ 35 - 40 - 36 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 บทสรุป

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบโดยใช้ Lyapunov นั้นเราจะวิเคราะห์ที่ได้จากสมการ Lyapunov ซึ่งเมื่อทำการ Differential สมการของ Lyapunov ซึ่งถ้ามีผลตอบสนองออกมาเป็น Negative definite ก็แสดงว่าระบบนั้นเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วย Lyapunov แล้วทำให้ระบบนั้นมีเสถียรภาพ

ในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีนั้น เริ่มจากการหาเสถียรภาพของระบบที่จะควบคุม แล้วนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพ มาออกแบบกฎของฟัซซีที่เหมาะสมกับเงื่อนไขเสถียรภาพของลิวาปูนอฟ ซึ่งทำได้โดยการปรับตัวแปรสเตทของกฎ

จากการวิเคราะห์ระบบของเครื่องทำน้ำอุ่นแล้วจะเห็นว่าระบบจะมีเสถียรภาพคือ เมื่อเราหาค่า Matrix P จะเห็นว่าค่า P มีค่าเป็นบวก ซึ่งจะทำให้ Differential ของสมการ Lyapunov มีผลลัพธ์ออกมาเป็น Negative definite ซึ่งก็สรุปได้ว่าระบบจะมีเสถียรภาพแบบ Asymptotic ณ Equilibrium ที่จุด Origin

จากการทดลองจะพบว่าผลตอบสนองเอาต์พุต มีการแกว่งในช่วงแคบๆ ซึ่งก็อยู่ในช่วงของค่า error ที่เรายอมรับได้ ที่ช่วง ± 0.5 องศา จากค่า Set point ทำให้ระบบมีเสถียรภาพเชิงอะซิมโทติกในขอบเขตที่กว้าง (asymptotically stable in-the-large)

ในการควบคุมอุณหภูมิของน้ำให้ได้ดีที่สุดนั้น ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอีกหลายอย่าง เช่น แรงดันของน้ำ และอุณหภูมิของน้ำที่เข้ามา ปัญหาที่พบในระหว่างการศึกษาทำการทดลองอยู่นั้นคืออุณหภูมิของน้ำจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำที่เข้ามา ทำให้การควบคุมอุณหภูมินั้นยากขึ้น ถ้ามีอัตราการไหลที่สูงจะทำให้อุณหภูมิเข้าใกล้ค่าเป้าหมายช้า ใช้เวลานาน นอกจากนี้ยังพบว่าตัว Heater มีสมรรถนะไม่สูงพอเป็นสาเหตุให้น้ำมีอุณหภูมิเข้าใกล้ Set Point ที่อุณหภูมิสูงๆ ช้า

5.2 แนวทางพัฒนา

การพัฒนาขั้นต่อไปจะเป็นการสร้าง Application ของฟัซซีคอนโทรลเลอร์ (Fuzzy Controller) ที่มีลักษณะเป็น Universal Controller โดยการใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ หรือ ไมโครโปรเซสเซอร์มาเป็นโปรแกรมให้เป็น Fuzzy Controller สำหรับควบคุมกระบวนการจริง

บรรณานุกรม

- [1] กมล เกี้ยวศรีกุล , ถวิดา มณีวรรณ , “ระบบควบคุมฟัซซี่ ”, ปริญญาพิพนธ์ , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2536
- [2] วิพันธ์ ปรีชาพานิช , “การวิเคราะห์ระบบแนวใหม่ ”, ตำราชุดวิศวกรรมศาสตร์ , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [3] สาธิต อินทจักร์ , “ การหาขอบเขตภาพโดยใช้แบบจำลองฟัซซี่และนิวรอลเน็ตเวิร์ค ”, วิทยานิพนธ์ , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2538.
- [4] Hoa O.Wang , K. Tanaka and F.Griffin , “ An Approach to Fuzzy Control of Nonlinear System : Stability and Design Issues ” , IEEE Trans. Fuzzy System Vol.4 No.1, pp.14-23 ,1996.
- [5] Chin-Leng and C.S.George Lee , “ Neural Fuzzy System ” , Prentice-Hall A Simon & Schuster Company Upper Sadle River, NJ , 1996.
- [6] G.F. Franklin , J.D. Powell and A.Emami-Naeine , “ Feedback Control of Dynamic System Third Edition ”, Addison-Wesley Publishing Compant , 1994.
- [7] N.R.Pal , and J.C.Bezdek , “Measuring Fuzzy Uncertainty”, IEEE Trans. , Fuzzy Syst., Vol.2 , PP.107- 118 , 1994.
- [8] B.R.Ebanks, “On Measures of Fuzziness and Their Representation”, J.Math.Anal. and Appl.,Vol.94 , PP.24-37 , 1983.
- [9] L.A.Zadeh, “Probability Measures of Fuzzy Events”, J.Math.Analysis and Application, Vol.23 , PP.421-427,1968.
- [10] L.A.Zadeh , “Fuzzy Sets”, Information and Control , Vol.8,PP.338-351 , 1965.
- [11] E.H.Mamdani , and S.Assilian , “An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller”,Fuzzy Reasoning and Its Applications, Edited by E.H. Mamdani , B.R.Gaines , Academic Press Inc.London , PP.311-323 , 1981.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

Source Code Program

Option Explicit

```
Dim Error_Compare As Integer, Change_Error_Compare As Integer, outputs As Variant
```

```
Dim Temp_Error As Single, Change_of_Error As Single, current_temp(10000) As Single
```

```
Dim hour, minute, second, input1 As Variant
```

```
Dim count1 As Integer, outputs1 As Variant
```

```
Dim outputs2 As Single
```

```
Dim hours, minutes, seconds As Variant
```

```
Dim set_point As Variant
```

```
Private Sub change_error_Click()
```

```
change_error11.Show
```

```
End Sub
```

```
Private Sub change_error14_Click()
```

```
change_error11.Show
```

```
End Sub
```

```
Private Sub cmdStart_Click()
```

```
cmdStop.Default = True
```

```
cmdStart.Default = False
```

```
cmdStop.Visible = True
```

```
cmdStart.Visible = False
```

```
Timer1.Enabled = True
```

```
Timer2.Enabled = True
```

```
current_temp11.Timer1.Enabled = True
```

```
error_temp11.Timer1.Enabled = True
```

```
output11.Timer1.Enabled = True
```

```
change_error11.Timer1.Enabled = True
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

hour = 0
minute = 0
second = 0
form2.Timer1.Enabled = True
End Sub

```

```
Private Sub cmdStop_Click()
```

```

cmdStart.Default = True
form2.Timer1.Enabled = False
TxtCT.Text = 0

```

```

cmdStop.Visible = False
cmdStart.Visible = True
iSevenSegmentClockX1.hours = 0
iSevenSegmentClockX1.minutes = 0
iSevenSegmentClockX1.seconds = 0
TxtSPT.Text = ""
Label3.Caption = ""
Text3.Text = ""
Text6.Text = ""
Text5.Text = ""
Text2.Text = ""
count1 = 0

```

```
On Local Error Resume Next
```

```
If MSComm1.PortOpen = True Then
```

```
MSComm1.PortOpen = False
```

```
Else
```

```
MSComm1.PortOpen = False
```

```
End If
```

```
Timer1.Enabled = False
```

```
Timer2.Enabled = False
```

```
hour = 0
```

```
minute = 0
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
second = 0
```

```
End Sub
```

```
Private Sub error_temp_Click()
```

```
error_temp11.Show
```

```
End Sub
```

```
Private Sub current_temp14_Click()
```

```
current_temp11.Show
```

```
End Sub
```

```
Private Sub error_temp14_Click()
```

```
error_temp11.Show
```

```
End Sub
```

```
Private Sub exit_Click()
```

```
Unload Me
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Form_Load()
```

```
cmdStart.Default = True
```

```
End Sub
```

```
Private Sub graph_Click()
```

```
form2.Show
```

```
End Sub
```

```
Private Sub outputs125_Click()
```

```
output11.Show
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Timer1_Timer()
```

```
On Local Error Resume Next
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MSComm1.CommPort = 1
MSComm1.Settings = "9600,N,8,1"
MSComm1.InputLen = 0
If Not MSComm1.PortOpen Then
    MSComm1.PortOpen = True
End If
seconds = seconds + 1
If seconds = 60 Then
    minutes = minutes + 1
    seconds = 0
    If minutes = 60 Then
        hours = hours + 1
        minutes = 0
    Else
    End If
Else
End If
iSevenSegmentClockX2.hours = hours
iSevenSegmentClockX2.minutes = minutes
iSevenSegmentClockX2.seconds = seconds
input1 = MSComm1.Input
TxtCT.Text = Asc(input1) / 2
count1 = count1 + 1
current_temp(count1) = Asc(input1) / 2
iThermometerX1.Position = Asc(input1) / 2
Text3.Text = current_temp(count1)
set_point = Val(TxtSPT.Text)
If set_point = 34 Then
    Temp_Error = Val(TxtSPT.Text) - current_temp(count1) - 1.5
ElseIf set_point = 35 Then
    Temp_Error = Val(TxtSPT.Text) - current_temp(count1) - 1
ElseIf set_point = 36 Then

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Temp_Error = Val(TxtSPT.Text) - current_temp(count1) - 0.5
ElseIf set_point = 37 Then
    Temp_Error = Val(TxtSPT.Text) - current_temp(count1)
ElseIf set_point = 38 Then
    Temp_Error = Val(TxtSPT.Text) - current_temp(count1)
ElseIf set_point = 39 Then
    Temp_Error = Val(TxtSPT.Text) - current_temp(count1) + 1
ElseIf set_point = 40 Then
    Temp_Error = Val(TxtSPT.Text) - current_temp(count1) + 1.5
ElseIf set_point = 41 Then
    Temp_Error = Val(TxtSPT.Text) - current_temp(count1) + 2
ElseIf set_point = 42 Then
    Temp_Error = Val(TxtSPT.Text) - current_temp(count1) + 2.5
Else
    Temp_Error = Val(TxtSPT.Text) - current_temp(count1)
End If
Text6.Text = Temp_Error
If Temp_Error > 2.2 Then
    Timer5.Enabled = True
    Timer4.Enabled = False
    Timer3.Enabled = False
ElseIf Temp_Error < -2.2 Then
    Timer5.Enabled = False
    Timer4.Enabled = True
    Timer3.Enabled = False
Else
    Call Fuzzy_Input_Temp_Error(Temp_Error)
    Change_of_Error = current_temp(count1) - current_temp(count1 - 1)
    Text5.Text = Change_of_Error
    Call Fuzzy_input_Change_of_Error(Change_of_Error)
    Call fuzzy_output(Change_Error_Compare, Error_Compare)
    outputs1 = outputs

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

outputs2 = outputs * 100
Timer3.Interval = 1000 * outputs1
Timer4.Enabled = False
Timer5.Enabled = False
Timer3.Enabled = True
Text2.Text = outputs2
End If
End Sub
Sub Fuzzy_Input_Temp_Error(TE As Single)

```

```

Select Case TE

```

```

Case 1.8 To 2.2

```

```

    Error_Compare = 4

```

```

Case 1.3 To 1.7

```

```

    Error_Compare = 3

```

```

Case 0.8 To 1.2

```

```

    Error_Compare = 2

```

```

Case 0.3 To 0.7

```

```

    Error_Compare = 1

```

```

Case -0.2 To 0.2

```

```

    Error_Compare = 0

```

```

Case -0.7 To -0.3

```

```

    Error_Compare = -1

```

```

Case -1.2 To -0.8

```

```

    Error_Compare = -2

```

```

Case -1.7 To -1.3

```

```

    Error_Compare = -3

```

```

Case -2.2 To -1.8

```

```

    Error_Compare = -4

```

```

End Select

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

End Sub

Sub Fuzzy_input_Change_of_Error(CE As Single)

Select Case CE

Case 0.8 To 10000

Change_Error_Compare = 2

Case 0.3 To 0.7

Change_Error_Compare = 1

Case -0.2 To 0.2

Change_Error_Compare = 0

Case -0.7 To -0.3

Change_Error_Compare = -1

Case -10000 To -0.8

Change_Error_Compare = -2

End Select

End Sub

Sub fuzzy_output(n As Variant, m As Variant)

Dim Output_table(-2 To 2, -4 To 4) As Variant

Output_table(-2, -4) = 0.823

Output_table(-2, -3) = 0.65

Output_table(-2, -2) = 0.475

Output_table(-2, -1) = 0.573

Output_table(-2, 0) = 0.65

Output_table(-2, 1) = 0.727

Output_table(-2, 2) = 0.823

Output_table(-2, 3) = 0.862

Output_table(-2, 4) = 0.956

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Output_table}(-1, -4) = 0.673$$

$$\text{Output_table}(-1, -3) = 0.602$$

$$\text{Output_table}(-1, -2) = 0.475$$

$$\text{Output_table}(-1, -1) = 0.573$$

$$\text{Output_table}(-1, 0) = 0.65$$

$$\text{Output_table}(-1, 1) = 0.727$$

$$\text{Output_table}(-1, 2) = 0.823$$

$$\text{Output_table}(-1, 3) = 0.862$$

$$\text{Output_table}(-1, 4) = 0.952$$

$$\text{Output_table}(0, -4) = 0.344$$

$$\text{Output_table}(0, -3) = 0.438$$

$$\text{Output_table}(0, -2) = 0.475$$

$$\text{Output_table}(0, -1) = 0.573$$

$$\text{Output_table}(0, 0) = 0.75$$

$$\text{Output_table}(0, 1) = 0.727$$

$$\text{Output_table}(0, 2) = 0.823$$

$$\text{Output_table}(0, 3) = 0.862$$

$$\text{Output_table}(0, 4) = 0.956$$

$$\text{Output_table}(1, -4) = 0.348$$

$$\text{Output_table}(1, -3) = 0.438$$

$$\text{Output_table}(1, -2) = 0.433$$

$$\text{Output_table}(1, -1) = 0.532$$

$$\text{Output_table}(1, 0) = 0.558$$

$$\text{Output_table}(1, 1) = 0.637$$

$$\text{Output_table}(1, 2) = 0.823$$

$$\text{Output_table}(1, 3) = 0.862$$

$$\text{Output_table}(1, 4) = 0.952$$

$$\text{Output_table}(2, -4) = 0.344$$

$$\text{Output_table}(2, -3) = 0.355$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Output_table(2, -2) = 0.347

Output_table(2, -1) = 0.447

Output_table(2, 0) = 0.477

Output_table(2, 1) = 0.637

Output_table(2, 2) = 0.823

Output_table(2, 3) = 0.862

Output_table(2, 4) = 0.956

outputs = Output_table(n, m)

End Sub

Private Sub Timer3_Timer()

On Local Error Resume Next

If Timer3.Interval < 1000 * outputs1 Then

Timer3.Interval = 1000 * outputs1

MSComm1.Output = Chr(80)

Else

Timer3.Interval = 1000 * (1 - outputs1)

MSComm1.Output = Chr(81)

End If

End Sub

Private Sub Timer4_Timer()

On Local Error Resume Next

MSComm1.Output = Chr(81)

End Sub

Private Sub Timer5_Timer()

On Local Error Resume Next

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
MSComm1.Output = Chr(80)
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Timer2_Timer()
```

```
    second = second + 1
```

```
    If second = 60 Then
```

```
        minute = minute + 1
```

```
        second = 0
```

```
        If minute = 60 Then
```

```
            hour = hour + 1
```

```
            minute = 0
```

```
        Else
```

```
        End If
```

```
    Else
```

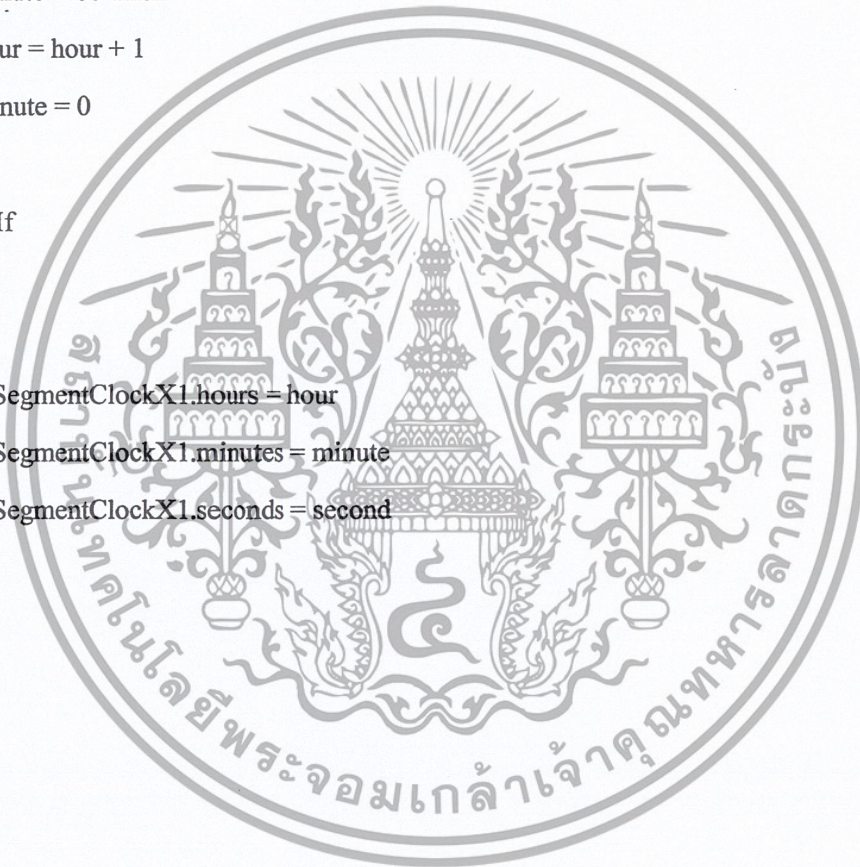
```
    End If
```

```
    iSevenSegmentClockX1.hours = hour
```

```
    iSevenSegmentClockX1.minutes = minute
```

```
    iSevenSegmentClockX1.seconds = second
```

```
End Sub
```



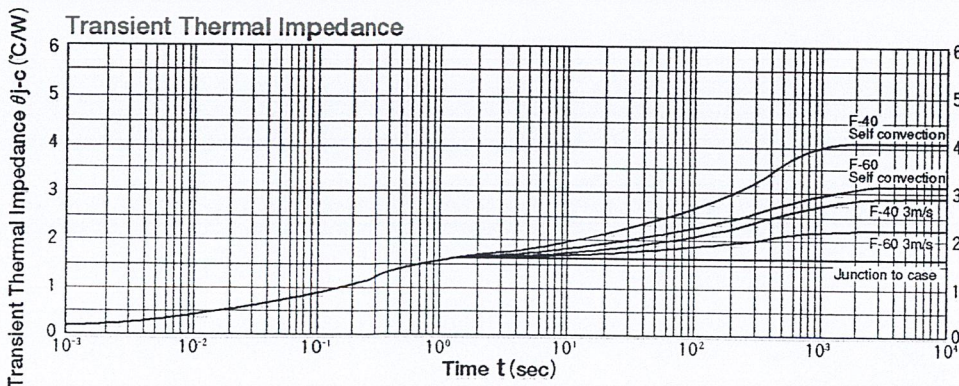
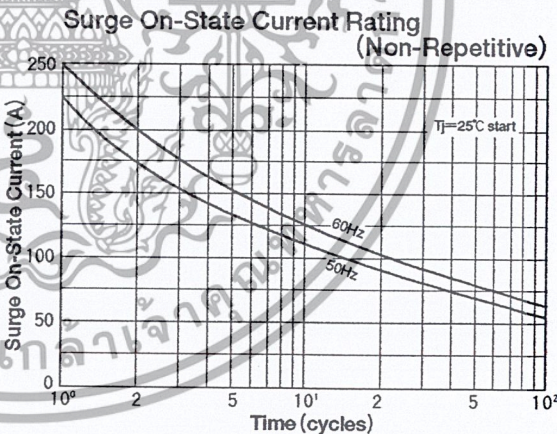
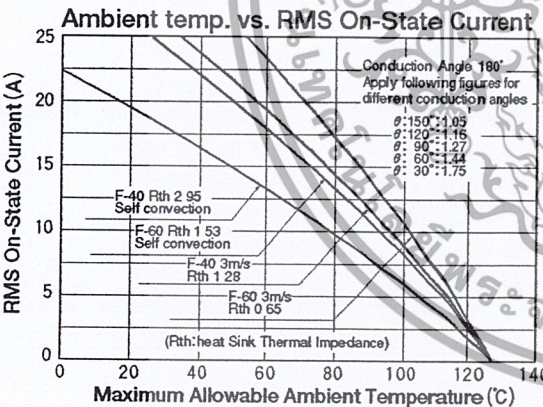
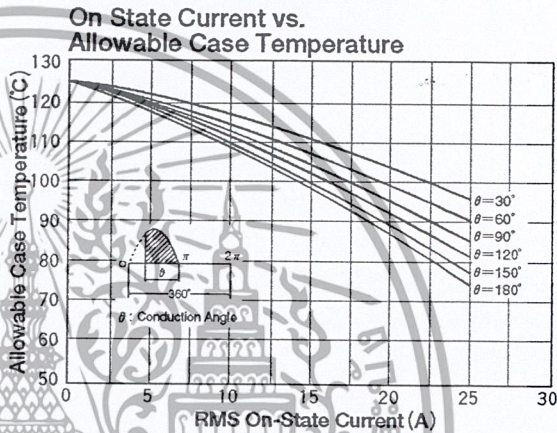
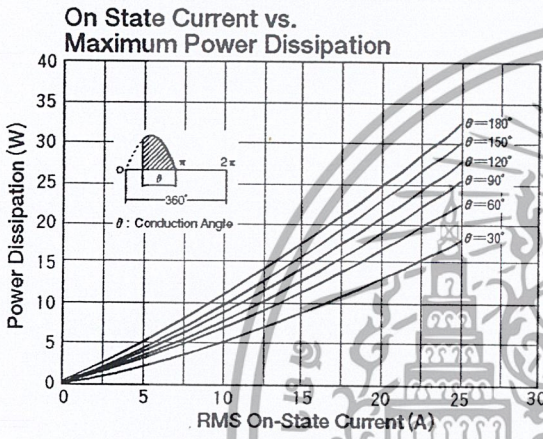
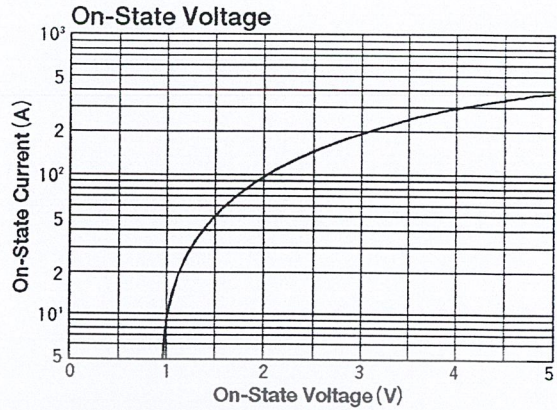
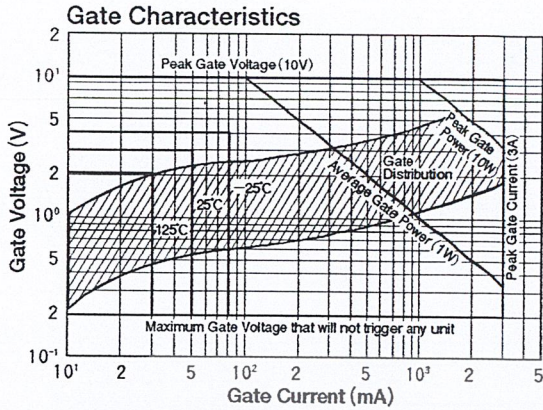
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

Data Sheet



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



MAXIM

+5V-Powered, Multi-Channel RS-232 Drivers/Receivers

General Description

The MAX220-MAX249 family of line drivers/receivers is intended for all EIA/TIA-232E and V.28/V.24 communications interfaces, and in particular, for those applications where $\pm 12V$ is not available.

These parts are particularly useful in battery-powered systems, since their low-power shutdown mode reduces power dissipation to less than $5\mu W$. The MAX225, MAX233, MAX235, and MAX245-MAX247 use no external components and are recommended for applications where printed circuit board space is critical.

Applications

Portable Computers
Low-Power Modems
Interface Translation
Battery-Powered RS-232 Systems
Multi-Drop RS-232 Networks

Features

Superior to Bipolar

- ◆ Operate from Single +5V Power Supply (+5V and +12V—MAX231/MAX239)
- ◆ Low-Power Receive Mode in Shutdown (MAX223/MAX242)
- ◆ Meet All EIA/TIA-232E and V.28 Specifications
- ◆ Multiple Drivers and Receivers
- ◆ 3-State Driver and Receiver Outputs
- ◆ Open-Line Detection (MAX243)

Ordering Information

PART	TEMP. RANGE	PIN-PACKAGE
MAX220CPE	0°C to +70°C	16 Plastic DIP
MAX220CSE	0°C to +70°C	16 Narrow SO
MAX220CWE	0°C to +70°C	16 Wide SO
MAX220C/D	0°C to +70°C	Dice*
MAX220EPE	-40°C to +85°C	16 Plastic DIP
MAX220ESE	-40°C to +85°C	16 Narrow SO
MAX220EWE	-40°C to +85°C	16 Wide SO
MAX220EJE	-40°C to +85°C	16 CERDIP
MAX220MJE	-55°C to +125°C	16 CERDIP

Ordering Information continued at end of data sheet.

*Contact factory for dice specifications.

Selection Table

Part Number	Power Supply (V)	No. of RS-232 Drivers/Rx	No. of Ext. Caps	Nominal Cap. Value (μF)	SHDN & Three-State	Rx Active in SHDN	Data Rate (kbps)	Features
MAX220	+5	2/2	4	4.7/10	No	✓	120	Ultra-low-power, industry-standard pinout
MAX222	+5	2/2	4	0.1	Yes	✓	200	Low-power shutdown
MAX223 (MAX213)	+5	4/5	4	1.0 (0.1)	Yes	✓	120	MAX241 + receivers active in shutdown
MAX225	+5	5/5	0	—	Yes	✓	120	Available in SO
MAX230 (MAX200)	+5	5/0	4	1.0 (0.1)	Yes	✓	120	5 drivers with shutdown
MAX231 (MAX201)	+5 and +7.5 to +13.2	2/2	2	1.0 (0.1)	No	✓	120	Standard +5/+12V or battery supplies; same functions as MAX232
MAX232 (MAX202)	+5	2/2	4	1.0 (0.1)	No	✓	120 (64)	Industry standard
MAX232A	+5	2/2	4	0.1	No	✓	200	Higher slew rate, small caps
MAX233 (MAX203)	+5	2/2	0	—	No	✓	120	No external caps
MAX233A	+5	2/2	0	—	No	✓	200	No external caps, high slew rate
MAX234 (MAX204)	+5	4/0	4	1.0 (0.1)	No	✓	120	Replaces 1488
MAX235 (MAX205)	+5	5/5	0	—	Yes	✓	120	No external caps
MAX236 (MAX206)	+5	4/3	4	1.0 (0.1)	Yes	✓	120	Shutdown, three state
MAX237 (MAX207)	+5	5/3	4	1.0 (0.1)	No	✓	120	Complements IBM PC serial port
MAX238 (MAX208)	+5	4/4	4	1.0 (0.1)	No	✓	120	Replaces 1488 and 1489
MAX239 (MAX209)	+5 and +7.5 to +13.2	3/5	2	1.0 (0.1)	No	✓	120	Standard +5/+12V or battery supplies; single-package solution for IBM PC serial port
MAX240	+5	5/5	4	1.0	Yes	✓	120	DIP or flatpack package
MAX241 (MAX211)	+5	4/5	4	1.0 (0.1)	Yes	✓	120	Complete IBM PC serial port
MAX242	+5	2/2	4	0.1	Yes	✓	200	Separate shutdown and enable
MAX243	+5	2/2	4	0.1	No	✓	200	Open-line detection simplifies cabling
MAX244	+5	8/10	4	1.0	No	✓	120	High slew rate
MAX245	+5	8/10	0	—	Yes	✓	120	High slew rate, int. caps, two shutdown modes
MAX246	+5	8/10	0	—	Yes	✓	120	High slew rate, int. caps, three shutdown modes
MAX247	+5	8/9	0	—	Yes	✓	120	High slew rate, int. caps, nine operating modes
MAX248	+5	8/8	4	1.0	Yes	✓	120	High slew rate, selective half-chip enables
MAX249	+5	6/10	4	1.0	Yes	✓	120	Available in quad flatpack package

MAXIM

Maxim Integrated Products 1

For free samples & the latest literature: <http://www.maxim-ic.com>, or phone 1-800-998-8800

MAX220-MAX249

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

+5V-Powered, Multi-Channel RS-232 Drivers/Receivers

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS—MAX220/222/232A/233A/242/243

Supply Voltage (Vcc).....	-0.3V to +6V	16-Pin Narrow SO (derate 8.70mW/°C above +70°C).....	696mW
Input Voltages		16-Pin Wide SO (derate 9.52mW/°C above +70°C).....	762mW
VIN.....	-0.3V to (Vcc - 0.3V)	18-Pin Wide SO (derate 9.52mW/°C above +70°C).....	762mW
FIN.....	±30V	20-Pin Wide SO (derate 10.00mW/°C above +70°C).....	800mW
TOUT (Note 1).....	±15V	20-Pin SSOP (derate 8.00mW/°C above +70°C).....	640mW
Output Voltages		16-Pin CERDIP (derate 10.00mW/°C above +70°C).....	800mW
VOUT.....	±15V	18-Pin CERDIP (derate 10.53mW/°C above +70°C).....	842mW
ROUT.....	-0.3V to (Vcc + 0.3V)		
Driver/Receiver Output Short Circuited to GND.....	Continuous	Operating Temperature Ranges	
Continuous Power Dissipation (TA = +70°C)		MAX2_AC_, MAX2_C_.....	0°C to +70°C
16-Pin Plastic DIP (derate 10.53mW/°C above +70°C).....	342mW	MAX2_AE_, MAX2_E_.....	-40°C to +85°C
18-Pin Plastic DIP (derate 11.11mW/°C above +70°C).....	889mW	MAX2_AM_, MAX2_M_.....	-55°C to +125°C
20-Pin Plastic DIP (derate 8.00mW/°C above +70°C).....	440mW	Storage Temperature Range.....	-65°C to +160°C
		Lead Temperature (soldering, 10sec).....	+300°C

Note 1: Input voltage measured with TOUT in high-impedance state, SHDN or Vcc = 0V.

Stresses beyond those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated in the operational sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS—MAX220/222/232A/233A/242/243

(Vcc = +5V ±10%, C1-C4 = 0.1µF, TA = TMIN to TMAX, unless otherwise noted.)

PARAMETER	CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNITS
RS-232 TRANSMITTERS						
Output Voltage Swing	All transmitter outputs loaded with 3kΩ to GND		±5	±8		V
Input Logic Threshold Low				1.4	0.8	V
Input Logic Threshold High			2	1.4		V
Logic Pull-Up/Input Current	Normal operation			5	40	µA
	SHDN = 0V, MAX222/242, shutdown			±0.01	±1	
Output Leakage Current	Vcc = 5.5V, SHDN = 0V, VOUT = ±15V, MAX222/242			±0.01	±10	µA
	Vcc = SHDN = 0V, VOUT = ±15V			±0.01	±10	
Data Rate	Except MAX220, normal operation			200	116	kbits/sec
	MAX220			22	20	
Transmitter Output Resistance	Vcc = V+ = V- = 0V, VOUT = ±2V		300	10M		Ω
Output Short-Circuit Current	VOUT = 0V		±7	±22		mA
RS-232 RECEIVERS						
RS-232 Input Voltage Operating Range					±30	V
RS-232 Input Threshold Low	Vcc = 5V	Except MAX243 R2IN	0.8	1.3		V
		MAX243 R2IN (Note 2)	-3			
RS-232 Input Threshold High	Vcc = 5V	Except MAX243 R2IN		1.8	2.4	V
		MAX243 R2IN (Note 2)		-0.5	-0.1	
RS-232 Input Hysteresis	Except MAX243, Vcc = 5V, no hyst. in shdn.		0.2	0.5	1	V
	MAX243			1		
RS-232 Input Resistance			3	5	7	kΩ
TTL/CMOS Output Voltage Low	IOUT = 3.2mA			0.2	0.4	V
TTL/CMOS Output Voltage High	IOUT = -1.0mA		3.5	Vcc - 0.2		V
TTL/CMOS Output Short-Circuit Current	Sourcing VOUT = GND		-2	-10		mA
	Shrinking VOUT = Vcc		10	30		
TTL/CMOS Output Leakage Current	SHDN = Vcc or EN = Vcc (SHDN = 0V for MAX222), 0V ≤ VOUT ≤ Vcc			±0.05	±10	µA

+5V-Powered, Multi-Channel RS-232 Drivers/Receivers

MAX220-MAX249

ELECTRICAL CHARACTERISTICS—MAX220/222/232A/233A/242/243 (continued)

(V_{CC} = +5V ±10%, C1-C4 = 0.1µF, T_A = T_{MIN} to T_{MAX}, unless otherwise noted.)

PARAMETER	CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNITS
EN Input Threshold Low	MAX242			1.4	0.8	V
EN Input Threshold High	MAX242		2.0	1.4		V
POWER SUPPLY						
Operating Supply Voltage			4.5		5.5	V
V _{CC} Supply Current (SHDN = V _{CC}), Figures 5, 6, 9, 19	No load	MAX220		0.5	2	mA
		MAX222/232A/233A/242/243		4	10	
	3kΩ load both inputs	MAX220		12		
		MAX222/232A/233A/242/243		15		
Shutdown Supply Current	MAX222/242	T _A = +25°C		0.1	10	µA
		T _A = 0° to +70°C		2	50	
		T _A = -40° to +85°C		2	50	
		T _A = -55° to +125°C		35	100	
SHDN Input Leakage Current	MAX222/242				±1	µA
SHDN Threshold Low	MAX222/242			1.4	0.8	V
SHDN Threshold High	MAX222/242		2.0	1.4		V
AC CHARACTERISTICS						
Transition Slew Rate	C _L = 50pF to 2500pF, R _L = 3kΩ to 7kΩ, V _{CC} = 5V, T _A = +25°C, measured from +3V to -3V or -3V to +3V	MAX222/232A/233A/242/243	6	12	30	V/µs
		MAX220	1.5	3	30	
Transmitter Propagation Delay TLL to RS-232 (normal operation), Figure 1	t _{PHLT}	MAX222/232A/233A/242/243		1.3	3.5	µs
		MAX220		4	10	
	t _{PLHT}	MAX222/232A/233A/242/243		1.5	3.5	µs
		MAX220		5	10	
Receiver Propagation Delay RS-232 to TLL (normal operation), Figure 2	t _{PHLR}	MAX222/232A/233A/242/243		0.5	1	µs
		MAX220		0.6	3	
	t _{PLHR}	MAX222/232A/233A/242/243		0.6	1	µs
		MAX220		0.8	3	
Receiver Propagation Delay RS-232 to TLL (shutdown), Figure 2	t _{PLHS}	MAX242		0.5	10	µs
	t _{PLHS}	MAX242		2.5	10	µs
Receiver-Output Enable Time, Figure 3	t _{ER}	MAX242		125	500	ns
Receiver-Output Disable Time, Figure 3	t _{DR}	MAX242		160	500	ns
Transmitter-Output Enable Time (SHDN goes high), Figure 4	t _{ET}	MAX222/242, 0.1µF caps (includes charge-pump start-up)		250		µs
Transmitter-Output Disable Time (SHDN goes low), Figure 4	t _{DT}	MAX222/242, 0.1µF caps		600		ns
Transmitter + to - Propagation Delay Difference (normal operation)	t _{PHLT} - t _{PLHT}	MAX222/232A/233A/242/243		300		ns
		MAX220		2000		
Receiver + to - Propagation Delay Difference (normal operation)	t _{PHLR} - t _{PLHR}	MAX222/232A/233A/242/243		100		ns
		MAX220		225		

Note 2: MAX243 R_{2OUT} is guaranteed to be low when R_{2IN} is ≥ 0V or is floating.

MAXIM

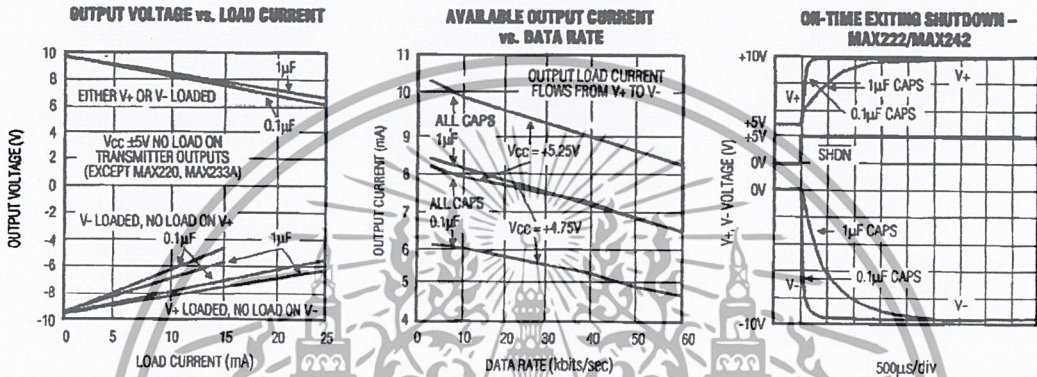
3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

+5V-Powered, Multi-Channel RS-232 Drivers/Receivers

Typical Operating Characteristics

MAX220/MAX222/MAX232A/MAX233A/MAX242/MAX243



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

+5V-Powered, Multi-Channel RS-232 Drivers/Receivers

MAX220-MAX249

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS—MAX223/MAX230-MAX241

V _{CC}	-0.3V to +6V	20-Pin Wide SO (derate 10.00mW/°C above +70°C).....	800mW
V ₊	(V _{CC} - 0.3V) to +14V	24-Pin Wide SO (derate 11.76mW/°C above +70°C).....	941mW
V ₋	+0.3V to -14V	28-Pin Wide SO (derate 12.50mW/°C above +70°C).....	1W
Input Voltages		44-Pin Plastic FP (derate 11.11 mW/°C above +70°C).....	889mW
T _{IN}	-0.3V to (V _{CC} + 0.3V)	14-Pin CERDIP (derate 9.09mW/°C above +70°C).....	727mW
R _{IN}	±30V	16-Pin CERDIP (derate 10.00mW/°C above +70°C).....	800mW
Output Voltages		20-Pin CERDIP (derate 11.11mW/°C above +70°C).....	889mW
T _{OUT}	(V ₊ + 0.3V) to (V ₋ - 0.3V)	24-Pin Narrow CERDIP	
R _{OUT}	-0.3V to (V _{CC} + 0.3V)	(derate 12.50mW/°C above +70°C).....	1W
Short-Circuit Duration, T _{OUT}	Continuous	24-Pin Sidebrazed (derate 20.0mW/°C above +70°C).....	1.6W
Continuous Power Dissipation (T _A = +70°C)		28-Pin SSOP (derate 9.52mW/°C above +70°C).....	762mW
14-Pin Plastic DIP (derate 10.00mW/°C above +70°C).....		Operating Temperature Ranges	
16-Pin Plastic DIP (derate 10.53mW/°C above +70°C).....		MAX2...C.....	0°C to +70°C
20-Pin Plastic DIP (derate 11.11 mW/°C above +70°C).....		MAX2...E.....	40°C to +85°C
24-Pin Narrow Plastic DIP		MAX2...M.....	-55°C to +125°C
(derate 13.33mW/°C above +70°C).....		Storage Temperature Range.....	-65°C to +160°C
1.07W		Lead Temperature (soldering, 10sec).....	+300°C
24-Pin Plastic DIP (derate 9.09mW/°C above +70°C).....			
500mW			
16-Pin Wide SO (derate 9.52mW/°C above +70°C).....			
762mW			

Stresses beyond those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated in the operational sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS—MAX223/MAX230-MAX241

(MAX223/230/232/234/236/237/238/240/241 V_{CC} = +5V ±10%, MAX233/MAX235 V_{CC} = 5V ±5%, C1-C4 = 1.0µF MAX231/MAX239 V_{CC} = 5V ±10%, V₊ = 7.5V to 13.2V, T_A = T_{MIN} to T_{MAX}, unless otherwise noted.)

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Output Voltage Swing	All transmitter outputs loaded with 3kΩ to ground	±5.0	±7.3		V
V _{CC} Power-Supply Current	No load, T _A = +25°C	MAX232/233	5	10	mA
		MAX223/230/234-238/240/241	7	15	
		MAX231/239	.4	.7	
V ₊ Power-Supply Current	T _A = +25°C	MAX231	1.8	5	mA
		MAX239	5	15	
Shutdown Supply Current	T _A = +25°C	MAX223	15	50	µA
		MAX230/235/236/240/241	1	10	
Input Logic Threshold Low	T _{IN} ; EN, SHDN (MAX223), EN, SHDN (MAX230/235-241)			0.8	V
Input Logic Threshold High	T _{IN}	2.0			V
	EN, SHDN (MAX223), EN, SHDN (MAX230/235/236/240/241)	2.4			
Logic Pull-Up Current	T _{IN} = 0V		1.5	200	µA
Receiver Input Voltage Operating Range		-30		30	V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

+5V-Powered, Multi-Channel RS-232 Drivers/Receivers

ELECTRICAL CHARACTERISTICS—MAX223/MAX230-MAX241 (continued)

(MAX223/230/232/234/236/237/238/240/241 $V_{CC} = +5V \pm 10\%$, MAX233/MAX235 $V_{CC} = 5V \pm 5\%$, C1-C4 = 1.0 μ F; MAX231/MAX239 $V_{CC} = 5V \pm 10\%$, $V_+ = 7.5V$ to 13.2V, $T_A = T_{MIN}$ to T_{MAX} , unless otherwise noted.)

PARAMETER	CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNITS
RS-232 Input Threshold Low	$T_A = +25^\circ\text{C}$, $V_{CC} = 5V$	Normal operation SHDN = 5V (MAX223) SHDN = 0V (MAX235/236/240/241)	0.8	1.2		V
		Shutdown (MAX223) SHDN = 0V, EN = 5V (R4IN, R5IN)	0.6	1.5		
RS-232 Input Threshold High	$T_A = +25^\circ\text{C}$, $V_{CC} = 5V$	Normal operation SHDN = 5V (MAX223) SHDN = 0V (MAX235/236/240/241)		1.7	2.4	V
		Shutdown (MAX223) SHDN = 0V, EN = 5V (R4IN, R5IN)		1.5	2.4	
RS-232 Input Hysteresis	$V_{CC} = 5V$; no hysteresis in shutdown		0.2	0.5	1.0	V
RS-232 Input Resistance	$T_A = +25^\circ\text{C}$, $V_{CC} = 5V$		3	5	7	k Ω
TTL/CMOS Output Voltage Low	$I_{OUT} = 1.6\text{mA}$ (MAX231-233) $I_{OUT} = 3.2\text{mA}$				0.4	V
TTL/CMOS Output Voltage High	$I_{OUT} = -1\text{mA}$		3.5	$V_{CC} - 0.4$		V
TTL/CMOS Output Leakage Current	0V \leq $I_{OUT} \leq V_{CC}$; EN = 0V (MAX223); EN = V_{CC} (MAX235-241)			0.05	± 10	μA
Receiver Output Enable Time	Normal operation	MAX223		600		ns
		MAX235/236/239/240/241		400		
Receiver Output Disable Time	Normal operation	MAX223		900		ns
		MAX235/236/239/240/241		250		
Propagation Delay	RS-232 IN to TTL/CMOS OUT; $C_L = 150\text{pF}$	Normal operation		0.5	10	μs
		SHDN = 0V (MAX223)	I _{PLHS}	4	40	
Transition Region Slew Rate	MAX223/MAX230/MAX234-241 $T_A = +25^\circ\text{C}$, $V_{CC} = 5V$, $R_L = 3\text{k}\Omega$ to 7k Ω , $C_L = 50\text{pF}$ to 2500pF, measured from +3V to -3V or -3V to +3V		3	5.1	30	V/ μs
	MAX231/MAX232/MAX233 $T_A = +25^\circ\text{C}$, $V_{CC} = 5V$, $R_L = 3\text{k}\Omega$ to 7k Ω , $C_L = 50\text{pF}$ to 2500pF, measured from +3V to -3V or -3V to +3V			4	30	
Transmitter Output Resistance	$V_{CC} = V_+ = V_- = 0V$, $V_{OUT} = \pm 2V$		300			Ω
Transmitter Out Short-Circuit Current				± 10		mA

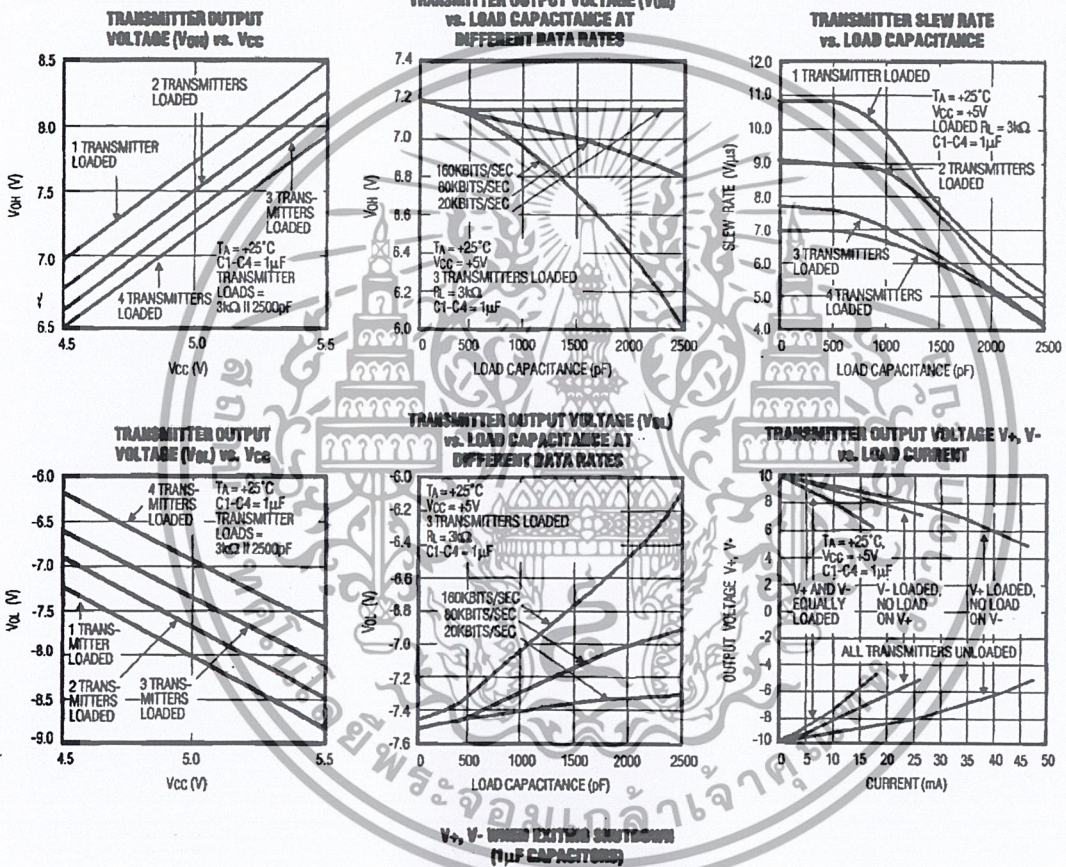
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

+5V-Powered, Multi-Channel RS-232 Drivers/Receivers

Typical Operating Characteristics

MAX220-MAX249

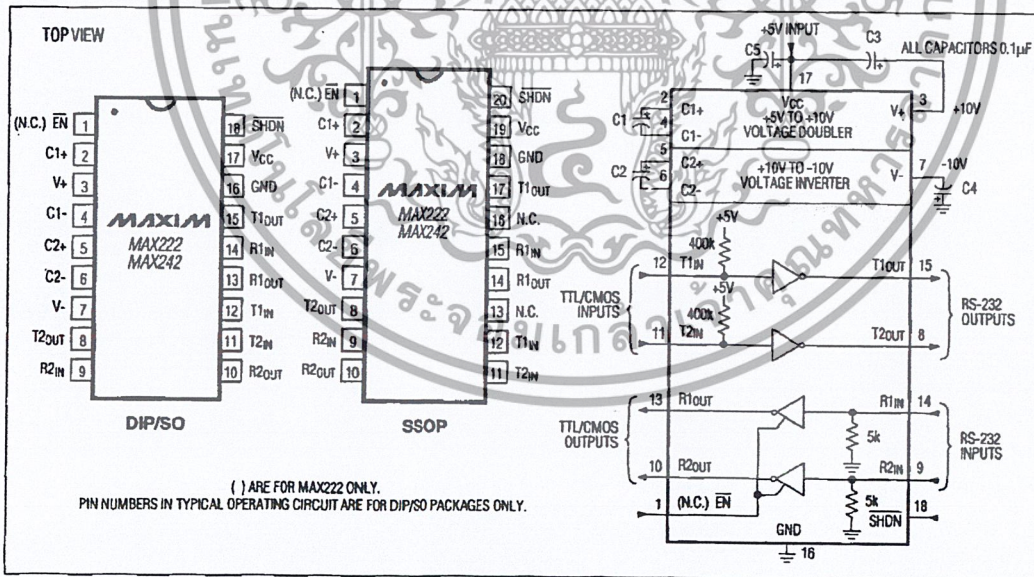
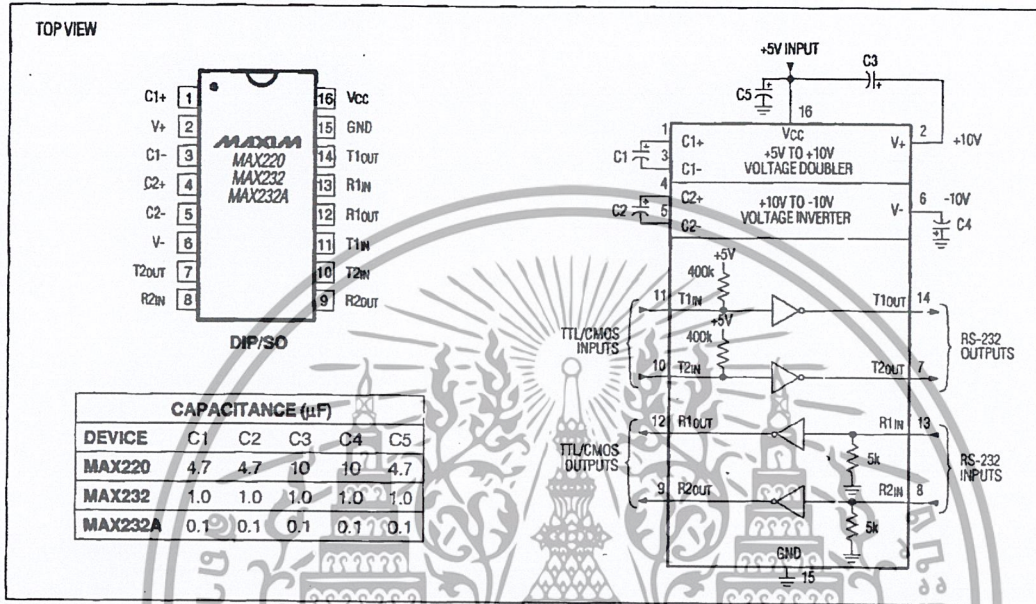
MAX223/MAX230-MAX241



*SHUTDOWN POLARITY IS REVERSED FOR THE MAX241

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

+5V-Powered, Multi-Channel RS-232 Drivers/Receivers



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DALLAS
SEMICONDUCTOR

DS1820 1-Wire™ Digital Thermometer

FEATURES

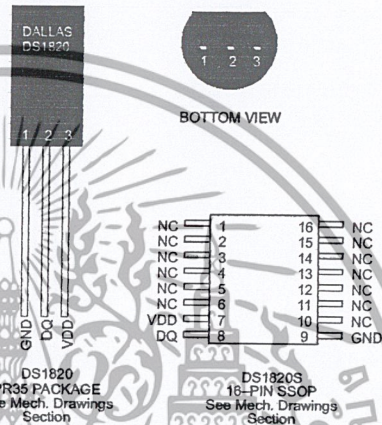
- Unique 1-Wire™ interface requires only one port pin for communication
- Multidrop capability simplifies distributed temperature sensing applications
- Requires no external components
- Can be powered from data line
- Zero standby power required
- Measures temperatures from -55°C to $+125^{\circ}\text{C}$ in 0.5°C increments. Fahrenheit equivalent is -67°F to $+257^{\circ}\text{F}$ in 0.9°F increments
- Temperature is read as a 9-bit digital value.
- Converts temperature to digital word in 200 ms (typ.)
- User-definable, nonvolatile temperature alarm settings
- Alarm search command identifies and addresses devices whose temperature is outside of programmed limits (temperature alarm condition)
- Applications include thermostatic controls, industrial systems, consumer products, thermometers, or any thermally sensitive system

DESCRIPTION

The DS1820 Digital Thermometer provides 9-bit temperature readings which indicate the temperature of the device.

Information is sent to/from the DS1820 over a 1-Wire interface, so that only one wire (and ground) needs to be connected from a central microprocessor to a DS1820. Power for reading, writing, and performing temperature conversions can be derived from the data line itself with no need for an external power source.

PIN ASSIGNMENT



PIN DESCRIPTION

GND	—	Ground
DQ	—	Data In/Out
V _{DD}	—	Optional V _{DD}
NC	—	No Connect

Because each DS1820 contains a unique silicon serial number, multiple DS1820s can exist on the same 1-Wire bus. This allows for placing temperature sensors in many different places. Applications where this feature is useful include HVAC environmental controls, sensing temperatures inside buildings, equipment or machinery, and in process monitoring and control.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DETAILED PIN DESCRIPTION

PIN 16-PIN SSOP	PIN PR35	SYMBOL	DESCRIPTION
9	1	GND	Ground.
8	2	DQ	Data Input/Output pin. For 1-Wire operation: Open drain. (See "Parasite Power" section.)
7	3	V _{DD}	Optional V _{DD} pin. See "Parasite Power" section for details of connection.

DS1820S (16-pin SSOP): All pins not specified in this table are not to be connected.

OVERVIEW

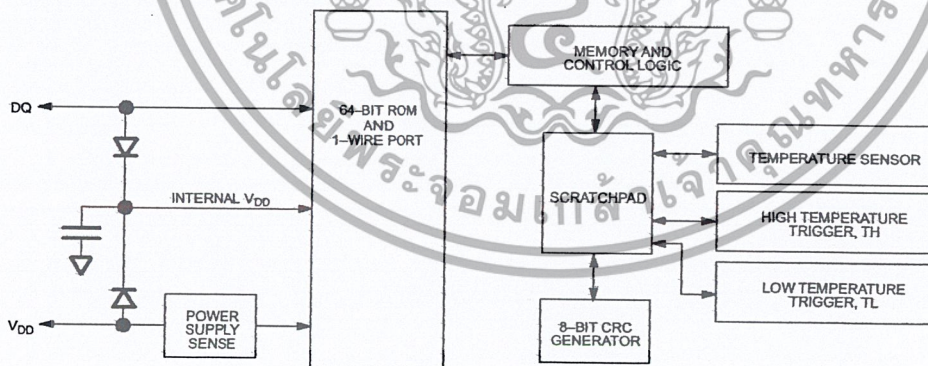
The block diagram of Figure 1 shows the major components of the DS1820. The DS1820 has three main data components: 1) 64-bit lasered ROM, 2) temperature sensor, and 3) nonvolatile temperature alarm triggers TH and TL. The device derives its power from the 1-Wire communication line by storing energy on an internal capacitor during periods of time when the signal line is high and continues to operate off this power source during the low times of the 1-Wire line until it returns high to replenish the parasite (capacitor) supply. As an alternative, the DS1820 may also be powered from an external 5 volts supply.

Communication to the DS1820 is via a 1-Wire port. With the 1-Wire port, the memory and control functions will not be available before the ROM function protocol has been established. The master must first provide one of five ROM function commands: 1) Read ROM, 2) Match ROM, 3) Search ROM, 4) Skip ROM, or 5) Alarm Search. These commands operate on the 64-bit lasered ROM portion of each device and can single out

a specific device if many are present on the 1-Wire line as well as indicate to the Bus Master how many and what types of devices are present. After a ROM function sequence has been successfully executed, the memory and control functions are accessible and the master may then provide any one of the six memory and control function commands.

One control function command instructs the DS1820 to perform a temperature measurement. The result of this measurement will be placed in the DS1820's scratchpad memory, and may be read by issuing a memory function command which reads the contents of the scratchpad memory. The temperature alarm triggers TH and TL consist of one byte EEPROM each. If the alarm search command is not applied to the DS1820, these registers may be used as general purpose user memory. Writing TH and TL is done using a memory function command. Read access to these registers is through the scratchpad. All data is read and written least significant bit first.

DS1820 BLOCK DIAGRAM Figure 1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PARASITE POWER

The block diagram (Figure 1) shows the parasite powered circuitry. This circuitry "steals" power whenever the I/O or V_{DD} pins are high. I/O will provide sufficient power as long as the specified timing and voltage requirements are met (see the section titled "1-Wire Bus System"). The advantages of parasite power are two-fold: 1) by parasiting off this pin, no local power source is needed for remote sensing of temperature, and 2) the ROM may be read in absence of normal power.

In order for the DS1820 to be able to perform accurate temperature conversions, sufficient power must be provided over the I/O line when a temperature conversion is taking place. Since the operating current of the DS1820 is up to 1 mA, the I/O line will not have sufficient drive due to the 5K pull-up resistor. This problem is particularly acute if several DS1820's are on the same I/O and attempting to convert simultaneously.

There are two ways to assure that the DS1820 has sufficient supply current during its active conversion cycle. The first is to provide a strong pull-up on the I/O line whenever temperature conversions or copies to the E^2 memory are taking place. This may be accomplished by using a MOSFET to pull the I/O line directly to the power supply as shown in Figure 2. The I/O line must be switched over to the strong pull-up within 10 μ s maximum after issuing any protocol that involves copying to the E^2 memory or initiates temperature conversions. When using the parasite power mode, the V_{DD} pin must be tied to ground.

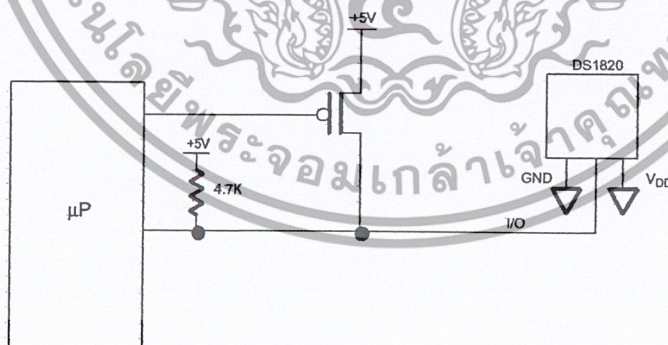
Another method of supplying current to the DS1820 is through the use of an external power supply tied to the

V_{DD} pin, as shown in Figure 3. The advantage to this is that the strong pull-up is not required on the I/O line, and the bus master need not be tied up holding that line high during temperature conversions. This allows other data traffic on the 1-Wire bus during the conversion time. In addition, any number of DS1820's may be placed on the 1-Wire bus, and if they all use external power, they may all simultaneously perform temperature conversions by issuing the Skip ROM command and then issuing the Convert T command. Note that as long as the external power supply is active, the GND pin may not be floating.

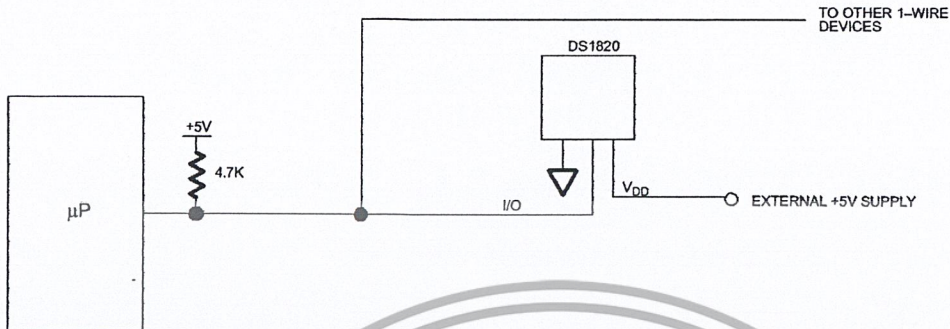
The use of parasite power is not recommended above 100°C, since it may not be able to sustain communications given the higher leakage currents the DS1820 exhibits at these temperatures. For applications in which such temperatures are likely, it is strongly recommended that V_{DD} be applied to the DS1820.

For situations where the bus master does not know whether the DS1820's on the bus are parasite powered or supplied with external V_{DD} , a provision is made in the DS1820 to signal the power supply scheme used. The bus master can determine if any DS1820's are on the bus which require the strong pull-up by sending a Skip ROM protocol, then issuing the read power supply command. After this command is issued, the master then issues read time slots. The DS1820 will send back "0" on the 1-Wire bus if it is parasite powered; it will send back a "1" if it is powered from the V_{DD} pin. If the master receives a "0", it knows that it must supply the strong pull-up on the I/O line during temperature conversions. See "Memory Command Functions" section for more detail on this command protocol.

STRONG PULL-UP FOR SUPPLYING DS1820 DURING TEMPERATURE CONVERSION Figure 2



USING V_{DD} TO SUPPLY TEMPERATURE CONVERSION CURRENT Figure 3



OPERATION – MEASURING TEMPERATURE

The DS1820 measures temperature through the use of an on-board proprietary temperature measurement technique. A block diagram of the temperature measurement circuitry is shown in Figure 4.

The DS1820 measures temperature by counting the number of clock cycles that an oscillator with a low temperature coefficient goes through during a gate period determined by a high temperature coefficient oscillator. The counter is preset with a base count that corresponds to -55°C . If the counter reaches zero before the gate period is over, the temperature register, which is also preset to the -55°C value, is incremented, indicating that the temperature is higher than -55°C .

At the same time, the counter is then preset with a value determined by the slope accumulator circuitry. This circuitry is needed to compensate for the parabolic behavior of the oscillators over temperature. The counter is then clocked again until it reaches zero. If the gate period is still not finished, then this process repeats.

The slope accumulator is used to compensate for the non-linear behavior of the oscillators over temperature, yielding a high resolution temperature measurement. This is done by changing the number of counts necessary for the counter to go through for each incremental degree in temperature. To obtain the desired resolution, therefore, both the value of the counter and the number of counts per degree C (the value of the slope accumulator) at a given temperature must be known.

Internally, this calculation is done inside the DS1820 to provide 0.5°C resolution. The temperature reading is

provided in a 16-bit, sign-extended two's complement reading. Table 1 describes the exact relationship of output data to measured temperature. The data is transmitted serially over the 1-Wire interface. The DS1820 can measure temperature over the range of -55°C to $+125^{\circ}\text{C}$ in 0.5°C increments. For Fahrenheit usage, a lookup table or conversion factor must be used.

Note that temperature is represented in the DS1820 in terms of a $1/2^{\circ}\text{C}$ LSB, yielding the following 9-bit format:

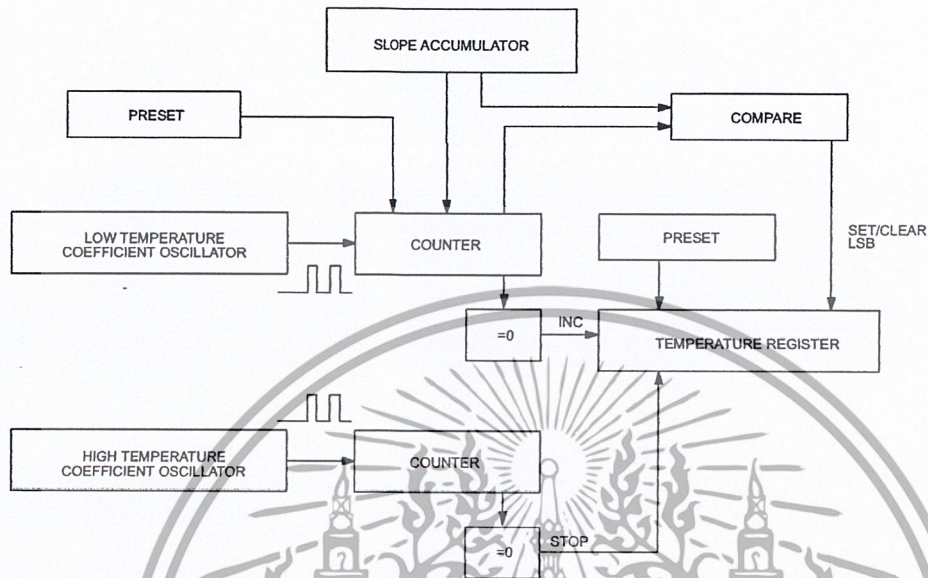


The most significant (sign) bit is duplicated into all of the bits in the upper MSB of the two-byte temperature register in memory. This "sign-extension" yields the 16-bit temperature readings as shown in Table 1.

Higher resolutions may be obtained by the following procedure. First, read the temperature, and truncate the 0.5°C bit (the LSB) from the read value. This value is TEMP_READ. The value left in the counter may then be read. This value is the count remaining (COUNT_REMAIN) after the gate period has ceased. The last value needed is the number of counts per degree C (COUNT_PER_C) at that temperature. The actual temperature may be then be calculated by the user using the following:

$$\text{TEMPERATURE} = \text{TEMP_READ} - 0.25 + \frac{(\text{COUNT_PER_C} - \text{COUNT_REMAIN})}{\text{COUNT_PER_C}}$$

TEMPERATURE MEASURING CIRCUITRY Figure 4



TEMPERATURE/DATA RELATIONSHIPS Table 1

TEMPERATURE	DIGITAL OUTPUT (Binary)	DIGITAL OUTPUT (Hex)
+125°C	00000000 11111010	00FA
+25°C	00000000 00110010	0032h
+1/2°C	00000000 00000001	0001h
+0°C	00000000 00000000	0000h
-1/2°C	11111111 11111111	FFFFh
-25°C	11111111 11001110	FFCEh
-55°C	11111111 10010010	FF92h

OPERATION – ALARM SIGNALING

After the DS1820 has performed a temperature conversion, the temperature value is compared to the trigger values stored in TH and TL. Since these registers are 8-bit only, the 0.5°C bit is ignored for comparison. The most significant bit of TH or TL directly corresponds to the sign bit of the 16-bit temperature register. If the result of a temperature measurement is higher than TH or lower than TL, an alarm flag inside the device is set.

This flag is updated with every temperature measurement. As long as the alarm flag is set, the DS1820 will respond to the alarm search command. This allows many DS1820s to be connected in parallel doing simultaneous temperature measurements. If somewhere the temperature exceeds the limits, the alarming device(s) can be identified and read immediately without having to read non-alarming devices.

64-BIT LASERED ROM

Each DS1820 contains a unique ROM code that is 64-bits long. The first eight bits are a 1-Wire family code (DS1820 code is 10h). The next 48 bits are a unique serial number. The last eight bits are a CRC of the first 56 bits. (See Figure 5.) The 64-bit ROM and ROM Function Control section allow the DS1820 to operate as a 1-Wire device and follow the 1-Wire protocol detailed in the section "1-Wire Bus System". The functions required to control sections of the DS1820 are not accessible until the ROM function protocol has been satisfied. This protocol is described in the ROM function protocol flowchart (Figure 6). The 1-Wire bus master must first provide one of five ROM function commands: 1) Read ROM, 2) Match ROM, 3) Search ROM, 4) Skip ROM, or 5) Alarm Search. After a ROM functions sequence has been successfully executed, the functions specific to the DS1820 are accessible and the bus master may then provide and one of the six memory and control function commands.

CRC GENERATION

The DS1820 has an 8-bit CRC stored in the most significant byte of the 64-bit ROM. The bus master can compute a CRC value from the first 56-bits of the 64-bit ROM and compare it to the value stored within the DS1820 to determine if the ROM data has been received error-free by the bus master. The equivalent polynomial function of this CRC is:

$$CRC = X^8 + X^5 + X^4 + 1$$

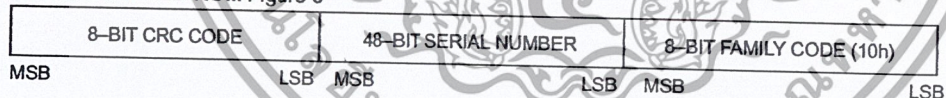
The DS1820 also generates an 8-bit CRC value using the same polynomial function shown above and pro-

vides this value to the bus master to validate the transfer of data bytes. In each case where a CRC is used for data transfer validation, the bus master must calculate a CRC value using the polynomial function given above and compare the calculated value to either the 8-bit CRC value stored in the 64-bit ROM portion of the DS1820 (for ROM reads) or the 8-bit CRC value computed within the DS1820 (which is read as a ninth byte when the scratchpad is read). The comparison of CRC values and decision to continue with an operation are determined entirely by the bus master. There is no circuitry inside the DS1820 that prevents a command sequence from proceeding if the CRC stored in or calculated by the DS1820 does not match the value generated by the bus master.

The 1-Wire CRC can be generated using a polynomial generator consisting of a shift register and XOR gates as shown in Figure 7. Additional information about the Dallas 1-Wire Cyclic Redundancy Check is available in Application Note 27 entitled "Understanding and Using Cyclic Redundancy Checks with Dallas Semiconductor Touch Memory Products".

The shift register bits are initialized to zero. Then starting with the least significant bit of the family code, one bit at a time is shifted in. After the 8th bit of the family code has been entered, then the serial number is entered. After the 48th bit of the serial number has been entered, the shift register contains the CRC value. Shifting in the eight bits of CRC should return the shift register to all zeros.

64-BIT LASERED ROM Figure 5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS*

Voltage on Any Pin Relative to Ground	-0.5V to +7.0V
Operating Temperature	-55°C to +125°C
Storage Temperature	-55°C to +125°C
Soldering Temperature	260°C for 10 seconds

* This is a stress rating only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operation sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods of time may affect reliability.

RECOMMENDED DC OPERATING CONDITIONS

PARAMETER	SYMBOL	CONDITION	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
Supply Voltage	V _{DD}	I/O Functions	2.8	5.0	5.5	V	1, 2
		±1/2°C Accurate Temperature Conversions	4.3		5.5		
Data Pin	I/O		-0.5		+5.5	V	2
Logic 1	V _{IH}		2.0		V _{CC} +0.3	V	2, 3
Logic 0	V _{IL}		-0.3		+0.8	V	2, 4

DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS(-55°C to +125°C; V_{DD}=3.6V to 5.5V)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITION	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
Thermometer Error	t _{ERR}	-0°C to +70°C			±1/2	°C	1, 9, 10
		-55°C to 0°C and +70°C to +125°C			See Typical Curve		
Input Logic High	V _{IH}		2.2		5.5	V	2, 3
Input Logic Low	V _{IL}		-0.3		+0.8	V	2, 4
Sink Current	i _L	V _{I/O} =0.4V	-4.0			mA	2
Standby Current	I _Q			200	350	nA	8
Active Current	I _{DD}			1	1.5	mA	5, 6
Input Load Current	i _L			5		μA	7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้